

물리학 통합 마스터 레퍼런스

고전역학에서 양자역학까지

수식 중심 한국어 PDF

전자기학 마스터 레퍼런스 문서 형식 기반 재조판

대학 - 대학원 / 연구원 수준 통합 물리 레퍼런스
2026년 7월 7일

전체 페이지: 1 - 2024, 단일 조판 규칙, 중간 병합 표식 없음

이 문서의 범위와 사용법

이 PDF는 물리학 전공자와 전자공학 전공자가 고전역학, 열역학/통계역학, 유체역학, 광학, 전자기학, 상대성이론, 양자역학을 한 번에 조망할 수 있도록 만든 수식 중심 연구 레퍼런스이다. 목표는 모든 교재를 대체하는 것이 아니라, 대학 수준에서 대학원·연구원 수준으로 넘어갈 때 반복해서 등장하는 공식, 구조, 조건, 계산법을 하나의 문서 안에 압축하는 것이다.

기존 통합본의 앞쪽 카드식 반복 구성을 제거하고, 전자기학 마스터 레퍼런스의 글꼴, 여백, Part/Chapter 흐름, 목차 분위기, 수식 카드와 자가 점검 문체를 기준으로 다시 조판했다. 전자기학과 양자역학도 뒤에 붙인 별도 모듈처럼 보이지 않게 같은 문서 체계 안으로 녹였다.

핵심. 읽는 순서: (1) 식을 외우기 전에 단위와 작은 매개변수를 확인한다. (2) 경계값 문제, 초기값 문제, 고유값 문제 중 어느 유형인지 판별한다. (3) 보존량, 대칭성, 응답함수, Green 함수 중 어떤 구조가 쓰이는지 표시한다. (4) 연구 수준에서는 근사 조건, 실험 observable, 수치 안정성, 극한 계산을 함께 본다.

자가 점검. 각 장 마지막의 질문은 답을 바로 보려는 장치가 아니라, 내가 한 줄로 설명할 수 있는지 확인하는 체크포인트다. 전자공학 전공자는 회로, 신호, 전송선, 안테나, 광학, 반도체, 양자정보와 연결해서 읽으면 좋다.

Contents

이 문서의 범위와 사용법.....	2
Contents	3
공통 수학 도구.....	11
고전역학	119
열역학/통계역학.....	228
유체역학	349
광학	464
전자기학	561
상대성이론.....	868
양자역학	971
전자기학/양자역학 접점	1272
통합 연구 도구	1345
핵심 수식 아틀라스.....	1376
대표 유도 아틀라스.....	1603
연구 문제와 논문 읽기 체크	1784
학습 체크리스트와 반복 훈련	1935
학습 체크리스트.....	1936

Contents

공통 수학 도구.....	11
001. 차원분석과 스케일링.....	12
002. 벡터해석과 적분정리.....	17
003. 텐서와 Einstein 합 규약.....	23
004. 분포와 Dirac 델타.....	29
005. Fourier와 Laplace 변환.....	35
006. Green 함수의 공통 구조.....	41
007. 변분 원리.....	47
008. Noether 정리.....	53
009. 고유값과 정상모드.....	59
010. Hermitian, unitary, symplectic 구조.....	65
011. PDE 분류와 특성곡선.....	71
012. 점근해석과 stationary phase.....	77
013. 섭동론의 공통 뼈대.....	83
014. 경계층과 matched asymptotics.....	89
015. 확률, cumulant, 잡음.....	95
016. 상관함수와 response.....	101
017. 안정성 분석과 Lyapunov 지수.....	107
018. Lie 군과 Lie 대수.....	113
고전역학.....	119
019. Newton 방정식과 운동량 보존.....	120
020. 일-에너지 정리.....	126
021. 중심력과 유효 퍼텐셜.....	132
022. Kepler 문제와 궤도 요소.....	138
023. 조화진동자와 정상모드.....	144
024. 감쇠와 구동 진동.....	150
025. Lagrange 역학.....	156
026. Hamilton 역학과 위상공간.....	162
027. Poisson bracket과 정준변환.....	168
028. Hamilton-Jacobi 이론.....	174
029. 작용-각 변수.....	180
030. 강체와 Euler 방정식.....	186
031. 비관성계와 회전좌표계.....	192
032. 비선형 동역학과 chaos.....	198
033. Lagrange multiplier와 제약.....	204
034. 연속체와 탄성파.....	210
035. 충돌과 산란의 고전 공식.....	216
036. Symplectic integrator와 검산.....	222

Contents

열역학/통계역학.....	228
037. 열역학 제1법칙.....	229
038. 엔트로피와 제2법칙.....	235
039. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환.....	241
040. Maxwell 관계.....	247
041. 상평형과 Clapeyron 방정식.....	253
042. Microcanonical ensemble.....	259
043. Canonical ensemble.....	265
044. Grand canonical ensemble.....	271
045. 이상기체와 equipartition.....	277
046. Bose/Fermi 분포.....	283
047. Blackbody와 Debye 모형.....	289
048. Virial 전개와 실제기체.....	295
049. Landau 평균장과 상전이.....	301
050. Ising 모형과 mean field.....	307
051. Critical scaling과 RG.....	313
052. Boltzmann 방정식.....	319
053. Langevin과 Fokker-Planck.....	325
054. Kubo와 fluctuation-dissipation.....	331
055. Jarzynski와 비평형 일.....	337
056. 정보와 열역학.....	343
유체역학.....	349
057. 연속체 가정과 물질미분.....	350
058. 질량보존과 연속방정식.....	356
059. Cauchy 응력과 운동량 보존.....	362
060. Navier-Stokes 방정식.....	368
061. Euler 방정식과 Bernoulli.....	374
062. Vorticity와 Kelvin 정리.....	380
063. Stokes 유동과 low Re.....	386
064. 경계층과 Blasius.....	392
065. Poiseuille와 pipe flow.....	398
066. Lubrication 근사.....	404
067. 표면장력과 capillary 현상.....	410
068. 압축성 Euler와 Mach 수.....	416
069. 충격파와 Rankine-Hugoniot.....	422
070. 난류와 Kolmogorov scaling.....	428
071. RANS와 closure 문제.....	434
072. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld.....	440

Contents

광학	464
076. Fermat 원리와 eikonal	465
077. ABCD 행렬과 Gaussian optics	471
078. 렌즈 공식과 수차	477
079. Jones 벡터와 Stokes 파라미터	483
080. Fresnel 계수와 경계조건	489
081. 다층막 transfer matrix	495
082. Fraunhofer 회절	501
083. Fresnel 회절과 near field	507
084. PSF, OTF, 해상도	513
085. Coherence와 Van Cittert-Zernike	519
086. Fabry-Perot와 laser cavity	525
087. Gaussian beam	531
088. Optical fiber와 waveguide	537
089. 비선형 편광과 phase matching	543
090. NLSE와 soliton	549
091. Photonic crystal과 위상광학	555
전자기학	561
092. Maxwell 방정식의 네 줄	562
093. 전하보존과 게이지 구조	568
094. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙	574
095. Poisson/Laplace 방정식	580
096. 유일성 정리와 에너지 방법	586
097. 영상법	592
098. 다중극 전개	598
099. 정전기 에너지와 정전용량	604
100. 유전체와 분극	610
101. 국소장과 Clausius-Mossotti	616
102. Biot-Savart와 Ampere 법칙	622
103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지	628
104. 자기쌍극자와 자성체	634
105. Faraday 유도와 준정적 근사	640
106. 피부효과와 전하완화	646
107. Poynting 정리와 응력텐서	652
108. 지연 퍼텐셜	658
109. 평면파와 편파	664
110. Stokes 파라미터와 편광	670
111. Fresnel 계수와 경계조건	676

Contents

상대성이론.....	868
143. Lorentz 변환과 시공간 간격	869
144. 4-벡터와 에너지-운동량	875
145. 상대론적 action과 고유시간	881
146. 전자기장 텐서와 불변량	887
147. 상대론적 Doppler와 aberration	893
148. 등가원리와 계량	899
149. 공변미분과 Christoffel 기호	905
150. Geodesic 방정식	911
151. 곡률 텐서	917
152. Einstein 방정식	923
153. Stress-energy tensor	929
154. Schwarzschild 해	935
155. 약장 근사와 중력파	941
156. Kerr와 회전 블랙홀	947
157. FLRW 우주론	953
158. 블랙홀 열역학	959
159. 상대론적 유체와 보존법칙	965
양자역학	971
160. 상태와 Born 규칙	972
161. 힐베르트 공간과 자기수반성	978
162. 브라켓과 완비성	984
163. Schroedinger 방정식	990
164. 운동량 표현과 Fourier 변환	996
165. 불확정성 관계	1002
166. 동역학 그림	1008
167. 전파자와 Green 함수	1014
168. 경로적분	1020
169. 밀도행렬	1026
170. POVM과 Kraus 연산자	1032
171. 얽힘과 엔트로피	1038
172. 무한·유한 우물	1044
173. 델타 퍼텐셜과 장벽	1050
174. 조화진동자	1056
175. Coherent와 squeezed state	1062
176. 각운동량 대수	1068
177. Spin 1/2와 Pauli 행렬	1074
178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart	1080

Contents

전자기학/양자역학 접점	1272
210. 최소결합과 gauge 불변성	1273
211. Aharonov-Bohm 위상	1279
212. Landau 준위	1285
213. Pauli 해밀토니언과 스핀	1291
214. 전자기장 양자화	1297
215. 자발방출과 Purcell 효과	1303
216. Kubo 전도도와 물성	1309
217. Casimir 효과	1315
218. Quantum Hall response	1321
219. 밀도행렬과 부분추적	1327
220. 경로적분과 전파자	1333
221. 산란과 S 행렬	1339
통합 연구 도구	1345
222. 차원과 극한으로 논문 읽기	1346
223. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙	1352
224. 선형응답과 측정량 연결	1358
225. 수치해석 검증 루틴	1364
226. 스케일 분리와 유효이론	1370

Contents

Part 시작 페이지

Part I 공통 수학 도구	11
Part II 고전역학	119
Part III 열역학/통계역학	228
Part IV 유체역학	349
Part V 광학	464
Part VI 전자기학	561
Part VII 상대성이론	868
Part VIII 양자역학	971
Part IX 전자기학/양자역학 접점	1272
Part X 통합 연구 도구	1345
Part XI 핵심 수식 아틀라스	1376
Part XII 대표 유도 아틀라스	1603
Part XIII 연구 문제와 논문 읽기 체크	1784
Part XIV 수학·과학 공식 부록	1935

수정 메모: 기존 9-10쪽의 F/D/R 항목은 같은 과목명으로 반복되어 실제 색인 역할을 하지 못하던 부분을 정리했다. 여기서는 문서 전체의 Part 시작 페이지와 뒤쪽 아틀라스·부록 위치를 먼저 찾을 수 있도록 재배치했다.

Contents

아틀라스와 부록 색인

핵심 수식 아틀라스	1376
F001-F226 과목별 대표식 빠른 참조	1377
대표 유도 아틀라스	1603
D001-D180 대표 유도 흐름과 계산	1604
연구 문제와 논문 읽기 체크	1784
R001-R150 논문식 가정·측정량·검증 루틴	1785
수학·과학 공식 부록	1935
A1 초등-중등 수학/기하	1935
A2 고등수학·미적분·확률	1938
A3 대학수학: 선형대수·해석·ODE/PDE	1944
A4 일반물리·전자기·상대론·양자	1949
A5 화학·재료·전자공학	1958
A6 상수·단위·실험·계산 루틴	1962

표기 규칙

- 벡터/장 기호 E, B, D, H, J, A, F, S 는 수식 줄에서 bold italic로 표시했다.
- 함수명 $\sin, \cos, \exp, \log, \det, \text{tr}$ 등은 upright로 두고, 변수와 그리스 문자는 italic로 처리했다.
- 수식 줄의 $\nabla \cdot / \text{curl}$, 닫힌 선적분, $\varepsilon, \mu, \omega, \hbar$ 등은 보기 쉬운 수학 serif 계열로 정리했다.

Part I

공통 수학 도구

차원분석, 벡터해석, 텐서, 분포, Fourier/Laplace 변환, Green 함수, 변분원리, Noether 정리, 고유값 문제, 확률과 응답 함수는 모든 물리 과목의 공통 언어다. 이 Part는 뒤쪽 고전역학, 열역학/통계역학, 유체역학, 광학, 전자기학, 상대성이론, 양자역학을 읽기 위한 수학적 좌표계를 제공한다.

공통 수학 도구

1. 차원분석과 스케일링 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $[q] = M^a L^b T^c I^d$
02. $\Pi_i = \prod_j x_j^{\alpha_{ij}}$
03. $s_j = \partial \log q / \partial \log x_j$
04. 작은매개변수 $\varepsilon \ll 1$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

1. 차원분석과 스케일링 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 기준 길이, 시간, 질량, 전하 스케일을 먼저 잡고 무차원화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $[q] = M^a L^b T^c I^d$

02. $\Pi_i = \prod_j x_j^{\alpha_{ij}}$

03. $s_j = \partial \log q / \partial \log x_j$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

1. 차원분석과 스케일링 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 차원 독립 변수 수를 줄이면 지배 항과 무시 가능한 항이 보인다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

1. 차원분석과 스케일링 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 차원분석과 스케일링 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

1. 차원분석과 스케일링 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

상사법, 수치 안정성, 근사 전개에서 가장 먼저 쓰는 검산 도구다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

2. 벡터해석과 적분정리

개념 지도와 물리량 정의

벡터해석과 적분정리는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 국소 보존법칙과 전체 플럭스 보존을 연결한다.

핵심 수식.

$$01. \nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i A_i$$

$$02. (\nabla \times \mathbf{A})_i = \varepsilon_{ijk} \partial_j A_k$$

$$03. \int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dA$$

$$04. \int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{n} dA = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

유도 뼈대. 작은 pillbox, loop, control volume을 잡아 경계조건을 유도한다.

검산. 발산정리와 Stokes 정리가 각각 어떤 경계조건을 주는지 말해보라.

자가 점검. 벡터해석과 적분정리에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

2. 벡터해석과 적분정리 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i A_i$$

$$02. (\nabla \times \mathbf{A})_i = \varepsilon_{ijk} \partial_j A_k$$

$$03. \int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dA$$

$$04. \int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{n} dA = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

2. 벡터해석과 적분정리 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 pillbox, loop, control volume을 잡아 경계조건을 유도한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i A_i$$

$$02. (\nabla \times \mathbf{A})_i = \varepsilon_{ijk} \partial_j A_k$$

$$03. \int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dA$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

2. 벡터해석과 적분정리 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 국소 보존법칙과 전체 플럭스 보존을 연결한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

2. 벡터해석과 적분정리 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 벡터해석과 적분정리 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

2. 벡터해석과 적분정리 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전자기학, 유체역학, 열전달, 파동 문제의 공통 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

3. 텐서와 Einstein 합 규약

개념 지도와 물리량 정의

텐서와 Einstein 합 규약은/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 좌표가 바뀌어도 물리량이 같은 방식으로 변해야 한다.

핵심 수식.

01. $a_i b_i = a \cdot b$

02. $T_{ij} \rightarrow R_{ik} R_{jl} T_{kl}$

03. $\varepsilon_{ijk} \varepsilon_{ilm} = \delta_{jl} \delta_{km} - \delta_{jm} \delta_{kl}$

04. $\text{trace } T = T_{ii}$

유도 뼈대. 반복 인덱스는 합하고, 자유 인덱스는 양변에서 같아야 한다.

검산. 자유 인덱스가 맞지 않는 식을 하나 만들어 보고 왜 틀렸는지 설명하라.

자가 점검. 텐서와 Einstein 합 규약에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

3. 텐서와 Einstein 합 규약 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $a_i b_i = a \cdot b$
02. $T_{ij} \rightarrow R_{ik} R_{jl} T_{kl}$
03. $\varepsilon_{ijk} \varepsilon_{ilm} = \delta_{jl} \delta_{km} - \delta_{jm} \delta_{kl}$
04. trace $T = T_{ii}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

3. 텐서와 Einstein 합 규약 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 반복 인덱스는 합하고, 자유 인덱스는 양변에서 같아야 한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $a_i b_i = a \cdot b$

02. $T_{ij} \rightarrow R_{ik} R_{jl} T_{kl}$

03. $\varepsilon_{ijk} \varepsilon_{ilm} = \delta_{jl} \delta_{km} - \delta_{jm} \delta_{kl}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

3. 텐서와 Einstein 합 규약 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 좌표가 바뀌어도 물리량이 같은 방식으로 변해야 한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

3. 텐서와 Einstein 합 규약 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 텐서와 Einstein 합 규약 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

3. 텐서와 Einstein 합 규약 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

응력, 관성모멘트, 전자기장 텐서, 계량 텐서가 모두 텐서다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

4. 분포와 Dirac 델타

개념 지도와 물리량 정의

분포와 Dirac 델타는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 점입자, 점전하, Green 함수, 산란 경계조건에는 분포가 자연스럽다.

핵심 수식.

01. $\int f(x) \delta(x-a) dx = f(a)$
02. $\delta(g(x)) = \sum \delta(x-x_i)/|g'(x_i)|$
03. $\nabla^2(1/r) = -4\pi \delta^3(r)$
04. $1/(x \pm i0) = P(1/x) \mp i\pi\delta(x)$

유도 뼈대. 부피적분에서 특이점을 작은 구로 감싸고 표면항을 계산한다.

검산. 점전하 전위에서 Poisson 방정식을 델타 함수로 확인해보라.

자가 점검. 분포와 Dirac 델타에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

4. 분포와 Dirac 델타 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $\int f(x) \delta(x-a) dx = f(a)$
- 02. $\delta(g(x)) = \sum \delta(x-x_i)/|g'(x_i)|$
- 03. $\nabla^2(1/r) = -4\pi \delta^3(r)$
- 04. $1/(x \pm i0) = P(1/x) \mp i\pi\delta(x)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

4. 분포와 Dirac 델타 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 부피적분에서 특이점을 작은 구로 감싸고 표면항을 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \int f(x) \delta(x-a) dx = f(a)$$

$$02. \delta(g(x)) = \sum \delta(x-x_i)/|g'(x_i)|$$

$$03. \nabla^2(1/r) = -4\pi \delta^3(r)$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

4. 분포와 Dirac 델타 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 점입자, 점전하, Green 함수, 산란 경계조건에는 분포가 자연스럽다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

4. 분포와 Dirac 델타 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 분포와 Dirac 델타 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

4. 분포와 Dirac 델타 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

델타 함수는 “매우 큰 함수”가 아니라 선형 functional로 이해해야 안전하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

5. Fourier와 Laplace 변환

개념 지도와 물리량 정의

Fourier와 Laplace 변환은/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형 시간불변 문제에서는 주파수 공간이 가장 짧은 언어다.

핵심 수식.

01. $f(t) = \int d\omega / (2\pi) \tilde{f}(\omega) e^{-i\omega t}$
02. $\partial_t \rightarrow -i\omega, \nabla \rightarrow ik$
03. $L[f](s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$
04. convolution $\rightarrow \prod$

유도 뼈대. 미분방정식을 대수식으로 바꾸고 pole과 branch cut을 해석한다.

검산. 시간 지연이 주파수 공간에서 어떤 위상因자가 되는지 확인하라.

자가 점검. Fourier와 Laplace 변환에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

5. Fourier와 Laplace 변환 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $f(t) = \int d\omega / (2\pi) \tilde{f}(\omega) e^{-i\omega t}$

02. $\partial_t \rightarrow -i\omega, \nabla \rightarrow ik$

03. $L[f](s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$

04. convolution $\rightarrow \prod$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

5. Fourier와 Laplace 변환 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 미분방정식을 대수식으로 바꾸고 pole과 branch cut을 해석한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. f(t) = \int d\omega / (2\pi) f_{\sim}(\omega) e^{-i\omega t}$$

$$02. \partial_t \rightarrow -i\omega, \nabla \rightarrow ik$$

$$03. L[f](s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

5. Fourier와 Laplace 변환 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형 시간불변 문제에서는 주파수 공간이 가장 짧은 언어다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

5. Fourier와 Laplace 변환 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 Fourier와 Laplace 변환 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

5. Fourier와 Laplace 변환 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

분산관계, normal mode, response function, 안정성 분석의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

6. Green 함수의 공통 구조

개념 지도와 물리량 정의

Green 함수의 공통 구조는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 소스, 경계조건, 인과성을 하나의 kernel에 넣는다.

핵심 수식.

01. $L G(x, x') = \delta(x - x')$
02. $u(x) = \int G(x, x') s(x') dx' + u_{\text{hom}}$
03. $G^R(t) = \theta(t) G(t)$
04. $G(\omega) = (\omega - \mathbf{H} + i0)^{-1}$

유도 뼈대. 연산자 L 의 역을 찾되, homogeneous solution과 경계조건을 잊지 않는다.

검산. retarded, advanced, Feynman Green 함수의 차이를 시간 순서로 말해보라.

자가 점검. Green 함수의 공통 구조에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

6. Green 함수의 공통 구조 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $L G(x, x') = \delta(x - x')$

02. $u(x) = \int G(x, x') s(x') dx' + u_{\text{hom}}$

03. $G^R(t) = \theta(t) G(t)$

04. $G(\omega) = (\omega - \mathbf{H} + i0)^{-1}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

6. Green 함수의 공통 구조 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 연산자 L 의 역을 찾되, homogeneous solution과 경계조건을 잊지 않는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $L G(x, x') = \delta(x - x')$

02. $u(x) = \int G(x, x') s(x') dx' + u_{\text{hom}}$

03. $G^R(t) = \theta(t) G(t)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

6. Green 함수의 공통 구조 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 소스, 경계조건, 인과성을 하나의 kernel에 넣는다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

6. Green 함수의 공통 구조 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 Green 함수의 공통 구조 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

6. Green 함수의 공통 구조 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전자기학, 양자역학, 열방정식, 유체 안정성에 같은 구조가 반복된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

7. 변분 원리

개념 지도와 물리량 정의

변분 원리는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 경로 또는 장 configuration 중 action을 stationary로 만드는 해가 운동방정식이다.

핵심 수식.

01. $\delta S=0$

02. $S=\int L(q,\dot{q},t)dt$

03. $\partial L/\partial q_i - d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i)=0$

04. $\delta F[u]=0 \rightarrow \text{Euler-Lagrange PDE}$

유도 뼈대. 부분적분으로 경계항을 분리하고, 내부 변분의 계수를 0으로 둔다.

검산. 경계항을 0으로 두는 조건이 무엇인지 항상 명시하라.

자가 점검. 변분 원리에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

7. 변분 원리 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\delta S=0$

02. $S=\int L(q,\dot{q},t)dt$

03. $\partial L/\partial q_i - d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i)=0$

04. $\delta F[u]=0 \rightarrow \text{Euler-Lagrange PDE}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

7. 변분 원리 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 부분적분으로 경계항을 분리하고, 내부 변분의 계수를 0으로 둔다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\delta S=0$

02. $S=\int L(q,\dot{q},t)dt$

03. $\partial L/\partial q_i - d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i)=0$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

7. 변분 원리 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 경로 또는 장 configuration 중 action을 stationary로 만드는 해가 운동방정식이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

7. 변분 원리 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 변분 원리 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

7. 변분 원리 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

고전역학, 장론, 광학, 일반상대론, 양자 경로적분의 연결축이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

8. Noether 정리

개념 지도와 물리량 정의

Noether 정리는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 연속 대칭은 보존량을 만든다.

핵심 수식.

$$01. q_i \rightarrow q_i + \varepsilon \Delta q_i$$

$$02. \delta L = \varepsilon dK/dt$$

$$03. Q = \Sigma p_i \Delta q_i - K$$

$$04. dQ/dt = 0$$

유도 뼈대. 시간 병진 -> 에너지, 공간 병진 -> 운동량, 회전 -> 각운동량을 대응시킨다.

검산. 대칭을 하나 골라 보존량을 직접 써보라.

자가 점검. Noether 정리에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

8. Noether 정리 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $q_i \rightarrow q_i + \varepsilon \Delta q_i$

02. $\delta L = \varepsilon dK/dt$

03. $Q = \Sigma p_i \Delta q_i - K$

04. $dQ/dt = 0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

8. Noether 정리 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 시간 병진 □ 에너지, 공간 병진 □ 운동량, 회전 □ 각운동량을 대응시킨다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $q_i \rightarrow q_i + \varepsilon \Delta q_i$

02. $\delta L = \varepsilon dK/dt$

03. $Q = \Sigma p_i \Delta q_i - K$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

8. Noether 정리 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 연속 대칭은 보존량을 만든다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory_kernel, tensor_response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

8. Noether 정리 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 Noether 정리 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

8. Noether 정리 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

gauge 대칭에서는 제약식과 전하 보존까지 이어진다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

9. 고유값과 정상모드

개념 지도와 물리량 정의

고유값과 정상모드는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형화된 문제는 대부분 고유값 문제로 시작한다.

핵심 수식.

$$01. \mathbf{A}|n\rangle = \lambda_n |n\rangle$$

$$02. \mathbf{A} = \sum \lambda_n |n\rangle\langle n|$$

$$03. f(\mathbf{A}) = \sum f(\lambda_n) |n\rangle\langle n|$$

$$04. \det(\mathbf{A} - \lambda I) = 0$$

유도 뼈대. 직교성, completeness, boundary condition을 함께 확인한다.

검산. 왜 Hermitian 문제에서는 고유값이 실수인지 설명하라.

자가 점검. 고유값과 정상모드에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

9. 고유값과 정상모드 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{A}|n\rangle = \lambda_n |n\rangle$
02. $\mathbf{A} = \sum \lambda_n |n\rangle\langle n|$
03. $f(\mathbf{A}) = \sum f(\lambda_n) |n\rangle\langle n|$
04. $\det(\mathbf{A} - \lambda I) = 0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

9. 고유값과 정상모드 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 직교성, completeness, boundary condition을 함께 확인한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. A|n\rangle = \lambda_n |n\rangle$$

$$02. A = \sum \lambda_n |n\rangle\langle n|$$

$$03. f(A) = \sum f(\lambda_n) |n\rangle\langle n|$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

9. 고유값과 정상모드 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형화된 문제는 대부분 고유값 문제로 시작한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

9. 고유값과 정상모드 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 고유값과 정상모드 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

9. 고유값과 정상모드 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

진동, 파동, 양자상태, 안정성, 공진기의 공통 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

10. Hermitian, unitary, symplectic 구조

개념 지도와 물리량 정의

Hermitian, unitary, symplectic 구조는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 보존되는 내적 또는 symplectic form이 무엇인지가 이론의 구조를 정한다.

핵심 수식.

01. $A^\dagger = A$

02. $U^\dagger U = I$

03. $M^T J M = J$

04. $J = \begin{bmatrix} 0, I \\ I, 0 \end{bmatrix}$

유도 뼈대. 시간발전이 확률을 보존하면 unitary, Hamilton 흐름은 symplectic이다.

검산. unitary 보존량과 symplectic 보존량의 차이를 말해보라.

자가 점검. Hermitian, unitary, symplectic 구조에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

10. Hermitian, unitary, symplectic 구조 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $A^\dagger = A$

02. $U^\dagger U = I$

03. $M^T J M = J$

04. $J = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

10. Hermitian, unitary, symplectic 구조 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 시간발전이 확률을 보존하면 unitary, Hamilton 흐름은 symplectic이다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $A^\dagger = A$

02. $U^\dagger U = I$

03. $M^T J M = J$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

10. Hermitian, unitary, symplectic 구조 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 보존되는 내적 또는 symplectic form이 무엇인지가 이론의 구조를 정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

10. Hermitian, unitary, symplectic 구조 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 Hermitian, unitary, symplectic 구조 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

10. Hermitian, unitary, symplectic 구조 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자역학과 Hamilton 역학의 깊은 구조적 유사성을 보여준다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

11. PDE 분류와 특성곡선

개념 지도와 물리량 정의

PDE 분류와 특성곡선은/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. PDE 유형은 필요한 초기/경계 조건을 결정한다.

핵심 수식.

01. $A u_{xx} + B u_{xy} + C u_{yy} = 0$

02. $\Delta = B^2 - 4AC$

03. $\Delta < 0$ elliptic, $\Delta = 0$ parabolic, $\Delta > 0$ hyperbolic

04. $dx/ds=a, du/ds=b$

유도 뼈대. 최고차 미분항만 보고 local type을 먼저 분류한다.

검산. 파동방정식이 왜 초기값 문제인지 특성곡선으로 설명하라.

자가 점검. PDE 분류와 특성곡선에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

11. PDE 분류와 특성곡선 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $A u_{xx} + B u_{xy} + C u_{yy} = 0$

02. $\Delta = B^2 - 4AC$

03. $\Delta < 0$ elliptic, $\Delta = 0$ parabolic, $\Delta > 0$ hyperbolic

04. $dx/ds=a, du/ds=b$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

11. PDE 분류와 특성곡선 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 최고차 미분항만 보고 local type을 먼저 분류한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $A u_{xx} + B u_{xy} + C u_{yy} = 0$

02. $\Delta = B^2 - 4AC$

03. $\Delta < 0$ elliptic, $\Delta = 0$ parabolic, $\Delta > 0$ hyperbolic

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

11. PDE 분류와 특성곡선 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. PDE 유형은 필요한 초기/경계 조건을 결정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 빠대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

11. PDE 분류와 특성곡선 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 PDE 분류와 특성곡선 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

11. PDE 분류와 특성곡선 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Laplace, diffusion, wave equation을 한 가족으로 비교할 수 있다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

12. 점근해석과 stationary phase

개념 지도와 물리량 정의

점근해석과 stationary phase은/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 빠르게 진동하는 적분은 stationary point가 지배한다.

핵심 수식.

01. $I(\lambda) = \int a(x) \exp(i\lambda\varphi(x)) dx$
02. $\varphi'(x_0) = 0$
03. $I(\lambda) \sim a(x_0) \exp(i\lambda\varphi_0) \sqrt{2\pi/(\lambda|\varphi''_0|)}$
04. $\lambda \gg 1$

유도 뼈대. 위상 도함수가 0인 점 주변으로 Taylor 전개한다.

검산. 왜 위상이 빠르게 변하는 영역은 상쇄되는지 말해보라.

자가 점검. 점근해석과 stationary phase에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

12. 점근해석과 stationary phase - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $I(\lambda) = \int a(x) \exp(i\lambda\varphi(x)) dx$
02. $\varphi'(x_0) = 0$
03. $I(\lambda) \sim a(x_0) \exp(i\lambda\varphi_0) \sqrt{(2\pi/(\lambda|\varphi''_0|))}$
04. $\lambda \gg 1$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

12. 점근해석과 stationary phase - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 위상 도함수가 0인 점 주변으로 Taylor 전개한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $I(\lambda) = \int a(x) \exp(i\lambda\varphi(x)) dx$

02. $\varphi'(x_0) = 0$

03. $I(\lambda) \sim a(x_0) \exp(i\lambda\varphi_0) \sqrt{2\pi/(\lambda|\varphi''(x_0)|)}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

12. 점근해석과 stationary phase - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 빠르게 진동하는 적분은 stationary point가 지배한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

12. 점근해석과 stationary phase - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 점근해석과 stationary phase 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

12. 점근해석과 stationary phase - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

기하광학, WKB, 경로적분, 산란 근사의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

13. 섭동론의 공통 뼈대

개념 지도와 물리량 정의

섭동론의 공통 뼈대는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 작은 매개변수 주변에서 해를 계층적으로 구한다.

핵심 수식.

$$01. L(\varepsilon)u=s, L=L0+\varepsilon L1+\dots$$

$$02. u=u0+\varepsilon u1+\varepsilon^2 u2+\dots$$

$$03. L0 u0=s$$

$$04. L0 u1=-L1 u0$$

유도 뼈대. 동차해와 solvability condition을 놓치면 secular term이 생긴다.

검산. 정칙 섭동과 singular perturbation의 차이를 예로 설명하라.

자가 점검. 섭동론의 공통 뼈대에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

13. 섭동론의 공통 뼈대 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $L(\varepsilon)u=s, L=L_0+\varepsilon L_1+\dots$

02. $u=u_0+\varepsilon u_1+\varepsilon^2 u_2+\dots$

03. $L_0 u_0=s$

04. $L_0 u_1=-L_1 u_0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

13. 섭동론의 공통 뼈대 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 동차해와 solvability condition을 놓치면 secular term이 생긴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $L(\varepsilon)u=s, L=L_0+\varepsilon L_1+\dots$

02. $u=u_0+\varepsilon u_1+\varepsilon^2 u_2+\dots$

03. $L_0 u_0=s$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

13. 섭동론의 공통 뼈대 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 작은 매개변수 주변에서 해를 계층적으로 구한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

13. 섭동론의 공통 뼈대 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 섭동론의 공통 뼈대 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 뼈대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

13. 섭동론의 공통 뼈대 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

고전 섭동, 양자 섭동, 유체 안정성, 비선형 광학에 반복된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

14. 경계층과 matched asymptotics

개념 지도와 물리량 정의

경계층과 matched asymptotics은/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 작은 점성, 작은 확산, 급격한 경계 변화에서 내부/외부 해가 따로 필요하다.

핵심 수식.

01. $\varepsilon y'' + a(x)y' + b(x)y = 0$

02. $X = (x - x_b)/\varepsilon^\alpha$

03. $y_{\text{outer}} \sim y_{\text{inner}}$ in overlap

04. $y \sim y_{\text{out}} + y_{\text{in}} - y_{\text{match}}$

유도 뼈대. outer 해와 inner 해를 만들고 overlap 영역에서 맞춘다.

검산. 왜 $\varepsilon \rightarrow 0$ 극한에서 방정식 차수가 낮아지는지 확인하라.

자가 점검. 경계층과 matched asymptotics에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

14. 경계층과 matched asymptotics - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\varepsilon y'' + a(x)y' + b(x)y = 0$

02. $X = (x - x_b)/\varepsilon^\alpha$

03. $y_{\text{outer}} \sim y_{\text{inner}}$ in overlap

04. $y \sim y_{\text{out}} + y_{\text{in}} - y_{\text{match}}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

14. 경계층과 matched asymptotics - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. outer 해와 inner 해를 만들고 overlap 영역에서 맞춘다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\varepsilon y'' + a(x)y' + b(x)y = 0$

02. $X = (x - x_b)/\varepsilon^\alpha$

03. $y_{\text{outer}} \sim y_{\text{inner}}$ in overlap

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

14. 경계층과 matched asymptotics - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 작은 점성, 작은 확산, 급격한 경계 변화에서 내부/외부 해가 따로 필요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

14. 경계층과 matched asymptotics - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 경계층과 matched asymptotics 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

14. 경계층과 matched asymptotics - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

유체 경계층뿐 아니라 양자 터널링, 열전달에도 같은 발상이 있다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

15. 확률, cumulant, 잡음

개념 지도와 물리량 정의

확률, cumulant, 잡음은/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 평균만으로는 fluctuation과 상관을 설명할 수 없다.

핵심 수식.

01. $M(t) = \langle \exp(tX) \rangle$

02. $K(t) = \log M(t)$

03. $\kappa_n = d^n K / dt^n \text{ at } 0$

04. $\langle X^2 \rangle_c = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$

유도 뼈대. moment generating function보다 cumulant가 독립성 분석에 편하다.

검산. Poisson 과정에서 평균과 분산이 같다는 것을 cumulant로 확인하라.

자가 점검. 확률, cumulant, 잡음에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

15. 확률, cumulant, 잡음 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $M(t) = \langle \exp(tX) \rangle$

02. $K(t) = \log M(t)$

03. $\kappa_n = d^n K / dt^n \text{ at } 0$

04. $\langle X^2 \rangle_c = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

15. 확률, cumulant, 잡음 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. moment generating function보다 cumulant가 독립성 분석에 편하다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $M(t) = \langle \exp(tX) \rangle$

02. $K(t) = \log M(t)$

03. $\kappa_n = d^n K / dt^n \text{ at } 0$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

15. 확률, cumulant, 잡음 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 평균만으로는 fluctuation과 상관을 설명할 수 없다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

15. 확률, cumulant, 잡음 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 확률, cumulant, 잡음 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

15. 확률, cumulant, 잡음 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

통계역학, 계측, 난류, 양자잡음에서 핵심 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

16. 상관함수와 response

개념 지도와 물리량 정의

상관함수와 response은/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관측량은 보통 외부장에 대한 선형응답으로 측정된다.

핵심 수식.

01. $C_{AB}(t) = \langle \mathbf{A}(t) \mathbf{B}(0) \rangle$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar) \theta(t) \langle [\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)] \rangle$
03. $\mathbf{S}_{AB}(\omega) = \int e^{i\omega t} C_{AB}(t) dt$
04. response = variation of observable

유도 뼈대. 미소 외부 perturbation을 넣고 1차 변화량을 계산한다.

검산. 흡수율이 왜 $\text{Im } \chi$ 와 연결되는지 에너지 흐름으로 설명하라.

자가 점검. 상관함수와 response에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

16. 상관함수와 response - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $C_{AB}(t) = \langle \mathbf{A}(t) \mathbf{B}(0) \rangle$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar) \theta(t) \langle [\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)] \rangle$
03. $\mathbf{S}_{AB}(\omega) = \int e^{i\omega t} C_{AB}(t) dt$
04. response = variation of observable

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

16. 상관함수와 response - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 미소 외부 perturbation을 넣고 1차 변화량을 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $C_{AB}(t) = \langle \mathbf{A}(t) \mathbf{B}(0) \rangle$

02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar) \theta(t) \langle [\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)] \rangle$

03. $\mathbf{S}_{AB}(\omega) = \int e^{i\omega t} C_{AB}(t) dt$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

16. 상관함수와 response - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관측량은 보통 외부장에 대한 선형응답으로 측정된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

16. 상관함수와 response - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 상관함수와 response 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

16. 상관함수와 response - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

열/통계, 양자다체, 광학, 전자기 물성의 공통 측정 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

17. 안정성 분석과 Lyapunov 지수

개념 지도와 물리량 정의

안정성 분석과 Lyapunov 지수는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 비선형계도 고정점 근처에서는 선형계로 시작한다.

핵심 수식.

01. $\dot{x}=f(x)$
02. $\delta\dot{x}=J(x)\delta x$
03. $J_{ij}=\partial f_i/\partial x_j$
04. $\lambda_L = \lim (1/t) \log |\delta x(t)|/|\delta x(0)|$

유도 뼈대. Jacobian 고유값의 실수부가 local stability를 정한다.

검산. 안정한 고정점과 limit cycle의 차이를 위상공간에서 설명하라.

자가 점검. 안정성 분석과 Lyapunov 지수에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

17. 안정성 분석과 Lyapunov 지수 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\dot{x} = f(x)$
02. $\delta \dot{x} = J(x) \delta x$
03. $J_{ij} = \partial f_i / \partial x_j$
04. $\lambda_L = \lim (1/t) \log |\delta x(t)| / |\delta x(0)|$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

17. 안정성 분석과 Lyapunov 지수 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Jacobian 고유값의 실수부가 local stability를 정한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\dot{x}=f(x)$
02. $\delta\dot{x}=J(x)\delta x$
03. $J_{ij}=\partial f_i/\partial x_j$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

17. 안정성 분석과 Lyapunov 지수 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 비선형계도 고정점 근처에서는 선형계로 시작한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

17. 안정성 분석과 Lyapunov 지수 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 안정성 분석과 Lyapunov 지수 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

17. 안정성 분석과 Lyapunov 지수 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

chaos, 유체 난류, driven system, orbital stability에 모두 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

공통 수학 도구

18. Lie 군과 Lie 대수

개념 지도와 물리량 정의

Lie 군과 Lie 대수는/는 공통 수학 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 연속 변환의 국소 구조는 생성자와 commutator에 담긴다.

핵심 수식.

- 01. $g(\varepsilon) = \exp(\varepsilon X)$
- 02. $[X_a, X_b] = f_{ab}^c X_c$
- 03. $R(n, \theta) = \exp(-i\theta \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}/\hbar)$
- 04. $Ad_g X = gXg^{-1}$

유도 뼈대. 작은 변환을 곱해 commutator와 구조상수를 구한다.

검산. $SO(3)$ 와 $SU(2)$ 의 관계를 스핀 1/2 관점에서 말해보라.

자가 점검. Lie 군과 Lie 대수에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

공통 수학 도구

18. Lie 군과 Lie 대수 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 공통 수학 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $g(\varepsilon) = \exp(\varepsilon X)$
- 02. $[X_a, X_b] = f_{ab}^c X_c$
- 03. $R(n, \theta) = \exp(-i\theta \, n \cdot \mathbf{J} / \hbar)$
- 04. $Ad_g X = gXg^{-1}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

공통 수학 도구

18. Lie 군과 Lie 대수 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 변환을 곱해 commutator와 구조상수를 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $g(\varepsilon) = \exp(\varepsilon X)$

02. $[X_a, X_b] = f_{ab}^c X_c$

03. $R(n, \theta) = \exp(-i\theta \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}/\hbar)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

공통 수학 도구

18. Lie 군과 Lie 대수 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 연속 변환의 국소 구조는 생성자와 commutator에 담긴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

공통 수학 도구

18. Lie 군과 Lie 대수 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 공통 수학 도구의 Lie 군과 Lie 대수 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

공통 수학 도구

18. Lie 군과 Lie 대수 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

회전, Lorentz, gauge, canonical transformation의 공통 문법이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 2

고전역학

고전역학 Part는 18개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치계산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: Newton 방정식과 운동량 보존, 일-에너지 정리, 중심력과 유효 퍼텐셜, Kepler 문제와 궤도 요소, 조화진동자와 정상모드, 감쇠와 구동 진동, Lagrange 역학, Hamilton 역학과 위상공간. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

고전역학

19. Newton 방정식과 운동량 보존

개념 지도와 물리량 정의

Newton 방정식과 운동량 보존은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관성계에서 힘은 운동량 변화율이다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$

02. $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$

03. $\Sigma \mathbf{F}_{ext} = d\mathbf{P}_{tot}/dt$

04. $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$

유도 뼈대. 계 전체를 잡으면 내부힘은 상쇄되고 외부힘만 남는다.

검산. 운동량 보존과 에너지 보존이 동시에 성립하지 않는 예를 생각해보라.

자가 점검. Newton 방정식과 운동량 보존에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

19. Newton 방정식과 운동량 보존 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$

02. $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$

03. $\Sigma \mathbf{F}_{ext} = d\mathbf{P}_{tot}/dt$

04. $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

19. Newton 방정식과 운동량 보존 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 계 전체를 잡으면 내부힘은 상쇄되고 외부힘만 남는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F = dp/dt$

02. $p = m v$

03. $\Sigma F_{ext} = dP_{tot}/dt$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

19. Newton 방정식과 운동량 보존 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관성계에서 힘은 운동량 변화율이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

19. Newton 방정식과 운동량 보존 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 Newton 방정식과 운동량 보존 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

19. Newton 방정식과 운동량 보존 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

입자계, 충돌, 로켓, 연속체 운동량 방정식의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

20. 일-에너지 정리

개념 지도와 물리량 정의

일-에너지 정리는/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 보존력이면 에너지 적분이 궤도 계산을 크게 줄인다.

핵심 수식.

01. $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$

02. $dK/dt = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$

03. $E = K + V, \mathbf{F} = -\nabla V$

04. $dE/dt = \partial V/\partial t$

유도 뼈대. 힘에 속도를 내적해 시간 적분한다.

검산. 시간에 의존하는 퍼텐셜에서 왜 E가 보존되지 않는지 설명하라.

자가 점검. 일-에너지 정리에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

20. 일-에너지 정리 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$
- 02. $dK/dt = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$
- 03. $E = K + V, \mathbf{F} = -\nabla V$
- 04. $dE/dt = \partial V / \partial t$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

20. 일-에너지 정리 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 힘에 속도를 내적해 시간 적분한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$

02. $dK/dt = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$

03. $E = K + V, \mathbf{F} = -\nabla V$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

20. 일-에너지 정리 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 보존력이면 에너지 적분이 궤도 계산을 크게 줄인다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

20. 일-에너지 정리 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 일-에너지 정리 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

20. 일-에너지 정리 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

potential landscape와 effective potential 분석의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

21. 중심력과 유효 퍼텐셜

개념 지도와 물리량 정의

중심력과 유효 퍼텐셜은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 회전 대칭이면 각운동량이 보존되어 2차원 문제로 줄어든다.

핵심 수식.

01. $L = m r^2 \dot{\varphi}$

02. $E = 1/2 m \dot{r}^2 + L^2/(2mr^2) + V(r)$

03. $V_{\text{eff}} = V + L^2/(2mr^2)$

04. $d^2u/d\varphi^2 + u = -mF(1/u)/(L^2u^2)$

유도 뼈대. 각도 운동을 L로 제거하고 radial motion을 1차원 문제로 본다.

검산. 원궤도 안정성 조건을 V_{eff} 의 곡률로 말해보라.

자가 점검. 중심력과 유효 퍼텐셜에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

21. 중심력과 유효 퍼텐셜 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $L = m r^2 \dot{\varphi}$

02. $E = 1/2 m \dot{r}^2 + L^2/(2mr^2) + V(r)$

03. $V_{eff} = V + L^2/(2mr^2)$

04. $d^2u/d\varphi^2 + u = -mF(1/u)/(L^2u^2)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

21. 중심력과 유효 퍼텐셜 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 각도 운동을 L로 제거하고 radial motion을 1차원 문제로 본다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $L = m r^2 \dot{\varphi}$

02. $E = 1/2 m \dot{r}^2 + L^2/(2mr^2) + V(r)$

03. $V_{eff} = V + L^2/(2mr^2)$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

21. 중심력과 유효 퍼텐셜 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 회전 대칭이면 각운동량이 보존되어 2차원 문제로 줄어든다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, `memory kernel`, `tensor response`, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter `epsilon`
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

21. 중심력과 유효 퍼텐셜 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 중심력과 유효 퍼텐셜 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

21. 중심력과 유효 퍼텐셜 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

행성 궤도, Rutherford 산란, bound orbit stability에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

22. Kepler 문제와 궤도 요소

개념 지도와 물리량 정의

Kepler 문제와 궤도 요소는/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 역제곱 중심력은 닫힌 원뿔곡선 궤도를 만든다.

핵심 수식.

01. $V(r) = -k/r$

02. $r(\varphi) = p/(1 + e \cos \varphi)$

03. $E = -k/(2a)$

04. $T^2 = 4\pi^2 a^3/(GM)$

유도 뼈대. $u=1/r$ 치환으로 Binet 방정식을 푼다.

검산. 타원, 포물선, 쌍곡선을 에너지 부호로 분류하라.

자가 점검. Kepler 문제와 궤도 요소에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

22. Kepler 문제와 궤도 요소 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $V(r) = -k/r$

02. $r(\varphi) = p/(1 + e \cos \varphi)$

03. $E = -k/(2a)$

04. $T^2 = 4\pi^2 a^3/(GM)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

22. Kepler 문제와 궤도 요소 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. $u=1/r$ 치환으로 Binet 방정식을 푼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $V(r) = -k/r$

02. $r(\varphi) = p/(1 + e \cos \varphi)$

03. $E = -k/(2a)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

22. Kepler 문제와 궤도 요소 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 역제곱 중심력은 닫힌 원뿔곡선 궤도를 만든다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

22. Kepler 문제와 궤도 요소 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 Kepler 문제와 궤도 요소 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

22. Kepler 문제와 궤도 요소 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Runge-Lenz 벡터는 숨은 대칭과 degeneracy를 보여준다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

23. 조화진동자와 정상모드

개념 지도와 물리량 정의

조화진동자와 정상모드는/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 작은 진동은 평형점 주변의 2차 근사로 나타난다.

핵심 수식.

01. $x'' + \omega_0^2 x = 0$

02. $E = 1/2 m \dot{x}^2 + 1/2 kx^2$

03. $q_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$

04. $K a = \omega^2 M a$

유도 뼈대. potential을 Hessian까지 전개하고 질량행렬로 generalized eigenvalue problem을 푼다.

검산. 정상모드 좌표에서는 왜 에너지가 모드별로 분리되는지 설명하라.

자가 점검. 조화진동자와 정상모드에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

23. 조화진동자와 정상모드 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $x'' + \omega_0^2 x = 0$

02. $E = 1/2 m \dot{x}^2 + 1/2 kx^2$

03. $q_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$

04. $K a = \omega^2 M a$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

23. 조화진동자와 정상모드 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. potential을 Hessian까지 전개하고 질량행렬로 generalized eigenvalue problem을 푼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$

02. $E = 1/2 m \dot{x}^2 + 1/2 kx^2$

03. $q_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

23. 조화진동자와 정상모드 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 작은 진동은 평형점 주변의 2차 근사로 나타난다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

23. 조화진동자와 정상모드 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 조화진동자와 정상모드 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

23. 조화진동자와 정상모드 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

분자진동, 회로, 광공진기, 격자 phonon의 기본 모형이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

24. 감쇠와 구동 진동

개념 지도와 물리량 정의

감쇠와 구동 진동은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형 response의 가장 단순한 실험 모형이다.

핵심 수식.

01. $x'' + 2\beta x' + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t$
02. $A(\omega) = f_0 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta\omega)^2}$
03. $Q = \omega_0 / (2\beta)$
04. phase lag $\tan \delta = 2\beta\omega / (\omega_0^2 - \omega^2)$

유도 뼈대. 복소 phasor를 넣어 amplitude와 phase를 얻는다.

검산. Q가 클수록 시간응답과 주파수응답이 어떻게 바뀌는지 말해보라.

자가 점검. 감쇠와 구동 진동에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

24. 감쇠와 구동 진동 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $x'' + 2\beta x' + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t$
02. $A(\omega) = f_0 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta\omega)^2}$
03. $Q = \omega_0 / (2\beta)$
04. phase lag $\tan \delta = 2\beta\omega / (\omega_0^2 - \omega^2)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

24. 감쇠와 구동 진동 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 복소 phasor를 넣어 amplitude와 phase를 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $x'' + 2\beta x' + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t$

02. $A(\omega) = f_0 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta\omega)^2}$

03. $Q = \omega_0 / (2\beta)$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

24. 감쇠와 구동 진동 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형 response의 가장 단순한 실험 모형이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

24. 감쇠와 구동 진동 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 감쇠와 구동 진동 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

24. 감쇠와 구동 진동 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

공진, linewidth, susceptibility, filter 해석으로 이어진다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

25. Lagrange 역학

개념 지도와 물리량 정의

Lagrange 역학은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 좌표 선택 자유도가 큰 문제에서 Newton 법칙보다 구조가 선명하다.

핵심 수식.

01. $L=T-V$

02. $\delta \int L dt = 0$

03. $d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i) - \partial L/\partial q_i = Q_i$

04. $p_i = \partial L/\partial \dot{q}_i$

유도 뼈대. 제약조건에 맞는 일반화좌표를 고르고 Euler-Lagrange 방정식을 쓴다.

검산. 진짜 문제를 θ 하나로 쓰면 어떤 힘을 계산하지 않아도 되는가?

자가 점검. Lagrange 역학에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

25. Lagrange 역학 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $L=T-V$

02. $\delta \int L dt = 0$

03. $d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i) - \partial L/\partial q_i = Q_i$

04. $p_i = \partial L/\partial \dot{q}_i$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

25. Lagrange 역학 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 제약조건에 맞는 일반화좌표를 고르고 Euler-Lagrange 방정식을 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $L=T-V$

02. $\delta \int L dt = 0$

03. $d/dt(\partial L / \partial \dot{q}_i) - \partial L / \partial q_i = Q_i$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

25. Lagrange 역학 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 좌표 선택 자유도가 큰 문제에서 Newton 법칙보다 구조가 선명하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

25. Lagrange 역학 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 Lagrange 역학 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

25. Lagrange 역학 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

대칭성과 보존량을 찾는 가장 쉬운 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

26. Hamilton 역학과 위상공간

개념 지도와 물리량 정의

Hamilton 역학과 위상공간은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 상태는 configuration이 아니라 phase space의 점이다.

핵심 수식.

- 01. $H(q,p)=p_i \dot{q}_i - L$
- 02. $\dot{q}_i=\partial H/\partial p_i$
- 03. $\dot{p}_i=-\partial H/\partial q_i$
- 04. $dp/dt=0$ (Liouville)

유도 뼈대. Legendre 변환으로 속도를 운동량으로 바꾼다.

검산. Hamiltonian flow가 위상공간 부피를 보존한다는 뜻을 그림으로 말해보라.

자가 점검. Hamilton 역학과 위상공간에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

26. Hamilton 역학과 위상공간 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $H(q,p)=p_i \dot{q}_i - L$

02. $\dot{q}_i=\partial H/\partial p_i$

03. $\dot{p}_i=-\partial H/\partial q_i$

04. $d\rho/dt=0$ (Liouville)

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

26. Hamilton 역학과 위상공간 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Legendre 변환으로 속도를 운동량으로 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H(q,p)=p_i \dot{q}_i - L$

02. $\dot{q}_i = \partial H / \partial p_i$

03. $\dot{p}_i = -\partial H / \partial q_i$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

26. Hamilton 역학과 위상공간 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 상태는 configuration이 아니라 phase space의 점이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

26. Hamilton 역학과 위상공간 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 Hamilton 역학과 위상공간 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

26. Hamilton 역학과 위상공간 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

통계역학, 양자화, symplectic 수치해석의 핵심 구조다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

27. Poisson bracket과 정준변환

개념 지도와 물리량 정의

Poisson bracket과 정준변환은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관측량의 시간발전과 대칭생성자를 같은 bracket으로 표현한다.

핵심 수식.

- 01. $\{A, B\} = \partial A / \partial q_i \partial B / \partial p_i - \partial A / \partial p_i \partial B / \partial q_i$
- 02. $dA/dt = \{A, H\} + \partial A / \partial t$
- 03. $\{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$
- 04. canonical: $\{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$

유도 뼈대. 정준변환은 Poisson bracket 구조를 보존한다.

검산. 각운동량 성분의 Poisson bracket을 회전대수와 연결하라.

자가 점검. Poisson bracket과 정준변환에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

27. Poisson bracket과 정준변환 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\{A, B\} = \partial A / \partial q_i \partial B / \partial p_i - \partial A / \partial p_i \partial B / \partial q_i$

02. $dA/dt = \{A, H\} + \partial A / \partial t$

03. $\{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$

04. canonical: $\{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

27. Poisson bracket과 정준변환 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 정준변환은 Poisson bracket 구조를 보존한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\{A, B\} = \partial A / \partial q_i \partial B / \partial p_i - \partial A / \partial p_i \partial B / \partial q_i$
02. $dA/dt = \{A, H\} + \partial A / \partial t$
03. $\{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

27. Poisson bracket과 정준변환 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관측량의 시간발전과 대칭생성자를 같은 bracket으로 표현한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

27. Poisson bracket과 정준변환 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 Poisson bracket과 정준변환 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

27. Poisson bracket과 정준변환 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자역학의 commutator와 대응된다: $\{, \}$ $\square \rightarrow [,]/(\hbar)$. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

28. Hamilton-Jacobi 이론

개념 지도와 물리량 정의

Hamilton-Jacobi 이론은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 궤적 문제를 작용 함수의 PDE 문제로 바꾼다.

핵심 수식.

$$01. \quad H(q, \partial S / \partial q, t) + \partial S / \partial t = 0$$

$$02. \quad p_i = \partial S / \partial q_i$$

$$03. \quad Q_i = \partial S / \partial \alpha_i$$

$$04. \quad S = W(q, \alpha) - Et$$

유도 뼈대. 완전적분 S 를 찾으면 canonical transformation으로 운동이 적분된다.

검산. S 가 파면의 위상처럼 행동하는 이유를 설명하라.

자가 점검. Hamilton-Jacobi 이론에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

28. Hamilton-Jacobi 이론 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \mathbf{H}(q, \partial \mathbf{S} / \partial q, t) + \partial \mathbf{S} / \partial t = 0$$

$$02. p_i = \partial \mathbf{S} / \partial q_i$$

$$03. Q_i = \partial \mathbf{S} / \partial \alpha_i$$

$$04. \mathbf{S} = W(q, \alpha) - Et$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

28. Hamilton-Jacobi 이론 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 완전적분 S를 찾으면 canonical transformation으로 운동이 적분된다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H(q, \partial S / \partial q, t) + \partial S / \partial t = 0$

02. $p_i = \partial S / \partial q_i$

03. $Q_i = \partial S / \partial \alpha_i$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

28. Hamilton-Jacobi 이론 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 궤적 문제를 작용 함수의 PDE 문제로 바꾼다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

28. Hamilton-Jacobi 이론 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 Hamilton-Jacobi 이론 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 질의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

28. Hamilton-Jacobi 이론 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

기하광학 eikonal과 양자 WKB의 고전적 뿌리다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

29. 작용-각 변수

개념 지도와 물리량 정의

작용-각 변수는/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 완전적분 가능한 계에서는 운동이 torus 위의 등속 회전이 된다.

핵심 수식.

01. $J_i = (1/2\pi) \oint p_i dq_i$

02. $\omega_i = \partial H / \partial J_i$

03. $\theta_i(t) = \theta_i(0) + \omega_i t$

04. adiabatic invariant $J \sim \text{const}$

유도 뼈대. 폐곡선 위 $p dq$ 를 적분해 action을 얻는다.

검산. 1D oscillator에서 $J = E/\omega$ 가 되는지 확인하라.

자가 점검. 작용-각 변수에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

29. 작용-각 변수 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $J_i = (1/2\pi) \oint p_i dq_i$

02. $\omega_i = \partial H / \partial J_i$

03. $\theta_i(t) = \theta_i(0) + \omega_i t$

04. adiabatic invariant $J \sim \text{const}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

29. 작용-각 변수 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 폐곡선 위 $p dq$ 를 적분해 action을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. J_i = (1/2\pi) \oint p_i dq_i$$

$$02. \omega_i = \partial H / \partial J_i$$

$$03. \theta_i(t) = \theta_i(0) + \omega_i t$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

29. 작용-각 변수 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 완전적분 가능한 계에서는 운동이 torus 위의 등속 회전이 된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 빠대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

29. 작용-각 변수 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 작용-각 변수 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

29. 작용-각 변수 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

준고전 양자화와 KAM 이론의 기본 좌표다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

30. 강체와 Euler 방정식

개념 지도와 물리량 정의

강체와 Euler 방정식은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 방향 자유도가 있는 물체는 `body frame`과 `space frame`을 구별해야 한다.

핵심 수식.

01. $L = I\omega$

02. $T = 1/2 \omega \cdot I \omega$

03. $N = dL/dt$

04. $I_1 \dot{\Omega}_1 + (I_3 - I_2)\Omega_2\Omega_3 = N_1$

유도 뼈대. 주축좌표계에서 관성텐서를 대각화한다.

검산. 중간축 정리가 왜 불안정한지 에너지-각운동량으로 설명하라.

자가 점검. 강체와 Euler 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

30. 강체와 Euler 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $L = I\omega$

02. $T = 1/2 \omega \cdot I \omega$

03. $N = dL/dt$

04. $I_1 \dot{\Omega}_1 + (I_3 - I_2)\Omega_2\Omega_3 = N_1$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

30. 강체와 Euler 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 주축좌표계에서 관성텐서를 대각화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $L = I\omega$

02. $T = 1/2 \omega \cdot I \omega$

03. $N = dL/dt$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

30. 강체와 Euler 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 방향 자유도가 있는 물체는 body frame과 space frame을 구별해야 한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

30. 강체와 Euler 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 강체와 Euler 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

30. 강체와 Euler 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

자이로스코프, 세차운동, 위성 자세제어의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

31. 비관성계와 회전좌표계

개념 지도와 물리량 정의

비관성계와 회전좌표계은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 회전하는 기준계에서는 가짜힘이 운동방정식에 들어간다.

핵심 수식.

01. $a_{\text{inertial}} = a_{\text{rot}} + 2\Omega \times v + \Omega \times (\Omega \times r) + \dot{\Omega} \times r$

02. $F_{\text{cor}} = -2m\Omega \times v$

03. $F_{\text{cent}} = -m\Omega \times (\Omega \times r)$

04. $F_{\text{Euler}} = -m\dot{\Omega} \times r$

유도 뼈대. 시간미분 연산자 관계 $(dA/dt)_I = (dA/dt)_R + \Omega \times A$ 를 반복 적용한다.

검산. Coriolis 힘은 속도 방향에 수직인데 일을 하는가?

자가 점검. 비관성계와 회전좌표계에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

31. 비관성계와 회전좌표계 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. a_{\text{inertial}} = a_{\text{rot}} + 2\Omega \times v + \Omega \times (\Omega \times r) + \dot{\Omega} \times r$$

$$02. F_{\text{cor}} = -2m\Omega \times v$$

$$03. F_{\text{cent}} = -m\Omega \times (\Omega \times r)$$

$$04. F_{\text{Euler}} = -m\dot{\Omega} \times r$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

31. 비관성계와 회전좌표계 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 시간미분 연산자 관계 $(dA/dt)_I = (dA/dt)_R + \Omega \times A$ 를 반복 적용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $a_{\text{inertial}} = a_{\text{rot}} + 2\Omega \times v + \Omega \times (\Omega \times r) + \dot{\Omega} \times r$

02. $F_{\text{cor}} = -2m\Omega \times v$

03. $F_{\text{cent}} = -m\Omega \times (\Omega \times r)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

31. 비관성계와 회전좌표계 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 회전하는 기준계에서는 가짜힘이 운동방정식에 들어간다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, `memory kernel`, `tensor response`, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter `epsilon`
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 빠대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

31. 비관성계와 회전좌표계 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 비관성계와 회전좌표계 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

31. 비관성계와 회전좌표계 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

기상학, 회전유체, Foucault pendulum에 필수다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

32. 비선형 동역학과 chaos

개념 지도와 물리량 정의

비선형 동역학과 chaos은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 비선형계는 작은 차이가 장시간에 크게 증폭될 수 있다.

핵심 수식.

- 01. $\dot{x}=f(x)$
- 02. Poincare map $x_{n+1}=P(x_n)$
- 03. $\lambda_L > 0 \rightarrow$ sensitive dependence
- 04. $S_{KS} = \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$

유도 뼈대. 연속 flow를 단면 map으로 줄여 fixed point와 stability를 본다.

검산. Lyapunov 지수가 양수라는 말과 예측 가능 시간의 관계를 말하라.

자가 점검. 비선형 동역학과 chaos에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

32. 비선형 동역학과 chaos - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $\dot{x}=f(x)$
- 02. Poincare map $x_{n+1}=P(x_n)$
- 03. $\lambda_L > 0 \rightarrow$ sensitive dependence
- 04. $S_{KS} = \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

32. 비선형 동역학과 chaos - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 연속 flow를 단면 map으로 줄여 fixed point와 stability를 본다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\dot{x}=f(x)$
02. Poincare map $x_{n+1}=P(x_n)$
03. $\lambda_L > 0 \rightarrow$ sensitive dependence
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

32. 비선형 동역학과 chaos - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 비선형계는 작은 차이가 장시간에 크게 증폭될 수 있다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
02. large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

32. 비선형 동역학과 chaos - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 비선형 동역학과 chaos 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

32. 비선형 동역학과 chaos - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

혼돈은 무작위가 아니라 결정론적 불안정성이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

33. Lagrange multiplier와 제약

개념 지도와 물리량 정의

Lagrange multiplier와 제약은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 제약력이 일을 하지 않는 ideal constraint에서 유용하다.

핵심 수식.

01. $F(q,t)=0$

02. $L'=L+\lambda_a F_a$

03. $\partial L'/\partial \lambda_a = F_a = 0$

04. constraint force does no virtual work

유도 뼈대. 일반화좌표로 제약을 제거하거나 multiplier로 힘까지 구한다.

검산. 구 위를 구르는 입자에서 제약력이 왜 에너지를 바꾸지 않는지 말하라.

자가 점검. Lagrange multiplier와 제약에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

33. Lagrange multiplier와 제약 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $F(q,t)=0$

02. $L'=L+\lambda_a F_a$

03. $\partial L'/\partial \lambda_a = F_a = 0$

04. constraint force does no virtual work

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

33. Lagrange multiplier와 제약 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 일반화좌표로 제약을 제거하거나 multiplier로 힘까지 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F(q,t)=0$

02. $L'=L+\lambda_a F_a$

03. $\partial L'/\partial \lambda_a = F_a = 0$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

33. Lagrange multiplier와 제약 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 제약력이 일을 하지 않는 ideal constraint에서 유용하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 빠대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

33. Lagrange multiplier와 제약 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 Lagrange multiplier와 제약 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

33. Lagrange multiplier와 제약 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

비홀로노믹 제약에서는 단순히 좌표만 줄이면 틀릴 수 있다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

34. 연속체와 탄성파

개념 지도와 물리량 정의

연속체와 탄성파는/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고체도 작은 변형에서는 장 방정식으로 기술된다.

핵심 수식.

- 01. $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$
- 02. $\varepsilon_{ij} = 1/2(\partial_i u_j + \partial_j u_i)$
- 03. $\rho u''_i = \partial_j \sigma_{ij} + f_i$
- 04. $c_L = \sqrt{((K+4G/3)/\rho)}$

유도 뼈대. 변위장 u 를 정의하고 strain-stress 관계를 닫는다.

검산. Hooke 법칙이 스칼라가 아니라 텐서인 이유를 말해보라.

자가 점검. 연속체와 탄성파에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

34. 연속체와 탄성과 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$
02. $\varepsilon_{ij} = 1/2(\partial_i u_j + \partial_j u_i)$
03. $\rho \ddot{u}_i = \partial_j \sigma_{ij} + f_i$
04. $c_L = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

34. 연속체와 탄성파 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 변위장 u 를 정의하고 strain-stress 관계를 닫는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$

02. $\varepsilon_{ij} = 1/2(\partial_i u_j + \partial_j u_i)$

03. $\rho u''_i = \partial_j \sigma_{ij} + f_i$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

34. 연속체와 탄성과 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고체도 작은 변형에서는 장 방정식으로 기술된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

34. 연속체와 탄성파 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 연속체와 탄성파 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

34. 연속체와 탄성파 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

음향, 탄성파, 지진파, MEMS 공진기 해석으로 이어진다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

35. 충돌과 산란의 고전 공식

개념 지도와 물리량 정의

충돌과 산란의 고전 공식은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 입사 impact parameter가 산란각과 단면적을 정한다.

핵심 수식.

01. $d\sigma = b db d\varphi / \sin\theta d\theta$

02. $d\sigma/d\Omega = b/\sin\theta |db/d\theta|$

03. impulse $\mathbf{J} = \int \mathbf{F} dt = \Delta \mathbf{p}$

04. coefficient $e = -v_{relafter}/v_{relbefore}$

유도 뼈대. 운동량 보존, 에너지 손실, 중심력 궤도 방정식을 조합한다.

검산. 단면적의 차원이 면적인 이유를 확인하라.

자가 점검. 충돌과 산란의 고전 공식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

35. 충돌과 산란의 고전 공식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $d\sigma = b \, db \, d\varphi / \sin\theta \, d\theta$

02. $d\sigma/d\Omega = b/\sin\theta \, |db/d\theta|$

03. impulse $\mathbf{J} = \int \mathbf{F} dt = \Delta \mathbf{p}$

04. coefficient $e = -v_{relafter}/v_{relbefore}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

35. 충돌과 산란의 고전 공식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 운동량 보존, 에너지 손실, 중심력 궤도 방정식을 조합한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $d\sigma = b db d\varphi / \sin\theta d\theta$

02. $d\sigma/d\Omega = b/\sin\theta |db/d\theta|$

03. impulse $\mathbf{J} = \int \mathbf{F} dt = \Delta \mathbf{p}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

35. 충돌과 산란의 고전 공식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 입사 impact parameter가 산란각과 단면적을 정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

35. 충돌과 산란의 고전 공식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 충돌과 산란의 고전 공식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

35. 충돌과 산란의 고전 공식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Rutherford 산란은 양자 산란 직관의 고전적 원형이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

고전역학

36. Symplectic integrator와 검산

개념 지도와 물리량 정의

Symplectic integrator와 검산은/는 고전역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 장시간 Hamilton simulation에서는 구조 보존이 중요하다.

핵심 수식.

- 01. $q_{n+1} = q_n + \Delta t \partial H / \partial p$
- 02. $p_{n+1} = p_n - \Delta t \partial H / \partial q$
- 03. energy error bounded oscillatory
- 04. phase volume preserved

유도 뼈대. 위치와 운동량을 leapfrog 방식으로 staggered update한다.

검산. Euler 방법과 leapfrog를 에너지 drift 관점에서 비교하라.

자가 점검. Symplectic integrator와 검산에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

고전역학

36. Symplectic integrator와 검산 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 고전역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $q_{n+1} = q_n + \Delta t \partial H / \partial p$
- 02. $p_{n+1} = p_n - \Delta t \partial H / \partial q$
- 03. energy error bounded oscillatory
- 04. phase volume preserved

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

고전역학

36. Symplectic integrator와 검산 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 위치와 운동량을 leapfrog 방식으로 staggered update한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $q_{n+1} = q_n + \Delta t \partial H / \partial p$

02. $p_{n+1} = p_n - \Delta t \partial H / \partial q$

03. energy error bounded oscillatory

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

고전역학

36. Symplectic integrator와 검산 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 장시간 Hamilton simulation에서는 구조 보존이 중요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
02. large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 빠대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

고전역학

36. Symplectic integrator와 검산 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 고전역학의 Symplectic integrator와 검산 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

고전역학

36. Symplectic integrator와 검산 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

에너지가 완벽히 보존되지 않아도 drift가 작고 위상공간 구조가 보존된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 3

열역학/통계역학

열역학/통계역학 Part는 20개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치검산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: 열역학 제1법칙, 엔트로피와 제2법칙, 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환, Maxwell 관계, 상평형과 Clapeyron 방정식, Microcanonical ensemble, Canonical ensemble, Grand canonical ensemble. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

열역학/통계역학

37. 열역학 제1법칙

개념 지도와 물리량 정의

열역학 제1법칙은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 에너지는 상태함수지만 열과 일은 경로함수다.

핵심 수식.

$$01. dU = \delta Q - \delta W$$

$$02. \delta W = p dV$$

$$03. dU = T dS - p dV + \mu dN$$

$$04. C_V = (\partial U / \partial T)_V$$

유도 뼈대. 닫힌계, 열린계, 부호 convention을 먼저 고정한다.

검산. 열 Q 가 상태함수가 아닌 이유를 순환과정으로 설명하라.

자가 점검. 열역학 제1법칙에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

37. 열역학 제1법칙 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $dU = \delta Q - \delta W$

02. $\delta W = p dV$

03. $dU = T dS - p dV + \mu dN$

04. $C_V = (\partial U / \partial T)_V$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

37. 열역학 제1법칙 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 닫힌계, 열린계, 부호 convention을 먼저 고정한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $dU = \delta Q - \delta W$

02. $\delta W = p dV$

03. $dU = T dS - p dV + \mu dN$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

37. 열역학 제1법칙 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 에너지는 상태함수지만 열과 일은 경로함수다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

37. 열역학 제1법칙 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 열역학 제1법칙 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

37. 열역학 제1법칙 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

미시 통계역학으로 갈 때도 에너지 보존이 첫 제약이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결 되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

38. 엔트로피와 제2법칙

개념 지도와 물리량 정의

엔트로피와 제2법칙은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 자발 과정의 방향은 에너지뿐 아니라 상태수 증가가 정한다.

핵심 수식.

$$01. dS \geq \delta Q_{rev}/T$$

$$02. \Delta S_{univ} \geq 0$$

$$03. T^{-1} = (\partial S / \partial U)_{V,N}$$

$$04. S = k_B \ln \Omega$$

유도 뼈대. 가역 경로를 상상해 $\delta Q_{rev}/T$ 를 적분한다.

검산. 단열 자유팽창에서 $Q=0$ 인데 S 가 증가하는 이유를 말하라.

자가 점검. 엔트로피와 제2법칙에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

38. 엔트로피와 제2법칙 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $dS \geq \delta Q_{rev}/T$
02. $\Delta S_{univ} \geq 0$
03. $T^{-1} = (\partial S / \partial U)_{V,N}$
04. $S = k_B \ln \Omega$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

38. 엔트로피와 제2법칙 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 가역 경로를 상상해 $\delta Q_{rev}/T$ 를 적분한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $dS \geq \delta Q_{rev}/T$

02. $\Delta S_{univ} \geq 0$

03. $T^{-1} = (\partial S / \partial U)_{V,N}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

38. 엔트로피와 제2법칙 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 자발 과정의 방향은 에너지뿐 아니라 상태수 증가가 정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, `memory_kernel`, `tensor_response`, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter `epsilon`
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

38. 엔트로피와 제2법칙 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 엔트로피와 제2법칙 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

38. 엔트로피와 제2법칙 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

미시상태 수와 거시 irreversibility를 연결한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

39. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환

개념 지도와 물리량 정의

열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 제어변수에 맞는 퍼텐셜을 고르면 평형 조건이 최소화로 바뀐다.

핵심 수식.

01. $F=U-TS$

02. $G=U-TS+pV$

03. $H=U+pV$

04. $\Omega=U-TS-\mu N$

유도 뼈대. 고정된 intensive/extensive 변수에 맞춰 Legendre 변환한다.

검산. T,p가 고정된 실험에서는 왜 Gibbs 자유에너지를 쓰는가?

자가 점검. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

39. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $F=U-TS$

02. $G=U-TS+pV$

03. $H=U+pV$

04. $\Omega=U-TS-\mu N$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

39. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 고정한 intensive/extensive 변수에 맞춰 Legendre 변환한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F=U-TS$

02. $G=U-TS+pV$

03. $H=U+pV$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

39. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 제어변수에 맞는 퍼텐셜을 고르면 평형 조건이 최소화로 바뀐다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

39. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

39. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

상전이, 화학평형, grand canonical ensemble의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

40. Maxwell 관계

개념 지도와 물리량 정의

Maxwell 관계는/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 상태함수의 이계미분 교환성이 측정 가능한 관계를 만든다.

핵심 수식.

$$01. dF = -S dT - p dV$$

$$02. (\partial S / \partial V)_T = (\partial p / \partial T)_V$$

$$03. dG = -S dT + V dp$$

$$04. (\partial S / \partial p)_T = -(\partial V / \partial T)_p$$

유도 뼈대. 적절한 퍼텐셜의 자연변수를 쓰고 혼합미분을 비교한다.

검산. 하나의 퍼텐셜에서 Maxwell 관계를 직접 유도해보라.

자가 점검. Maxwell 관계에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

40. Maxwell 관계 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. dF = -S dT - p dV$$

$$02. (\partial S / \partial V)_T = (\partial p / \partial T)_V$$

$$03. dG = -S dT + V dp$$

$$04. (\partial S / \partial p)_T = -(\partial V / \partial T)_p$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

40. Maxwell 관계 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 적절한 퍼텐셜의 자연변수를 쓰고 혼합미분을 비교한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $dF = -S dT - p dV$

02. $(\partial S / \partial V)_T = (\partial p / \partial T)_V$

03. $dG = -S dT + V dp$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

40. Maxwell 관계 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 상태함수의 이계미분 교환성이 측정 가능한 관계를 만든다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, `memory kernel`, `tensor response`, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter `epsilon`
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

40. Maxwell 관계 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Maxwell 관계 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

40. Maxwell 관계 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

직접 재기 어려운 엔트로피 변화를 p, V, T 측정으로 바꾼다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

41. 상평형과 Clapeyron 방정식

개념 지도와 물리량 정의

상평형과 Clapeyron 방정식은 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 공존선에서는 두 상의 화학퍼텐셜이 같다.

핵심 수식.

01. $\mu_\alpha(T,p)=\mu_\beta(T,p)$

02. $dp/dT = \Delta s/\Delta v$

03. $dp/dT = L/(T \Delta v)$

04. Gibbs phase rule: $f=c-p+2$

유도 뼈대. $d\mu=-s dT+v dp$ 를 두 상에 적용해 기울기를 얻는다.

검산. 물의 융해곡선 기울기가 음수인 이유를 Δv 로 설명하라.

자가 점검. 상평형과 Clapeyron 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

41. 상평형과 Clapeyron 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mu_\alpha(T,p)=\mu_\beta(T,p)$
02. $dp/dT = \Delta s/\Delta v$
03. $dp/dT = L/(T \Delta v)$
04. Gibbs phase rule: $f=c-p+2$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

41. 상평형과 Clapeyron 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. $d\mu = s dT + v dp$ 를 두 상에 적용해 기울기를 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mu_\alpha(T, p) = \mu_\beta(T, p)$

02. $dp/dT = \Delta s / \Delta v$

03. $dp/dT = L / (T \Delta v)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

41. 상평형과 Clapeyron 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 공존선에서는 두 상의 화학퍼텐셜이 같다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

41. 상평형과 Clapeyron 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 상평형과 Clapeyron 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

41. 상평형과 Clapeyron 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

증기압, 융해곡선, 임계점 해석에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

42. Microcanonical ensemble

개념 지도와 물리량 정의

Microcanonical ensemble은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고립계의 기본 ensemble이다.

핵심 수식.

01. $\Omega(E, V, N) = \text{Tr } \delta(E - H)$

02. $S = k_B \ln \Omega$

03. $1/T = \partial S / \partial E$

04. $p/T = \partial S / \partial V$

유도 뼈대. 에너지 shell 위에서 모든 접근 가능한 미시상태를 동일하게 둔다.

검산. microcanonical에서 온도를 어떻게 정의하는지 설명하라.

자가 점검. Microcanonical ensemble에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

42. Microcanonical ensemble - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Omega(E, V, N) = \text{Tr } \delta(E - H)$

02. $S = k_B \ln \Omega$

03. $1/T = \partial S / \partial E$

04. $p/T = \partial S / \partial V$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

42. Microcanonical ensemble - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 에너지 shell 위에서 모든 접근 가능한 미시상태를 동일하게 둔다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\Omega(E, V, N) = \text{Tr } \delta(E - H)$

02. $S = k_B \ln \Omega$

03. $1/T = \partial S / \partial E$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

42. Microcanonical ensemble - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고립계의 기본 ensemble이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory_kernel, tensor_response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

42. Microcanonical ensemble - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Microcanonical ensemble 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

42. Microcanonical ensemble - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

canonical ensemble은 큰 heat bath와 약하게 접촉한 부분계에서 나온다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

43. Canonical ensemble

개념 지도와 물리량 정의

Canonical ensemble은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 온도 고정계는 partition function 하나로 열역학을 만든다.

핵심 수식.

01. $Z = \text{Tr} \exp(-\beta H)$

02. $F = -k_B T \ln Z$

03. $\langle E \rangle = -\partial \ln Z / \partial \beta$

04. $C_V = k_B \beta^2 (\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2)$

유도 뼈대. Boltzmann weight를 정규화하고 $\ln Z$ 의 미분을 계산한다.

검산. 열용량이 에너지 fluctuation과 연결되는 이유를 유도하라.

자가 점검. Canonical ensemble에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

43. Canonical ensemble - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $Z = \text{Tr} \exp(-\beta H)$
02. $F = -k_B T \ln Z$
03. $\langle E \rangle = -\partial \ln Z / \partial \beta$
04. $C_V = k_B \beta^2 (\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

43. Canonical ensemble - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Boltzmann weight를 정규화하고 $\ln Z$ 의 미분을 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $Z = \text{Tr} \exp(-\beta H)$

02. $F = -k_B T \ln Z$

03. $\langle E \rangle = -\partial \ln Z / \partial \beta$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

43. Canonical ensemble - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 온도 고정계는 partition function 하나로 열역학을 만든다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

43. Canonical ensemble - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Canonical ensemble 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

43. Canonical ensemble - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

평형 통계역학의 중심 공식이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

44. Grand canonical ensemble

개념 지도와 물리량 정의

Grand canonical ensemble은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 입자수까지 교환하면 화학퍼텐셜이 자연변수다.

핵심 수식.

01. $\Xi = \text{Tr} \exp[-\beta(\mathbf{H} - \mu N)]$

02. $\Omega_G = -k_B T \ln \Xi$

03. $\langle N \rangle = k_B T \partial \ln \Xi / \partial \mu$

04. $P V = k_B T \ln \Xi$

유도 뼈대. N별 canonical partition function을 fugacity $z = \exp(\beta\mu)$ 로 합한다.

검산. μ 가 큰 양수이면 입자수가 어떻게 변하는지 직관을 말하라.

자가 점검. Grand canonical ensemble에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

44. Grand canonical ensemble - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \mathcal{E} = \text{Tr} \exp[-\beta(\mathbf{H} - \mu N)]$$

$$02. \Omega_G = -k_B T \ln \mathcal{E}$$

$$03. \langle N \rangle = k_B T \partial \ln \mathcal{E} / \partial \mu$$

$$04. P V = k_B T \ln \mathcal{E}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

44. Grand canonical ensemble - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. N별 canonical partition function을 fugacity $z=\exp(\beta\mu)$ 로 합한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathcal{E} = \text{Tr} \exp[-\beta(\mathbf{H} - \mu N)]$

02. $\Omega_G = -k_B T \ln \mathcal{E}$

03. $\langle N \rangle = k_B T \partial \ln \mathcal{E} / \partial \mu$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

44. Grand canonical ensemble - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 입자수까지 교환하면 화학퍼텐셜이 자연변수다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

44. Grand canonical ensemble - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Grand canonical ensemble 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

44. Grand canonical ensemble - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자기체, 흡착, 전자계, photon gas에 필요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

45. 이상기체와 equipartition

개념 지도와 물리량 정의

이상기체와 equipartition은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고전 quadratic 자유도 하나는 평균 에너지 $k_B T/2$ 를 가진다.

핵심 수식.

01. $pV = Nk_B T$
02. $U = 3/2 Nk_B T$
03. $\langle x_i \partial H / \partial x_i \rangle = k_B T$
04. $C_V = f/2 Nk_B$

유도 뼈대. Gaussian 적분으로 partition function을 계산한다.

검산. 회전/진동 자유도가 온도에 따라 켜지는 이유를 설명하라.

자가 점검. 이상기체와 equipartition에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

45. 이상기체와 equipartition - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $pV = Nk_B T$
02. $U = 3/2 Nk_B T$
03. $\langle x_i \partial H / \partial x_i \rangle = k_B T$
04. $C_V = f/2 Nk_B$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

45. 이상기체와 equipartition - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Gaussian 적분으로 partition function을 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $pV = Nk_B T$

02. $U = 3/2 Nk_B T$

03. $\langle x_i \partial H / \partial x_i \rangle = k_B T$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

45. 이상기체와 equipartition - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고전 quadratic 자유도 하나는 평균 에너지 $kBT/2$ 를 가진다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

45. 이상기체와 equipartition - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 이상기체와 equipartition 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

45. 이상기체와 equipartition - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

저온 양자계에서는 equipartition이 깨진다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

46. Bose/Fermi 분포

개념 지도와 물리량 정의

Bose/Fermi 분포는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 동일입자 대칭성이 점유수 분포를 바꾼다.

핵심 수식.

$$01. n_B(\varepsilon) = 1/(\exp(\beta(\varepsilon - \mu)) - 1)$$

$$02. n_F(\varepsilon) = 1/(\exp(\beta(\varepsilon - \mu)) + 1)$$

$$03. Z_{\text{mode}}^B = 1/(1 - z e^{-\beta\varepsilon})$$

$$04. Z_{\text{mode}}^F = 1 + z e^{-\beta\varepsilon}$$

유도 뼈대. mode별 occupation number를 합산한다.

검산. 왜 photon의 화학퍼텐셜은 보통 0인가?

자가 점검. Bose/Fermi 분포에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

46. Bose/Fermi 분포- 대표방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. n_B(\varepsilon) = 1/(\exp(\beta(\varepsilon - \mu)) - 1)$$

$$02. n_F(\varepsilon) = 1/(\exp(\beta(\varepsilon - \mu)) + 1)$$

$$03. Z_{\text{mode}}^B = 1/(1 - z e^{-\beta\varepsilon})$$

$$04. Z_{\text{mode}}^F = 1 + z e^{-\beta\varepsilon}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

46. Bose/Fermi 분포- 유도빠대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. mode별 occupation number를 합산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $n_B(\varepsilon) = 1/(\exp(\beta(\varepsilon - \mu)) - 1)$

02. $n_F(\varepsilon) = 1/(\exp(\beta(\varepsilon - \mu)) + 1)$

03. $Z_{\text{mode}}^B = 1/(1 - z e^{-\beta\varepsilon})$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 빠대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

46. Bose/Fermi 분포- 조건과근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 동일입자 대칭성이 점유수 분포를 바꾼다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

46. Bose/Fermi 분포- 계산루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Bose/Fermi 분포 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

46. Bose/Fermi 분포- 연구자메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전자, photon, phonon, 원자기체의 기본 공식이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

47. Blackbody와 Debye 모형

개념 지도와 물리량 정의

Blackbody와 Debye 모형은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 양자화된 boson 모드의 밀도상태가 열복사를 결정한다.

핵심 수식.

- 01. $u(\omega) = \hbar \omega^3 / (\pi^2 c^3) / (\exp(\beta \hbar \omega) - 1)$
- 02. $j = \sigma T^4$
- 03. $C_V \propto T^3$ at low T
- 04. $\omega_D^3 = 6\pi^2 n c_s^3$

유도 뼈대. mode density와 Bose 분포를 곱해 적분한다.

검산. Rayleigh-Jeans 발산이 왜 생기는지 고전 극한으로 설명하라.

자가 점검. Blackbody와 Debye 모형에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

47. Blackbody와 Debye 모형 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $u(\omega) = \hbar \omega^3 / (\pi^2 c^3) / (\exp(\beta \hbar \omega) - 1)$

02. $j = \sigma T^4$

03. $C_V \propto T^3$ at low T

04. $\omega_D^3 = 6\pi^2 n c_s^3$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

47. Blackbody와 Debye 모형 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. mode density와 Bose 분포를 곱해 적분한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $u(\omega) = \hbar\omega^3 / (\pi^2 c^3) / (\exp(\beta\hbar\omega) - 1)$

02. $j = \sigma T^4$

03. $C_V \propto T^3$ at low T

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

47. Blackbody와 Debye 모형 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 양자화된 boson 모드의 밀도상태가 열복사를 결정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

47. Blackbody와 Debye 모형 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Blackbody와 Debye 모형 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

47. Blackbody와 Debye 모형 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

열복사, phonon 열용량, 광자기체의 기본 구조다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

48. Virial 전개와 실제기체

개념 지도와 물리량 정의

Virial 전개와 실제기체는/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 상호작용은 밀도 전개 계수에 들어간다.

핵심 수식.

01. $p/(kBT) = \rho + B_2(T)\rho^2 + B_3(T)\rho^3 + \dots$

02. $B_2 = -1/2 \int (\exp(-\beta u(r)) - 1) d^3r$

03. $Z = pV/(NkBT)$

04. *van der Waals*: $(p + a n^2)(V - Nb) = NkBT$

유도 뼈대. Mayer f-function으로 pair potential을 적분한다.

검산. 인력과 배척력이 B_2 의 부호에 주는 영향을 말하라.

자가 점검. Virial 전개와 실제기체에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

48. Virial 전개와 실제기체 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $p/(kBT) = \rho + B_2(T)\rho^2 + B_3(T)\rho^3 + \dots$

02. $B_2 = -1/2 \int (\exp(-\beta u(r)) - 1) d^3r$

03. $Z = pV/(NkBT)$

04. *van der Waals*: $(p + a n^2)(V - Nb) = NkBT$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

48. Virial 전개와 실제기체 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Mayer function으로 pair potential을 적분한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \quad p/(kBT) = \rho + B_2(T)\rho^2 + B_3(T)\rho^3 + \dots$$

$$02. \quad B_2 = -1/2 \int (\exp(-\beta u(r)) - 1) d^3r$$

$$03. \quad Z = pV/(NkBT)$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

48. Virial 전개와 실제기체 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 상호작용은 밀도 전개 계수에 들어간다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

48. Virial 전개와 실제기체 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Virial 전개와 실제기체 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

48. Virial 전개와 실제기체 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

희박 기체에서 실제기체 correction을 체계화한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

49. Landau 평균장과 상전이

개념 지도와 물리량 정의

Landau 평균장과 상전이는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 질서변수와 대칭성으로 상전이를 모델링한다.

핵심 수식.

01. $F(m) = F_0 + a(T - T_c)m^{2+b} - hm^4$

02. $m \propto (T_c - T)^{1/2}$

03. $\chi \propto |T - T_c|^{-1}$

04. C has jump

유도 뼈대. free energy를 질서변수의 짝수 거듭제곱으로 전개한다.

검산. $b > 0$ 조건이 왜 안정성을 주는지 설명하라.

자가 점검. Landau 평균장과 상전이에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

49. Landau 평균장과 상전이 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $F(m) = F_0 + a(T - T_c)m^{2+b} - hm$

02. $m \propto (T_c - T)^{1/2}$

03. $\chi \propto |T - T_c|^{-1}$

04. C has jump

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

49. Landau 평균장과 상전이 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. free energy를 질서변수의 짝수 거듭제곱으로 전개한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F(m) = F_0 + a(T - T_c)m^2 + b m^4 - hm$

02. $m \propto (T_c - T)^{1/2}$

03. $\chi \propto |T - T_c|^{-1}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

49. Landau 평균장과 상전이 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 질서변수와 대칭성으로 상전이를 모델링한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

49. Landau 평균장과 상전이 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Landau 평균장과 상전이 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

49. Landau 평균장과 상전이 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

평균장은 보편성의 첫 근사지만 fluctuation을 과소평가한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

50. Ising 모형과 mean field

개념 지도와 물리량 정의

Ising 모형과 mean field은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 가장 단순한 이산 대칭 깨짐 모형이다.

핵심 수식.

$$01. H = -J \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j - h \sum_i s_i$$

$$02. m = \tanh[\beta(zJm + h)]$$

$$03. k_B T_c = zJ$$

$$04. \chi = \partial m / \partial h$$

유도 뼈대. 이웃 스핀을 평균장 zJm 으로 바꾼다.

검산. 1D Ising이 유한온도 상전이를 갖지 않는 이유를 생각해보라.

자가 점검. Ising 모형과 mean field에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

50. Ising 모형과 mean field - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $H = -J \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j - h \sum_i s_i$

02. $m = \tanh[\beta(zJm + h)]$

03. $k_B T_c = zJ$

04. $\chi = \partial m / \partial h$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

50. Ising 모형과 mean field - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 이웃 스핀을 평균장 zJm 으로 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H = -J \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j - h \sum_i s_i$

02. $m = \tanh[\beta(zJm + h)]$

03. $k_B T_c = zJ$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

50. Ising 모형과 mean field - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 가장 단순한 이산 대칭 깨짐 모형이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

50. Ising 모형과 mean field - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Ising 모형과 mean field 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

50. Ising 모형과 mean field - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

자성, lattice gas, binary alloy의 공통 모형이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

51. Critical scaling과 RG

개념 지도와 물리량 정의

Critical scaling과 RG은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 임계점 근처에서는 미시세부보다 스케일 불변성이 중요하다.

핵심 수식.

01. $\xi \propto |t|^{-\nu}$

02. $\chi \propto |t|^{-\gamma}$

03. $m \propto (-t)^\beta$

04. $\beta_g = d / d \ln b$

유도 뼈대. coarse-graining 후 coupling이 어떻게 흐르는지 본다.

검산. 상관길이가 발산하면 왜 평균장 근사가 위험한가?

자가 점검. Critical scaling과 RG에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

51. Critical scaling과 RG - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\xi \propto |t|^{-\nu}$

02. $\chi \propto |t|^{-\gamma}$

03. $m \propto (-t)^\beta$

04. $\beta_g = d \, g / d \ln b$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

51. Critical scaling과 RG - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. coarse-graining 후 coupling이 어떻게 흐르는지 본다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\xi \propto |t|^{-\nu}$

02. $\chi \propto |t|^{-\gamma}$

03. $m \propto (-t)^\beta$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

51. Critical scaling과 RG - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 임계점 근처에서는 미시세부보다 스케일 불변성이 중요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

51. Critical scaling과 RG - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Critical scaling과 RG 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

51. Critical scaling과 RG - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

보편성 class는 차원, 대칭성, 상호작용 범위로 정해진다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

52. Boltzmann 방정식

개념 지도와 물리량 정의

Boltzmann 방정식은 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 분포함수의 수송과 충돌이 비평형 relaxation을 만든다.

핵심 수식.

01. $\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f + \mathbf{F}/m \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = C[f]$

02. $H = \int f \ln f d^3x d^3v$

03. $dH/dt \leq 0$

04. local equilibrium: $f_0 \propto \exp[-\beta(p-\mu)^2/2m]$

유도 뼈대. 좌변은 phase-space advection, 우변은 collision integral이다.

검산. H-theorem이 시간가역성과 어떻게 조화되는지 생각해보라.

자가 점검. Boltzmann 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

52. Boltzmann 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f + \mathbf{F}/m \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = C[f]$

02. $H = \int f \ln f d^3x d^3v$

03. $dH/dt \leq 0$

04. local equilibrium: $f_0 \propto \exp[-\beta(p-\mu)^2/2m]$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

52. Boltzmann 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 좌변은 phase space advection, 우변은 collision integral이다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f + \mathbf{F}/m \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = C[f]$

02. $H = \int f \ln f d^3x d^3v$

03. $dH/dt \leq 0$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

52. Boltzmann 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 분포함수의 수송과 충돌이 비평형 relaxation을 만든다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

52. Boltzmann 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Boltzmann 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

52. Boltzmann 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

유체방정식은 Boltzmann 방정식의 moment로 얻는다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

53. Langevin과 Fokker-Planck

개념 지도와 물리량 정의

Langevin과 Fokker-Planck은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 잡음과 마찰은 평형에서 fluctuation과 dissipation 관계로 묶인다.

핵심 수식.

01. $m \dot{v} = -\gamma v + \eta(t)$
02. $\langle \eta(t) \eta(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta(t - t')$
03. $\partial_t P = -\partial_x (AP) + 1/2 \partial_x^2 (BP)$
04. $D = k_B T / \gamma$

유도 뼈대. 확률미분방정식의 drift와 diffusion을 probability equation으로 바꾼다.

검산. 마찰이 커질수록 확산계수는 어떻게 변하는가?

자가 점검. Langevin과 Fokker-Planck에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

53. Langevin과 Fokker-Planck - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $m \dot{v} = -\gamma v + \eta(t)$
02. $\langle \eta(t) \eta(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta(t - t')$
03. $\partial_t P = -\partial_x (AP) + 1/2 \partial_x^2 (BP)$
04. $D = k_B T / \gamma$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

53. Langevin과 Fokker-Planck - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 확률미분방정식의 drift와 diffusion을 probability equation으로 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $m \dot{v} = -\gamma v + \eta(t)$

02. $\langle \eta(t) \eta(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta(t - t')$

03. $\partial_t P = -\partial_x (AP) + 1/2 \partial_x^2 (BP)$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

53. Langevin과 Fokker-Planck - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 잡음과 마찰은 평형에서 fluctuation-dissipation 관계로 묶인다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

53. Langevin과 Fokker-Planck - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Langevin과 Fokker-Planck 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

53. Langevin과 Fokker-Planck - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Brownian motion, mesoscopic transport, 계측 잡음에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

54. Kubo와 fluctuation-dissipation

개념 지도와 물리량 정의

Kubo와 fluctuation-dissipation은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 평형 fluctuation이 외부장 response를 결정한다.

핵심 수식.

01. $\delta\langle\mathbf{A}(t)\rangle = \int \chi_{AB}^R(t-t') f(t') dt'$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle[\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)]\rangle$
03. $\mathbf{S}(\omega) = 2\hbar/(1-e^{-\beta\hbar\omega}) \text{Im}\chi^R(\omega)$
04. classical: $\mathbf{S}(\omega) = 2kBT \chi''(\omega)/\omega$

유도 뼈대. 섭동 Hamiltonian $H' = -f(t)B$ 를 넣고 1차 항만 남긴다.

검산. 흡수와 잡음이 같은 함수의 다른 얼굴인 이유를 말해보라.

자가 점검. Kubo와 fluctuation-dissipation에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

54. Kubo와 fluctuation-dissipation - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\delta\langle\mathbf{A}(t)\rangle = \int \chi_{AB}^R(t-t') f(t') dt'$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle[\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)]\rangle$
03. $\mathbf{S}(\omega) = 2\hbar/(1-e^{-\beta\hbar\omega}) \text{Im}\chi^R(\omega)$
04. classical: $\mathbf{S}(\omega) = 2kBT \chi''(\omega)/\omega$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

54. Kubo와 fluctuation-dissipation - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 섭동 Hamiltonian $H' = -f(t)B$ 를 넣고 1차 항만 남긴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\delta \langle A(t) \rangle = \int \chi_{AB}^R(t-t') f(t') dt'$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar) \theta(t) \langle [A(t), B(0)] \rangle$
03. $S(\omega) = 2\hbar / (1 - e^{-\beta \hbar \omega}) \text{Im} \chi^R(\omega)$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

54. Kubo와 fluctuation-dissipation - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 평형 fluctuation이 외부장 response를 결정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

54. Kubo와 fluctuation-dissipation - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Kubo와 fluctuation-dissipation 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

54. Kubo와 fluctuation-dissipation - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전도도, susceptibility, noise spectroscopy의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

55. Jarzynski와 비평형 일

개념 지도와 물리량 정의

Jarzynski와 비평형 일은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 비평형 과정에서도 자유에너지 차이를 추정할 수 있다.

핵심 수식.

01. $\langle \exp(-\beta W) \rangle = \exp(-\beta \Delta F)$
02. $W = \int \partial \mathbf{H} / \partial \lambda \dot{\lambda} dt$
03. Crooks: $P_F(W) / P_R(-W) = \exp[\beta(W - \Delta F)]$
04. $\langle W \rangle = \Delta F$

유도 뼈대. 같은 protocol을 많이 반복해 work distribution을 샘플링한다.

검산. Jensen 부등식으로 제2법칙을 얻어보라.

자가 점검. Jarzynski와 비평형 일에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

55. Jarzynski와 비평형 일 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\langle \exp(-\beta W) \rangle = \exp(-\beta \Delta F)$
02. $W = \int \partial H / \partial \lambda \dot{\lambda} dt$
03. Crooks: $P_F(W) / P_R(-W) = \exp[\beta(W - \Delta F)]$
04. $\langle W \rangle = \Delta F$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

55. Jarzynski와 비평형 일 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 같은 protocol을 많이 반복해 work distribution을 샘플링한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\langle \exp(-\beta W) \rangle = \exp(-\beta \Delta F)$

02. $W = \int \partial H / \partial \lambda \dot{\lambda} dt$

03. Crooks: $P_F(W)/P_R(-W) = \exp[\beta(W - \Delta F)]$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

55. Jarzynski와 비평형 일 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 비평형 과정에서도 자유에너지 차이를 추정할 수 있다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

55. Jarzynski와 비평형 일 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 Jarzynski와 비평형 일 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

55. Jarzynski와 비평형 일 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

작은계 열역학과 single-molecule 실험의 기본 결과다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

열역학/통계역학

56. 정보와 열역학

개념 지도와 물리량 정의

정보와 열역학은/는 열역학/통계역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 정보 삭제와 열 방출은 물리적으로 연결된다.

핵심 수식.

01. $S_{vN} = -k_B \text{Tr } \rho \ln \rho$
02. $I(X:Y) = S_X + S_Y - S_{XY}$
03. Landauer: $Q \geq k_B T \ln 2$
04. relative entropy $D(\rho || \sigma) \geq 0$

유도 뼈대. 엔트로피를 확률분포 또는 밀도행렬의 함수로 계산한다.

검산. 비트 하나를 지울 때 왜 최소 열이 필요한지 설명하라.

자가 점검. 정보와 열역학에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

열역학/통계역학

56. 정보와 열역학 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 열역학/통계역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $S_{VN} = -k_B \text{Tr } \rho \ln \rho$
02. $I(X:Y) = S_{X+Y} - S_{XY}$
03. Landauer: $Q \geq k_B T \ln 2$
04. relative entropy $D(\rho||\sigma) \geq 0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

열역학/통계역학

56. 정보와 열역학 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 엔트로피를 확률분포 또는 밀도행렬의 함수로 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $S_{vN} = -k_B \text{Tr } \rho \ln \rho$

02. $I(X:Y) = S_X + S_Y - S_{XY}$

03. Landauer: $Q \geq k_B T \ln 2$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

열역학/통계역학

56. 정보와 열역학 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 정보 삭제와 열 방출은 물리적으로 연결된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

열역학/통계역학

56. 정보와 열역학 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 열역학/통계역학의 정보와 열역학 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

열역학/통계역학

56. 정보와 열역학 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

계측, feedback, 양자정보, Maxwell demon 문제의 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 4

유체역학

유체역학 Part는 19개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치검산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: 연속체 가정과 물질미분, 질량보존과 연속방정식, Cauchy 응력과 운동량 보존, Navier-Stokes 방정식, Euler 방정식과 Bernoulli, Vorticity와 Kelvin 정리, Stokes 유동과 low Re, 경계층과 Blasius. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

유체역학

57. 연속체 가정과 물질미분

개념 지도와 물리량 정의

연속체 가정과 물질미분은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 유체는 많은 입자의 평균장이며, 관측 스케일이 평균자유행로보다 커야 한다.

핵심 수식.

01. $D/Dt = \partial/\partial t + u \cdot \nabla$
02. $\rho(x,t), u(x,t), p(x,t)$
03. $Kn = \lambda_{mfp}/L \ll 1$
04. $Re = \rho UL/\mu$

유도 뼈대. 입자와 함께 움직이는 미분 D/Dt 를 사용한다.

검산. Eulerian 관찰자와 Lagrangian 입자 관찰자의 차이를 말하라.

자가 점검. 연속체 가정과 물질미분에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

57. 연속체 가정과 물질미분 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $D/Dt = \partial/\partial t + u \cdot \nabla$

02. $\rho(x,t), u(x,t), p(x,t)$

03. $Kn = \lambda_{mfp}/L \ll 1$

04. $Re = \rho UL/\mu$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

57. 연속체 가정과 물질미분 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 입자와 함께 움직이는 미분 D/Dt 를 사용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $D/Dt = \partial/\partial t + u \cdot \nabla$

02. $\rho(x,t), u(x,t), p(x,t)$

03. $Kn = \lambda_{mfp}/L \ll 1$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

57. 연속체 가정과 물질미분 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 유체는 많은 입자의 평균장이며, 관측 스케일이 평균자유행로보다 커야 한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

57. 연속체 가정과 물질미분 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 연속체 가정과 물질미분 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

57. 연속체 가정과 물질미분 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Knudsen 수가 커지면 continuum Navier-Stokes가 깨진다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

58. 질량보존과 연속방정식

개념 지도와 물리량 정의

질량보존과 연속방정식은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. control volume 안의 질량 변화는 경계 flux로만 생긴다.

핵심 수식.

01. $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$
02. incompressible: $\nabla \cdot u = 0$
03. $D\rho/Dt = -\rho \nabla \cdot u$
04. mass flux $= \rho u \cdot n$

유도 뼈대. Reynolds transport theorem을 질량에 적용한다.

검산. 비압축 조건이 밀도 상수와 항상 같은 말인지 구분하라.

자가 점검. 질량보존과 연속방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

58. 질량보존과 연속방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$

02. incompressible: $\nabla \cdot u = 0$

03. $D\rho/Dt = -\rho \nabla \cdot u$

04. mass flux = $\rho u \cdot n$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

58. 질량보존과 연속방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Reynolds transport theorem을 질량에 적용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$

02. incompressible: $\nabla \cdot u = 0$

03. $D\rho/Dt = -\rho \nabla \cdot u$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

58. 질량보존과 연속방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. control volume 안의 질량 변화는 경계 flux로만 생긴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

58. 질량보존과 연속방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 질량보존과 연속방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

58. 질량보존과 연속방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

모든 유체 계산의 첫 번째 검산식이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

59. Cauchy 응력과 운동량 보존

개념 지도와 물리량 정의

Cauchy 응력과 운동량 보존은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 유체가 면을 통해 주고받는 힘은 응력텐서로 표현된다.

핵심 수식.

01. $\rho \, Du/Dt = \nabla \cdot \sigma + \rho b$

02. $\sigma = -pI + \tau$

03. $\tau = \mu(\nabla u + \nabla u^T) + \lambda(\nabla \cdot u)I$

04. traction $t = \sigma \cdot n$

유도 뼈대. 작은 체적요소에 Newton 법칙을 적용하고 표면힘을 발산으로 바꾼다.

검산. 압력항은 왜 isotropic 응력으로 들어가는지 말해보라.

자가 점검. Cauchy 응력과 운동량 보존에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

59. Cauchy 응력과 운동량 보존 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\rho Du/Dt = \nabla \cdot \sigma + \rho b$

02. $\sigma = -pI + \tau$

03. $\tau = \mu(\nabla u + \nabla u^T) + \lambda(\nabla \cdot u)I$

04. traction $t = \sigma \cdot n$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

59. Cauchy 응력과 운동량 보존 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 체적요소에 Newton 법칙을 적용하고 표면힘을 발산으로 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \rho Du/Dt = \nabla \cdot \sigma + \rho b$$

$$02. \sigma = -pI + \tau$$

$$03. \tau = \mu(\nabla u + \nabla u^T) + \lambda(\nabla \cdot u)I$$

$$04. \text{boundary/initial condition closes the problem}$$

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

59. Cauchy 응력과 운동량 보존 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 유체가 면을 통해 주고받는 힘은 응력텐서로 표현된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

59. Cauchy 응력과 운동량 보존 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 Cauchy 응력과 운동량 보존 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

59. Cauchy 응력과 운동량 보존 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

solid mechanics와 fluid mechanics가 같은 연속체 언어를 쓴다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

60. Navier-Stokes 방정식

개념 지도와 물리량 정의

Navier-Stokes 방정식은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. Newtonian, incompressible, constant viscosity 가정에서 달한다.

핵심 수식.

01. $\rho(\partial_t u + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f$
02. $\nabla \cdot u = 0$
03. $\nu = \mu / \rho$
04. energy dissipation $\varepsilon = 2\nu \mathbf{S}_{ij} \mathbf{S}_{ij}$

유도 뼈대. 운동량 보존에 선형 점성 constitutive law를 넣는다.

검산. Reynolds 수가 비선형항/점성항 비율인 것을 확인하라.

자가 점검. Navier-Stokes 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

60. Navier-Stokes 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\rho(\partial_t u + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f$

02. $\nabla \cdot u = 0$

03. $\nu = \mu / \rho$

04. energy dissipation $\varepsilon = 2\nu \mathbf{S}_{ij} \mathbf{S}_{ij}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

60. Navier-Stokes 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 운동량 보존에 선형 점성 constitutive law를 넣는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \rho(\partial_t u + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f$$

$$02. \nabla \cdot u = 0$$

$$03. \nu = \mu / \rho$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

60. Navier-Stokes 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. Newtonian, incompressible, constant viscosity 가정에서 단한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

60. Navier-Stokes 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 Navier-Stokes 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

60. Navier-Stokes 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

비선형 advection과 점성 diffusion의 경쟁이 유체 현상을 만든다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

61. Euler 방정식과 Bernoulli

개념 지도와 물리량 정의

Euler 방정식과 Bernoulli는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 점성을 무시할 수 있는 영역에서는 Euler 방정식을 쓴다.

핵심 수식.

- 01. $\rho Du/Dt = -\nabla p + \rho g$
- 02. $\partial_t \varphi + 1/2 |\nabla \varphi|^2 + p/\rho + gz = \text{const}$
- 03. steady streamline: $p + 1/2 \rho u^2 + \rho gz = \text{const}$
- 04. irrotational: $u = \nabla \varphi$

유도 뼈대. 속도와 운동방정식을 streamline 또는 potential에 적분한다.

검산. Bernoulli 식을 적용하면 안 되는 상황을 하나 말하라.

자가 점검. Euler 방정식과 Bernoulli에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

61. Euler 방정식과 Bernoulli - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\rho Du/Dt = -\nabla p + \rho g$
02. $\partial_t \varphi + 1/2 |\nabla \varphi|^2 + p/\rho + gz = \text{const}$
03. steady streamline: $p + 1/2 \rho u^2 + \rho gz = \text{const}$
04. irrotational: $u = \nabla \varphi$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

61. Euler 방정식과 Bernoulli - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 속도와 운동방정식을 streamline 또는 potential에 적분한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\rho Du/Dt = -\nabla p + \rho g$
02. $\partial_t \varphi + 1/2 |\nabla \varphi|^2 + p/\rho + gz = \text{const}$
03. steady streamline: $p + 1/2 \rho u^2 + \rho gz = \text{const}$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

61. Euler 방정식과 Bernoulli - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 점성을 무시할 수 있는 영역에서는 Euler 방정식을 쓴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

61. Euler 방정식과 Bernoulli - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 Euler 방정식과 Bernoulli 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

61. Euler 방정식과 Bernoulli - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

날개, 노즐, 수면파의 컷 근사다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

62. Vorticity와 Kelvin 정리

개념 지도와 물리량 정의

Vorticity와 Kelvin 정리는/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 회전 성분은 vortex stretching과 점성확산으로 변한다.

핵심 수식.

01. $\omega = \nabla \times u$
02. $D\omega/Dt = (\omega \cdot \nabla)u + \nu \nabla^2 \omega$
03. $\Gamma = \oint u \cdot dl$
04. $D\Gamma/Dt = 0$ for inviscid barotropic conservative force

유도 뼈대. Navier-Stokes에 curl을 취해 압력을 제거한다.

검산. 2D 유동에서 vortex stretching이 사라지는 이유를 말하라.

자가 점검. Vorticity와 Kelvin 정리에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

62. Vorticity와 Kelvin 정리 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\omega = \nabla \times u$

02. $D\omega/Dt = (\omega \cdot \nabla)u + \nu \nabla^2 \omega$

03. $\Gamma = \oint u \cdot dl$

04. $D\Gamma/Dt = 0$ for inviscid barotropic conservative force

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

62. Vorticity와 Kelvin 정리 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Navier-Stokes에 curl을 취해 압력을 제거한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\omega = \nabla \times u$

02. $D\omega/Dt = (\omega \cdot \nabla)u + \nu \nabla^2 \omega$

03. $\Gamma = \oint u \cdot dl$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

62. Vorticity와 Kelvin 정리 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 회전 성분은 vortex stretching과 점성확산으로 변한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

62. Vorticity와 Kelvin 정리 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 Vorticity와 Kelvin 정리 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

62. Vorticity와 Kelvin 정리 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

난류, 경계층, 양력, 지구유체의 핵심 변수다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

63. Stokes 유동과 low Re

개념 지도와 물리량 정의

Stokes 유동과 low Re은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관성보다 점성이 큰 미시/느린 유동이다.

핵심 수식.

- 01. $Re \ll 1$
- 02. $0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f$
- 03. $\nabla \cdot u = 0$
- 04. sphere drag $F = 6\pi\mu a U$

유도 뼈대. Navier-Stokes에서 비선형 관성항을 버린다.

검산. Stokes 유동이 시간반전 대칭에 가까워지는 의미를 설명하라.

자가 점검. Stokes 유동과 low Re에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

63. Stokes 유동과 low Re - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01.** $Re \ll 1$
- 02.** $0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f$
- 03.** $\nabla \cdot u = 0$
- 04.** sphere drag $F = 6\pi\mu a U$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

63. Stokes 유동과 low Re - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Navier-Stokes에서 비선형 관성항을 버린다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $Re \ll 1$

02. $0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f$

03. $\nabla \cdot u = 0$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

63. Stokes 유동과 low Re - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관성보다 점성이 큰 미시/느린 유동이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

63. Stokes 유동과 low Re - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 Stokes 유동과 low Re 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

63. Stokes 유동과 low Re - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

미생물, microfluidics, colloid dynamics의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

64. 경계층과 Blasius

개념 지도와 물리량 정의

경계층과 Blasius은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 큰 Re 에서도 벽 근처 얇은 층에서는 점성이 중요하다.

핵심 수식.

01. $\delta \sim L/\sqrt{(Re_L)}$

02. $u\partial_x u + v\partial_y u = U dU/dx + \nu \partial_y^2 u$

03. $\eta = y \sqrt{(U/(\nu x))}$

04. $f''' + 1/2 f f'' = 0$

유도 뼈대. x방향 변화가 y방향 변화보다 느리다는 scaling을 쓴다.

검산. no-slip 조건이 경계층을 만드는 이유를 말하라.

자가 점검. 경계층과 Blasius에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

64. 경계층과 Blasius - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\delta \sim L/\sqrt{(\text{Re}_L)}$

02. $u\partial_x u + v\partial_y u = U dU/dx + \nu \partial_y^2 u$

03. $\eta = y \sqrt{U/(\nu x)}$

04. $f''' + 1/2 f f'' = 0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

64. 경계층과 Blasius - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. x방향 변화가 y방향 변화보다 느리다는 scaling을 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\delta \sim L/\sqrt{(\text{Re}_L)}$

02. $u\partial_x u + v\partial_y u = U dU/dx + \nu \partial_y^2 u$

03. $\eta = y \sqrt{U/(\nu x)}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

64. 경계층과 Blasius - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 큰 Re 에서도 벽 근처 얇은 층에서는 점성이 중요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

64. 경계층과 Blasius - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 경계층과 Blasius 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

64. 경계층과 Blasius - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

drag, separation, heat transfer의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

65. Poiseuille와 pipe flow

개념 지도와 물리량 정의

Poiseuille와 pipe flow은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 층류 원관 유동은 정확해가 있다.

핵심 수식.

01. $u(r)=\Delta p/(4\mu L)(R^2-r^2)$

02. $Q=\pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$

03. $\tau_w=R \Delta p/(2L)$

04. $f_D=64/\text{Re}$

유도 뼈대. 원통좌표에서 정상 완전발달 Navier-Stokes를 적분한다.

검산. 유량이 반지름 네제곱에 비례하는 이유를 감각적으로 설명하라.

자가 점검. Poiseuille와 pipe flow에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

65. Poiseuille와 pipe flow - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $u(r) = \Delta p / (4\mu L) (R^2 - r^2)$

02. $Q = \pi R^4 \Delta p / (8\mu L)$

03. $\tau_w = R \Delta p / (2L)$

04. $f_D = 64 / \text{Re}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

65. Poiseuille와 pipe flow - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 원통좌표에서 정상 완전발달 Navier-Stokes를 적분한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $u(r) = \Delta p / (4\mu L) (R^2 - r^2)$

02. $Q = \pi R^4 \Delta p / (8\mu L)$

03. $\tau_w = R \Delta p / (2L)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

65. Poiseuille와 pipe flow - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 층류 원관 유동은 정확해가 있다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

65. Poiseuille와 pipe flow - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 Poiseuille와 pipe flow 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

65. Poiseuille와 pipe flow - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전자회로의 저항과 유체 저항을 비교할 수 있다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

66. Lubrication 근사

개념 지도와 물리량 정의

Lubrication 근사는/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 얇은 틈에서는 압력구배가 큰 면내 방향으로 작용한다.

핵심 수식.

01. $h/L \ll 1$

02. $\partial p / \partial z \sim 0$

03. $\partial p / \partial x = \mu \partial^2 u / \partial z^2$

04. $\partial / \partial x (h^3 \partial p / \partial x) = 6\mu U \partial h / \partial x$

유도 뼈대. 작은 aspect ratio로 방정식을 차수별로 줄인다.

검산. 압력이 두께 방향으로 거의 일정한 이유를 scaling으로 말하라.

자가 점검. Lubrication 근사에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

66. Lubrication 근사 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $h/L \ll 1$

02. $\partial p / \partial z \sim 0$

03. $\partial p / \partial x = \mu \partial^2 u / \partial z^2$

04. $\partial / \partial x (h^3 \partial p / \partial x) = 6\mu U \partial h / \partial x$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

66. Lubrication 근사 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 aspect ratio로 방정식을 차수별로 줄인다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $h/L \ll 1$

02. $\partial p / \partial z \sim 0$

03. $\partial p / \partial x = \mu \partial^2 u / \partial z^2$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

66. Lubrication 근사 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 얇은 틈에서는 압력구배가 큰 면내 방향으로 작용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

66. Lubrication 근사 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 Lubrication 근사 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

66. Lubrication 근사 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

베어링, 코팅, MEMS, 생체유헬에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

67. 표면장력과 capillary 현상

개념 지도와 물리량 정의

표면장력과 capillary 현상은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 계면 에너지가 압력 jump와 모세관 길이를 만든다.

핵심 수식.

01. $\Delta p = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$

02. $Ca = \mu U / \gamma$

03. $Bo = \rho g L^2 / \gamma$

04. $l_c = \sqrt{\gamma / (\rho g)}$

유도 뼈대. 계면의 곡률과 에너지 변화를 연결한다.

검산. 작은 물방울에서 중력보다 표면장력이 중요한 이유를 Bo로 말하라.

자가 점검. 표면장력과 capillary 현상에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

67. 표면장력과 capillary 현상 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Delta p = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$

02. $Ca = \mu U / \gamma$

03. $Bo = \rho g L^2 / \gamma$

04. $l_c = \sqrt{\gamma / (\rho g)}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

67. 표면장력과 capillary 현상 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 계면의 곡률과 에너지 변화를 연결한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\Delta p = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$

02. $Ca = \mu U / \gamma$

03. $Bo = \rho g L^2 / \gamma$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

67. 표면장력과 capillary 현상 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 계면 에너지가 압력 jump와 모세관 길이를 만든다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

67. 표면장력과 capillary 현상 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 표면장력과 capillary 현상 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

67. 표면장력과 capillary 현상 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

방울, 젖음, inkjet, microfluidics의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

68. 압축성 Euler와 Mach 수

개념 지도와 물리량 정의

압축성 Euler와 Mach 수는/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 유속이 음속과 비슷하면 밀도 변화와 음파가 중요하다.

핵심 수식.

$$01. \partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$02. \partial_t (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u + p I) = 0$$

$$03. M = U/c_s$$

$$04. c_s^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$$

유도 뼈대. 질량, 운동량, 에너지 보존형 방정식을 쓴다.

검산. $M < 0.3$ 에서 비압축 근사가 자주 쓰이는 이유를 말하라.

자가 점검. 압축성 Euler와 Mach 수에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

68. 압축성 Euler와 Mach 수 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$02. \partial_t (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u + p I) = 0$$

$$03. M = U/c_s$$

$$04. c_s^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

68. 압축성 Euler와 Mach 수 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 질량, 운동량, 에너지 보존형 방정식을 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$

02. $\partial_t (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u + p I) = 0$

03. $M = U/c_s$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

68. 압축성 Euler와 Mach 수 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 유속이 음속과 비슷하면 밀도 변화와 음파가 중요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

68. 압축성 Euler와 Mach 수 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 압축성 Euler와 Mach 수 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

68. 압축성 Euler와 Mach 수 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

노즐, 충격파, 항공우주, 폭발 유동의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

69. 충격파와 Rankine-Hugoniot

개념 지도와 물리량 정의

충격파와 Rankine-Hugoniot은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 불연속면을 통과해 보존량 flux가 맞아야 한다.

핵심 수식.

01. $[\rho u_n]=0$
02. $[\rho u_n^{2+p}]=0$
03. $[(E+p)u_n]=0$
04. entropy increases across shock

유도 뼈대. 얇은 shock를 감싸는 control volume에 보존법칙을 적용한다.

검산. shock에서 엔트로피가 증가한다는 말이 왜 방향성을 주는가?

자가 점검. 충격파와 Rankine-Hugoniot에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

69. 충격파와 Rankine-Hugoniot - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $[\rho u_n]=0$
- 02. $[\rho u_n^{2+p}]=0$
- 03. $[(E+p)u_n]=0$
- 04. entropy increases across shock

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

69. 충격파와 Rankine-Hugoniot - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 얇은 shock를 감싸는 control volume에 보존법칙을 적용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $[\rho u_n]=0$
02. $[\rho u_n^{2+p}]=0$
03. $[(E+p)u_n]=0$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

69. 충격파와 Rankine-Hugoniot - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 불연속면을 통과해 보존량 flux가 맞아야 한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

69. 충격파와 Rankine-Hugoniot - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 충격파와 Rankine-Hugoniot 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

69. 충격파와 Rankine-Hugoniot - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

초음속 유동과 폭발파 해석에서 필수다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

70. 난류와 Kolmogorov scaling

개념 지도와 물리량 정의

난류와 Kolmogorov scaling은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 큰 Re 유동은 넓은 스케일 범위의 에너지 cascade를 갖는다.

핵심 수식.

- 01. $Re \gg 1$
- 02. $E(k) \sim C \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$
- 03. $\eta_K = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$
- 04. $u_l \sim (\varepsilon l)^{1/3}$

유도 뼈대. 관성범위에서 ε 만이 에너지 전달률이라고 가정한다.

검산. 왜 난류는 평균장만으로 설명하기 어려운가?

자가 점검. 난류와 Kolmogorov scaling에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

70. 난류와 Kolmogorov scaling - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $Re \gg 1$
- 02. $E(k) \sim C \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$
- 03. $\eta_K = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$
- 04. $u_l \sim (\varepsilon l)^{1/3}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

70. 난류와 Kolmogorov scaling - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 관성범위에서 ε 만이 에너지 전달률이라고 가정한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $Re \gg 1$

02. $E(k) \sim C \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$

03. $\eta_K = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

70. 난류와 Kolmogorov scaling - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 큰 Re 유동은 넓은 스케일 범위의 에너지 cascade를 갖는다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

70. 난류와 Kolmogorov scaling - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 난류와 Kolmogorov scaling 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

70. 난류와 Kolmogorov scaling - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

난류 모델링, LES/DNS, 혼합 문제의 기준이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

71. RANS와 closure 문제

개념 지도와 물리량 정의

RANS와 closure 문제는/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 평균을 취하면 미지의 fluctuation stress가 생긴다.

핵심 수식.

01. $u=U+u'$
02. $\partial_t U + U \cdot \nabla U = -\nabla P/\rho + \nu \nabla^2 U - \nabla \cdot \langle u'u' \rangle$
03. Reynolds stress $\tau_R = -\rho \langle u'u' \rangle$
04. eddy viscosity ν_t

유도 뼈대. 비선형항의 평균이 평균의 비선형항과 다르다는 점이 핵심이다.

검산. closure가 필요한 이유를 식 하나로 설명하라.

자가 점검. RANS와 closure 문제에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

71. RANS와 closure 문제 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $u=U+u'$
02. $\partial_t U + U \cdot \nabla U = -\nabla P/\rho + \nu \nabla^2 U - \nabla \cdot \langle u' u' \rangle$
03. Reynolds stress $\tau_R = -\rho \langle u' u' \rangle$
04. eddy viscosity ν_t

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

71. RANS와 closure 문제 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 비선형항의 평균이 평균의 비선형항과 다르다는 점이 핵심이다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $u=U+u'$

02. $\partial_t U + U \cdot \nabla U = -\nabla P/\rho + \nu \nabla^2 U - \nabla \cdot \langle u' u' \rangle$

03. Reynolds stress $\tau_R = -\rho \langle u' u' \rangle$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

71. RANS와 closure 문제 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 평균을 취하면 미지의 fluctuation stress가 생긴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

71. RANS와 closure 문제 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 RANS와 closure 문제 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

71. RANS와 closure 문제 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

산업 CFD의 대부분은 closure model을 쓴다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

72. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld

개념 지도와 물리량 정의

선형 안정성: Orr-Sommerfeld은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 기본 유동 위 작은 교란의 성장률을 본다.

핵심 수식.

01. $u=U(y)+u'$
02. $u' \propto \exp[i(\alpha x - \omega t)]$
03. $(D^2 - \alpha^2)^2 \varphi = i\alpha Re[(U-c)(D^2 - \alpha^2) - U'']\varphi$
04. $\text{Im } \omega > 0$ unstable

유도 뼈대. Navier-Stokes를 선형화하고 normal mode를 넣는다.

검산. 성장률과 phase velocity를 구분해보라.

자가 점검. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

72. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $u=U(y)+u'$
02. $u' \propto \exp[i(\alpha x - \omega t)]$
03. $(D^2 - \alpha^2)^2 \varphi = i\alpha Re[(U-c)(D^2 - \alpha^2) - U'']\varphi$
04. $\text{Im } \omega > 0 \text{ unstable}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

72. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Navier-Stokes를 선형화하고 normal mode를 넣는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $u=U(y)+u'$

02. $u' \propto \exp[i(\alpha x - \omega t)]$

03. $(D^2 - \alpha^2)^2 \varphi = i\alpha Re[(U - c)(D^2 - \alpha^2) - U'']\varphi$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

72. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 기본 유동 위 작은 교란의 성장률을 본다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

72. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 선형 안정성: Orr-Sommerfeld 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

72. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

층류□난류 천이의 수학적 시작점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

73. 회전유체와 geostrophic balance

개념 지도와 물리량 정의

회전유체와 geostrophic balance은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 회전이 강하면 Coriolis 힘과 압력구배가 균형을 이룬다.

핵심 수식.

01. $Ro = U/(fL)$
02. $f \mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\nabla p / \rho$
03. Taylor–Proudman: $\partial u / \partial z \sim 0$
04. $PV = (\zeta + f)/h$

유도 뼈대. 작은 Rossby 수 전개로 leading balance를 잡는다.

검산. 북반구에서 저기압 주변 회전 방향을 geostrophic balance로 설명하라.

자가 점검. 회전유체와 geostrophic balance에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

73. 회전유체와 geostrophic balance - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $Ro = U/(fL)$
02. $f \mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\nabla p / \rho$
03. Taylor–Proudman: $\partial u / \partial z \sim 0$
04. $PV = (\zeta + f)/h$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

73. 회전유체와 geostrophic balance - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 Rossby 수 전개로 leading balance를 잡는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $Ro = U/(fL)$

02. $f \mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\nabla p / \rho$

03. Taylor–Proudman: $\partial \mathbf{u} / \partial z \sim 0$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

73. 회전유체와 geostrophic balance - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 회전이 강하면 Coriolis 힘과 압력구배가 균형을 이룬다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

73. 회전유체와 geostrophic balance - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 회전유체와 geostrophic balance 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

73. 회전유체와 geostrophic balance - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

대기, 해양, 행성유체의 기본 구조다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

74. Shallow water 방정식

개념 지도와 물리량 정의

Shallow water 방정식은/는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 수평 길이가 수심보다 크면 수직구조를 평균화한다.

핵심 수식.

$$01. \partial_t h + \nabla \cdot (hu) = 0$$

$$02. \partial_t u + u \cdot \nabla u = -g \nabla h$$

$$03. c = \sqrt{gh}$$

$$04. Fr = U / \sqrt{gh}$$

유도 뼈대. 깊이적분된 질량/운동량 보존을 쓴다.

검산. $Fr=1$ 이 어떤 임계성을 나타내는지 말하라.

자가 점검. Shallow water 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

74. Shallow water 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\partial_t h + \nabla \cdot (hu) = 0$

02. $\partial_t u + u \cdot \nabla u = -g \nabla h$

03. $c = \sqrt{gh}$

04. $Fr = U / \sqrt{gh}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

74. Shallow water 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 깊이적분된 질량/운동량 보존을 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\partial_t h + \nabla \cdot (hu) = 0$

02. $\partial_t u + u \cdot \nabla u = -g \nabla h$

03. $c = \sqrt{gh}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

74. Shallow water 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 수평 길이가 수심보다 크면 수직구조를 평균화한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

74. Shallow water 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 Shallow water 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

74. Shallow water 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

쓰나미, 조석, hydraulic jump의 첫 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

유체역학

75. MHD와 Alfvén 파

개념 지도와 물리량 정의

MHD와 Alfvén 파는 유체역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 전도성 유체에서는 유동과 자기장이 서로 끌고 간다.

핵심 수식.

$$01. \partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

$$02. \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$03. \rho \, Du/Dt = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

$$04. v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho}$$

유도 뼈대. Ohm law와 Faraday 법칙을 결합해 induction equation을 얻는다.

검산. magnetic Reynolds 수가 클 때 frozen-in이 무슨 뜻인지 말하라.

자가 점검. MHD와 Alfvén 파에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

유체역학

75. MHD와 Alfvén 파 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 유체역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$

02. $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

03. $\rho D\mathbf{u}/Dt = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$

04. $v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

유체역학

75. MHD와 Alfvén 파 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Ohm law와 Faraday 법칙을 결합해 induction equation을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$

02. $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

03. $\rho D\mathbf{u}/Dt = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

유체역학

75. MHD와 Alfvén 파 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 전도성 유체에서는 유동과 자기장이 서로 끌고 간다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

유체역학

75. MHD와 Alfvén 파 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 유체역학의 MHD와 Alfvén 파 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

유체역학

75. MHD와 Alfvén 파 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

플라즈마, 액체금속, 태양풍, fusion 연구와 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 5

광학

광학 Part는 16개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치검산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: Fermat 원리와 eikonal, ABCD 행렬과 Gaussian optics, 렌즈 공식과 수차, Jones 벡터와 Stokes 파라미터, Fresnel 계수와 경계조건, 다층막 transfer matrix, Fraunhofer 회절, Fresnel 회절과 near field. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

광학

76. Fermat 원리와 eikonal

개념 지도와 물리량 정의

Fermat 원리와 eikonal은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 파장이 매질 변화 길이보다 짧으면 빛은 ray로 근사된다.

핵심 수식.

01. $\delta \int n \, ds = 0$

02. $|\nabla S|^2 = n^2$

03. $k = \nabla S$

04. ray: $d/ds(n \, dr/ds) = \nabla n$

유도 뼈대. 위상 S를 빠르게 변하는 함수로 두고 leading order를 취한다.

검산. 굴절을 gradient가 ray를 어떻게 휘게 하는지 설명하라.

자가 점검. Fermat 원리와 eikonal에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

76. Fermat 원리와 eikonal - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\delta \int n \, ds = 0$

02. $|\nabla S|^2 = n^2$

03. $k = \nabla S$

04. ray: $d/ds(n \, dr/ds) = \nabla n$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

76. Fermat 원리와 eikonal - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 위상 S 를 빠르게 변하는 함수로 두고 leading order를 취한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\delta \int n \, ds = 0$

02. $|\nabla S|^2 = n^2$

03. $k = \nabla S$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

76. Fermat 원리와 eikonal - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 파장이 매질 변화 길이보다 짧으면 빛은 ray로 근사된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

76. Fermat 원리와 eikonal - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Fermat 원리와 eikonal 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

76. Fermat 원리와 eikonal - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

기하광학은 파동방정식의 WKB 극한이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

77. ABCD 행렬과 Gaussian optics

개념 지도와 물리량 정의

ABCD 행렬과 Gaussian optics은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. paraxial 광선은 2x2 symplectic 행렬로 전달된다.

핵심 수식.

$$01. [r2, \theta2]^T = [[A, B], [C, D]][r1, \theta1]^T$$

$$02. \text{thin lens: } [[1, 0], [-1/f, 1]]$$

$$03. \text{free space: } [[1, L], [0, 1]]$$

$$04. q2 = (Aq1 + B) / (Cq1 + D)$$

유도 뼈대. 각 요소의 행렬을 순서대로 곱한다.

검산. 렌즈 뒤 초점 조건을 ABCD로 확인하라.

자가 점검. ABCD 행렬과 Gaussian optics에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

77. ABCD 행렬과 Gaussian optics - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $[r_2, \theta_2]^T = [[\mathbf{A}, \mathbf{B}], [\mathbf{C}, \mathbf{D}]] [r_1, \theta_1]^T$

02. thin lens: $[[1, 0], [-1/f, 1]]$

03. free space: $[[1, L], [0, 1]]$

04. $q_2 = (Aq_1 + B)/(Cq_1 + D)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

77. ABCD 행렬과 Gaussian optics - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 각 요소의 행렬을 순서대로 곱한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $[r_2, \theta_2]^T = [[\mathbf{A}, \mathbf{B}], [\mathbf{C}, \mathbf{D}]] [r_1, \theta_1]^T$

02. thin lens: $[[1, 0], [-1/f, 1]]$

03. free space: $[[1, L], [0, 1]]$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

77. ABCD 행렬과 Gaussian optics - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. paraxial 광선은 2x2 symplectic 행렬로 전달된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

77. ABCD 행렬과 Gaussian optics - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 ABCD 행렬과 Gaussian optics 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

77. ABCD 행렬과 Gaussian optics - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

렌즈계, resonator, Gaussian beam 설계의 빠른 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

78. 렌즈 공식과 수차

개념 지도와 물리량 정의

렌즈 공식과 수차는/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 얇은 렌즈 근사는 작은 각도와 작은 aperture에서 가장 단순하다.

핵심 수식.

01. $1/s + 1/s' = 1/f$

02. $m = -s'/s$

03. $NA = n \sin\theta$

04. diffraction limit $\sim 0.61\lambda/NA$

유도 뼈대. paraxial ray transfer로 imaging condition을 얻는다.

검산. NA를 키우면 해상도와 초점심도가 어떻게 변하는지 말하라.

자가 점검. 렌즈 공식과 수차에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

78. 렌즈 공식과 수차 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $1/s + 1/s' = 1/f$

02. $m = -s'/s$

03. $NA = n \sin \theta$

04. diffraction limit $\sim 0.61\lambda/NA$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

78. 렌즈 공식과 수차 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. paraxial ray transfer로 imaging condition을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $1/s + 1/s' = 1/f$

02. $m = -s'/s$

03. $NA = n \sin \theta$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

78. 렌즈 공식과 수차 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 얇은 렌즈 근사는 작은 각도와 작은 aperture에서 가장 단순하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

78. 렌즈 공식과 수차 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 렌즈 공식과 수차 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

78. 렌즈 공식과 수차 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

실제 영상계는 회절과 수차가 함께 resolution을 제한한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

79. Jones 벡터와 Stokes 파라미터

개념 지도와 물리량 정의

Jones 벡터와 Stokes 파라미터는/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. coherent 편광은 Jones, 부분편광은 Stokes/Mueller가 편하다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{E} = [E_x, E_y]^T$
02. $S_0 = |E_x|^2 + |E_y|^2$
03. $S_1 = |E_x|^2 - |E_y|^2$
04. $S_2 = 2\text{Re } E_x E_y^*, S_3 = 2\text{Im } E_x E_y^*$

유도 뼈대. 편광소자를 2x2 복소 행렬로 곱한다.

검산. 선편광과 원편광의 Jones 벡터를 써보라.

자가 점검. Jones 벡터와 Stokes 파라미터에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

79. Jones 벡터와 Stokes 파라미터 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \mathbf{E}=[E_x, E_y]^T$$

$$02. S0=|E_x|^2+|E_y|^2$$

$$03. S1=|E_x|^2-|E_y|^2$$

$$04. S2=2\text{Re } E_x E_y, S3=2\text{Im } E_x E_y$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

79. Jones 벡터와 Stokes 파라미터 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 편광소자를 2x2 복소 행렬로 곱한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{E}=[E_x, E_y]^T$

02. $S_0=|E_x|^2+|E_y|^2$

03. $S_1=|E_x|^2-|E_y|^2$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

79. Jones 벡터와 Stokes 파라미터 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. coherent 편광은 Jones, 부분편광은 Stokes/Mueller가 편하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

79. Jones 벡터와 Stokes 파라미터 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Jones 벡터와 Stokes 파라미터 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

79. Jones 벡터와 Stokes 파라미터 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

광통신, 현미경, ellipsometry, 양자광학에 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

80. Fresnel 계수와 경계조건

개념 지도와 물리량 정의

Fresnel 계수와 경계조건은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 평면파가 경계에서 E,H 접선 성분 연속성을 만족해야 한다.

핵심 수식.

$$01. n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

$$02. r_s = (n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2) / (n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2)$$

$$03. r_p = (n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2) / (n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2)$$

$$04. R = |r|^2$$

유도 뼈대. s/p 편광을 분리하고 Maxwell 경계조건을 적용한다.

검산. Brewster 각에서 p 반사가 0이 되는 조건을 유도하라.

자가 점검. Fresnel 계수와 경계조건에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

80. Fresnel 계수와 경계조건 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

$$02. r_s = (n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2) / (n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2)$$

$$03. r_p = (n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2) / (n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2)$$

$$04. R = |r|^2$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

80. Fresnel 계수와 경계조건 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. s/p 편광을 분리하고 Maxwell 경계조건을 적용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

02. $r_s = (n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2) / (n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2)$

03. $r_p = (n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2) / (n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

80. Fresnel 계수와 경계조건 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 평면파가 경계에서 E,H 접선 성분 연속성을 만족해야 한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

80. Fresnel 계수와 경계조건 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Fresnel 계수와 경계조건 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

80. Fresnel 계수와 경계조건 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

박막, 코팅, 도파관, 전자기학 파동 모듈과 직접 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

81. 다층막 transfer matrix

개념 지도와 물리량 정의

다층막 transfer matrix은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 층마다 위상축적과 경계반사를 행렬로 연결한다.

핵심 수식.

01. $[E+; E-]_{j+1} = M_j [E+; E-]_j$
02. phase $\delta_j = k_0 n_j d_j \cos \theta_j$
03. quarter-wave stack
04. stop band from periodic phase

유도 뼈대. 각 layer의 propagation matrix와 interface matrix를 곱한다.

검산. $\lambda/4$ 코팅이 반사를 줄이는 위상 조건을 설명하라.

자가 점검. 다층막 transfer matrix에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

81. 다층막 transfer matrix - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $[E+; E-]_{j+1} = M_j [E+; E-]_j$
02. phase $\delta_j = k_0 n_j d_j \cos \theta_j$
03. quarter-wave stack
04. stop band from periodic phase

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

81. 다층막 transfer matrix - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 각 layer의 propagation matrix와 interface matrix를 곱한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $[E+; E-]_{j+1} = M_j [E+; E-]_j$

02. phase $\delta_j = k_0 n_j d_j \cos \theta_j$

03. quarter-wave stack

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

81. 다층막 transfer matrix - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 층마다 위상축적과 경계반사를 행렬로 연결한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

81. 다층막 transfer matrix - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 다층막 transfer matrix 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

81. 다층막 transfer matrix - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

AR coating, Bragg mirror, photonic crystal의 1D 원형이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

82. Fraunhofer 회절

개념 지도와 물리량 정의

Fraunhofer 회절은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. far field에서는 aperture의 Fourier transform이 패턴이다.

핵심 수식.

- 01. $U(P) \propto \mathcal{F}\{\text{aperture}\}(k_x, k_y)$
- 02. single slit: $I \propto \text{sinc}^2(\pi a \sin\theta/\lambda)$
- 03. Airy disk radius $1.22\lambda f/D$
- 04. grating: $d \sin\theta = m\lambda$

유도 뼈대. Fresnel 적분에서 2차 위상항을 far-field 근사로 단순화한다.

검산. 슬릿이 좁아질수록 회절무늬가 넓어지는 이유를 말하라.

자가 점검. Fraunhofer 회절에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

82. Fraunhofer 회절 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $U(P) \propto F\{\text{aperture}\}(k_x, k_y)$
- 02. single slit: $I \propto \text{sinc}^2(\pi a \sin\theta/\lambda)$
- 03. Airy disk radius $1.22\lambda f/D$
- 04. grating: $d \sin\theta = m\lambda$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

82. Fraunhofer 회절 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Fresnel 적분에서 2차 위상항을 far-field 근사로 단순화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $U(P) \propto \mathcal{F}\{\text{aperture}\}(k_x, k_y)$
02. single slit: $I \propto \text{sinc}^2(\pi a \sin\theta/\lambda)$
03. Airy disk radius $1.22\lambda f/D$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

82. Fraunhofer 회절 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. far field에서는 aperture의 Fourier transform이 패턴이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

82. Fraunhofer 회절 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Fraunhofer 회절 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

82. Fraunhofer 회절 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

분광기, aperture synthesis, Fourier optics의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

83. Fresnel 회절과 near field

개념 지도와 물리량 정의

Fresnel 회절과 near field은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관측거리가 충분히 멀지 않으면 2차 위상항을 유지해야 한다.

핵심 수식.

01. $U(P) = \int_{\text{aperture}} \exp(ik(r+r'))/(rr') dA$
02. Fresnel number $N_F = a^2/(\lambda z)$
03. quadratic phase matters
04. Cornu spiral for edge

유도 뼈대. Huygens-Fresnel integral을 paraxial 근사로 전개한다.

검산. Fresnel number가 크면 어떤 regime인지 말하라.

자가 점검. Fresnel 회절과 near field에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

83. Fresnel 회절과 near field - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $U(P) = \int_{\text{aperture}} \exp(ik(r+r'))/(rr') dA$

02. Fresnel number $N_F = a^2/(\lambda z)$

03. quadratic phase matters

04. Cornu spiral for edge

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

83. Fresnel 회절과 near field - 유도 빠대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Huygens $\square$ Fresnel integral을 paraxial 근사로 전개한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $U(P) = \int_{\text{aperture}} \exp(ik(r+r'))/(rr') dA$
02. Fresnel number $N_F = a^2/(\lambda z)$
03. quadratic phase matters
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 빠대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

83. Fresnel 회절과 near field - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관측거리가 충분히 멀지 않으면 2차 위상항을 유지해야 한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

83. Fresnel 회절과 near field - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Fresnel 회절과 near field 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

83. Fresnel 회절과 near field - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

near-field optics와 beam propagation의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

84. PSF, OTF, 해상도

개념 지도와 물리량 정의

PSF, OTF, 해상도는/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형 shift-invariant 영상계는 convolution으로 표현된다.

핵심 수식.

- 01.** $\text{image} = \text{object} \cdot \text{PSF}$
- 02.** $\text{OTF} = \text{Fourier transform of PSF}$
- 03.** $\text{MTF} = |\text{OTF}|$
- 04.** Abbe: $d \sim \lambda / (2NA)$

유도 뼈대. point object의 응답을 알고 임의 object를 중첩한다.

검산. coherent imaging과 incoherent imaging의 transfer function 차이를 찾아보라.

자가 점검. PSF, OTF, 해상도에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

84. PSF, OTF, 해상도 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\text{image} = \text{object} \cdot \text{PSF}$
02. $\text{OTF} = \text{Fourier transform of PSF}$
03. $\text{MTF} = |\text{OTF}|$
04. Abbe: $d \sim \lambda / (2\text{NA})$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

84. PSF, OTF, 해상도 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. point object의 응답을 알고 임의 object를 중첩한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\text{image} = \text{object} \cdot \text{PSF}$
02. $\text{OTF} = \text{Fourier transform of PSF}$
03. $\text{MTF} = |\text{OTF}|$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

84. PSF, OTF, 해상도 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형 shift-invariant 영상계는 convolution으로 표현된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

84. PSF, OTF, 해상도 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 PSF, OTF, 해상도 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

84. PSF, OTF, 해상도 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

현미경, 카메라, lithography, computational imaging의 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

85. Coherence와 Van Cittert-Zernike

개념 지도와 물리량 정의

Coherence와 Van Cittert-Zernike은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 간섭무늬는 field correlation을 측정한다.

핵심 수식.

01. $\Gamma_{12} = \langle \mathbf{E}_1(t) \mathbf{E}_2(t) \rangle$

02. $g_{12} = \Gamma_{12} / \sqrt{I_1 I_2}$

03. visibility $V = 2|\Gamma_{12}| / (I_1 + I_2)$

04. spatial coherence = Fourier transform of source intensity

유도 뼈대. 두 점 검출기의 상관함수를 source 분포와 연결한다.

검산. 넓은 source일수록 spatial coherence가 어떻게 되는지 말하라.

자가 점검. Coherence와 Van Cittert-Zernike에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

85. Coherence와 Van Cittert-Zernike - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Gamma_{12} = \langle \mathbf{E}_1(t) \mathbf{E}_2(t) \rangle$

02. $g_{12} = \Gamma_{12} / \sqrt{I_1 I_2}$

03. visibility $V = 2|\Gamma_{12}| / (I_1 + I_2)$

04. spatial coherence = Fourier transform of source intensity

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

85. Coherence와 Van Cittert-Zernike - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 두 점 검출기의 상관함수를 source 분포와 연결한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\Gamma_{12} = \langle \mathbf{E}_1(t) \mathbf{E}_2(t) \rangle$

02. $g_{12} = \Gamma_{12} / \sqrt{I_1 I_2}$

03. visibility $V = 2|\Gamma_{12}| / (I_1 + I_2)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

85. Coherence와 Van Cittert-Zernike - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 간섭무늬는 field correlation을 측정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

85. Coherence와 Van Cittert-Zernike - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Coherence와 Van Cittert-Zernike 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

85. Coherence와 Van Cittert-Zernike - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

천문 간섭계와 coherence imaging의 기본 정리다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

86. Fabry-Perot와 laser cavity

개념 지도와 물리량 정의

Fabry-Perot와 laser cavity는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 공진기는 선택된 longitudinal mode만 크게 증폭한다.

핵심 수식.

01. $FSR = c/(2nL)$
02. $Finesse = FSR/linewidth$
03. resonance: $2nL = m\lambda$
04. threshold: $gain = loss$

유도 뼈대. 왕복 위상과 반사 손실을 곱해 resonance 조건을 얻는다.

검산. cavity 길이가 길어지면 FSR은 어떻게 변하는가?

자가 점검. Fabry-Perot와 laser cavity에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

86. Fabry-Perot와 laser cavity - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\text{FSR} = c/(2nL)$
02. $\text{Finesse} = \text{FSR}/\text{linewidth}$
03. resonance: $2nL = m\lambda$
04. threshold: $\text{gain} = \text{loss}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

86. Fabry-Perot와 laser cavity - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 왕복 위상과 반사 손실을 곱해 resonance 조건을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $FSR=c/(2nL)$

02. $Finesse=FSR/linewidth$

03. resonance: $2nL=m\lambda$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

86. Fabry-Perot와 laser cavity - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 공진기는 선택된 longitudinal mode만 크게 증폭한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

86. Fabry-Perot와 laser cavity - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Fabry-Perot와 laser cavity 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

86. Fabry-Perot와 laser cavity - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

laser, filter, sensing cavity, cavity QED의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

87. Gaussian beam

개념 지도와 물리량 정의

Gaussian beam은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. paraxial wave equation의 기본 beam 해다.

핵심 수식.

01. $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$

02. $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$

03. $R(z) = z[1 + (z_R/z)^2]$

04. Gouy phase $\psi = \arctan(z/z_R)$

유도 뼈대. complex q parameter 또는 paraxial equation ansatz로 유도한다.

검산. beam waist를 줄이면 divergence가 커지는 이유를 말하라.

자가 점검. Gaussian beam에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

87. Gaussian beam - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$
02. $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$
03. $R(z) = z[1 + (z_R/z)^2]$
04. Gouy phase $\psi = \arctan(z/z_R)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

87. Gaussian beam - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. complex q parameter 또는 paraxial equation ansatz로 유도한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$

02. $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$

03. $R(z) = z[1 + (z_R/z)^2]$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

87. Gaussian beam - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. paraxial wave equation의 기본 beam 해다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

87. Gaussian beam - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Gaussian beam 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

87. Gaussian beam - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

laser optics, fiber coupling, resonator mode에 필수다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

88. Optical fiber와 waveguide

개념 지도와 물리량 정의

Optical fiber와 waveguide은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 도파관은 횡방향 경계조건으로 mode가 양자화된다.

핵심 수식.

- 01. $V = (2\pi a/\lambda) \text{ NA}$
- 02. single mode if $V < 2.405$
- 03. $\beta(\omega)$ dispersion
- 04. $D = -(2\pi c/\lambda^2) d^2\beta/d\omega^2$

유도 뼈대. Helmholtz 방정식을 횡/종 방향으로 분리한다.

검산. single-mode 조건이 왜 mode count와 연결되는지 설명하라.

자가 점검. Optical fiber와 waveguide에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

88. Optical fiber와 waveguide - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $V=(2\pi a/\lambda) \text{ NA}$
02. single mode if $V<2.405$
03. $\beta(\omega)$ dispersion
04. $D=-(2\pi c/\lambda^2) d^2\beta/d\omega^2$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

88. Optical fiber와 waveguide - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Helmholtz 방정식을 횡/종 방향으로 분리한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $V=(2\pi a/\lambda) \text{ NA}$
02. single mode if $V<2.405$
03. $\beta(\omega)$ dispersion
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

88. Optical fiber와 waveguide - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 도파관은 횡방향 경계조건으로 mode가 양자화된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

88. Optical fiber와 waveguide - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Optical fiber와 waveguide 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

88. Optical fiber와 waveguide - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

광통신과 integrated photonics의 중심 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

89. 비선형 편광과 phase matching

개념 지도와 물리량 정의

비선형 편광과 phase matching은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 강한 빛에서는 매질 response가 장에 비선형으로 의존한다.

핵심 수식.

01. $P = \epsilon_0(\chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots)$
02. 2ω generation: $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_\omega$
03. efficiency $\propto \text{sinc}^2(\Delta k L/2)$
04. n_2 effect: $\Delta n = n_2 I$

유도 뼈대. 비선형 source term을 파동방정식에 넣고 slowly varying envelope를 쓴다.

검산. phase matching이 안 되면 왜 변환효율이 주기적으로 되돌아가는가?

자가 점검. 비선형 편광과 phase matching에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

89. 비선형 편광과 phase matching - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $P = \epsilon_0(\chi^1 E + \chi^2 E^2 + \chi^3 E^3 + \dots)$

02. 2ω generation: $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_\omega$

03. efficiency $\propto \text{sinc}^2(\Delta k L/2)$

04. n_2 effect: $\Delta n = n_2 I$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

89. 비선형 편광과 phase matching - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 비선형 source term을 파동방정식에 넣고 slowly varying envelope를 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $P = \epsilon_0(\chi^1 E + \chi^2 E^2 + \chi^3 E^3 + \dots)$
02. 2ω generation: $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_\omega$
03. efficiency $\propto \text{sinc}^2(\Delta k L/2)$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

89. 비선형 편광과 phase matching - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 강한 빛에서는 매질 response가 장에 비선형으로 의존한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

89. 비선형 편광과 phase matching - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 비선형 편광과 phase matching 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

89. 비선형 편광과 phase matching - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

SHG, OPA, Kerr lensing, frequency comb의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

90. NLSE와 soliton

개념 지도와 물리량 정의

NLSE와 soliton은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 분산과 Kerr 비선형성이 균형을 이루면 pulse가 유지된다.

핵심 수식.

01. $i\partial_z A - \beta_2/2 \partial_t^2 A + \gamma|A|^2 A = 0$
02. dispersion length $L_D = T_0^2/|\beta_2|$
03. nonlinear length $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$
04. soliton if $L_D \sim L_{NL}$

유도 뼈대. slowly varying envelope와 retarded time 좌표를 사용한다.

검산. 분산만 있을 때와 비선형만 있을 때 pulse가 어떻게 변하는지 비교하라.

자가 점검. NLSE와 soliton에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

90. NLSE와 soliton - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $i\partial_z A - \beta/2 \partial_t^2 A + \gamma|A|^2 A = 0$
02. dispersion length $L_D = T_0^2/|\beta_2|$
03. nonlinear length $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$
04. soliton if $L_D \sim L_{NL}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

90. NLSE와 soliton - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. slowly varying envelope와 retarded time 좌표를 사용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $i\partial_z A - \beta_2/2 \partial_t^2 A + \gamma|A|^2 A = 0$
02. dispersion length $L_D = T_0^2/|\beta_2|$
03. nonlinear length $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

90. NLSE와 soliton - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 분산과 Kerr 비선형성이 균형을 이루면 pulse가 유지된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

90. NLSE와 soliton - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 NLSE와 soliton 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

90. NLSE와 soliton - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

광섬유 통신, supercontinuum, nonlinear wave 연구에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

광학

91. Photonic crystal과 위상광학

개념 지도와 물리량 정의

Photonic crystal과 위상광학은/는 광학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 주기적 매질에서는 광자도 band structure와 topology를 가진다.

핵심 수식.

01. $E_k(r) = u_k(r) \exp(ik \cdot r)$
02. band gap from periodic $\varepsilon(r)$
03. Berry curvature $\Omega_n(k) = \nabla_{kx} A_n$
04. $C = (1/2\pi) \int \Omega d^2k$

유도 뼈대. Bloch 정리로 Maxwell eigenproblem을 풀고 Berry curvature를 계산한다.

검산. 전자 band와 photonic band의 공통점과 차이를 하나씩 말하라.

자가 점검. Photonic crystal과 위상광학에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

광학

91. Photonic crystal과 위상광학 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 광학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $E_k(r) = u_k(r) \exp(ik \cdot r)$
- 02. band gap from periodic $\varepsilon(r)$
- 03. Berry curvature $\Omega_n(k) = \nabla_{k \times} A_n$
- 04. $C = (1/2\pi) \int \Omega d^2k$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

광학

91. Photonic crystal과 위상광학 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Bloch 정리로 Maxwell eigenproblem을 풀고 Berry curvature를 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E_k(r) = u_k(r) \exp(ik \cdot r)$
02. band gap from periodic $\varepsilon(r)$
03. Berry curvature $\Omega_n(k) = \nabla_{k \times} A_n$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

광학

91. Photonic crystal과 위상광학 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 주기적 매질에서는 광자도 band structure와 topology를 가진다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

광학

91. Photonic crystal과 위상광학 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 광학의 Photonic crystal과 위상광학 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

광학

91. Photonic crystal과 위상광학 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

topological photonics, slow light, metamaterial 연구로 이어진다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 6

전자기학

전자기학 Part는 51개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치검산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: Maxwell 방정식의 네 줄, 전하보존과 게이지 구조, Coulomb 법칙과 Gauss 법칙, Poisson/Laplace 방정식, 유일성 정리와 에너지 방법, 영상법, 다중극 전개, 정전기 에너지와 정전용량. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

전자기학

92. Maxwell 방정식의 네 줄

개념 지도와 물리량 정의

Maxwell 방정식의 네 줄은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. SI 단위, 국소적인 전하와 전류 밀도, 고전 연속장 근사가 기본 조건이다.

핵심 수식.

01. $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$
02. $\text{div } \mathbf{B} = 0$
03. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$
04. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 d\mathbf{E}/dt$

유도 뼈대. 적분형 방정식에 작은 pillbox와 loop를 적용하면 미분형과 경계조건이 나온다.

검산. 각 항의 단위와 전하보존 유도 과정을 확인하라.

자가 점검. Maxwell 방정식의 네 줄에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

92. Maxwell 방정식의 네 줄 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$

02. $\text{div } \mathbf{B} = 0$

03. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$

04. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 d\mathbf{E}/dt$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

92. Maxwell 방정식의 네 줄 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 적분형 방정식에 작은 pillbox와 loop를 적용하면 미분형과 경계조건이 나온다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$

02. $\text{div } \mathbf{B} = 0$

03. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

92. Maxwell 방정식의 네 줄 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. SI 단위, 국소적인 전하와 전류 밀도, 고전 연속장 근사가 기본 조건이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

92. Maxwell 방정식의 네 줄 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Maxwell 방정식의 네 줄 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

92. Maxwell 방정식의 네 줄 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전기회로, 전송선, 안테나, 광학, 플라스마가 모두 이 네 줄의 서로 다른 극한이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

93. 전하보존과 게이지 구조

개념 지도와 물리량 정의

전하보존과 게이지 구조는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 전하가 생성·소멸하지 않는 폐쇄계와 충분히 매끄러운 퍼텐셜 표현에서 성립한다.

핵심 수식.

01. $d\rho/dt + \text{div } \mathbf{J} = 0$

02. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$

03. $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - d\mathbf{A}/dt$

04. $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \text{grad } \chi, \varphi \rightarrow \varphi - d\chi/dt$

유도 뼈대. Maxwell 방정식의 발산을 취해 연속방정식을 얻고, $\text{div } \mathbf{B}=0$ 에서 벡터퍼텐셜을 도입한다.

검산. Coulomb gauge와 Lorenz gauge의 차이를 한 줄로 설명하라.

자가 점검. 전하보존과 게이지 구조에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

93. 전하보존과 게이지 구조 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $d\rho/dt + \text{div } \mathbf{J} = 0$

02. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$

03. $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - d\mathbf{A}/dt$

04. $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \text{grad } \chi, \varphi \rightarrow \varphi - d\chi/dt$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

93. 전하보존과 게이지 구조 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Maxwell 방정식의 발산을 취해 연속방정식을 얻고, $\text{div } \mathbf{B} = 0$ 에서 벡터퍼텐셜을 도입한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $d\rho/dt + \text{div } \mathbf{J} = 0$

02. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$

03. $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - d\mathbf{A}/dt$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

93. 전하보존과 게이지 구조 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 전하가 생성·소멸하지 않는 폐쇄계와 충분히 매끄러운 퍼텐셜 표현에서 성립한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

93. 전하보존과 게이지 구조 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 전하보존과 게이지 구조 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

93. 전하보존과 게이지 구조 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

게이지는 물리량의 중복 표현이며 수치해석에서는 조건 선택이 안정성과 직접 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

94. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙

개념 지도와 물리량 정의

Coulomb 법칙과 Gauss 법칙은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 정전기, 비상대론적 소스, 시간 변화가 무시되는 영역에서 우선 적용한다.

핵심 수식.

01. $E(r) = 1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(r_p)(r-r_p)/|r-r_p|^3 d^3r_p$
02. $\oint E \cdot da = Q_{enc}/\epsilon_0$
03. $\text{div } E = \rho/\epsilon_0$
04. $F = qE$

유도 뼈대. 대칭이 있으면 Gauss 면을 고르고, 일반 분포에서는 Green 함수 적분으로 전기장을 계산한다.

검산. 구대칭, 원통대칭, 평면대칭에서 어떤 Gauss 면을 쓰는지 말해보라.

자가 점검. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

94. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(\mathbf{r}') (\mathbf{r} - \mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3 d^3r'$$

$$02. \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = Q_{enc}/\epsilon_0$$

$$03. \text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$$

$$04. \mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

94. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 대칭이 있으면 Gauss 면을 고르고, 일반 분포에서는 Green 함수 적분으로 전기장을 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E(r) = 1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(rp)(r-rp)/|r-rp|^3 d^3rp$
02. $\oint E \cdot da = Q_{enc}/\epsilon_0$
03. $\text{div } E = \rho/\epsilon_0$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

94. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 정전기, 비상대론적 소스, 시간 변화가 무시되는 영역에서 우선 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

94. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Coulomb 법칙과 Gauss 법칙 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

94. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전기장 문제는 회로의 전압·전하·정전용량 문제로 자주 축약된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

95. Poisson/Laplace 방정식

개념 지도와 물리량 정의

Poisson/Laplace 방정식은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 정전기 퍼텐셜이 잘 정의되고 경계조건이 주어진 영역에서 사용한다.

핵심 수식.

01. $E = -\text{grad } \varphi$
02. $\text{nabla}^2 \varphi = -\rho/\epsilon_0$
03. $\text{nabla}^2 \varphi = 0$ in source-free region
04. $G(r, r_p) = 1/(4\pi|r - r_p|)$

유도 뼈대. $E = -\text{grad } \varphi$ 를 Gauss 법칙에 넣고, 경계에서 Dirichlet 또는 Neumann 조건을 고정한다.

검산. 경계조건을 바꾸면 해가 어떻게 달라지는지 설명하라.

자가 점검. Poisson/Laplace 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

95. Poisson/Laplace 방정식- 대표방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01.** $E = -\text{grad } \varphi$
- 02.** $\text{nabla}^2 \varphi = -\rho/\epsilon_0$
- 03.** $\text{nabla}^2 \varphi = 0$ in source-free region
- 04.** $G(r, r_p) = 1/(4\pi|r-r_p|)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

95. Poisson/Laplace 방정식- 유도빠대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. $E = -\text{grad } \phi$ 를 Gauss 법칙에 넣고, 경계에서 Dirichlet 또는 Neumann 조건을 고정한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E = -\text{grad } \phi$
02. $\text{nabla}^2 \phi = -\rho/\epsilon_0$
03. $\text{nabla}^2 \phi = 0$ in source-free region
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 빠대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

95. Poisson/Laplace 방정식- 조건과근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 정전기 퍼텐셜이 잘 정의되고 경계조건이 주어진 영역에서 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

95. Poisson/Laplace 방정식- 계산루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Poisson/Laplace 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

95. Poisson/Laplace 방정식- 연구자메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

반도체 소자, 정전용량, 접지 구조, MEMS 전기력 계산의 기본 방정식이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

96. 유일성 정리와 에너지 방법

개념 지도와 물리량 정의

유일성 정리와 에너지 방법은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형 Poisson 문제와 적절한 경계조건이 있을 때 해의 중복 가능성을 제거한다.

핵심 수식.

$$01. \int_V |\text{grad } \psi|^2 dV = \oint \psi d_n \psi da - \int \psi \nabla^2 \psi$$

$$02. \varphi_1 - \varphi_2 = \psi$$

$$03. \text{Dirichlet or Neumann boundary}$$

$$04. U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 dV$$

유도 뼈대. 두 해의 차이를 만들고 Green 항등식으로 내부 에너지 적분이 0임을 보인다.

검산. 왜 Dirichlet 문제에서 경계값이 같으면 내부해가 같은지 말해보라.

자가 점검. 유일성 정리와 에너지 방법에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

96. 유일성 정리와 에너지 방법 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \int_V |\text{grad } \psi|^2 dV = \oint \psi d_n \psi da - \int \psi \nabla^2 \psi$$

$$02. \phi_1 - \phi_2 = \psi$$

03. Dirichlet or Neumann boundary

$$04. U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 dV$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

96. 유일성 정리와 에너지 방법 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 두 해의 차이를 만들고 Green 항등식으로 내부 에너지 적분이 0임을 보인다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \int_V |\text{grad } \psi|^2 dV = \oint \psi d_n \psi da - \int \psi \nabla^2 \psi$$

$$02. \phi_1 - \phi_2 = \psi$$

03. Dirichlet or Neumann boundary

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

96. 유일성 정리와 에너지 방법 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형 Poisson 문제와 적절한 경계조건이 있을 때 해의 중복 가능성을 제거한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

96. 유일성 정리와 에너지 방법 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 유일성 정리와 에너지 방법 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

96. 유일성 정리와 에너지 방법 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

수치 전자기학에서는 같은 정리로 mesh 해의 신뢰도를 점검한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

97. 영상법

개념 지도와 물리량 정의

영상법은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 도체 경계가 등전위면이 되도록 가상 전하를 배치할 수 있는 대칭 구조에서 유용하다.

핵심 수식.

01. $\varphi = \sum_i q_i / (4\pi\epsilon_0 |r - r_i|)$
02. $q_{\text{image}} = -q$ for grounded plane
03. $q_{\text{image}} = -q a/d$ for grounded sphere
04. force from image field

유도 뼈대. 경계면의 전위를 만족하도록 영상전하 위치와 크기를 정하고 유일성 정리로 정당화한다.

검산. 영상전하는 실제 전하가 아니라 경계조건을 구현하는 계산 장치임을 설명하라.

자가 점검. 영상법에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

97. 영상법 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $\varphi = \sum_i q_i / (4\pi\epsilon_0 |r-r_i|)$
- 02. $q_{\text{image}} = -q$ for grounded plane
- 03. $q_{\text{image}} = -q a/d$ for grounded sphere
- 04. force from image field

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

97. 영상법 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 경계면의 전위를 만족하도록 영상전하 위치와 크기를 정하고 유일성 정리로 정당화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\varphi = \sum_i q_i / (4\pi\epsilon_0 |r - r_i|)$
02. $q_{\text{image}} = -q$ for grounded plane
03. $q_{\text{image}} = -q a/d$ for grounded sphere
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

97. 영상법 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 도체 경계가 등전위면이 되도록 가상 전하를 배치할 수 있는 대칭 구조에서 유용하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

97. 영상법 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 영상법 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

97. 영상법 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전극 설계와 AFM/STM 근처 정전기력의 직관을 만든다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

98. 다중극 전개

개념 지도와 물리량 정의

다중극 전개는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관측점이 소스 영역보다 충분히 멀 때 $r \gg \text{source size}$ 의 점근 전개가 성립한다.

핵심 수식.

01. $1/|r-rp| = 1/r + rp \cdot r/r^3 + \dots$

02. $p = \int r \rho(r) d^3r$

03. $\varphi_{dip} = p \cdot \text{rhat} / (4\pi \epsilon_0 r^2)$

04. $Q_{ij} = \int \rho(3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) d^3r$

유도 뼈대. Green 함수 kernel을 작은 rp/r 에 대해 Taylor 전개하고 전하분포의 moment를 정의한다.

검산. 총전하가 0이면 어떤 항이 처음으로 남는지 확인하라.

자가 점검. 다중극 전개에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

98. 다중극 전개 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $1/|r-rp| = 1/r + rp \cdot r/r^3 + \dots$

02. $p = \int r \rho(r) d^3r$

03. $\varphi_{dip} = p \cdot \text{rhat} / (4\pi \epsilon_0 r^2)$

04. $Q_{ij} = \int \rho(3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) d^3r$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

98. 다중극 전개 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Green 함수 kernel을 작은 r_p/r 에 대해 Taylor 전개하고 전하분포의 moment를 정의한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. 1/|r-r_p| = 1/r + r_p \cdot r/r^3 + \dots$$

$$02. p = \int r \rho(r) d^3r$$

$$03. \varphi_{dip} = p \cdot \hat{r} / (4\pi \epsilon_0 r^2)$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

98. 다중극 전개 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관측점이 소스 영역보다 충분히 멀 때 $r \gg \text{source size}$ 의 점근 전개가 성립한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

98. 다중극 전개 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 다중극 전개 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

98. 다중극 전개 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

안테나, 분자 분극, 산란 이론에서 원거리장을 분류하는 표준 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

99. 정전기 에너지와 정전용량

개념 지도와 물리량 정의

정전기 에너지와 정전용량은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형 유전체와 정전기 평형에서 에너지 저장량을 정의한다.

핵심 수식.

01. $U = 1/2 \int \rho \phi d^3r$

02. $U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 d^3r$

03. $Q = C V$

04. C_{ij} matrix relation $Q_i = \sum_j C_{ij} V_j$

유도 뼈대. 전하를 무한대에서 천천히 가져오는 일을 적분하거나 장 에너지로 바꾸어 계산한다.

검산. 1/2 계수가 왜 필요한지 전하 조립 과정으로 설명하라.

자가 점검. 정전기 에너지와 정전용량에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

99. 정전기 에너지와 정전용량 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $U = 1/2 \int \rho \phi d^3r$

02. $U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 d^3r$

03. $Q = C V$

04. C_{ij} matrix relation $Q_i = \sum_j C_{ij} V_j$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

99. 정전기 에너지와 정전용량 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 전하를 무한대에서 천천히 가져오는 일을 적분하거나 장 에너지로 바꾸어 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. U = 1/2 \int \rho \phi d^3r$$

$$02. U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 d^3r$$

$$03. Q = C V$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

99. 정전기 에너지와 정전용량 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형 유전체와 정전기 평형에서 에너지 저장량을 정의한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

99. 정전기 에너지와 정전용량 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 정전기 에너지와 정전용량 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

99. 정전기 에너지와 정전용량 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

축전기, interconnect, RF MEMS, 터치 센서 해석에 바로 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

100. 유전체와 분극

개념 지도와 물리량 정의

유전체와 분극은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 매질의 미시 쌍극자를 연속분극 P 로 평균할 수 있을 때 사용한다.

핵심 수식.

$$01. \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$02. \rho_b = -\text{div } \mathbf{P}$$

$$03. \sigma_b = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n}$$

$$04. \mathbf{D}_{\text{perp jump}} = \sigma_{\text{free}}$$

유도 뼈대. 전체 전하를 자유전하와 결합전하로 나누어 Maxwell 방정식의 형태를 다시 쓴다.

검산. E 와 D 의 경계조건을 구분해서 말해보라.

자가 점검. 유전체와 분극에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

100. 유전체와 분극 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$02. \rho_b = -\text{div } \mathbf{P}$$

$$03. \sigma_b = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n}$$

$$04. \mathbf{D}_{\text{perp jump}} = \sigma_{\text{free}}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

100. 유전체와 분극 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 전체 전하를 자유전하와 결합전하로 나누어 Maxwell 방정식의 형태를 다시 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$

02. $\rho_b = -\text{div } \mathbf{P}$

03. $\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

100. 유전체와 분극 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 매질의 미시 쌍극자를 연속분극 P로 평균할 수 있을 때 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

100. 유전체와 분극 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 유전체와 분극 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

100. 유전체와 분극 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

커패시터, 절연막, 고유전율 재료, 반도체 게이트 산화막의 물리와 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

101. 국소장과 Clausius-Mossotti

개념 지도와 물리량 정의

국소장과 Clausius-Mossotti는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 희박하거나 등방적인 쌍극자 매질, Lorentz cavity 근사가 가능한 경우에 의미가 크다.

핵심 수식.

01. $P = N \alpha \mathbf{E}_{loc}$
02. $(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2) = N \alpha / (3\epsilon_0)$
03. $\mathbf{E}_{loc} = \mathbf{E} + P / (3\epsilon_0)$
04. $\chi_e = P / (\epsilon_0 \mathbf{E})$

유도 뼈대. 분자 분극률과 거시 유전율을 cavity field 보정으로 연결한다.

검산. 국소장과 평균장이 왜 다른지 cavity 그림으로 설명하라.

자가 점검. 국소장과 Clausius-Mossotti에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

101. 국소장과 Clausius-Mossotti - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $P = N \alpha E_{loc}$
02. $(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2) = N \alpha / (3 \epsilon_0)$
03. $E_{loc} = E + P / (3 \epsilon_0)$
04. $\chi_e = P / (\epsilon_0 E)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

101. 국소장과 Clausius-Mossotti - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 분자 분극률과 거시 유전율을 cavity field 보정으로 연결한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $P = N \alpha E_{loc}$

02. $(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2) = N \alpha / (3\epsilon_0)$

03. $E_{loc} = E + P / (3\epsilon_0)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

101. 국소장과 Clausius-Mossotti - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 희박하거나 등방적인 쌍극자 매질, Lorentz cavity 근사가 가능한 경우에 의미가 크다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

101. 국소장과 Clausius-Mossotti - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 국소장과 Clausius-Mossotti 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

101. 국소장과 Clausius-Mossotti - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

분자 물성, 유전체 분산, metamaterial effective medium 판단에 쓴다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

102. Biot-Savart와 Ampere 법칙

개념 지도와 물리량 정의

Biot-Savart와 Ampere 법칙은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 정자기, 전류가 시간적으로 안정하고 변위전류가 무시될 때 직접 적용한다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3 d^3r'$
02. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$
03. $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$
04. $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

유도 뼈대. 대칭 전류는 Ampere loop, 일반 전류는 Biot-Savart 적분으로 계산한다.

검산. 무한 직선 전류와 솔레노이드의 자기장을 각각 유도해보라.

자가 점검. Biot-Savart와 Ampere 법칙에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

102. Biot-Savart와 Ampere 법칙 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3 d^3r'$$

$$02. \text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

$$03. \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

$$04. \mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

102. Biot-Savart와 Ampere 법칙 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 대칭 전류는 Ampere loop, 일반 전류는 Biot-Savart 적분으로 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3 d^3r'$$

$$02. \text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

$$03. \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

102. Biot-Savart와 Ampere 법칙 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 정자기, 전류가 시간적으로 안정하고 변위전류가 무시될 때 직접 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

102. Biot-Savart와 Ampere 법칙 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Biot-Savart와 Ampere 법칙 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

102. Biot-Savart와 Ampere 법칙 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

인덕터, 전류센서, 모터, 자기장 shielding의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지

개념 지도와 물리량 정의

벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. $\text{div } \mathbf{B}=0$ 인 영역에서 정의되며 gauge 조건을 정해야 해가 유일해진다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$
02. $\text{curl curl } \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}$
03. $\text{div } \mathbf{A} = 0$
04. $\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| d^3r'$

유도 뼈대. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ 에 $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$ 를 넣고 벡터 항등식으로 Poisson형 방정식을 만든다.

검산. $\mathbf{A}$ 가 물리적으로 관측되지 않아도 위상에는 영향을 줄 수 있음을 설명하라.

자가 점검. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$

02. $\text{curl curl } \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}$

03. $\text{div } \mathbf{A} = 0$

04. $\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| d^3r'$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ 에 $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$ 를 넣고 벡터 항등식으로 Poisson형 방정식을 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$

02. $\text{curl } \text{curl } \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}$

03. $\text{div } \mathbf{A} = 0$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. $\text{div } \mathbf{B}=0$ 인 영역에서 정의되며 gauge 조건을 정해야 해가 유일해진다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

코일 설계, 자기 벡터퍼텐셜 FEM, Aharonov-Bohm 효과의 공통 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

104. 자기쌍극자와 자성체

개념 지도와 물리량 정의

자기쌍극자와 자성체는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 작은 전류 루프나 자화된 매질을 쌍극자 근사로 볼 때 적용한다.

핵심 수식.

- 01. $m = I a n$
- 02. $\tau = m \times \mathbf{B}$
- 03. $U = -m \cdot \mathbf{B}$
- 04. $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$

유도 뼈대. 전류분포의 원거리 벡터퍼텐셜을 확장하여 자기쌍극자 moment를 정의한다.

검산. H, B, M의 역할을 전기장의 E, D, P와 비교하라.

자가 점검. 자기쌍극자와 자성체에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

104. 자기쌍극자와 자성체 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01.** $m = I a n$
- 02.** $\tau = m \times \mathbf{B}$
- 03.** $U = -m \cdot \mathbf{B}$
- 04.** $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

104. 자기쌍극자와 자성체 - 유도 쌍대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 전류분포의 원거리 벡터퍼텐셜을 확장하여 자기쌍극자 moment를 정의한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $m = I a n$

02. $\tau = m \times \mathbf{B}$

03. $U = -m \cdot \mathbf{B}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 쌍대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

104. 자기쌍극자와 자성체 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 작은 전류 루프나 자화된 매질을 쌍극자 근사로 볼 때 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

104. 자기쌍극자와 자성체 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 자기쌍극자와 자성체 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

104. 자기쌍극자와 자성체 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

스핀 자기모멘트, 자기센서, ferrite, magnetic memory의 고전적 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

105. Faraday 유도와 준정적 근사

개념 지도와 물리량 정의

Faraday 유도와 준정적 근사는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 파장이 회로 크기보다 충분히 크지만 시간 변화가 유도전압을 만들 때 사용한다.

핵심 수식.

01. $\mathcal{emf} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\Phi_{\mathbf{B}}/dt$

02. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$

03. $L I = \Phi_{\mathbf{B}}$

04. $V_L = L dI/dt$

유도 빼대. 회로 loop에 Faraday 법칙을 적분하고 flux linkage로 인덕턴스를 정의한다.

검산. 전기준정적과 자기준정적 근사의 차이를 말해보라.

자가 점검. Faraday 유도와 준정적 근사에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

105. Faraday 유도와 준정적 근사 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathcal{emf} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\Phi_{\mathbf{B}}/dt$

02. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$

03. $L I = \Phi_{\mathbf{B}}$

04. $V_L = L dI/dt$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

105. Faraday 유도와 준정적 근사 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 회로 loop에 Faraday 법칙을 적분하고 flux linkage로 인덕턴스를 정의한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $emf = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\Phi_B/dt$

02. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$

03. $L I = \Phi_B$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

105. Faraday 유도와 준정적 근사 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 파장이 회로 크기보다 충분히 크지만 시간 변화가 유도전압을 만들 때 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 빠대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

105. Faraday 유도과 준정적 근사 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Faraday 유도과 준정적 근사 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

105. Faraday 유도와 준정적 근사 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

변압기, 인덕터, 무선전력, eddy current 손실의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

106. 피부효과와 전하완화

개념 지도와 물리량 정의

피부효과와 전하완화는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 좋은 도체, 조화 시간의존장, 변위전류보다 도전전류가 큰 영역에서 단순식이 좋다.

핵심 수식.

$$01. \delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$$

$$02. \tau = \varepsilon/\sigma$$

$$03. \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$04. \nabla^2 \mathbf{H} = i \omega \mu \sigma \mathbf{H}$$

유도 뼈대. phasor Maxwell 식과 Ohm 법칙을 결합해 도체 내부 확산형 파동방정식을 얻는다.

검산. 주파수가 올라가면 유효 저항이 왜 증가하는지 설명하라.

자가 점검. 피부효과와 전하완화에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

106. 피부효과와 전하완화 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$

02. $\tau = \varepsilon/\sigma$

03. $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

04. $\nabla^2 \mathbf{H} = i \omega \mu \sigma \mathbf{H}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

106. 피부효과와 전하완화 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. phasor Maxwell 식과 Ohm 법칙을 결합해 도체 내부 확산형 파동방정식을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$

02. $\tau = \varepsilon/\sigma$

03. $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

106. 피부효과와 전하완화 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 좋은 도체, 조화 시간의존장, 변위전류보다 도전전류가 큰 영역에서 단순식이 좋다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

106. 피부효과와 전하완화 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 피부효과와 전하완화 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

106. 피부효과와 전하완화 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

RF 손실, 도파관 도체 손실, PCB 고속신호 표피효과와 직결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

107. Poynting 정리와 응력텐서

개념 지도와 물리량 정의

Poynting 정리와 응력텐서는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고전장 에너지와 운동량이 국소적으로 보존되는 영역에서 해석한다.

핵심 수식.

01. $u = 1/2(\epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2/\mu_0)$

02. $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$

03. $d u/dt + \text{div } \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$

04. $T_{ij} = \epsilon_0(\mathbf{E}_i \mathbf{E}_j - 1/2 \mathbf{E}^2 \delta_{ij}) + \dots$

유도 뼈대. Maxwell curl 식을 E와 H에 내적해 더하고 벡터 항등식으로 divergence form을 만든다.

검산. $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ 의 부호가 흡수와 발생 중 무엇을 뜻하는지 확인하라.

자가 점검. Poynting 정리와 응력텐서에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

107. Poynting 정리와 응력텐서 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. u = 1/2(\epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2/\mu_0)$$

$$02. \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

$$03. d u/dt + \text{div } \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$$

$$04. T_{ij} = \epsilon_0(\mathbf{E}_i \mathbf{E}_j - 1/2 \mathbf{E}^2 \delta_{ij}) + \dots$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

107. Poynting 정리와 응력텐서 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Maxwell curl 식을 $\mathbf{E}$ 와 $\mathbf{H}$ 에 내적해 더하고 벡터 항등식으로 divergence form을 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $u = 1/2(\epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2/\mu_0)$

02. $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$

03. $d u/dt + \text{div } \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

107. Poynting 정리와 응력텐서 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고전장 에너지와 운동량이 국소적으로 보존되는 영역에서 해석한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

107. Poynting 정리와 응력텐서 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Poynting 정리와 응력텐서 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

107. Poynting 정리와 응력텐서 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

안테나 출력, 복사압, 광집게, 전력 흐름 시각화에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

108. 지연 퍼텐셜

개념 지도와 물리량 정의

지연 퍼텐셜은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 전파 지연과 인과성을 포함해야 하는 시간의존 소스에서 사용한다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{A}(r,t) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(r_p, t_R) / R \, d^3r_p$
02. $\varphi(r,t) = 1 / (4\pi \epsilon_0) \int \rho(r_p, t_R) / R \, d^3r_p$
03. $t_R = t - R/c$
04. Lorenz gauge: $\text{div } \mathbf{A} + c^{-2} d\varphi/dt = 0$

유도 뼈대. Lorenz gauge에서 퍼텐셜이 wave equation을 만족하고 retarded Green 함수로 적분된다.

검산. Coulomb 순간작용처럼 보이는 항이 실제 장에서는 어떻게 인과성을 지키는지 생각해보라.

자가 점검. 지연 퍼텐셜에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

108. 지연 퍼텐셜 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{A}(r,t) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(rp, t_R) / R \, d^3rp$
02. $\phi(r,t) = 1 / (4\pi \epsilon_0) \int \rho(rp, t_R) / R \, d^3rp$
03. $t_R = t - R/c$
04. Lorenz gauge: $\text{div } \mathbf{A} + c^{-2} d\phi/dt = 0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

108. 지연 퍼텐셜 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Lorenz gauge에서 퍼텐셜이 wave equation을 만족하고 retarded Green 함수로 적분된다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $A(r,t) = \mu_0 / (4\pi) \int J(rp, t_R) / R d^3rp$
02. $\phi(r,t) = 1 / (4\pi \epsilon_0) \int \rho(rp, t_R) / R d^3rp$
03. $t_R = t - R/c$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

108. 지연 퍼텐셜 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 전파 지연과 인과성을 포함해야 하는 시간의존 소스에서 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

108. 지연 퍼텐셜 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 지연 퍼텐셜 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

108. 지연 퍼텐셜 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

안테나와 복사 문제에서 near/far field를 분리하는 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

109. 평면파와 편파

개념 지도와 물리량 정의

평면파와 편파는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 균일 매질, source-free 영역, 선형 파동 근사에서 가장 기본 모드다.

핵심 수식.

$$01. \mathbf{E} = \text{Re}\{\mathbf{E}_0 \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))\}$$

$$02. \mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mathbf{B}$$

$$03. \mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$04. \omega = c k \text{ in vacuum}$$

유도 뼈대. phasor를 Maxwell 방정식에 넣어 횡파성, 임피던스, 분산관계를 얻는다.

검산. E, B, k가 만드는 오른손 관계를 직접 그려보라.

자가 점검. 평면파와 편파에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

109. 평면파와 편파 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \mathbf{E} = \text{Re}\{\mathbf{E}_0 \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))\}$$

$$02. \mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mathbf{B}$$

$$03. \mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$04. \omega = c k \text{ in vacuum}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

109. 평면파와 편파 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. phasor를 Maxwell 방정식에 넣어 횡파성, 임피던스, 분산관계를 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \mathbf{E} = \text{Re}\{\mathbf{E}0 \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))\}$$

$$02. \mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mathbf{B}$$

$$03. \mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$04. \text{boundary/initial condition closes the problem}$$

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

109. 평면파와 편파 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 균일 매질, source-free 영역, 선형 파동 근사에서 가장 기본 모드다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

109. 평면파와 편파 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 평면파와 편파 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

109. 평면파와 편파 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

무선통신, 광통신, 레이더, 편광소자 해석의 기본 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

110. Stokes 파라미터와 편광

개념 지도와 물리량 정의

Stokes 파라미터와 편광은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 완전 또는 부분 편광된 quasi-monochromatic beam 을 통계적으로 표현할 때 쓴다.

핵심 수식.

- 01. $S_0 = I_x + I_y$
- 02. $S_1 = I_x - I_y$
- 03. $S_2 = I_{45} - I_{135}$
- 04. $S_3 = I_R - I_L$

유도 뼈대. Jones vector의 복소 진폭에서 시간평균 세기 조합을 만든다.

검산. 선편광, 원편광, 타원편광의 Stokes vector를 구분하라.

자가 점검. Stokes 파라미터와 편광에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

110. Stokes 파라미터와 편광 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $S_0 = I_x + I_y$

02. $S_1 = I_x - I_y$

03. $S_2 = I_{45} - I_{135}$

04. $S_3 = I_R - I_L$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

110. Stokes 파라미터와 편광 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Jones vector의 복소 진폭에서 시간평균 세기 조합을 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $S_0 = I_x + I_y$

02. $S_1 = I_x - I_y$

03. $S_2 = I_{45} - I_{135}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

110. Stokes 파라미터와 편광 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 완전 또는 부분 편광된 quasi-monochromatic beam을 통계적으로 표현할 때 쓴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

110. Stokes 파라미터와 편광 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Stokes 파라미터와 편광 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

110. Stokes 파라미터와 편광 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

광통신 편광모드분산, ellipsometry, 광학 계측에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

111. Fresnel 계수와 경계조건

개념 지도와 물리량 정의

Fresnel 계수와 경계조건은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 평면 경계, 선형 등방 매질, specular reflection/refraction 조건에서 성립한다.

핵심 수식.

01. $r_s = (n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t) / (n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)$
02. $r_p = (n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t) / (n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t)$
03. $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$
04. $R = |r|^2$

유도 뼈대. 접선 E, H 연속조건과 Snell 법칙을 함께 풀어 반사·투과 진폭을 얻는다.

검산. Brewster 각에서 p 편파 반사가 사라지는 이유를 설명하라.

자가 점검. Fresnel 계수와 경계조건에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

111. Fresnel 계수와 경계조건 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. r_s = (n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t) / (n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)$$

$$02. r_p = (n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t) / (n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t)$$

$$03. n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

$$04. R = |r|^2$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

111. Fresnel 계수와 경계조건 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 접선 E,H 연속조건과 Snell 법칙을 함께 풀어 반사·투과 진폭을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. r_s = (n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t) / (n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)$$

$$02. r_p = (n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t) / (n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t)$$

$$03. n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

111. Fresnel 계수와 경계조건 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 평면 경계, 선형 등방 매질, specular reflection/refraction 조건에서 성립한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형향, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

111. Fresnel 계수와 경계조건 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Fresnel 계수와 경계조건 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

111. Fresnel 계수와 경계조건 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

박막코팅, 광섬유, RF 경계면, 레이저 cavity에 반복된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

112. 다층막 전송행렬

개념 지도와 물리량 정의

다층막 전송행렬은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 평면파와 층상 매질, 각 층이 균일하다는 조건에서 유용하다.

핵심 수식.

01. $[E+; E-]_{j+1} = M_j [E+; E-]_j$
02. $M = \prod_j I_j P_j$
03. $P_j = \text{diag}(\exp(i k_j d_j), \exp(-i k_j d_j))$
04. $T + R + A = 1$

유도 뼈대. 각 경계의 Fresnel 행렬과 전파 위상행렬을 곱해 전체 산란을 구한다.

검산. 손실이 없을 때 에너지 보존을 행렬 결과로 확인하라.

자가 점검. 다층막 전송행렬에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

112. 다층막 전송행렬 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $[E+; E-]_{j+1} = M_j [E+; E-]_j$
02. $M = \prod_j I_j P_j$
03. $P_j = \text{diag}(\exp(i k_j d_j), \exp(-i k_j d_j))$
04. $T + R + A = 1$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

112. 다층막 전송행렬 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 각 경계의 Fresnel 행렬과 전파 위상행렬을 곱해 전체 산란을 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. [E+; E-]_{j+1} = M_j [E+; E-]_j$$

$$02. M = \prod_j I_j P_j$$

$$03. P_j = \text{diag}(\exp(i k_j d_j), \exp(-i k_j d_j))$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

112. 다층막 전송행렬 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 평면파와 층상 매질, 각 층이 균일하다는 조건에서 유용하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

112. 다층막 전송행렬 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 다층막 전송행렬 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

112. 다층막 전송행렬 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

AR coating, Bragg mirror, photonic stack 설계의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

113. Drude-Lorentz 분산

개념 지도와 물리량 정의

Drude-Lorentz 분산은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형 응답, 조화 구동, 인과적 매질 응답을 가정한다.

핵심 수식.

01. $\epsilon(\omega) = \epsilon_{inf} - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\gamma))$

02. $\epsilon(\omega) = 1 + \sum_j f_j / (\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega)$

03. $n(\omega) = \sqrt{\epsilon \mu}$

04. Kramers-Kronig relation

유도 뼈대. 전자 운동방정식을 주파수 공간에서 풀어 분극률과 유전율을 얻는다.

검산. 흡수 피크 근처에서 실수부와 허수부가 어떻게 변하는지 말해보라.

자가 점검. Drude-Lorentz 분산에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

113. Drude-Lorentz 분산 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\epsilon(\omega) = \epsilon_{inf} - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\gamma))$

02. $\epsilon(\omega) = 1 + \sum_j f_j / (\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega)$

03. $n(\omega) = \sqrt{\epsilon \mu}$

04. Kramers-Kronig relation

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

113. Drude-Lorentz 분산 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 전자 운동방정식을 주파수 공간에서 풀어 분극률과 유전율을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\epsilon(\omega) = \epsilon_{inf} - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\gamma))$

02. $\epsilon(\omega) = 1 + \sum_j f_j / (\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega)$

03. $n(\omega) = \sqrt{\epsilon \mu}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

113. Drude-Lorentz 분산 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형 응답, 조화 구동, 인과적 매질 응답을 가정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

113. Drude-Lorentz 분산 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Drude-Lorentz 분산 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

113. Drude-Lorentz 분산 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

금속, 플라즈마, polariton, metamaterial의 분산 모델로 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

114. 비등방·자이로트로픽 매질

개념 지도와 물리량 정의

비등방·자이로트로픽 매질은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 결정축, bias magnetic field, tensor constitutive law가 있는 매질에서 사용한다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{D}_i = \varepsilon_{ij} \mathbf{E}_j$
02. $\det|k^2 \delta_{ij} - k_i k_j - \omega^2 \mu \varepsilon_{ij}| = 0$
03. n_o, n_e
04. Faraday rotation angle = $V \mathbf{B} L$

유도 뼈대. Maxwell 방정식을 고유값 문제로 만들어 정상모드와 굴절률을 구한다.

검산. ordinary와 extraordinary wave의 차이를 설명하라.

자가 점검. 비등방·자이로트로픽 매질에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

114. 비등방·자이로트로픽 매질 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{D}_i = \varepsilon_{ij} \mathbf{E}_j$
02. $\det|k^2 \delta_{ij} - k_i k_j - \omega^2 \mu \varepsilon_{ij}| = 0$
03. n_o, n_e
04. Faraday rotation angle = $V \mathbf{B} L$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

114. 비등방·자이로트로픽 매질 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Maxwell 방정식을 고유값 문제로 만들어 정상모드와 굴절률을 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{D}_i = \varepsilon_{ij} \mathbf{E}_j$
02. $\det|k^2 \delta_{ij} - k_i k_j - \omega^2 \mu \varepsilon_{ij}| = 0$
03. n_o, n_e
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

114. 비등방·자이로트로픽 매질 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 결정축, bias magnetic field, tensor constitutive law가 있는 매질에서 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

114. 비등방·자이로트로픽 매질 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 비등방·자이로트로픽 매질 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

114. 비등방·자이로트로픽 매질 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

편광소자, isolator, magneto-optic modulator, anisotropic metasurface에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

115. 전송선 방정식

개념 지도와 물리량 정의

전송선 방정식은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 횡단면이 파장보다 작아 TEM 또는 quasi-TEM 모드가 지배할 때 회로화한다.

핵심 수식.

01. $dV/dz = -(R + i\omega L)I$
02. $dI/dz = -(G + i\omega C)V$
03. $\gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}$
04. $Z_0 = \sqrt{(R + i\omega L)/(G + i\omega C)}$

유도 뼈대. 분포정수 회로의 작은 구간 KVL/KCL에서 telegrapher 방정식을 만든다.

검산. lumped 회로와 transmission line의 경계 조건 kL을 말해보라.

자가 점검. 전송선 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

115. 전송선 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \frac{dV}{dz} = -(R + i\omega L)I$$

$$02. \frac{dI}{dz} = -(G + i\omega C)V$$

$$03. \gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}$$

$$04. Z_0 = \sqrt{(R + i\omega L)/(G + i\omega C)}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

115. 전송선 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 분포정수 회로의 작은 구간 KVL/KCL에서 telegrapher 방정식을 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \quad dV/dz = -(R + i\omega L)I$$

$$02. \quad dI/dz = -(G + i\omega C)V$$

$$03. \quad \gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

115. 전송선 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 횡단면이 파장보다 작아 TEM 또는 quasi-TEM 모드가 지배할 때 회로화한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

115. 전송선 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 전송선 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

115. 전송선 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

PCB, coax, RF feed, high-speed digital interconnect의 핵심 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

116. 반사계수와 S-파라미터

개념 지도와 물리량 정의

반사계수와 S-파라미터는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형 time-harmonic 포트 네트워크와 기준 임피던스가 정해졌을 때 사용한다.

핵심 수식.

- 01. $\Gamma = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0)$
- 02. $VSWR = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|)$
- 03. $S_{ij} = b_i / a_j$
- 04. $P_{delivered} = P_{in}(1 - |\Gamma|^2)$

유도 뼈대. 입사파와 반사파의 전압·전류 표현을 포트 정규화로 바꾼다.

검산. S11이 작다는 것이 항상 효율이 높다는 뜻인지 검토하라.

자가 점검. 반사계수와 S-파라미터에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

116. 반사계수와 S-파라미터 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Gamma = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0)$
02. $VSWR = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|)$
03. $S_{ij} = b_i / a_j$
04. $P_{delivered} = P_{in}(1 - |\Gamma|^2)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

116. 반사계수와 S-파라미터 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 입사파와 반사파의 전압·전류 표현을 포트 정규화로 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\Gamma = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0)$

02. $VSWR = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|)$

03. $S_{ij} = b_i / a_j$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

116. 반사계수와 S-파라미터 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형 time-harmonic 포트 네트워크와 기준 임피던스가 정해졌을 때 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

116. 반사계수와 S-파라미터 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 반사계수와 S-파라미터 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

116. 반사계수와 S-파라미터 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

VNA 측정, RF matching, microwave filter 설계의 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

117. 도파관 모드와 차단

개념 지도와 물리량 정의

도파관 모드와 차단은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 금속 또는 유전체 waveguide에서 횡단 경계조건이 모드를 양자화할 때 적용한다.

핵심 수식.

01. $k_z^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - k_c^2$

02. $f_c = c/(2\pi) k_c$

03. TE: $E_z=0$

04. TM: $H_z=0$

유도 뼈대. z 방향 phasor를 분리하고 transverse Helmholtz 문제의 고유값을 찾는다.

검산. 차단 이하 주파수에서 왜 evanescent가 되는지 설명하라.

자가 점검. 도파관 모드와 차단에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

117. 도파관 모드와 차단 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $k_z^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - k_c^2$

02. $f_c = c/(2\pi) k_c$

03. TE: $E_z=0$

04. TM: $H_z=0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

117. 도파관 모드와 차단 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. z 방향 phasor를 분리하고 transverse Helmholtz 문제의 고유값을 찾는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $k_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon - k_c^2$

02. $f_c = c/(2\pi) k_c$

03. TE: $\mathbf{E}_z=0$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

117. 도파관 모드와 차단 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 금속 또는 유전체 waveguide에서 횡단 경계조건이 모드를 양자화할 때 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

117. 도파관 모드와 차단 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 도파관 모드와 차단 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

117. 도파관 모드와 차단 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

마이크로파 도파관, 집적광학, cavity feed 설계에 사용된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

118. 공동공진기와 Q

개념 지도와 물리량 정의

공동공진기와 Q은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 손실이 작고 특정 정상모드가 에너지 저장을 지배할 때 좋다.

핵심 수식.

- 01. ω_n from boundary eigenproblem
- 02. $Q = \omega U / P_{\text{loss}}$
- 03. $\Delta \omega = \omega_0 / Q$
- 04. Purcell $\sim Q / V_{\text{mode}}$

유도 뼈대. Maxwell 고유값 문제와 표면/매질 손실 적분으로 공진주파수와 Q를 구한다.

검산. 높은 Q가 항상 좋은지 bandwidth 관점으로 답하라.

자가 점검. 공동공진기와 Q에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

118. 공동공진기와 Q - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. ω_n from boundary eigenproblem
02. $Q = \omega U / P_{\text{loss}}$
03. $\Delta \omega = \omega_0 / Q$
04. Purcell $\sim Q/V_{\text{mode}}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

118. 공동공진기와 Q - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Maxwell 고유값 문제와 표면/매질 손실 적분으로 공진주파수와 Q를 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. ω_n from boundary eigenproblem
02. $Q = \omega U / P_{\text{loss}}$
03. $\Delta \omega = \omega_0 / Q$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

118. 공동공진기와 Q - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 손실이 작고 특정 정상모드가 에너지 저장을 지배할 때 좋다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

118. 공동공진기와 Q - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 공동공진기와 Q 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

118. 공동공진기와 Q - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

마이크로파 cavity, laser resonator, quantum emitter enhancement에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

119. Hertzian dipole와 안테나

개념 지도와 물리량 정의

Hertzian dipole와 안테나는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 안테나 길이가 파장보다 충분히 짧은 전기쌍극자 근사에서 시작한다.

핵심 수식.

01. $E_{\theta} \sim \eta k^2 p \sin \theta \exp(ikr)/(4\pi r)$

02. $P_{rad} = \eta k^4 |p|^2/(12\pi)$

03. $R_{rad} \sim 80 \pi^2 (l/\lambda)^2$

04. $G=4\pi U/P_{rad}$

유도 뼈대. 지연 벡터퍼텐셜의 원거리 항만 남기고 Poynting flux를 적분한다.

검산. 근거리장과 원거리장의 거리 의존성을 구분하라.

자가 점검. Hertzian dipole와 안테나에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

119. Hertzian dipole와 안테나 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $E_{\theta} \sim \eta k^2 p \sin \theta \exp(ikr)/(4\pi r)$

02. $P_{rad} = \eta k^4 |p|^2/(12\pi)$

03. $R_{rad} \sim 80 \pi^2 (l/\lambda)^2$

04. $G=4\pi U/P_{rad}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

119. Hertzian dipole와 안테나 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 자연 벡터퍼텐셜의 원거리 항만 남기고 Poynting flux를 적분한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E_\theta \sim \eta k^2 p \sin \theta \exp(ikr)/(4\pi r)$
02. $P_{rad} = \eta k^4 |p|^2/(12\pi)$
03. $R_{rad} \sim 80 \pi^2 (l/\lambda)^2$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

119. Hertzian dipole와 안테나 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 안테나 길이가 파장보다 충분히 짧은 전기쌍극자 근사에서 시작한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

119. Hertzian dipole와 안테나 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Hertzian dipole와 안테나 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

119. Hertzian dipole와 안테나 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

안테나 설계의 가장 기본적인 방사패턴과 스케일 법칙이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

120. 개구 안테나와 Fourier optics

개념 지도와 물리량 정의

개구 안테나와 Fourier optics은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 개구가 충분히 크고 far-field 조건 $R \gg 2D^2/\lambda$ 가 성립할 때 쓴다.

핵심 수식.

$$01. \mathbf{E}_{far}(k_x, k_y) \sim \text{Fourier}\{\mathbf{E}_{ap}(x, y)\}$$

$$02. D \sim 4\pi \mathbf{A}_{eff}/\lambda^2$$

$$03. \theta \sim \lambda/D_{ap}$$

$$04. \text{Friis: } P_r/P_t = G_t G_r (\lambda/(4\pi R))^2$$

유도 뼈대. Huygens 원리 또는 Kirchhoff 적분을 Fraunhofer 극한에서 Fourier 변환으로 바꾼다.

검산. 개구가 커질수록 빔폭이 왜 줄어드는지 설명하라.

자가 점검. 개구 안테나와 Fourier optics에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

120. 개구 안테나와 Fourier optics - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $E_{far}(kx, ky) \sim \text{Fourier}\{E_{ap}(x, y)\}$

02. $D \sim 4\pi A_{eff}/\lambda^2$

03. $\theta \sim \lambda/D_{ap}$

04. Friis: $Pr/Pt = Gt Gr (\lambda/(4\pi R))^2$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

120. 개구 안테나와 Fourier optics - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Huygens 원리 또는 Kirchhoff 적분을 Fraunhofer 극한에서 Fourier 변환으로 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E_{far}(kx, ky) \sim \text{Fourier}\{E_{ap}(x, y)\}$
02. $D \sim 4\pi A_{eff}/\lambda^2$
03. $\theta \sim \lambda/D_{ap}$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

120. 개구 안테나와 Fourier optics - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 개구가 충분히 크고 far-field 조건 $R \gg 2D^2/\lambda$ 가 성립할 때 쓴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

120. 개구 안테나와 Fourier optics - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 개구 안테나와 Fourier optics 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

120. 개구 안테나와 Fourier optics - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

레이더 안테나, 렌즈, 광학 영상계가 같은 수학을 공유한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

121. Lienard-Wiechert 장

개념 지도와 물리량 정의

Lienard-Wiechert 장은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 상대론적으로 움직이는 점전하의 retarded solution에 적용한다.

핵심 수식.

01. $\varphi = q / (4\pi \epsilon_0 (R - R \cdot \beta))_{ret}$
02. $A = \beta \varphi / c$
03. $E = \text{velocity field} + \text{acceleration field}$
04. $P_{Lienard} = q^2 \gamma^6 (a^2 - (\beta \times a)^2) / (6\pi \epsilon_0 c^3)$

유도 뼈대. retarded time 조건을 가진 점전하 4-current를 Green 함수에 넣는다.

검산. 가속도장이 왜 $1/R$ 로 감쇠하며 복사를 만드는지 말해보라.

자가 점검. Lienard-Wiechert 장에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

121. Lienard-Wiechert 장 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\varphi = q / (4\pi \epsilon_0 (R - R \cdot \beta))_{ret}$
02. $A = \beta \varphi / c$
03. E = velocity field + acceleration field
04. $P_{Lienard} = q^2 \gamma^6 (a^2 - (\beta \times a)^2) / (6\pi \epsilon_0 c^3)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

121. Lienard-Wiechert 장 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. retarded time 조건을 가진 점전하 $4\pi\epsilon_0 q$ 를 Green 함수에 넣는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\varphi = q/(4\pi\epsilon_0 (R - R\cdot\beta))_{ret}$
02. $A = \beta \varphi/c$
03. $E = \text{velocity field} + \text{acceleration field}$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

121. Lienard-Wiechert 장 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 상대론적으로 움직이는 점전하의 retarded solution에 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

121. Lienard-Wiechert 장 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Lienard-Wiechert 장 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

121. Lienard-Wiechert 장 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

synchrotron radiation, accelerator physics, relativistic antenna 문제의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에 서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

122. 복사 반작용

개념 지도와 물리량 정의

복사 반작용은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고전 점전하 모델의 자기복사 에너지 보존을 다룰 때 나타난다.

핵심 수식.

01. $F_{AL} = q^2/(6\pi \epsilon_0 c^3) d a/dt$

02. $\tau_0 = q^2/(6\pi \epsilon_0 m c^3)$

03. Landau-Lifshitz reduction

04. runaway/preacceleration issues

유도 뼈대. 방사 전력과 입자 에너지 손실을 맞추면 가속도의 시간미분 항이 생긴다.

검산. 왜 점전하 고전모형에 문제가 생기는지 에너지 관점으로 설명하라.

자가 점검. 복사 반작용에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

122. 복사 반작용 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $F_{AL} = q^2/(6\pi \epsilon_0 c^3) d a/dt$

02. $\tau_0 = q^2/(6\pi \epsilon_0 m c^3)$

03. Landau-Lifshitz reduction

04. runaway/preacceleration issues

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

122. 복사 반작용 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 방사 전력과 입자 에너지 손실을 맞추면 가속도의 시간미분 항이 생긴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F_{AL} = q^2/(6\pi \epsilon_0 c^3) d a/dt$

02. $\tau_0 = q^2/(6\pi \epsilon_0 m c^3)$

03. Landau-Lifshitz reduction

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

122. 복사 반작용 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고전 점전하 모델의 자기복사 에너지 보존을 다룰 때 나타난다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

122. 복사 반작용 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 복사 반작용 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

122. 복사 반작용 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

강장 레이저□전자 상호작용과 고전 전자 반작용의 한계 검토에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

123. 산란과 optical theorem

개념 지도와 물리량 정의

산란과 optical theorem은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형파 산란, 원거리 spherical wave 전개가 가능할 때 쓴다.

핵심 수식.

01. $f(\theta)$ scattering amplitude

02. $d\sigma/d\Omega = |f(\theta)|^2$

03. $\sigma_{tot} = (4\pi/k) \text{Im } f(0)$

04. $S = 1 + iT$

유도 뼈대. 입사파와 산란파의 원거리 asymptotic을 비교하고 flux 보존으로 optical theorem을 얻는다.

검산. 전방 산란 진폭이 총 단면적과 연결되는 이유를 보존법칙으로 설명하라.

자가 점검. 산란과 optical theorem에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

123. 산란과 optical theorem - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $f(\theta)$ scattering amplitude

02. $d\sigma/d\Omega = |f(\theta)|^2$

03. $\sigma_{tot} = (4\pi/k) \text{Im } f(0)$

04. $S = 1 + iT$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

123. 산란과 optical theorem - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 입사파와 산란파의 원거리 asymptotic을 비교하고 flux 보존으로 optical theorem을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $f(\theta)$ scattering amplitude

02. $d\sigma/d\Omega = |f(\theta)|^2$

03. $\sigma_{tot} = (4\pi/k) \text{Im } f(0)$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

123. 산란과 optical theorem - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형파 산란, 원거리 spherical wave 전개가 가능할 때 쓴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

123. 산란과 optical theorem - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 산란과 optical theorem 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

123. 산란과 optical theorem - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

레이더 단면적, 광산란, 양자 산란의 공통 구조다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

124. Rayleigh와 Mie 산란

개념 지도와 물리량 정의

Rayleigh와 Mie 산란은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 입자 크기와 파장의 비 $x=ka$ 가 산란 regime을 정한다.

핵심 수식.

01. $\sigma_R \sim (8\pi/3) k^4 |\alpha|^2$

02. $x = k a$

03. *Mie* coefficients a_l, b_l

04. $Q_{sca} = \sigma_{sca}/(\pi a^2)$

유도 뼈대. 작은 입자는 유도쌍극자로, 임의의 구는 vector spherical harmonics로 전개한다.

검산. Rayleigh 산란이 왜 λ^{-4} 에 비례하는지 말해보라.

자가 점검. Rayleigh와 Mie 산란에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

124. Rayleigh와 Mie 산란 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\sigma_R \sim (8\pi/3) k^4 |\alpha|^2$

02. $\chi = k a$

03. *Mie coefficients* a_l, b_l

04. $Q_{sca} = \sigma_{sca}/(\pi a^2)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

124. Rayleigh와 Mie 산란 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 입자는 유도쌍극자로, 임의의 구는 vector spherical harmonics로 전개한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\sigma_R \sim (8\pi i/3) k^4 |\alpha|^2$

02. $\chi = k a$

03. Mie coefficients a_l, b_l

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

124. Rayleigh와 Mie 산란 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 입자 크기와 파장의 비 $x=ka$ 가 산란 regime을 정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

124. Rayleigh와 Mie 산란 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Rayleigh와 Mie 산란 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

124. Rayleigh와 Mie 산란 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

대기광학, nanoparticle sensing, colloid optics, radar scattering에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

125. 공변 전자기학

개념 지도와 물리량 정의

공변 전자기학은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 특수상대론 좌표계에서 전자기 법칙을 텐서식으로 쓰는 표현이다.

핵심 수식.

01. $F_{mn} = d_m A_n - d_n A_m$
02. $d_m F^{mn} = \mu_0 J^n$
03. $d_a F_{bc} = 0$
04. $F_{mn} F^{mn} = 2(B^2 - c^{-2}E^2)$

유도 뼈대. 전기장과 자기장을 반대칭 tensor의 성분으로 묶고 4-current와 결합한다.

검산. 전기장과 자기장이 관성계에 따라 섞이는 이유를 설명하라.

자가 점검. 공변 전자기학에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

125. 공변 전자기학 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $F_{mn} = d_m A_n - d_n A_m$
02. $d_m F^{mn} = \mu_0 J^n$
03. $d_a F_{bc} = 0$
04. $F_{mn} F^{mn} = 2(B^2 - c^{-2}E^2)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

125. 공변 전자기학 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 전기장과 자기장을 반대칭 tensor의 성분으로 묶고 4-current과 결합한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F_{mn} = d_m A_n - d_n A_m$
02. $d_m F^{mn} = \mu_0 J^n$
03. $d_a F_{bc} = 0$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

125. 공변 전자기학 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 특수상대론 좌표계에서 전자기 법칙을 텐서식으로 쓰는 표현이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

125. 공변 전자기학 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 공변 전자기학 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

125. 공변 전자기학 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

상대론, 입자가속기, 장론, 고에너지 물리로 넘어가는 관문이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

126. 전자기 작용과 Noether 구조

개념 지도와 물리량 정의

전자기 작용과 Noether 구조는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고전장론의 작용원리와 gauge invariance를 전자기학에 적용한다.

핵심 수식.

$$01. S = \int d^4x \left(-1/(4\mu_0) \mathbf{F}_{mn} \mathbf{F}^{mn} - \mathbf{J}_m \mathbf{A}^m \right)$$

$$02. \delta S/dA = 0$$

$$03. \text{gauge } \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + d\chi$$

$$04. d_m \mathbf{J}^m = 0$$

유도 뼈대. 작용을 A에 대해 변분하여 Maxwell 방정식을 얻고, gauge symmetry에서 전하보존을 읽는다.

검산. 게이지 대칭이 물리 자유도가 아니라 중복표현임을 설명하라.

자가 점검. 전자기 작용과 Noether 구조에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

126. 전자기 작용과 Noether 구조 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $S = \int d^4x \left(-1/(4\mu_0) F_{mn} F^{mn} - J_m A^m \right)$

02. $\delta S/dA = 0$

03. gauge $A \rightarrow A + d\chi$

04. $d_m J^m = 0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

126. 전자기 작용과 Noether 구조 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작용을 A 에 대해 변분하여 Maxwell 방정식을 얻고, gauge symmetry에서 전하보존을 읽는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. S = \int d^4x \left(-1/(4\mu_0) F_{mn} F^{mn} - J_m A^m \right)$$

$$02. \delta S/dA = 0$$

$$03. \text{gauge } A \rightarrow A + d\chi$$

$$04. \text{boundary/initial condition closes the problem}$$

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

126. 전자기 작용과 Noether 구조 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고전장론의 작용원리와 gauge invariance를 전자기학에 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

126. 전자기 작용과 Noether 구조 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 전자기 작용과 Noether 구조 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

126. 전자기 작용과 Noether 구조 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

QED, Yang-Mills 이론, 현대 field theory 표기의 시작점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

127. 미분형식 표기

개념 지도와 물리량 정의

미분형식 표기는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 다양체와 좌표 독립 표기에서 Maxwell 방정식을 압축한다.

핵심 수식.

01. $F = dA$

02. $dF=0$

03. $d \cdot F = J$

04. $S = -1/(2\mu_0) \int F \wedge *F$

유도 뼈대. 외미분 d 와 Hodge star를 사용해 동차/비동차 Maxwell 방정식을 분리한다.

검산. $dF=0$ 이 Faraday 법칙과 $\text{div } B=0$ 을 동시에 답는 이유를 확인하라.

자가 점검. 미분형식 표기에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

127. 미분형식 표기 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{F} = d\mathbf{A}$

02. $d\mathbf{F}=0$

03. $d \cdot \mathbf{F} = \mathbf{J}$

04. $\mathbf{S} = -1/(2\mu_0) \int \mathbf{F} \wedge \mathbf{F}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

127. 미분형식 표기 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 외미분 d 와 Hodge star를 사용해 동차/비동차 Maxwell 방정식을 분리한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F = dA$

02. $dF=0$

03. $d \cdot F = J$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

127. 미분형식 표기 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 다양체와 좌표 독립 표기에서 Maxwell 방정식을 압축한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

127. 미분형식 표기 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 미분형식 표기 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

127. 미분형식 표기 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

일반상대론 배경, topological field theory, metamaterial geometry에 유용하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

128. Dyadic Green 함수

개념 지도와 물리량 정의

Dyadic Green 함수는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 벡터파, 경계, 산란체가 있는 선형 매질에서 소스□장 관계를 kernel로 쓴다.

핵심 수식.

$$\mathbf{01.} \quad \text{curl curl } \mathbf{G} - k_0^2 \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{G} = \mathbf{I} \delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_p)$$

$$\mathbf{02.} \quad \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i \omega \mu \int \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_p) \mathbf{J}(\mathbf{r}_p) d^3 r_p$$

$$\mathbf{03.} \quad \text{LDOS} \sim \text{Im Tr } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r})$$

$$\mathbf{04.} \quad \text{reciprocity: } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_p) = \mathbf{G}^T(\mathbf{r}_p, \mathbf{r})$$

유도 뼈대. 단위 점쌍극자 소스에 대한 Maxwell 방정식을 풀어 dyadic response를 정의한다.

검산. scalar Green 함수와 dyadic Green 함수의 차이를 설명하라.

자가 점검. Dyadic Green 함수에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

128. Dyadic Green 함수 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\text{curl curl } G - k_0^2 \epsilon(r) G = I \delta(r-rp)$

02. $E(r) = i \omega \mu \int G(r, rp) J(rp) d^3rp$

03. $\text{LDOS} \sim \text{Im Tr } G(r, r)$

04. reciprocity: $G(r, rp) = G^T(rp, r)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

128. Dyadic Green 함수 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 단위 점쌍극자 소스에 대한 Maxwell 방정식을 풀어 dyadic response를 정의한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \text{curl curl } G - k_0^2 \epsilon(r) G = I \delta(r-rp)$$

$$02. E(r) = i \omega \mu \int G(r, rp) J(rp) d^3rp$$

$$03. \text{LDOS} \sim \text{Im Tr } G(r, r)$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

128. Dyadic Green 함수 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 벡터파, 경계, 산란체가 있는 선형 매질에서 소스□장 관계를 kernel 로 쓴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

128. Dyadic Green 함수 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Dyadic Green 함수 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

128. Dyadic Green 함수 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

나노포토닉스, 방출률, thermal radiation, inverse design의 핵심 도구다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

129. Lorentz reciprocity

개념 지도와 물리량 정의

Lorentz reciprocity은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형, 시간불변, reciprocal constitutive relation이 있는 매질에서 성립한다.

핵심 수식.

01. $\text{div}(\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2$
02. $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{S}_{ji}$ for reciprocal network
03. $\epsilon^T = \epsilon, \mu^T = \mu$
04. $\xi^T = -\zeta$

유도 뼈대. 두 Maxwell 해의 curl 방정식을 교차 내적하고 빼서 divergence identity를 만든다.

검산. 자기 bias가 reciprocity를 어떻게 깰 수 있는지 말해보라.

자가 점검. Lorentz reciprocity에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

129. Lorentz reciprocity - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\text{div}(\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2$

02. $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{S}_{ji}$ for reciprocal network

03. $\varepsilon^T = \varepsilon, \mu^T = \mu$

04. $\xi^T = -\zeta$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

129. Lorentz reciprocity - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 두 Maxwell 해의 curl 방정식을 교차 내적하고 빼서 divergence identity를 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\text{div}(\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2$

02. $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{S}_{ji}$ for reciprocal network

03. $\varepsilon^T = \varepsilon, \mu^T = \mu$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검증한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

129. Lorentz reciprocity - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형, 시간불변, reciprocal constitutive relation이 있는 매질에서 성립한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

129. Lorentz reciprocity - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Lorentz reciprocity 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

129. Lorentz reciprocity - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

안테나 송수신 등가성, microwave network, photonic device 설계에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

130. FDTD와 Yee 격자

개념 지도와 물리량 정의

FDTD와 Yee 격자는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 시간영역 Maxwell 방정식을 staggered grid로 이산화하는 명시적 방법이다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + dt/\epsilon \operatorname{curl} \mathbf{H}^{n+1/2}$
02. $\mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - dt/\mu \operatorname{curl} \mathbf{E}^n$
03. $c \, dt \, \sqrt{(dx^{-2} + dy^{-2} + dz^{-2})} \leq 1$
04. numerical dispersion relation

유도 뼈대. E와 H를 시간·공간 반스텝 엇갈리게 배치하여 curl 업데이트를 만든다.

검산. Courant 조건을 위반하면 왜 불안정해지는지 설명하라.

자가 점검. FDTD와 Yee 격자에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

130. FDTD와 Yee 격자 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + dt/\epsilon \operatorname{curl} \mathbf{H}^{n+1/2}$
02. $\mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - dt/\mu \operatorname{curl} \mathbf{E}^n$
03. $c \, dt \, \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2} \leq 1$
04. numerical dispersion relation

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

130. FDTD와 Yee 격자 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. E와 H를 시간·공간 반스텝 엇갈리게 배치하여 curl 업데이트를 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + dt/\epsilon \operatorname{curl} \mathbf{H}^{n+1/2}$$

$$02. \mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - dt/\mu \operatorname{curl} \mathbf{E}^n$$

$$03. c \, dt \sqrt{(dx^{-2} + dy^{-2} + dz^{-2})} \leq 1$$

$$04. \text{boundary/initial condition closes the problem}$$

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

130. FDTD와 Yee 격자 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 시간영역 Maxwell 방정식을 staggered grid로 이산화하는 명시적 방법이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

130. FDTD와 Yee 격자 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 FDTD와 Yee 격자 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

130. FDTD와 Yee 격자 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

안테나 transient, photonics, EMC, scattering simulation에 널리 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

131. FEM weak form

개념 지도와 물리량 정의

FEM weak form은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 복잡한 형상과 불균일 매질에서 주파수영역 Maxwell 문제를 weak form으로 푼다.

핵심 수식.

01. $\int_V (\text{curl } \mathbf{v}) \cdot \mu^{-1} (\text{curl } \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int_V \mathbf{v} \cdot \epsilon \mathbf{E} dV = \int_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{J}$
02. edge elements
03. boundary terms
04. eigenfrequency problem

유도 뼈대. PDE에 test function을 곱하고 부분적분하여 edge basis 공간에서 행렬식을 만든다.

검산. nodal element 대신 edge element가 필요한 이유를 말해보라.

자가 점검. FEM weak form에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

131. FEM weak form - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\int_V (\text{curl } \mathbf{v}) \cdot \mu^{-1} (\text{curl } \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int_V \mathbf{v} \cdot \epsilon \mathbf{E} dV = \int_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{J}$
02. edge elements
03. boundary terms
04. eigenfrequency problem

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

131. FEM weak form - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. PDE에 test function을 곱하고 부분적분하여 edge basis 공간에서 행렬식을 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \int_V (\text{curl } \mathbf{v}) \cdot \mu^{-1} (\text{curl } \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int_V \mathbf{v} \cdot \epsilon \mathbf{E} dV = \int_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{J} dV$$

02. edge elements

03. boundary terms

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

131. FEM weak form - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 복잡한 형상과 불균일 매질에서 주파수영역 Maxwell 문제를 weak form으로 푼다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

131. FEM weak form - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 FEM weak form 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

131. FEM weak form - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

상용 EM solver의 중심축이며 waveguide/cavity/eigenmode 문제에 강하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

132. MoM과 적분방정식

개념 지도와 물리량 정의

MoM과 적분방정식은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 도체 또는 표면전류 문제에서 Green 함수 적분식을 이산화한다.

핵심 수식.

01. $E_{\text{scat}} = i \omega \mu \int G J_s dS$
02. $Z I = V$
03. EFIE/MFIE/CFIE
04. radiation condition built in

유도 뼈대. 경계면 미지 전류를 basis function으로 전개하고 testing하여 impedance matrix를 만든다.

검산. dense matrix가 생기는 이유와 fast method가 필요한 이유를 말하라.

자가 점검. MoM과 적분방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

132. MoM과 적분방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01.** $E_{\text{scat}} = i \omega \mu \int G J_s dS$
- 02.** $Z I = V$
- 03.** EFIE/MFIE/CFIE
- 04.** radiation condition built in

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

132. MoM과 적분방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 경계면 미지 전류를 basis function으로 전개하고 testing하여 impedance matrix를 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E_{\text{scat}} = i \omega \mu \int G J_s dS$

02. $Z I = V$

03. EFIE/MFIE/CFIE

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

132. MoM과 적분방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 도체 또는 표면전류 문제에서 Green 함수 적분식을 이산화한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 빠대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

132. MoM과 적분방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 MoM과 적분방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

132. MoM과 적분방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

안테나, 레이더 단면적, open region scattering에 유리하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

133. PML과 흡수경계

개념 지도와 물리량 정의

PML과 흡수경계는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. open domain을 유한 계산영역으로 자를 때 인공반사를 줄이는 경계층이다.

핵심 수식.

- 01. coordinate stretch $x \rightarrow \int s_x dx$
- 02. $s_x = 1 + \sigma_x/(i \omega \epsilon_0)$
- 03. reflection $\rightarrow 0$ ideally
- 04. anisotropic effective medium

유도 뼈대. 복소 좌표 stretching을 Maxwell 방정식에 넣어 매질 텐서로 해석한다.

검산. PML 두께와 흡수 프로파일을 바꾸면 어떤 수치오류가 생기는지 생각하라.

자가 점검. PML과 흡수경계에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

133. PML과 흡수경계 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. coordinate stretch $x \rightarrow \int s_x dx$
- 02. $s_x = 1 + \sigma_x / (i \omega \epsilon_0)$
- 03. reflection $\rightarrow 0$ ideally
- 04. anisotropic effective medium

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

133. PML과 흡수경계 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 복소 좌표 stretching을 Maxwell 방정식에 넣어 매질 텐서로 해석한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. coordinate stretch $x \rightarrow \int s_x dx$
02. $s_x = 1 + \sigma_x / (i \omega \epsilon_0)$
03. reflection $\rightarrow 0$ ideally
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

133. PML과 흡수경계 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. open domain을 유한 계산영역으로 자를 때 인공반사를 줄이는 경계층이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

133. PML과 흡수경계 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 PML과 흡수경계 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

133. PML과 흡수경계 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

FDTD/FEM 모두에서 방사조건을 구현하는 핵심 기술이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

134. 역설계와 adjoint 방법

개념 지도와 물리량 정의

역설계와 adjoint 방법은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 선형 PDE 제약 최적화에서 설계변수가 많을 때 adjoint gradient를 사용한다.

핵심 수식.

01. $F = \text{objective}(\mathbf{E}, p)$
02. $dF/dp = \partial_p F - \lambda^T \partial_p \mathbf{A} \mathbf{E}$
03. $\mathbf{A}(p)\mathbf{E} = \mathbf{b}$
04. $\mathbf{A}^T \lambda = \partial_{\mathbf{E}} F$

유도 뼈대. 전방 문제와 adjoint 문제 두 번으로 많은 설계변수의 gradient를 얻는다.

검산. finite difference gradient와 adjoint gradient의 계산량 차이를 비교하라.

자가 점검. 역설계와 adjoint 방법에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

134. 역설계와 adjoint 방법 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이며 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{F} = \text{objective}(\mathbf{E}, p)$

02. $dF/dp = \partial_p \mathbf{F} - \lambda^T \partial_p \mathbf{A} \mathbf{E}$

03. $\mathbf{A}(p)\mathbf{E} = \mathbf{b}$

04. $\mathbf{A}^T \lambda = \partial_{\mathbf{E}} \mathbf{F}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

134. 역설계와 adjoint 방법 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 전방 문제와 adjoint 문제 두 번으로 많은 설계변수의 gradient를 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F = \text{objective}(\mathbf{E}, p)$

02. $dF/dp = \partial_p F - \lambda^T \partial_p \mathbf{A} \mathbf{E}$

03. $\mathbf{A}(p)\mathbf{E} = \mathbf{b}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

134. 역설계와 adjoint 방법 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 선형 PDE 제약 최적화에서 설계변수가 많을 때 adjoint gradient를 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

134. 역설계와 adjoint 방법 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 역설계와 adjoint 방법 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

134. 역설계와 adjoint 방법 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

metasurface, photonic inverse design, topology optimization의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

135. Vlasov-Maxwell 플라즈마

개념 지도와 물리량 정의

Vlasov-Maxwell 플라즈마는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 충돌이 약하고 분포함수의 위상공간 동역학이 중요한 플라즈마에서 쓴다.

핵심 수식.

01. $df_s/dt + \mathbf{v} \cdot \text{grad } f_s + (q_s/m_s)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \text{grad}_v f_s = 0$
02. $\rho = \sum q_s \int f_s d^3v$
03. $\mathbf{J} = \sum q_s \int \mathbf{v} f_s d^3v$
04. Maxwell coupled

유도 뼈대. 입자 Liouville 방정식과 Maxwell 방정식을 self-consistent하게 결합한다.

검산. fluid model로 얻을 수 없는 정보를 분포함수가 어떻게 담는지 설명하라.

자가 점검. Vlasov-Maxwell 플라즈마에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

135. Vlasov-Maxwell 플라즈마 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \frac{df_s}{dt} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} f_s + (q_s/m_s)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \text{grad}_v f_s = 0$$

$$02. \rho = \sum q_s \int f_s d^3v$$

$$03. \mathbf{J} = \sum q_s \int \mathbf{v} f_s d^3v$$

$$04. \text{Maxwell coupled}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

135. Vlasov-Maxwell 플라즈마 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 입자 Liouville 방정식과 Maxwell 방정식을 self-consistent하게 결합한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \quad df_s/dt + \mathbf{v} \cdot \text{grad}_s f_s + (q_s/m_s)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \text{grad}_v f_s = 0$$

$$02. \quad \rho = \sum q_s \int f_s d^3v$$

$$03. \quad \mathbf{J} = \sum q_s \int \mathbf{v} f_s d^3v$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

135. Vlasov-Maxwell 플라즈마 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 충돌이 약하고 분포함수의 위상공간 동역학이 중요한 플라즈마에서 쓴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

135. Vlasov-Maxwell 플라즈마 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Vlasov-Maxwell 플라즈마 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

135. Vlasov-Maxwell 플라즈마 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

우주플라즈마, fusion, beam instability, Landau damping의 기본 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

136. Cold plasma waves

개념 지도와 물리량 정의

Cold plasma waves은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 열운동과 충돌을 무시하고 선형화한 전자 유체 플라즈마에서 시작한다.

핵심 수식.

01. $\omega_p^2 = n e^2 / (\epsilon_0 m)$

02. $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$

03. $n^2 = \epsilon$

04. Appleton-Hartree form

유도 뼈대. 전자 운동방정식과 Maxwell 파동방정식을 결합해 dielectric tensor를 얻는다.

검산. $\omega < \omega_p$ 에서 전파가 왜 차단되는지 설명하라.

자가 점검. Cold plasma waves에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

136. Cold plasma waves - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\omega_p^2 = n e^2 / (\epsilon_0 m)$

02. $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$

03. $n^2 = \epsilon$

04. Appleton-Hartree form

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

136. Cold plasma waves - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 전자 운동방정식과 Maxwell 파동방정식을 결합해 dielectric tensor를 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\omega_p^2 = n e^2 / (\epsilon_0 m)$

02. $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$

03. $n^2 = \epsilon$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

136. Cold plasma waves - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 열운동과 충돌을 무시하고 선형화한 전자 유체 플라즈마에서 시작한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

136. Cold plasma waves - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Cold plasma waves 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

136. Cold plasma waves - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전리층, plasma diagnostics, microwave propagation에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

137. MHD와 Alfven 파

개념 지도와 물리량 정의

MHD와 Alfven 파는/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 강한 충돌 또는 큰 스케일에서 플라스마를 전도성 유체로 볼 때 사용한다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$
02. $d\mathbf{B}/dt = \text{curl}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}$
03. $\rho d\mathbf{v}/dt = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \text{grad } p$
04. $\omega = k_{\text{parallel}} v_A$

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Ohm 법칙, 유체 운동량 방정식을 결합한다.

검산. frozen-in condition이 성립하는 극한을 말해보라.

자가 점검. MHD와 Alfven 파에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

137. MHD와 Alfven 파 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$$

$$02. d\mathbf{B}/dt = \text{curl}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}$$

$$03. \rho d\mathbf{v}/dt = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \text{grad } p$$

$$04. \omega = k_{\text{parallel}} v_A$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

137. MHD와 Alfven 파 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Maxwell 방정식, Ohm 법칙, 유체 운동량 방정식을 결합한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$

02. $d\mathbf{B}/dt = \text{curl}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}$

03. $\rho d\mathbf{v}/dt = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \text{grad } p$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

137. MHD와 Alfven 파 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 강한 충돌 또는 큰 스케일에서 플라스마를 전도성 유체로 볼 때 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

137. MHD와 Alfven 파 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 MHD와 Alfven 파 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

137. MHD와 Alfven 파 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

태양풍, fusion confinement, liquid metal, astrophysical jet에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

138. Metamaterial effective medium

개념 지도와 물리량 정의

Metamaterial effective medium은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 구조 주기가 파장보다 충분히 작아 유효매질로 평균할 수 있을 때 의미가 있다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{D} = \epsilon_{eff} \mathbf{E} + \boldsymbol{\xi} \mathbf{H}$
02. $\mathbf{B} = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{E} + \mu_{eff} \mathbf{H}$
03. n_{eff} may be negative
04. unit cell $\ll \lambda$

유도 뼈대. 산란 또는 Bloch response에서 effective parameter를 추출한다.

검산. retrieved parameter가 물리적인지 passivity/causality로 점검하라.

자가 점검. Metamaterial effective medium에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

138. Metamaterial effective medium - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{D} = \epsilon_{eff} \mathbf{E} + \boldsymbol{\xi} \mathbf{H}$
02. $\mathbf{B} = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{E} + \mu_{eff} \mathbf{H}$
03. n_{eff} may be negative
04. unit cell $\ll \lambda$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

138. Metamaterial effective medium - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 산란 또는 Bloch response에서 effective parameter를 추출한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{D} = \epsilon_{eff} \mathbf{E} + \boldsymbol{\xi} \mathbf{H}$

02. $\mathbf{B} = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{E} + \mu_{eff} \mathbf{H}$

03. n_{eff} may be negative

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

138. Metamaterial effective medium - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 구조 주기가 파장보다 충분히 작아 유효매질로 평균할 수 있을 때 의미가 있다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

138. Metamaterial effective medium - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Metamaterial effective medium 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

138. Metamaterial effective medium - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

음의 굴절률, absorber, cloak, metasurface 설계의 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

139. Photonic crystal band theory

개념 지도와 물리량 정의

Photonic crystal band theory은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 유전율이 주기적으로 변하고 손실이 작을 때 Bloch 정리를 적용한다.

핵심 수식.

01. $E_k(r) = u_k(r) \exp(i k \cdot r)$
02. $\omega_n(k)$ eigenvalue
03. band gap $\Delta \omega$
04. group velocity = $\text{grad}_k \omega$

유도 뼈대. Maxwell eigenproblem을 unit cell과 Bloch boundary condition으로 푼다.

검산. 전자 밴드구조와 광자 밴드구조의 차이를 말해보라.

자가 점검. Photonic crystal band theory에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

139. Photonic crystal band theory - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01.** $E_k(r) = u_k(r) \exp(i k \cdot r)$
- 02.** $\omega_n(k)$ eigenvalue
- 03. band gap $\Delta \omega$
- 04.** group velocity = $\text{grad}_k \omega$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

139. Photonic crystal band theory - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Maxwell eigenproblem을 unit cell과 Bloch boundary condition으로 푼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E_k(r) = u_k(r) \exp(i k \cdot r)$
02. $\omega_n(k)$ eigenvalue
03. band gap $\Delta \omega$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

139. Photonic crystal band theory - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 유전율이 주기적으로 변하고 손실이 작을 때 Bloch 정리를 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

139. Photonic crystal band theory - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Photonic crystal band theory 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

139. Photonic crystal band theory - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

waveguide, cavity, slow light, topological photonics의 기반이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

140. Topological photonics

개념 지도와 물리량 정의

Topological photonics은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. band gap과 모드 연속성이 유지되는 파동계에서 위상 불변량을 정의한다.

핵심 수식.

01. Berry curvature $\Omega_n(k)$
02. $C_n = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega_n d^2k$
03. edge modes from bulk invariant
04. nonreciprocal or synthetic gauge

유도 뼈대. Bloch eigenmode의 Berry connection을 계산하고 gap Chern number를 구한다.

검산. edge mode가 국소 결함에 강한 이유를 bulk-boundary 대응으로 설명하라.

자가 점검. Topological photonics에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

140. Topological photonics - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. Berry curvature $\Omega_n(k)$
- 02. $C_n = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega_n d^{2k}$
- 03. edge modes from bulk invariant
- 04. nonreciprocal or synthetic gauge

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

140. Topological photonics - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Bloch eigenmode의 Berry connection을 계산하고 gap Chern number를 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. Berry curvature $\Omega_n(k)$
02. $C_n = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega_n d^{2k}$
03. edge modes from bulk invariant
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

140. Topological photonics - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. band gap과 모드 연속성이 유지되는 파동계에서 위상 불변량을 정의한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

140. Topological photonics - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Topological photonics 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

140. Topological photonics - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

robust waveguide, chiral edge state, disorder-tolerant photonic routing에 쓰인다. 논문이나 프로젝트에서 는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

141. 열복사와 LDOS

개념 지도와 물리량 정의

열복사와 LDOS은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 평형 또는 근평형 열잡음과 전자기 Green 함수가 연결될 때 사용한다.

핵심 수식.

- 01. $\Theta(\omega, T) = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)$
- 02. $\rho(r, \omega) \sim \text{Im Tr } G(r, r)$
- 03. $P = \int d\omega [\Theta_1 - \Theta_2] T(\omega)$
- 04. fluctuation-dissipation source

유도 뼈대. 열적 전류 fluctuation을 Maxwell Green 함수로 전파시켜 스펙트럼 에너지 흐름을 구한다.

검산. 흑체복사와 근접장 열복사의 차이를 LDOS 관점에서 말하라.

자가 점검. 열복사와 LDOS에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

141. 열복사와 LDOS - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Theta(\omega, T) = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)$

02. $\rho(r, \omega) \sim \text{Im Tr } G(r, r)$

03. $P = \int d\omega [\Theta_1 - \Theta_2] T(\omega)$

04. fluctuation-dissipation source

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

141. 열복사와 LDOS - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 열적 전류 fluctuation을 Maxwell Green 함수로 전파시켜 스펙트럼 에너지 흐름을 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \Theta(\omega, T) = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)$$

$$02. \rho(r, \omega) \sim \text{Im Tr } G(r, r)$$

$$03. P = \int d\omega [\Theta 1 - \Theta 2] T(\omega)$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

141. 열복사와 LDOS - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 평형 또는 근평형 열잡음과 전자기 Green 함수가 연결될 때 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

141. 열복사와 LDOS - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 열복사와 LDOS 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

141. 열복사와 LDOS - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

near-field heat transfer, thermophotovoltaics, thermal emission engineering에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학

142. Casimir 효과와 진공 fluctuation

개념 지도와 물리량 정의

Casimir 효과와 진공 fluctuation은/는 전자기학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 양자 전자기 진공 모드가 경계조건에 의해 바뀌는 경우 나타난다.

핵심 수식.

01. $F/A = -\pi^2 \hbar c / (240 a^4)$

02. $\omega \rightarrow i \xi$

03. Lifshitz formula

04. stress tensor expectation

유도 뼈대. 모드 합 또는 Green 함수의 imaginary frequency 적분으로 에너지/힘을 계산한다.

검산. 왜 imaginary frequency 축에서 수치적분이 안정해지는지 설명하라.

자가 점검. Casimir 효과와 진공 fluctuation에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학

142. Casimir 효과와 진공 fluctuation - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $F/A = -\pi^2 \hbar c / (240 a^4)$

02. $\omega \rightarrow i \xi$

03. Lifshitz formula

04. stress tensor expectation

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학

142. Casimir 효과와 진공 fluctuation - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 모드 합 또는 Green 함수의 imaginary frequency 적분으로 에너지/힘을 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F/A = -\pi^2 \hbar c / (240 a^4)$

02. $\omega \rightarrow i \xi$

03. Lifshitz formula

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학

142. Casimir 효과와 진공 fluctuation - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 양자 전자기 진공 모드가 경계조건에 의해 바뀌는 경우 나타난다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학

142. Casimir 효과와 진공 fluctuation - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학의 Casimir 효과와 진공 fluctuation 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학

142. Casimir 효과와 진공 fluctuation - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

MEMS stiction, 나노스케일 힘, 양자진공 공학의 기준 문제다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 7

상대성이론

상대성이론 Part는 17개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치검산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: Lorentz 변환과 시공간 간격, 4-벡터와 에너지-운동량, 상대론적 action과 고유시간, 전자기장 텐서와 불변량, 상대론적 Doppler와 aberration, 등가원리와 계량, 공변미분과 Christoffel 기호, Geodesic 방정식. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

상대성이론

143. Lorentz 변환과 시공간 간격

개념 지도와 물리량 정의

Lorentz 변환과 시공간 간격은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 모든 관성계에서 빛의 속도와 시공간 간격이 불변이다.

핵심 수식.

- 01. $ct' = \gamma(ct - \beta x)$
- 02. $x' = \gamma(x - \beta ct)$
- 03. $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$
- 04. $s^2 = -c^2 t^2 + x^2 + y^2 + z^2$

유도 뼈대. 두 inertial frame 사이 선형변환이 interval을 보존하게 둔다.

검산. 동시였던 두 사건이 다른 계에서 동시가 아닌 이유를 말하라.

자가 점검. Lorentz 변환과 시공간 간격에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

143. Lorentz 변환과 시공간 간격 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $ct' = \gamma(ct - \beta x)$
02. $x' = \gamma(x - \beta ct)$
03. $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$
04. $s^2 = -c^2 t^2 + x^2 + y^2 + z^2$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

143. Lorentz 변환과 시공간 간격 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 두 inertial frame 사이 선형변환이 interval을 보존하게 둔다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $ct' = \gamma(ct - \beta x)$

02. $x' = \gamma(x - \beta ct)$

03. $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

143. Lorentz 변환과 시공간 간격 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 모든 관성계에서 빛의 속도와 시공간 간격이 불변이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

143. Lorentz 변환과 시공간 간격 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 Lorentz 변환과 시공간 간격 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

143. Lorentz 변환과 시공간 간격 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

시간지연, 길이수축, 동시성 상대성의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

144. 4-벡터와 에너지-운동량

개념 지도와 물리량 정의

4-벡터와 에너지-운동량은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. Lorentz 변환에서 4-벡터는 같은 규칙으로 변환한다.

핵심 수식.

01. $x^\mu = (ct, x, y, z)$

02. $p^\mu = (E/c, p)$

03. $p_\mu p^\mu = -m^2 c^2$

04. $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

유도 뼈대. 불변량을 만들려면 Minkowski metric으로 contraction한다.

검산. 질량이 0이면 $E=pc$ 가 되는 것을 확인하라.

자가 점검. 4-벡터와 에너지-운동량에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

144. 4-벡터와 에너지-운동량 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $x^\mu = (ct, x, y, z)$

02. $p^\mu = (E/c, p)$

03. $p_\mu p^\mu = -m^2 c^2$

04. $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

144. 4-벡터와 에너지-운동량 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 불변량을 만들려면 Minkowski metric으로 contraction한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $x^\mu = (ct, x, y, z)$

02. $p^\mu = (E/c, p)$

03. $p_\mu p^\mu = -m^2 c^2$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

144. 4-벡터와 에너지-운동량 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. Lorentz 변환에서 4□벡터는 같은 규칙으로 변환다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

144. 4-벡터와 에너지-운동량 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 4-벡터와 에너지-운동량 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

144. 4-벡터와 에너지-운동량 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

입자물리, 상대론적 충돌, 전자기장 텐서의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

145. 상대론적 action과 고유시간

개념 지도와 물리량 정의

상대론적 action과 고유시간은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 자유입자의 action은 worldline 길이에 비례한다.

핵심 수식.

01. $d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$

02. $S = -mc^2 \int d\tau$

03. $p = \gamma m v$

04. $L = -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - q\phi + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$

유도 뼈대. 고유시간을 최대/정지화하는 worldline을 변분한다.

검산. 저속 극한에서 $L \sim 1/2mv^2 - mc^2$ 가 되는지 전개하라.

자가 점검. 상대론적 action과 고유시간에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

145. 상대론적 action과 고유시간 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$

02. $S = -mc^2 \int d\tau$

03. $p = \gamma m v$

04. $L = -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - q\phi + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

145. 상대론적 action과 고유시간 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 고유시간을 최대/정지화하는 worldline을 변분한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$

02. $S = -mc^2 \int d\tau$

03. $p = \gamma mv$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

145. 상대론적 action과 고유시간 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 자유입자의 action은 worldline 길이에 비례한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

145. 상대론적 action과 고유시간 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 상대론적 action과 고유시간 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

145. 상대론적 action과 고유시간 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전자기 최소결합과 바로 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

146. 전자기장 텐서와 불변량

개념 지도와 물리량 정의

전자기장 텐서와 불변량은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. E와 B는 서로 다른 물체가 아니라 하나의 2□form 성분이다.

핵심 수식.

$$01. \mathbf{F}^{0i} = -\mathbf{E}_i/c$$

$$02. \mathbf{F}^{ij} = -\varepsilon_{ijk} \mathbf{B}_k$$

$$03. \partial_\mu \mathbf{F}^{\mu\nu} = \mu_0 \mathbf{J}^\nu$$

$$04. I1 = \mathbf{E}^2 - c^2 \mathbf{B}^2, \quad I2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$$

유도 뼈대. Maxwell 방정식을 4차원 tensor 식으로 묶는다.

검산. 어떤 계에서 B=0으로 만들 수 있는 조건을 불변량으로 생각하라.

자가 점검. 전자기장 텐서와 불변량에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

146. 전자기장 텐서와 불변량 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $F^{0i} = -E_i/c$

02. $F^{ij} = -\varepsilon_{ijk} B_k$

03. $\partial_\mu F^{\mu\nu} = \mu_0 J^\nu$

04. $I_1 = E^2 - c^2 B^2, I_2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

146. 전자기장 텐서와 불변량 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Maxwell 방정식을 4차원 tensor 식으로 묶는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F^{0i} = -E_i/c$

02. $F^{ij} = -\epsilon_{ijk} B_k$

03. $\partial_\mu F^{\mu\nu} = \mu_0 J^\nu$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

146. 전자기장 텐서와 불변량 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. E와 B는 서로 다른 물체가 아니라 하나의 2-form 성분이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

146. 전자기장 텐서와 불변량 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 전자기장 텐서와 불변량 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

146. 전자기장 텐서와 불변량 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

상대론적 전자기학과 gauge field theory의 공통 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

147. 상대론적 Doppler와 aberration

개념 지도와 물리량 정의

상대론적 Doppler와 aberration은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관측자의 상대속도는 주파수와 방향을 모두 바꾼다.

핵심 수식.

- 01. $\nu' = \gamma \nu (1 - \beta \cos \theta)$
- 02. $\cos \theta' = (\cos \theta - \beta) / (1 - \beta \cos \theta)$
- 03. headlight effect
- 04. I_ν / ν^3 invariant

유도 뼈대. 광자의 4-운동량을 Lorentz 변환한다.

검산. 접근하는 광원은 왜 blue shift되는지 4-운동량으로 설명하라.

자가 점검. 상대론적 Doppler와 aberration에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

147. 상대론적 Doppler와 aberration - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $\nu' = \gamma\nu(1 - \beta \cos\theta)$
- 02. $\cos\theta' = (\cos\theta - \beta)/(1 - \beta \cos\theta)$
- 03. headlight effect
- 04. I_ν/ν^3 invariant

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

147. 상대론적 Doppler와 aberration - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 광자의 4운동량을 Lorentz 변환한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\nu' = \gamma \nu (1 - \beta \cos \theta)$

02. $\cos \theta' = (\cos \theta - \beta) / (1 - \beta \cos \theta)$

03. headlight effect

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

147. 상대론적 Doppler와 aberration - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관측자의 상대속도는 주파수와 방향을 모두 바꾼다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

147. 상대론적 Doppler와 aberration - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 상대론적 Doppler와 aberration 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

147. 상대론적 Doppler와 aberration - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

천체물리, synchrotron, CMB dipole에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

148. 등가원리와 계량

개념 지도와 물리량 정의

등가원리와 계량은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 중력은 국소적으로 관성계 선택으로 지울 수 있지만 곡률은 지울 수 없다.

핵심 수식.

- 01. local free fall $\rightarrow$ special relativity
- 02. $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
- 03. proper time $d\tau^2 = -ds^2/c^2$
- 04. gravity as geometry

유도 뼈대. 작은 freely falling frame에서 물리법칙을 특수상대론 형태로 둔다.

검산. 균일중력장과 가속계의 관계를 예로 설명하라.

자가 점검. 등가원리와 계량에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

148. 등가원리와 계량 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. local free fall → special relativity

02. $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

03. proper time $d\tau^2 = -ds^2/c^2$

04. gravity as geometry

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

148. 등가원리와 계량 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 freely falling frame에서 물리법칙을 특수상대론 형태로 둔다.

유도에 쓰는 최소식.

01. local free fall $\rightarrow$ special relativity
02. $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
03. proper time $d\tau^2 = -ds^2/c^2$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

148. 등가원리와 계량 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 중력은 국소적으로 관성계 선택으로 지울 수 있지만 곡률은 지울 수 없다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

148. 등가원리와 계량 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 등가원리와 계량 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

148. 등가원리와 계량 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

일반상대론의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

149. 공변미분과 Christoffel 기호

개념 지도와 물리량 정의

공변미분과 Christoffel 기호는/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 곡선좌표/곡률공간에서는 단순 편미분이 tensor로 변하지 않는다.

핵심 수식.

01. $\nabla_{\mu} V^{\nu} = \partial_{\mu} V^{\nu} + \Gamma^{\nu}_{\mu\lambda} V^{\lambda}$
02. $\Gamma^{\rho}_{\mu\nu} = 1/2 g^{\rho\sigma} (\partial_{\mu} g_{\nu\sigma} + \partial_{\nu} g_{\mu\sigma} - \partial_{\sigma} g_{\mu\nu})$
03. $\nabla_{\lambda} g_{\mu\nu} = 0$
04. torsion-free $\Gamma^{\rho}_{\mu\nu} = \Gamma^{\rho}_{\nu\mu}$

유도 뼈대. metric compatibility와 torsion-free 조건으로 Levi-Civita connection을 구한다.

검산. polar coordinate에서도 Christoffel이 0이 아닌 이유를 말하라.

자가 점검. 공변미분과 Christoffel 기호에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

149. 공변미분과 Christoffel 기호 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\nabla_\mu V^\nu = \partial_\mu V^\nu + \Gamma^\nu_{\mu\lambda} V^\lambda$
02. $\Gamma^\rho_{\mu\nu} = 1/2 g^{\rho\sigma} (\partial_\mu g_{\nu\sigma} + \partial_\nu g_{\mu\sigma} - \partial_\sigma g_{\mu\nu})$
03. $\nabla_\lambda g_{\mu\nu} = 0$
04. torsion-free $\Gamma^\rho_{\mu\nu} = \Gamma^\rho_{\nu\mu}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

149. 공변미분과 Christoffel 기호 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. metric compatibility와 torsion-free 조건으로 Levi-Civita connection을 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \nabla_{\mu} V^{\nu} = \partial_{\mu} V^{\nu} + \Gamma^{\nu}_{\mu\lambda} V^{\lambda}$$

$$02. \Gamma^{\rho}_{\mu\nu} = 1/2 g^{\rho\sigma} (\partial_{\mu} g_{\nu\sigma} + \partial_{\nu} g_{\mu\sigma} - \partial_{\sigma} g_{\mu\nu})$$

$$03. \nabla_{\lambda} g_{\mu\nu} = 0$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

149. 공변미분과 Christoffel 기호 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 곡선좌표/곡률공간에서는 단순 편미분이 tensor로 변하지 않는다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

149. 공변미분과 Christoffel 기호 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 공변미분과 Christoffel 기호 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

149. 공변미분과 Christoffel 기호 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

geodesic, curvature, Einstein equation의 계산 엔진이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

150. Geodesic 방정식

개념 지도와 물리량 정의

Geodesic 방정식은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 자유낙하 입자와 빛은 metric이 정하는 geodesic을 따른다.

핵심 수식.

- 01. $d^2x^\mu/d\lambda^2 + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} dx^\alpha/d\lambda dx^\beta/d\lambda = 0$
- 02. $\delta \int ds = 0$
- 03. $u^\nu \nabla_\nu u^\mu = 0$
- 04. null geodesic $ds^2 = 0$

유도 뼈대. proper time 또는 affine parameter로 worldline action을 변분한다.

검산. geodesic이 “힘이 0”인 운동이라는 말을 조심해서 해석하라.

자가 점검. Geodesic 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

150. Geodesic 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $d^2x^\mu/d\lambda^2 + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} dx^\alpha/d\lambda dx^\beta/d\lambda = 0$

02. $\delta \int ds = 0$

03. $u^\nu \nabla_\nu u^\mu = 0$

04. null geodesic $ds^2 = 0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

150. Geodesic 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. proper time 또는 affine parameter로 worldline action을 변분한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \quad d^2x^\mu/d\lambda^2 + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} dx^\alpha/d\lambda dx^\beta/d\lambda = 0$$

$$02. \quad \delta \int ds = 0$$

$$03. \quad u^\nu \nabla_\nu u^\mu = 0$$

$$04. \quad \text{boundary/initial condition closes the problem}$$

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

150. Geodesic 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 자유낙하 입자와 빛은 metric이 정하는 geodesic을 따른다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

150. Geodesic 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 Geodesic 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 질의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

150. Geodesic 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

빛 휨, 궤도 precession, black hole lensing의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

151. 곡률 텐서

개념 지도와 물리량 정의

곡률 텐서는/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 곡률은 vector를 평행이동해 돌아왔을 때의 불일치다.

핵심 수식.

01. $[\nabla_\mu, \nabla_\nu]V^\rho = R^\rho_{\sigma\mu\nu}V^\sigma$

02. $R_{\mu\nu} = R^\rho_{\mu\rho\nu}$

03. $R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$

04. $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - 1/2 R g_{\mu\nu}$

유도 뼈대. connection에서 Riemann tensor를 만들고 contraction한다.

검산. 평평한 공간의 곡선좌표와 진짜 곡률을 어떻게 구분하는가?

자가 점검. 곡률 텐서에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

151. 곡률 텐서 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $[\nabla_\mu, \nabla_\nu]V^\rho = R^\rho_{\sigma\mu\nu}V^\sigma$

02. $R_{\mu\nu} = R^\rho_{\mu\rho\nu}$

03. $R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$

04. $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - 1/2 R g_{\mu\nu}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

151. 곡률 텐서 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. connection에서 Riemann tensor를 만들고 contraction한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. [\nabla_\mu, \nabla_\nu]V^\rho = R^\rho_{\sigma\mu\nu}V^\sigma$$

$$02. R_{\mu\nu} = R^\rho_{\mu\rho\nu}$$

$$03. R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

151. 곡률 텐서 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 곡률은 vector를 평행이동해 돌아왔을 때의 불일치다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

151. 곡률 텐서 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 곡률 텐서 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

151. 곡률 텐서 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

일반상대론 방정식의 왼쪽은 geometry다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

152. Einstein 방정식

개념 지도와 물리량 정의

Einstein 방정식은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 물질 에너지-운동량이 시공간 곡률을 정한다.

핵심 수식.

01. $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$

02. $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$

03. Newtonian limit $\rightarrow \nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$

04. Λ as vacuum energy

유도 뼈대. 일반공변성, Bianchi identity, Newtonian limit을 만족하는 2계 방정식을 고른다.

검산. 좌변과 우변의 차원이 어떻게 맞는지 확인하라.

자가 점검. Einstein 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

152. Einstein 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$
02. $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$
03. Newtonian limit $\rightarrow \nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$
04. Λ as vacuum energy

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

152. Einstein 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 일반공변성, Bianchi identity, Newtonian limit을 만족하는 2계 방정식을 고른다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$

02. $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$

03. Newtonian limit $\rightarrow \nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

152. Einstein 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 물질 에너지-운동량이 시공간 곡률을 정한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

152. Einstein 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 Einstein 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

152. Einstein 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

중력장 방정식의 핵심 압축식이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

153. Stress-energy tensor

개념 지도와 물리량 정의

Stress-energy tensor은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 에너지 밀도, 운동량 밀도, 압력을 하나의 tensor로 묶는다.

핵심 수식.

- 01. T^{00} =energy density
- 02. T^{0i} =energy flux/ c
- 03. T^{ij} =stress
- 04. perfect fluid: $T^{\mu\nu}=(\rho+p/c^2)u^{\mu}u^{\nu}+p g^{\mu\nu}$

유도 뼈대. action을 metric으로 변분하거나 유체 rest frame에서 boost한다.

검산. 압력도 중력의 source가 되는 이유를 tensor 성분으로 말하라.

자가 점검. Stress-energy tensor에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

153. Stress-energy tensor - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. T^{00} =energy density
02. T^{0i} =energy flux/ c
03. T^{ij} =stress
04. perfect fluid: $T^{\mu\nu}=(\rho+p/c^2)u^{\mu\nu+p} g^{\mu\nu}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

153. Stress-energy tensor - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. action을 metric으로 변분하거나 유체 rest frame에서 boost한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. T^{00} =energy density
02. T^{0i} =energy flux/ c
03. T^{ij} =stress
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

153. Stress-energy tensor - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 에너지 밀도, 운동량 밀도, 압력을 하나의 tensor로 묶는다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

153. Stress-energy tensor - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 Stress-energy tensor 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

153. Stress-energy tensor - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

우주론, 별 구조, 전자기장 중력효과의 source다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

154. Schwarzschild 해

개념 지도와 물리량 정의

Schwarzschild 해는/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 정적 구대칭 진공 중력장의 외부해다.

핵심 수식.

01. $ds^2 = -(1-r_s/r)c^2 dt^2 + (1-r_s/r)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$

02. $r_s = 2GM/c^2$

03. horizon at $r=r_s$

04. effective potential for orbits

유도 뼈대. 대칭 ansatz를 Einstein 방정식에 넣어 metric 함수를 구한다.

검산. $r=r_s$ 가 진짜 특이점인지 좌표 특이점인지 구분하라.

자가 점검. Schwarzschild 해에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

154. Schwarzschild 해 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $ds^2 = -(1-r_s/r)c^2 dt^2 + (1-r_s/r)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$

02. $r_s = 2GM/c^2$

03. horizon at $r=r_s$

04. effective potential for orbits

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

154. Schwarzschild 해 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 대칭 ansatz를 Einstein 방정식에 넣어 metric 함수를 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $ds^2 = -(1-r_s/r)c^2 dt^2 + (1-r_s/r)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$

02. $r_s = 2GM/c^2$

03. horizon at $r=r_s$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

154. Schwarzschild 해 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 정적 구대칭 진공 중력장의 외부해다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

154. Schwarzschild 해 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 Schwarzschild 해 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

154. Schwarzschild 해 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

블랙홀, perihelion precession, 빛 휨의 기본 metric이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

155. 약장 근사와 중력파

개념 지도와 물리량 정의

약장 근사와 중력파는/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. metric perturbation이 작은 영역에서는 파동방정식이 된다.

핵심 수식.

- 01. $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $|h| \ll 1$
- 02. $\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}/c^4$
- 03. TT gauge: h_+ , $h_\times$
- 04. quadrupole radiation

유도 뼈대. trace-reversed perturbation과 gauge condition을 선택한다.

검산. 중력파가 왜 monopole/dipole이 아니라 quadrupole에서 시작하는지 생각하라.

자가 점검. 약장 근사와 중력파에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

155. 약장 근사와 중력파 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $|h| \ll 1$
02. $\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}/c^4$
03. TT gauge: h_+ , $h_\times$
04. quadrupole radiation

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

155. 약장 근사와 중력과 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. trace-reversed perturbation과 gauge condition을 선택한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, |h| \ll 1$
02. $\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}/c^4$
03. TT gauge: $h_+, h_\times$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

155. 약장 근사와 중력파 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. metric perturbation이 작은 영역에서는 파동방정식이 된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

155. 약장 근사와 중력과 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 약장 근사와 중력과 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

155. 약장 근사와 중력파 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

중력파 검출과 post-Newtonian 계산의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

156. Kerr와 회전 블랙홀

개념 지도와 물리량 정의

Kerr와 회전 블랙홀은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 회전 질량은 주변 inertial frame을 끌고 간다.

핵심 수식.

- 01. parameters $M, a=J/(Mc)$
- 02. ergosphere where $g_{tt}=0$
- 03. horizon $r_+=GM/c^2 + \sqrt{((GM/c^2)^2 - a^2)}$
- 04. frame dragging

유도 뼈대. 축대칭 stationary metric에서 Killing vector를 사용한다.

검산. ergosphere와 event horizon의 차이를 말해보라.

자가 점검. Kerr와 회전 블랙홀에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

156. Kerr와 회전 블랙홀 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. parameters $M, a=J/(Mc)$
02. ergosphere where $g_{tt}=0$
03. horizon $r_+=GM/c^2 + \sqrt{((GM/c^2)^2 - a^2)}$
04. frame dragging

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

156. Kerr와 회전 블랙홀 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 축대칭 stationary metric에서 Killing vector를 사용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. parameters $M, a=J/(Mc)$
02. ergosphere where $g_{tt}=0$
03. horizon $r_+=GM/c^2 + \sqrt{((GM/c^2)^2 - a^2)}$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

156. Kerr와 회전 블랙홀 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 회전 질량은 주변 inertial frame을 끌고 간다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

156. Kerr와 회전 블랙홀 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 Kerr와 회전 블랙홀 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

156. Kerr와 회전 블랙홀 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

천체물리 블랙홀과 accretion disk 연구에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

157. FLRW 우주론

개념 지도와 물리량 정의

FLRW 우주론은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 균일·등방 우주는 scale factor 하나로 동역학을 기술한다.

핵심 수식.

01. $ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 [d\chi^2 / (1 - k\chi^2) + \chi^2 d\Omega^2]$

02. $H = \dot{a}/a$

03. $H^2 = (8\pi G/3)\rho - kc^2/a^2 + \Lambda c^2/3$

04. $\rho\dot{a} + 3H(\rho + p/c^2) = 0$

유도 뼈대. FLRW metric을 Einstein 방정식에 넣어 Friedmann 방정식을 얻는다.

검산. 복사, 물질, Λ 가 $a(t)$ 에 따라 어떻게 희석되는지 말하라.

자가 점검. FLRW 우주론에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

157. FLRW 우주론 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $ds^2 = -c^{2dt^2+a}(t)^2 [d\chi^2/(1-k\chi^2) + \chi^{2d\Omega^2}]$

02. $H = \dot{a}/a$

03. $H^2 = (8\pi G/3)\rho - kc^2/a^2 + \Lambda c^2/3$

04. $\rho\dot{} + 3H(\rho + p/c^2) = 0$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

157. FLRW 우주론 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. FLRW metric을 Einstein 방정식에 넣어 Friedmann 방정식을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 [d\chi^2 / (1 - k\chi^2) + \chi^2 d\Omega^2]$

02. $H = \dot{a}/a$

03. $H^2 = (8\pi G/3)\rho - kc^2/a^2 + \Lambda c^2/3$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

157. FLRW 우주론 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 균일·등방 우주는 scale factor 하나로 동역학을 기술한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

157. FLRW 우주론 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 FLRW 우주론 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

157. FLRW 우주론 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

빅뱅, 우주팽창, 암흑에너지의 기본 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

158. 블랙홀 열역학

개념 지도와 물리량 정의

블랙홀 열역학은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 중력, 양자, 열역학이 만나는 접점이다.

핵심 수식.

01. $T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$

02. $S_{BH} = k_B A / (4l_P^2)$

03. $dM = T dS + \Omega dJ + \Phi dQ$

04. area theorem

유도 뼈대. horizon surface gravity와 Euclidean time periodicity로 온도를 얻는다.

검산. 엔트로피가 부피가 아니라 면적에 비례한다는 의미를 생각해보라.

자가 점검. 블랙홀 열역학에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

158. 블랙홀 열역학 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$

02. $S_{BH} = k_B A / (4l_P^2)$

03. $dM = T dS + \Omega dJ + \Phi dQ$

04. area theorem

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

158. 블랙홀 열역학 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. horizon surface gravity와 Euclidean time periodicity로 온도를 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$

02. $S_{BH} = k_B A / (4l_P^2)$

03. $dM = T dS + \Omega dJ + \Phi dQ$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

158. 블랙홀 열역학 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 중력, 양자, 열역학이 만나는 접점이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

158. 블랙홀 열역학 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 블랙홀 열역학 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

158. 블랙홀 열역학 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자중력 문제의 가장 강한 단서 중 하나다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

상대성이론

159. 상대론적 유체와 보존법칙

개념 지도와 물리량 정의

상대론적 유체와 보존법칙은/는 상대성이론에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고온 플라즈마, 중성자별, 우주론에서는 상대론적 유체가 필요하다.

핵심 수식.

- 01. $\nabla_\mu T^{\mu\nu}=0$
- 02. $\nabla_\mu(\nu^\mu)=0$
- 03. $T^{\mu\nu}=(e+p)u^\mu u^\nu + p g^{\mu\nu}$
- 04. sound speed $c_s^2=\partial p/\partial e$

유도 뼈대. 보존법칙을 3+1 형태로 분해해 수치해석한다.

검산. 비상대론 극한에서 Euler 방정식이 어떻게 나오는지 확인하라.

자가 점검. 상대론적 유체와 보존법칙에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

상대성이론

159. 상대론적 유체와 보존법칙 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 상대성이론 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\nabla_\mu T^{\mu\nu}=0$
02. $\nabla_\mu(\nu^\mu)=0$
03. $T^{\mu\nu}=(e+p)u^{\mu\nu+p} g^{\mu\nu}$
04. sound speed $c_s^2=\partial p/\partial e$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

상대성이론

159. 상대론적 유체와 보존법칙 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 보존법칙을 3+1 형태로 분해해 수치해석한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\nabla_\mu T^{\mu\nu}=0$

02. $\nabla_\mu(\nu^\mu)=0$

03. $T^{\mu\nu}=(e+p)u^{\mu\nu+p} g^{\mu\nu}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

상대성이론

159. 상대론적 유체와 보존법칙 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고온 플라즈마, 중성자별, 우주론에서는 상대론적 유체가 필요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

상대성이론

159. 상대론적 유체와 보존법칙 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 상대성이론의 상대론적 유체와 보존법칙 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

상대성이론

159. 상대론적 유체와 보존법칙 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

GRMHD와 천체물리 simulation의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 8

양자역학

양자역학 Part는 50개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치검산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: 상태와 Born 규칙, 힐베르트 공간과 자기수반성, 브라켓과 완비성, Schrodinger 방정식, 운동량 표현과 Fourier 변환, 불확정성 관계, 동역학 그림, 전파자와 Green 함수. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

양자역학

160. 상태와 Born 규칙

개념 지도와 물리량 정의

상태와 Born 규칙은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고립계의 순수상태와 일반 혼합상태를 확률적으로 해석한다.

핵심 수식.

01. $|\psi\rangle$ in Hilbert space, $|\psi\rangle \sim \exp(i\alpha)|\psi\rangle$
02. $P(a) = \langle \psi | P_a | \psi \rangle$
03. $\langle A \rangle = \langle \psi | A | \psi \rangle$
04. $\rho \geq 0, \text{Tr } \rho = 1$

유도 뼈대. 관측량을 spectral projector로 분해하고 probability measure를 정의한다.

검산. global phase가 확률에 영향을 주지 않음을 확인하라.

자가 점검. 상태와 Born 규칙에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

160. 상태와 Born 규칙 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $|\psi\rangle$ in Hilbert space, $|\psi\rangle \sim \exp(i\alpha)|\psi\rangle$

02. $P(a) = \langle \psi | P_a | \psi \rangle$

03. $\langle A \rangle = \langle \psi | A | \psi \rangle$

04. $\rho \geq 0, \text{Tr } \rho = 1$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

160. 상태와 Born 규칙 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 관측량을 spectral projector로 분해하고 probability measure를 정의한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $|\psi\rangle$ in Hilbert space, $|\psi\rangle \sim \exp(i\alpha)|\psi\rangle$
02. $P(a) = \langle \psi | P_a | \psi \rangle$
03. $\langle A \rangle = \langle \psi | A | \psi \rangle$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

160. 상태와 Born 규칙 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고립계의 순수상태와 일반 혼합상태를 확률적으로 해석한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 빠대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

160. 상태와 Born 규칙 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 상태와 Born 규칙 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

160. 상태와 Born 규칙 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자계산, 측정, 응집물질 계산의 공통 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

161. 힐베르트 공간과 자기수반성

개념 지도와 물리량 정의

힐베르트 공간과 자기수반성은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 무한차원에서는 연산자 영역(domain)까지 포함해야 물리적으로 안전하다.

핵심 수식.

01. $A=A^{\text{dagger}}$

02. $D(A)=D(A^{\text{dagger}})$

03. $A=\sum a P_a$

04. $U(t)=\exp(-iHt/\hbar)$

유도 뼈대. 스펙트럼 정리로 관측량과 시간발전을 정의한다.

검산. Hermitian matrix와 unbounded self-adjoint operator의 차이를 말하라.

자가 점검. 힐베르트 공간과 자기수반성에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

161. 힐베르트 공간과 자기수반성 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $A=A^{\text{dagger}}$

02. $D(A)=D(A^{\text{dagger}})$

03. $A=\sum a P_a$

04. $U(t)=\exp(-iHt/\hbar)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

161. 힐베르트 공간과 자기수반성 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 스펙트럼 정리로 관측량과 시간발전을 정의한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $A=A^{\text{dagger}}$

02. $D(A)=D(A^{\text{dagger}})$

03. $A=\sum a P_a$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

161. 힐베르트 공간과 자기수반성 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 무한차원에서는 연산자 영역(domain)까지 포함해야 물리적으로 안전하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

161. 힐베르트 공간과 자기수반성 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 힐베르트 공간과 자기수반성 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

161. 힐베르트 공간과 자기수반성 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

경계조건이 Hamiltonian의 자기수반 확장을 바꾸는 경우가 많다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

162. 브라켓과 완비성

개념 지도와 물리량 정의

브라켓과 완비성은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 연속기저는 정규화 가능한 벡터가 아니라 분포적 기저로 해석한다.

핵심 수식.

01. $\langle x | xp \rangle = \delta(x - xp)$
02. $\int dx |x\rangle \langle x| = 1$
03. $\langle x | p \rangle = \exp(i p x / \hbar) / \sqrt{2\pi i \hbar}$
04. $\psi(x) = \langle x | \psi \rangle$

유도 뼈대. 항등연산자를 위치 또는 운동량 기저로 삽입해 표현을 바꾼다.

검산. delta normalization과 box normalization을 비교하라.

자가 점검. 브라켓과 완비성에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

162. 브라켓과 완비성 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\langle x | xp \rangle = \delta(x - xp)$

02. $\int dx |x\rangle \langle x| = 1$

03. $\langle x | p \rangle = \exp(i p x / \hbar) / \sqrt{(2\pi i \hbar)}$

04. $\psi(x) = \langle x | \psi \rangle$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

162. 브라켓과 완비성 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 항등연산자를 위치 또는 운동량 기저로 삽입해 표현을 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\langle x | xp \rangle = \delta(x - xp)$

02. $\int dx |x\rangle \langle x| = 1$

03. $\langle x | p \rangle = \exp(i p x / \hbar) / \sqrt{2\pi i \hbar}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

162. 브라켓과 완비성 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 연속기저는 정규화 가능한 벡터가 아니라 분포적 기저로 해석한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

162. 브라켓과 완비성 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 브라켓과 완비성 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

162. 브라켓과 완비성 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

파동역학과 추상 연산자 형식을 연결한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

163. Schroedinger 방정식

개념 지도와 물리량 정의

Schroedinger 방정식은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 폐쇄계의 unitary 시간발전과 주어진 Hamiltonian에서 적용된다.

핵심 수식.

- 01. $i \hbar d|\psi\rangle/dt = \mathbf{H}|\psi\rangle$
- 02. $i \hbar d\psi/dt = [-\hbar^2/(2m)\nabla^2 + V]\psi$
- 03. $U(t,t_0) = T \exp[-i/\hbar \int_{t_0}^t \mathbf{H} dt]$
- 04. probability conserved

유도 뼈대. 에너지 연산자를 시간발전 generator로 두고 위치표현으로 미분방정식을 얻는다.

검산. Hamiltonian이 self-adjoint이면 norm이 보존됨을 보이라.

자가 점검. Schroedinger 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

163. Schroedinger 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $i \hbar d|\psi\rangle/dt = \mathbf{H}|\psi\rangle$
- 02. $i \hbar d\psi/dt = [-\hbar^2/(2m)\nabla^2 + V]\psi$
- 03. $U(t,t_0) = T \exp[-i/\hbar \int_{t_0}^t \mathbf{H} dt]$
- 04. probability conserved

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

163. Schroedinger 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 에너지 연산자를 시간발전 generator로 두고 위치표현으로 미분방정식을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. i \hbar d|\psi\rangle/dt = \mathbf{H}|\psi\rangle$$

$$02. i \hbar d\psi/dt = [-\hbar^2/(2m)\nabla^2 + V]\psi$$

$$03. U(t,t_0) = T \exp[-i/\hbar \int_{t_0}^t \mathbf{H} dt]$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

163. Schroedinger 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 폐쇄계의 unitary 시간발전과 주어진 Hamiltonian에서 적용된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

163. Schroedinger 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Schroedinger 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

163. Schroedinger 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

모든 비상대론적 양자계산의 기본 PDE다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

164. 운동량 표현과 Fourier 변환

개념 지도와 물리량 정의

운동량 표현과 Fourier 변환은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 무한공간 또는 주기경계 조건에서 Fourier 기저가 운동량 고유상태가 된다.

핵심 수식.

01. $\varphi(p) = 1/\sqrt{2\pi\hbar} \int e^{-ipx/\hbar} \psi(x) dx$
02. $x \rightarrow i\hbar d/dp$
03. $p \rightarrow -i\hbar d/dx$
04. $[x, p] = i\hbar$

유도 뼈대. 위치와 운동량 표현 사이의 unitary Fourier transform을 쓴다.

검산. Gaussian wave packet이 Fourier 변환 뒤에도 Gaussian임을 확인하라.

자가 점검. 운동량 표현과 Fourier 변환에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

164. 운동량 표현과 Fourier 변환 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\varphi(p) = 1/\sqrt{2\pi\hbar} \int e^{-ipx/\hbar} \psi(x) dx$

02. $x \rightarrow i\hbar d/dp$

03. $p \rightarrow -i\hbar d/dx$

04. $[x, p] = i\hbar$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

164. 운동량 표현과 Fourier 변환 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 위치와 운동량 표현 사이의 unitary Fourier transform을 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\varphi(p) = 1/\sqrt{2\pi\hbar} \int e^{-ipx/\hbar} \psi(x) dx$
02. $x \rightarrow i\hbar d/dp$
03. $p \rightarrow -i\hbar d/dx$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

164. 운동량 표현과 Fourier 변환 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 무한공간 또는 주기경계 조건에서 Fourier 기저가 운동량 고유상태가 된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

164. 운동량 표현과 Fourier 변환 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 운동량 표현과 Fourier 변환 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

164. 운동량 표현과 Fourier 변환 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

회절, 터널링, scattering, numerical split operator에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

165. 불확정성 관계

개념 지도와 물리량 정의

불확정성 관계는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관측량의 비가환성과 상태의 분산을 연결한다.

핵심 수식.

01. $\Delta A^2 \Delta B^2 \geq |\langle [A, B] \rangle|^2 / 4$

02. $\Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$

03. Robertson-Schrodinger inequality

04. minimum uncertainty Gaussian

유도 뼈대. Cauchy-Schwarz 부등식을 $(A - \langle A \rangle)|\psi\rangle$ 와 $(B - \langle B \rangle)|\psi\rangle$ 에 적용한다.

검산. 불확정성과 측정장비의 교란을 구분해 설명하라.

자가 점검. 불확정성 관계에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

165. 불확정성 관계 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Delta A^2 \Delta B^2 \geq |\langle [A, B] \rangle|^2 / 4$

02. $\Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$

03. Robertson-Schrodinger inequality

04. minimum uncertainty Gaussian

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

165. 불확정성 관계 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Cauchy-Schwarz 부등식을 $(A \square \langle A \rangle) | \psi \rangle$ 와 $(B \square \langle B \rangle) | \psi \rangle$ 에 적용한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \Delta A^2 \Delta B^2 \geq |\langle [A, B] \rangle|^2 / 4$$

$$02. \Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$$

03. Robertson-Schrodinger inequality

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

165. 불확정성 관계 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관측량의 비가환성과 상태의 분산을 연결한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

165. 불확정성 관계 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 불확정성 관계 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

165. 불확정성 관계 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

측정오차라기보다 상태 준비의 분산 한계로 해석해야 안전하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

166. 동역학 그림

개념 지도와 물리량 정의

동역학 그림은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. Hamiltonian을 어떻게 나눌지에 따라 계산이 쉬운 그림을 선택한다.

핵심 수식.

- 01. $\mathbf{A}_H(t) = U^{\text{dagger}} \mathbf{A}_S U$
- 02. $d\mathbf{A}_H/dt = (i/\hbar)[\mathbf{H}, \mathbf{A}_H] + \partial_t \mathbf{A}_H$
- 03. $|\psi_I\rangle = \exp(iH_0 t/\hbar) |\psi_S\rangle$
- 04. $V_I(t) = \exp(iH_0 t/\hbar) V \exp(-iH_0 t/\hbar)$

유도 뼈대. 시간발전자를 상태 또는 연산자에 옮겨 같은 물리를 다른 표현으로 쓴다.

검산. Schroedinger와 Heisenberg 그림에서 관측값이 같음을 보이라.

자가 점검. 동역학 그림에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

166. 동역학 그림 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{A}_H(t) = U^{\dagger} \mathbf{A}_S U$
02. $d\mathbf{A}_H/dt = (i/\hbar)[\mathbf{H}, \mathbf{A}_H] + \partial_t \mathbf{A}_H$
03. $|\psi_I\rangle = \exp(iH_0 t/\hbar) |\psi_S\rangle$
04. $V_I(t) = \exp(iH_0 t/\hbar) V \exp(-iH_0 t/\hbar)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

166. 동역학 그림 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 시간발전자를 상태 또는 연산자에 옮겨 같은 물리를 다른 표현으로 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{A}_H(t) = U^{\text{dagger}} \mathbf{A}_S U$

02. $d\mathbf{A}_H/dt = (i/\hbar)[\mathbf{H}, \mathbf{A}_H] + \partial_t \mathbf{A}_H$

03. $|\psi_I\rangle = \exp(iH_0 t/\hbar) |\psi_S\rangle$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

166. 동역학 그림 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. Hamiltonian을 어떻게 나눌지에 따라 계산이 쉬운 그림을 선택한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

166. 동역학 그림 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 동역학 그림 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

166. 동역학 그림 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

섭동론, 산란, 양자광학에서 interaction picture가 표준이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

167. 전파자와 Green 함수

개념 지도와 물리량 정의

전파자와 Green 함수는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 초기상태에서 최종상태로 가는 선형 kernel이 존재할 때 사용한다.

핵심 수식.

01. $K(x,t;xp,tp) = \langle x | U(t,tp) | xp \rangle$
02. $\psi(x,t) = \int K(x,t;xp,tp) \psi(xp,tp) dxp$
03. $(i\hbar \partial_t - \mathbf{H})K = i\hbar \delta(t - tp) \delta(x - xp)$
04. $G(\mathbf{E}) = (\mathbf{E} - \mathbf{H} + i0)^{-1}$

유도 뼈대. 시간발전 연산자를 위치기저에 끼워 넣고 Green 함수와 Fourier 변환으로 연결한다.

검산. retarded boundary condition의 +i0 처방을 설명하라.

자가 점검. 전파자와 Green 함수에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

167. 전파자와 Green 함수 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. K(x,t;xp,tp)=\langle x|U(t,tp)|xp\rangle$$

$$02. \psi(x,t)=\int K(x,t;xp,tp)\psi(xp,tp)dxp$$

$$03. (i\hbar d_t - H)K = i\hbar \delta(t - tp)\delta(x - xp)$$

$$04. G(E) = (E - H + i0)^{-1}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

167. 전파자와 Green 함수 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 시간발전 연산자를 위치기저에 끼워 넣고 Green 함수와 Fourier 변환으로 연결한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. K(x,t;xp,tp) = \langle x | U(t,tp) | xp \rangle$$

$$02. \psi(x,t) = \int K(x,t;xp,tp) \psi(xp,tp) dxp$$

$$03. (i\hbar \partial_t - H)K = i\hbar \delta(t - tp) \delta(x - xp)$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

167. 전파자와 Green 함수 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 초기상태에서 최종상태로 가는 선형 kernel이 존재할 때 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

167. 전파자와 Green 함수 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 전파자와 Green 함수 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

167. 전파자와 Green 함수 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

터널링, 산란, 경로적분, 수치전파 알고리즘의 연결점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

168. 경로적분

개념 지도와 물리량 정의

경로적분은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 작용이 주어진 계에서 모든 경로의 위상합으로 전파자를 표현한다.

핵심 수식.

01. $K = \int D[x] \exp(i S[x]/\hbar)$
02. $S = \int L dt$
03. stationary phase $\rightarrow$ classical path
04. Euclidean: $\exp(-S_E/\hbar)$

유도 뼈대. 시간을 작은 조각으로 나누고 완비성을 반복 삽입하여 continuum limit를 취한다.

검산. $\hbar \rightarrow 0$ 에서 고전경로가 지배하는 이유를 말하라.

자가 점검. 경로적분에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

168. 경로적분 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $K = \int \mathcal{D}[x] \exp(i S[x]/\hbar)$
- 02. $S = \int L dt$
- 03. stationary phase $\rightarrow$ classical path
- 04. Euclidean: $\exp(-S_E/\hbar)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

168. 경로적분 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 시간을 작은 조각으로 나누고 완비성을 반복 삽입하여 continuum limit를 취한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $K = \int D[x] \exp(i S[x]/\hbar)$
02. $S = \int L dt$
03. stationary phase $\rightarrow$ classical path
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

168. 경로적분 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 작용이 주어진 계에서 모든 경로의 위상합으로 전파자를 표현한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

168. 경로적분 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 경로적분 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

168. 경로적분 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

반고전, instanton, field theory, statistical mechanics와 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

169. 밀도행렬

개념 지도와 물리량 정의

밀도행렬은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 불완전한 정보, 혼합상태, 부분계 기술에서 필요하다.

핵심 수식.

01. $\rho = \sum p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$

02. $\langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$

03. $\rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$

04. $S = -\text{Tr} \rho \log \rho$

유도 뼈대. ensemble 평균을 trace 표현으로 바꾸고 부분추적으로 subsystem state를 정의한다.

검산. 순수상태와 혼합상태를 $\text{Tr} \rho^2$ 로 구분하라.

자가 점검. 밀도행렬에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

169. 밀도행렬 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \rho = \sum p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|$$

$$02. \langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$$

$$03. \rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$$

$$04. S = -\text{Tr} \rho \log \rho$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

169. 밀도행렬 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. ensemble 평균을 trace 표현으로 바꾸고 부분추적으로 subsystem state를 정의한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\rho = \sum p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$

02. $\langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$

03. $\rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

169. 밀도행렬 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 불완전한 정보, 혼합상태, 부분계 기술에서 필요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, `memory kernel`, `tensor response`, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. `small parameter epsilon`
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. `boundary data`
- 04. `validity domain`

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, `singular point`가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

169. 밀도행렬 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 밀도행렬 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

169. 밀도행렬 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

열상태, 열린계, 양자정보, 계측 이론의 기본 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

170. POVM과 Kraus 연산자

개념 지도와 물리량 정의

POVM과 Kraus 연산자는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 일반 측정과 noise가 있는 detector를 투영측정보다 넓게 표현한다.

핵심 수식.

- 01. $E_m = M_m^{\text{dagger}} M_m$
- 02. $\sum_m E_m = 1$
- 03. $p_m = \text{Tr}(E_m \rho)$
- 04. $\rho_m = M_m \rho M_m^{\text{dagger}} / p_m$

유도 뼈대. system-detector unitary와 ancilla projection을 부분추적으로 줄이면 Kraus 표현이 나온다.

검산. projective measurement가 POVM의 특수한 경우임을 보이라.

자가 점검. POVM과 Kraus 연산자에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

170. POVM과 Kraus 연산자 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $E_m = M_m^{\text{dagger}} M_m$
02. $\sum_m E_m = 1$
03. $p_m = \text{Tr}(E_m \rho)$
04. $\rho_m = M_m \rho M_m^{\text{dagger}} / p_m$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

170. POVM과 Kraus 연산자 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. system $\square$ detector unitary와 ancilla projection을 부분추적으로 줄이면 Kraus 표현이 나온다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E_m = M_m^{\text{dagger}} M_m$

02. $\sum_m E_m = 1$

03. $p_m = \text{Tr}(E_m \rho)$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

170. POVM과 Kraus 연산자 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 일반 측정과 noise가 있는 detector를 투영측정보다 넓게 표현한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

170. POVM과 Kraus 연산자 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 POVM과 Kraus 연산자 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

170. POVM과 Kraus 연산자 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자계산 readout, 양자통신, 연속측정의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

171. 얽힘과 엔트로피

개념 지도와 물리량 정의

얽힘과 엔트로피는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 복합계의 상태가 부분계 상태들의 곱으로 분리되지 않을 때 얽힘이 있다.

핵심 수식.

- 01. $|\psi_{AB}\rangle \text{ not equal } |\psi_A\rangle|\psi_B\rangle$
- 02. $\rho_A = \text{Tr}_B |\psi\rangle\langle\psi|$
- 03. $S_A = -\text{Tr} \rho_A \log \rho_A$
- 04. $I(A:B) = S_{A+SB} - S_{AB}$

유도 뼈대. Schmidt 분해로 순수 bipartite entanglement를 고유값 문제로 바꾼다.

검산. Bell state의 reduced density matrix를 직접 계산하라.

자가 점검. 얽힘과 엔트로피에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

171. 얽힘과 엔트로피 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $|\psi_{AB}\rangle \text{ not equal } |\psi_A\rangle|\psi_B\rangle$

02. $\rho_A = \text{Tr}_B |\psi\rangle\langle\psi|$

03. $S_A = -\text{Tr} \rho_A \log \rho_A$

04. $I(A:B) = S_{A+SB} - S_{AB}$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

171. 얽힘과 엔트로피 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Schmidt 분해로 순수 bipartite entanglement를 고유값 문제로 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $|\psi_{AB}\rangle$ not equal $|\psi_A\rangle|\psi_B\rangle$
02. $\rho_A = \text{Tr}_B |\psi\rangle\langle\psi|$
03. $S_A = -\text{Tr} \rho_A \log \rho_A$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

171. 얽힘과 엔트로피 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 복합계의 상태가 부분계 상태들의 곱으로 분리되지 않을 때 얽힘이 있다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

171. 얽힘과 엔트로피 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 얽힘과 엔트로피 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

171. 얽힘과 엔트로피 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자정보, tensor network, 위상물질에서 핵심 진단량이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

172. 무한·유한 우물

개념 지도와 물리량 정의

무한·유한 우물은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 1차원 경계조건과 정상상태 양자화의 기본 예제다.

핵심 수식.

01. $\psi_n = \sqrt{2/L} \sin(n \pi x/L)$

02. $E_n = n^2 \pi^2 \hbar^2 / (2mL^2)$

03. finite well matching

04. bound states from transcendental equation

유도 뼈대. 경계조건을 만족하는 Helmholtz형 방정식의 고유값을 찾는다.

검산. 에너지 준위가 L^{-2} 로 스케일하는 이유를 차원분석하라.

자가 점검. 무한·유한 우물에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

172. 무한·유한 우물 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\psi_n = \sqrt{2/L} \sin(n \pi x/L)$

02. $E_n = n^2 \pi^2 \hbar^2 / (2mL^2)$

03. finite well matching

04. bound states from transcendental equation

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

172. 무한·유한 우물 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 경계조건을 만족하는 Helmholtz형 방정식의 고유값을 찾는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\psi_n = \sqrt{2/L} \sin(n \pi x/L)$

02. $E_n = n^2 \pi^2 \hbar^2 / (2mL^2)$

03. finite well matching

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

172. 무한·유한 우물 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 1차원 경계조건과 정상상태 양자화의 기본 예제다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

172. 무한·유한 우물 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 무한·유한 우물 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

172. 무한·유한 우물 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자점, heterostructure, waveguide mode의 가장 단순한 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

173. 델타 퍼텐셜과 장벽

개념 지도와 물리량 정의

델타 퍼텐셜과 장벽은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 특히 퍼텐셜을 경계조건으로 바꿔 해석할 수 있을 때 유용하다.

핵심 수식.

01. $V(x)=g \delta(x)$

02. ψ continuous

03. $\psi(+0)-\psi(-0)$ derivative jump $= 2mg \psi(0)/\hbar^2$

04. $T = 1/(1+...)$

유도 뼈대. Schroedinger 방정식을 특이점 주변에서 적분하여 접합조건을 얻는다.

검산. 파동함수는 연속인데 도함수는 왜 불연속인지 설명하라.

자가 점검. 델타 퍼텐셜과 장벽에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

173. 델타 퍼텐셜과 장벽 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $V(x) = g \delta(x)$

02. ψ continuous

03. $\psi(+0) - \psi(-0)$ derivative jump $= 2mg \psi(0)/\hbar^2$

04. $T = 1/(1 + \dots)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

173. 델타 퍼텐셜과 장벽 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Schroedinger 방정식을 특이점 주변에서 적분하여 접합조건을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $V(x)=g \delta(x)$

02. ψ continuous

03. $\psi(+0)-\psi(-0)$ derivative jump $= 2mg \psi(0)/\hbar^2$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

173. 델타 퍼텐셜과 장벽 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 특히 퍼텐셜을 경계조건으로 바꿔 해석할 수 있을 때 유용하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

173. 델타 퍼텐셜과 장벽 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 델타 퍼텐셜과 장벽 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

173. 델타 퍼텐셜과 장벽 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

터널링, contact interaction, scattering length의 훈련장이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

174. 조화진동자

개념 지도와 물리량 정의

조화진동자는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 2차 근사 퍼텐셜과 정규모드 양자화에서 보편적으로 등장한다.

핵심 수식.

01. $H = \hbar \omega (a^{\dagger} a + 1/2)$

02. $[a, a^{\dagger}] = 1$

03. $E_n = \hbar \omega (n + 1/2)$

04. $x = \sqrt{\hbar / (2m\omega)} (a + a^{\dagger})$

유도 뼈대. 무차원 변수로 Hamiltonian을 완전제곱 형태의 ladder operator로 쓴다.

검산. zero-point energy가 사라지지 않는 이유를 말하라.

자가 점검. 조화진동자에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

174. 조화진동자 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $H = \hbar \omega (a^{\dagger} a + 1/2)$

02. $[a, a^{\dagger}] = 1$

03. $E_n = \hbar \omega (n + 1/2)$

04. $x = \sqrt{\hbar / (2m\omega)} (a + a^{\dagger})$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

174. 조화진동자 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 무차원 변수로 Hamiltonian을 완전제곱 형태의 ladder operator로 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H = \hbar \omega (a^{\dagger} a + 1/2)$
02. $[a, a^{\dagger}] = 1$
03. $E_n = \hbar \omega (n + 1/2)$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

174. 조화진동자 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 2차 근사 퍼텐셜과 정규모드 양자화에서 보편적으로 등장한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

174. 조화진동자 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 조화진동자 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

174. 조화진동자 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

phonon, photon, circuit oscillator, molecular vibration의 표준 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

175. Coherent와 squeezed state

개념 지도와 물리량 정의

Coherent와 squeezed state은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 조화진동자의 quasi-classical state와 양자잡음 제어 상태를 다룬다.

핵심 수식.

01. $a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$
02. $\Delta x \Delta p = \hbar/2$
03. $S(z) = \exp(1/2(z \cdot a^2 - z \cdot a^{\dagger 2}))$
04. quadrature variance squeezed

유도 뼈대. displacement와 squeeze operator를 vacuum에 작용시켜 Gaussian state를 만든다.

검산. coherent state가 시간발전하면서 고전 진동과 닮는 이유를 말하라.

자가 점검. Coherent와 squeezed state에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

175. Coherent와 squeezed state - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$
02. $\Delta x \Delta p = \hbar/2$
03. $S(z) = \exp(1/2(z \cdot a^2 - z \cdot a^{\dagger 2}))$
04. quadrature variance squeezed

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

175. Coherent와 squeezed state - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. displacement와 squeeze operator를 vacuum에 작용시켜 Gaussian state를 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$

02. $\Delta x \Delta p = \hbar/2$

03. $S(z) = \exp(1/2(z \cdot a^2 - z \cdot a^{\dagger 2}))$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

175. Coherent와 squeezed state - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 조화진동자의 quasi-classical state와 양자잡음 제어 상태를 다룬다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

175. Coherent와 squeezed state - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Coherent와 squeezed state 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

175. Coherent와 squeezed state - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자광학, gravitational wave detector, circuit QED에서 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

176. 각운동량 대수

개념 지도와 물리량 정의

각운동량 대수는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 회전대칭이 있는 계에서 상태를 irreducible representation으로 분류한다.

핵심 수식.

01. $[J_i, J_j] = i \hbar \epsilon_{ijk} J_k$
02. $J^2 |jm\rangle = \hbar^2 j(j+1) |jm\rangle$
03. $J_z |jm\rangle = \hbar m |jm\rangle$
04. $J_{\pm} |jm\rangle = \hbar \sqrt{j(j+1) - m(m \pm 1)} |j, m \pm 1\rangle$

유도 뼈대. Lie algebra와 ladder operator로 spectrum을 구한다.

검산. m의 가능한 값이 -j에서 j까지인 이유를 말하라.

자가 점검. 각운동량 대수에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

176. 각운동량 대수 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. [J_i, J_j] = i \hbar \epsilon_{ijk} J_k$$

$$02. J^2 |jm\rangle = \hbar^2 j(j+1) |jm\rangle$$

$$03. J_z |jm\rangle = \hbar m |jm\rangle$$

$$04. J_{\pm} |jm\rangle = \hbar \sqrt{j(j+1) - m(m \pm 1)} |j, m \pm 1\rangle$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

176. 각운동량 대수 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Lie algebra와 ladder operator로 spectrum을 구한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. [J_i, J_j] = i \hbar \epsilon_{ijk} J_k$$

$$02. J^2 |jm\rangle = \hbar^2 j(j+1) |jm\rangle$$

$$03. J_z |jm\rangle = \hbar m |jm\rangle$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

176. 각운동량 대수 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 회전대칭이 있는 계에서 상태를 irreducible representation으로 분류한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

176. 각운동량 대수 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 각운동량 대수 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

176. 각운동량 대수 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

원자, 분자, 핵, spin system, polarization mode의 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

177. Spin 1/2와 Pauli 행렬

개념 지도와 물리량 정의

Spin 1/2와 Pauli 행렬은 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 두 수준계와 SU(2) 기본 표현에서 사용한다.

핵심 수식.

01. $\mathbf{S} = \hbar/2 \boldsymbol{\sigma}$
02. $\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} + i \varepsilon_{ijk} \sigma_k$
03. $U(n, \theta) = \exp(-i \theta \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}/2)$
04. $|n+\rangle \langle n+| = (1 + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma})/2$

유도 뼈대. Pauli 행렬의 대수로 회전과 측정을 표현한다.

검산. 2π 회전에서 spinor 부호가 바뀌는 의미를 설명하라.

자가 점검. Spin 1/2와 Pauli 행렬에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

177. Spin 1/2와 Pauli 행렬 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $\mathbf{S} = \hbar/2 \boldsymbol{\sigma}$
- 02. $\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} + i \varepsilon_{ijk} \sigma_k$
- 03. $U(n, \theta) = \exp(-i \theta \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} / 2)$
- 04. $|n+\rangle \langle n+| = (1 + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) / 2$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

177. Spin 1/2와 Pauli 행렬 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Pauli 행렬의 대수로 회전과 측정을 표현한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{S} = \hbar/2 \boldsymbol{\sigma}$

02. $\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} + i \varepsilon_{ijk} \sigma_k$

03. $U(n, \theta) = \exp(-i \theta \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} / 2)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

177. Spin 1/2와 Pauli 행렬 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 두 수준계와 SU(2) 기본 표현에서 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

177. Spin 1/2와 Pauli 행렬 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Spin 1/2와 Pauli 행렬 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

177. Spin 1/2와 Pauli 행렬 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

qubit, ESR/NMR, spintronics, 양자정보의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart

개념 지도와 물리량 정의

각운동량 결합과 Wigner-Eckart은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 여러 각운동량을 하나의 총각운동량으로 결합할 때 사용한다.

핵심 수식.

01. $|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle = \sum CG |JM\rangle$
02. $\langle jm | T_q^k | j_1 p m_1 \rangle = CG \times \text{reduced matrix element}$
03. 3j, 6j symbols
04. selection rules

유도 뼈대. Clebsch-Gordan 계수와 tensor operator 정리로 행렬원소를 분리한다.

검산. selection rule이 대칭성의 결과임을 설명하라.

자가 점검. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle = \sum CG |JM\rangle$
02. $\langle jm | T_q^k | j' m' \rangle = CG \times \text{reduced matrix element}$
03. 3j, 6j symbols
04. selection rules

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Clebsch-Gordan 계수와 tensor operator 정리로 행렬원소를 분리한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle = \sum CG |JM\rangle$
02. $\langle jm | T_q^k | j' p m' \rangle = CG \times \text{reduced matrix element}$
03. 3j, 6j symbols
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 여러 각운동량을 하나의 총각운동량으로 결합할 때 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 각운동량 결합과 Wigner-Eckart 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

원자 전이, selection rule, spectroscopy 해석의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

179. 중심 퍼텐셜

개념 지도와 물리량 정의

중심 퍼텐셜은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 구대칭 퍼텐셜에서 변수분리와 각운동량 보존이 가능하다.

핵심 수식.

- 01. $\psi = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi)$
- 02. $u'' + [2m(E - V)/\hbar^2 - l(l+1)/r^2]u = 0$
- 03. L^2 eigenvalues
- 04. centrifugal barrier

유도 뼈대. L^2 와 L_z 동시고유기저로 각도를 분리하고 radial equation을 푼다.

검산. $l(l+1)/r^2$ 항이 물리적으로 어떤 장벽인지 설명하라.

자가 점검. 중심 퍼텐셜에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

179. 중심 퍼텐셜 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\psi = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi)$
02. $u'' + [2m(E - V)/\hbar^2 - l(l+1)/r^2]u = 0$
03. L^2 eigenvalues
04. centrifugal barrier

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

179. 중심 퍼텐셜 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. L^2 와 L_z 동시고유기저로 각도를 분리하고 radial equation을 푼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\psi = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi)$

02. $u'' + [2m(E - V)/\hbar^2 - l(l+1)/r^2]u = 0$

03. L^2 eigenvalues

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

179. 중심 퍼텐셜 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 구대칭 퍼텐셜에서 변수분리와 각운동량 보존이 가능하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

179. 중심 퍼텐셜 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 중심 퍼텐셜 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

179. 중심 퍼텐셜 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

원자, 산란, bound state 분석의 표준 구조다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

180. 수소 원자

개념 지도와 물리량 정의

수소 원자는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. Coulomb 중심 퍼텐셜과 reduced mass 근사에서 시작한다.

핵심 수식.

01. $V = -e^2 / (4\pi \epsilon_0 r)$

02. $E_n = -Ry / n^2$

03. $a_0 = 4\pi \epsilon_0 \hbar^2 / (m e^2)$

04. degeneracy n^2

유도 뼈대. radial equation을 Laguerre 다항식으로 풀거나 SO(4) 숨은 대칭으로 spectrum을 얻는다.

검산. 에너지가 l이 아니라 n에만 의존하는 이유를 숨은 대칭과 연결하라.

자가 점검. 수소 원자에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

180. 수소 원자 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $V = -e^2 / (4\pi \epsilon_0 r)$

02. $E_n = -Ry / n^2$

03. $a_0 = 4\pi \epsilon_0 \hbar^2 / (m e^2)$

04. degeneracy n^2

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

180. 수소 원자 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. radial equation을 Laguerre 다항식으로 풀거나 SO(4) 숨은 대칭으로 spectrum을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $V = -e^2 / (4\pi \epsilon_0 r)$

02. $E_n = -Ry/n^2$

03. $a_0 = 4\pi \epsilon_0 \hbar^2 / (m e^2)$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

180. 수소 원자 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. Coulomb 중심 퍼텐셜과 reduced mass 근사에서 시작한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

180. 수소 원자 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 수소 원자 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

180. 수소 원자 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

원자물리, spectroscopy, 양자수 개념의 기준 문제다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

181. 시간독립 섭동론

개념 지도와 물리량 정의

시간독립 섭동론은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 작은 perturbation과 비축퇴 spectrum에서 표준적으로 적용한다.

핵심 수식.

01. $E_n^{(1)} = \langle n | V | n \rangle$

02. $E_n^{(2)} = \sum_{m \neq n} \frac{|\langle m | V | n \rangle|^2}{(E_n - E_m)}$

03. $|n^{(1)}\rangle = \sum_{m \neq n} |m\rangle \frac{\langle m | V | n \rangle}{(E_n - E_m)}$

04. $H = H_0 + \lambda V$

유도 뼈대. 고유값과 고유벡터를 lambda 급수로 놓고 차수별로 비교한다.

검산. 분모가 작아지는 근축퇴 상황에서 왜 조심해야 하는지 말하라.

자가 점검. 시간독립 섭동론에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

181. 시간독립 섭동론 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. E_n^1 = \langle n | V | n \rangle$$

$$02. E_n^2 = \sum_{m \neq n} |\langle m | V | n \rangle|^2 / (E_n - E_m)$$

$$03. |n^1\rangle = \sum_{m \neq n} |m\rangle \langle m | V | n \rangle / (E_n - E_m)$$

$$04. H = H_0 + \lambda V$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

181. 시간독립 섭동론 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 고유값과 고유벡터를 λ 급수로 놓고 차수별로 비교한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. E_n^1 = \langle n | V | n \rangle$$

$$02. E_n^2 = \sum_{m \neq n} |\langle m | V | n \rangle|^2 / (E_n - E_m)$$

$$03. |n^1\rangle = \sum_{m \neq n} |m\rangle \langle m | V | n \rangle / (E_n - E_m)$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

181. 시간독립 섭동론 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 작은 perturbation과 비축퇴 spectrum에서 표준적으로 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

181. 시간독립 섭동론 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 시간독립 섭동론 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

181. 시간독립 섭동론 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Stark/Zee-man, effective model, weak coupling 계산의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

182. 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian

개념 지도와 물리량 정의

축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 같은 에너지의 상태들이 perturbation으로 섞일 때 필요하다.

핵심 수식.

01. $P V P$ diagonalize in degenerate subspace
- 02. $H_{eff} = P H P + P V Q (E - Q H Q)^{-1} Q V P$**
03. Schrieffer-Wolff
04. level splitting

유도 뼈대. 축퇴 부분공간에 perturbation 행렬을 제한하고 먼저 대각화한다.

검산. 나쁜 기저를 고르면 1차 보정이 왜 불안정해지는지 설명하라.

자가 점검. 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

182. 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $P V P$ diagonalize in degenerate subspace

02. $\mathbf{H}_{eff} = P \mathbf{H} P + P V Q (\mathbf{E} - Q \mathbf{H} Q)^{-1} Q V P$

03. Schrieffer-Wolff

04. level splitting

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

182. 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 축퇴 부분공간에 perturbation 행렬을 제한하고 먼저 대각화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $P V P$ diagonalize in degenerate subspace

02. $\mathbf{H}_{eff} = P \mathbf{H} P + P V Q (\mathbf{E} - Q \mathbf{H} Q)^{-1} Q V P$

03. Schrieffer-Wolff

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

182. 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 같은 에너지의 상태들이 perturbation으로 섞일 때 필요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

182. 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

182. 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

fine structure, crystal field, low-energy effective theory에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

183. 변분 원리

개념 지도와 물리량 정의

변분 원리는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 바닥상태 에너지 upper bound를 trial state로 추정할 때 적용한다.

핵심 수식.

01. $E_0 \leq \langle \psi | H | \psi \rangle / \langle \psi | \psi \rangle$

02. $\delta(\langle H \rangle - E \langle \psi | \psi \rangle) = 0$

03. Rayleigh-Ritz

04. basis diagonalization

유도 뼈대. 에너지 functional을 변분하여 최적 파라미터 또는 행렬 고유값 문제를 얻는다.

검산. trial space를 넓히면 에너지 estimate가 어떻게 변하는지 말하라.

자가 점검. 변분 원리에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

183. 변분 원리 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $E_0 \leq \langle \psi | H | \psi \rangle / \langle \psi | \psi \rangle$

02. $\delta(\langle H \rangle - E \langle \psi | \psi \rangle) = 0$

03. Rayleigh-Ritz

04. basis diagonalization

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

183. 변분 원리 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 에너지 functional을 변분하여 최적 파라미터 또는 행렬 고유값 문제를 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. E_0 \leq \langle \psi | H | \psi \rangle / \langle \psi | \psi \rangle$$

$$02. \delta(\langle H \rangle - E \langle \psi | \psi \rangle) = 0$$

03. Rayleigh-Ritz

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

183. 변분 원리 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 바닥상태 에너지 upper bound를 trial state로 추정할 때 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

183. 변분 원리 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 변분 원리 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

183. 변분 원리 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자화학, Hartree-Fock, numerical diagonalization의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

184. 시간의존 섭동과 Fermi 황금률

개념 지도와 물리량 정의

시간의존 섭동과 Fermi 황금률은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 약한 시간의존 상호작용과 연속 최종상태 밀도에서 전이율을 구한다.

핵심 수식.

01. $c_f^1(t) = (-i/\hbar) \int \langle f | V(t) | i \rangle \exp(i \omega_{fi} t) dt$
02. $\Gamma = 2\pi i/\hbar |V_{fi}|^2 \rho(E_f)$
03. response spectrum
04. long-time delta function

유도 뼈대. interaction picture에서 Dyson 전개 1차항을 계산하고 긴 시간 극한을 취한다.

검산. 전이율이 density of states에 비례하는 이유를 말하라.

자가 점검. 시간의존 섭동과 Fermi 황금률에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

184. 시간의존 섭동과 Fermi 황금률 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $c_f^1(t) = (-i/\hbar) \int \langle f | V(t) | i \rangle \exp(i \omega_{fi} t) dt$

02. $\Gamma = 2\pi i / \hbar |V_{fi}|^2 \rho(E_f)$

03. response spectrum

04. long-time delta function

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

184. 시간의존 섭동과 Fermi 황금률 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. interaction picture에서 Dyson 전개 1차항을 계산하고 긴 시간 극한을 취한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $c_f^1(t) = (-i/\hbar) \int_0^t \langle f | V(t) | i \rangle \exp(i \omega_{fi} t) dt$

02. $\Gamma = 2\pi i/\hbar |V_{fi}|^2 \rho(E_f)$

03. response spectrum

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

184. 시간의존 섭동과 Fermi 황금률 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 약한 시간의존 상호작용과 연속 최종상태 밀도에서 전이율을 구한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

184. 시간의존 섭동과 Fermi 황금률 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 시간의존 섭동과 Fermi 황금률 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

184. 시간의존 섭동과 Fermi 황금률 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

흡수, 방출, scattering, spectroscopy 해석의 중심 공식이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

185. Rabi 진동

개념 지도와 물리량 정의

Rabi 진동은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 거의 공명하는 두 수준계와 조화 구동장에서 적용한다.

핵심 수식.

01. $H = \hbar \Delta/2 \sigma_z + \hbar \Omega/2 \sigma_x$

02. $P_e(t) = \Omega^2 / \Omega_R^2 \sin^2(\Omega_R t/2)$

03. $\Omega_R = \sqrt{(\Omega^2 + \Delta^2)}$

04. rotating wave approximation

유도 뼈대. 회전좌표계로 옮겨 빠르게 진동하는 항을 버리고 2x2 Hamiltonian을 푼다.

검산. detuning이 커질수록 전이확률이 어떻게 줄어드는지 확인하라.

자가 점검. Rabi 진동에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

185. Rabi 진동 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $\mathbf{H} = \hbar \Delta/2 \sigma_z + \hbar \Omega/2 \sigma_x$
- 02. $P_e(t) = \Omega^2 / \Omega_R^2 \sin^2(\Omega_R t/2)$
- 03. $\Omega_R = \sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$
- 04. rotating wave approximation

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

185. Rabi 진동 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 회전좌표계로 옮겨 빠르게 진동하는 항을 버리고 2x2 Hamiltonian을 푼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H = \hbar \Delta/2 \sigma_z + \hbar \Omega/2 \sigma_x$

02. $P_e(t) = \Omega^2 / \Omega_R^2 \sin^2(\Omega_R t/2)$

03. $\Omega_R = \sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

185. Rabi 진동 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 거의 공명하는 두 수준계와 조화 구동장에서 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

185. Rabi 진동 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Rabi 진동 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

185. Rabi 진동 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

NMR, AMO, superconducting qubit control의 표준 공식이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

186. Adiabatic theorem과 Berry 위상

개념 지도와 물리량 정의

Adiabatic theorem과 Berry 위상은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. Hamiltonian이 천천히 변하고 에너지 gap이 유지될 때 성립한다.

핵심 수식.

01. $|\psi_n(t)\rangle \rightarrow \exp(i \gamma_n) \exp(-i \int E_n dt/\hbar) |n(t)\rangle$
02. $\gamma_n = i \int \langle n | \text{grad}_R n \rangle \cdot dR$
03. Berry curvature = curl $\mathbf{A}$
04. gap condition

유도 뼈대. instantaneous eigenbasis에서 비대각 coupling이 작은 조건을 분석한다.

검산. 동역학 위상과 기하학적 위상을 구분하라.

자가 점검. Adiabatic theorem과 Berry 위상에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

186. Adiabatic theorem과 Berry 위상 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. |\psi_n(t)\rangle \rightarrow \exp(i \gamma_n) \exp(-i \int E_n dt/\hbar) |n(t)\rangle$$

$$02. \gamma_n = i \int \langle n | \text{grad}_R n \rangle \cdot dR$$

$$03. \text{Berry curvature} = \text{curl } \mathbf{A}$$

$$04. \text{gap condition}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

186. Adiabatic theorem과 Berry 위상 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. instantaneous eigenbasis에서 비대각 coupling이 작은 조건을 분석한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $|\psi_n(t)\rangle \rightarrow \exp(i \gamma_n) \exp(-i \int E_n dt/\hbar) |n(t)\rangle$
02. $\gamma_n = i \int \langle n | \text{grad}_R n \rangle \cdot dR$
03. Berry curvature = curl $\mathbf{A}$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

186. Adiabatic theorem과 Berry 위상 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. Hamiltonian이 천천히 변하고 에너지 gap이 유지될 때 성립한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

186. Adiabatic theorem과 Berry 위상 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Adiabatic theorem과 Berry 위상 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

186. Adiabatic theorem과 Berry 위상 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

topological phase, geometric gate, Born-Oppenheimer 분리에 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

187. Landau-Zener 전이

개념 지도와 물리량 정의

Landau-Zener 전이는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 두 에너지 준위가 avoided crossing을 통과할 때 전이확률을 준다.

핵심 수식.

01. $H = (vt/2)\sigma_z + (\Delta/2)\sigma_x$
02. $P_{LZ} = \exp(-\pi \Delta^2 / (2 \hbar v))$
03. avoided crossing
04. adiabatic vs diabatic basis

유도 뼈대. 시간선형 detuning과 일정 coupling의 2x2 문제를 해석적으로 푼다.

검산. 천천히 지나가면 왜 adiabatic following이 되는지 설명하라.

자가 점검. Landau-Zener 전이에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

187. Landau-Zener 전이 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $H = (vt/2)\sigma_z + (\Delta/2)\sigma_x$
02. $P_{LZ} = \exp(-\pi \Delta^2 / (2 \hbar v))$
03. avoided crossing
04. adiabatic vs diabatic basis

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

187. Landau-Zener 전이 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 시간선행 detuning과 일정 coupling의 2x2 문제를 해석적으로 푼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H=(vt/2)\sigma_z + (\Delta/2)\sigma_x$

02. $P_{LZ}=\exp(-\pi \Delta^2/(2 \hbar v))$

03. avoided crossing

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

187. Landau-Zener 전이 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 두 에너지 준위가 avoided crossing을 통과할 때 전이확률을 준다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

187. Landau-Zener 전이 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Landau-Zener 전이 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

187. Landau-Zener 전이 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

qubit sweep, molecular collision, band transition에 반복된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

188. WKB와 준고전 양자화

개념 지도와 물리량 정의

WKB와 준고전 양자화는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 퍼텐셜이 de Broglie 파장에 비해 천천히 변할 때 적용한다.

핵심 수식.

- 01. $\psi \sim C/p(x)^{1/2} \exp(\pm i \int p dx/\hbar)$
- 02. $p(x) = \sqrt{2m(E - V)}$
- 03. $\int p dx = \pi \hbar (n + 1/2)$
- 04. $T \sim \exp(-2 \int |p| dx/\hbar)$

유도 뼈대. phase와 amplitude를 $\hbar$ 급수로 놓고 turning point 연결공식을 사용한다.

검산. turning point에서 WKB가 왜 깨지는지 말하라.

자가 점검. WKB와 준고전 양자화에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

188. WKB와 준고전 양자화 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\psi \sim C/p(x)^{1/2} \exp(\pm i \int p \, dx/\hbar)$

02. $p(x) = \sqrt{2m(E - V)}$

03. $\int p \, dx = \pi \hbar (n + 1/2)$

04. $T \sim \exp(-2 \int |p| \, dx/\hbar)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

188. WKB와 준고전 양자화 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. phase와 amplitude를 $\hbar$ 급수로 놓고 turning point 연결공식을 사용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\psi \sim C/p(x)^{1/2} \exp(\pm i \int p dx/\hbar)$
02. $p(x) = \sqrt{2m(E - V)}$
03. $\int p dx = \pi \hbar (n + 1/2)$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

188. WKB와 준고전 양자화 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 퍼텐셜이 de Broglie 파장에 비해 천천히 변할 때 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

188. WKB와 준고전 양자화 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 WKB와 준고전 양자화 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

188. WKB와 준고전 양자화 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

터널링, bound state, 광선근사와 깊게 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

189. 산란 T 행렬

개념 지도와 물리량 정의

산란 T 행렬은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 입사 자유상태와 상호작용 퍼텐셜이 정의된 산란 문제에서 사용한다.

핵심 수식.

01. $|\psi^+\rangle = |\varphi\rangle + G_0^+ V |\psi^+\rangle$
02. $T = V + V G_0^+ T$
03. $f(kp, k) = -(m/(2\pi i \hbar^2)) \langle kp | T | k \rangle$
04. $S = 1 - 2\pi i \delta(E_f - E_i) T$

유도 뼈대. Lippmann-Schwinger 방정식으로 outgoing boundary condition을 넣는다.

검산. Born approximation이 언제 타당한지 조건을 말하라.

자가 점검. 산란 T 행렬에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

189. 산란 T 행렬 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. |\psi^+\rangle = |\varphi\rangle + G0^+ V |\psi^+\rangle$$

$$02. T = V + V G0^+ T$$

$$03. f(kp, k) = -(m/(2\pi i \hbar^2)) \langle kp | T | k \rangle$$

$$04. S = 1 - 2\pi i \delta(E_f - E_i) T$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

189. 산란 T 행렬 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Lippmann-Schwinger 방정식으로 outgoing boundary condition을 넣는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. |\psi^+\rangle = |\varphi\rangle + G_0^+ V |\psi^+\rangle$$

$$02. T = V + V G_0^+ T$$

$$03. f(kp, k) = -(m/(2\pi\hbar^2)) \langle kp | T | k \rangle$$

$$04. \text{boundary/initial condition closes the problem}$$

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

189. 산란 T 행렬 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 입사 자유상태와 상호작용 퍼텐셜이 정의된 산란 문제에서 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

189. 산란 T 행렬 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 산란 T 행렬 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

189. 산란 T 행렬 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

원자·핵·응집물질 산란과 response 계산의 공통 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

190. 부분파 산란

개념 지도와 물리량 정의

부분파 산란은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 중심 퍼텐셜 산란에서 각운동량 채널이 분리될 때 사용한다.

핵심 수식.

$$01. f(\theta) = \sum_l (2l+1)(\exp(2i\delta_l) - 1)P_l(\cos\theta)/(2ik)$$

$$02. \sigma = 4\pi/k^2 \sum_l (2l+1) \sin^2 \delta_l$$

$$03. k \cot \delta_0 = -1/a + r_e k^2/2 + \dots$$

$$04. \text{unitarity}$$

유도 뼈대. radial wave의 원거리 phase shift를 자유해와 비교한다.

검산. s-wave가 저에너지에서 지배적인 이유를 말하라.

자가 점검. 부분파 산란에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

190. 부분파 산란 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $f(\theta) = \sum_l (2l+1)(\exp(2i\delta_l) - 1)P_l(\cos\theta)/(2ik)$

02. $\sigma = 4\pi/k^2 \sum_l (2l+1) \sin^2 \delta_l$

03. $k \cot \delta_0 = -1/a + r_e k^2/2 + \dots$

04. unitarity

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

190. 부분파 산란 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. radial wave의 원거리 phase shift를 자유해와 비교한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. f(\theta) = \sum_l (2l+1)(\exp(2i\delta_l) - 1)P_l(\cos\theta)/(2ik)$$

$$02. \sigma = 4\pi/k^2 \sum_l (2l+1) \sin^2 \delta_l$$

$$03. k \cot \delta_0 = -1/a + r_e k^2/2 + \dots$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

190. 부분파 산란 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 중심 퍼텐셜 산란에서 각운동량 채널이 분리될 때 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, `memory kernel`, `tensor response`, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. `small parameter epsilon`
- 02. `large/small dimensionless group`**
- 03. `boundary data`
- 04. `validity domain`

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, `singular point`가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

190. 부분파 산란 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 부분파 산란 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

190. 부분과 산란 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

저에너지 scattering length, resonance, cold atom physics에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

191. 동일입자와 통계

개념 지도와 물리량 정의

동일입자와 통계은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 구별 불가능한 입자들의 Hilbert space는 대칭 또는 반대칭 부분공간이다.

핵심 수식.

- 01. $\psi(\dots\xi, x_j \dots) = \pm \psi(\dots x_j, \xi \dots)$
- 02. $[a_i, a_j^{\dagger}]_- = \delta_{ij}$
- 03. $\{c_i, c_j^{\dagger}\} = \delta_{ij}$
- 04. $n_i = a_i^{\dagger} a_i$

유도 뼈대. 교환 연산자의 고유값과 생성·소멸 연산자 대수로 통계를 구현한다.

검산. Pauli exclusion이 반교환관계에서 어떻게 나오는지 설명하라.

자가 점검. 동일입자와 통계에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

191. 동일입자와 통계 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \psi(\dots\xi, x_j \dots) = \pm \psi(\dots x_j, \xi \dots)$$

$$02. [a_{i,a_j}^{\text{dagger}}]_- = \delta_{ij}$$

$$03. \{c_{i,c_j}^{\text{dagger}}\} = \delta_{ij}$$

$$04. n_i = a_i^{\text{dagger}} a_i$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

191. 동일입자와 통계 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 교환 연산자의 고유값과 생성·소멸 연산자 대수로 통계를 구현한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \psi(\dots\xi, x_j \dots) = \pm \psi(\dots x_j, \xi \dots)$$

$$02. [a_{i, a_j}^{\dagger}]_- = \delta_{ij}$$

$$03. \{c_{i, c_j}^{\dagger}\} = \delta_{ij}$$

$$04. \text{boundary/initial condition closes the problem}$$

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

191. 동일입자와 통계 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 구별 불가능한 입자들의 Hilbert space는 대칭 또는 반대칭 부분 공간이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

191. 동일입자와 통계 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 동일입자와 통계 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

191. 동일입자와 통계 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

다체물리, 양자장론, condensed matter의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

192. 2차 양자화와 장 연산자

개념 지도와 물리량 정의

2차 양자화와 장 연산자는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 입자수가 변하거나 많은 동일입자를 다룰 때 필수적이다.

핵심 수식.

01. $\psi_{\text{hat}}(r) = \sum_i \varphi_i(r) a_i$
02. $H = \sum_{ij} h_{ij} a_i^{\dagger} a_j + 1/2 \sum_{ijkl} V_{ijkl} a_i^{\dagger} a_j^{\dagger} a_k a_l$
03. $N = \int \psi^{\dagger} \psi dr$
04. Fock space

유도 뼈대. 단일입자 기저를 선택하고 occupation number basis로 Hamiltonian을 다시 쓴다.

검산. basis를 바꿔도 field operator가 같은 물리량임을 확인하라.

자가 점검. 2차 양자화와 장 연산자에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

192. 2차 양자화와 장 연산자 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \psi_{hat}(r) = \sum_i \varphi_i(r) a_i$$

$$02. H = \sum_{ij} h_{ij} a_i^{dagger} a_j + 1/2 \sum_{ijkl} V_{ijkl} a_i^{dagger} a_j^{dagger} a_k a_l$$

$$03. N = \int \psi^{dagger} \psi dr$$

$$04. \text{Fock space}$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

192. 2차 양자화와 장 연산자 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 단일입자 기저를 선택하고 occupation number basis로 Hamiltonian을 다시 쓴다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\psi_{hat}(r) = \sum_i \varphi_i(r) a_i$

02. $H = \sum_{i,j} h_{ij} a_i^{dagger} a_j + 1/2 \sum_{ijkl} V_{ijkl} a_i^{dagger} a_j^{dagger} a_l a_k$

03. $N = \int \psi^{dagger} \psi dr$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

192. 2차 양자화와 장 연산자 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 입자수가 변하거나 많은 동일입자를 다룰 때 필수적이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

192. 2차 양자화와 장 연산자 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 2차 양자화와 장 연산자 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

192. 2차 양자화와 장 연산자 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전자계, 광자, phonon, cold atoms, QFT의 공통 표기다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

193. 최소결합과 Landau 준위

개념 지도와 물리량 정의

최소결합과 Landau 준위는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 균일 자기장 속 charged particle과 gauge invariance를 다룬다.

핵심 수식.

- 01. $p \rightarrow p - q A$
- 02. $H = (p - qA)^2 / (2m)$
- 03. $E_n = \hbar \omega_c (n + 1/2)$
- 04. degeneracy per area = eB/h

유도 뼈대. 적절한 gauge를 고르고 oscillator algebra로 횡방향 운동을 양자화한다.

검산. Landau degeneracy가 flux quantum과 연결되는 이유를 말하라.

자가 점검. 최소결합과 Landau 준위에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

193. 최소결합과 Landau 준위 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $p \rightarrow p - q A$

02. $H = (p - qA)^2 / (2m)$

03. $E_n = \hbar \omega_c (n + 1/2)$

04. degeneracy per area = eB/h

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

193. 최소결합과 Landau 준위 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 적절한 gauge를 고르고 oscillator algebra로 횡방향 운동을 양자화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $p \rightarrow p - q A$

02. $H=(p-qA)^2/(2m)$

03. $E_n=\hbar \omega_c(n+1/2)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

193. 최소결합과 Landau 준위 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 균일 자기장 속 charged particle과 gauge invariance를 다룬다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

193. 최소결합과 Landau 준위 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 최소결합과 Landau 준위 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

193. 최소결합과 Landau 준위 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Quantum Hall, cyclotron resonance, 2DEG 물리의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

194. Pauli와 Dirac 방정식

개념 지도와 물리량 정의

Pauli와 Dirac 방정식은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 스핀과 상대론 효과가 필요한 영역에서 비상대론/상대론 모델을 선택한다.

핵심 수식.

$$01. \mathbf{H}_P = (p - q\mathbf{A})^2 / (2m) - (q \hbar / (2m)) \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B} + q \phi$$

$$02. (i \hbar \gamma^\mu \mathbf{D}_\mu - mc) \psi = 0$$

$$03. \{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2 \eta^{\mu\nu}$$

$$04. g \sim 2$$

유도 뼈대. Dirac 방정식의 비상대론적 전개에서 Pauli Hamiltonian과 spin-orbit 항이 나온다.

검산. Dirac 방정식이 왜 반입자를 예고하는지 설명하라.

자가 점검. Pauli와 Dirac 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

194. Pauli와 Dirac 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $H_p = (p - qA)^2 / (2m) - (q \hbar / (2m)) \sigma \cdot \mathbf{B} + q \varphi$

02. $(i \hbar \gamma^\mu D_\mu - mc) \psi = 0$

03. $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2 \eta^{\mu\nu}$

04. $g \sim 2$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

194. Pauli와 Dirac 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Dirac 방정식의 비상대론적 전개에서 Pauli Hamiltonian과 spin-orbit 항이 나온다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H_p = (p - qA)^2 / (2m) - (q \hbar / (2m)) \sigma \cdot B + q \varphi$
02. $(i \hbar \gamma^\mu D_\mu - mc) \psi = 0$
03. $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2 \eta^{\mu\nu}$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

194. Pauli와 Dirac 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 스핀과 상대론 효과가 필요한 영역에서 비상대론/상대론 모델을 선택한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

194. Pauli와 Dirac 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Pauli와 Dirac 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

194. Pauli와 Dirac 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

원자 미세구조, relativistic electron, spintronics의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

195. 상대론적 양자역학

개념 지도와 물리량 정의

상대론적 양자역학은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 단일입자 파동방정식만으로는 생성소멸과 인과성을 완전히 다루기 어렵다.

핵심 수식.

- 01. Klein-Gordon: $(\Box + m^2 c^2/\hbar^2)\phi=0$
- 02. Dirac current $j^\mu=c \text{ psibar } \gamma^\mu \psi$
- 03. negative energy issue
- 04. field quantization needed

유도 뼈대. 상대론적 energy-momentum relation을 wave equation으로 바꾼다.

검산. KG 확률밀도가 양의 정부호가 아닌 문제를 설명하라.

자가 점검. 상대론적 양자역학에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

195. 상대론적 양자역학 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. Klein-Gordon: $(\Box + m^2 c^2/\hbar^2)\phi=0$

02. Dirac current $j^\mu=c \text{ psibar } \gamma^\mu \psi$

03. negative energy issue

04. field quantization needed

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

195. 상대론적 양자역학 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 상대론적 energy-momentum relation을 wave equation으로 바꾼다.

유도에 쓰는 최소식.

01. Klein-Gordon: $(\Box + m^2 c^2/\hbar^2)\varphi=0$

02. Dirac current $j^\mu = c \text{psibar } \gamma^\mu \psi$

03. negative energy issue

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

195. 상대론적 양자역학 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 단일입자 파동방정식만으로는 생성소멸과 인과성을 완전히 다루기 어렵다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

195. 상대론적 양자역학 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 상대론적 양자역학 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

195. 상대론적 양자역학 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자장론으로 넘어가는 동기를 제공한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

196. 정준 양자화

개념 지도와 물리량 정의

정준 양자화는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 고전 Hamilton 구조가 주어진 계를 양자 연산자 대수로 바꾼다.

핵심 수식.

- 01. $[q_{i,pj}] = i \hbar \delta_{ij}$
- 02. $[\varphi(x), \pi(y)] = i \hbar \delta(x-y)$
- 03. classical Poisson bracket $\rightarrow$ commutator/ $(i \hbar)$
- 04. normal modes $\rightarrow$ oscillators

유도 뼈대. 정준변수와 Poisson bracket을 확인한 뒤 commutator를 부여한다.

검산. 구속계에서 Dirac bracket이 필요한 이유를 말하라.

자가 점검. 정준 양자화에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

196. 정준 양자화 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $[q_{i,pj}] = i \hbar \delta_{ij}$
- 02. $[\varphi(x), \pi(y)] = i \hbar \delta(x-y)$
- 03. classical Poisson bracket $\rightarrow$ commutator $/(i \hbar)$
- 04. normal modes $\rightarrow$ oscillators

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

196. 정준 양자화 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 정준변수와 Poisson bracket을 확인한 뒤 commutator를 부여한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $[q_{i,pj}] = i \hbar \delta_{ij}$

02. $[\varphi(x), \pi(y)] = i \hbar \delta(x-y)$

03. classical Poisson bracket $\rightarrow$ commutator/ $(i \hbar)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

196. 정준 양자화 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 고전 Hamilton 구조가 주어진 계를 양자 연산자 대수로 바꾼다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

196. 정준 양자화 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 정준 양자화 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

196. 정준 양자화 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

입자, 장, 회로양자화, cavity mode 양자화의 공통 절차다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

197. Wick 정리와 Feynman rule

개념 지도와 물리량 정의

Wick 정리와 Feynman rule은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. Gaussian/free theory를 기준으로 상호작용 perturbation을 전개한다.

핵심 수식.

- 01. $T \phi_1 \dots \phi_n = \text{normal ordered} + \text{contractions}$
- 02. $G_0(k) = 1/(\omega - \varepsilon_{k+i0})$
- 03. Dyson: $G^{-1} = G_0^{-1} - \Sigma$
- 04. vertex factors

유도 뼈대. time-ordered product를 contraction의 합으로 바꿔 diagrammatic series를 만든다.

검산. self-energy가 관측 스펙트럼에 어떤 영향을 주는지 말하라.

자가 점검. Wick 정리와 Feynman rule에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

197. Wick 정리와 Feynman rule - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $T \phi^{1\dots\phi} = \text{normal ordered} + \text{contractions}$

02. $G_0(k) = 1/(\omega - \varepsilon_{k+i0})$

03. Dyson: $G^{-1} = G_0^{-1} - \Sigma$

04. vertex factors

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

197. Wick 정리와 Feynman rule - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. time-ordered product를 contraction의 합으로 바꿔 diagrammatic series를 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $T \phi^1 \dots \phi_n = \text{normal ordered} + \text{contractions}$
02. $G_0(k) = 1/(\omega - \varepsilon_{k+i0})$
03. Dyson: $G^{-1} = G_0^{-1} - \Sigma$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

197. Wick 정리와 Feynman rule - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. Gaussian/free theory를 기준으로 상호작용 perturbation을 전개한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

197. Wick 정리와 Feynman rule - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Wick 정리와 Feynman rule 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

197. Wick 정리와 Feynman rule - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

many-body, QFT, response function 계산의 표준 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

198. Many-body Green 함수

개념 지도와 물리량 정의

Many-body Green 함수는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 상호작용 다체계의 단일입자 propagation과 spectrum을 기술한다.

핵심 수식.

- 01. $G(1,2) = -i \langle T \psi(1) \psi^{\dagger}(2) \rangle$
- 02. $A(k, \omega) = -(1/\pi) \text{Im } G^R(k, \omega)$
- 03. $\sum \text{rule } \int A d\omega = 1$
- 04. Dyson equation

유도 뼈대. time-ordered correlation을 정의하고 해석적 continuation으로 retarded function을 얻는다.

검산. spectral function의 peak width가 lifetime과 연결됨을 설명하라.

자가 점검. Many-body Green 함수에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

198. Many-body Green 함수 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $G(1,2) = -i \langle T \psi(1) \psi^{\dagger}(2) \rangle$

02. $A(k, \omega) = -(1/\pi) \text{Im } G^R(k, \omega)$

03. $\sum_{\text{rule}} \int d\omega A = 1$

04. Dyson equation

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

198. Many-body Green 함수 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. time-ordered correlation을 정의하고 해석적 continuation으로 retarded function을 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $G(1,2) = -i \langle T \psi(1) \psi^{\dagger}(2) \rangle$
02. $A(k, \omega) = -(1/\pi) \text{Im } G^R(k, \omega)$
03. $\sum \text{rule } \int A d\omega = 1$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

198. Many-body Green 함수 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 상호작용 다체계의 단일입자 propagation과 spectrum을 기술한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

198. Many-body Green 함수 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Many-body Green 함수 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

198. Many-body Green 함수 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

ARPES, tunneling, transport, condensed matter theory에 필수다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

199. Matsubara와 Kubo 공식

개념 지도와 물리량 정의

Matsubara와 Kubo 공식은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 열평형 다체계와 선형응답을 계산하는 표준 형식이다.

핵심 수식.

01. $G(\tau) = -\langle T_\tau c(\tau) c^{\dagger}(0) \rangle$
02. $\omega_n = (2n+1)\pi/\beta$ for fermion
03. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [A(t), B(0)] \rangle$
04. $\sigma(\omega) = (1/(i\omega)) K^R(\omega)$

유도 뼈대. imaginary time 경로적분에서 Matsubara sum을 계산하고 analytic continuation을 수행한다.

검산. bosonic과 fermionic Matsubara frequency가 다른 이유를 말하라.

자가 점검. Matsubara와 Kubo 공식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

199. Matsubara와 Kubo 공식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $G(\tau) = -\langle T_\tau c(\tau) c^{\dagger}(0) \rangle$

02. $\omega_n = (2n+1)\pi/\beta$ for fermion

03. $\chi^R_{AB}(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [A(t), B(0)] \rangle$

04. $\sigma(\omega) = (1/(i\omega)) K^R(\omega)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

199. Matsubara와 Kubo 공식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. imaginary time 경로적분에서 Matsubara sum을 계산하고 analytic continuation을 수행한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $G(\tau) = -\langle T_\tau c(\tau) c^{\dagger}(0) \rangle$
02. $\omega_n = (2n+1)\pi/\beta$ for fermion
03. $\chi^R_{AB}(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [A(t), B(0)] \rangle$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

199. Matsubara와 Kubo 공식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 열평형 다체계와 선형응답을 계산하는 표준 형식이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

199. Matsubara와 Kubo 공식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Matsubara와 Kubo 공식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

199. Matsubara와 Kubo 공식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전도도, susceptibility, noise, spectroscopy를 이론과 연결한다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

200. BCS와 Bogoliubov 변환

개념 지도와 물리량 정의

BCS와 Bogoliubov 변환은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 약한 attractive interaction과 Cooper pairing 평균장에서 시작한다.

핵심 수식.

$$01. \Delta = -V \sum_k \langle c_{-k} \downarrow c_k \uparrow \rangle$$

$$02. E_k = \sqrt{(\xi_k)^2 + |\Delta|^2}$$

$$03. u_k^2 = (1 + \xi_k/E_k)/2$$

$$04. 2\Delta(0) = 3.52 k_B T_c$$

유도 뼈대. Nambu spinor로 Hamiltonian을 쓰고 Bogoliubov 변환으로 대각화한다.

검산. gap이 density of states에 어떤 신호를 남기는지 설명하라.

자가 점검. BCS와 Bogoliubov 변환에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

200. BCS와 Bogoliubov 변환 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Delta = -V \sum_k \langle c_{-k} \downarrow c_k \uparrow \rangle$

02. $E_k = \sqrt{(\xi_k^2 + |\Delta|^2)}$

03. $u_k^2 = (1 + \xi_k/E_k)/2$

04. $2\Delta(0) = 3.52 k_B T_c$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

200. BCS와 Bogoliubov 변환 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Nambu spinor로 Hamiltonian을 쓰고 Bogoliubov 변환으로 대각화한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \Delta = -V \sum_k \langle c_{-k} \downarrow c_k \uparrow \rangle$$

$$02. E_k = \sqrt{(\xi_k)^2 + |\Delta|^2}$$

$$03. u_k^2 = (1 + \xi_k / E_k) / 2$$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

200. BCS와 Bogoliubov 변환 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 약한 attractive interaction과 Cooper pairing 평균장에서 시작한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

200. BCS와 Bogoliubov 변환 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 BCS와 Bogoliubov 변환 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

200. BCS와 Bogoliubov 변환 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

초전도, 초유체, Josephson device, quantum material의 기본 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

201. 밴드 위상과 Berry 곡률

개념 지도와 물리량 정의

밴드 위상과 Berry 곡률은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. Bloch band가 gap으로 분리되고 Berry curvature가 정의될 때 적용한다.

핵심 수식.

- 01. $\mathbf{A}_n(k) = i \langle u_n | \text{grad}_k u_n \rangle$
- 02. $\Omega_n = \text{curl}_k \mathbf{A}_n$
- 03. $C = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega d^2k$
- 04. $\sigma_{xy} = C e^2/h$

유도 뼈대. cell-periodic Bloch state의 connection을 계산하고 Brillouin zone에서 적분한다.

검산. gauge choice가 Berry connection을 바꾸지만 Chern number를 보존하는 이유를 말하라.

자가 점검. 밴드 위상과 Berry 곡률에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

201. 밴드 위상과 Berry 곡률 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{A}_n(k) = i \langle u_n | \text{grad}_k u_n \rangle$

02. $\Omega_n = \text{curl}_k \mathbf{A}_n$

03. $C = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega d^2k$

04. $\sigma_{xy} = C e^2/h$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

201. 밴드 위상과 Berry 곡률 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. cell-periodic Bloch state의 connection을 계산하고 Brillouin zone에서 적분한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{A}_n(k) = i \langle u_n | \text{grad}_k u_n \rangle$
02. $\Omega_n = \text{curl}_k \mathbf{A}_n$
03. $C = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega d^2k$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

201. 밴드 위상과 Berry 곡률 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. Bloch band가 gap으로 분리되고 Berry curvature가 정의될 때 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

201. 밴드 위상과 Berry 곡률 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 밴드 위상과 Berry 곡률 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

201. 밴드 위상과 Berry 곡률 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Chern insulator, quantum Hall, topological materials의 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

202. 열린계와 Lindblad 방정식

개념 지도와 물리량 정의

열린계와 Lindblad 방정식은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. Markovian bath와 complete positivity가 필요한 reduced dynamics에서 사용한다.

핵심 수식.

$$01. \frac{d\rho}{dt} = -i[H, \rho]/\hbar + \sum_j \gamma_j (L_j \rho L_j^\dagger - \frac{1}{2}\{L_j^\dagger L_j, \rho\})$$

02. CPTP map

03. quantum jumps

04. decoherence rate

유도 뼈대. system-bath coupling을 Born-Markov-secular 근사로 줄여 generator를 얻는다.

검산. trace preservation을 Lindblad 항에서 직접 확인하라.

자가 점검. 열린계와 Lindblad 방정식에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

202. 열린계와 Lindblad 방정식 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $d\rho/dt = -i[H, \rho]/\hbar + \sum_j \gamma_j (L_j \rho L_j^\dagger - 1/2\{L_j^\dagger L_j, \rho\})$
02. CPTP map
03. quantum jumps
04. decoherence rate

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

202. 열린계와 Lindblad 방정식 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. system-bath coupling을 Born-Markov-secular 근사로 줄여 generator를 얻는다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \quad d\rho/dt = -i[H, \rho]/\hbar + \sum_j \gamma_j (L_j \rho L_j^\dagger - \frac{1}{2}\{L_j^\dagger L_j, \rho\})$$

02. CPTP map

03. quantum jumps

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

202. 열린계와 Lindblad 방정식 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. Markovian bath와 complete positivity가 필요한 reduced dynamics에서 사용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

202. 열린계와 Lindblad 방정식 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 열린계와 Lindblad 방정식 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

202. 열린계와 Lindblad 방정식 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자광학, qubit noise, dissipative state engineering의 표준 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

203. 양자 게이트와 회로

개념 지도와 물리량 정의

양자 게이트와 회로는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 유한차원 qubit register의 unitary와 측정을 회로로 표현한다.

핵심 수식.

- 01. $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
- 02. $X, Y, Z, H, CNOT$
- 03. U in $U(2^n)$
- 04. measurement probabilities

유도 뼈대. 기본 gate 집합을 조합해 원하는 unitary를 근사한다.

검산. Bloch sphere에서 X, Z, H gate의 작용을 설명하라.

자가 점검. 양자 게이트와 회로에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

203. 양자 게이트와 회로 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
- 02. X, Y, Z, H, CNOT
- 03. U in $U(2^n)$
- 04. measurement probabilities

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

203. 양자 게이트와 회로 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 기본 gate 집합을 조합해 원하는 unitary를 근사한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

02. X, Y, Z, H, CNOT

03. $U \text{ in } U(2^n)$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

203. 양자 게이트와 회로 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 유한차원 qubit register의 unitary와 측정을 회로로 표현한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

203. 양자 게이트와 회로 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 양자 게이트와 회로 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

203. 양자 게이트와 회로 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자알고리즘, 오류정정, 제어펄스 설계와 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

204. 양자 오류정정

개념 지도와 물리량 정의

양자 오류정정은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. noise가 있는 qubit에서 logical information을 redundancy로 보호한다.

핵심 수식.

01. stabilizer $S_i |\psi\rangle = |\psi\rangle$
02. syndrome measurement
03. d code distance
04. correct $t = \text{floor}((d-1)/2)$ errors

유도 뼈대. commuting stabilizer를 측정해 error syndrome을 얻고 복구 연산을 적용한다.

검산. 측정이 logical state를 직접 붕괴시키지 않고 error만 알아내는 이유를 말하라.

자가 점검. 양자 오류정정에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

204. 양자 오류정정 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01.** stabilizer S_i $|\psi\rangle = |\psi\rangle$
- 02. syndrome measurement
- 03. d code distance
- 04.** correct $t = \text{floor}((d-1)/2)$ errors

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

204. 양자 오류정정 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. commuting stabilizer를 측정해 error syndrome을 얻고 복구 연산을 적용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. stabilizer $S_i |\psi\rangle = |\psi\rangle$
02. syndrome measurement
03. d code distance
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

204. 양자 오류정정 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. noise가 있는 qubit에서 logical information을 redundancy로 보호한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

204. 양자 오류정정 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 양자 오류정정 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

204. 양자 오류정정 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

fault-tolerant quantum computing의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

205. 양자 알고리즘

개념 지도와 물리량 정의

양자 알고리즘은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 중첩, 간섭, entanglement를 이용해 특정 계산구조를 가속한다.

핵심 수식.

- 01. QFT $|x\rangle = 1/\sqrt{N} \sum_y \exp(2\pi i xy/N) |y\rangle$
- 02. phase estimation
- 03. amplitude amplification
- 04. HHL scaling

유도 뼈대. unitary oracle과 Fourier/phase extraction을 조합해 hidden structure를 찾는다.

검산. 속도향상이 입력/출력 준비 비용에 의해 제한될 수 있음을 설명하라.

자가 점검. 양자 알고리즘에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

205. 양자 알고리즘 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. QFT $|x\rangle = 1/\sqrt{N} \sum_y \exp(2\pi i xy/N) |y\rangle$
- 02. phase estimation
- 03. amplitude amplification
- 04. HHL scaling

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

205. 양자 알고리즘 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. unitary_oracle과 Fourier/phase extraction을 조합해 hidden structure를 찾는다.

유도에 쓰는 최소식.

01. QFT $|x\rangle = 1/\sqrt{N} \sum_y \exp(2\pi i xy/N) |y\rangle$
02. phase estimation
03. amplitude amplification
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

205. 양자 알고리즘 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 중첩, 간섭, entanglement를 이용해 특정 계산구조를 가속한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

205. 양자 알고리즘 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 양자 알고리즘 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

205. 양자 알고리즘 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Shor, Grover, simulation, linear system algorithm으로 이어진다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

206. Jaynes-Cummings 모형

개념 지도와 물리량 정의

Jaynes-Cummings 모형은 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 두 수준 원자/qubit와 단일 cavity mode가 약결합 또는 강결합할 때 적용한다.

핵심 수식.

01. $H = \hbar \omega_c a^\dagger a + \hbar \omega_q \sigma_z / 2 + \hbar g (a \sigma_+ + a^\dagger \sigma_-)$

02. $\Omega_n = 2g \sqrt{n+1}$

03. vacuum Rabi splitting

04. dispersive shift $\chi = g^2 / \Delta$

유도 뼈대. RWA로 counter-rotating term을 제거하고 excitation number block을 대각화한다.

검산. strong coupling 조건 $g > \kappa, \gamma$ 의 의미를 말하라.

자가 점검. Jaynes-Cummings 모형에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

206. Jaynes-Cummings 모형 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $H = \hbar \omega_c a^\dagger a + \hbar \omega_q \sigma_z / 2 + \hbar g (a \sigma_+ + a^\dagger \sigma_-)$

02. $\Omega_n = 2g \sqrt{n+1}$

03. vacuum Rabi splitting

04. dispersive shift $\chi = g^2 / \Delta$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

206. Jaynes-Cummings 모형 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. RWA로 counter-rotating term을 제거하고 excitation number block을 대각화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H = \hbar \omega_c a^\dagger a + \hbar \omega_q \sigma_z / 2 + \hbar g (a \sigma_+ + a^\dagger \sigma_-)$

02. $\Omega_n = 2g \sqrt{n+1}$

03. vacuum Rabi splitting

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

206. Jaynes-Cummings 모형 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 두 수준 원자/qubit와 단일 cavity mode가 약결합 또는 강결합할 때 적용한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

206. Jaynes-Cummings 모형 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Jaynes-Cummings 모형 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

206. Jaynes-Cummings 모형 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

cavity QED, circuit QED, quantum optics 실험의 기준 모델이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01. observable = measurement functional
- 02. fit parameter vs direct observable
- 03. uncertainty/error budget
- 04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

207. AMO와 sideband cooling

개념 지도와 물리량 정의

AMO와 sideband cooling은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 원자·이온·분자의 internal state와 motional state를 laser로 제어한다.

핵심 수식.

01. $H_{int} = -d \cdot E$

02. Lamb-Dicke $\eta = k \cdot x_0$

03. red sideband

04. cooling limit

유도 뼈대. dipole interaction을 RWA와 Lamb-Dicke expansion으로 전개한다.

검산. red sideband가 운동양자를 줄이는 과정을 설명하라.

자가 점검. AMO와 sideband cooling에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

207. AMO와 sideband cooling - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $H_{int} = -d \cdot E$
- 02. Lamb-Dicke $\eta = k \cdot x_0$
- 03. red sideband
- 04. cooling limit

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

207. AMO와 sideband cooling - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. dipole interaction을 RWA와 Lamb-Dicke expansion으로 전개한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H_{int} = -d \cdot E$

02. Lamb-Dicke $\eta = k \cdot x_0$

03. red sideband

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

207. AMO와 sideband cooling - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 원자·이온·분자의 internal state와 motional state를 laser로 제어한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

207. AMO와 sideband cooling - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 AMO와 sideband cooling 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

207. AMO와 sideband cooling - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

trapped ion quantum computing, precision spectroscopy, clock에 중요하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

208. Tensor network와 DMRG

개념 지도와 물리량 정의

Tensor network와 DMRG은/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 1차원 국소 Hamiltonian의 낮은 entanglement 상태를 효율적으로 표현한다.

핵심 수식.

01. $|\psi\rangle = \sum \mathbf{A}^{s_1} \mathbf{A}^{s_2} \dots |s_1 s_2 \dots\rangle$

02. Schmidt decomposition

03. entanglement entropy bounded by bond dimension

04. variational sweep

유도 뼈대. Schmidt 분해와 SVD를 반복해 MPS canonical form을 만든다.

검산. area law가 DMRG의 성공과 어떻게 연결되는지 설명하라.

자가 점검. Tensor network와 DMRG에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

208. Tensor network와 DMRG - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $|\psi\rangle = \sum \mathbf{A}^{s_1} \mathbf{A}^{s_2} \dots |s_1 s_2 \dots\rangle$

02. Schmidt decomposition

03. entanglement entropy bounded by bond dimension

04. variational sweep

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

208. Tensor network와 DMRG - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Schmidt 분해와 SVD를 반복해 MPS canonical form을 만든다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $|\psi\rangle = \sum \mathbf{A}^{s_1} \mathbf{A}^{s_2} \dots |s_1 s_2 \dots\rangle$

02. Schmidt decomposition

03. entanglement entropy bounded by bond dimension

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

208. Tensor network와 DMRG - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 1차원 국소 Hamiltonian의 낮은 entanglement 상태를 효율적으로 표현한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

208. Tensor network와 DMRG - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 Tensor network와 DMRG 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

208. Tensor network와 DMRG - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

spin chain, strongly correlated 1D systems, quantum simulation에 강력하다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

양자역학

209. 양자계측과 Fisher 정보

개념 지도와 물리량 정의

양자계측과 Fisher 정보는/는 양자역학에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 파라미터 추정에서 양자상태가 제공하는 최대 민감도를 다룬다.

핵심 수식.

- 01. $F_Q = 4 \Delta G^2$ for pure state
- 02. $\Delta \theta \geq 1/\sqrt{\nu F_Q}$
- 03. SQL $\sim 1/\sqrt{N}$
- 04. Heisenberg limit $\sim 1/N$

유도 뼈대. 상태의 파라미터 변화율과 distinguishability를 Fisher information으로 정량화한다.

검산. squeezing이 어떤 quadrature의 잡음을 줄이는지 말하라.

자가 점검. 양자계측과 Fisher 정보에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

양자역학

209. 양자계측과 Fisher 정보 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 양자역학 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $F_Q = 4 \Delta G^2$ for pure state

02. $\Delta \theta \geq 1/\sqrt{\nu F_Q}$

03. SQL $\sim 1/\sqrt{N}$

04. Heisenberg limit $\sim 1/N$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

양자역학

209. 양자계측과 Fisher 정보 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 상태의 파라미터 변화율과 distinguishability를 Fisher information으로 정량화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $F_Q = 4 \Delta G^2$ for pure state
02. $\Delta \theta \geq 1/\sqrt{\nu F_Q}$
03. SQL $\sim 1/\sqrt{N}$
04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

양자역학

209. 양자계측과 Fisher 정보 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 파라미터 추정에서 양자상태가 제공하는 최대 민감도를 다룬다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

양자역학

209. 양자계측과 Fisher 정보 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 양자역학의 양자계측과 Fisher 정보 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

양자역학

209. 양자계측과 Fisher 정보 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

원자시계, 간섭계, 자기장 센서, gravitational wave detector에 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 9

전자기학/양자역학 접점

전자기학/양자역학 접점 Part는 12개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치계산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: 최소결합과 gauge 불변성, Aharonov-Bohm 위상, Landau 준위, Pauli 해밀토니언과 스핀, 전자기장 양자화, 자발방출과 Purcell 효과, Kubo 전도도와 물성, Casimir 효과. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

전자기학/양자역학 접점

210. 최소결합과 gauge 불변성

개념 지도와 물리량 정의

최소결합과 gauge 불변성은/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 전자기 퍼텐셜은 양자 위상과 직접 결합한다.

핵심 수식.

01. $p \rightarrow p - qA$

02. $H = (p - qA)^2 / (2m) + q\phi$

03. $\psi \rightarrow \exp(iq\chi/\hbar)\psi$

04. $A \rightarrow A + \nabla\chi, \phi \rightarrow \phi - \partial_t\chi$

유도 뼈대. Schrodinger 방정식이 gauge 변환 후에도 같은 형태인지 확인한다.

검산. E, B가 0인 영역에서도 A가 물리 효과를 낼 수 있는가?

자가 점검. 최소결합과 gauge 불변성에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

210. 최소결합과 gauge 불변성 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

- 01. $p \rightarrow p - qA$
- 02. $H = (p - qA)^2 / (2m) + q\varphi$
- 03. $\psi \rightarrow \exp(iq\chi/\hbar)\psi$
- 04. $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \nabla\chi, \varphi \rightarrow \varphi - \partial_t\chi$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

210. 최소결합과 gauge 불변성 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Schrodinger 방정식이 gauge 변환 후에도 같은 형태인지 확인한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $p \rightarrow p - qA$

02. $H = (p - qA)^2 / (2m) + q\phi$

03. $\psi \rightarrow \exp(iq\chi/\hbar)\psi$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

210. 최소결합과 gauge 불변성 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 전자기 퍼텐셜은 양자 위상과 직접 결합한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

210. 최소결합과 gauge 불변성 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 최소결합과 gauge 불변성 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

210. 최소결합과 gauge 불변성 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Aharonov-Bohm, Landau level, superconductivity의 출발점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

211. Aharonov-Bohm 위상

개념 지도와 물리량 정의

Aharonov-Bohm 위상은/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 장 자체가 없는 경로에서도 위상은 flux의 global 정보에 민감하다.

핵심 수식.

- 01. $\Delta\phi = (q/\hbar)\oint \mathbf{A}\cdot d\mathbf{l}$
- 02. $\oint \mathbf{A}\cdot d\mathbf{l} = \Phi_B$
- 03. phase shift = $q\Phi_B/\hbar$
- 04. gauge invariant modulo 2π

유도 뼈대. 두 경로의 action phase 차이를 계산한다.

검산. 왜 local $B=0$ 인데 interference pattern이 이동하는가?

자가 점검. Aharonov-Bohm 위상에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

211. Aharonov-Bohm 위상 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Delta\phi = (q/\hbar)\oint \mathbf{A}\cdot d\mathbf{l}$
02. $\oint \mathbf{A}\cdot d\mathbf{l} = \Phi_B$
03. phase shift = $q\Phi_B/\hbar$
04. gauge invariant modulo 2π

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

211. Aharonov-Bohm 위상 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 두 경로의 action phase 차이를 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\Delta\phi = (q/\hbar)\oint \mathbf{A}\cdot d\mathbf{l}$

02. $\oint \mathbf{A}\cdot d\mathbf{l} = \Phi_B$

03. phase shift = $q\Phi_B/\hbar$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

211. Aharonov-Bohm 위상 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 장 자체가 없는 경로에서도 위상은 flux의 global 정보에 민감하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

211. Aharonov-Bohm 위상 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 Aharonov-Bohm 위상 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

211. Aharonov-Bohm 위상 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

퍼텐셜의 물리적 의미와 topology를 보여준다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

212. Landau 준위

개념 지도와 물리량 정의

Landau 준위는/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 균일 자기장 속 2D 전자의 운동은 조화진동자처럼 양자화된다.

핵심 수식.

01. $H=(p-qA)^2/(2m)$

02. $E_n=\hbar\omega_c(n+1/2)$

03. $\omega_c=|q|\mathbf{B}/m$

04. degeneracy per area = $|q|\mathbf{B}/h$

유도 뼈대. gauge를 고르고 한 방향 운동량을 좋은 양자수로 둔다.

검산. degeneracy가 flux quantum 수와 같은 이유를 말해보라.

자가 점검. Landau 준위에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

212. Landau 준위 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $H=(p-qA)^2/(2m)$

02. $E_n=\hbar\omega_c(n+1/2)$

03. $\omega_c=|q|\mathbf{B}/m$

04. degeneracy per area = $|q|\mathbf{B}/h$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

212. Landau 준위 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. gauge를 고르고 한 방향 운동량을 좋은 양자수로 둔다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H=(p-qA)^2/(2m)$

02. $E_n=\hbar\omega_c(n+1/2)$

03. $\omega_c=|q|\mathbf{B}/m$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

212. Landau 준위 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 균일 자기장 속 2D 전자의 운동은 조화진동자처럼 양자화된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

212. Landau 준위 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 Landau 준위 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

212. Landau 준위 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자 Hall 효과와 자성/반도체 물성의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

213. Pauli 해밀토니언과 스핀

개념 지도와 물리량 정의

Pauli 해밀토니언과 스핀은/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 비상대론 전자도 스핀 자기장 결합을 가진다.

핵심 수식.

01. $H = (\sigma \cdot (p - qA))^2 / (2m) + q\phi$

02. $(\sigma \cdot a)(\sigma \cdot b) = a \cdot b + i\sigma \cdot (a \times b)$

03. H includes $-\mu \cdot B$

04. $g \sim 2$ for Dirac electron

유도 뼈대. Dirac 방정식의 저속 전개 또는 Pauli 행렬 항등식을 사용한다.

검산. 스핀 자기모멘트 부호가 전자 전하 부호와 어떻게 연결되는지 확인하라.

자가 점검. Pauli 해밀토니언과 스핀에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

213. Pauli 해밀토니언과 스핀 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $H = (\sigma \cdot (p - qA))^2 / (2m) + q\phi$

02. $(\sigma \cdot a)(\sigma \cdot b) = a \cdot b + i\sigma \cdot (a \times b)$

03. H includes $-\mu \cdot B$

04. $g \sim 2$ for Dirac electron

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

213. Pauli 해밀토니언과 스핀 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Dirac 방정식의 저속 전개 또는 Pauli 행렬 항등식을 사용한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $H = (\sigma \cdot (p - qA))^2 / (2m) + q\phi$

02. $(\sigma \cdot a)(\sigma \cdot b) = a \cdot b + i\sigma \cdot (a \times b)$

03. H includes $-\mu \cdot B$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

213. Pauli 해밀토니언과 스핀 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 비상대론 전자도 스핀 자기장 결합을 가진다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

213. Pauli 해밀토니언과 스핀 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 Pauli 해밀토니언과 스핀 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

213. Pauli 해밀토니언과 스핀 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Zeeman 효과와 spintronics의 기본이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

214. 전자기장 양자화

개념 지도와 물리량 정의

전자기장 양자화는/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 각 Maxwell normal mode는 양자 조화된 동자처럼 양자화된다.

핵심 수식.

- 01. $A(r,t) = \sum_{k\lambda} \sqrt{(\hbar/(2\epsilon_0\omega V))} e_{k\lambda} (a + a^\dagger)$
- 02. $H = \sum \hbar\omega (a^\dagger a + 1/2)$
- 03. $[a, a^\dagger] = 1$
- 04. photon number $n = a^\dagger a$

유도 뼈대. Coulomb gauge에서 횡모드만 남기고 canonical quantization한다.

검산. zero-point energy가 왜 $1/2\hbar\omega$ 로 나타나는지 말해보라.

자가 점검. 전자기장 양자화에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

214. 전자기장 양자화 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \sum_{\mathbf{k}\lambda} \sqrt{(\hbar/(2\epsilon_0\omega V))} \mathbf{e}_{\mathbf{k}\lambda} (a + a^\dagger)$

02. $H = \sum \hbar\omega (a^\dagger a + 1/2)$

03. $[a, a^\dagger] = 1$

04. photon number $n = a^\dagger a$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

214. 전자기장 양자화 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Coulomb gauge에서 횡모드만 남기고 canonical quantization한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \sum_{\mathbf{k}\lambda} \sqrt{(\hbar/(2\epsilon_0\omega V))} e_{\mathbf{k}\lambda} (a + a^\dagger)$

02. $H = \sum \hbar\omega (a^\dagger a + 1/2)$

03. $[a, a^\dagger] = 1$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

214. 전자기장 양자화 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 각 Maxwell normal mode는 양자 조화진동자처럼 양자화된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

214. 전자기장 양자화 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 전자기장 양자화 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

214. 전자기장 양자화 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자광학과 QED의 입구다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

215. 자발방출과 Purcell 효과

개념 지도와 물리량 정의

자발방출과 Purcell 효과는/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 원자의 방출률은 전자기 mode density에 의해 바뀐다.

핵심 수식.

01. $\Gamma = (\omega^3 |d|^2)/(3\pi \epsilon_0 \hbar c^3)$

02. $F_p = (3/4\pi^2)(\lambda/n)^3 Q/V$

03. $\Gamma \propto \text{LDOS}$

04. selection rule from dipole matrix element

유도 뼈대. Fermi 황금률로 초기 excited state에서 photon mode로의 전이를 계산한다.

검산. 공진기 mode volume이 작아지면 방출률은 어떻게 되는가?

자가 점검. 자발방출과 Purcell 효과에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

215. 자발방출과 Purcell 효과 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\Gamma = (\omega^3 |d|^2)/(3\pi \epsilon_0 \hbar c^3)$
02. $F_p = (3/4\pi^2)(\lambda/n)^3 Q/V$
03. $\Gamma \propto \text{LDOS}$
04. selection rule from dipole matrix element

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

215. 자발방출과 Purcell 효과 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Fermi 황금률로 초기 excited state에서 photon mode로의 전이를 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\Gamma = (\omega^3 |d|^2)/(3\pi \epsilon_0 \hbar c^3)$

02. $F_p = (3/4\pi^2)(\lambda/n)^3 Q/V$

03. $\Gamma \propto \text{LDOS}$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

215. 자발방출과 Purcell 효과 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 원자의 방출률은 전자기 mode density에 의해 바뀐다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

215. 자발방출과 Purcell 효과 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 자발방출과 Purcell 효과 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

215. 자발방출과 Purcell 효과 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

cavity QED, photonic crystal, single photon source의 핵심이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

216. Kubo 전도도와 물성

개념 지도와 물리량 정의

Kubo 전도도와 물성은/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 전기전도도는 전류□전류 response function이다.

핵심 수식.

01. $\sigma_{ij}(\omega) = (i/\omega)[K_{ij}^R(\omega) - K_{ij}^R(0)]$

02. $j_i = \sigma_{ij} E_j$

03. $K^R = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [J_i(t), J_j(0)] \rangle$

04. $\sum \text{rule} \int \text{Re}\sigma(\omega)d\omega = \pi n e^2/(2m)$

유도 뼈대. 외부 vector potential에 대한 전류의 1차 응답을 계산한다.

검산. dc limit과 optical conductivity limit의 차이를 말하라.

자가 점검. Kubo 전도도와 물성에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

216. Kubo 전도도와 물성 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \sigma_{ij}(\omega) = (i/\omega)[K_{ij}^R(\omega) - K_{ij}^R(0)]$$

$$02. j_i = \sigma_{ij} E_j$$

$$03. K^R = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [J_i(t), J_j(0)] \rangle$$

$$04. \sum \text{rule} \int \text{Re} \sigma(\omega) d\omega = \pi n e^2 / (2m)$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

216. Kubo 전도도와 물성 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 외부 vector potential에 대한 전류의 1차 응답을 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. \sigma_{ij}(\omega) = (i/\omega)[K_{ij}^R(\omega) - K_{ij}^R(0)]$$

$$02. j_i = \sigma_{ij} E_j$$

$$03. K^R = -(i/\hbar)\theta(t)\langle J_i(t)J_j(0) \rangle$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

216. Kubo 전도도와 물성 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 전기전도도는 전류□전류 response function이다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

216. Kubo 전도도와 물성 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 Kubo 전도도와 물성 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

216. Kubo 전도도와 물성 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

Drude, Hall, topological response를 하나의 틀로 본다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

217. Casimir 효과

개념 지도와 물리량 정의

Casimir 효과는/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 경계조건이 vacuum fluctuation mode spectrum 을 바꾼다.

핵심 수식.

- 01. $E_0 = 1/2 \sum \hbar \omega$
- 02. $F/A = -\pi^2 \hbar^4 c^4 / (240 a^4)$
- 03. regularization needed
- 04. material correction via $\epsilon(i\xi)$

유도 뼈대. 두 plate 사이와 바깥의 zero-point energy 차이를 정규화한다.

검산. 무한한 zero-point energy에서 왜 차이만 물리적인지 생각하라.

자가 점검. Casimir 효과에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

217. Casimir 효과 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $E_0 = 1/2 \sum \hbar \omega$
02. $F/A = -\pi^2 \hbar^2 c^4 / (240 a^4)$
03. regularization needed
04. material correction via $\epsilon(i\xi)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

217. Casimir 효과 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 두 plate 사이와 바깥의 zero-point energy 차이를 정규화한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $E_0 = \frac{1}{2} \sum \hbar \omega$

02. $F/A = -\pi^2 \hbar^2 c^2 / (240 a^4)$

03. regularization needed

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

217. Casimir 효과 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 경계조건이 vacuum fluctuation mode spectrum을 바꾼다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

217. Casimir 효과 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 Casimir 효과 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

217. Casimir 효과 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

양자장론, 나노역학, fluctuation electrodynamics의 접점이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

218. Quantum Hall response

개념 지도와 물리량 정의

Quantum Hall response은/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 2D 전자계의 Hall 전도도는 위상 불변량으로 양자화된다.

핵심 수식.

- 01. $\sigma_{xy} = \nu e^2/h$
- 02. Chern number $C=(1/2\pi)\int\Omega d^2k$
- 03. $\rho_{xx}\sim 0$ plateau
- 04. edge states carry current

유도 뼈대. Landau level filling 또는 band Berry curvature를 계산한다.

검산. 불순물이 있는데 plateau가 안정한 이유를 edge/localization 관점으로 생각하라.

자가 점검. Quantum Hall response에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

218. Quantum Hall response - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\sigma_{xy} = \nu e^2/h$
02. Chern number $C=(1/2\pi)\int\Omega d^2k$
03. $\rho_{xx}\sim 0$ plateau
04. edge states carry current

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

218. Quantum Hall response - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Landau level filling 또는 band Berry curvature를 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\sigma_{xy} = \nu e^2/h$
02. Chern number $C=(1/2\pi)\int\Omega d^2k$
03. $\rho_{xx}\sim 0$ plateau
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

218. Quantum Hall response - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 2D 전자계의 Hall 전도도는 위상 불변량으로 양자화된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

218. Quantum Hall response - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 Quantum Hall response 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

218. Quantum Hall response - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

위상물질, metrology, condensed matter의 핵심 현상이다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

219. 밀도행렬과 부분추적

개념 지도와 물리량 정의

밀도행렬과 부분추적은/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 순수상태뿐 아니라 혼합상태와 부분계 상태가 필요하다.

핵심 수식.

01. $\rho = \sum p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|$

02. $\langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$

03. $\rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$

04. $S = -\text{Tr} \rho \ln \rho$

유도 뼈대. 전체 Hilbert space에서 관심 없는 자유도를 trace out한다.

검산. entangled pure state의 부분계가 mixed state가 되는 예를 써보라.

자가 점검. 밀도행렬과 부분추적에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

219. 밀도행렬과 부분추적 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. \rho = \sum p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|$$

$$02. \langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$$

$$03. \rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$$

$$04. S = -\text{Tr} \rho \ln \rho$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

219. 밀도행렬과 부분추적 - 유도 빼대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 전체 Hilbert space에서 관심 없는 자유도를 trace out한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\rho = \sum p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$

02. $\langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$

03. $\rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 빼대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

219. 밀도행렬과 부분추적 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 순수상태뿐 아니라 혼합상태와 부분계 상태가 필요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, `memory kernel`, `tensor response`, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter `epsilon`
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

219. 밀도행렬과 부분추적 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 밀도행렬과 부분추적 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

219. 밀도행렬과 부분추적 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

열상태, 열린계, 양자정보의 공통 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

220. 경로적분과 전파자

개념 지도와 물리량 정의

경로적분과 전파자는/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 양자진폭은 모든 경로의 위상합으로 표현된다.

핵심 수식.

- 01. $K(b,a)=\int Dq \exp(iS[q]/\hbar)$
- 02. $K \sim \sum_{\text{classical paths}} \mathbf{A} \exp(iS_{cl}/\hbar)$
- 03. $Z=\int D\varphi \exp(iS[\varphi]/\hbar)$
- 04. Euclidean: $\exp(-\mathbf{S}_E/\hbar)$

유도 뼈대. 시간을 작은 조각으로 나누고 완비성을 삽입한다.

검산. $\hbar \rightarrow 0$ 에서 stationary phase가 고전경로를 선택하는 이유를 말하라.

자가 점검. 경로적분과 전파자에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

220. 경로적분과 전파자 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $K(b,a) = \int Dq \exp(iS[q]/\hbar)$
02. $K \sim \sum_{\text{classical paths}} \mathbf{A} \exp(iS_{cl}/\hbar)$
03. $Z = \int D\varphi \exp(iS[\varphi]/\hbar)$
04. Euclidean: $\exp(-S_E/\hbar)$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

220. 경로적분과 전파자 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 시간을 작은 조각으로 나누고 완비성을 삽입한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $K(b,a) = \int Dq \exp(iS[q]/\hbar)$
02. $K \sim \sum_{\text{classical paths}} \mathbf{A} \exp(iS_{cl}/\hbar)$
03. $Z = \int D\varphi \exp(iS[\varphi]/\hbar)$
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

220. 경로적분과 전파자 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 양자진폭은 모든 경로의 위상합으로 표현된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter ϵ
- 02.** large/small dimensionless group
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

220. 경로적분과 전파자 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 경로적분과 전파자 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

220. 경로적분과 전파자 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

고전극한, instanton, 양자장론, 통계역학과 연결된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

221. 산란과 S 행렬

개념 지도와 물리량 정의

산란과 S 행렬은/는 전자기학/양자역학 접점에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 입사상태와 outgoing boundary condition을 연결한다.

핵심 수식.

- 01. $|\psi^+\rangle = |\varphi\rangle + G0^+ V |\psi^+\rangle$
- 02. $T = V + V G0^+ T$
- 03. $S = 1 - 2\pi i \delta(E_f - E_i) T$
- 04. $d\sigma/d\Omega = |f(\theta, \varphi)|^2$

유도 뼈대. Lippmann-Schwinger 방정식을 반복하면 Born series가 나온다.

검산. unitarity가 optical theorem으로 이어지는 직관을 말하라.

자가 점검. 산란과 S 행렬에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

전자기학/양자역학 접점

221. 산란과 S 행렬 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 전자기학/양자역학 접점 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

$$01. |\psi^+\rangle = |\varphi\rangle + G_0^+ V |\psi^+\rangle$$

$$02. T = V + V G_0^+ T$$

$$03. S = 1 - 2\pi i \delta(E_f - E_i) T$$

$$04. d\sigma/d\Omega = |f(\theta, \varphi)|^2$$

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

전자기학/양자역학 접점

221. 산란과 S 행렬 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Lippmann-Schwinger 방정식을 반복하면 Born series가 나온다.

유도에 쓰는 최소식.

$$01. |\psi^+\rangle = |\varphi\rangle + G_0^+ V |\psi^+\rangle$$

$$02. T = V + V G_0^+ T$$

$$03. S = 1 - 2\pi i \delta(E_f - E_i) T$$

04. boundary/initial condition closes the problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

전자기학/양자역학 접점

221. 산란과 S 행렬 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 입사상태와 outgoing boundary condition을 연결한다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

전자기학/양자역학 접점

221. 산란과 S 행렬 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 전자기학/양자역학 접점의 산란과 S 행렬 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

전자기학/양자역학 접점

221. 산란과 S 행렬 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

원자, 핵, 입자, 파동 산란 모두 같은 구조를 쓴다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 10

통합 연구 도구

통합 연구 도구 Part는 5개의 핵심 장으로 구성된다. 앞부분 장은 기본 언어와 대표 방정식을 고정하고, 뒤쪽 장은 근사, 수치검산, 연구 응용으로 확장한다. 대표 주제: 차원과 극한으로 논문 읽기, 보존법칙과 경계조건 우선 원칙, 선형응답과 측정량 연결, 수치해석 검증 루틴, 스케일 분리와 유효이론. 각 장은 전자기학 레퍼런스 방식처럼 개념 지도, 대표 방정식, 유도 뼈대, 조건과 근사, 계산 루틴, 연구자 메모의 흐름으로 읽는다.

통합 연구 도구

222. 차원과 극한으로 논문 읽기

개념 지도와 물리량 정의

차원과 극한으로 논문 읽기는/는 통합 연구 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계 조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 공식의 가정이 명시되지 않은 논문일수록 극한 계산이 중요하다.

핵심 수식.

01. check units

02. $\varepsilon \rightarrow 0$ or ∞

03. $\text{loss} \rightarrow 0$

04. symmetry restored

유도 뼈대. 식 하나를 고르고 단위, 부호, 극한, 보존량을 차례로 표시한다.

검산. 새 논문에서 가장 먼저 볼 식 하나를 고르는 기준을 말해보라.

자가 점검. 차원과 극한으로 논문 읽기에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

통합 연구 도구

222. 차원과 극한으로 논문 읽기 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 통합 연구 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. check units

02. $\varepsilon \rightarrow 0$ or ∞

03. $\text{loss} \rightarrow 0$

04. symmetry restored

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

통합 연구 도구

222. 차원과 극한으로 논문 읽기 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 식 하나를 고르고 단위, 부호, 극한, 보존량을 차례로 표시한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. check units

02. $\varepsilon \rightarrow 0$ or ∞

03. $\text{loss} \rightarrow 0$

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

통합 연구 도구

222. 차원과 극한으로 논문 읽기 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 공식의 가정이 명시되지 않은 논문일수록 극한 검산이 중요하다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter ϵ
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

통합 연구 도구

222. 차원과 극한으로 논문 읽기 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 통합 연구 도구의 차원과 극한으로 논문 읽기 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

통합 연구 도구

222. 차원과 극한으로 논문 읽기 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

연구 노트의 첫 페이지에 넣을 만한 공통 점검 절차다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

통합 연구 도구

223. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙

개념 지도와 물리량 정의

보존법칙과 경계조건 우선 원칙은/는 통합 연구 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 정확한 미분방정식보다 먼저 무엇이 보존되는지와 경계에서 무엇이 주어지는지 본다.

핵심 수식.

01. $d_t \text{ density} + \text{div flux} = \text{source}$
02. boundary term controls physics
03. Noether charge
04. weak form surface term

유도 뼈대. 작은 control volume 또는 variational boundary term으로 조건을 분류한다.

검산. 경계조건이 틀리면 어떤 물리량이 먼저 깨지는지 설명하라.

자가 점검. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

통합 연구 도구

223. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 통합 연구 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. d_t density + div flux = source
02. boundary term controls physics
03. Noether charge
04. weak form surface term

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

통합 연구 도구

223. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 control volume 또는 variational boundary term으로 조건을 분류한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. d_t density + div flux = source
02. boundary term controls physics
03. Noether charge
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

통합 연구 도구

223. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 정확한 미분방정식보다 먼저 무엇이 보존되는지와 경계에서 무엇이 주어지는지 본다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

통합 연구 도구

223. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 통합 연구 도구의 보존법칙과 경계조건 우선 원칙 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표 식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

01. choose coordinates/basis
02. write governing equation
03. apply boundary/initial data
04. solve or approximate
05. verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

통합 연구 도구

223. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

전자기학, 유체, 열전달, 양자 산란에서 같은 실수를 줄여준다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

통합 연구 도구

224. 선형응답과 측정량 연결

개념 지도와 물리량 정의

선형응답과 측정량 연결은/는 통합 연구 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 실험은 대부분 외부 perturbation에 대한 응답함수로 이론과 연결된다.

핵심 수식.

01. $\delta\langle A \rangle = \int \chi_{AB} f_B$
02. $S(\omega)$ related to $\text{Im } \chi$
03. Kramers-Kronig
04. noise spectrum

유도 뼈대. Hamiltonian 또는 보존법칙에 coupling term을 추가하고 1차 응답을 계산한다.

검산. 측정값이 response인지 correlation인지 구분하라.

자가 점검. 선형응답과 측정량 연결에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

통합 연구 도구

224. 선형응답과 측정량 연결 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 통합 연구 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. $\delta\langle A \rangle = \int \chi_{AB} f_B$
02. $S(\omega)$ related to $\text{Im } \chi$
03. Kramers-Kronig
04. noise spectrum

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

통합 연구 도구

224. 선형응답과 측정량 연결 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. Hamiltonian 또는 보존법칙에 coupling term을 추가하고 1차 응답을 계산한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. $\delta\langle A \rangle = \text{int } \chi_{AB} f_B$

02. $S(\omega)$ related to $\text{Im } \chi$

03. Kramers-Kronig

04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

통합 연구 도구

224. 선형응답과 측정량 연결 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 실험은 대부분 외부 perturbation에 대한 응답함수로 이론과 연결된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

통합 연구 도구

224. 선형응답과 측정량 연결 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 통합 연구 도구의 선형응답과 측정량 연결 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

통합 연구 도구

224. 선형응답과 측정량 연결 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

광학, 전기수송, AMO spectroscopy, 열잡음 분석의 공통 언어다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

통합 연구 도구

225. 수치해석 검증 루틴

개념 지도와 물리량 정의

수치해석 검증 루틴은/는 통합 연구 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 수치결과는 해상도, 경계조건, 알고리즘 안정성의 검증이 있어야 신뢰된다.

핵심 수식.

- 01. convergence with grid/basis
- 02. conservation residual
- 03. benchmark limit
- 04. condition number

유도 뼈대. 격자/기저를 바꾸며 수렴률을 보고 보존량 residual과 known solution을 비교한다.

검산. 그래프가 그럴듯해도 틀릴 수 있는 이유를 설명하라.

자가 점검. 수치해석 검증 루틴에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

통합 연구 도구

225. 수치해석 검증 루틴 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 통합 연구 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. convergence with grid/basis
02. conservation residual
03. benchmark limit
04. condition number

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

통합 연구 도구

225. 수치해석 검증 루틴 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 격자/기저를 바꾸며 수렴률을 보고 보존량 residual과 known solution을 비교한다.

유도에 쓰는 최소식.

- 01.** convergence with grid/basis
- 02.** conservation residual
- 03.** benchmark limit
- 04.** boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

통합 연구 도구

225. 수치해석 검증 루틴 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 수치결과는 해상도, 경계조건, 알고리즘 안정성의 검증이 있어야 신뢰된다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, memory kernel, tensor response, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

- 01. small parameter epsilon
- 02. large/small dimensionless group**
- 03. boundary data
- 04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

통합 연구 도구

225. 수치해석 검증 루틴 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 통합 연구 도구의 수치해석 검증 루틴 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

통합 연구 도구

225. 수치해석 검증 루틴 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

CFD, FEM, FDTD, DMRG, diagonalization 모두에 적용된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

- 01.** observable = measurement functional
- 02.** fit parameter vs direct observable
- 03.** uncertainty/error budget
- 04.** benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

통합 연구 도구

226. 스케일 분리와 유효이론

개념 지도와 물리량 정의

스케일 분리와 유효이론은/는 통합 연구 도구에서 반복적으로 등장하는 핵심 구조다. 먼저 상태변수, 소스, 경계조건, 측정량을 분리한다. 이 절의 목표는 긴 유도 전체를 외우는 것이 아니라 대표식이 어느 조건에서 작동하는지 판단하고, 다른 과목에서 같은 구조가 나타날 때 바로 알아보는 것이다. 관심 스케일과 버릴 스케일이 분리될 때 유효모델이 생긴다.

핵심 수식.

01. fast variables integrated out
- 02. H_{eff} or L_{eff}**
03. renormalized parameters
04. valid below cutoff

유도 뼈대. 작은 매개변수 또는 cutoff를 정하고 제거된 자유도의 효과를 계수로 흡수한다.

검산. 유효이론의 cutoff를 명시해야 하는 이유를 말하라.

자가 점검. 스케일 분리와 유효이론에서 주어진 양과 구해야 할 양을 각각 세 개 이하로 적어보라.

통합 연구 도구

226. 스케일 분리와 유효이론 - 대표 방정식

가장 먼저 고정해야 할 식과 부호 convention

대표식은 계산의 시작점이면서 동시에 검산 도구다. 이 장에서는 식을 그대로 외우기보다 각 항의 차원, 부호, 기하학적 의미를 함께 표시한다. 특히 통합 연구 도구 문제에서는 좌표계와 boundary/initial data를 먼저 정해야 식이 닫힌다.

대표 방정식 묶음.

01. fast variables integrated out

02. H_{eff} or L_{eff}

03. renormalized parameters

04. valid below cutoff

유도 뼈대. 대표식의 왼쪽은 보통 변화율, flux, generator, 또는 response이다. 오른쪽은 source, force, constitutive relation, 또는 coupling을 담는다. 각 항이 어느 물리 과정을 표현하는지 이름을 붙인다.

검산. 양변 차원, 무차원 극한, 부호 convention, source-free limit를 확인한다.

자가 점검. 가장 중요한 식 하나를 골라 모든 항의 단위를 써보라.

통합 연구 도구

226. 스케일 분리와 유효이론 - 유도 뼈대

출발 원리에서 대표식까지의 최소 경로

유도는 세부 계산을 모두 외우는 과정이 아니다. 시작 원리, 사용한 수학 정리, 버린 항, 경계조건을 순서대로 표시하면 필요할 때 다시 만들 수 있다. 작은 매개변수 또는 cutoff를 정하고 제거된 자유도의 효과를 계수로 흡수한다.

유도에 쓰는 최소식.

01. fast variables integrated out
02. H_{eff} or L_{eff}
03. renormalized parameters
04. boundary/initial condition closes *the* problem

유도 뼈대. 1단계: 대칭성과 좌표계를 고른다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, 또는 연산자 방정식을 쓴다. 3단계: constitutive law와 경계조건을 넣는다. 4단계: 특수 극한으로 결과를 검산한다.

검산. 중간에 부분적분을 했다면 표면항이 사라지는 조건을 반드시 적는다.

자가 점검. 이 유도에서 가장 강한 가정 하나를 제거하면 어떤 항이 새로 생기는지 말해보라.

통합 연구 도구

226. 스케일 분리와 유효이론 - 조건과 근사

언제 쓰면 되고 언제 조심해야 하는가

공식의 가치는 적용 범위를 정확히 아는 데 있다. 관심 스케일과 버릴 스케일이 분리될 때 유효모델이 생긴다. 근사가 깨질 때는 더 일반적인 방정식, 비선형항, `memory kernel`, `tensor response`, 또는 수치해석이 필요하다.

핵심 수식.

01. small parameter `epsilon`
- 02. large/small dimensionless group**
03. boundary data
04. validity domain

유도 뼈대. 무차원화로 지배항을 찾고, 버린 항의 상대 크기를 계산한다. 그 크기가 실험 또는 수치 오차보다 작을 때 근사가 의미 있다.

검산. 특수 극한에서 알려진 해로 돌아가는지, 보존량이 깨지지 않는지, singular point가 없는지 확인한다.

자가 점검. 이 절의 공식이 실패할 수 있는 상황을 하나 만들어보라.

통합 연구 도구

226. 스케일 분리와 유효이론 - 계산 루틴

문제를 실제로 풀 때의 순서

계산은 문제 유형 판별에서 시작한다. 통합 연구 도구의 스케일 분리와 유효이론 문제는 먼저 미지함수와 domain을 정하고, analytic solution이 가능한지 또는 numerical method가 필요한지 판단한다. 그 다음 대표식에 적절한 basis, mesh, mode expansion, ensemble, 또는 gauge를 붙인다.

핵심 수식.

- 01.** choose coordinates/basis
- 02.** write governing equation
- 03.** apply boundary/initial data
- 04.** solve or approximate
- 05.** verify with limit/benchmark

유도 빠대. 계산 전 예상 스케일을 적어두면 결과가 틀렸을 때 빨리 잡힌다. 수치 문제에서는 grid refinement나 basis cutoff convergence가 필수다.

검산. 중간 계산에서 보존법칙 residual을 추적하고, 최종값의 order of magnitude를 비교한다.

자가 점검. 이 절의 문제를 손계산으로 풀 수 있는 경우와 수치해석이 필요한 경우를 나누어보라.

통합 연구 도구

226. 스케일 분리와 유효이론 - 연구자 메모

논문, 실험, 전자공학 응용에서 보는 방법

회로모델, 유체 방정식, 평균장, 장론 RG에 반복된다. 논문이나 프로젝트에서는 식 자체보다 식이 측정량으로 연결되는 방식이 중요하다. 데이터가 직접 측정하는 것은 보통 전압, 전류, power, spectrum, correlation, scattering amplitude, probability, 또는 response coefficient다.

핵심 수식.

01. observable = measurement functional
02. fit parameter vs direct observable
03. uncertainty/error budget
04. benchmark and calibration

유도 뼈대. 논문을 읽을 때는 초록보다 먼저 핵심 식 하나를 고르고, 그 식의 가정·단위계·경계조건·실험 observable을 표시한다.

검산. 이론이 예측한 quantity와 실험이 측정한 quantity가 같은지, 아니면 모델 fitting을 거쳤는지 구분한다.

자가 점검. 이 주제에서 실험 장비가 실제로 줄 수 있는 raw data가 무엇인지 적어보라.

Part 11

핵심 수식 아틀라스

앞의 본문 장에서 나온 대표식을 F 번호로 다시 묶었다. 이 Part는 검색과 복습을 위한 공식 지도이며, 식만 보지 말고 조건과 검산까지 함께 읽는다.

핵심 수식 아틀라스

F001. 차원분석과 스케일링

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 차원분석과 스케일링을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $[q]=M^a L^b T^c I^d$
- 02. $\Pi_i = \prod_j x_j^{\alpha_{ij}}$
- 03. $s_j = \partial \log q / \partial \log x_j$
- 04. 작은매개변수 $\epsilon \ll 1$

유도 뼈대. 기준 길이, 시간, 질량, 전하 스케일을 먼저 잡고 무차원화한다.

검산. 차원 독립 변수 수를 줄이면 지배 항과 무시 가능한 항이 보인다.

자가 점검. 새 공식을 보면 단위가 양변에서 맞는지 먼저 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F002. 벡터해석과 적분정리

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 벡터해석과 적분정리를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i A_i$$

$$02. (\nabla \times \mathbf{A})_i = \varepsilon_{ijk} \partial_j A_k$$

$$03. \int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dA$$

$$04. \int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{n} dA = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

유도 뼈대. 작은 pillbox, loop, control volume을 잡아 경계조건을 유도한다.

검산. 국소 보존법칙과 전체 플럭스 보존을 연결한다.

자가 점검. 발산정리와 Stokes 정리가 각각 어떤 경계조건을 주는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F003. 텐서와 Einstein 합 규약

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 텐서와 Einstein 합 규약을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $a_i b_i = a \cdot b$

02. $T_{ij} \rightarrow R_{ik} R_{jl} T_{kl}$

03. $\varepsilon_{ijk} \varepsilon_{ilm} = \delta_{jl} \delta_{km} - \delta_{jm} \delta_{kl}$

04. $\text{trace } T = T_{ii}$

유도 뼈대. 반복 인덱스는 합하고, 자유 인덱스는 양변에서 같아야 한다.

검산. 좌표가 바뀌어도 물리량이 같은 방식으로 변해야 한다.

자가 점검. 자유 인덱스가 맞지 않는 식을 하나 만들어 보고 왜 틀렸는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F004. 분포와 Dirac 델타

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 분포와 Dirac 델타를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \int f(x) \delta(x-a) dx = f(a)$$

$$02. \delta(g(x)) = \sum \delta(x-x_i)/|g'(x_i)|$$

$$03. \nabla^2(1/r) = -4\pi \delta^3(r)$$

$$04. 1/(x \pm i0) = P(1/x) \mp i\pi\delta(x)$$

유도 뼈대. 부피적분에서 특이점을 작은 구로 감싸고 표면항을 계산한다.

검산. 점입자, 점전하, Green 함수, 산란 경계조건에는 분포가 자연스럽다.

자가 점검. 점전하 전위에서 Poisson 방정식을 델타 함수로 확인해보라.

핵심 수식 아틀라스

F005. Fourier와 Laplace 변환

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 Fourier와 Laplace 변환을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $f(t) = \int d\omega / (2\pi) \tilde{f}(\omega) e^{-i\omega t}$

02. $\partial_t \rightarrow -i\omega, \nabla \rightarrow ik$

03. $L[f](s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$

04. convolution $\rightarrow \prod$

유도 뼈대. 미분방정식을 대수식으로 바꾸고 pole과 branch cut을 해석한다.

검산. 선형 시간불변 문제에서는 주파수 공간이 가장 짧은 언어다.

자가 점검. 시간 지연이 주파수 공간에서 어떤 위상因子가 되는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F006. Green 함수의 공통 구조

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 Green 함수의 공통 구조를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $L G(x, x') = \delta(x - x')$
- 02. $u(x) = \int G(x, x') s(x') dx' + u_{\text{hom}}$
- 03. $G^R(t) = \theta(t) G(t)$
- 04. $G(\omega) = (\omega - \mathbf{H} + i0)^{-1}$

유도 뼈대. 연산자 L의 역을 찾되, homogeneous solution과 경계조건을 잊지 않는다.

검산. 소스, 경계조건, 인과성을 하나의 kernel에 넣는다.

자가 점검. retarded, advanced, Feynman Green 함수의 차이를 시간 순서로 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F007. 변분 원리

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 변분 원리를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\delta S=0$

02. $S=\int L(q,\dot{q},t)dt$

03. $\partial L/\partial q_i - d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i)=0$

04. $\delta F[u]=0 \rightarrow \text{Euler-Lagrange PDE}$

유도 뼈대. 부분적분으로 경계항을 분리하고, 내부 변분의 계수를 0으로 둔다.

검산. 경로 또는 장 configuration 중 action을 stationary로 만드는 해가 운동방정식이다.

자가 점검. 경계항을 0으로 두는 조건이 무엇인지 항상 명시하라.

핵심 수식 아틀라스

F008. Noether 정리

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 Noether 정리를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $q_i \rightarrow q_i + \varepsilon \Delta q_i$

02. $\delta L = \varepsilon dK/dt$

03. $Q = \Sigma p_i \Delta q_i - K$

04. $dQ/dt = 0$

유도 뼈대. 시간 병진 -> 에너지, 공간 병진 -> 운동량, 회전 -> 각운동량을 대응시킨다.

검산. 연속 대칭은 보존량을 만든다.

자가 점검. 대칭을 하나 골라 보존량을 직접 써보라.

핵심 수식 아틀라스

F009. 고유값과 정상모드

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 고유값과 정상모드를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \mathbf{A}|n\rangle = \lambda_n |n\rangle$$

$$02. \mathbf{A} = \sum \lambda_n |n\rangle\langle n|$$

$$03. f(\mathbf{A}) = \sum f(\lambda_n) |n\rangle\langle n|$$

$$04. \det(\mathbf{A} - \lambda I) = 0$$

유도 뼈대. 직교성, completeness, boundary condition을 함께 확인한다.

검산. 선형화된 문제는 대부분 고유값 문제로 시작한다.

자가 점검. 왜 Hermitian 문제에서는 고유값이 실수인지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F010. Hermitian, unitary, symplectic 구조

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 Hermitian, unitary, symplectic 구조를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다.
조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $A^\dagger = A$

02. $U^\dagger U = I$

03. $M^T J M = J$

04. $J = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix}$

유도 뼈대. 시간발전이 확률을 보존하면 unitary, Hamilton 흐름은 symplectic이다.

검산. 보존되는 내적 또는 symplectic form이 무엇인지가 이론의 구조를 정한다.

자가 점검. unitary 보존량과 symplectic 보존량의 차이를 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F011. PDE 분류와 특성곡선

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 PDE 분류와 특성곡선을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $A u_{xx} + B u_{xy} + C u_{yy} = 0$

02. $\Delta = B^2 - 4AC$

03. $\Delta < 0$ elliptic, $\Delta = 0$ parabolic, $\Delta > 0$ hyperbolic

04. $dx/ds=a, du/ds=b$

유도 뼈대. 최고차 미분항만 보고 local type을 먼저 분류한다.

검산. PDE 유형은 필요한 초기/경계 조건을 결정한다.

자가 점검. 파동방정식이 왜 초기값 문제인지 특성곡선으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F012. 점근해석과 stationary phase

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 점근해석과 stationary phase을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $I(\lambda) = \int a(x) \exp(i\lambda\varphi(x)) dx$
02. $\varphi'(x_0) = 0$
03. $I(\lambda) \sim a(x_0) \exp(i\lambda\varphi_0) \sqrt{2\pi/(\lambda|\varphi''_0|)}$
04. $\lambda \gg 1$

유도 뼈대. 위상 도함수가 0인 점 주변으로 Taylor 전개한다.

검산. 빠르게 진동하는 적분은 stationary point가 지배한다.

자가 점검. 왜 위상이 빠르게 변하는 영역은 상쇄되는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F013. 섭동론의 공통 뼈대

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 섭동론의 공통 뼈대를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $L(\varepsilon)u=s, L=L_0+\varepsilon L_1+\dots$

02. $u=u_0+\varepsilon u_1+\varepsilon^2 u_2+\dots$

03. $L_0 u_0=s$

04. $L_0 u_1=-L_1 u_0$

유도 뼈대. 동차해와 solvability condition을 놓치면 secular term이 생긴다.

검산. 작은 매개변수 주변에서 해를 계층적으로 구한다.

자가 점검. 정칙 섭동과 singular perturbation의 차이를 예로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F014. 경계층과 matched asymptotics

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 경계층과 matched asymptotics을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\varepsilon y'' + a(x)y' + b(x)y = 0$

02. $X = (x - x_b)/\varepsilon^\alpha$

03. $y_{\text{outer}} \sim y_{\text{inner}}$ in overlap

04. $y \sim y_{\text{out}} + y_{\text{in}} - y_{\text{match}}$

유도 뼈대. outer 해와 inner 해를 만들고 overlap 영역에서 맞춘다.

검산. 작은 점성, 작은 확산, 급격한 경계 변화에서 내부/외부 해가 따로 필요하다.

자가 점검. 왜 $\varepsilon \rightarrow 0$ 극한에서 방정식 차수가 낮아지는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F015. 확률, cumulant, 잡음

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 공통 수학 도구의 확률, cumulant, 잡음을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $M(t) = \langle \exp(tX) \rangle$

02. $K(t) = \log M(t)$

03. $\kappa_n = d^n K / dt^n \text{ at } 0$

04. $\langle X^2 \rangle_c = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$

유도 뼈대. moment generating function보다 cumulant가 독립성 분석에 편하다.

계산. 평균만으로는 fluctuation과 상관을 설명할 수 없다.

자가 점검. Poisson 과정에서 평균과 분산이 같다는 것을 cumulant로 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F016. 상관함수와 response

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 상관함수와 response을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $C_{AB}(t) = \langle \mathbf{A}(t) \mathbf{B}(0) \rangle$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar) \theta(t) \langle [\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)] \rangle$
03. $\mathbf{S}_{AB}(\omega) = \int e^{i\omega t} C_{AB}(t) dt$
04. response = variation of observable

유도 뼈대. 미소 외부 perturbation을 넣고 1차 변화량을 계산한다.

검산. 관측량은 보통 외부장에 대한 선형응답으로 측정된다.

자가 점검. 흡수율이 왜 $\text{Im } \chi$ 와 연결되는지 에너지 흐름으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F017. 안정성 분석과 Lyapunov 지수

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 공통 수학 도구의 안정성 분석과 Lyapunov 지수를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\dot{x} = f(x)$

02. $\delta \dot{x} = J(x) \delta x$

03. $J_{ij} = \partial f_i / \partial x_j$

04. $\lambda_L = \lim (1/t) \log |\delta x(t)| / |\delta x(0)|$

유도 뼈대. Jacobian 고유값의 실수부가 local stability를 정한다.

검산. 비선형계도 고정점 근처에서는 선형계로 시작한다.

자가 점검. 안정한 고정점과 limit cycle의 차이를 위상공간에서 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F018. Lie 군과 Lie 대수

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 공통 수학 도구의 Lie 군과 Lie 대수를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $g(\varepsilon) = \exp(\varepsilon X)$
- 02. $[X_a, X_b] = f_{ab}^c X_c$
- 03. $R(n, \theta) = \exp(-i\theta \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}/\hbar)$
- 04. $Ad_g X = gXg^{-1}$

유도 뼈대. 작은 변환을 곱해 commutator와 구조상수를 구한다.

계산. 연속 변환의 국소 구조는 생성자와 commutator에 담긴다.

자가 점검. SO(3)와 SU(2)의 관계를 스핀 1/2 관점에서 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F019. Newton 방정식과 운동량 보존

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 Newton 방정식과 운동량 보존을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$

02. $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$

03. $\Sigma \mathbf{F}_{ext} = d\mathbf{P}_{tot}/dt$

04. $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$

유도 뼈대. 계 전체를 잡으면 내부힘은 상쇄되고 외부힘만 남는다.

검산. 관성계에서 힘은 운동량 변화율이다.

자가 점검. 운동량 보존과 에너지 보존이 동시에 성립하지 않는 예를 생각해보라.

핵심 수식 아틀라스

F020. 일-에너지 정리

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 일-에너지 정리를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$

02. $dK/dt = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$

03. $E = K + V, \mathbf{F} = -\nabla V$

04. $dE/dt = \partial V / \partial t$

유도 뼈대. 힘에 속도를 내적해 시간 적분한다.

검산. 보존력이면 에너지 적분이 궤도 계산을 크게 줄인다.

자가 점검. 시간에 의존하는 퍼텐셜에서 왜 E가 보존되지 않는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F021. 중심력과 유효 퍼텐셜

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 중심력과 유효 퍼텐셜을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $L = m r^2 \dot{\varphi}$

02. $E = 1/2 m \dot{r}^2 + L^2/(2mr^2) + V(r)$

03. $V_{eff} = V + L^2/(2mr^2)$

04. $d^2u/d\varphi^2 + u = -mF(1/u)/(L^2u^2)$

유도 뼈대. 각도 운동을 L로 제거하고 radial motion을 1차원 문제로 본다.

검산. 회전 대칭이면 각운동량이 보존되어 2차원 문제로 줄어든다.

자가 점검. 원궤도 안정성 조건을 V_{eff} 의 곡률로 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F022. Kepler 문제와 궤도 요소

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 Kepler 문제와 궤도 요소를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $V(r) = -k/r$

02. $r(\varphi) = p/(1 + e \cos \varphi)$

03. $E = -k/(2a)$

04. $T^2 = 4\pi^2 a^3/(GM)$

유도 뼈대. $u=1/r$ 치환으로 Binet 방정식을 푼다.

검산. 역제곱 중심력은 닫힌 원뿔곡선 궤도를 만든다.

자가 점검. 타원, 포물선, 쌍곡선을 에너지 부호로 분류하라.

핵심 수식 아틀라스

F023. 조화진동자와 정상모드

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 조화진동자와 정상모드를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$

02. $E = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} kx^2$

03. $q_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$

04. $K a = \omega^2 M a$

유도 뼈대. potential을 Hessian까지 전개하고 질량행렬로 generalized eigenvalue problem을 푼다.

검산. 작은 진동은 평형점 주변의 2차 근사로 나타난다.

자가 점검. 정상모드 좌표에서는 왜 에너지가 모드별로 분리되는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F024. 감쇠와 구동 진동

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 고전역학의 감쇠와 구동 진동을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $x'' + 2\beta x' + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t$

02. $A(\omega) = f_0 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta\omega)^2}$

03. $Q = \omega_0 / (2\beta)$

04. phase lag $\tan \delta = 2\beta\omega / (\omega_0^2 - \omega^2)$

유도 뼈대. 복소 phasor를 넣어 amplitude와 phase를 얻는다.

계산. 선형 response의 가장 단순한 실험 모형이다.

자가 점검. Q가 클수록 시간응답과 주파수응답이 어떻게 바뀌는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F025. Lagrange 역학

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 고전역학의 Lagrange 역학을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $L=T-V$

02. $\delta \int L dt = 0$

03. $d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i) - \partial L/\partial q_i = Q_i$

04. $p_i = \partial L/\partial \dot{q}_i$

유도 뼈대. 제약조건에 맞는 일반화좌표를 고르고 Euler-Lagrange 방정식을 쓴다.

계산. 좌표 선택 자유도가 큰 문제에서 Newton 법칙보다 구조가 선명하다.

자가 점검. 진자 문제를 θ 하나로 쓰면 어떤 힘을 계산하지 않아도 되는가?

핵심 수식 아틀라스

F026. Hamilton 역학과 위상공간

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 Hamilton 역학과 위상공간을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H(q,p)=p_i \dot{q}_i - L$

02. $\dot{q}_i=\partial H/\partial p_i$

03. $\dot{p}_i=-\partial H/\partial q_i$

04. $d\rho/dt=0$ (Liouville)

유도 뼈대. Legendre 변환으로 속도를 운동량으로 바꾼다.

검산. 상태는 configuration이 아니라 phase space의 점이다.

자가 점검. Hamiltonian flow가 위상공간 부피를 보존한다는 뜻을 그림으로 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F027. Poisson bracket과 정준변환

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 Poisson bracket과 정준변환을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\{A, B\} = \partial A / \partial q_i \partial B / \partial p_i - \partial A / \partial p_i \partial B / \partial q_i$

02. $dA/dt = \{A, H\} + \partial A / \partial t$

03. $\{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$

04. canonical: $\{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$

유도 뼈대. 정준변환은 Poisson bracket 구조를 보존한다.

검산. 관측량의 시간발전과 대칭생성자를 같은 bracket으로 표현한다.

자가 점검. 각운동량 성분의 Poisson bracket을 회전대수와 연결하라.

핵심 수식 아틀라스

F028. Hamilton-Jacobi 이론

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 Hamilton-Jacobi 이론을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H(q, \partial S / \partial q, t) + \partial S / \partial t = 0$

02. $p_i = \partial S / \partial q_i$

03. $Q_i = \partial S / \partial \alpha_i$

04. $S = W(q, \alpha) - Et$

유도 뼈대. 완전적분 S 를 찾으면 canonical transformation으로 운동이 적분된다.

검산. 궤적 문제를 작용 함수의 PDE 문제로 바꾼다.

자가 점검. S 가 파면의 위상처럼 행동하는 이유를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F029. 작용-각 변수

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 작용-각 변수를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $J_i = (1/2\pi) \oint p_i dq_i$

02. $\omega_i = \partial H / \partial J_i$

03. $\theta_i(t) = \theta_i(0) + \omega_i t$

04. adiabatic invariant $J \sim \text{const}$

유도 뼈대. 폐곡선 위 $p dq$ 를 적분해 action을 얻는다.

검산. 완전적분 가능한 계에서는 운동이 torus 위의 등속 회전이 된다.

자가 점검. 1D oscillator에서 $J = E/\omega$ 가 되는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F030. 강체와 Euler 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 강체와 Euler 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $L = I\omega$

02. $T = 1/2 \omega \cdot I\omega$

03. $N = dL/dt$

04. $I_1 \dot{\Omega}_1 + (I_3 - I_2)\Omega_2\Omega_3 = N_1$

유도 뼈대. 주축좌표계에서 관성텐서를 대각화한다.

검산. 방향 자유도가 있는 물체는 body frame과 space frame을 구별해야 한다.

자가 점검. 중간축 정리가 왜 불안정한지 에너지-각운동량으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F031. 비관성계와 회전좌표계

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 비관성계와 회전좌표계를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $a_{\text{inertial}} = a_{\text{rot}} + 2\Omega \times v + \Omega \times (\Omega \times r) + \dot{\Omega} \times r$

02. $F_{\text{cor}} = -2m\Omega \times v$

03. $F_{\text{cent}} = -m\Omega \times (\Omega \times r)$

04. $F_{\text{Euler}} = -m\dot{\Omega} \times r$

유도 뼈대. 시간미분 연산자 관계 $(dA/dt)_I = (dA/dt)_R + \Omega \times A$ 를 반복 적용한다.

검산. 회전하는 기준계에서는 가짜힘이 운동방정식에 들어간다.

자가 점검. Coriolis 힘은 속도 방향에 수직인데 일을 하는가?

핵심 수식 아틀라스

F032. 비선형 동역학과 chaos

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 비선형 동역학과 chaos을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $\dot{x}=f(x)$
- 02. Poincare map $x_{n+1}=P(x_n)$
- 03. $\lambda_L > 0 \rightarrow$ sensitive dependence
- 04. $S_{KS} = \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$

유도 뼈대. 연속 flow를 단면 map으로 줄여 fixed point와 stability를 본다.

검산. 비선형계는 작은 차이가 장시간에 크게 증폭될 수 있다.

자가 점검. Lyapunov 지수가 양수라는 말과 예측 가능 시간의 관계를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F033. Lagrange multiplier와 제약

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 Lagrange multiplier와 제약을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F(q,t)=0$

02. $L'=L+\lambda_a F_a$

03. $\partial L'/\partial \lambda_a = F_a = 0$

04. constraint force does no virtual work

유도 뼈대. 일반화좌표로 제약을 제거하거나 multiplier로 힘까지 구한다.

검산. 제약력이 일을 하지 않는 ideal constraint에서 유용하다.

자가 점검. 구 위를 구르는 입자에서 제약력이 왜 에너지를 바꾸지 않는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F034. 연속체와 탄성파

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 연속체와 탄성파를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$\mathbf{01.} \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

$$\mathbf{02.} \quad \varepsilon_{ij} = 1/2(\partial_i u_j + \partial_j u_i)$$

$$\mathbf{03.} \quad \rho u''_i = \partial_j \sigma_{ij} + f_i$$

$$\mathbf{04.} \quad c_L = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho}$$

유도 뼈대. 변위장 u 를 정의하고 strain-stress 관계를 닫는다.

검산. 고체도 작은 변형에서는 장 방정식으로 기술된다.

자가 점검. Hooke 법칙이 스칼라가 아니라 텐서인 이유를 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F035. 충돌과 산란의 고전 공식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 고전역학의 충돌과 산란의 고전 공식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $d\sigma = b \, db \, d\varphi / \sin\theta \, d\theta$

02. $d\sigma/d\Omega = b/\sin\theta \, |db/d\theta|$

03. impulse $\mathbf{J} = \int \mathbf{F} dt = \Delta \mathbf{p}$

04. coefficient $e = -v_{rel\text{after}}/v_{rel\text{before}}$

유도 뼈대. 운동량 보존, 에너지 손실, 중심력 궤도 방정식을 조합한다.

계산. 입사 impact parameter가 산란각과 단면적을 정한다.

자가 점검. 단면적의 차원이 면적인 이유를 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F036. Symplectic integrator와 검산

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 고전역학의 Symplectic integrator와 검산을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $q_{n+1} = q_n + \Delta t \partial H / \partial p$
- 02. $p_{n+1} = p_n - \Delta t \partial H / \partial q$
- 03. energy error bounded oscillatory
- 04. phase volume preserved

유도 뼈대. 위치와 운동량을 leapfrog 방식으로 staggered update한다.

검산. 장시간 Hamilton simulation에서는 구조 보존이 중요하다.

자가 점검. Euler 방법과 leapfrog를 에너지 drift 관점에서 비교하라.

핵심 수식 아틀라스

F037. 열역학 제1법칙

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 열역학 제1법칙을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $dU = \delta Q - \delta W$

02. $\delta W = p dV$

03. $dU = T dS - p dV + \mu dN$

04. $C_V = (\partial U / \partial T)_V$

유도 뼈대. 닫힌계, 열린계, 부호 convention을 먼저 고정한다.

계산. 에너지는 상태함수지만 열과 일은 경로함수다.

자가 점검. 열 Q가 상태함수가 아닌 이유를 순환과정으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F038. 엔트로피와 제2법칙

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 엔트로피와 제2법칙을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. dS \geq \delta Q_{rev}/T$$

$$02. \Delta S_{univ} \geq 0$$

$$03. T^{-1} = (\partial S / \partial U)_{V,N}$$

$$04. S = k_B \ln \Omega$$

유도 뼈대. 가역 경로를 상상해 $\delta Q_{rev}/T$ 를 적분한다.

검산. 자발 과정의 방향은 에너지뿐 아니라 상태수 증가가 정한다.

자가 점검. 단열 자유팽창에서 $Q=0$ 인데 S 가 증가하는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F039. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F=U-TS$

02. $G=U-TS+pV$

03. $H=U+pV$

04. $\Omega=U-TS-\mu N$

유도 뼈대. 고정된 intensive/extensive 변수에 맞춰 Legendre 변환한다.

계산. 제어변수에 맞는 퍼텐셜을 고르면 평형 조건이 최소화로 바뀐다.

자가 점검. T,p가 고정된 실험에서는 왜 Gibbs 자유에너지를 쓰는가?

핵심 수식 아틀라스

F040. Maxwell 관계

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Maxwell 관계를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. dF = -S dT - p dV$$

$$02. (\partial S / \partial V)_T = (\partial p / \partial T)_V$$

$$03. dG = -S dT + V dp$$

$$04. (\partial S / \partial p)_T = -(\partial V / \partial T)_p$$

유도 뼈대. 적절한 퍼텐셜의 자연변수를 쓰고 혼합미분을 비교한다.

검산. 상태함수의 이계미분 교환성이 측정 가능한 관계를 만든다.

자가 점검. 하나의 퍼텐셜에서 Maxwell 관계를 직접 유도해보라.

핵심 수식 아틀라스

F041. 상평형과 Clapeyron 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 상평형과 Clapeyron 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mu_\alpha(T,p)=\mu_\beta(T,p)$

02. $dp/dT = \Delta s/\Delta v$

03. $dp/dT = L/(T \Delta v)$

04. Gibbs phase rule: $f=c-p+2$

유도 뼈대. $d\mu=-s dT+v dp$ 를 두 상에 적용해 기울기를 얻는다.

계산. 공존선에서는 두 상의 화학퍼텐셜이 같다.

자가 점검. 물의 융해곡선 기울기가 음수인 이유를 Δv 로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F042. Microcanonical ensemble

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Microcanonical ensemble을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\Omega(E, V, N) = \text{Tr } \delta(E - H)$

02. $S = k_B \ln \Omega$

03. $1/T = \partial S / \partial E$

04. $p/T = \partial S / \partial V$

유도 뼈대. 에너지 shell 위에서 모든 접근 가능한 미시상태를 동일하게 둔다.

계산. 고립계의 기본 ensemble이다.

자가 점검. microcanonical에서 온도를 어떻게 정의하는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F043. Canonical ensemble

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Canonical ensemble을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $Z = \text{Tr} \exp(-\beta H)$

02. $F = -k_B T \ln Z$

03. $\langle E \rangle = -\partial \ln Z / \partial \beta$

04. $C_V = k_B \beta^2 (\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2)$

유도 뼈대. Boltzmann weight를 정규화하고 $\ln Z$ 의 미분을 계산한다.

검산. 온도 고정계는 partition function 하나로 열역학을 만든다.

자가 점검. 열용량이 에너지 fluctuation과 연결되는 이유를 유도하라.

핵심 수식 아틀라스

F044. Grand canonical ensemble

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Grand canonical ensemble을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathcal{E} = \text{Tr} \exp[-\beta(\mathbf{H} - \mu N)]$

02. $\Omega_G = -k_B T \ln \mathcal{E}$

03. $\langle N \rangle = k_B T \partial \ln \mathcal{E} / \partial \mu$

04. $P V = k_B T \ln \mathcal{E}$

유도 뼈대. N별 canonical partition function을 fugacity $z = \exp(\beta\mu)$ 로 합한다.

계산. 입자수까지 교환하면 화학퍼텐셜이 자연변수다.

자가 점검. μ 가 큰 양수이면 입자수가 어떻게 변하는지 직관을 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F045. 이상기체와 equipartition

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 이상기체와 equipartition을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $pV = Nk_B T$
- 02. $U = 3/2 Nk_B T$
- 03. $\langle x_i \partial H / \partial x_i \rangle = k_B T$
- 04. $C_V = f/2 Nk_B$

유도 뼈대. Gaussian 적분으로 partition function을 계산한다.

검산. 고전 quadratic 자유도 하나는 평균 에너지 $k_B T/2$ 를 가진다.

자가 점검. 회전/진동 자유도가 온도에 따라 켜지는 이유를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F046. Bose/Fermi 분포

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Bose/Fermi 분포를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $n_B(\varepsilon) = 1/(\exp(\beta(\varepsilon - \mu)) - 1)$

02. $n_F(\varepsilon) = 1/(\exp(\beta(\varepsilon - \mu)) + 1)$

03. $Z_{\text{mode}}^B = 1/(1 - z e^{-\beta\varepsilon})$

04. $Z_{\text{mode}}^F = 1 + z e^{-\beta\varepsilon}$

유도 뼈대. mode별 occupation number를 합산한다.

계산. 동일입자 대칭성이 점유수 분포를 바꾼다.

자가 점검. 왜 photon의 화학퍼텐셜은 보통 0인가?

핵심 수식 아틀라스

F047. Blackbody와 Debye 모형

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Blackbody와 Debye 모형을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $u(\omega) = \hbar \omega^3 / (\pi^2 c^3) / (\exp(\beta \hbar \omega) - 1)$

02. $j = \sigma T^4$

03. $C_V \propto T^3$ at low T

04. $\omega_D^3 = 6\pi^2 n c_s^3$

유도 뼈대. mode density와 Bose 분포를 곱해 적분한다.

계산. 양자화된 boson 모드의 밀도상태가 열복사를 결정한다.

자가 점검. Rayleigh-Jeans 발산이 왜 생기는지 고전 극한으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F048. Virial 전개와 실제기체

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Virial 전개와 실제기체를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $p/(kBT) = \rho + B_2(T)\rho^2 + B_3(T)\rho^3 + \dots$

02. $B_2 = -1/2 \int (\exp(-\beta u(r)) - 1) d^3r$

03. $Z = pV/(NkBT)$

04. *van der Waals*: $(p + a n^2)(V - Nb) = NkBT$

유도 뼈대. Mayer f-function으로 pair potential을 적분한다.

계산. 상호작용은 밀도 전개 계수에 들어간다.

자가 점검. 인력과 배척력이 B_2 의 부호에 주는 영향을 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F049. Landau 평균장과 상전이

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Landau 평균장과 상전이를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F(m) = F_0 + a(T - T_c)m^{2+b} - hm^4$

02. $m \propto (T_c - T)^{1/2}$

03. $\chi \propto |T - T_c|^{-1}$

04. C has jump

유도 뼈대. free energy를 질서변수의 짝수 거듭제곱으로 전개한다.

검산. 질서변수와 대칭성으로 상전이를 모델링한다.

자가 점검. $b > 0$ 조건이 왜 안정성을 주는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F050. Ising 모형과 mean field

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Ising 모형과 mean field을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H = -J \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j - h \sum_i s_i$

02. $m = \tanh[\beta(zJm + h)]$

03. $k_B T_c = zJ$

04. $\chi = \partial m / \partial h$

유도 뼈대. 이웃 스핀을 평균장 zJm 으로 바꾼다.

검산. 가장 단순한 이산 대칭 깨짐 모형이다.

자가 점검. 1D Ising이 유한온도 상전이를 갖지 않는 이유를 생각해보라.

핵심 수식 아틀라스

F051. Critical scaling과 RG

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Critical scaling과 RG을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\xi \propto |t|^{-\nu}$

02. $\chi \propto |t|^{-\gamma}$

03. $m \propto (-t)^\beta$

04. $\beta_g = d \, g / d \ln b$

유도 뼈대. coarse-graining 후 coupling이 어떻게 흐르는지 본다.

검산. 임계점 근처에서는 미시세부보다 스케일 불변성이 중요하다.

자가 점검. 상관길이 발산하면 왜 평균장 근사가 위험한가?

핵심 수식 아틀라스

F052. Boltzmann 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Boltzmann 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f + \mathbf{F}/m \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = C[f]$

02. $H = \int f \ln f d^3x d^3v$

03. $dH/dt \leq 0$

04. local equilibrium: $f_0 \propto \exp[-\beta(p-\mu)^2/2m]$

유도 뼈대. 좌변은 phase-space advection, 우변은 collision integral이다.

계산. 분포함수의 수송과 충돌이 비평형 relaxation을 만든다.

자가 점검. H-theorem이 시간가역성과 어떻게 조화되는지 생각해보라.

핵심 수식 아틀라스

F053. Langevin과 Fokker-Planck

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Langevin과 Fokker-Planck을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $m \dot{v} = -\gamma v + \eta(t)$

02. $\langle \eta(t) \eta(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta(t - t')$

03. $\partial_t P = -\partial_x (AP) + 1/2 \partial_x^2 (BP)$

04. $D = k_B T / \gamma$

유도 뼈대. 확률미분방정식의 drift와 diffusion을 probability equation으로 바꾼다.

검산. 잡음과 마찰은 평형에서 fluctuation-dissipation 관계로 묶인다.

자가 점검. 마찰이 커질수록 확산계수는 어떻게 변하는가?

핵심 수식 아틀라스

F054. Kubo와 fluctuation-dissipation

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Kubo와 fluctuation-dissipation을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\delta\langle\mathbf{A}(t)\rangle = \int \chi_{AB}^R(t-t') f(t') dt'$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle[\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)]\rangle$
03. $\mathbf{S}(\omega) = 2\hbar/(1-e^{-\beta\hbar\omega}) \text{Im}\chi^R(\omega)$
04. classical: $\mathbf{S}(\omega) = 2kBT \chi''(\omega)/\omega$

유도 뼈대. 섭동 Hamiltonian $H' = -f(t)B$ 를 넣고 1차 항만 남긴다.

검산. 평형 fluctuation이 외부장 response를 결정한다.

자가 점검. 흡수와 잡음이 같은 함수의 다른 얼굴인 이유를 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F055. Jarzynski와 비평형 일

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 Jarzynski와 비평형 일을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\langle \exp(-\beta W) \rangle = \exp(-\beta \Delta F)$
02. $W = \int \partial \mathbf{H} / \partial \lambda \, \lambda \, dt$
03. Crooks: $P_F(W)/P_R(-W) = \exp[\beta(W - \Delta F)]$
04. $\langle W \rangle = \Delta F$

유도 뼈대. 같은 protocol을 많이 반복해 work distribution을 샘플링한다.

검산. 비평형 과정에서도 자유에너지 차이를 추정할 수 있다.

자가 점검. Jensen 부등식으로 제2법칙을 얻어보라.

핵심 수식 아틀라스

F056. 정보와 열역학

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 열역학/통계역학의 정보와 열역학을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $S_{VN} = -k_B \text{Tr } \rho \ln \rho$

02. $I(X:Y) = S_{X+Y} - S_{XY}$

03. Landauer: $Q \geq k_B T \ln 2$

04. relative entropy $D(\rho||\sigma) \geq 0$

유도 뼈대. 엔트로피를 확률분포 또는 밀도행렬의 함수로 계산한다.

검산. 정보 삭제와 열 방출은 물리적으로 연결된다.

자가 점검. 비트 하나를 지울 때 왜 최소 열이 필요한지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F057. 연속체 가정과 물질미분

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 연속체 가정과 물질미분을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $D/Dt = \partial/\partial t + u \cdot \nabla$

02. $\rho(x,t), u(x,t), p(x,t)$

03. $Kn = \lambda_{mfp}/L \ll 1$

04. $Re = \rho UL/\mu$

유도 뼈대. 입자와 함께 움직이는 미분 D/Dt 를 사용한다.

검산. 유체는 많은 입자의 평균장이며, 관측 스케일이 평균자유행로보다 커야 한다.

자가 점검. Eulerian 관찰자와 Lagrangian 입자 관찰자의 차이를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F058. 질량보존과 연속방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 유체역학의 질량보존과 연속방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01.** $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$
- 02.** incompressible: $\nabla \cdot u = 0$
- 03.** $D\rho/Dt = -\rho \nabla \cdot u$
- 04.** mass flux $= \rho u \cdot n$

유도 뼈대. Reynolds transport theorem을 질량에 적용한다.

계산. control volume 안의 질량 변화는 경계 flux로만 생긴다.

자가 점검. 비압축 조건이 밀도 상수와 항상 같은 말인지 구분하라.

핵심 수식 아틀라스

F059. Cauchy 응력과 운동량 보존

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 Cauchy 응력과 운동량 보존을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\rho \, Du/Dt = \nabla \cdot \sigma + \rho b$

02. $\sigma = -pI + \tau$

03. $\tau = \mu(\nabla u + \nabla u^T) + \lambda(\nabla \cdot u)I$

04. traction $t = \sigma \cdot n$

유도 뼈대. 작은 체적요소에 Newton 법칙을 적용하고 표면힘을 발산으로 바꾼다.

검산. 유체가 면을 통해 주고받는 힘은 응력텐서로 표현된다.

자가 점검. 압력항은 왜 isotropic 응력으로 들어가는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F060. Navier-Stokes 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 Navier-Stokes 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\rho(\partial_t u + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f$
02. $\nabla \cdot u = 0$
03. $\nu = \mu / \rho$
04. energy dissipation $\varepsilon = 2\nu \mathbf{S}_{ij} \mathbf{S}_{ij}$

유도 뼈대. 운동량 보존에 선형 점성 constitutive law를 넣는다.

검산. Newtonian, incompressible, constant viscosity 가정에서 닫힌다.

자가 점검. Reynolds 수가 비선형항/점성항 비율인 것을 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F061. Euler 방정식과 Bernoulli

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 Euler 방정식과 Bernoulli를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $\rho Du/Dt = -\nabla p + \rho g$
- 02. $\partial_t \varphi + 1/2 |\nabla \varphi|^2 + p/\rho + gz = \text{const}$
- 03. steady streamline: $p + 1/2 \rho u^2 + \rho gz = \text{const}$
- 04. irrotational: $u = \nabla \varphi$

유도 뼈대. 속도와 운동방정식을 streamline 또는 potential에 적분한다.

검산. 점성을 무시할 수 있는 영역에서는 Euler 방정식을 쓴다.

자가 점검. Bernoulli 식을 적용하면 안 되는 상황을 하나 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F062. Vorticity와 Kelvin 정리

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 Vorticity와 Kelvin 정리를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\omega = \nabla \times u$

02. $D\omega/Dt = (\omega \cdot \nabla)u + \nu \nabla^2 \omega$

03. $\Gamma = \oint u \cdot dl$

04. $D\Gamma/Dt = 0$ for inviscid barotropic conservative force

유도 뼈대. Navier-Stokes에 curl을 취해 압력을 제거한다.

검산. 회전 성분은 vortex stretching과 점성확산으로 변한다.

자가 점검. 2D 유동에서 vortex stretching이 사라지는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F063. Stokes 유동과 low Re

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 Stokes 유동과 low Re을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $Re \ll 1$

02. $0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f$

03. $\nabla \cdot u = 0$

04. sphere drag $F = 6\pi\mu a U$

유도 뼈대. Navier-Stokes에서 비선형 관성항을 버린다.

검산. 관성보다 점성이 큰 미시/느린 유동이다.

자가 점검. Stokes 유동이 시간반전 대칭에 가까워지는 의미를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F064. 경계층과 Blasius

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 경계층과 Blasius을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\delta \sim L/\sqrt{(\text{Re}_L)}$

02. $u\partial_x u + v\partial_y u = U dU/dx + \nu \partial_y^2 u$

03. $\eta = y \sqrt{(U/(\nu x))}$

04. $f''' + 1/2 f f'' = 0$

유도 뼈대. x방향 변화가 y방향 변화보다 느리다는 scaling을 쓴다.

검산. 큰 Re에서도 벽 근처 얇은 층에서는 점성이 중요하다.

자가 점검. no-slip 조건이 경계층을 만드는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F065. Poiseuille와 pipe flow

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 유체역학의 Poiseuille와 pipe flow을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $u(r)=\Delta p/(4\mu L)(R^2-r^2)$

02. $Q=\pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$

03. $\tau_w=R \Delta p/(2L)$

04. $f_D=64/\text{Re}$

유도 뼈대. 원통좌표에서 정상 완전발달 Navier-Stokes를 적분한다.

계산. 층류 원관 유동은 정확해가 있다.

자가 점검. 유량이 반지름 네제곱에 비례하는 이유를 감각적으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F066. Lubrication 근사

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 Lubrication 근사를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $h/L \ll 1$

02. $\partial p / \partial z \sim 0$

03. $\partial p / \partial x = \mu \partial^2 u / \partial z^2$

04. $\partial / \partial x (h^3 \partial p / \partial x) = 6\mu U \partial h / \partial x$

유도 뼈대. 작은 aspect ratio로 방정식을 차수별로 줄인다.

검산. 얇은 틈에서는 압력구배가 큰 면내 방향으로 작용한다.

자가 점검. 압력이 두께 방향으로 거의 일정한 이유를 scaling으로 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F067. 표면장력과 capillary 현상

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 표면장력과 capillary 현상을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\Delta p = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$

02. $Ca = \mu U / \gamma$

03. $Bo = \rho g L^2 / \gamma$

04. $l_c = \sqrt{\gamma / (\rho g)}$

유도 뼈대. 계면의 곡률과 에너지 변화를 연결한다.

검산. 계면 에너지가 압력 jump와 모세관 길이를 만든다.

자가 점검. 작은 물방울에서 중력보다 표면장력이 중요한 이유를 Bo로 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F068. 압축성 Euler와 Mach 수

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 압축성 Euler와 Mach 수를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$02. \partial_t (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u + p I) = 0$$

$$03. M = U/c_s$$

$$04. c_s^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$$

유도 뼈대. 질량, 운동량, 에너지 보존형 방정식을 쓴다.

검산. 유속이 음속과 비슷하면 밀도 변화와 음파가 중요하다.

자가 점검. $M < 0.3$ 에서 비압축 근사가 자주 쓰이는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F069. 충격파와 Rankine-Hugoniot

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 유체역학의 충격파와 Rankine-Hugoniot을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $[\rho u_n]=0$
- 02. $[\rho u_n^{2+p}]=0$
- 03. $[(E+p)u_n]=0$
- 04. entropy increases across shock

유도 뼈대. 얇은 shock를 감싸는 control volume에 보존법칙을 적용한다.

계산. 불연속면을 통과해 보존량 flux가 맞아야 한다.

자가 점검. shock에서 엔트로피가 증가한다는 말이 왜 방향성을 주는가?

핵심 수식 아틀라스

F070. 난류와 Kolmogorov scaling

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 유체역학의 난류와 Kolmogorov scaling을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $Re \gg 1$

02. $E(k) \sim C \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$

03. $\eta_K = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$

04. $u_l \sim (\varepsilon l)^{1/3}$

유도 뼈대. 관성범위에서 ε 만이 에너지 전달률이라고 가정한다.

계산. 큰 Re 유동은 넓은 스케일 범위의 에너지 cascade를 갖는다.

자가 점검. 왜 난류는 평균장만으로 설명하기 어려운가?

핵심 수식 아틀라스

F071. RANS와 closure 문제

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 유체역학의 RANS와 closure 문제를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $u=U+u'$
02. $\partial_t U + U \cdot \nabla U = -\nabla P/\rho + \nu \nabla^2 U - \nabla \cdot \langle u' u' \rangle$
03. Reynolds stress $\tau_R = -\rho \langle u' u' \rangle$
04. eddy viscosity ν_t

유도 뼈대. 비선형항의 평균이 평균의 비선형항과 다르다는 점이 핵심이다.

계산. 평균을 취하면 미지의 fluctuation stress가 생긴다.

자가 점검. closure가 필요한 이유를 식 하나로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F072. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 유체역학의 선형 안정성: Orr-Sommerfeld을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01.** $u=U(y)+u'$
- 02.** $u' \propto \exp[i(\alpha x - \omega t)]$
- 03.** $(D^2 - \alpha^2)^2 \varphi = i\alpha Re[(U-c)(D^2 - \alpha^2) - U'']\varphi$
- 04.** $\text{Im } \omega > 0$ unstable

유도 뼈대. Navier-Stokes를 선형화하고 normal mode를 넣는다.

계산. 기본 유동 위 작은 교란의 성장률을 본다.

자가 점검. 성장률과 phase velocity를 구분해보라.

핵심 수식 아틀라스

F073. 회전유체와 geostrophic balance

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 회전유체와 geostrophic balance을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $Ro = U/(fL)$

02. $f \times u = -\nabla p / \rho$

03. Taylor–Proudman: $\partial u / \partial z \sim 0$

04. $PV = (\zeta + f)/h$

유도 뼈대. 작은 Rossby 수 전개로 leading balance를 잡는다.

검산. 회전이 강하면 Coriolis 힘과 압력구배가 균형을 이룬다.

자가 점검. 북반구에서 저기압 주변 회전 방향을 geostrophic balance로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F074. Shallow water 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 Shallow water 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \partial_t h + \nabla \cdot (hu) = 0$$

$$02. \partial_t u + u \cdot \nabla u = -g \nabla h$$

$$03. c = \sqrt{gh}$$

$$04. Fr = U / \sqrt{gh}$$

유도 뼈대. 깊이적분된 질량/운동량 보존을 쓴다.

검산. 수평 길이가 수심보다 크면 수직구조를 평균화한다.

자가 점검. $Fr=1$ 이 어떤 임계성을 나타내는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F075. MHD와 Alfvén 파

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 유체역학의 MHD와 Alfvén 파를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

$$02. \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$03. \rho D\mathbf{u}/Dt = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

$$04. v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho}$$

유도 뼈대. Ohm law와 Faraday 법칙을 결합해 induction equation을 얻는다.

검산. 전도성 유체에서는 유동과 자기장이 서로 끌고 간다.

자가 점검. magnetic Reynolds 수가 클 때 frozen-in이 무슨 뜻인지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F076. Fermat 원리와 eikonal

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 Fermat 원리와 eikonal을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\delta \int n \, ds = 0$

02. $|\nabla S|^2 = n^2$

03. $k = \nabla S$

04. ray: $d/ds(n \, dr/ds) = \nabla n$

유도 뼈대. 위상 S를 빠르게 변하는 함수로 두고 leading order를 취한다.

검산. 파장이 매질 변화 길이보다 짧으면 빛은 ray로 근사된다.

자가 점검. 굴절률 gradient가 ray를 어떻게 휘게 하는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F077. ABCD 행렬과 Gaussian optics

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 ABCD 행렬과 Gaussian optics을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $[r_2, \theta_2]^T = [[\mathbf{A}, \mathbf{B}], [\mathbf{C}, \mathbf{D}]] [r_1, \theta_1]^T$

02. thin lens: $[[1, 0], [-1/f, 1]]$

03. free space: $[[1, L], [0, 1]]$

04. $q_2 = (Aq_1 + B)/(Cq_1 + D)$

유도 뼈대. 각 요소의 행렬을 순서대로 곱한다.

검산. paraxial 광선은 2x2 symplectic 행렬로 전달된다.

자가 점검. 렌즈 뒤 초점 조건을 ABCD로 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F078. 렌즈 공식과 수차

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 렌즈 공식과 수차를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $1/s + 1/s' = 1/f$

02. $m = -s'/s$

03. $NA = n \sin\theta$

04. diffraction limit $\sim 0.61\lambda/NA$

유도 뼈대. paraxial ray transfer로 imaging condition을 얻는다.

검산. 얇은 렌즈 근사는 작은 각도와 작은 aperture에서 가장 단순하다.

자가 점검. NA를 키우면 해상도와 초점심도가 어떻게 변하는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F079. Jones 벡터와 Stokes 파라미터

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 광학의 Jones 벡터와 Stokes 파라미터를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{E}=[E_x, E_y]^T$
02. $S_0=|E_x|^2+|E_y|^2$
03. $S_1=|E_x|^2-|E_y|^2$
04. $S_2=2\text{Re } E_x E_y^*, S_3=2\text{Im } E_x E_y^*$

유도 뼈대. 편광소자를 2x2 복소 행렬로 곱한다.

계산. coherent 편광은 Jones, 부분편광은 Stokes/Mueller가 편하다.

자가 점검. 선편광과 원편광의 Jones 벡터를 써보라.

핵심 수식 아틀라스

F080. Fresnel 계수와 경계조건

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 Fresnel 계수와 경계조건을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

02. $r_s = (n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2) / (n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2)$

03. $r_p = (n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2) / (n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2)$

04. $R = |r|^2$

유도 뼈대. s/p 편광을 분리하고 Maxwell 경계조건을 적용한다.

검산. 평면파가 경계에서 E, H 접선 성분 연속성을 만족해야 한다.

자가 점검. Brewster 각에서 p 반사가 0이 되는 조건을 유도하라.

핵심 수식 아틀라스

F081. 다층막 transfer matrix

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 광학의 다층막 transfer matrix을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $[E+;E-]_{j+1}=M_j [E+;E-]_j$
02. phase $\delta_j=k_0 n_j d_j \cos\theta_j$
03. quarter-wave stack
04. stop band from periodic phase

유도 뼈대. 각 layer의 propagation matrix와 interface matrix를 곱한다.

계산. 층마다 위상축적과 경계반사를 행렬로 연결한다.

자가 점검. $\lambda/4$ 코팅이 반사를 줄이는 위상 조건을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F082. Fraunhofer 회절

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 Fraunhofer 회절을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01.** $U(P) \propto \mathcal{F}\{\text{aperture}\}(k_x, k_y)$
- 02.** single slit: $I \propto \text{sinc}^2(\pi a \sin\theta/\lambda)$
- 03.** Airy disk radius $1.22\lambda f/D$
- 04.** grating: $d \sin\theta = m\lambda$

유도 뼈대. Fresnel 적분에서 2차 위상항을 far-field 근사로 단순화한다.

검산. far field에서는 aperture의 Fourier transform이 패턴이다.

자가 점검. 슬릿이 좁아질수록 회절무늬가 넓어지는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F083. Fresnel 회절과 near field

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 Fresnel 회절과 near field을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $U(P) = \int_{\text{aperture}} \exp(ik(r+r'))/(rr') dA$

02. Fresnel number $N_F = a^2/(\lambda z)$

03. quadratic phase matters

04. Cornu spiral for edge

유도 뼈대. Huygens-Fresnel integral을 paraxial 근사로 전개한다.

검산. 관측거리가 충분히 멀지 않으면 2차 위상항을 유지해야 한다.

자가 점검. Fresnel number가 크면 어떤 regime인지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F084. PSF, OTF, 해상도

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 광학의 PSF, OTF, 해상도를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01.** $\text{image} = \text{object} \cdot \text{PSF}$
- 02.** $\text{OTF} = \text{Fourier transform of PSF}$
- 03.** $\text{MTF} = |\text{OTF}|$
- 04.** Abbe: $d \sim \lambda / (2\text{NA})$

유도 빼대. point object의 응답을 알고 임의 object를 중첩한다.

계산. 선형 shift-invariant 영상계는 convolution으로 표현된다.

자가 점검. coherent imaging과 incoherent imaging의 transfer function 차이를 찾아보라.

핵심 수식 아틀라스

F085. Coherence와 Van Cittert-Zernike

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 광학의 Coherence와 Van Cittert-Zernike을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\Gamma_{12} = \langle \mathbf{E}_1(t) \mathbf{E}_2(t) \rangle$

02. $g_{12} = \Gamma_{12} / \sqrt{I_1 I_2}$

03. visibility $V = 2|\Gamma_{12}| / (I_1 + I_2)$

04. spatial coherence = Fourier transform of source intensity

유도 뼈대. 두 점 검출기의 상관함수를 source 분포와 연결한다.

계산. 간섭무늬는 field correlation을 측정한다.

자가 점검. 넓은 source일수록 spatial coherence가 어떻게 되는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F086. Fabry-Perot와 laser cavity

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 광학의 Fabry-Perot와 laser cavity을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01.** $FSR=c/(2nL)$
- 02.** $Finesse=FSR/linewidth$
- 03.** resonance: $2nL=m\lambda$
- 04.** threshold: $gain = loss$

유도 뼈대. 왕복 위상과 반사 손실을 곱해 resonance 조건을 얻는다.

계산. 공진기는 선택된 longitudinal mode만 크게 증폭한다.

자가 점검. cavity 길이가 길어지면 FSR은 어떻게 변하는가?

핵심 수식 아틀라스

F087. Gaussian beam

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 Gaussian beam을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$

02. $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$

03. $R(z) = z[1 + (z_R/z)^2]$

04. Gouy phase $\psi = \arctan(z/z_R)$

유도 뼈대. complex q parameter 또는 paraxial equation ansatz로 유도한다.

검산. paraxial wave equation의 기본 beam 해다.

자가 점검. beam waist를 줄이면 divergence가 커지는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F088. Optical fiber와 waveguide

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 Optical fiber와 waveguide을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $V=(2\pi a/\lambda) \text{ NA}$

02. single mode if $V<2.405$

03. $\beta(\omega)$ dispersion

04. $D=-(2\pi c/\lambda^2) d^2\beta/d\omega^2$

유도 뼈대. Helmholtz 방정식을 횡/종 방향으로 분리한다.

검산. 도파관은 횡방향 경계조건으로 mode가 양자화된다.

자가 점검. single-mode 조건이 왜 mode count와 연결되는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F089. 비선형 편광과 phase matching

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 광학의 비선형 편광과 phase matching을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $P = \epsilon_0(\chi^1 E + \chi^2 E^2 + \chi^3 E^3 + \dots)$

02. 2ω generation: $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_\omega$

03. efficiency $\propto \text{sinc}^2(\Delta k L/2)$

04. n_2 effect: $\Delta n = n_2 I$

유도 뼈대. 비선형 source term을 파동방정식에 넣고 slowly varying envelope를 쓴다.

계산. 강한 빛에서는 매질 response가 장에 비선형으로 의존한다.

자가 점검. phase matching이 안 되면 왜 변환효율이 주기적으로 되돌아가는가?

핵심 수식 아틀라스

F090. NLSE와 soliton

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 광학의 NLSE와 soliton을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $i\partial_z A - \beta_2/2 \partial_t^2 A + \gamma|A|^2 A = 0$
02. dispersion length $L_D = T_0^2/|\beta_2|$
03. nonlinear length $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$
04. soliton if $L_D \sim L_{NL}$

유도 뼈대. slowly varying envelope와 retarded time 좌표를 사용한다.

검산. 분산과 Kerr 비선형성이 균형을 이루면 pulse가 유지된다.

자가 점검. 분산만 있을 때와 비선형만 있을 때 pulse가 어떻게 변하는지 비교하라.

핵심 수식 아틀라스

F091. Photonic crystal과 위상광학

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 광학의 Photonic crystal과 위상광학을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $E_k(r) = u_k(r) \exp(ik \cdot r)$
- 02. band gap from periodic $\varepsilon(r)$
- 03. Berry curvature $\Omega_n(k) = \nabla_{kx} A_n$
- 04. $C = (1/2\pi) \int \Omega d^2k$

유도 뼈대. Bloch 정리로 Maxwell eigenproblem을 풀고 Berry curvature를 계산한다.

계산. 주기적 매질에서는 광자도 band structure와 topology를 가진다.

자가 점검. 전자 band와 photonic band의 공통점과 차이를 하나씩 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F092. Maxwell 방정식의 네 줄

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Maxwell 방정식의 네 줄을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$

02. $\text{div } \mathbf{B} = 0$

03. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$

04. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 d\mathbf{E}/dt$

유도 뼈대. 적분형 방정식에 작은 pillbox와 loop를 적용하면 미분형과 경계조건이 나온다.

검산. SI 단위, 국소적인 전하와 전류 밀도, 고전 연속장 근사가 기본 조건이다.

자가 점검. 각 항의 단위와 전하보존 유도 과정을 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F093. 전하보존과 게이지 구조

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 전하보존과 게이지 구조를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $d\rho/dt + \text{div } \mathbf{J} = 0$

02. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$

03. $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - d\mathbf{A}/dt$

04. $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \text{grad } \chi, \varphi \rightarrow \varphi - d\chi/dt$

유도 뼈대. Maxwell 방정식의 발산을 취해 연속방정식을 얻고, $\text{div } \mathbf{B}=0$ 에서 벡터퍼텐셜을 도입한다.

검산. 전하가 생성·소멸하지 않는 폐쇄계와 충분히 매끄러운 퍼텐셜 표현에서 성립한다.

자가 점검. Coulomb gauge와 Lorenz gauge의 차이를 한 줄로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F094. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Coulomb 법칙과 Gauss 법칙을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $E(r) = 1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(rp)(r-rp)/|r-rp|^3 d^3rp$

02. $\oint E \cdot da = Q_{enc}/\epsilon_0$

03. $\text{div } E = \rho/\epsilon_0$

04. $F = qE$

유도 뼈대. 대칭이 있으면 Gauss 면을 고르고, 일반 분포에서는 Green 함수 적분으로 전기장을 계산한다.

검산. 정전기, 비상대론적 소스, 시간 변화가 무시되는 영역에서 우선 적용한다.

자가 점검. 구대칭, 원통대칭, 평면대칭에서 어떤 Gauss 면을 쓰는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F095. Poisson/Laplace 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Poisson/Laplace 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$
02. $\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon_0$
03. $\nabla^2 \varphi = 0$ in source-free region
04. $G(r, r_p) = 1/(4\pi|r - r_p|)$

유도 뼈대. $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$ 를 Gauss 법칙에 넣고, 경계에서 Dirichlet 또는 Neumann 조건을 고정한다.

검산. 정전기 퍼텐셜이 잘 정의되고 경계조건이 주어진 영역에서 사용한다.

자가 점검. 경계조건을 바꾸면 해가 어떻게 달라지는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F096. 유일성 정리와 에너지 방법

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 유일성 정리와 에너지 방법을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$\mathbf{01.} \int_V |\text{grad } \psi|^2 dV = \oint \psi d_n \psi da - \int \psi \nabla^2 \psi$$

$$\mathbf{02.} \varphi_1 - \varphi_2 = \psi$$

03. Dirichlet or Neumann boundary

$$\mathbf{04.} U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 dV$$

유도 뼈대. 두 해의 차이를 만들고 Green 항등식으로 내부 에너지 적분이 0임을 보인다.

검산. 선형 Poisson 문제와 적절한 경계조건이 있을 때 해의 중복 가능성을 제거한다.

자가 점검. 왜 Dirichlet 문제에서 경계값이 같으면 내부해가 같은지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F097. 영상법

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 영상법을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\varphi = \sum_i q_i / (4\pi\epsilon_0 |r - r_i|)$
02. $q_{\text{image}} = -q$ for grounded plane
03. $q_{\text{image}} = -q a/d$ for grounded sphere
04. force from image field

유도 뼈대. 경계면의 전위를 만족하도록 영상전하 위치와 크기를 정하고 유일성 정리로 정당화한다.

검산. 도체 경계가 등전위면이 되도록 가상 전하를 배치할 수 있는 대칭 구조에서 유용하다.

자가 점검. 영상전하는 실제 전하가 아니라 경계조건을 구현하는 계산 장치임을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F098. 다중극 전개

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 다중극 전개를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \quad 1/|r-rp| = 1/r + rp \cdot r/r^3 + \dots$$

$$02. \quad p = \int r \rho(r) d^3r$$

$$03. \quad \varphi_{dip} = p \cdot \hat{r} / (4\pi \epsilon_0 r^2)$$

$$04. \quad Q_{ij} = \int \rho(3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) d^3r$$

유도 뼈대. Green 함수 kernel을 작은 rp/r 에 대해 Taylor 전개하고 전하분포의 moment를 정의한다.

검산. 관측점이 소스 영역보다 충분히 멀 때 $r \gg \text{source size}$ 의 점근 전개가 성립한다.

자가 점검. 총전하가 0이면 어떤 항이 처음으로 남는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F099. 정전기 에너지와 정전용량

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 정전기 에너지와 정전용량을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $U = 1/2 \int \rho \phi d^3r$

02. $U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 d^3r$

03. $Q = C V$

04. C_{ij} matrix relation $Q_i = \sum_j C_{ij} V_j$

유도 뼈대. 전하를 무한대에서 천천히 가져오는 일을 적분하거나 장 에너지로 바꾸어 계산한다.

검산. 선형 유전체와 정전기 평형에서 에너지 저장량을 정의한다.

자가 점검. 1/2 계수가 왜 필요한지 전하 조립 과정으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F100. 유전체와 분극

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 유전체와 분극을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$\mathbf{01.} \quad \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{02.} \quad \rho_b = -\text{div } \mathbf{P}$$

$$\mathbf{03.} \quad \sigma_b = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n}$$

$$\mathbf{04.} \quad D_{\text{perp jump}} = \sigma_{\text{free}}$$

유도 뼈대. 전체 전하를 자유전하와 결합전하로 나누어 Maxwell 방정식의 형태를 다시 쓴다.

검산. 매질의 미시 쌍극자를 연속분극 $\mathbf{P}$ 로 평균할 수 있을 때 사용한다.

자가 점검. $\mathbf{E}$ 와 $\mathbf{D}$ 의 경계조건을 구분해서 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F101. 국소장과 Clausius-Mossotti

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 국소장과 Clausius-Mossotti을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. P = N \alpha E_{loc}$$

$$02. (\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2) = N \alpha / (3 \epsilon_0)$$

$$03. E_{loc} = E + P / (3 \epsilon_0)$$

$$04. \chi_e = P / (\epsilon_0 E)$$

유도 뼈대. 분자 분극률과 거시 유전율을 cavity field 보정으로 연결한다.

검산. 희박하거나 등방적인 쌍극자 매질, Lorentz cavity 근사가 가능한 경우에 의미가 크다.

자가 점검. 국소장과 평균장이 왜 다른지 cavity 그림으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F102. Biot-Savart와 Ampere 법칙

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Biot-Savart와 Ampere 법칙을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3 d^3r'$$

$$02. \text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

$$03. \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

$$04. \mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

유도 빼대. 대칭 전류는 Ampere loop, 일반 전류는 Biot-Savart 적분으로 계산한다.

검산. 정자기, 전류가 시간적으로 안정하고 변위전류가 무시될 때 직접 적용한다.

자가 점검. 무한 직선 전류와 솔레노이드의 자기장을 각각 유도해보라.

핵심 수식 아틀라스

F103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$

02. $\text{curl curl } \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}$

03. $\text{div } \mathbf{A} = 0$

04. $\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| d^3r'$

유도 뼈대. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ 에 $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$ 를 넣고 벡터 항등식으로 Poisson형 방정식을 만든다.

검산. $\text{div } \mathbf{B} = 0$ 인 영역에서 정의되며 gauge 조건을 정해야 해가 유일해진다.

자가 점검. $\mathbf{A}$ 가 물리적으로 관측되지 않아도 위상에는 영향을 줄 수 있음을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F104. 자기쌍극자와 자성체

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 자기쌍극자와 자성체를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $m = I a n$

02. $\tau = m \times \mathbf{B}$

03. $U = -m \cdot \mathbf{B}$

04. $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$

유도 빼대. 전류분포의 원거리 벡터퍼텐셜을 확장하여 자기쌍극자 moment를 정의한다.

계산. 작은 전류 루프나 자화된 매질을 쌍극자 근사로 볼 때 적용한다.

자가 점검. H, B, M의 역할을 전기장의 E, D, P와 비교하라.

핵심 수식 아틀라스

F105. Faraday 유도와 준정적 근사

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 Faraday 유도와 준정적 근사를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \text{ emf} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\Phi_{\mathbf{B}}/dt$$

$$02. \text{ curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$$

$$03. \text{ } L I = \Phi_{\mathbf{B}}$$

$$04. \text{ } V_L = L dI/dt$$

유도 빼대. 회로 loop에 Faraday 법칙을 적분하고 flux linkage로 인덕턴스를 정의한다.

계산. 파장이 회로 크기보다 충분히 크지만 시간 변화가 유도전압을 만들 때 사용한다.

자가 점검. 전기준정적과 자기준정적 근사의 차이를 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F106. 피부효과와 전하완화

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 피부효과와 전하완화를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$$

$$02. \tau = \varepsilon/\sigma$$

$$03. \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$04. \nabla^2 \mathbf{H} = i \omega \mu \sigma \mathbf{H}$$

유도 뼈대. phasor Maxwell 식과 Ohm 법칙을 결합해 도체 내부 확산형 파동방정식을 얻는다.

검산. 좋은 도체, 조화 시간의존장, 변위전류보다 도전전류가 큰 영역에서 단순식이 좋다.

자가 점검. 주파수가 올라가면 유효 저항이 왜 증가하는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F107. Poynting 정리와 응력텐서

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Poynting 정리와 응력텐서를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. u = 1/2(\epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2/\mu_0)$$

$$02. \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

$$03. d u/dt + \text{div } \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$$

$$04. T_{ij} = \epsilon_0(\mathbf{E}_i \mathbf{E}_j - 1/2 \mathbf{E}^2 \delta_{ij}) + \dots$$

유도 뼈대. Maxwell curl 식을 E와 H에 내적해 더하고 벡터 항등식으로 divergence form을 만든다.

검산. 고전장 에너지와 운동량이 국소적으로 보존되는 영역에서 해석한다.

자가 점검. $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ 의 부호가 흡수와 발생 중 무엇을 뜻하는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F108. 지연 퍼텐셜

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 지연 퍼텐셜을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{A}(r,t) = \mu_0/(4\pi) \int \mathbf{J}(r_p, t_R)/R \, d^3r_p$
02. $\varphi(r,t) = 1/(4\pi \epsilon_0) \int \rho(r_p, t_R)/R \, d^3r_p$
03. $t_R = t - R/c$
04. Lorenz gauge: $\text{div } \mathbf{A} + c^{-2} d\varphi/dt = 0$

유도 뼈대. Lorenz gauge에서 퍼텐셜이 wave equation을 만족하고 retarded Green 함수로 적분된다.

검산. 전파 지연과 인과성을 포함해야 하는 시간의존 소스에서 사용한다.

자가 점검. Coulomb 순간작용처럼 보이는 항이 실제 장에서는 어떻게 인과성을 지키는지 생각해보라.

핵심 수식 아틀라스

F109. 평면파와 편파

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 평면파와 편파를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{E} = \text{Re}\{\mathbf{E}_0 \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))\}$

02. $\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mathbf{B}$

03. $\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$

04. $\omega = c k$ in vacuum

유도 뼈대. phasor를 Maxwell 방정식에 넣어 횡파성, 임피던스, 분산관계를 얻는다.

검산. 균일 매질, source-free 영역, 선형 파동 근사에서 가장 기본 모드다.

자가 점검. E, B, k가 만드는 오른손 관계를 직접 그려보라.

핵심 수식 아틀라스

F110. Stokes 파라미터와 편광

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Stokes 파라미터와 편광을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $S_0 = I_x + I_y$

02. $S_1 = I_x - I_y$

03. $S_2 = I_{45} - I_{135}$

04. $S_3 = I_R - I_L$

유도 뼈대. Jones vector의 복소 진폭에서 시간평균 세기 조합을 만든다.

검산. 완전 또는 부분 편광된 quasi-monochromatic beam을 통계적으로 표현할 때 쓴다.

자가 점검. 선편광, 원편광, 타원편광의 Stokes vector를 구분하라.

핵심 수식 아틀라스

F111. Fresnel 계수와 경계조건

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Fresnel 계수와 경계조건을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. r_s = (n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t) / (n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)$$

$$02. r_p = (n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t) / (n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t)$$

$$03. n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

$$04. R = |r|^2$$

유도 뼈대. 접선 E,H 연속조건과 Snell 법칙을 함께 풀어 반사·투과 진폭을 얻는다.

검산. 평면 경계, 선형 등방 매질, specular reflection/refraction 조건에서 성립한다.

자가 점검. Brewster 각에서 p 편파 반사가 사라지는 이유를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F112. 다층막 전송행렬

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 다층막 전송행렬을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $[E+;E-]_{j+1}=M_j [E+;E-]_j$
02. $M = \prod_j I_j P_j$
03. $P_j=\text{diag}(\exp(i k_j d_j), \exp(-i k_j d_j))$
04. $T+R+A=1$

유도 뼈대. 각 경계의 Fresnel 행렬과 전파 위상행렬을 곱해 전체 산란을 구한다.

검산. 평면파와 층상 매질, 각 층이 균일하다는 조건에서 유용하다.

자가 점검. 손실이 없을 때 에너지 보존을 행렬 결과로 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F113. Drude-Lorentz 분산

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Drude-Lorentz 분산을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\epsilon(\omega) = \epsilon_{inf} - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\gamma))$

02. $\epsilon(\omega) = 1 + \sum_j f_j / (\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega)$

03. $n(\omega) = \sqrt{\epsilon \mu}$

04. Kramers-Kronig relation

유도 뼈대. 전자 운동방정식을 주파수 공간에서 풀어 분극률과 유전율을 얻는다.

검산. 선형 응답, 조화 구동, 인과적 매질 응답을 가정한다.

자가 점검. 흡수 피크 근처에서 실수부와 허수부가 어떻게 변하는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F114. 비등방·자이로트로픽 매질

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 비등방·자이로트로픽 매질을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{D}_i = \varepsilon_{ij} \mathbf{E}_j$
02. $\det|k^2 \delta_{ij} - k_i k_j - \omega^2 \mu \varepsilon_{ij}| = 0$
03. n_o, n_e
04. Faraday rotation angle = $V \mathbf{B} L$

유도 뼈대. Maxwell 방정식을 고유값 문제로 만들어 정상모드와 굴절률을 구한다.

검산. 결정축, bias magnetic field, tensor constitutive law가 있는 매질에서 사용한다.

자가 점검. ordinary와 extraordinary wave의 차이를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F115. 전송선 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 전송선 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $dV/dz = -(R + i\omega L)I$
02. $dI/dz = -(G + i\omega C)V$
03. $\gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}$
04. $Z_0 = \sqrt{(R + i\omega L)/(G + i\omega C)}$

유도 뼈대. 분포정수 회로의 작은 구간 KVL/KCL에서 telegrapher 방정식을 만든다.

검산. 횡단면이 파장보다 작아 TEM 또는 quasi-TEM 모드가 지배할 때 회로화한다.

자가 점검. lumped 회로와 transmission line의 경계 조건 kL을 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F116. 반사계수와 S-파라미터

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 반사계수와 S-파라미터를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $\Gamma = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0)$
- 02. $VSWR = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|)$
- 03. $S_{ij} = b_i / a_j$
- 04. $P_{delivered} = P_{in}(1 - |\Gamma|^2)$

유도 뼈대. 입사파와 반사파의 전압·전류 표현을 포트 정규화로 바꾼다.

계산. 선형 time-harmonic 포트 네트워크와 기준 임피던스가 정해졌을 때 사용한다.

자가 점검. S11이 작다는 것이 항상 효율이 높다는 뜻인지 검토하라.

핵심 수식 아틀라스

F117. 도파관 모드와 차단

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 도파관 모드와 차단을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $k_z^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - k_c^2$

02. $f_c = c/(2\pi) k_c$

03. TE: $\mathbf{E}_z=0$

04. TM: $\mathbf{H}_z=0$

유도 뼈대. z 방향 phasor를 분리하고 transverse Helmholtz 문제의 고유값을 찾는다.

검산. 금속 또는 유전체 waveguide에서 횡단 경계조건이 모드를 양자화할 때 적용한다.

자가 점검. 차단 이하 주파수에서 왜 evanescent가 되는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F118. 공동공진기와 Q

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 공동공진기와 Q를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. ω_n from boundary eigenproblem

02. $Q = \omega U / P_{\text{loss}}$

03. $\Delta \omega = \omega_0 / Q$

04. Purcell $\sim Q/V_{\text{mode}}$

유도 뼈대. Maxwell 고유값 문제와 표면/매질 손실 적분으로 공진주파수와 Q를 구한다.

검산. 손실이 작고 특정 정상모드가 에너지 저장을 지배할 때 좋다.

자가 점검. 높은 Q가 항상 좋은지 bandwidth 관점으로 답하라.

핵심 수식 아틀라스

F119. Hertzian dipole와 안테나

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Hertzian dipole와 안테나을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $E_{\theta} \sim \eta k^2 p \sin \theta \exp(ikr)/(4\pi r)$

02. $P_{rad} = \eta k^4 |p|^2/(12\pi)$

03. $R_{rad} \sim 80 \pi^2 (l/\lambda)^2$

04. $G=4\pi U/P_{rad}$

유도 뼈대. 지연 벡터퍼텐셜의 원거리 항만 남기고 Poynting flux를 적분한다.

검산. 안테나 길이가 파장보다 충분히 짧은 전기쌍극자 근사에서 시작한다.

자가 점검. 근거리장과 원거리장의 거리 의존성을 구분하라.

핵심 수식 아틀라스

F120. 개구 안테나와 Fourier optics

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 개구 안테나와 Fourier optics을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $E_{far}(kx, ky) \sim \text{Fourier}\{E_{ap}(x, y)\}$

02. $D \sim 4\pi A_{eff}/\lambda^2$

03. $\theta \sim \lambda/D_{ap}$

04. Friis: $Pr/Pt = Gt Gr (\lambda/(4\pi R))^2$

유도 뼈대. Huygens 원리 또는 Kirchhoff 적분을 Fraunhofer 극한에서 Fourier 변환으로 바꾼다.

검산. 개구가 충분히 크고 far-field 조건 $R \gg 2D^2/\lambda$ 가 성립할 때 쓴다.

자가 점검. 개구가 커질수록 빔폭이 왜 줄어드는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F121. Lienard-Wiechert 장

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 Lienard-Wiechert 장을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\varphi = q / (4\pi \epsilon_0 (R - R \cdot \beta))_{ret}$

02. $A = \beta \varphi / c$

03. $E = \text{velocity field} + \text{acceleration field}$

04. $P_{\text{Lienard}} = q^2 \gamma^6 (a^2 - (\beta \times a)^2) / (6\pi \epsilon_0 c^3)$

유도 뼈대. retarded time 조건을 가진 점전하 4-current를 Green 함수에 넣는다.

계산. 상대론적으로 움직이는 점전하의 retarded solution에 적용한다.

자가 점검. 가속도장이 왜 $1/R$ 로 감쇠하며 복사를 만드는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F122. 복사 반작용

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 복사 반작용을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F_{AL} = q^2/(6\pi \epsilon_0 c^3) d a/dt$

02. $\tau_0 = q^2/(6\pi \epsilon_0 m c^3)$

03. Landau-Lifshitz reduction

04. runaway/preacceleration issues

유도 뼈대. 방사 전력과 입자 에너지 손실을 맞추면 가속도의 시간미분 항이 생긴다.

계산. 고전 점전하 모델의 자기복사 에너지 보존을 다룰 때 나타난다.

자가 점검. 왜 점전하 고전모형에 문제가 생기는지 에너지 관점으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F123. 산란과 optical theorem

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 산란과 optical theorem을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $f(\theta)$ scattering amplitude

02. $d\sigma/d\Omega = |f(\theta)|^2$

03. $\sigma_{tot} = (4\pi/k) \text{Im } f(0)$

04. $S = 1 + iT$

유도 뼈대. 입사파와 산란파의 원거리 asymptotic을 비교하고 flux 보존으로 optical theorem을 얻는다.

계산. 선형파 산란, 원거리 spherical wave 전개가 가능할 때 쓴다.

자가 점검. 전방 산란 진폭이 총 단면적과 연결되는 이유를 보존법칙으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F124. Rayleigh와 Mie 산란

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Rayleigh와 Mie 산란을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\sigma_R \sim (8\pi/3) k^4 |\alpha|^2$

02. $x = k a$

03. *Mie* coefficients a_l, b_l

04. $Q_{sca} = \sigma_{sca}/(\pi a^2)$

유도 뼈대. 작은 입자는 유도쌍극자로, 임의의 구는 vector spherical harmonics로 전개한다.

검산. 입자 크기와 파장의 비 $x=ka$ 가 산란 regime을 정한다.

자가 점검. Rayleigh 산란이 왜 λ^{-4} 에 비례하는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F125. 공변 전자기학

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 공변 전자기학을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F_{mn} = d_m A_n - d_n A_m$
02. $d_m F^{mn} = \mu_0 J^n$
03. $d_a F_{bc} = 0$
04. $F_{mn} F^{mn} = 2(B^2 - c^{-2}E^2)$

유도 뼈대. 전기장과 자기장을 반대칭 tensor의 성분으로 묶고 4-current와 결합한다.

검산. 특수상대론 좌표계에서 전자기 법칙을 텐서식으로 쓰는 표현이다.

자가 점검. 전기장과 자기장이 관성계에 따라 섞이는 이유를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F126. 전자기 작용과 Noether 구조

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 전자기 작용과 Noether 구조를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \mathbf{S} = \int d^4x \left(-1/(4\mu_0) \mathbf{F}_{mn} \mathbf{F}^{mn} - \mathbf{J}_m \mathbf{A}^m \right)$$

$$02. \delta \mathbf{S}/d\mathbf{A} = 0$$

$$03. \text{gauge } \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + d\chi$$

$$04. d_m \mathbf{J}^m = 0$$

유도 뼈대. 작용을 A에 대해 변분하여 Maxwell 방정식을 얻고, gauge symmetry에서 전하보존을 읽는다.

계산. 고전장론의 작용원리와 gauge invariance를 전자기학에 적용한다.

자가 점검. 게이지 대칭이 물리 자유도가 아니라 중복표현임을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F127. 미분형식 표기

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 미분형식 표기를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F = dA$

02. $dF=0$

03. $d \cdot F = J$

04. $S = -1/(2\mu_0) \int F \wedge \star F$

유도 뼈대. 외미분 d 와 Hodge star를 사용해 동차/비동차 Maxwell 방정식을 분리한다.

검산. 다양체와 좌표 독립 표기에서 Maxwell 방정식을 압축한다.

자가 점검. $dF=0$ 이 Faraday 법칙과 $\text{div } B=0$ 을 동시에 담는 이유를 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F128. Dyadic Green 함수

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Dyadic Green 함수를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$\mathbf{01.} \quad \text{curl curl } \mathbf{G} - k_0^2 \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{G} = \mathbf{I} \delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_p)$$

$$\mathbf{02.} \quad \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i \omega \mu \int \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_p) \mathbf{J}(\mathbf{r}_p) d^3r_p$$

$$\mathbf{03.} \quad \text{LDOS} \sim \text{Im Tr } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r})$$

$$\mathbf{04.} \quad \text{reciprocity: } \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_p) = \mathbf{G}^T(\mathbf{r}_p, \mathbf{r})$$

유도 뼈대. 단위 점쌍극자 소스에 대한 Maxwell 방정식을 풀어 dyadic response를 정의한다.

검산. 벡터파, 경계, 산란체가 있는 선형 매질에서 소스-장 관계를 kernel로 쓴다.

자가 점검. scalar Green 함수와 dyadic Green 함수의 차이를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F129. Lorentz reciprocity

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Lorentz reciprocity을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\text{div}(\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2$

02. $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{S}_{ji}$ for reciprocal network

03. $\epsilon^T = \epsilon, \mu^T = \mu$

04. $\xi^T = -\zeta$

유도 뼈대. 두 Maxwell 해의 curl 방정식을 교차 내적하고 빼서 divergence identity를 만든다.

검산. 선형, 시간불변, reciprocal constitutive relation이 있는 매질에서 성립한다.

자가 점검. 자기 bias가 reciprocity를 어떻게 깰 수 있는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F130. FDTD와 Yee 격자

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 FDTD와 Yee 격자를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + dt/\epsilon \operatorname{curl} \mathbf{H}^{n+1/2}$
02. $\mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - dt/\mu \operatorname{curl} \mathbf{E}^n$
03. $c \, dt \, \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2} \leq 1$
04. numerical dispersion relation

유도 뼈대. E와 H를 시간·공간 반스텝 엇갈리게 배치하여 curl 업데이트를 만든다.

검산. 시간영역 Maxwell 방정식을 staggered grid로 이산화하는 명시적 방법이다.

자가 점검. Courant 조건을 위반하면 왜 불안정해지는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F131. FEM weak form

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 FEM weak form을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \int_{\text{dV}} (\text{curl } \mathbf{v}) \cdot \mu^{-1} (\text{curl } \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int \mathbf{v} \cdot \epsilon \mathbf{E} dV = \int \mathbf{v} \cdot \mathbf{J}$$

02. edge elements

03. boundary terms

04. eigenfrequency problem

유도 뼈대. PDE에 test function을 곱하고 부분적분하여 edge basis 공간에서 행렬식을 만든다.

검산. 복잡한 형상과 불균일 매질에서 주파수영역 Maxwell 문제를 weak form으로 푼다.

자가 점검. nodal element 대신 edge element가 필요한 이유를 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F132. MoM과 적분방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 MoM과 적분방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $E_{\text{scat}} = i \omega \mu \int G \mathbf{J}_s dS$

02. $Z I = V$

03. EFIE/MFIE/CFIE

04. radiation condition built in

유도 뼈대. 경계면 미지 전류를 basis function으로 전개하고 testing하여 impedance matrix를 만든다.

검산. 도체 또는 표면전류 문제에서 Green 함수 적분식을 이산화한다.

자가 점검. dense matrix가 생기는 이유와 fast method가 필요한 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F133. PML과 흡수경계

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 PML과 흡수경계를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. coordinate stretch $x \rightarrow \int s_x dx$
- 02. $s_x = 1 + \sigma_x / (i \omega \epsilon_0)$
- 03. reflection $\rightarrow 0$ ideally
- 04. anisotropic effective medium

유도 뼈대. 복소 좌표 stretching을 Maxwell 방정식에 넣어 매질 텐서로 해석한다.

검산. open domain을 유한 계산영역으로 자를 때 인공반사를 줄이는 경계층이다.

자가 점검. PML 두께와 흡수 프로파일을 바꾸면 어떤 수치오류가 생기는지 생각하라.

핵심 수식 아틀라스

F134. 역설계와 adjoint 방법

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 역설계와 adjoint 방법을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F = \text{objective}(\mathbf{E}, p)$
02. $dF/dp = \partial_p F - \lambda^T \partial_p \mathbf{A} \mathbf{E}$
03. $\mathbf{A}(p)\mathbf{E} = \mathbf{b}$
04. $\mathbf{A}^T \lambda = \partial_E F$

유도 뼈대. 전방 문제와 adjoint 문제 두 번으로 많은 설계변수의 gradient를 얻는다.

검산. 선형 PDE 제약 최적화에서 설계변수가 많을 때 adjoint gradient를 사용한다.

자가 점검. finite difference gradient와 adjoint gradient의 계산량 차이를 비교하라.

핵심 수식 아틀라스

F135. Vlasov-Maxwell 플라즈마

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Vlasov-Maxwell 플라즈마를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \frac{df_s}{dt} + \mathbf{v} \cdot \text{grad}_s f_s + (q_s/m_s)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \text{grad}_v f_s = 0$$

$$02. \rho = \sum q_s \int f_s d^3v$$

$$03. \mathbf{J} = \sum q_s \int \mathbf{v} f_s d^3v$$

$$04. \text{Maxwell coupled}$$

유도 뼈대. 입자 Liouville 방정식과 Maxwell 방정식을 self-consistent하게 결합한다.

검산. 충돌이 약하고 분포함수의 위상공간 동역학이 중요한 플라즈마에서 쓴다.

자가 점검. fluid model로 달을 수 없는 정보를 분포함수가 어떻게 담는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F136. Cold plasma waves

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Cold plasma waves을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\omega_p^2 = n e^2 / (\epsilon_0 m)$

02. $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$

03. $n^2 = \epsilon$

04. Appleton-Hartree form

유도 뼈대. 전자 운동방정식과 Maxwell 파동방정식을 결합해 dielectric tensor를 얻는다.

검산. 열운동과 충돌을 무시하고 선형화한 전자 유체 플라즈마에서 시작한다.

자가 점검. $\omega < \omega_p$ 에서 전파가 왜 차단되는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F137. MHD와 Alfven 파

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 MHD와 Alfven 파를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$

02. $d\mathbf{B}/dt = \text{curl}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}$

03. $\rho d\mathbf{v}/dt = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \text{grad } p$

04. $\omega = k_{\text{parallel}} v_A$

유도 뼈대. Maxwell 방정식, Ohm 법칙, 유체 운동량 방정식을 결합한다.

검산. 강한 충돌 또는 큰 스케일에서 플라즈마를 전도성 유체로 볼 때 사용한다.

자가 점검. frozen-in condition이 성립하는 극한을 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F138. Metamaterial effective medium

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Metamaterial effective medium을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01.** $\mathbf{D} = \epsilon_{eff} \mathbf{E} + \boldsymbol{\xi} \mathbf{H}$
- 02.** $\mathbf{B} = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{E} + \mu_{eff} \mathbf{H}$
- 03.** n_{eff} may be negative
- 04.** unit cell $\ll \lambda$

유도 뼈대. 산란 또는 Bloch response에서 effective parameter를 추출한다.

검산. 구조 주기가 파장보다 충분히 작아 유효매질로 평균할 수 있을 때 의미가 있다.

자가 점검. retrieved parameter가 물리적인지 passivity/causality로 점검하라.

핵심 수식 아틀라스

F139. Photonic crystal band theory

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 Photonic crystal band theory을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $E_k(r) = u_k(r) \exp(i k \cdot r)$
- 02. $\omega_n(k)$ eigenvalue
- 03. band gap $\Delta \omega$
- 04. group velocity = $\text{grad}_k \omega$

유도 뼈대. Maxwell eigenproblem을 unit cell과 Bloch boundary condition으로 푼다.

계산. 유전율이 주기적으로 변하고 손실이 작을 때 Bloch 정리를 적용한다.

자가 점검. 전자 밴드구조와 광자 밴드구조의 차이를 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F140. Topological photonics

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학의 Topological photonics을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. Berry curvature $\Omega_n(k)$
- 02. $C_n = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega_n d^2k$
- 03. edge modes from bulk invariant
- 04. nonreciprocal or synthetic gauge

유도 뼈대. Bloch eigenmode의 Berry connection을 계산하고 gap Chern number를 구한다.

검산. band gap과 모드 연속성이 유지되는 파동계에서 위상 불변량을 정의한다.

자가 점검. edge mode가 국소 결함에 강한 이유를 bulk-boundary 대응으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F141. 열복사와 LDOS

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 열복사와 LDOS을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $\Theta(\omega, T) = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)$
- 02. $\rho(r, \omega) \sim \text{Im Tr } G(r, r)$
- 03. $P = \int d\omega [\Theta_1 - \Theta_2] T(\omega)$
- 04. fluctuation-dissipation source

유도 뼈대. 열적 전류 fluctuation을 Maxwell Green 함수로 전파시켜 스펙트럼 에너지 흐름을 구한다.

계산. 평형 또는 근평형 열잡음과 전자기 Green 함수가 연결될 때 사용한다.

자가 점검. 흑체복사와 근접장 열복사의 차이를 LDOS 관점에서 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F142. Casimir 효과와 진공 fluctuation

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학의 Casimir 효과와 진공 fluctuation을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F/A = -\pi^2 \hbar c / (240 a^4)$

02. $\omega \rightarrow i \xi$

03. Lifshitz formula

04. stress tensor expectation

유도 뼈대. 모드 합 또는 Green 함수의 imaginary frequency 적분으로 에너지/힘을 계산한다.

계산. 양자 전자기 진공 모드가 경계조건에 의해 바뀌는 경우 나타난다.

자가 점검. 왜 imaginary frequency 축에서 수치적분이 안정해지는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F143. Lorentz 변환과 시공간 간격

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 Lorentz 변환과 시공간 간격을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $ct' = \gamma(ct - \beta x)$

02. $x' = \gamma(x - \beta ct)$

03. $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$

04. $s^2 = -c^2 t^2 + x^2 + y^2 + z^2$

유도 뼈대. 두 inertial frame 사이 선형변환이 interval을 보존하게 둔다.

검산. 모든 관성계에서 빛의 속도와 시공간 간격이 불변이다.

자가 점검. 동시였던 두 사건이 다른 계에서 동시가 아닌 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F144. 4-벡터와 에너지-운동량

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 4-벡터와 에너지-운동량을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $x^\mu = (ct, x, y, z)$

02. $p^\mu = (E/c, p)$

03. $p_\mu p^\mu = -m^2 c^2$

04. $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

유도 뼈대. 불변량을 만들려면 Minkowski metric으로 contraction한다.

검산. Lorentz 변환에서 4-벡터는 같은 규칙으로 변환다.

자가 점검. 질량이 0이면 $E=pc$ 가 되는 것을 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F145. 상대론적 action과 고유시간

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 상대론적 action과 고유시간을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$

02. $S = -mc^2 \int d\tau$

03. $p = \gamma m v$

04. $L = -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - q\phi + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$

유도 뼈대. 고유시간을 최대/정지화하는 worldline을 변분한다.

검산. 자유입자의 action은 worldline 길이에 비례한다.

자가 점검. 저속 극한에서 $L \sim 1/2mv^2 - mc^2$ 가 되는지 전개하라.

핵심 수식 아틀라스

F146. 전자기장 텐서와 불변량

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 상대성이론의 전자기장 텐서와 불변량을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \mathbf{F}^{0i} = -\mathbf{E}_i/c$$

$$02. \mathbf{F}^{ij} = -\varepsilon_{ijk} \mathbf{B}_k$$

$$03. \partial_\mu \mathbf{F}^{\mu\nu} = \mu_0 \mathbf{J}^\nu$$

$$04. I1 = \mathbf{E}^2 - c^2 \mathbf{B}^2, I2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$$

유도 뼈대. Maxwell 방정식을 4차원 tensor 식으로 묶는다.

계산. E와 B는 서로 다른 물체가 아니라 하나의 2-form 성분이다.

자가 점검. 어떤 계에서 B=0으로 만들 수 있는 조건을 불변량으로 생각하라.

핵심 수식 아틀라스

F147. 상대론적 Doppler와 aberration

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 상대론적 Doppler와 aberration을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\nu' = \gamma \nu (1 - \beta \cos \theta)$

02. $\cos \theta' = (\cos \theta - \beta) / (1 - \beta \cos \theta)$

03. headlight effect

04. I_ν / ν^3 invariant

유도 뼈대. 광자의 4-운동량을 Lorentz 변환한다.

검산. 관측자의 상대속도는 주파수와 방향을 모두 바꾼다.

자가 점검. 접근하는 광원은 왜 blue shift되는지 4-운동량으로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F148. 등가원리와 계량

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 등가원리와 계량을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. local free fall → special relativity

02. $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

03. proper time $d\tau^2 = -ds^2/c^2$

04. gravity as geometry

유도 뼈대. 작은 freely falling frame에서 물리법칙을 특수상대론 형태로 둔다.

검산. 중력은 국소적으로 관성계 선택으로 지울 수 있지만 곡률은 지울 수 없다.

자가 점검. 균일중력장과 가속계의 관계를 예로 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F149. 공변미분과 Christoffel 기호

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 공변미분과 Christoffel 기호를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\nabla_{\mu} V^{\nu} = \partial_{\mu} V^{\nu} + \Gamma^{\nu}_{\mu\lambda} V^{\lambda}$
02. $\Gamma^{\rho}_{\mu\nu} = 1/2 g^{\rho\sigma} (\partial_{\mu} g_{\nu\sigma} + \partial_{\nu} g_{\mu\sigma} - \partial_{\sigma} g_{\mu\nu})$
03. $\nabla_{\lambda} g_{\mu\nu} = 0$
04. torsion-free $\Gamma^{\rho}_{\mu\nu} = \Gamma^{\rho}_{\nu\mu}$

유도 뼈대. metric compatibility와 torsion-free 조건으로 Levi-Civita connection을 구한다.

검산. 곡선좌표/곡률공간에서는 단순 편미분이 tensor로 변하지 않는다.

자가 점검. polar coordinate에서도 Christoffel이 0이 아닌 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F150. Geodesic 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 Geodesic 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $d^2x^\mu/d\lambda^2 + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} dx^\alpha/d\lambda dx^\beta/d\lambda = 0$

02. $\delta \int ds = 0$

03. $u^\nu \nabla_\nu u^\mu = 0$

04. null geodesic $ds^2 = 0$

유도 뼈대. proper time 또는 affine parameter로 worldline action을 변분한다.

검산. 자유낙하 입자와 빛은 metric이 정하는 geodesic을 따른다.

자가 점검. geodesic이 “힘이 0”인 운동이라는 말을 조심해서 해석하라.

핵심 수식 아틀라스

F151. 곡률 텐서

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 곡률 텐서를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. [\nabla_\mu, \nabla_\nu]V^\rho = R^\rho_{\sigma\mu\nu}V^\sigma$$

$$02. R_{\mu\nu} = R^\rho_{\mu\rho\nu}$$

$$03. R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$$

$$04. G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - 1/2 R g_{\mu\nu}$$

유도 뼈대. connection에서 Riemann tensor를 만들고 contraction한다.

검산. 곡률은 vector를 평행이동해 돌아왔을 때의 불일치다.

자가 점검. 평평한 공간의 곡선좌표와 진짜 곡률을 어떻게 구분하는가?

핵심 수식 아틀라스

F152. Einstein 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 Einstein 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$

02. $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$

03. Newtonian limit $\rightarrow \nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$

04. Λ as vacuum energy

유도 뼈대. 일반공변성, Bianchi identity, Newtonian limit을 만족하는 2계 방정식을 고른다.

검산. 물질 에너지-운동량이 시공간 곡률을 정한다.

자가 점검. 좌변과 우변의 차원이 어떻게 맞는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F153. Stress-energy tensor

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 상대성이론의 Stress-energy tensor을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. T^{00} =energy density
02. T^{0i} =energy flux/c
03. T^{ij} =stress
04. perfect fluid: $T^{\mu\nu}=(\rho+p/c^2)u^{\mu}u^{\nu}+p g^{\mu\nu}$

유도 뼈대. action을 metric으로 변분하거나 유체 rest frame에서 boost한다.

계산. 에너지 밀도, 운동량 밀도, 압력을 하나의 tensor로 묶는다.

자가 점검. 압력도 중력의 source가 되는 이유를 tensor 성분으로 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F154. Schwarzschild 해

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 Schwarzschild 해를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $ds^2 = -(1-r_s/r)c^2 dt^2 + (1-r_s/r)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$

02. $r_s = 2GM/c^2$

03. horizon at $r=r_s$

04. effective potential for orbits

유도 뼈대. 대칭 ansatz를 Einstein 방정식에 넣어 metric 함수를 구한다.

검산. 정적 구대칭 진공 중력장의 외부해다.

자가 점검. $r=r_s$ 가 진짜 특이점인지 좌표 특이점인지 구분하라.

핵심 수식 아틀라스

F155. 약장 근사와 중력파

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 약장 근사와 중력파를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, |h| \ll 1$
- 02. $\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}/c^4$
- 03. TT gauge: $h_+, h_\times$
- 04. quadrupole radiation

유도 뼈대. trace-reversed perturbation과 gauge condition을 선택한다.

검산. metric perturbation이 작은 영역에서는 파동방정식이 된다.

자가 점검. 중력파가 왜 monopole/dipole이 아니라 quadrupole에서 시작하는지 생각하라.

핵심 수식 아틀라스

F156. Kerr와 회전 블랙홀

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 상대성이론의 Kerr와 회전 블랙홀을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. parameters $M, a=J/(Mc)$
02. ergosphere where $g_{tt}=0$
03. horizon $r_+=GM/c^2 + \sqrt{((GM/c^2)^2 - a^2)}$
04. frame dragging

유도 뼈대. 축대칭 stationary metric에서 Killing vector를 사용한다.

계산. 회전 질량은 주변 inertial frame을 끌고 간다.

자가 점검. ergosphere와 event horizon의 차이를 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F157. FLRW 우주론

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 FLRW 우주론을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 [d\chi^2 / (1 - k\chi^2) + \chi^2 d\Omega^2]$$

$$02. H = \dot{a}/a$$

$$03. H^2 = (8\pi G/3)\rho - kc^2/a^2 + \Lambda c^2/3$$

$$04. \dot{\rho} + 3H(\rho + p/c^2) = 0$$

유도 뼈대. FLRW metric을 Einstein 방정식에 넣어 Friedmann 방정식을 얻는다.

검산. 균일·등방 우주는 scale factor 하나로 동역학을 기술한다.

자가 점검. 복사, 물질, Λ 가 $a(t)$ 에 따라 어떻게 희석되는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F158. 블랙홀 열역학

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 블랙홀 열역학을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$

02. $S_{BH} = k_B A / (4l_P^2)$

03. $dM = T dS + \Omega dJ + \Phi dQ$

04. area theorem

유도 뼈대. horizon surface gravity와 Euclidean time periodicity로 온도를 얻는다.

검산. 중력, 양자, 열역학이 만나는 접점이다.

자가 점검. 엔트로피가 부피가 아니라 면적에 비례한다는 의미를 생각해보라.

핵심 수식 아틀라스

F159. 상대론적 유체와 보존법칙

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 상대성이론의 상대론적 유체와 보존법칙을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\nabla_{\mu} T^{\mu\nu}=0$

02. $\nabla_{\mu}(\nu^{\mu})=0$

03. $T^{\mu\nu}=(e+p)u^{\mu}u^{\nu}+p g^{\mu\nu}$

04. sound speed $c_s^2=\partial p/\partial e$

유도 뼈대. 보존법칙을 3+1 형태로 분해해 수치해석한다.

검산. 고온 플라즈마, 중성자별, 우주론에서는 상대론적 유체가 필요하다.

자가 점검. 비상대론 극한에서 Euler 방정식이 어떻게 나오는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F160. 상태와 Born 규칙

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 상태와 Born 규칙을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $|\psi\rangle$ in Hilbert space, $|\psi\rangle \sim \exp(i\alpha)|\psi\rangle$
02. $P(a) = \langle \psi | P_a | \psi \rangle$
03. $\langle A \rangle = \langle \psi | A | \psi \rangle$
04. $\rho \geq 0, \text{Tr } \rho = 1$

유도 뼈대. 관측량을 spectral projector로 분해하고 probability measure를 정의한다.

검산. 고립계의 순수상태와 일반 혼합상태를 확률적으로 해석한다.

자가 점검. global phase가 확률에 영향을 주지 않음을 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F161. 힐베르트 공간과 자기수반성

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 힐베르트 공간과 자기수반성을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $A=A^{\text{dagger}}$

02. $D(A)=D(A^{\text{dagger}})$

03. $A=\sum a P_a$

04. $U(t)=\exp(-iHt/\hbar)$

유도 뼈대. 스펙트럼 정리로 관측량과 시간발전을 정의한다.

검산. 무한차원에서는 연산자 영역(domain)까지 포함해야 물리적으로 안전하다.

자가 점검. Hermitian matrix와 unbounded self-adjoint operator의 차이를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F162. 브라켓과 완비성

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 브라켓과 완비성을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\langle x | xp \rangle = \delta(x - xp)$

02. $\int dx |x\rangle \langle x| = 1$

03. $\langle x | p \rangle = \exp(i p x / \hbar) / \sqrt{2\pi i \hbar}$

04. $\psi(x) = \langle x | \psi \rangle$

유도 뼈대. 항등연산자를 위치 또는 운동량 기저로 삽입해 표현을 바꾼다.

검산. 연속기저는 정규화 가능한 벡터가 아니라 분포적 기저로 해석한다.

자가 점검. delta normalization과 box normalization을 비교하라.

핵심 수식 아틀라스

F163. Schroedinger 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Schroedinger 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $i \hbar d|\psi\rangle/dt = \mathbf{H}|\psi\rangle$
02. $i \hbar d\psi/dt = [-\hbar^2/(2m)\nabla^2 + V]\psi$
03. $U(t,t_0) = T \exp[-i/\hbar \int_{t_0}^t \mathbf{H} dt]$
04. probability conserved

유도 뼈대. 에너지 연산자를 시간발전 generator로 두고 위치표현으로 미분방정식을 얻는다.

검산. 폐쇄계의 unitary 시간발전과 주어진 Hamiltonian에서 적용된다.

자가 점검. Hamiltonian이 self-adjoint이면 norm이 보존됨을 보이라.

핵심 수식 아틀라스

F164. 운동량 표현과 Fourier 변환

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 운동량 표현과 Fourier 변환을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\varphi(p) = 1/\sqrt{2\pi\hbar} \int e^{-ipx/\hbar} \psi(x) dx$

02. $x \rightarrow i\hbar d/dp$

03. $p \rightarrow -i\hbar d/dx$

04. $[x, p] = i\hbar$

유도 뼈대. 위치와 운동량 표현 사이의 unitary Fourier transform을 쓴다.

검산. 무한공간 또는 주기경계 조건에서 Fourier 기저가 운동량 고유상태가 된다.

자가 점검. Gaussian wave packet이 Fourier 변환 뒤에도 Gaussian임을 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F165. 불확정성 관계

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 불확정성 관계를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\Delta A^2 \Delta B^2 \geq |\langle [A, B] \rangle|^2 / 4$

02. $\Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$

03. Robertson-Schrodinger inequality

04. minimum uncertainty Gaussian

유도 뼈대. Cauchy-Schwarz 부등식을 $(A - \langle A \rangle)|\psi\rangle$ 와 $(B - \langle B \rangle)|\psi\rangle$ 에 적용한다.

검산. 관측량의 비가환성과 상태의 분산을 연결한다.

자가 점검. 불확정성과 측정장비의 교란을 구분해 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F166. 동역학 그림

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 동역학 그림을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \mathbf{A}_H(t) = U^{\dagger} \mathbf{A}_S U$$

$$02. d\mathbf{A}_H/dt = (i/\hbar)[\mathbf{H}, \mathbf{A}_H] + \partial_t \mathbf{A}_H$$

$$03. |\psi_I\rangle = \exp(iH_0 t/\hbar) |\psi_S\rangle$$

$$04. V_I(t) = \exp(iH_0 t/\hbar) V \exp(-iH_0 t/\hbar)$$

유도 뼈대. 시간발전자를 상태 또는 연산자에 옮겨 같은 물리를 다른 표현으로 쓴다.

검산. Hamiltonian을 어떻게 나눌지에 따라 계산이 쉬운 그림을 선택한다.

자가 점검. Schroedinger와 Heisenberg 그림에서 관측값이 같음을 보이라.

핵심 수식 아틀라스

F167. 전파자와 Green 함수

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 전파자와 Green 함수를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. K(x,t;xp,tp) = \langle x | U(t,tp) | xp \rangle$$

$$02. \psi(x,t) = \int K(x,t;xp,tp) \psi(xp,tp) dxp$$

$$03. (i\hbar \partial_t - \mathbf{H})K = i\hbar \delta(t - tp) \delta(x - xp)$$

$$04. G(\mathbf{E}) = (\mathbf{E} - \mathbf{H} + i0)^{-1}$$

유도 뼈대. 시간발전 연산자를 위치기저에 끼워 넣고 Green 함수와 Fourier 변환으로 연결한다.

검산. 초기상태에서 최종상태로 가는 선형 kernel이 존재할 때 사용한다.

자가 점검. retarded boundary condition의 +i0 처방을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F168. 경로적분

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 경로적분을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $K = \int \mathcal{D}[x] \exp(i S[x]/\hbar)$
02. $S = \int L dt$
03. stationary phase $\rightarrow$ classical path
04. Euclidean: $\exp(-S_E/\hbar)$

유도 뼈대. 시간을 작은 조각으로 나누고 완비성을 반복 삽입하여 continuum limit를 취한다.

검산. 작용이 주어진 계에서 모든 경로의 위상합으로 전파자를 표현한다.

자가 점검. $\hbar \rightarrow 0$ 에서 고전경로가 지배하는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F169. 밀도행렬

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 양자역학의 밀도행렬을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \rho = \sum p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|$$

$$02. \langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$$

$$03. \rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$$

$$04. S = -\text{Tr} \rho \log \rho$$

유도 뼈대. ensemble 평균을 trace 표현으로 바꾸고 부분추적으로 subsystem state를 정의한다.

계산. 불완전한 정보, 혼합상태, 부분계 기술에서 필요하다.

자가 점검. 순수상태와 혼합상태를 $\text{Tr} \rho^2$ 로 구분하라.

핵심 수식 아틀라스

F170. POVM과 Kraus 연산자

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 POVM과 Kraus 연산자를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \mathbf{E}_m = M_m^{\text{dagger}} M_m$$

$$02. \sum_m \mathbf{E}_m = 1$$

$$03. p_m = \text{Tr}(\mathbf{E}_m \rho)$$

$$04. \rho_m = M_m \rho M_m^{\text{dagger}} / p_m$$

유도 뼈대. system-detector unitary와 ancilla projection을 부분추적으로 줄이면 Kraus 표현이 나온다.

검산. 일반 측정과 noise가 있는 detector를 투영측정보다 넓게 표현한다.

자가 점검. projective measurement가 POVM의 특수한 경우임을 보이라.

핵심 수식 아틀라스

F171. 얽힘과 엔트로피

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 얽힘과 엔트로피를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $|\psi_{AB}\rangle \text{ not equal } |\psi_A\rangle|\psi_B\rangle$

02. $\rho_A = \text{Tr}_B |\psi\rangle\langle\psi|$

03. $S_A = -\text{Tr} \rho_A \log \rho_A$

04. $I(A:B) = S_A + S_B - S_{AB}$

유도 뼈대. Schmidt 분해로 순수 bipartite entanglement를 고유값 문제로 바꾼다.

검산. 복합계의 상태가 부분계 상태들의 곱으로 분리되지 않을 때 얽힘이 있다.

자가 점검. Bell state의 reduced density matrix를 직접 계산하라.

핵심 수식 아틀라스

F172. 무한·유한 우물

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 무한·유한 우물을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\psi_n = \sqrt{2/L} \sin(n \pi x/L)$

02. $E_n = n^2 \pi^2 \hbar^2 / (2mL^2)$

03. finite well matching

04. bound states from transcendental equation

유도 뼈대. 경계조건을 만족하는 Helmholtz형 방정식의 고유값을 찾는다.

검산. 1차원 경계조건과 정상상태 양자화의 기본 예제다.

자가 점검. 에너지 준위가 L^{-2} 로 스케일하는 이유를 차원분석하라.

핵심 수식 아틀라스

F173. 델타 퍼텐셜과 장벽

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 델타 퍼텐셜과 장벽을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $V(x) = g \delta(x)$

02. ψ continuous

03. $\psi(+0) - \psi(-0)$ derivative jump $= 2mg \psi(0)/\hbar^2$

04. $T = 1/(1 + \dots)$

유도 뼈대. Schrodinger 방정식을 특이점 주변에서 적분하여 접합조건을 얻는다.

검산. 특이 퍼텐셜을 경계조건으로 바꿔 해석할 수 있을 때 유용하다.

자가 점검. 파동함수는 연속인데 도함수는 왜 불연속인지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F174. 조화진동자

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 조화진동자를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H = \hbar \omega (a^{\dagger} a + 1/2)$

02. $[a, a^{\dagger}] = 1$

03. $E_n = \hbar \omega (n + 1/2)$

04. $x = \sqrt{\hbar / (2m\omega)} (a + a^{\dagger})$

유도 뼈대. 무차원 변수로 Hamiltonian을 완전제곱 형태의 ladder operator로 쓴다.

검산. 2차 근사 퍼텐셜과 정규모드 양자화에서 보편적으로 등장한다.

자가 점검. zero-point energy가 사라지지 않는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F175. Coherent와 squeezed state

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Coherent와 squeezed state을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$
- 02. $\Delta x \Delta p = \hbar/2$
- 03. $S(z) = \exp(1/2(z \cdot a^2 - z^\dagger a^2))$
- 04. quadrature variance squeezed

유도 뼈대. displacement와 squeeze operator를 vacuum에 작용시켜 Gaussian state를 만든다.

검산. 조화진동자의 quasi-classical state와 양자잡음 제어 상태를 다룬다.

자가 점검. coherent state가 시간발전하면서 고전 진동과 닮는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F176. 각운동량 대수

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 각운동량 대수를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $[J_i, J_j] = i \hbar \varepsilon_{ijk} J_k$
02. $J^2 |jm\rangle = \hbar^2 j(j+1) |jm\rangle$
03. $J_z |jm\rangle = \hbar m |jm\rangle$
04. $J_{\pm} |jm\rangle = \hbar \sqrt{j(j+1) - m(m\pm 1)} |j, m\pm 1\rangle$

유도 뼈대. Lie algebra와 ladder operator로 spectrum을 구한다.

검산. 회전대칭이 있는 계에서 상태를 irreducible representation으로 분류한다.

자가 점검. m의 가능한 값이 -j에서 j까지인 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F177. Spin 1/2와 Pauli 행렬

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Spin 1/2와 Pauli 행렬을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{S} = \hbar/2 \boldsymbol{\sigma}$

02. $\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} + i \varepsilon_{ijk} \sigma_k$

03. $U(n, \theta) = \exp(-i \theta \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} / 2)$

04. $|n+\rangle \langle n+| = (1 + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) / 2$

유도 뼈대. Pauli 행렬의 대수로 회전과 측정을 표현한다.

검산. 두 수준계와 SU(2) 기본 표현에서 사용한다.

자가 점검. 2pi 회전에서 spinor 부호가 바뀌는 의미를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 각운동량 결합과 Wigner-Eckart을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle = \sum CG |JM\rangle$
02. $\langle jm | T_q^k | j' m' \rangle = CG \times \text{reduced matrix element}$
03. 3j, 6j symbols
04. selection rules

유도 뼈대. Clebsch-Gordan 계수와 tensor operator 정리로 행렬원소를 분리한다.

검산. 여러 각운동량을 하나의 총각운동량으로 결합할 때 사용한다.

자가 점검. selection rule이 대칭성의 결과임을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F179. 중심 퍼텐셜

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 중심 퍼텐셜을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $\psi = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi)$
- 02. $u'' + [2m(E - V)/\hbar^2 - l(l+1)/r^2]u = 0$
- 03. L^2 eigenvalues
- 04. centrifugal barrier

유도 뼈대. L^2 와 L_z 동시 고유기저로 각도를 분리하고 radial equation을 푼다.

검산. 구대칭 퍼텐셜에서 변수분리와 각운동량 보존이 가능하다.

자가 점검. $l(l+1)/r^2$ 항이 물리적으로 어떤 장벽인지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F180. 수소 원자

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 수소 원자를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $V = -e^2 / (4\pi \epsilon_0 r)$

02. $E_n = -Ry / n^2$

03. $a_0 = 4\pi \epsilon_0 \hbar^2 / (m e^2)$

04. degeneracy n^2

유도 뼈대. radial equation을 Laguerre 다항식으로 풀거나 SO(4) 숨은 대칭으로 spectrum을 얻는다.

검산. Coulomb 중심 퍼텐셜과 reduced mass 근사에서 시작한다.

자가 점검. 에너지가 l이 아니라 n에만 의존하는 이유를 숨은 대칭과 연결하라.

핵심 수식 아틀라스

F181. 시간독립 섭동론

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 양자역학의 시간독립 섭동론을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. E_n^{(1)} = \langle n | V | n \rangle$$

$$02. E_n^{(2)} = \sum_{m \neq n} \frac{|\langle m | V | n \rangle|^2}{(E_n - E_m)}$$

$$03. |n^{(1)}\rangle = \sum_{m \neq n} |m\rangle \frac{\langle m | V | n \rangle}{(E_n - E_m)}$$

$$04. H = H_0 + \lambda V$$

유도 뼈대. 고유값과 고유벡터를 λ 급수로 놓고 차수별로 비교한다.

계산. 작은 perturbation과 비축퇴 spectrum에서 표준적으로 적용한다.

자가 점검. 분모가 작아지는 근축퇴 상황에서 왜 조심해야 하는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F182. 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 축퇴 섭동론과 유효 Hamiltonian을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $P V P$ diagonalize in degenerate subspace

02. $H_{eff} = P H P + P V Q (E - Q H Q)^{-1} Q V P$

03. Schrieffer-Wolff

04. level splitting

유도 뼈대. 축퇴 부분공간에 perturbation 행렬을 제한하고 먼저 대각화한다.

검산. 같은 에너지의 상태들이 perturbation으로 섞일 때 필요하다.

자가 점검. 나쁜 기저를 고르면 1차 보정이 왜 불안정해지는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F183. 변분 원리

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 양자역학의 변분 원리를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $E_0 \leq \langle \psi | H | \psi \rangle / \langle \psi | \psi \rangle$

02. $\delta(\langle H \rangle - E \langle \psi | \psi \rangle) = 0$

03. Rayleigh-Ritz

04. basis diagonalization

유도 뼈대. 에너지 functional을 변분하여 최적 파라미터 또는 행렬 고유값 문제를 얻는다.

계산. 바닥상태 에너지 upper bound를 trial state로 추정할 때 적용한다.

자가 점검. trial space를 넓히면 에너지 estimate가 어떻게 변하는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F184. 시간의존 섭동과 Fermi 황금률

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 시간의존 섭동과 Fermi 황금률을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $c_f^1(t) = (-i/\hbar) \int \langle f | V(t) | i \rangle \exp(i \omega_{fi} t) dt$

02. $\Gamma = 2\pi/\hbar |V_{fi}|^2 \rho(E_f)$

03. response spectrum

04. long-time delta function

유도 뼈대. interaction picture에서 Dyson 전개 1차항을 계산하고 긴 시간 극한을 취한다.

검산. 약한 시간의존 상호작용과 연속 최종상태 밀도에서 전이율을 구한다.

자가 점검. 전이율이 density of states에 비례하는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F185. Rabi 진동

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Rabi 진동을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H = \hbar \Delta/2 \sigma_z + \hbar \Omega/2 \sigma_x$
02. $P_e(t) = \Omega^2 / \Omega_R^2 \sin^2(\Omega_R t/2)$
03. $\Omega_R = \sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$
04. rotating wave approximation

유도 뼈대. 회전좌표계로 옮겨 빠르게 진동하는 항을 버리고 2x2 Hamiltonian을 푼다.

검산. 거의 공명하는 두 수준계와 조화 구동장에서 적용한다.

자가 점검. detuning이 커질수록 전이확률이 어떻게 줄어드는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F186. Adiabatic theorem과 Berry 위상

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Adiabatic theorem과 Berry 위상을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $|\psi_n(t)\rangle \rightarrow \exp(i \gamma_n) \exp(-i \int E_n dt/\hbar) |n(t)\rangle$

02. $\gamma_n = i \int \langle n | \text{grad}_R n \rangle \cdot dR$

03. Berry curvature = curl $\mathbf{A}$

04. gap condition

유도 뼈대. instantaneous eigenbasis에서 비대각 coupling이 작은 조건을 분석한다.

검산. Hamiltonian이 천천히 변하고 에너지 gap이 유지될 때 성립한다.

자가 점검. 동역학 위상과 기하학적 위상을 구분하라.

핵심 수식 아틀라스

F187. Landau-Zener 전이

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 양자역학의 Landau-Zener 전이를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H = (vt/2)\sigma_z + (\Delta/2)\sigma_x$

02. $P_{LZ} = \exp(-\pi \Delta^2 / (2 \hbar v))$

03. avoided crossing

04. adiabatic vs diabatic basis

유도 뼈대. 시간선형 detuning과 일정 coupling의 2x2 문제를 해석적으로 푼다.

계산. 두 에너지 준위가 avoided crossing을 통과할 때 전이확률을 준다.

자가 점검. 천천히 지나가면 왜 adiabatic following이 되는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F188. WKB와 준고전 양자화

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 양자역학의 WKB와 준고전 양자화를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\psi \sim C/p(x)^{1/2} \exp(\pm i \int p \, dx/\hbar)$

02. $p(x) = \sqrt{2m(E - V)}$

03. $\int p \, dx = \pi \hbar (n + 1/2)$

04. $T \sim \exp(-2 \int |p| \, dx/\hbar)$

유도 뼈대. phase와 amplitude를 $\hbar$ 급수로 놓고 turning point 연결공식을 사용한다.

계산. 퍼텐셜이 de Broglie 파장에 비해 천천히 변할 때 적용한다.

자가 점검. turning point에서 WKB가 왜 깨지는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F189. 산란 T 행렬

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 산란 T 행렬을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $|\psi^+\rangle = |\varphi\rangle + G0^+ V |\psi^+\rangle$
02. $T = V + V G0^+ T$
03. $f(kp, k) = -(m/(2\pi \hbar^2)) \langle kp | T | k \rangle$
04. $S = 1 - 2\pi i \delta(E_f - E_i) T$

유도 뼈대. Lippmann-Schwinger 방정식으로 outgoing boundary condition을 넣는다.

검산. 입사 자유상태와 상호작용 퍼텐셜이 정의된 산란 문제에서 사용한다.

자가 점검. Born approximation이 언제 타당한지 조건을 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F190. 부분파 산란

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 부분파 산란을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $f(\theta) = \sum_l (2l+1)(\exp(2i\delta_l) - 1)P_l(\cos\theta)/(2ik)$

02. $\sigma = 4\pi/k^2 \sum_l (2l+1) \sin^2 \delta_l$

03. $k \cot \delta_0 = -1/a + r_e k^2/2 + \dots$

04. unitarity

유도 뼈대. radial wave의 원거리 phase shift를 자유해와 비교한다.

검산. 중심 퍼텐셜 산란에서 각운동량 채널이 분리될 때 사용한다.

자가 점검. s-wave가 저에너지에서 지배적인 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F191. 동일입자와 통계

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 동일입자와 통계를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \psi(\dots\xi, x_j \dots) = \pm \psi(\dots x_j, \xi \dots)$$

$$02. [a_{i,a_j}^{\text{dagger}}]_- = \delta_{ij}$$

$$03. \{c_{i,c_j}^{\text{dagger}}\} = \delta_{ij}$$

$$04. n_i = a_i^{\text{dagger}} a_i$$

유도 뼈대. 교환 연산자의 고유값과 생성·소멸 연산자 대수로 통계를 구현한다.

검산. 구별 불가능한 입자들의 Hilbert space는 대칭 또는 반대칭 부분공간이다.

자가 점검. Pauli exclusion이 반교환관계에서 어떻게 나오는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F192. 2차 양자화와 장 연산자

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 2차 양자화와 장 연산자를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\psi_{hat}(r) = \sum_i \varphi_i(r) a_i$
02. $H = \sum_{ij} h_{ij} a_i^{\dagger} a_j + 1/2 \sum_{ijkl} V_{ijkl} a_i^{\dagger} a_j^{\dagger} a_k a_l$
03. $N = \int \psi^{\dagger} \psi dr$
04. Fock space

유도 뼈대. 단일입자 기저를 선택하고 occupation number basis로 Hamiltonian을 다시 쓴다.

검산. 입자수가 변하거나 많은 동일입자를 다룰 때 필수적이다.

자가 점검. basis를 바꿔도 field operator가 같은 물리량임을 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F193. 최소결합과 Landau 준위

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 양자역학의 최소결합과 Landau 준위를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $p \rightarrow p - q A$

02. $H = (p - qA)^2 / (2m)$

03. $E_n = \hbar \omega_c (n + 1/2)$

04. degeneracy per area = eB/h

유도 뼈대. 적절한 gauge를 고르고 oscillator algebra로 횡방향 운동을 양자화한다.

계산. 균일 자기장 속 charged particle과 gauge invariance를 다룬다.

자가 점검. Landau degeneracy가 flux quantum과 연결되는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F194. Pauli와 Dirac 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Pauli와 Dirac 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \mathbf{H}_P = (p - qA)^2 / (2m) - (q \hbar / (2m)) \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B} + q \varphi$$

$$02. (i \hbar \gamma^\mu \mathbf{D}_\mu - mc) \psi = 0$$

$$03. \{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2 \eta^{\mu\nu}$$

$$04. g \sim 2$$

유도 뼈대. Dirac 방정식의 비상대론적 전개에서 Pauli Hamiltonian과 spin-orbit 항이 나온다.

검산. 스핀과 상대론 효과가 필요한 영역에서 비상대론/상대론 모델을 선택한다.

자가 점검. Dirac 방정식이 왜 반입자를 예고하는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F195. 상대론적 양자역학

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 상대론적 양자역학을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. Klein-Gordon: $(\Box + m^2 c^2/\hbar^2)\phi=0$

02. Dirac current $j^\mu=c \text{psibar } \gamma^\mu \psi$

03. negative energy issue

04. field quantization needed

유도 뼈대. 상대론적 energy-momentum relation을 wave equation으로 바꾼다.

검산. 단일입자 파동방정식만으로는 생성소멸과 인과성을 완전히 다루기 어렵다.

자가 점검. KG 확률밀도가 양의 정부호가 아닌 문제를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F196. 정준 양자화

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 정준 양자화를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01.** $[q_{i,pj}] = i \hbar \delta_{ij}$
- 02.** $[\varphi(x), \pi(y)] = i \hbar \delta(x-y)$
- 03.** classical Poisson bracket $\rightarrow$ commutator/ $(i \hbar)$
- 04.** normal modes $\rightarrow$ oscillators

유도 뼈대. 정준변수와 Poisson bracket을 확인한 뒤 commutator를 부여한다.

검산. 고전 Hamilton 구조가 주어진 계를 양자 연산자 대수로 바꾼다.

자가 점검. 구속계에서 Dirac bracket이 필요한 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F197. Wick 정리와 Feynman rule

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Wick 정리와 Feynman rule을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $T \phi^1 \dots \phi^n = \text{normal ordered} + \text{contractions}$

02. $G_0(k) = 1/(\omega - \varepsilon_k + i0)$

03. Dyson: $G^{-1} = G_0^{-1} - \Sigma$

04. vertex factors

유도 뼈대. time-ordered product를 contraction의 합으로 바꿔 diagrammatic series를 만든다.

검산. Gaussian/free theory를 기준으로 상호작용 perturbation을 전개한다.

자가 점검. self-energy가 관측 스펙트럼에 어떤 영향을 주는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F198. Many-body Green 함수

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Many-body Green 함수를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $G(1,2) = -i \langle T \psi(1) \psi^{\dagger}(2) \rangle$

02. $A(k, \omega) = -(1/\pi) \text{Im } G^R(k, \omega)$

03. $\sum \text{rule } \int A d\omega = 1$

04. Dyson equation

유도 뼈대. time-ordered correlation을 정의하고 해석적 continuation으로 retarded function을 얻는다.

검산. 상호작용 다체계의 단일입자 propagation과 spectrum을 기술한다.

자가 점검. spectral function의 peak width가 lifetime과 연결됨을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F199. Matsubara와 Kubo 공식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Matsubara와 Kubo 공식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $G(\tau) = -\langle T_\tau c(\tau) c^\dagger(0) \rangle$
02. $\omega_n = (2n+1)\pi/\beta$ for fermion
03. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)] \rangle$
04. $\sigma(\omega) = (1/(i\omega)) K^R(\omega)$

유도 뼈대. imaginary time 경로적분에서 Matsubara sum을 계산하고 analytic continuation을 수행한다.

검산. 열평형 다체계와 선형응답을 계산하는 표준 형식이다.

자가 점검. bosonic과 fermionic Matsubara frequency가 다른 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F200. BCS와 Bogoliubov 변환

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 BCS와 Bogoliubov 변환을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \Delta = -V \sum_k \langle c_{-k} \downarrow c_k \uparrow \rangle$$

$$02. E_k = \sqrt{\xi_k^2 + |\Delta|^2}$$

$$03. u_k^2 = (1 + \xi_k / E_k) / 2$$

$$04. 2\Delta(0) = 3.52 k_B T_c$$

유도 뼈대. Nambu spinor로 Hamiltonian을 쓰고 Bogoliubov 변환으로 대각화한다.

검산. 약한 attractive interaction과 Cooper pairing 평균장에서 시작한다.

자가 점검. gap이 density of states에 어떤 신호를 남기는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F201. 밴드 위상과 Berry 곡률

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 밴드 위상과 Berry 곡률을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \mathbf{A}_n(k) = i \langle u_n | \text{grad}_k u_n \rangle$$

$$02. \Omega_n = \text{curl}_k \mathbf{A}_n$$

$$03. C = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega d^2k$$

$$04. \sigma_{xy} = C e^2/h$$

유도 뼈대. cell-periodic Bloch state의 connection을 계산하고 Brillouin zone에서 적분한다.

검산. Bloch band가 gap으로 분리되고 Berry curvature가 정의될 때 적용한다.

자가 점검. gauge choice가 Berry connection을 바꾸지만 Chern number를 보존하는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F202. 열린계와 Lindblad 방정식

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 열린계와 Lindblad 방정식을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \frac{d\rho}{dt} = -i[\mathbf{H}, \rho]/\hbar + \sum_j \gamma_j (L_j \rho L_j^\dagger - \frac{1}{2}\{L_j^\dagger L_j, \rho\})$$

02. CPTP map

03. quantum jumps

04. decoherence rate

유도 뼈대. system-bath coupling을 Born-Markov-secular 근사로 줄여 generator를 얻는다.

검산. Markovian bath와 complete positivity가 필요한 reduced dynamics에서 사용한다.

자가 점검. trace preservation을 Lindblad 항에서 직접 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F203. 양자 게이트와 회로

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 양자 게이트와 회로를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
- 02. X, Y, Z, H, CNOT
- 03. U in $U(2^n)$
- 04. measurement probabilities

유도 뼈대. 기본 gate 집합을 조합해 원하는 unitary를 근사한다.

검산. 유한차원 qubit register의 unitary와 측정을 회로로 표현한다.

자가 점검. Bloch sphere에서 X, Z, H gate의 작용을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F204. 양자 오류정정

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 양자 오류정정을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01.** stabilizer $S_i |\psi\rangle = |\psi\rangle$
- 02. syndrome measurement
- 03. d code distance
- 04.** correct $t = \text{floor}((d-1)/2)$ errors

유도 뼈대. commuting stabilizer를 측정해 error syndrome을 얻고 복구 연산을 적용한다.

검산. noise가 있는 qubit에서 logical information을 redundancy로 보호한다.

자가 점검. 측정이 logical state를 직접 붕괴시키지 않고 error만 알아내는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F205. 양자 알고리즘

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 양자 알고리즘을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. QFT $|x\rangle = 1/\sqrt{N} \sum_y \exp(2\pi i xy/N) |y\rangle$

02. phase estimation

03. amplitude amplification

04. HHL scaling

유도 뼈대. unitary oracle과 Fourier/phase extraction을 조합해 hidden structure를 찾는다.

검산. 중첩, 간섭, entanglement를 이용해 특정 계산구조를 가속한다.

자가 점검. 속도향상이 입력/출력 준비 비용에 의해 제한될 수 있음을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F206. Jaynes-Cummings 모형

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 Jaynes-Cummings 모형을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H = \hbar \omega_c a^\dagger a + \hbar \omega_q \sigma_z / 2 + \hbar g (a \sigma_+ + a^\dagger \sigma_-)$

02. $\Omega_n = 2g \sqrt{n+1}$

03. vacuum Rabi splitting

04. dispersive shift $\chi = g^2 / \Delta$

유도 뼈대. RWA로 counter-rotating term을 제거하고 excitation number block을 대각화한다.

검산. 두 수준 원자/qubit와 단일 cavity mode가 약결합 또는 강결합할 때 적용한다.

자가 점검. strong coupling 조건 $g > \kappa, \gamma$ 의 의미를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F207. AMO와 sideband cooling

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 AMO와 sideband cooling을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H_{int} = -d \cdot E$

02. Lamb-Dicke $\eta = k \cdot x_0$

03. red sideband

04. cooling limit

유도 뼈대. dipole interaction을 RWA와 Lamb-Dicke expansion으로 전개한다.

검산. 원자·이온·분자의 internal state와 motional state를 laser로 제어한다.

자가 점검. red sideband가 운동양자를 줄이는 과정을 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F208. Tensor network와 DMRG

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 양자역학의 Tensor network와 DMRG을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $|\psi\rangle = \sum \mathbf{A}^{s_1} \mathbf{A}^{s_2} \dots |s_1 s_2 \dots\rangle$

02. Schmidt decomposition

03. entanglement entropy bounded by bond dimension

04. variational sweep

유도 뼈대. Schmidt 분해와 SVD를 반복해 MPS canonical form을 만든다.

계산. 1차원 국소 Hamiltonian의 낮은 entanglement 상태를 효율적으로 표현한다.

자가 점검. area law가 DMRG의 성공과 어떻게 연결되는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F209. 양자계측과 Fisher 정보

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 양자역학의 양자계측과 Fisher 정보를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $F_Q = 4 \Delta G^2$ for pure state

02. $\Delta \theta \geq 1/\sqrt{\nu F_Q}$

03. SQL $\sim 1/\sqrt{N}$

04. Heisenberg limit $\sim 1/N$

유도 뼈대. 상태의 파라미터 변화율과 distinguishability를 Fisher information으로 정량화한다.

검산. 파라미터 추정에서 양자상태가 제공하는 최대 민감도를 다룬다.

자가 점검. squeezing이 어떤 quadrature의 잡음을 줄이는지 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F210. 최소결합과 gauge 불변성

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 최소결합과 gauge 불변성을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $p \rightarrow p - qA$

02. $H = (p - qA)^2 / (2m) + q\varphi$

03. $\psi \rightarrow \exp(iq\chi/\hbar)\psi$

04. $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \nabla\chi, \varphi \rightarrow \varphi - \partial_t\chi$

유도 뼈대. Schrodinger 방정식이 gauge 변환 후에도 같은 형태인지 확인한다.

검산. 전자기 퍼텐셜은 양자 위상과 직접 결합한다.

자가 점검. E, B가 0인 영역에서도 A가 물리 효과를 낼 수 있는가?

핵심 수식 아틀라스

F211. Aharonov-Bohm 위상

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 Aharonov-Bohm 위상을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\Delta\phi = (q/\hbar)\oint \mathbf{A}\cdot d\mathbf{l}$

02. $\oint \mathbf{A}\cdot d\mathbf{l} = \Phi_B$

03. $\text{phase shift} = q\Phi_B/\hbar$

04. gauge invariant modulo 2π

유도 뼈대. 두 경로의 action phase 차이를 계산한다.

검산. 장 자체가 없는 경로에서도 위상은 flux의 global 정보에 민감하다.

자가 점검. 왜 local $B=0$ 인데 interference pattern이 이동하는가?

핵심 수식 아틀라스

F212. Landau 준위

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 Landau 준위를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H = (p - qA)^2 / (2m)$

02. $E_n = \hbar \omega_c (n + 1/2)$

03. $\omega_c = |q|B/m$

04. degeneracy per area = $|q|B/h$

유도 뼈대. gauge를 고르고 한 방향 운동량을 좋은 양자수로 둔다.

검산. 균일 자기장 속 2D 전자의 운동은 조화진동자처럼 양자화된다.

자가 점검. degeneracy가 flux quantum 수와 같은 이유를 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F213. Pauli 해밀토니언과 스핀

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 Pauli 해밀토니언과 스핀을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $H = (\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p} - q\mathbf{A}))^2 / (2m) + q\phi$

02. $(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{a})(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{b}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + i\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})$

03. H includes $-\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$

04. $g \sim 2$ for Dirac electron

유도 뼈대. Dirac 방정식의 저속 전개 또는 Pauli 행렬 항등식을 사용한다.

검산. 비상대론 전자도 스핀-자기장 결합을 가진다.

자가 점검. 스핀 자기모멘트 부호가 전자 전하 부호와 어떻게 연결되는지 확인하라.

핵심 수식 아틀라스

F214. 전자기장 양자화

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 전자기장 양자화를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \sum_{\mathbf{k}\lambda} \sqrt{(\hbar/(2\epsilon_0\omega V))} \mathbf{e}_{\mathbf{k}\lambda} (a + a^\dagger)$

02. $\mathbf{H} = \sum \hbar\omega (a^\dagger a + 1/2)$

03. $[a, a^\dagger] = 1$

04. photon number $n = a^\dagger a$

유도 뼈대. Coulomb gauge에서 횡모드만 남기고 canonical quantization한다.

계산. 각 Maxwell normal mode는 양자 조화진동자처럼 양자화된다.

자가 점검. zero-point energy가 왜 $1/2\hbar\omega$ 로 나타나는지 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F215. 자발방출과 Purcell 효과

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 자발방출과 Purcell 효과에 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $\Gamma = (\omega^3 |d|^2)/(3\pi \epsilon_0 \hbar c^3)$

02. $F_p = (3/4\pi^2)(\lambda/n)^3 Q/V$

03. $\Gamma \propto \text{LDOS}$

04. selection rule from dipole matrix element

유도 뼈대. Fermi 황금률로 초기 excited state에서 photon mode로의 전이를 계산한다.

검산. 원자의 방출률은 전자기 mode density에 의해 바뀐다.

자가 점검. 공진기 mode volume이 작아지면 방출률은 어떻게 되는가?

핵심 수식 아틀라스

F216. Kubo 전도도와 물성

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 Kubo 전도도와 물성을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \sigma_{ij}(\omega) = (i/\omega)[K_{ij}^R(\omega) - K_{ij}^R(0)]$$

$$02. j_i = \sigma_{ij} E_j$$

$$03. K^R = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [J_i(t), J_j(0)] \rangle$$

$$04. \sum \text{rule} \int \text{Re}\sigma(\omega)d\omega = \pi n e^2 / (2m)$$

유도 뼈대. 외부 vector potential에 대한 전류의 1차 응답을 계산한다.

검산. 전기전도도는 전류-전류 response function이다.

자가 점검. dc limit과 optical conductivity limit의 차이를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F217. Casimir 효과

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 Casimir 효과를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $E_0 = \frac{1}{2} \sum \hbar \omega$

02. $F/A = -\pi^2 \hbar^2 c^4 / (240 a^4)$

03. regularization needed

04. material correction via $\epsilon(i\xi)$

유도 뼈대. 두 plate 사이와 바깥의 zero-point energy 차이를 정규화한다.

계산. 경계조건이 vacuum fluctuation mode spectrum을 바꾼다.

자가 점검. 무한한 zero-point energy에서 왜 차이만 물리적인지 생각하라.

핵심 수식 아틀라스

F218. Quantum Hall response

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 Quantum Hall response을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $\sigma_{xy} = \nu e^2/h$
- 02. Chern number $C=(1/2\pi)\int\Omega d^2k$
- 03. $\rho_{xx}\sim 0$ plateau
- 04. edge states carry current

유도 뼈대. Landau level filling 또는 band Berry curvature를 계산한다.

계산. 2D 전자계의 Hall 전도도는 위상 불변량으로 양자화된다.

자가 점검. 불순물이 있는데 plateau가 안정한 이유를 edge/localization 관점으로 생각하라.

핵심 수식 아틀라스

F219. 밀도행렬과 부분추적

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 밀도행렬과 부분추적을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. \rho = \sum p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|$$

$$02. \langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$$

$$03. \rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$$

$$04. S = -\text{Tr} \rho \ln \rho$$

유도 뼈대. 전체 Hilbert space에서 관심 없는 자유도를 trace out한다.

계산. 순수상태뿐 아니라 혼합상태와 부분계 상태가 필요하다.

자가 점검. entangled pure state의 부분계가 mixed state가 되는 예를 써보라.

핵심 수식 아틀라스

F220. 경로적분과 전파자

한 장으로 보는 대표식, 조건, 계산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 경로적분과 전파자를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. $K(b,a) = \int Dq \exp(iS[q]/\hbar)$

02. $K \sim \sum_{\text{classical paths}} \mathbf{A} \exp(iS_{cl}/\hbar)$

03. $Z = \int D\varphi \exp(iS[\varphi]/\hbar)$

04. Euclidean: $\exp(-S_E/\hbar)$

유도 뼈대. 시간을 작은 조각으로 나누고 완비성을 삽입한다.

계산. 양자진폭은 모든 경로의 위상합으로 표현된다.

자가 점검. $\hbar \rightarrow 0$ 에서 stationary phase가 고전경로를 선택하는 이유를 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F221. 산란과 S 행렬

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 전자기학/양자역학 접점의 산란과 S 행렬을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

$$01. |\psi^+\rangle = |\varphi\rangle + G0^+ V |\psi^+\rangle$$

$$02. T = V + V G0^+ T$$

$$03. S = 1 - 2\pi i \delta(E_f - E_i) T$$

$$04. d\sigma/d\Omega = |f(\theta, \varphi)|^2$$

유도 뼈대. Lippmann-Schwinger 방정식을 반복하면 Born series가 나온다.

검산. 입사상태와 outgoing boundary condition을 연결한다.

자가 점검. unitarity가 optical theorem으로 이어지는 직관을 말하라.

핵심 수식 아틀라스

F222. 차원과 극한으로 논문 읽기

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 통합 연구 도구의 차원과 극한으로 논문 읽기를 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. check units

02. $\varepsilon \rightarrow 0$ or ∞

03. loss $\rightarrow 0$

04. symmetry restored

유도 뼈대. 식 하나를 고르고 단위, 부호, 극한, 보존량을 차례로 표시한다.

검산. 공식의 가정이 명시되지 않은 논문일수록 극한 검산이 중요하다.

자가 점검. 새 논문에서 가장 먼저 볼 식 하나를 고르는 기준을 말해보라.

핵심 수식 아틀라스

F223. 보존법칙과 경계조건 우선 원칙

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 통합 연구 도구의 보존법칙과 경계조건 우선 원칙을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $d_t \text{ density} + \text{div flux} = \text{source}$
- 02. boundary term controls physics
- 03. Noether charge
- 04. weak form surface term

유도 뼈대. 작은 control volume 또는 variational boundary term으로 조건을 분류한다.

검산. 정확한 미분방정식보다 먼저 무엇이 보존되는지와 경계에서 무엇이 주어지는지 본다.

자가 점검. 경계조건이 틀리면 어떤 물리량이 먼저 깨지는지 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F224. 선형응답과 측정량 연결

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 통합 연구 도구의 선형응답과 측정량 연결을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. $\delta\langle A \rangle = \text{int } \chi_{AB} f_B$
- 02. $S(\omega)$ related to $\text{Im } \chi$
- 03. Kramers-Kronig
- 04. noise spectrum

유도 뼈대. Hamiltonian 또는 보존법칙에 coupling term을 추가하고 1차 응답을 계산한다.

검산. 실험은 대부분 외부 perturbation에 대한 응답함수로 이론과 연결된다.

자가 점검. 측정값이 response인지 correlation인지 구분하라.

핵심 수식 아틀라스

F225. 수치해석 검증 루틴

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 통합 연구 도구의 수치해석 검증 루틴을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

- 01. convergence with grid/basis
- 02. conservation residual
- 03. benchmark limit
- 04. condition number

유도 뼈대. 격자/기저를 바꾸며 수렴률을 보고 보존량 residual과 known solution을 비교한다.

검산. 수치결과는 해상도, 경계조건, 알고리즘 안정성의 검증이 있어야 신뢰된다.

자가 점검. 그래프가 그럴듯해도 틀릴 수 있는 이유를 설명하라.

핵심 수식 아틀라스

F226. 스케일 분리와 유효이론

한 장으로 보는 대표식, 조건, 검산

이 수식표는 통합 연구 도구의 스케일 분리와 유효이론을 빠르게 복원하기 위한 압축 항목이다. 조건을 모르면 공식은 위험하다. 먼저 어떤 변수와 단위계를 쓰는지 표시하고, 그 다음 가장 강한 가정을 찾는다.

핵심식.

01. fast variables integrated out

02. H_{eff} or L_{eff}

03. renormalized parameters

04. valid below cutoff

유도 뼈대. 작은 매개변수 또는 cutoff를 정하고 제거된 자유도의 효과를 계수로 흡수한다.

검산. 관심 스케일과 버릴 스케일이 분리될 때 유효모델이 생긴다.

자가 점검. 유효이론의 cutoff를 명시해야 하는 이유를 말하라.

Part 12

대표 유도 아틀라스

대표 유도는 완전한 풀이집이 아니라, 식을 다시 만들기 위한 최소 경로다. 각 페이지는 목표식, 보조식, 4단계 유도, 실패 조건을 담는다.

대표 유도 아틀라스

D001. 차원분석과 스케일링

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $[q]=M^a L^b T^c I^d$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $[q]=M^a L^b T^c I^d$
02. $\Pi_i = \prod_j x_j^{\alpha_{ij}}$
03. $s_j = \partial \log q / \partial \log x_j$
04. 작은매개변수 $\varepsilon \ll 1$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D002. 벡터해석과 적분정리

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i A_i$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i A_i$

02. $(\nabla \times \mathbf{A})_i = \varepsilon_{ijk} \partial_j A_k$

03. $\int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dA$

04. $\int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{n} dA = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D003. 텐서와 Einstein 합 규약

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $a_i b_i = a \cdot b$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $a_i b_i = a \cdot b$

02. $T_{ij} \rightarrow R_{ik} R_{jl} T_{kl}$

03. $\varepsilon_{ijk} \varepsilon_{ilm} = \delta_{jl} \delta_{km} - \delta_{jm} \delta_{kl}$

04. $\text{trace } T = T_{ii}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D004. 분포와 Dirac 델타

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\int f(x) \delta(x-a) dx = f(a)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $\int f(x) \delta(x-a) dx = f(a)$
- 02.** $\delta(g(x)) = \sum \delta(x-x_i)/|g'(x_i)|$
- 03.** $\nabla^2(1/r) = -4\pi \delta^3(r)$
- 04.** $1/(x \pm i0) = P(1/x) \mp i\pi\delta(x)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D005. Fourier와 Laplace 변환

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $f(t) = \int d\omega / (2\pi) \tilde{f}(\omega) e^{-i\omega t}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. f(t) = \int d\omega / (2\pi) \tilde{f}(\omega) e^{-i\omega t}$$

$$02. \partial_t \rightarrow -i\omega, \nabla \rightarrow ik$$

$$03. L[f](s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$$

$$04. \text{convolution} \rightarrow \prod$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D006. Green 함수의 공통 구조

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $L G(x, x') = \delta(x - x')$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $L G(x, x') = \delta(x - x')$

02. $u(x) = \int G(x, x') s(x') dx' + u_{\text{hom}}$

03. $G^R(t) = \theta(t) G(t)$

04. $G(\omega) = (\omega - \mathbf{H} + i0)^{-1}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D007. 변분 원리

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\delta S=0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\delta S=0$

02. $S=\int L(q,\dot{q},t)dt$

03. $\partial L/\partial q_i - d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i)=0$

04. $\delta F[u]=0 \rightarrow \text{Euler-Lagrange PDE}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D008. Noether 정리

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $q_i \rightarrow q_i + \varepsilon \Delta q_i$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $q_i \rightarrow q_i + \varepsilon \Delta q_i$

02. $\delta L = \varepsilon dK/dt$

03. $Q = \Sigma p_i \Delta q_i - K$

04. $dQ/dt = 0$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D009. 고유값과 정상모드

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $A|n\rangle = \lambda_n |n\rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $A|n\rangle = \lambda_n |n\rangle$
02. $A = \sum \lambda_n |n\rangle\langle n|$
03. $f(A) = \sum f(\lambda_n) |n\rangle\langle n|$
04. $\det(A - \lambda I) = 0$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D010. Hermitian, unitary, symplectic 구조

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $A^\dagger = A$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $A^\dagger = A$

02. $U^\dagger U = I$

03. $M^T J M = J$

04. $J = \begin{bmatrix} 0, I \\ I, 0 \end{bmatrix}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D011. PDE 분류와 특성곡선

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $A u_{xx} + B u_{xy} + C u_{yy} = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $A u_{xx} + B u_{xy} + C u_{yy} = 0$

02. $\Delta = B^2 - 4AC$

03. $\Delta < 0$ elliptic, $\Delta = 0$ parabolic, $\Delta > 0$ hyperbolic

04. $dx/ds=a, du/ds=b$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D012. 점근해석과 stationary phase

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $I(\lambda) = \int a(x) \exp(i\lambda\phi(x)) dx$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $I(\lambda) = \int a(x) \exp(i\lambda\phi(x)) dx$
- 02.** $\phi'(x_0) = 0$
- 03.** $I(\lambda) \sim a(x_0) \exp(i\lambda\phi_0) \sqrt{(2\pi/(\lambda|\phi''(x_0)|))}$
- 04.** $\lambda \gg 1$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D013. 섭동론의 공통 뼈대

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $L(\epsilon)u=s$, $L=L_0+\epsilon L_1+\dots$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $L(\epsilon)u=s$, $L=L_0+\epsilon L_1+\dots$

02. $u=u_0+\epsilon u_1+\epsilon^2 u_2+\dots$

03. $L_0 u_0=s$

04. $L_0 u_1=-L_1 u_0$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D014. 경계층과 matched asymptotics

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\varepsilon y'' + a(x)y' + b(x)y = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\varepsilon y'' + a(x)y' + b(x)y = 0$

02. $X = (x - x_b)/\varepsilon^\alpha$

03. $y_{\text{outer}} \sim y_{\text{inner}}$ in overlap

04. $y \sim y_{\text{out}} + y_{\text{in}} - y_{\text{match}}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D015. 확률, cumulant, 잡음

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $M(t)=\langle \exp(tX) \rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $M(t)=\langle \exp(tX) \rangle$

02. $K(t)=\log M(t)$

03. $\kappa_n = d^n K / dt^n \text{ at } 0$

04. $\langle X^2 \rangle_c = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D016. 상관함수와 response

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $C_{AB}(t) = \langle A(t)B(0) \rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $C_{AB}(t) = \langle A(t)B(0) \rangle$
- 02.** $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [A(t), B(0)] \rangle$
- 03.** $S_{AB}(\omega) = \int e^{i\omega t} C_{AB}(t) dt$
- 04.** response = variation of observable

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D017. 안정성 분석과 Lyapunov 지수

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\dot{x}=f(x)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\dot{x}=f(x)$
02. $\delta\dot{x}=J(x)\delta x$
03. $J_{ij}=\partial f_i/\partial x_j$
04. $\lambda_L = \lim (1/t) \log |\delta x(t)|/|\delta x(0)|$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D018. Lie 군과 Lie 대수

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $g(\epsilon)=\exp(\epsilon X)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $g(\epsilon)=\exp(\epsilon X)$

02. $[X_a, X_b]=f_{ab}^c X_c$

03. $R(n, \theta)=\exp(-i\theta \ n \cdot \mathbf{J}/\hbar)$

04. $Ad_g X = gXg^{-1}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D019. Newton 방정식과 운동량 보존

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F = dp/dt$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F = dp/dt$

02. $p = m v$

03. $\Sigma F_{ext} = dP_{tot}/dt$

04. $F_{12} = -F_{21}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D020. 일-에너지 정리

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$
- 02.** $dK/dt = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$
- 03.** $E = K + V, \mathbf{F} = -\nabla V$
- 04.** $dE/dt = \partial V / \partial t$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D021. 중심력과 유효 퍼텐셜

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $L = m r^2 \dot{\varphi}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $L = m r^2 \dot{\varphi}$

02. $E = 1/2 m \dot{r}^2 + L^2/(2mr^2) + V(r)$

03. $V_{eff} = V + L^2/(2mr^2)$

04. $d^2u/d\varphi^2 + u = -mF(1/u)/(L^2u^2)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D022. Kepler 문제와 궤도 요소

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $V(r)=-k/r$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $V(r)=-k/r$

02. $r(\varphi)=p/(1+e \cos \varphi)$

03. $E=-k/(2a)$

04. $T^2 = 4\pi^2 a^3/(GM)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D023. 조화진동자와 정상모드

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $x'' + \omega_0^2 x = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $x'' + \omega_0^2 x = 0$

02. $E = 1/2 m \dot{x}^2 + 1/2 kx^2$

03. $q_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$

04. $K a = \omega^2 M a$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D024. 감쇠와 구동 진동

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $x'' + 2\beta x' + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $x'' + 2\beta x' + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t$
02. $A(\omega) = f_0 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta\omega)^2}$
03. $Q = \omega_0 / (2\beta)$
04. phase lag $\tan \delta = 2\beta\omega / (\omega_0^2 - \omega^2)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D025. Lagrange 역학

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $L=T-V$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $L=T-V$

02. $\delta \int L dt = 0$

03. $d/dt(\partial L / \partial \dot{q}_i) - \partial L / \partial q_i = Q_i$

04. $p_i = \partial L / \partial \dot{q}_i$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D026. Hamilton 역학과 위상공간

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $H(q,p)=p_i \dot{q}_i - L$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $H(q,p)=p_i \dot{q}_i - L$

02. $\dot{q}_i=\partial H/\partial p_i$

03. $\dot{p}_i=-\partial H/\partial q_i$

04. $dp/dt=0$ (Liouville)

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D027. Poisson bracket과 정준변환

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\{A, B\} = \partial A / \partial q_i \partial B / \partial p_i - \partial A / \partial p_i \partial B / \partial q_i$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \{A, B\} = \partial A / \partial q_i \partial B / \partial p_i - \partial A / \partial p_i \partial B / \partial q_i$$

$$02. dA/dt = \{A, H\} + \partial A / \partial t$$

$$03. \{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$$

$$04. \text{canonical: } \{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D028. Hamilton-Jacobi 이론

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $H(q, \partial S / \partial q, t) + \partial S / \partial t = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $H(q, \partial S / \partial q, t) + \partial S / \partial t = 0$

02. $p_i = \partial S / \partial q_i$

03. $Q_i = \partial S / \partial \alpha_i$

04. $S = W(q, \alpha) - Et$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D029. 작용-각 변수

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $J_i = (1/2\pi) \oint p_i dq_i$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $J_i = (1/2\pi) \oint p_i dq_i$
02. $\omega_i = \partial H / \partial J_i$
03. $\theta_i(t) = \theta_i(0) + \omega_i t$
04. adiabatic invariant $J \sim \text{const}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D030. 강체와 Euler 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $L=I\omega$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $L=I\omega$

02. $T=1/2 \omega \cdot I\omega$

03. $N = dL/dt$

04. $I_1 \Omega \dot{\Omega}_1 + (I_3 - I_2)\Omega_2\Omega_3 = N_1$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D031. 비관성계와 회전좌표계

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $a_{\text{inertial}} = a_{\text{rot}} + 2\Omega \times v + \Omega \times (\Omega \times r) + \dot{\Omega} \times r$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. a_{\text{inertial}} = a_{\text{rot}} + 2\Omega \times v + \Omega \times (\Omega \times r) + \dot{\Omega} \times r$$

$$02. F_{\text{cor}} = -2m\Omega \times v$$

$$03. F_{\text{cent}} = -m\Omega \times (\Omega \times r)$$

$$04. F_{\text{Euler}} = -m\dot{\Omega} \times r$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D032. 비선형 동역학과 chaos

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\dot{x}=f(x)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $\dot{x}=f(x)$
- 02.** Poincare map $x_{n+1}=P(x_n)$
- 03.** $\lambda_L > 0 \rightarrow$ sensitive dependence
- 04.** $S_{KS} = \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D033. Lagrange multiplier와 제약

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F(q,t)=0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F(q,t)=0$
02. $L'=L+\lambda_a F_a$
03. $\partial L'/\partial \lambda_a = F_a = 0$
04. constraint force does no virtual work

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D034. 연속체와 탄성파

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$
- 02.** $\varepsilon_{ij} = 1/2(\partial_i u_j + \partial_j u_i)$
- 03.** $\rho u''_i = \partial_j \sigma_{ij} + f_i$
- 04.** $c_L = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D035. 충돌과 산란의 고전 공식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $d\sigma = b db d\phi / \sin\theta d\theta$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $d\sigma = b db d\phi / \sin\theta d\theta$

02. $d\sigma/d\Omega = b/\sin\theta |db/d\theta|$

03. impulse $\mathbf{J} = \int \mathbf{F} dt = \Delta \mathbf{p}$

04. coefficient $e = -v_{rel\text{after}}/v_{rel\text{before}}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D036. Symplectic integrator와 검산

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $q_{n+1} = q_n + \Delta t \partial H / \partial p$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $q_{n+1} = q_n + \Delta t \partial H / \partial p$
- 02. $p_{n+1} = p_n - \Delta t \partial H / \partial q$
- 03. energy error bounded oscillatory
- 04. phase volume preserved

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D037. 열역학 제1법칙

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $dU = \delta Q - \delta W$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. dU = \delta Q - \delta W$$

$$02. \delta W = p dV$$

$$03. dU = T dS - p dV + \mu dN$$

$$04. C_V = (\partial U / \partial T)_V$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D038. 엔트로피와 제2법칙

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $dS \geq \delta Q_{\text{rev}}/T$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. dS \geq \delta Q_{\text{rev}}/T$$

$$02. \Delta S_{\text{univ}} \geq 0$$

$$03. T^{-1} = (\partial S / \partial U)_{V,N}$$

$$04. S = k_B \ln \Omega$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D039. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F=U-TS$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F=U-TS$

02. $G=U-TS+pV$

03. $H=U+pV$

04. $\Omega=U-TS-\mu N$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D040. Maxwell 관계

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $dF = -S dT - p dV$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $dF = -S dT - p dV$

02. $(\partial S / \partial V)_T = (\partial p / \partial T)_V$

03. $dG = -S dT + V dp$

04. $(\partial S / \partial p)_T = -(\partial V / \partial T)_p$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D041. 상평형과 Clapeyron 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\mu_\alpha(T,p)=\mu_\beta(T,p)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\mu_\alpha(T,p)=\mu_\beta(T,p)$
02. $dp/dT = \Delta s/\Delta v$
03. $dp/dT = L/(T \Delta v)$
04. Gibbs phase rule: $f=c-p+2$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D042. Microcanonical ensemble

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\Omega(E,V,N)=\text{Tr } \delta(E-H)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\Omega(E,V,N)=\text{Tr } \delta(E-H)$

02. $S=k_B \ln \Omega$

03. $1/T=\partial S/\partial E$

04. $p/T=\partial S/\partial V$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D043. Canonical ensemble

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $Z = \text{Tr} \exp(-\beta H)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $Z = \text{Tr} \exp(-\beta H)$

02. $F = -k_B T \ln Z$

03. $\langle E \rangle = -\partial \ln Z / \partial \beta$

04. $C_V = k_B \beta^2 (\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D044. Grand canonical ensemble

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\Xi = \text{Tr} \exp[-\beta(H - \mu N)]$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$\mathbf{01.} \quad \Xi = \text{Tr} \exp[-\beta(\mathbf{H} - \mu N)]$$

$$\mathbf{02.} \quad \Omega_G = -k_B T \ln \Xi$$

$$\mathbf{03.} \quad \langle N \rangle = k_B T \partial \ln \Xi / \partial \mu$$

$$\mathbf{04.} \quad P V = k_B T \ln \Xi$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D045. 이상기체와 equipartition

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $pV=Nk_B T$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $pV=Nk_B T$
- 02. $U=3/2 Nk_B T$
- 03. $\langle x_i \partial H / \partial x_i \rangle = k_B T$
- 04. $C_V = f/2 Nk_B$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D046. Bose/Fermi 분포

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $n_B(\epsilon)=1/(\exp(\beta(\epsilon-\mu))-1)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $n_B(\epsilon)=1/(\exp(\beta(\epsilon-\mu))-1)$

02. $n_F(\epsilon)=1/(\exp(\beta(\epsilon-\mu))+1)$

03. $Z_{\text{mode}}^B=1/(1-z e^{-\beta\epsilon})$

04. $Z_{\text{mode}}^F=1+z e^{-\beta\epsilon}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D047. Blackbody와 Debye 모형

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $u(\omega) = \hbar\omega^3 / (\pi^2 c^3) / (\exp(\beta\hbar\omega) - 1)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. u(\omega) = \hbar\omega^3 / (\pi^2 c^3) / (\exp(\beta\hbar\omega) - 1)$$

$$02. j = \sigma T^4$$

$$03. C_V \propto T^3 \text{ at low } T$$

$$04. \omega_D^3 = 6\pi^2 n c_s^3$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D048. Virial 전개와 실제기체

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $p/(kBT) = \rho + B_2(T)\rho^2 + B_3(T)\rho^3 + \dots$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \quad p/(kBT) = \rho + B_2(T)\rho^2 + B_3(T)\rho^3 + \dots$$

$$02. \quad B_2 = -1/2 \int (\exp(-\beta u(r)) - 1) d^3r$$

$$03. \quad Z = pV/(NkBT)$$

$$04. \quad \text{van der Waals: } (p + a n^2)(V - Nb) = NkBT$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D049. Landau 평균장과 상전이

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F(m)=F_0+a(T-T_c)m^2+b m^4-hm$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F(m)=F_0+a(T-T_c)m^{2+b} m^4-hm$

02. $m \propto (T_c-T)^{1/2}$

03. $\chi \propto |T-T_c|^{-1}$

04. C has jump

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D050. Ising 모형과 mean field

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $H = -J \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j - h \sum_i s_i$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $H = -J \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j - h \sum_i s_i$

02. $m = \tanh[\beta(zJm + h)]$

03. $k_B T_c = zJ$

04. $\chi = \partial m / \partial h$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D051. Critical scaling과 RG

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\xi \propto |t|^{-\nu}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\xi \propto |t|^{-\nu}$

02. $\chi \propto |t|^{-\gamma}$

03. $m \propto (-t)^\beta$

04. $\beta_g = d g / d \ln b$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D052. Boltzmann 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f + \mathbf{F}/m \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = C[f]$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$\mathbf{01.} \quad \partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f + \mathbf{F}/m \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = C[f]$$

$$\mathbf{02.} \quad H = \int f \ln f d^3x d^3v$$

$$\mathbf{03.} \quad dH/dt \leq 0$$

$$\mathbf{04.} \quad \text{local equilibrium: } f_0 \propto \exp[-\beta(p-\mu)^2/2m]$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D053. Langevin과 Fokker-Planck

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $m \dot{v} = -\gamma v + \eta(t)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $m \dot{v} = -\gamma v + \eta(t)$
02. $\langle \eta(t) \eta(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta(t - t')$
03. $\partial_t P = -\partial_x (AP) + 1/2 \partial_x^2 (BP)$
04. $D = k_B T / \gamma$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D054. Kubo와 fluctuation-dissipation

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\delta\langle A(t) \rangle = \int \chi^R_{AB}(t-t') f(t') dt'$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\delta\langle A(t) \rangle = \int \chi^R_{AB}(t-t') f(t') dt'$
02. $\chi^R_{AB}(t) = -(i/\hbar)\theta(t)\langle [A(t), B(0)] \rangle$
03. $S(\omega) = 2\hbar/(1-e^{-\beta\hbar\omega}) \text{Im}\chi^R(\omega)$
04. classical: $S(\omega) = 2kBT \chi''(\omega)/\omega$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D055. Jarzynski와 비평형 일

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\langle \exp(-\beta W) \rangle = \exp(-\beta \Delta F)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\langle \exp(-\beta W) \rangle = \exp(-\beta \Delta F)$
02. $W = \int \partial \mathbf{H} / \partial \lambda \cdot \lambda \dot{dt}$
03. Crooks: $P_F(W)/P_R(-W) = \exp[\beta(W - \Delta F)]$
04. $\langle W \rangle = \Delta F$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D056. 정보와 열역학

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $S_{VN} = -k_B \text{Tr } \rho \ln \rho$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $S_{VN} = -k_B \text{Tr } \rho \ln \rho$
- 02.** $I(X:Y) = S_{X+Y} - S_{XY}$
- 03.** Landauer: $Q \geq k_B T \ln 2$
- 04.** relative entropy $D(\rho || \sigma) \geq 0$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D057. 연속체 가정과 물질미분

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $D/Dt = \partial/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $D/Dt = \partial/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$

02. $\rho(x,t), u(x,t), p(x,t)$

03. $Kn = \lambda_{mfp}/L \ll 1$

04. $Re = \rho UL/\mu$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D058. 질량보존과 연속방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$
- 02.** incompressible: $\nabla \cdot u = 0$
- 03.** $D\rho/Dt = -\rho \nabla \cdot u$
- 04.** mass flux $= \rho u \cdot n$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D059. Cauchy 응력과 운동량 보존

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\rho Du/Dt = \nabla \cdot \sigma + \rho b$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \rho Du/Dt = \nabla \cdot \sigma + \rho b$$

$$02. \sigma = -pI + \tau$$

$$03. \tau = \mu(\nabla u + \nabla u^T) + \lambda(\nabla \cdot u)I$$

$$04. \text{traction } t = \sigma \cdot n$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D060. Navier-Stokes 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\rho(\partial_t u + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\rho(\partial_t u + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f$
02. $\nabla \cdot u = 0$
03. $\nu = \mu / \rho$
04. energy dissipation $\varepsilon = 2\nu S_{ij} S_{ij}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D061. Euler 방정식과 Bernoulli

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\rho Du/Dt = -\nabla p + \rho g$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $\rho Du/Dt = -\nabla p + \rho g$
- 02. $\partial_t \varphi + 1/2 |\nabla \varphi|^2 + p/\rho + gz = \text{const}$
- 03. steady streamline: $p + 1/2 \rho u^2 + \rho gz = \text{const}$
- 04. irrotational: $u = \nabla \varphi$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D062. Vorticity와 Kelvin 정리

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\omega = \nabla \times u$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\omega = \nabla \times u$

02. $D\omega/Dt = (\omega \cdot \nabla)u + \nu \nabla^2 \omega$

03. $\Gamma = \oint u \cdot dl$

04. $D\Gamma/Dt = 0$ for inviscid barotropic conservative force

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D063. Stokes 유동과 low Re

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $Re \ll 1$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $Re \ll 1$

02. $0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f$

03. $\nabla \cdot u = 0$

04. sphere drag $\mathbf{F} = 6\pi\mu a \mathbf{U}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D064. 경계층과 Blasius

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\delta \sim L/\sqrt{\text{Re}_L}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\delta \sim L/\sqrt{(\text{Re}_L)}$

02. $u\partial_x u + \nu\partial_y^2 u = U dU/dx + \nu\partial_y^2 u$

03. $\eta = y \sqrt{(U/(\nu x))}$

04. $f''' + 1/2 f f'' = 0$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D065. Poiseuille와 pipe flow

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $u(r)=\Delta p/(4\mu L)(R^2-r^2)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $u(r)=\Delta p/(4\mu L)(R^2-r^2)$

02. $Q=\pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$

03. $\tau_w=R \Delta p/(2L)$

04. $f_D=64/Re$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D066. Lubrication 근사

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $h/L \ll 1$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $h/L \ll 1$

02. $\partial p / \partial z \sim 0$

03. $\partial p / \partial x = \mu \partial^2 u / \partial z^2$

04. $\partial / \partial x (h^3 \partial p / \partial x) = 6\mu U \partial h / \partial x$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D067. 표면장력과 capillary 현상

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\Delta p = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\Delta p = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$

02. $Ca = \mu U / \gamma$

03. $Bo = \rho g L^2 / \gamma$

04. $l_c = \sqrt{\gamma / (\rho g)}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면향, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D068. 압축성 Euler와 Mach 수

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$

02. $\partial_t (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u + p I) = 0$

03. $M = U/c_s$

04. $c_s^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D069. 충격파와 Rankine-Hugoniot

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $[\rho u_n]=0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $[\rho u_n]=0$
- 02. $[\rho u_n^{2+p}]=0$
- 03. $[(E+p)u_n]=0$
- 04. entropy increases across shock

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D070. 난류와 Kolmogorov scaling

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $Re \gg 1$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $Re \gg 1$

02. $E(k) \sim C \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$

03. $\eta_K = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$

04. $u_l \sim (\varepsilon l)^{1/3}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D071. RANS와 closure 문제

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $u=U+u'$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $u=U+u'$
02. $\partial_t U + U \cdot \nabla U = -\nabla P/\rho + \nu \nabla^2 U - \nabla \cdot \langle u' u' \rangle$
03. Reynolds stress $\tau_R = -\rho \langle u' u' \rangle$
04. eddy viscosity ν_t

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D072. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $u=U(y)+u'$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $u=U(y)+u'$
- 02.** $u' \propto \exp[i(\alpha x - \omega t)]$
- 03.** $(D^2 - \alpha^2)^2 \varphi = i\alpha Re[(U-c)(D^2 - \alpha^2) - U'']\varphi$
- 04.** $\text{Im } \omega > 0 \text{ unstable}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D073. 회전유체와 geostrophic balance

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $Ro=U/(fL)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $Ro=U/(fL)$
02. $f \times u = -\nabla p/\rho$
03. Taylor–Proudman: $\partial u/\partial z \sim 0$
04. $PV = (\zeta+f)/h$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D074. Shallow water 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\partial_t h + \nabla \cdot (hu) = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\partial_t h + \nabla \cdot (hu) = 0$

02. $\partial_t u + u \cdot \nabla u = -g \nabla h$

03. $c = \sqrt{gh}$

04. $Fr = U / \sqrt{gh}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면장, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D075. MHD와 Alfvén 파

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

$$02. \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$03. \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

$$04. v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D076. Fermat 원리와 eikonal

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\delta \int n ds = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\delta \int n ds = 0$

02. $|\nabla S|^2 = n^2$

03. $k = \nabla S$

04. ray: $d/ds(n dr/ds) = \nabla n$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D077. ABCD 행렬과 Gaussian optics

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $[r_2, \theta_2]^T = [A, B; C, D][r_1, \theta_1]^T$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $[r_2, \theta_2]^T = [A, B; C, D][r_1, \theta_1]^T$

02. thin lens: $[1, 0; -1/f, 1]$

03. free space: $[1, L; 0, 1]$

04. $q_2 = (Aq_1 + B)/(Cq_1 + D)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D078. 렌즈 공식과 수차

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $1/s + 1/s' = 1/f$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $1/s + 1/s' = 1/f$

02. $m = -s'/s$

03. $NA = n \sin \theta$

04. diffraction limit $\sim 0.61\lambda/NA$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D079. Jones 벡터와 Stokes 파라미터

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E=[E_x, E_y]^T$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $E=[E_x, E_y]^T$
02. $S_0=|E_x|^2+|E_y|^2$
03. $S_1=|E_x|^2-|E_y|^2$
04. $S_2=2\text{Re } E_x E_y^*, S_3=2\text{Im } E_x E_y^*$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D080. Fresnel 계수와 경계조건

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

02. $r_s = (n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2) / (n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2)$

03. $r_p = (n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2) / (n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2)$

04. $R = |r|^2$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D081. 다층막 transfer matrix

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $[E+;E-]_{j+1}=M_j [E+;E-]_j$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $[E+;E-]_{j+1}=M_j [E+;E-]_j$
02. phase $\delta_j=k_0 n_j d_j \cos\theta_j$
03. quarter-wave stack
04. stop band from periodic phase

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D082. Fraunhofer 회절

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $U(P) \propto F\{\text{aperture}\}(k_x, k_y)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $U(P) \propto F\{\text{aperture}\}(k_x, k_y)$
- 02.** single slit: $I \propto \text{sinc}^2(\pi a \sin\theta/\lambda)$
- 03.** Airy disk radius $1.22\lambda f/D$
- 04.** grating: $d \sin\theta = m\lambda$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D083. Fresnel 회절과 near field

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $U(P) = \int_{\text{aperture}} \exp(ik(r+r'))/(rr') dA$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $U(P) = \int_{\text{aperture}} \exp(ik(r+r'))/(rr') dA$

02. Fresnel number $N_F = a^2/(\lambda z)$

03. quadratic phase matters

04. Cornu spiral for edge

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D084. PSF, OTF, 해상도

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\text{image} = \text{object} * \text{PSF}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\text{image} = \text{object} \cdot \text{PSF}$
02. $\text{OTF} = \text{Fourier transform of PSF}$
03. $\text{MTF} = |\text{OTF}|$
04. Abbe: $d \sim \lambda / (2\text{NA})$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D085. Coherence와 Van Cittert-Zernike

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\Gamma_{12} = \langle E_1^*(t) E_2(t) \rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\Gamma_{12} = \langle E_1^*(t) E_2(t) \rangle$

02. $g_{12} = \Gamma_{12} / \sqrt{I_1 I_2}$

03. visibility $V = 2|\Gamma_{12}| / (I_1 + I_2)$

04. spatial coherence = Fourier transform of source intensity

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D086. Fabry-Perot와 laser cavity

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $FSR=c/(2nL)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $FSR=c/(2nL)$
- 02.** $Finesse=FSR/linewidth$
- 03.** resonance: $2nL=m\lambda$
- 04.** threshold: $gain = loss$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D087. Gaussian beam

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $w(z)=w_0 \sqrt{1+(z/z_R)^2}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $w(z)=w_0 \sqrt{1+(z/z_R)^2}$
02. $z_R=\pi w_0^2/\lambda$
03. $R(z)=z[1+(z_R/z)^2]$
04. Gouy phase $\psi=\arctan(z/z_R)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D088. Optical fiber와 waveguide

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $V=(2\pi a/\lambda) NA$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $V=(2\pi a/\lambda) NA$
- 02.** single mode if $V<2.405$
- 03.** $\beta(\omega)$ dispersion
- 04.** $D=-(2\pi c/\lambda^2) d^2\beta/d\omega^2$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D089. 비선형 편광과 phase matching

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $P = \epsilon_0(\chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $P = \epsilon_0(\chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots)$

02. 2ω generation: $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_\omega$

03. efficiency $\propto \text{sinc}^2(\Delta k L/2)$

04. n_2 effect: $\Delta n = n_2 I$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D090. NLSE와 soliton

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $i\partial_z A - \beta/2 \partial_t^2 A + \gamma|A|^2 A = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $i\partial_z A - \beta/2 \partial_t^2 A + \gamma|A|^2 A = 0$
- 02.** dispersion length $L_D = T_0^2/|\beta_2|$
- 03.** nonlinear length $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$
- 04.** soliton if $L_D \sim L_{NL}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D091. Photonic crystal과 위상광학

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E_k(r)=u_k(r) \exp(ik \cdot r)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $E_k(r)=u_k(r) \exp(ik \cdot r)$
- 02. band *gap* from periodic $\varepsilon(r)$
- 03. Berry curvature $\Omega_n(k)=\nabla_{kx}A_n$
- 04. $C=(1/2\pi)\int_{\Omega} d^2k$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D092. Maxwell 방정식의 네 줄

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$

02. $\text{div } \mathbf{B} = 0$

03. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$

04. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 d\mathbf{E}/dt$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D093. 전하보존과 게이지 구조

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $d\rho/dt + \text{div } \mathbf{J} = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $d\rho/dt + \text{div } \mathbf{J} = 0$

02. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$

03. $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - d\mathbf{A}/dt$

04. $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \text{grad } \chi, \varphi \rightarrow \varphi - d\chi/dt$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D094. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E(r)=1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(r_p)(r-r_p)/|r-r_p|^3 d^3r_p$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \mathbf{E}(r)=1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(r_p)(r-r_p)/|r-r_p|^3 d^3r_p$$

$$02. \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = Q_{enc}/\epsilon_0$$

$$03. \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$$

$$04. \mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D095. Poisson/Laplace 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E = -\text{grad } \phi$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $E = -\text{grad } \phi$
02. $\nabla^2 \phi = -\rho/\epsilon_0$
03. $\nabla^2 \phi = 0$ in source-free region
04. $G(r, r_p) = 1/(4\pi|r - r_p|)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D096. 유일성 정리와 에너지 방법

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\int_V |\text{grad } \psi|^2 dV = \oint \psi d_n \psi da - \int \psi \nabla^2 \psi dV$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$\mathbf{01.} \int_V |\text{grad } \psi|^2 dV = \oint \psi d_n \psi da - \int \psi \nabla^2 \psi dV$$

$$\mathbf{02.} \varphi_1 - \varphi_2 = \psi$$

03. Dirichlet or Neumann boundary

$$\mathbf{04.} U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 dV$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D097. 영상법

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\phi = \sum_i q_i / (4\pi\epsilon_0 |r-r_i|)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\phi = \sum_i q_i / (4\pi\epsilon_0 |r-r_i|)$
02. $q_{\text{image}} = -q$ for grounded plane
03. $q_{\text{image}} = -q a/d$ for grounded sphere
04. force from image field

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D098. 다중극 전개

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $1/|r-rp| = 1/r + rp \cdot r/r^3 + \dots$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \quad 1/|r-rp| = 1/r + rp \cdot r/r^3 + \dots$$

$$02. \quad p = \int r \rho(r) d^3r$$

$$03. \quad \varphi_{dip} = p \cdot \hat{r} / (4\pi \epsilon_0 r^2)$$

$$04. \quad Q_{ij} = \int \rho (3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) d^3r$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D099. 정전기 에너지와 정전용량

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $U = 1/2 \int \rho \phi d^3r$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $U = 1/2 \int \rho \phi d^3r$

02. $U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 d^3r$

03. $Q = C V$

04. C_{ij} matrix relation $Q_i = \sum_j C_{ij} V_j$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D100. 유전체와 분극

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $D = \epsilon_0 E + P$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$02. \rho_b = -\text{div } \mathbf{P}$$

$$03. \sigma_b = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n}$$

$$04. D_{\text{perp jump}} = \sigma_{\text{free}}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D101. 국소장과 Clausius-Mossotti

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $P = N \alpha E_{loc}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $P = N \alpha E_{loc}$
02. $(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2) = N \alpha / (3\epsilon_0)$
03. $E_{loc} = E + P / (3\epsilon_0)$
04. $\chi_e = P / (\epsilon_0 E)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D102. Biot-Savart와 Ampere 법칙

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $B(r) = \mu_0 / (4\pi) \int J(r_p) \times (r - r_p) / |r - r_p|^3 d^3r_p$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \mathbf{B}(r) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(r_p) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_p) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_p|^3 d^3r_p$$

$$02. \text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

$$03. \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

$$04. \mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $B = \text{curl } A$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $B = \text{curl } A$

02. $\text{curl curl } A = \mu_0 J$

03. $\text{div } A = 0$

04. $A(r) = \mu_0 / (4\pi) \int J(rp) / |r - rp| d^3rp$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D104. 자기쌍극자와 자성체

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $m = I a n$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $m = I a n$
- 02.** $\tau = m \times \mathbf{B}$
- 03.** $U = -m \cdot \mathbf{B}$
- 04.** $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D105. Faraday 유도와 준정적 근사

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\text{emf} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\Phi_B/dt$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \text{emf} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\Phi_B/dt$$

$$02. \text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$$

$$03. L I = \Phi_B$$

$$04. V_L = L dI/dt$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D106. 피부효과와 전하완화

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$\mathbf{01.} \quad \delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$$

$$\mathbf{02.} \quad \tau = \varepsilon/\sigma$$

$$\mathbf{03.} \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\mathbf{04.} \quad \nabla^2 \mathbf{H} = i \omega \mu \sigma \mathbf{H}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D107. Poynting 정리와 응력텐서

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $u = 1/2(\epsilon_0 E^2 + B^2/\mu_0)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. u = 1/2(\epsilon_0 E^2 + B^2/\mu_0)$$

$$02. \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

$$03. d u/dt + \text{div } \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$$

$$04. T_{ij} = \epsilon_0(\mathbf{E}_i \mathbf{E}_j - 1/2 \mathbf{E}^2 \delta_{ij}) + \dots$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D108. 지연 퍼텐셜

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $A(r,t) = \mu_0 / (4\pi) \int J(rp, t_R) / R \, d^3rp$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $A(r,t) = \mu_0 / (4\pi) \int J(rp, t_R) / R \, d^3rp$
- 02.** $\varphi(r,t) = 1 / (4\pi \epsilon_0) \int \rho(rp, t_R) / R \, d^3rp$
- 03.** $t_R = t - R/c$
- 04.** Lorenz gauge: $\text{div } \mathbf{A} + c^{-2} d\varphi/dt = 0$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D109. 평면파와 편파

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E = \text{Re}\{E_0 \exp(i(k \cdot r - \omega t))\}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \mathbf{E} = \text{Re}\{\mathbf{E}_0 \exp(i(k \cdot \mathbf{r} - \omega t))\}$$

$$02. \mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mathbf{B}$$

$$03. \mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$04. \omega = c k \text{ in vacuum}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D110. Stokes 파라미터와 편광

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $S_0 = I_x + I_y$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $S_0 = I_x + I_y$
- 02.** $S_1 = I_x - I_y$
- 03.** $S_2 = I_{45} - I_{135}$
- 04.** $S_3 = I_R - I_L$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D111. Fresnel 계수와 경계조건

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $r_s = (n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t) / (n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. r_s = (n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t) / (n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)$$

$$02. r_p = (n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t) / (n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t)$$

$$03. n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

$$04. R = |r|^2$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D112. 다층막 전송행렬

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $[E+;E-]_{j+1}=M_j [E+;E-]_j$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $[E+;E-]_{j+1}=M_j [E+;E-]_j$
- 02.** $M = \prod_j I_j P_j$
- 03.** $P_j=\text{diag}(\exp(i k_j d_j), \exp(-i k_j d_j))$
- 04.** $T+R+A=1$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D113. Drude-Lorentz 분산

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\epsilon(\omega) = \epsilon_{\text{inf}} - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\gamma))$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $\epsilon(\omega) = \epsilon_{\text{inf}} - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\gamma))$
- 02. $\epsilon(\omega) = 1 + \sum_j f_j / (\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega)$
- 03. $n(\omega) = \sqrt{\epsilon \mu}$
- 04. Kramers-Kronig relation

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D114. 비등방·자이로트로픽 매질

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $D_i = \epsilon_{ij} E_j$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $D_i = \epsilon_{ij} E_j$
- 02.** $\det|k^2 \delta_{ij} - k_i k_j - \omega^2 \mu \epsilon_{ij}| = 0$
- 03.** n_o, n_e
- 04.** Faraday rotation angle = $V B L$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D115. 전송선 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $dV/dz = -(R+i\omega L)I$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $dV/dz = -(R+i\omega L)I$
02. $dI/dz = -(G+i\omega C)V$
03. $\gamma = \sqrt{(R+i\omega L)(G+i\omega C)}$
04. $Z_0 = \sqrt{(R+i\omega L)/(G+i\omega C)}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D116. 반사계수와 S-파라미터

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\Gamma = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $\Gamma = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0)$
- 02. $VSWR = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)$
- 03. $S_{ij} = b_i/a_j$
- 04. $P_{delivered} = P_{in}(1 - |\Gamma|^2)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D117. 도파관 모드와 차단

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $k_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon - k_c^2$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $k_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon - k_c^2$

02. $f_c = c/(2\pi) k_c$

03. TE: $\mathbf{E}_z=0$

04. TM: $\mathbf{H}_z=0$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D118. 공동공진기와 Q

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 ω_n from boundary eigenproblem 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** ω_n from boundary eigenproblem
- 02.** $Q = \omega U / P_{\text{loss}}$
- 03.** $\Delta \omega = \omega_0 / Q$
- 04.** Purcell $\sim Q / V_{\text{mode}}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D119. Hertzian dipole와 안테나

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E_\theta \sim \eta k^2 p \sin \theta \exp(ikr)/(4\pi r)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. E_\theta \sim \eta k^2 p \sin \theta \exp(ikr)/(4\pi r)$$

$$02. P_{rad} = \eta k^4 |p|^2/(12\pi)$$

$$03. R_{rad} \sim 80 \pi^2 (l/\lambda)^2$$

$$04. G=4\pi U/P_{rad}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D120. 개구 안테나와 Fourier optics

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E_{far}(k_x, k_y) \sim \text{Fourier}[E_{ap}(x, y)]$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. E_{far}(k_x, k_y) \sim \text{Fourier}\{E_{ap}(x, y)\}$$

$$02. D \sim 4\pi A_{eff}/\lambda^2$$

$$03. \theta \sim \lambda/D_{ap}$$

$$04. \text{Friis: } Pr/Pt = Gt Gr (\lambda/(4\pi R))^2$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D121. Lienard-Wiechert 장

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\phi = q/(4\pi\epsilon_0 (R - R\cdot\beta))_{ret}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\phi = q/(4\pi\epsilon_0 (R - R\cdot\beta))_{ret}$
02. $A = \beta \phi/c$
03. $E = \text{velocity field} + \text{acceleration field}$
04. $P_{Lienard} = q^2 \gamma^6 (a^2 - (\beta \times a)^2)/(6\pi\epsilon_0 c^3)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D122. 복사 반작용

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F_{AL} = q^2/(6\pi \epsilon_0 c^3) da/dt$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F_{AL} = q^2/(6\pi \epsilon_0 c^3) da/dt$

02. $\tau_0 = q^2/(6\pi \epsilon_0 m c^3)$

03. Landau-Lifshitz reduction

04. runaway/preacceleration issues

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D123. 산란과 optical theorem

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $f(\theta)$ scattering amplitude 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $f(\theta)$ scattering amplitude

02. $d\sigma/d\Omega = |f(\theta)|^2$

03. $\sigma_{tot} = (4\pi/k) \text{Im } f(0)$

04. $S = 1 + iT$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D124. Rayleigh와 Mie 산란

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\sigma_R \sim (8\pi/3) k^4 |\alpha|^2$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\sigma_R \sim (8\pi/3) k^4 |\alpha|^2$

02. $\chi = k a$

03. *Mie* coefficients a_l, b_l

04. $Q_{sca} = \sigma_{sca}/(\pi a^2)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D125. 공변 전자기학

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F_{mn} = d_m A_n - d_n A_m$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F_{mn} = d_m A_n - d_n A_m$
02. $d_m F^{mn} = \mu_0 J^n$
03. $d_a F_{bc} = 0$
04. $F_{mn} F^{mn} = 2(B^2 - c^{-2}E^2)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D126. 전자기 작용과 Noether 구조

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $S = \int d^4x \left(-\frac{1}{4\mu_0} F_{mn} F^{mn} - J_m A^m \right)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$\mathbf{01.} \quad S = \int d^4x \left(-\frac{1}{4\mu_0} \mathbf{F}_{mn} \mathbf{F}^{mn} - \mathbf{J}_m \mathbf{A}^m \right)$$

$$\mathbf{02.} \quad \delta S/dA = 0$$

$$\mathbf{03.} \quad \text{gauge } \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + d\chi$$

$$\mathbf{04.} \quad d_m \mathbf{J}^m = 0$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D127. 미분형식 표기

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F = dA$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F = dA$

02. $dF=0$

03. $d \cdot F = J$

04. $S = -1/(2\mu_0) \int F \wedge F$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D128. Dyadic Green 함수

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\text{curl curl } G - k_0^2 \epsilon(r) G = I \delta(r-rp)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$\mathbf{01.} \quad \text{curl curl } G - k_0^2 \epsilon(r) G = I \delta(r-rp)$$

$$\mathbf{02.} \quad E(r) = i \omega \mu \int G(r, rp) J(rp) d^3rp$$

$$\mathbf{03.} \quad \text{LDOS} \sim \text{Im Tr } G(r, r)$$

$$\mathbf{04.} \quad \text{reciprocity: } G(r, rp) = G^T(rp, r)$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D129. Lorentz reciprocity

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\text{div}(\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\text{div}(\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2$

02. $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{S}_{ji}$ for reciprocal network

03. $\epsilon^T = \epsilon, \mu^T = \mu$

04. $\xi^T = -\zeta$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D130. FDTD와 Yee 격자

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E^{n+1} = E^n + dt/\epsilon \text{curl } H^{n+1/2}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $E^{n+1} = E^n + dt/\epsilon \text{curl } H^{n+1/2}$
- 02. $H^{n+1/2} = H^{n-1/2} - dt/\mu \text{curl } E^n$
- 03. $c \, dt \, \sqrt{(dx^{-2} + dy^{-2} + dz^{-2})} \leq 1$
- 04. numerical dispersion relation

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D131. FEM weak form

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\int (\text{curl } \mathbf{v}) \cdot \mu^{-1}(\text{curl } \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int \mathbf{v} \cdot \epsilon \mathbf{E} dV = \int \mathbf{v} \cdot \mathbf{J} dV$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \int (\text{curl } \mathbf{v}) \cdot \mu^{-1}(\text{curl } \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int \mathbf{v} \cdot \epsilon \mathbf{E} dV = \int \mathbf{v} \cdot \mathbf{J} dV$$

02. edge elements

03. boundary terms

04. eigenfrequency problem

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D132. MoM과 적분방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E_{\text{scat}} = i \omega \mu \int G \mathbf{J}_s dS$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $E_{\text{scat}} = i \omega \mu \int G \mathbf{J}_s dS$
- 02.** $Z I = V$
- 03.** EFIE/MFIE/CFIE
- 04.** radiation condition built in

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D133. PML과 흡수경계

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 coordinate stretch $x \rightarrow \int s_x dx$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. coordinate stretch $x \rightarrow \int s_x dx$

02. $s_x = 1 + \sigma_x / (i \omega \epsilon_0)$

03. reflection $\rightarrow 0$ ideally

04. anisotropic effective medium

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D134. 역설계와 adjoint 방법

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F = \text{objective}(E, p)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F = \text{objective}(E, p)$

02. $dF/dp = \partial_p F - \lambda^T \partial_p A E$

03. $A(p)E = b$

04. $A^T \lambda = \partial_E F$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D135. Vlasov-Maxwell 플라즈마

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $df_s/dt + \mathbf{v} \cdot \text{grad } f_s + (q_s/m_s)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \text{grad}_v f_s = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \quad df_s/dt + \mathbf{v} \cdot \text{grad } f_s + (q_s/m_s)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \text{grad}_v f_s = 0$$

$$02. \quad \rho = \sum q_s \int f_s d^3v$$

$$03. \quad \mathbf{J} = \sum q_s \int \mathbf{v} f_s d^3v$$

$$04. \quad \text{Maxwell coupled}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D136. Cold plasma waves

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\omega_p^2 = n e^2 / (\epsilon_0 m)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\omega_p^2 = n e^2 / (\epsilon_0 m)$

02. $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$

03. $n^2 = \epsilon$

04. Appleton-Hartree form

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D137. MHD와 Alfven 파

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$\mathbf{01.} \quad \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$$

$$\mathbf{02.} \quad d\mathbf{B}/dt = \text{curl}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}$$

$$\mathbf{03.} \quad \rho d\mathbf{v}/dt = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \text{grad } p$$

$$\mathbf{04.} \quad \omega = k_{\text{parallel}} v_A$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D138. Metamaterial effective medium

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\mathbf{D} = \epsilon_{\text{eff}} \mathbf{E} + \xi \mathbf{H}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $\mathbf{D} = \epsilon_{\text{eff}} \mathbf{E} + \xi \mathbf{H}$
- 02.** $\mathbf{B} = \zeta \mathbf{E} + \mu_{\text{eff}} \mathbf{H}$
- 03.** n_{eff} may be negative
- 04.** unit cell $\ll \lambda$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D139. Photonic crystal band theory

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E_k(r)=u_k(r) \exp(i k \cdot r)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $E_k(r)=u_k(r) \exp(i k \cdot r)$
- 02.** $\omega_n(k)$ eigenvalue
- 03.** band gap $\Delta \omega$
- 04.** group velocity = $\text{grad}_k \omega$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D140. Topological photonics

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 Berry curvature $\Omega_n(k)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. Berry curvature $\Omega_n(k)$
- 02. $C_n = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega_n d^2k$
- 03. edge modes from bulk invariant
- 04. nonreciprocal or synthetic gauge

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D141. 열복사와 LDOS

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\Theta(\omega, T) = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $\Theta(\omega, T) = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)$
- 02. $\rho(r, \omega) \sim \text{Im Tr } G(r, r)$
- 03. $P = \int d\omega [\Theta_1 - \Theta_2] T(\omega)$
- 04. fluctuation-dissipation source

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D142. Casimir 효과와 진공 fluctuation

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F/A = -\pi^2 \hbar c / (240 a^4)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F/A = -\pi^2 \hbar c / (240 a^4)$

02. $\omega \rightarrow i \xi$

03. Lifshitz formula

04. stress tensor expectation

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D143. Lorentz 변환과 시공간 간격

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $ct' = \gamma(ct - \beta x)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $ct' = \gamma(ct - \beta x)$
02. $x' = \gamma(x - \beta ct)$
03. $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$
04. $s^2 = -c^2 t^2 + x^2 + y^2 + z^2$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D144. 4-벡터와 에너지-운동량

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $x^\mu = (ct, x, y, z)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $x^\mu = (ct, x, y, z)$

02. $p^\mu = (E/c, p)$

03. $p_\mu p^\mu = -m^2 c^2$

04. $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D145. 상대론적 action과 고유시간

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$02. S = -mc^2 \int d\tau$$

$$03. p = \gamma m v$$

$$04. L = -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - q\phi + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D146. 전자기장 텐서와 불변량

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $F^{0i} = -E_i/c$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $F^{0i} = -E_i/c$

02. $F^{ij} = -\epsilon_{ijk} B_k$

03. $\partial_\mu F^{\mu\nu} = \mu_0 J^\nu$

04. $I_1 = E^2 - c^2 B^2, I_2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D147. 상대론적 Doppler와 aberration

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\nu' = \gamma\nu(1 - \beta \cos\theta)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\nu' = \gamma\nu(1 - \beta \cos\theta)$
02. $\cos\theta' = (\cos\theta - \beta)/(1 - \beta \cos\theta)$
03. headlight effect
04. I_ν/ν^3 invariant

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D148. 등가원리와 계량

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 local free fall $\square \rightarrow$ special relativity 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. local free fall $\rightarrow$ special relativity**02.** $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ **03.** proper time $d\tau^2 = -ds^2/c^2$ **04.** gravity as geometry

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D149. 공변미분과 Christoffel 기호

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\nabla_\mu V^\nu = \partial_\mu V^\nu + \Gamma^\nu_{\mu\lambda} V^\lambda$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\nabla_\mu V^\nu = \partial_\mu V^\nu + \Gamma^\nu_{\mu\lambda} V^\lambda$
02. $\Gamma^\rho_{\mu\nu} = \frac{1}{2} g^{\rho\sigma} (\partial_\mu g_{\nu\sigma} + \partial_\nu g_{\mu\sigma} - \partial_\sigma g_{\mu\nu})$
03. $\nabla_\lambda g_{\mu\nu} = 0$
04. torsion-free $\Gamma^\rho_{\mu\nu} = \Gamma^\rho_{\nu\mu}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D150. Geodesic 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $d^2x^\mu/d\lambda^2 + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} dx^\alpha/d\lambda dx^\beta/d\lambda = 0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $d^2x^\mu/d\lambda^2 + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} dx^\alpha/d\lambda dx^\beta/d\lambda = 0$

02. $\delta \int ds = 0$

03. $u^\nu \nabla_\nu u^\mu = 0$

04. null geodesic $ds^2 = 0$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D151. 곡률 텐서

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $[\nabla_\mu, \nabla_\nu]V^\rho = R^\rho_{\sigma\mu\nu}V^\sigma$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. [\nabla_\mu, \nabla_\nu]V^\rho = R^\rho_{\sigma\mu\nu}V^\sigma$$

$$02. R_{\mu\nu} = R^\rho_{\mu\rho\nu}$$

$$03. R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$$

$$04. G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - 1/2 R g_{\mu\nu}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D152. Einstein 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$
02. $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$
03. Newtonian limit $\rightarrow \nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$
04. Λ as vacuum energy

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D153. Stress-energy tensor

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 T^{00} =energy density 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. T^{00} =energy density
02. T^{0i} =energy flux/ c
03. T^{ij} =stress
04. perfect fluid: $T^{\mu\nu}=(\rho+p/c^2)u^{\mu}u^{\nu}+p g^{\mu\nu}$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D154. Schwarzschild 해

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $ds^2 = -(1-r_s/r)c^2 dt^2 + (1-r_s/r)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $ds^2 = -(1-r_s/r)c^2 dt^2 + (1-r_s/r)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$

02. $r_s = 2GM/c^2$

03. horizon at $r=r_s$

04. effective potential for orbits

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D155. 약장 근사와 중력과

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $|h| \ll 1$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $|h| \ll 1$
02. $\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}/c^4$
03. TT gauge: h_+ , $h_\times$
04. quadrupole radiation

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D156. Kerr와 회전 블랙홀

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 parameters $M, a=J/(Mc)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. parameters $M, a=J/(Mc)$
02. ergosphere where $g_{tt}=0$
03. horizon $r_+=GM/c^2 + \sqrt{((GM/c^2)^2 - a^2)}$
04. frame dragging

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D157. FLRW 우주론

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 [d\chi^2/(1-k\chi^2) + \chi^2 d\Omega^2]$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 [d\chi^2/(1-k\chi^2) + \chi^2 d\Omega^2]$$

$$02. H = \dot{a}/a$$

$$03. H^2 = (8\pi G/3)\rho - kc^2/a^2 + \Lambda c^2/3$$

$$04. \dot{\rho} + 3H(\rho + p/c^2) = 0$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D158. 블랙홀 열역학

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$$

$$02. S_{BH} = k_B A / (4l_P^2)$$

$$03. dM = T dS + \Omega dJ + \Phi dQ$$

$$04. \text{area theorem}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D159. 상대론적 유체와 보존법칙

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\nabla_\mu T^{\mu\nu}=0$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\nabla_\mu T^{\mu\nu}=0$
02. $\nabla_\mu(\nu^\mu)=0$
03. $T^{\mu\nu}=(e+p)u^\mu u^\nu + p g^{\mu\nu}$
04. sound speed $c_s^2=\partial p/\partial e$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D160. 상태와 Born 규칙

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $|\psi\rangle$ in Hilbert space, $|\psi\rangle \sim \exp(i\alpha)|\psi\rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $|\psi\rangle$ in Hilbert space, $|\psi\rangle \sim \exp(i\alpha)|\psi\rangle$
- 02.** $P(a) = \langle \psi | P_a | \psi \rangle$
- 03.** $\langle A \rangle = \langle \psi | A | \psi \rangle$
- 04.** $\rho \geq 0, \text{Tr } \rho = 1$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D161. 힐베르트 공간과 자기수반성

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $A=A^{\dagger}$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $A=A^{\dagger}$

02. $D(A)=D(A^{\dagger})$

03. $A=\sum a P_a$

04. $U(t)=\exp(-iHt/\hbar)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D162. 브라켓과 완비성

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\langle x|xp \rangle = \delta(x-xp)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $\langle x|xp \rangle = \delta(x-xp)$
- 02. $\int dx |x\rangle \langle x| = 1$
- 03. $\langle x|p \rangle = \exp(i p x/\hbar) / \sqrt{2\pi i \hbar}$
- 04. $\psi(x) = \langle x|\psi \rangle$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 계산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D163. Schroedinger 방정식

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $i \hbar d|\psi\rangle/dt = H|\psi\rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $i \hbar d|\psi\rangle/dt = H|\psi\rangle$
02. $i \hbar d\psi/dt = [-\hbar^2/(2m)\nabla^2 + V]\psi$
03. $U(t,t_0) = T \exp[-i/\hbar \int_{t_0}^t H dt]$
04. probability conserved

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D164. 운동량 표현과 Fourier 변환

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\phi(p) = 1/\sqrt{2\pi\hbar} \int e^{-ipx/\hbar} \psi(x) dx$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \phi(p) = 1/\sqrt{2\pi\hbar} \int e^{-ipx/\hbar} \psi(x) dx$$

$$02. x \rightarrow i\hbar d/dp$$

$$03. p \rightarrow -i\hbar d/dx$$

$$04. [x, p] = i\hbar$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D165. 불확정성 관계

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\Delta A^2 \Delta B^2 \geq |\langle [A, B] \rangle|^2 / 4$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계 조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \Delta A^2 \Delta B^2 \geq |\langle [A, B] \rangle|^2 / 4$$

$$02. \Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$$

$$03. \text{Robertson-Schrodinger inequality}$$

$$04. \text{minimum uncertainty Gaussian}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schrodinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D166. 동역학 그림

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $A_H(t) = U^\dagger A_S U$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \mathbf{A}_H(t) = U^\dagger \mathbf{A}_S U$$

$$02. d\mathbf{A}_H/dt = (i/\hbar)[\mathbf{H}, \mathbf{A}_H] + \partial_t \mathbf{A}_H$$

$$03. |\psi_I\rangle = \exp(iH_0 t/\hbar) |\psi_S\rangle$$

$$04. V_I(t) = \exp(iH_0 t/\hbar) V \exp(-iH_0 t/\hbar)$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D167. 전파자와 Green 함수

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $K(x,t;xp,tp)=\langle x|U(t,tp)|xp\rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. K(x,t;xp,tp)=\langle x|U(t,tp)|xp\rangle$$

$$02. \psi(x,t)=\int K \psi(xp,tp) dxp$$

$$03. (i \hbar d_t - \mathbf{H})K = i \hbar \delta(t - tp) \delta(x - xp)$$

$$04. G(\mathbf{E}) = (\mathbf{E} - \mathbf{H} + i0)^{-1}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D168. 경로적분

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $K = \int D[x] \exp(i S[x]/\hbar)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $K = \int D[x] \exp(i S[x]/\hbar)$
02. $S = \int L dt$
03. stationary phase $\rightarrow$ classical path
04. Euclidean: $\exp(-S_E/\hbar)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D169. 밀도행렬

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\rho = \sum p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. \rho = \sum p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$$

$$02. \langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$$

$$03. \rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$$

$$04. S = -\text{Tr} \rho \log \rho$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D170. POVM과 Kraus 연산자

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $E_m = M_m^\dagger M_m$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $E_m = M_m^\dagger M_m$
02. $\sum_m E_m = 1$
03. $p_m = \text{Tr}(E_m \rho)$
04. $\rho_m = M_m \rho M_m^\dagger / p_m$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D171. 얽힘과 엔트로피

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $|\psi_{AB}\rangle \neq |\psi_A\rangle |\psi_B\rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

$$01. |\psi_{AB}\rangle \neq |\psi_A\rangle |\psi_B\rangle$$

$$02. \rho_A = \text{Tr}_B |\psi\rangle \langle \psi|$$

$$03. S_A = -\text{Tr} \rho_A \log \rho_A$$

$$04. I(A:B) = S_A + S_B - S_{AB}$$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D172. 무한·유한 우물

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\psi_n = \sqrt{2/L} \sin(n \pi x/L)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\psi_n = \sqrt{2/L} \sin(n \pi x/L)$

02. $E_n = n^2 \pi^2 \hbar^2 / (2mL^2)$

03. finite well matching

04. bound states from transcendental equation

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D173. 델타 퍼텐셜과 장벽

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $V(x)=g \delta(x)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $V(x)=g \delta(x)$

02. ψ continuous

03. $\psi(+0)-\psi(-0)$ derivative jump $= 2mg \psi(0)/\hbar^2$

04. $T = 1/(1+...)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D174. 조화진동자

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $H = \hbar \omega (a^\dagger a + 1/2)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01.** $H = \hbar \omega (a^\dagger a + 1/2)$
- 02.** $[a, a^\dagger] = 1$
- 03.** $E_n = \hbar \omega (n + 1/2)$
- 04.** $x = \sqrt{(\hbar/(2m\omega))}(a + a^\dagger)$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D175. Coherent와 squeezed state

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$
02. $\Delta x \Delta p = \hbar/2$
03. $S(z) = \exp(1/2(z \cdot a^2 - z \cdot a^{\dagger 2}))$
04. quadrature variance squeezed

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D176. 각운동량 대수

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $[J_i, J_j] = i \hbar \epsilon_{ijk} J_k$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $[J_i, J_j] = i \hbar \epsilon_{ijk} J_k$
02. $J^2 |jm\rangle = \hbar^2 j(j+1) |jm\rangle$
03. $J_z |jm\rangle = \hbar m |jm\rangle$
04. $J_{pm} |jm\rangle = \hbar \sqrt{j(j+1) - m(m \pm 1)} |j, m \pm 1\rangle$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D177. Spin 1/2와 Pauli 행렬

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $S = \hbar/2 \sigma$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $\mathbf{S} = \hbar/2 \boldsymbol{\sigma}$
02. $\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} + i \varepsilon_{ijk} \sigma_k$
03. $U(n, \theta) = \exp(-i \theta \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}/2)$
04. $|n+\rangle \langle n+| = (1 + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma})/2$

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D178. 각운동량 결합과 Wigner-Eckart

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle = \sum CG |JM\rangle$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle = \sum CG |JM\rangle$
- 02. $\langle jm | T_q^k | j' p m' \rangle = CG \times \text{reduced matrix element}$
- 03. 3j, 6j symbols
- 04. selection rules

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D179. 중심 퍼텐셜

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $\psi = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \phi)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

- 01. $\psi = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \phi)$
- 02. $u'' + [2m(E - V)/\hbar^2 - l(l+1)/r^2]u = 0$
- 03. L^2 eigenvalues
- 04. centrifugal barrier

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

대표 유도 아틀라스

D180. 수소 원자

시험과 연구노트에서 다시 만들 수 있는 유도 뼈대

목표식은 $V = -e^2/(4\pi\epsilon_0 r)$ 이다. 완전한 엄밀 증명보다, 어떤 출발점에서 어떤 근사와 경계조건을 사용했는지 복원하는 데 초점을 둔다. 같은 유도 방식은 다른 장에서도 반복된다.

목표식과 보조식.

01. $V = -e^2/(4\pi\epsilon_0 r)$

02. $E_n = -Ry/n^2$

03. $a_0 = 4\pi\epsilon_0 \hbar^2/(m e^2)$

04. degeneracy n^2

유도 뼈대. 1단계: 상태변수와 좌표계를 정한다. 2단계: 보존법칙, 변분원리, Maxwell/Schroedinger/Einstein/transport 방정식 중 적절한 출발식을 쓴다. 3단계: 경계조건과 constitutive relation을 넣는다. 4단계: 차원과 극한을 검산한다.

검산. 유도 중 표면항, gauge 조건, 정규화 조건, source-free limit 중 하나라도 빠지면 결과가 달라질 수 있다.

자가 점검. 이 유도에서 경계조건이 바뀌면 어느 줄이 가장 먼저 바뀌는지 표시하라.

Part 13

연구 문제와 논문 읽기 체크

이 Part는 공식을 실제 연구 문제로 연결하기 위한 체크리스트다. 논문을 읽거나 설계를 시작하기 전에 가정, 단위계, 경계조건, 측정 observable, benchmark를 먼저 표시한다.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R001. 차원분석과 스케일링

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

차원분석과 스케일링을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 상사법, 수치 안정성, 근사 전개에서 가장 먼저 쓰는 검산 도구다.

연구 체크식.

01. $[q]=M^a L^b T^c I^d$
02. $\Pi_i = \prod_j x_j^{\alpha_{ij}}$
03. $s_j = \partial \log q / \partial \log x_j$
04. 작은매개변수 $\varepsilon \ll 1$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R002. 벡터해석과 적분정리

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

벡터해석과 적분정리를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전자기학, 유체역학, 열전달, 파동 문제의 공통 언어다.

연구 체크식.

01. $\nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i \mathbf{A}_i$
02. $(\nabla \times \mathbf{A})_i = \varepsilon_{ijk} \partial_j \mathbf{A}_k$
03. $\int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dA$
04. $\int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{n} dA = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R003. 텐서와 Einstein 합 규약

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

텐서와 Einstein 합 규약을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 응력, 관성모멘트, 전자기장 텐서, 계량 텐서가 모두 텐서다.

연구 체크식.

01. $a_i b_i = a \cdot b$
02. $T_{ij} \rightarrow R_{ik} R_{jl} T_{kl}$
03. $\varepsilon_{ijk} \varepsilon_{ilm} = \delta_{jl} \delta_{km} - \delta_{jm} \delta_{kl}$
04. $\text{trace } T = T_{ii}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R004. 분포와 Dirac 델타

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

분포와 Dirac 델타을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 델타 함수는 “매우 큰 함수”가 아니라 선형 functional로 이해해야 안전하다.

연구 체크식.

01. $\int f(x) \delta(x-a) dx = f(a)$
02. $\delta(g(x)) = \sum \delta(x-x_i)/|g'(x_i)|$
03. $\nabla^2(1/r) = -4\pi \delta^3(r)$
04. $1/(x \pm i0) = P(1/x) \mp i\pi\delta(x)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R005. Fourier와 Laplace 변환

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Fourier와 Laplace 변환을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 분산관계, normal mode, response function, 안정성 분석의 기본이다.

연구 체크식.

01. $f(t) = \int d\omega / (2\pi) \tilde{f}(\omega) e^{-i\omega t}$

02. $\partial_t \rightarrow -i\omega, \nabla \rightarrow ik$

03. $L[f](s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$

04. convolution $\rightarrow \prod$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R006. Green 함수의 공통 구조

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Green 함수의 공통 구조를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전자기학, 양자역학, 열방정식, 유체 안정성에 같은 구조가 반복된다.

연구 체크식.

01. $L G(x, x') = \delta(x - x')$
02. $u(x) = \int G(x, x') s(x') dx' + u_{\text{hom}}$
03. $G^R(t) = \theta(t) G(t)$
04. $G(\omega) = (\omega - \mathbf{H} + i0)^{-1}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R007. 변분 원리

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

변분 원리(을)를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 고전역학, 장론, 광학, 일반상대론, 양자 경로적분의 연결축이다.

연구 체크식.

01. $\delta S=0$
02. $S=\int L(q,\dot{q},t)dt$
03. $\partial L/\partial q_i - d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i)=0$
04. $\delta F[u]=0 \rightarrow \text{Euler-Lagrange PDE}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R008. Noether 정리

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Noether 정리를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/_ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. gauge 대칭에서는 제약식과 전하 보존까지 이어진다.

연구 체크식.

01. $q_i \rightarrow q_i + \varepsilon \Delta q_i$
02. $\delta L = \varepsilon dK/dt$
03. $Q = \sum p_i \Delta q_i - K$
04. $dQ/dt = 0$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R009. 고유값과 정상모드

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

고유값과 정상모드를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 진동, 파동, 양자상태, 안정성, 공진기의 공통 언어다.

연구 체크식.

01. $A|n\rangle = \lambda_n |n\rangle$
02. $A = \sum \lambda_n |n\rangle\langle n|$
03. $f(A) = \sum f(\lambda_n) |n\rangle\langle n|$
04. $\det(A - \lambda I) = 0$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R010. Hermitian, unitary, symplectic 구조

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Hermitian, unitary, symplectic 구조를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 양자역학과 Hamilton 역학의 깊은 구조적 유사성을 보여준다.

연구 체크식.

01. $A^\dagger = A$
02. $U^\dagger U = I$
03. $M^T J M = J$
04. $J = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R011. PDE 분류와 특성곡선

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

PDE 분류와 특성곡선을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. Laplace, diffusion, wave equation을 한 가족으로 비교할 수 있다.

연구 체크식.

$$01. \mathbf{A} u_{xx} + \mathbf{B} u_{xy} + \mathbf{C} u_{yy} = 0$$

$$02. \Delta = \mathbf{B}^2 - 4\mathbf{A}\mathbf{C}$$

$$03. \Delta < 0 \text{ elliptic, } \Delta = 0 \text{ parabolic, } \Delta > 0 \text{ hyperbolic}$$

$$04. dx/ds=a, du/ds=b$$

$$05. \text{objective / observable / residual}$$

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R012. 점근해석과 stationary phase

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

점근해석과 stationary phase을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 기하광학, WKB, 경로적분, 산란 근사의 핵심이다.

연구 체크식.

01. $I(\lambda) = \int a(x) \exp(i\lambda\varphi(x)) dx$
02. $\varphi'(x_0) = 0$
03. $I(\lambda) \sim a(x_0) \exp(i\lambda\varphi_0) \sqrt{(2\pi/(\lambda|\varphi''_0|))}$
04. $\lambda \gg 1$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R013. 섭동론의 공통 뼈대

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

섭동론의 공통 뼈대/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 고전 섭동, 양자 섭동, 유체 안정성, 비선형 광학에 반복된다.

연구 체크식.

01. $L(\varepsilon)u=s, L=L_0+\varepsilon L_1+\dots$
02. $u=u_0+\varepsilon u_1+\varepsilon^2 u_2+\dots$
03. $L_0 u_0=s$
04. $L_0 u_1=-L_1 u_0$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R014. 경계층과 matched asymptotics

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

경계층과 matched asymptotics을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 유체 경계층뿐 아니라 양자 터널링, 열전달에도 같은 발상이 있다.

연구 체크식.

01. $\varepsilon y'' + a(x)y' + b(x)y = 0$
02. $X = (x - x_b)/\varepsilon^\alpha$
03. $y_{\text{outer}} \sim y_{\text{inner}}$ in overlap
04. $y \sim y_{\text{out}} + y_{\text{in}} - y_{\text{match}}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R015. 확률, cumulant, 잡음

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

확률, cumulant, 잡음을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 통계역학, 계측, 난류, 양자잡음에서 핵심 언어다.

연구 체크식.

01. $M(t) = \langle \exp(tX) \rangle$
02. $K(t) = \log M(t)$
03. $\kappa_n = d^n K / dt^n$ at 0
04. $\langle X^2 \rangle_c = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R016. 상관함수와 response

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

상관함수와 response을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 열/통계, 양자다체, 광학, 전자기 물성의 공통 측정 언어다.

연구 체크식.

01. $C_{AB}(t) = \langle \mathbf{A}(t) \mathbf{B}(0) \rangle$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar) \theta(t) \langle [\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)] \rangle$
03. $\mathbf{S}_{AB}(\omega) = \int e^{i\omega t} C_{AB}(t) dt$
04. response = variation of observable
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R017. 안정성 분석과 Lyapunov 지수

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

안정성 분석과 Lyapunov 지수를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. chaos, 유체 난류, driven system, orbital stability 에 모두 쓰인다.

연구 체크식.

01. $\dot{x}=f(x)$
02. $\delta\dot{x}=J(x)\delta x$
03. $J_{ij}=\partial f_i/\partial x_j$
04. $\lambda_L = \lim (1/t) \log |\delta x(t)|/|\delta x(0)|$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R018. Lie 군과 Lie 대수

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Lie 군과 Lie 대수를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/_frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 회전, Lorentz, gauge, canonical transformation의 공통 문법이 다.

연구 체크식.

01. $g(\varepsilon)=\exp(\varepsilon X)$
02. $[X_a,X_b]=f_{ab}^c X_c$
03. $R(n,\theta)=\exp(-i\theta n\cdot\mathbf{J}/\hbar)$
04. $Ad_g X = gXg^{-1}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R019. Newton 방정식과 운동량 보존

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Newton 방정식과 운동량 보존을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 입자계, 충돌, 로켓, 연속체 운동량 방정식의 출발점이다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$
02. $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$
03. $\Sigma \mathbf{F}_{ext} = d\mathbf{P}_{tot}/dt$
04. $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R020. 일-에너지 정리

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

일-에너지 정리를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. potential landscape와 effective potential 분석의 기본이다.

연구 체크식.

01. $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$
02. $dK/dt = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$
03. $E = K + V, \mathbf{F} = -\nabla V$
04. $dE/dt = \partial V / \partial t$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R021. 중심력과 유효 퍼텐셜

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

중심력과 유효 퍼텐셜을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 행성 궤도, Rutherford 산란, bound orbit stability에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $L = m r^2 \dot{\varphi}$
02. $E = 1/2 m \dot{r}^2 + L^2/(2mr^2) + V(r)$
03. $V_{eff} = V + L^2/(2mr^2)$
04. $d^2u/d\varphi^2 + u = -mF(1/u)/(L^2u^2)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R022. Kepler 문제와 궤도 요소

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Kepler 문제와 궤도 요소들/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. Runge-Lenz 벡터는 숨은 대칭과 degeneracy를 보여준다.

연구 체크식.

01. $V(r) = -k/r$
02. $r(\varphi) = p/(1 + e \cos \varphi)$
03. $E = -k/(2a)$
04. $T^2 = 4\pi^2 a^3/(GM)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R023. 조화진동자와 정상모드

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

조화진동자와 정상모드을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 분자진동, 회로, 광공진기, 격자 phonon의 기본 모형이다.

연구 체크식.

01. $x'' + \omega_0^2 x = 0$
02. $E = 1/2 m \dot{x}^2 + 1/2 kx^2$
03. $q_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$
04. $K a = \omega^2 M a$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R024. 감쇠와 구동 진동

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

감쇠와 구동 진동을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/_frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 공진, linewidth, susceptibility, filter 해석으로 이어진다.

연구 체크식.

01. $\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t$
02. $A(\omega) = f_0 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta\omega)^2}$
03. $Q = \omega_0 / (2\beta)$
04. phase lag $\tan \delta = 2\beta\omega / (\omega_0^2 - \omega^2)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R025. Lagrange 역학

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

Lagrange 역학을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 대칭성과 보존량을 찾는 가장 쉬운 출발점이다.

연구 체크식.

01. $L=T-V$
02. $\delta \int L dt = 0$
03. $d/dt(\partial L / \partial \dot{q}_i) - \partial L / \partial q_i = Q_i$
04. $p_i = \partial L / \partial \dot{q}_i$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R026. Hamilton 역학과 위상공간

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Hamilton 역학과 위상공간을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 통계역학, 양자화, symplectic 수치해석의 핵심 구조다.

연구 체크식.

01. $H(q,p)=p_i \dot{q}_i - L$
02. $\dot{q}_i=\partial H/\partial p_i$
03. $\dot{p}_i=-\partial H/\partial q_i$
04. $dp/dt=0$ (Liouville)
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R027. Poisson bracket과 정준변환

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Poisson bracket과 정준변환을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 양자역학의 commutator와 대응된다: $\{, \}$ $\square$ $[,]$ / $(ihbar)$.

연구 체크식.

01. $\{A, B\} = \partial A / \partial q_i \partial B / \partial p_i - \partial A / \partial p_i \partial B / \partial q_i$
02. $dA/dt = \{A, H\} + \partial A / \partial t$
03. $\{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$
04. canonical: $\{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R028. Hamilton-Jacobi 이론

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Hamilton-Jacobi 이론을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 기하광학 eikonal과 양자 WKB의 고전적 뿌리다.

연구 체크식.

01. $H(q, \partial S / \partial q, t) + \partial S / \partial t = 0$
02. $p_i = \partial S / \partial q_i$
03. $Q_i = \partial S / \partial \alpha_i$
04. $S = W(q, \alpha) - Et$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R029. 작용-각 변수

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

작용-각 변수를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 준고전 양자화와 KAM 이론의 기본 좌표다.

연구 체크식.

01. $J_i = (1/2\pi) \oint p_i dq_i$
02. $\omega_i = \partial H / \partial J_i$
03. $\theta_i(t) = \theta_i(0) + \omega_i t$
04. adiabatic invariant $J \sim \text{const}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R030. 강체와 Euler 방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

강체와 Euler 방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 자이로스코프, 세차운동, 위성 자세제어의 기본이다.

연구 체크식.

01. $L=I\omega$
02. $T=1/2 \omega \cdot I\omega$
03. $N = dL/dt$
04. $I1 \Omega \dot{\Omega}1 + (I3-I2)\Omega2\Omega3 = N1$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R031. 비관성계와 회전좌표계

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

비관성계와 회전좌표계를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 기상학, 회전유체, Foucault pendulum에 필수다.

연구 체크식.

$$01. a_{\text{inertial}} = a_{\text{rot}} + 2\Omega \times v + \Omega \times (\Omega \times r) + \Omega \dot{\times} r$$

$$02. F_{\text{cor}} = -2m\Omega \times v$$

$$03. F_{\text{cent}} = -m\Omega \times (\Omega \times r)$$

$$04. F_{\text{Euler}} = -m\Omega \dot{\times} r$$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R032. 비선형 동역학과 chaos

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

비선형 동역학과 chaos을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 혼돈은 무작위가 아니라 결정론적 불안정성이다.

연구 체크식.

01. $\dot{x}=f(x)$
02. Poincare map $x_{n+1}=P(x_n)$
03. $\lambda_L > 0 \rightarrow$ sensitive dependence
04. $S_{KS} = \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R033. Lagrange multiplier와 제약

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Lagrange multiplier와 제약을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 비홀로노믹 제약에서는 단순히 좌표만 줄이면 틀릴 수 있다.

연구 체크식.

01. $F(q,t)=0$
02. $L'=L+\lambda_a F_a$
03. $\partial L'/\partial \lambda_a = F_a = 0$
04. constraint force does no virtual work
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R034. 연속체와 탄성파

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

연속체와 탄성파를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 음향, 탄성파, 지진파, MEMS 공진기 해석으로 이어진다.

연구 체크식.

01. $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$
02. $\varepsilon_{ij} = 1/2(\partial_i u_j + \partial_j u_i)$
03. $\rho u''_i = \partial_j \sigma_{ij} + f_i$
04. $c_L = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R035. 충돌과 산란의 고전 공식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

충돌과 산란의 고전 공식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. Rutherford 산란은 양자 산란 직관의 고전적 원형이다.

연구 체크식.

01. $d\sigma = b db d\varphi / \sin\theta d\theta$
02. $d\sigma/d\Omega = b/\sin\theta |db/d\theta|$
03. impulse $\mathbf{J} = \int \mathbf{F} dt = \Delta \mathbf{p}$
04. coefficient $e = -v_{rel\text{after}}/v_{rel\text{before}}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R036. Symplectic integrator와 검산

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Symplectic integrator와 검산을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 에너지가 완벽히 보존되지 않아도 drift가 작고 위상공간 구조가 보존된다.

연구 체크식.

01. $q_{n+1}=q_{n+\Delta t} \partial H/\partial p$
02. $p_{n+1}=p_n-\Delta t \partial H/\partial q$
03. energy error bounded oscillatory
04. phase volume preserved
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R037. 열역학 제1법칙

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

열역학 제1법칙을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 미시 통계역학으로 갈 때도 에너지 보존이 첫 제약이다.

연구 체크식.

01. $dU = \delta Q - \delta W$

02. $\delta W = p dV$

03. $dU = T dS - p dV + \mu dN$

04. $C_V = (\partial U / \partial T)_V$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R038. 엔트로피와 제2법칙

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

엔트로피와 제2법칙을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 미시상태 수와 거시 irreversibility를 연결한다.

연구 체크식.

01. $dS \geq \delta Q_{rev}/T$
02. $\Delta S_{univ} \geq 0$
03. $T^{-1} = (\partial S / \partial U)_{V,N}$
04. $S = k_B \ln \Omega$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R039. 열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

열역학 퍼텐셜과 Legendre 변환을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 상전이, 화학평형, grand canonical ensemble의 기본이다.

연구 체크식.

01. $F=U-TS$
02. $G=U-TS+pV$
03. $H=U+pV$
04. $\Omega=U-TS-\mu N$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R040. Maxwell 관계

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Maxwell 관계들/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 직접 재기 어려운 엔트로피 변화를 p, V, T 측정으로 바꾼다.

연구 체크식.

01. $dF = -S dT - p dV$
02. $(\partial S / \partial V)_T = (\partial p / \partial T)_V$
03. $dG = -S dT + V dp$
04. $(\partial S / \partial p)_T = -(\partial V / \partial T)_p$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R041. 상평형과 Clapeyron 방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

상평형과 Clapeyron 방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 증기압, 융해곡선, 임계점 해석에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $\mu_\alpha(T,p)=\mu_\beta(T,p)$
02. $dp/dT = \Delta s/\Delta v$
03. $dp/dT = L/(T \Delta v)$
04. Gibbs phase rule: $f=c-p+2$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R042. Microcanonical ensemble

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Microcanonical ensemble을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. canonical ensemble은 큰 heat bath와 약하게 접촉한 부분계에서 나온다.

연구 체크식.

$$01. \Omega(E, V, N) = \text{Tr} \delta(E - H)$$

$$02. S = k_B \ln \Omega$$

$$03. 1/T = \partial S / \partial E$$

$$04. p/T = \partial S / \partial V$$

$$05. \text{objective / observable / residual}$$

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R043. Canonical ensemble

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Canonical ensemble을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 평형 통계역학의 중심 공식이다.

연구 체크식.

01. $Z = \text{Tr} \exp(-\beta H)$
02. $F = -k_B T \ln Z$
03. $\langle E \rangle = -\partial \ln Z / \partial \beta$
04. $C_V = k_B \beta^2 (\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R044. Grand canonical ensemble

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Grand canonical ensemble을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 양자기체, 흡착, 전자계, photon_gas에 필요하다.

연구 체크식.

01. $\Xi = \text{Tr} \exp[-\beta(\mathbf{H} - \mu N)]$
02. $\Omega_G = -k_B T \ln \Xi$
03. $\langle N \rangle = k_B T \partial \ln \Xi / \partial \mu$
04. $P V = k_B T \ln \Xi$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R045. 이상기체와 equipartition

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

이상기체와 equipartition을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 저온 양자계에서는 equipartition이 깨진다.

연구 체크식.

01. $pV=Nk_B T$
02. $U=3/2 Nk_B T$
03. $\langle x_i \partial H / \partial x_i \rangle = k_B T$
04. $C_V = f/2 Nk_B$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R046. Bose/Fermi 분포

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

Bose/Fermi 분포을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ _ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전자, photon, phonon, 원자기체의 기본 공식이다.

연구 체크식.

01. $n_B(\varepsilon)=1/(\exp(\beta(\varepsilon-\mu))-1)$
02. $n_F(\varepsilon)=1/(\exp(\beta(\varepsilon-\mu))+1)$
03. $Z_{\text{mode}}^B=1/(1-z e^{-\beta\varepsilon})$
04. $Z_{\text{mode}}^F=1+z e^{-\beta\varepsilon}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention 을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R047. Blackbody와 Debye 모형

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Blackbody와 Debye 모형을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 열복사, phonon 열용량, 광자기체의 기본 구조다.

연구 체크식.

01. $u(\omega) = \hbar \omega^3 / (\pi^2 c^3) / (\exp(\beta \hbar \omega) - 1)$

02. $j = \sigma T^4$

03. $C_V \propto T^3$ at low T

04. $\omega_D^3 = 6\pi^2 n c_s^3$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R048. Virial 전개와 실제기체

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

Virial 전개와 실제기체를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 희박 기체에서 실제기체 correction을 체계화한다.

연구 체크식.

01. $p/(kBT) = \rho + B_2(T)\rho^2 + B_3(T)\rho^3 + \dots$
02. $B_2 = -1/2 \int (\exp(-\beta u(r)) - 1) d^3r$
03. $Z = pV/(NkBT)$
04. *van der Waals*: $(p + a n^2)(V - Nb) = NkBT$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R049. Landau 평균장과 상전이

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Landau 평균장과 상전이를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 평균장은 보편성의 첫 근사지만 fluctuation을 과소평가한다.

연구 체크식.

01. $F(m)=F_0+a(T-T_c)m^{2+b} m^4-hm$

02. $m \propto (T_c-T)^{1/2}$

03. $\chi \propto |T-T_c|^{-1}$

04. C has jump

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R050. Ising 모형과 mean field

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

Ising 모형과 mean field을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 자성, lattice gas, binary alloy의 공통 모형이다.

연구 체크식.

01. $H = -J \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j - h \sum_i s_i$
02. $m = \tanh[\beta(zJm + h)]$
03. $k_B T_c = zJ$
04. $\chi = \partial m / \partial h$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R051. Critical scaling과 RG

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Critical scaling과 RG을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 보편성 class는 차원, 대칭성, 상호작용 범위로 정해진다.

연구 체크식.

01. $\xi \propto |t|^{-\nu}$
02. $\chi \propto |t|^{-\gamma}$
03. $m \propto (-t)^\beta$
04. $\beta_g = d \, g / d \ln b$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R052. Boltzmann 방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Boltzmann 방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 유체방정식은 Boltzmann 방정식의 moment로 얻는다.

연구 체크식.

01. $\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f + \mathbf{F}/m \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = C[f]$
02. $H = \int f \ln f d^3x d^3v$
03. $dH/dt \leq 0$
04. local equilibrium: $f_0 \propto \exp[-\beta(p-\mu)^2/2m]$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R053. Langevin과 Fokker-Planck

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Langevin과 Fokker-Planck을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. Brownian motion, mesoscopic transport, 계측 잡음에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $m \dot{v} = -\gamma v + \eta(t)$
02. $\langle \eta(t) \eta(t') \rangle = 2\gamma k_B T \delta(t-t')$
03. $\partial_t P = -\partial_x (AP) + 1/2 \partial_x^2 (BP)$
04. $D = k_B T / \gamma$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R054. Kubo와 fluctuation-dissipation

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Kubo와 fluctuation-dissipation을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전도도, susceptibility, noise spectroscopy의 핵심이다.

연구 체크식.

01. $\delta \langle \mathbf{A}(t) \rangle = \int \chi_{AB}^R(t-t') f(t') dt'$
02. $\chi_{AB}^R(t) = -(i/\hbar) \theta(t) \langle [\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(0)] \rangle$
03. $\mathbf{S}(\omega) = 2\hbar / (1 - e^{-\beta \hbar \omega}) \text{Im} \chi^R(\omega)$
04. classical: $\mathbf{S}(\omega) = 2kBT \chi''(\omega) / \omega$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R055. Jarzynski와 비평형 일

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

Jarzynski와 비평형 일을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 작은계 열역학과 single molecule 실험의 기본 결과다.

연구 체크식.

01. $\langle \exp(-\beta W) \rangle = \exp(-\beta \Delta F)$
02. $W = \int \partial \mathbf{H} / \partial \lambda \dot{\lambda} dt$
03. Crooks: $P_F(W)/P_R(-W) = \exp[\beta(W - \Delta F)]$
04. $\langle W \rangle = \Delta F$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R056. 정보와 열역학

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

정보와 열역학을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 계측, feedback, 양자정보, Maxwell demon 문제의 언어다.

연구 체크식.

01. $S_{VN} = -k_B \text{Tr } \rho \ln \rho$
02. $I(X:Y) = S_{X+SY} - S_{XY}$
03. Landauer: $Q \geq k_B T \ln 2$
04. relative entropy $D(\rho||\sigma) \geq 0$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R057. 연속체 가정과 물질미분

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

연속체 가정과 물질미분을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. Knudsen 수가 커지면 continuum Navier-Stokes가 깨진다.

연구 체크식.

01. $D/Dt = \partial/\partial t + u \cdot \nabla$
02. $\rho(x,t), u(x,t), p(x,t)$
03. $Kn = \lambda_{mfp}/L \ll 1$
04. $Re = \rho UL/\mu$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R058. 질량보존과 연속방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

질량보존과 연속방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 모든 유체 계산의 첫 번째 검산식이다.

연구 체크식.

01. $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$
02. incompressible: $\nabla \cdot u = 0$
03. $D\rho/Dt = -\rho \nabla \cdot u$
04. mass flux = $\rho u \cdot n$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R059. Cauchy 응력과 운동량 보존

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Cauchy 응력과 운동량 보존을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. solid mechanics와 fluid mechanics가 같은 연속체 언어를 쓴다.

연구 체크식.

01. $\rho Du/Dt = \nabla \cdot \sigma + \rho b$
02. $\sigma = -pI + \tau$
03. $\tau = \mu(\nabla u + \nabla u^T) + \lambda(\nabla \cdot u)I$
04. traction $t = \sigma \cdot n$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R060. Navier-Stokes 방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Navier-Stokes 방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 비선형 advection과 점성 diffusion의 경쟁이 유체 현상을 만든다.

연구 체크식.

01. $\rho(\partial_t u + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f$
02. $\nabla \cdot u = 0$
03. $\nu = \mu / \rho$
04. energy dissipation $\varepsilon = 2\nu \mathbf{S}_{ij} \mathbf{S}_{ij}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R061. Euler 방정식과 Bernoulli

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Euler 방정식과 Bernoulli을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 날개, 노즐, 수면파의 첫 근사다.

연구 체크식.

01. $\rho Du/Dt = -\nabla p + \rho g$
02. $\partial_t \varphi + 1/2 |\nabla \varphi|^2 + p/\rho + gz = \text{const}$
03. steady streamline: $p + 1/2 \rho u^2 + \rho gz = \text{const}$
04. irrotational: $u = \nabla \varphi$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R062. Vorticity와 Kelvin 정리

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Vorticity와 Kelvin 정리를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 난류, 경계층, 양력, 지구유체의 핵심 변수다.

연구 체크식.

01. $\omega = \nabla \times u$
02. $D\omega/Dt = (\omega \cdot \nabla)u + \nu \nabla^2 \omega$
03. $\Gamma = \oint u \cdot dl$
04. $D\Gamma/Dt = 0$ for inviscid barotropic conservative force
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R063. Stokes 유동과 low Re

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Stokes 유동과 low Re을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 미생물, microfluidics, colloid dynamics의 기본이다.

연구 체크식.

01. $Re \ll 1$
02. $0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f$
03. $\nabla \cdot u = 0$
04. sphere drag $\mathbf{F} = 6\pi\mu a \mathbf{U}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R064. 경계층과 Blasius

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

경계층과 Blasius을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ _ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. drag, separation, heat transfer의 핵심이다.

연구 체크식.

01. $\delta \sim L/\sqrt{\text{Re}_L}$
02. $u\partial_x u + v\partial_y u = U dU/dx + \nu \partial_y^2 u$
03. $\eta = y \sqrt{U/(\nu x)}$
04. $f''' + 1/2 f f'' = 0$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R065. Poiseuille와 pipe flow

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Poiseuille와 pipe flow을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전자회로의 저항과 유체 저항을 비교할 수 있다.

연구 체크식.

01. $u(r)=\Delta p/(4\mu L)(R^2-r^2)$
02. $Q=\pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$
03. $\tau_w=R \Delta p/(2L)$
04. $f_D=64/\text{Re}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R066. Lubrication 근사

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

Lubrication 근사를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/_frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 베어링, 코팅, MEMS, 생체유험에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $h/L \ll 1$
02. $\partial p / \partial z \sim 0$
03. $\partial p / \partial x = \mu \partial^2 u / \partial z^2$
04. $\partial / \partial x (h^3 \partial p / \partial x) = 6 \mu U \partial h / \partial x$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R067. 표면장력과 capillary 현상

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

표면장력과 capillary 현상을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 방울, 젖음, inkjet, microfluidics의 핵심이다.

연구 체크식.

01. $\Delta p = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$
02. $Ca = \mu U / \gamma$
03. $Bo = \rho g L^2 / \gamma$
04. $l_c = \sqrt{\gamma / (\rho g)}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R068. 압축성 Euler와 Mach 수

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

압축성 Euler와 Mach 수을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 노즐, 충격파, 항공우주, 폭발 유동의 기본이다.

연구 체크식.

01. $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0$
02. $\partial_t (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u + p I) = 0$
03. $M = U/c_s$
04. $c_s^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R069. 충격파와 Rankine-Hugoniot

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

충격파와 Rankine-Hugoniot을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 초음속 유동과 폭발파 해석에서 필수다.

연구 체크식.

01. $[\rho u_n]=0$
02. $[\rho u_n^{2+p}]=0$
03. $[(E+p)u_n]=0$
04. entropy increases across shock
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R070. 난류와 Kolmogorov scaling

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

난류와 Kolmogorov scaling을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 난류 모델링, LES/DNS, 혼합 문제의 기준이다.

연구 체크식.

- 01. $Re \gg 1$
- 02. $E(k) \sim C \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$
- 03. $\eta_K = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$
- 04. $u_l \sim (\varepsilon l)^{1/3}$
- 05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R071. RANS와 closure 문제

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

RANS와 closure 문제를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 산업 CFD의 대부분은 closure model을 쓴다.

연구 체크식.

01. $u=U+u'$
02. $\partial_t U + U \cdot \nabla U = -\nabla P/\rho + \nu \nabla^2 U - \nabla \cdot \langle u' u' \rangle$
03. Reynolds stress $\tau_R = -\rho \langle u' u' \rangle$
04. eddy viscosity ν_t
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R072. 선형 안정성: Orr-Sommerfeld

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

선형 안정성: Orr-Sommerfeld을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 층류-난류 천이의 수학적 시작점이다.

연구 체크식.

01. $u=U(y)+u'$
02. $u' \propto \exp[i(\alpha x - \omega t)]$
03. $(D^2 - \alpha^2)^2 \varphi = i\alpha Re[(U-c)(D^2 - \alpha^2) - U'']\varphi$
04. $\text{Im } \omega > 0$ unstable
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R073. 회전유체와 geostrophic balance

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

회전유체와 geostrophic balance을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 대기, 해양, 행성유체의 기본 구조다.

연구 체크식.

01. $Ro = U/(fL)$
02. $f \times u = -\nabla p / \rho$
03. Taylor–Proudman: $\partial u / \partial z \sim 0$
04. $PV = (\zeta + f)/h$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R074. Shallow water 방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Shallow water 방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 쓰나미, 조석, hydraulic jump의 첫 모델이다.

연구 체크식.

01. $\partial_t h + \nabla \cdot (hu) = 0$
02. $\partial_t u + u \cdot \nabla u = -g \nabla h$
03. $c = \sqrt{gh}$
04. $Fr = U/\sqrt{gh}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R075. MHD와 Alfvén 파

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

MHD와 Alfvén 파를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 플라즈마, 액체금속, 태양풍, fusion 연구와 연결된다.

연구 체크식.

01. $\partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$
02. $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
03. $\rho D\mathbf{u}/Dt = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$
04. $v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R076. Fermat 원리와 eikonal

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Fermat 원리와 eikonal을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 기하광학은 파동방정식의 WKB 극한이다.

연구 체크식.

01. $\delta \int n \, ds = 0$
02. $|\nabla S|^2 = n^2$
03. $k = \nabla S$
04. ray: $d/ds(n \, dr/ds) = \nabla n$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R077. ABCD 행렬과 Gaussian optics

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

ABCD 행렬과 Gaussian optics을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 렌즈계, resonator, Gaussian beam 설계의 빠른 언어다.

연구 체크식.

01. $[r2, \theta2]^T = [[\mathbf{A}, \mathbf{B}], [\mathbf{C}, \mathbf{D}]] [r1, \theta1]^T$

02. thin lens: $[[1, 0], [-1/f, 1]]$

03. free space: $[[1, L], [0, 1]]$

04. $q2 = (Aq1 + B) / (Cq1 + D)$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R078. 렌즈 공식과 수차

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

렌즈 공식과 수차를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/_ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 실제 영상계는 회절과 수차가 함께 resolution을 제한한다.

연구 체크식.

01. $1/s + 1/s' = 1/f$
02. $m = -s'/s$
03. $NA = n \sin \theta$
04. diffraction limit $\sim 0.61\lambda/NA$
05. objective / observable / residual

유도 빼대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R079. Jones 벡터와 Stokes 파라미터

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Jones 벡터와 Stokes 파라미터를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 광통신, 현미경, ellipsometry, 양자광학에 연결된다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{E}=[E_x, E_y]^T$
02. $S0=|E_x|^2+|E_y|^2$
03. $S1=|E_x|^2-|E_y|^2$
04. $S2=2\text{Re } E_x E_y^*, S3=2\text{Im } E_x E_y^*$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R080. Fresnel 계수와 경계조건

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Fresnel 계수와 경계조건을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 박막, 코팅, 도파관, 전자기학 파동 모듈과 직접 연결된다.

연구 체크식.

01. $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$
02. $r_s = (n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2) / (n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2)$
03. $r_p = (n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2) / (n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2)$
04. $R = |r|^2$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R081. 다층막 transfer matrix

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

다층막 transfer matrix을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. AR coating, Bragg mirror, photonic crystal의 1D 원형이다.

연구 체크식.

01. $[E+;E-]_{j+1}=M_j [E+;E-]_j$
02. phase $\delta_j=k_0 n_j d_j \cos\theta_j$
03. quarter-wave stack
04. stop band from periodic phase
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R082. Fraunhofer 회절

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

Fraunhofer 회절을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 분광기, aperture synthesis, Fourier optics의 출발점이다.

연구 체크식.

01. $U(P) \propto F\{\text{aperture}\}(k_x, k_y)$
02. single slit: $I \propto \text{sinc}^2(\pi a \sin\theta/\lambda)$
03. Airy disk radius $1.22\lambda f/D$
04. grating: $d \sin\theta = m\lambda$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R083. Fresnel 회절과 near field

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Fresnel 회절과 near field을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. near-field optics와 beam propagation의 기본이다.

연구 체크식.

01. $U(P) = \int_{\text{aperture}} \exp(ik(r+r'))/(rr') dA$

02. Fresnel number $N_F = a^2/(\lambda z)$

03. quadratic phase matters

04. Cornu spiral for edge

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R084. PSF, OTF, 해상도

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

PSF, OTF, 해상도를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 현미경, 카메라, lithography, computational imaging의 언어다.

연구 체크식.

01. $\text{image} = \text{object} \cdot \text{PSF}$
02. $\text{OTF} = \text{Fourier transform of PSF}$
03. $\text{MTF} = |\text{OTF}|$
04. Abbe: $d \sim \lambda / (2\text{NA})$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R085. Coherence와 Van Cittert-Zernike

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Coherence와 Van Cittert-Zernike을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 천문 간섭계와 coherence imaging의 기본 정리다.

연구 체크식.

01. $\Gamma_{12} = \langle \mathbf{E}_1(t) \mathbf{E}_2(t) \rangle$
02. $g_{12} = \Gamma_{12} / \sqrt{I_1 I_2}$
03. visibility $V = 2|\Gamma_{12}| / (I_1 + I_2)$
04. spatial coherence = Fourier transform of source intensity
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R086. Fabry-Perot와 laser cavity

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Fabry-Perot와 laser cavity을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. laser, filter, sensing cavity, cavity QED의 기본이다.

연구 체크식.

- 01. $FSR=c/(2nL)$
- 02. $Finesse=FSR/linewidth$
- 03. resonance: $2nL=m\lambda$
- 04. threshold: gain = loss
- 05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R087. Gaussian beam

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

Gaussian beam을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. laser optics, fiber coupling, resonator mode에 필수다.

연구 체크식.

01. $w(z)=w_0 \sqrt{1+(z/z_R)^2}$
02. $z_R=\pi w_0^2/\lambda$
03. $R(z)=z[1+(z_R/z)^2]$
04. Gouy phase $\psi=\arctan(z/z_R)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R088. Optical fiber와 waveguide

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Optical fiber와 waveguide을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 광통신과 integrated photonics의 중심 모델이다.

연구 체크식.

01. $V=(2\pi a/\lambda) \text{ NA}$
02. single mode if $V<2.405$
03. $\beta(\omega)$ dispersion
04. $D=-(2\pi c/\lambda^2) d^2\beta/d\omega^2$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R089. 비선형 편광과 phase matching

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

비선형 편광과 phase matching을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. SHG, OPA, Kerr lensing, frequency comb의 기본이다.

연구 체크식.

01. $P = \epsilon_0(\chi^1 E + \chi^2 E^2 + \chi^3 E^3 + \dots)$
02. 2ω generation: $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_\omega$
03. efficiency $\propto \text{sinc}^2(\Delta k L/2)$
04. n_2 effect: $\Delta n = n_2 I$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R090. NLSE와 soliton

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

NLSE와 soliton을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 광섬유 통신, supercontinuum, nonlinear wave 연구에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $i\partial_z A - \beta^2/2 \partial_t^2 A + \gamma|A|^2 A = 0$
02. dispersion length $L_D = T_0^2/|\beta^2|$
03. nonlinear length $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$
04. soliton if $L_D \sim L_{NL}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R091. Photonic crystal과 위상광학

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Photonic crystal과 위상광학을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. topological_photonics, slow light, metamaterial 연구로 이어진다.

연구 체크식.

01. $E_k(r)=u_k(r) \exp(ik \cdot r)$
02. band gap from periodic $\varepsilon(r)$
03. Berry curvature $\Omega_n(k)=\nabla_{kx} A_n$
04. $C=(1/2\pi)\int \Omega d^2k$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R092. Maxwell 방정식의 네 줄

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Maxwell 방정식의 네 줄을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전기회로, 전송선, 안테나, 광학, 플라즈마가 모두 이 네 줄의 서로 다른 극한이다.

연구 체크식.

01. $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$
02. $\text{div } \mathbf{B} = 0$
03. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$
04. $\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 d\mathbf{E}/dt$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R093. 전하보존과 게이지 구조

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

전하보존과 게이지 구조를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 게이지는 물리량의 중복 표현이며 수치해석에서는 조건 선택이 안정성과 직접 연결된다.

연구 체크식.

01. $d\rho/dt + \text{div } \mathbf{J} = 0$
02. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$
03. $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - d\mathbf{A}/dt$
04. $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \text{grad } \chi, \varphi \rightarrow \varphi - d\chi/dt$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R094. Coulomb 법칙과 Gauss 법칙

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Coulomb 법칙과 Gauss 법칙을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전기장 문제는 회로의 전압·전하·정전용량 문제로 자주 축약된다.

연구 체크식.

01. $E(r) = 1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(rp)(r-rp)/|r-rp|^3 d^3rp$
02. $\oint E \cdot da = Q_{enc}/\epsilon_0$
03. $\text{div } E = \rho/\epsilon_0$
04. $F = qE$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R095. Poisson/Laplace 방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Poisson/Laplace 방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 반도체 소자, 정전용량, 접지 구조, MEMS 전기력 계산의 기본 방정식이다.

연구 체크식.

01. $E = -\text{grad } \varphi$
02. $\text{nabla}^2 \varphi = -\rho/\epsilon_0$
03. $\text{nabla}^2 \varphi = 0$ in source-free region
04. $G(r, r_p) = 1/(4\pi|r - r_p|)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R096. 유일성 정리와 에너지 방법

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

유일성 정리와 에너지 방법을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 수치 전자기학에서는 같은 정리로 mesh 해의 신뢰도를 점검한다.

연구 체크식.

$$01. \int_V |\text{grad } \psi|^2 dV = \oint \psi d_n \psi da - \int \psi \nabla^2 \psi$$

$$02. \phi_1 - \phi_2 = \psi$$

03. Dirichlet or Neumann boundary

$$04. U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 dV$$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R097. 영상법

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

영상법을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전극 설계와 AFM/STM 근처 정전기력의 직관을 만든다.

연구 체크식.

01. $\varphi = \sum_i q_i / (4\pi\epsilon_0 |r-r_i|)$
02. $q_{\text{image}} = -q$ for grounded plane
03. $q_{\text{image}} = -q a/d$ for grounded sphere
04. force from image field
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R098. 다중극 전개

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

다중극 전개를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 안테나, 분자 분극, 산란 이론에서 원거리장을 분류하는 표준 언어다.

연구 체크식.

01. $1/|r-rp| = 1/r + rp \cdot r/r^3 + \dots$
02. $p = \int r \rho(r) d^3r$
03. $\varphi_{dip} = p \cdot \hat{r} / (4\pi \epsilon_0 r^2)$
04. $Q_{ij} = \int \rho(3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) d^3r$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R099. 정전기 에너지와 정전용량

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

정전기 에너지와 정전용량을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 축전기, interconnect, RF MEMS, 터치 센서 해석에 바로 쓰인다.

연구 체크식.

01. $U = 1/2 \int \rho \phi d^3r$
02. $U = \epsilon_0/2 \int |\mathbf{E}|^2 d^3r$
03. $Q = C V$
04. C_{ij} matrix relation $Q_i = \sum_j C_{ij} V_j$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R100. 유전체와 분극

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

유전체와 분극을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 커패시터, 절연막, 고유전을 재료, 반도체 게이트 산화막의 물리와 연결된다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$

02. $\rho_b = -\text{div } \mathbf{P}$

03. $\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n}$

04. $\mathbf{D}_{\text{perp jump}} = \sigma_{\text{free}}$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R101. 국소장과 Clausius-Mossotti

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

국소장과 Clausius-Mossotti을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 분자 물질, 유전체 분산, metamaterial effective medium 판단에 쓴다.

연구 체크식.

01. $P = N \alpha \mathbf{E}_{loc}$
02. $(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2) = N \alpha / (3 \epsilon_0)$
03. $\mathbf{E}_{loc} = \mathbf{E} + P / (3 \epsilon_0)$
04. $\chi_e = P / (\epsilon_0 \mathbf{E})$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R102. Biot-Savart와 Ampere 법칙

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Biot-Savart와 Ampere 법칙을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 인덕터, 전류센서, 모터, 자기장 shielding의 출발점이다.

연구 체크식.

$$01. \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3 d^3r'$$

$$02. \text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

$$03. \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

$$04. \mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$05. \text{objective / observable / residual}$$

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R103. 벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

벡터퍼텐셜과 Coulomb 게이지를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 코일 설계, 자기 벡터퍼텐셜 FEM, Aharonov-Bohm 효과의 공통 언어다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A}$
02. $\text{curl curl } \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}$
03. $\text{div } \mathbf{A} = 0$
04. $\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| d^3r'$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R104. 자기쌍극자와 자성체

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

자기쌍극자와 자성체를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 스핀 자기모멘트, 자기센서, ferrite, magnetic memory의 고전적 언어다.

연구 체크식.

01. $m = I a n$
02. $\tau = m \times \mathbf{B}$
03. $U = -m \cdot \mathbf{B}$
04. $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R105. Faraday 유도와 준정적 근사

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Faraday 유도와 준정적 근사를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 변압기, 인덕터, 무선전력, eddy current 손실의 출발점이다.

연구 체크식.

01. $\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\Phi_B/dt$
02. $\text{curl } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$
03. $L I = \Phi_B$
04. $V_L = L dI/dt$
05. objective / observable / residual

유도 빼대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R106. 피부효과와 전하완화

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

피부효과와 전하완화를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. RF 손실, 도파관 도체 손실, PCB 고속신호 표피효과와 직결된다.

연구 체크식.

01. $\delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$

02. $\tau = \varepsilon/\sigma$

03. $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

04. $\nabla^2 \mathbf{H} = i \omega \mu \sigma \mathbf{H}$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R107. Poynting 정리와 응력텐서

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Poynting 정리와 응력텐서를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 안테나 출력, 복사압, 광집계, 전력 흐름 시각화에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $u = 1/2(\epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2/\mu_0)$
02. $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$
03. $d u/dt + \text{div } \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$
04. $T_{ij} = \epsilon_0(\mathbf{E}_{iEj} - 1/2 \mathbf{E}^2 \delta_{ij}) + \dots$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R108. 자연 퍼텐셜

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

자연 퍼텐셜을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 안테나와 복사 문제에서 near/far field를 분리하는 출발점이다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{A}(r,t) = \mu_0 / (4\pi) \int \mathbf{J}(rp, t_R) / R \, d^3rp$
02. $\varphi(r,t) = 1 / (4\pi \epsilon_0) \int \rho(rp, t_R) / R \, d^3rp$
03. $t_R = t - R/c$
04. Lorenz gauge: $\text{div } \mathbf{A} + c^{-2} d\varphi/dt = 0$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R109. 평면파와 편파

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

평면파와 편파를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 무선통신, 광통신, 레이더, 편광소자 해석의 기본 언어다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{E} = \text{Re}\{\mathbf{E}_0 \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))\}$
02. $\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mathbf{B}$
03. $\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$
04. $\omega = c k$ in vacuum
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R110. Stokes 파라미터와 편광

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Stokes 파라미터와 편광을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 광통신 편광모드분산, ellipsometry, 광학 계측에 쓰인다.

연구 체크식.

- 01. $S_0 = I_x + I_y$
- 02. $S_1 = I_x - I_y$
- 03. $S_2 = I_{45} - I_{135}$
- 04. $S_3 = I_R - I_L$
- 05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R111. Fresnel 계수와 경계조건

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Fresnel 계수와 경계조건을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 박막코팅, 광섬유, RF 경계면, 레이저 cavity에 반복된다.

연구 체크식.

01. $r_s = (n1 \cos \theta_i - n2 \cos \theta_t) / (n1 \cos \theta_{i+n2} \cos \theta_t)$
02. $r_p = (n2 \cos \theta_i - n1 \cos \theta_t) / (n2 \cos \theta_{i+n1} \cos \theta_t)$
03. $n1 \sin \theta_i = n2 \sin \theta_t$
04. $R = |r|^2$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R112. 다층막 전송행렬

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

다층막 전송행렬을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. AR coating, Bragg mirror, photonic stack 설계의 핵심이다.

연구 체크식.

01. $[E+;E-]_{j+1}=M_j [E+;E-]_j$
02. $M = \prod_j I_j P_j$
03. $P_j=\text{diag}(\exp(i k_j d_j), \exp(-i k_j d_j))$
04. $T+R+A=1$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R113. Drude-Lorentz 분산

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Drude□Lorentz 분산을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 금속, 플라즈마, polariton, metamaterial의 분산 모델로 쓰인다.

연구 체크식.

01. $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{inf} - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\gamma))$
02. $\varepsilon(\omega) = 1 + \sum_j f_j / (\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega)$
03. $n(\omega) = \sqrt{\varepsilon \mu}$
04. Kramers-Kronig relation
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R114. 비등방·자이로트로픽 매질

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

비등방·자이로트로픽 매질을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 편광소자, isolator, magneto-optic modulator, anisotropic metasurface에 쓰인다.

연구 체크식.

- 01. $\mathbf{D}_i = \varepsilon_{ij} \mathbf{E}_j$
- 02. $\det|k^2 \delta_{ij} - k_i k_j - \omega^2 \mu \varepsilon_{ij}| = 0$
- 03. n_o, n_e
- 04. Faraday rotation angle = $V \mathbf{B} L$
- 05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R115. 전송선 방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

전송선 방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. PCB, coax, RF feed, high-speed digital interconnect의 핵심 모델이다.

연구 체크식.

01. $dV/dz = -(R+i\omega L)I$
02. $dI/dz = -(G+i\omega C)V$
03. $\gamma = \sqrt{(R+i\omega L)(G+i\omega C)}$
04. $Z_0 = \sqrt{(R+i\omega L)/(G+i\omega C)}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R116. 반사계수와 S-파라미터

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

반사계수와 S-파라미터를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. VNA 측정, RF matching, microwave filter 설계의 언어다.

연구 체크식.

01. $\Gamma = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0)$
02. $VSWR = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|)$
03. $S_{ij} = b_i / a_j$
04. $P_{delivered} = P_{in}(1 - |\Gamma|^2)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R117. 도파관 모드와 차단

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

도파관 모드와 차단을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 마이크로파 도파관, 집적광학, cavity feed 설계에 사용된다.

연구 체크식.

01. $k_z^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - k_c^2$

02. $f_c = c/(2\pi) k_c$

03. TE: $\mathbf{E}_z=0$

04. TM: $\mathbf{H}_z=0$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R118. 공동공진기와 Q

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

공동공진기와 Q을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 마이크로파 cavity, laser resonator, quantum emitter enhancement에 중요하다.

연구 체크식.

01. ω_n from boundary eigenproblem
02. $Q = \omega U / P_{\text{loss}}$
03. $\Delta \omega = \omega_0 / Q$
04. Purcell $\sim Q / V_{\text{mode}}$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R119. Hertzian dipole와 안테나

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Hertzian dipole와 안테나을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 안테나 설계의 가장 기본적인 방사패턴과 스케일 법칙이다.

연구 체크식.

01. $E_{\theta} \sim \eta k^2 p \sin \theta \exp(ikr)/(4\pi r)$

02. $P_{rad} = \eta k^4 |p|^2/(12\pi)$

03. $R_{rad} \sim 80 \pi^2 (l/\lambda)^2$

04. $G=4\pi U/P_{rad}$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R120. 개구 안테나와 Fourier optics

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

개구 안테나와 Fourier optics을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 레이더 안테나, 렌즈, 광학 영상계가 같은 수학을 공유한다.

연구 체크식.

$$01. \mathbf{E}_{far}(kx, ky) \sim \text{Fourier}\{\mathbf{E}_{ap}(x, y)\}$$

$$02. \mathbf{D} \sim 4\pi \mathbf{A}_{eff}/\lambda^2$$

$$03. \theta \sim \lambda/\mathbf{D}_{ap}$$

$$04. \text{Friis: } Pr/Pt = Gt Gr (\lambda/(4\pi R))^2$$

$$05. \text{objective / observable / residual}$$

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R121. Lienard-Wiechert 장

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Lienard-Wiechert 장을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. synchrotron radiation, accelerator physics, relativistic antenna 문제의 출발점이다.

연구 체크식.

01. $\varphi = q/(4\pi\epsilon_0 (R - R\cdot\beta))_{ret}$
02. $A = \beta \varphi/c$
03. E = velocity field + acceleration field
04. $P_{Lienard} = q^2 \gamma^6 (a^2 - (\beta \times a)^2)/(6\pi\epsilon_0 c^3)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R122. 복사 반작용

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

복사 반작용을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 강장 레이저□전자 상호작용과 고전 전자 반작용의 한계 검토에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $F_{AL} = q^2/(6\pi \epsilon_0 c^3) d a/dt$
02. $\tau_0 = q^2/(6\pi \epsilon_0 m c^3)$
03. Landau-Lifshitz reduction
04. runaway/preacceleration issues
05. objective / observable / residual

유도 빼대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R123. 산란과 optical theorem

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

산란과 optical theorem을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 레이더 단면적, 광산란, 양자 산란의 공통 구조다.

연구 체크식.

01. $f(\theta)$ scattering amplitude
02. $d\sigma/d\Omega = |f(\theta)|^2$
03. $\sigma_{tot} = (4\pi/k) \text{Im } f(0)$
04. $S = 1 + iT$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R124. Rayleigh와 Mie 산란

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Rayleigh와 Mie 산란을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 대기광학, nanoparticle_sensing, colloid_optics, radar_scattering에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $\sigma_R \sim (8\pi/3) k^4 |\alpha|^2$
02. $x = k a$
03. Mie coefficients a_l, b_l
04. $Q_{sca} = \sigma_{sca}/(\pi a^2)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R125. 공변 전자기학

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

공변 전자기학을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 상대론, 입자가속기, 장론, 고에너지 물리로 넘어가는 관문이다.

연구 체크식.

01. $F_{mn} = d_m A_n - d_n A_m$
02. $d_m F^{mn} = \mu_0 J^n$
03. $d_a F_{bc} = 0$
04. $F_{mn} F^{mn} = 2(B^2 - c^{-2}E^2)$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R126. 전자기 작용과 Noether 구조

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

전자기 작용과 Noether 구조을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. QED, Yang-Mills 이론, 현대 field theory 표기의 시작점이다.

연구 체크식.

$$01. S = \int d^4x \left(-1/(4\mu_0) \mathbf{F}_{mn} \mathbf{F}^{mn} - \mathbf{J}_m \mathbf{A}^m \right)$$

$$02. \delta S/dA = 0$$

$$03. \text{gauge } \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + d\chi$$

$$04. d_m \mathbf{J}^m = 0$$

$$05. \text{objective / observable / residual}$$

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R127. 미분형식 표기

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

미분형식 표기를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 일반상대론 배경, topological field theory, metamaterial geometry에 유용하다.

연구 체크식.

01. $F = dA$
02. $dF=0$
03. $d \cdot F = J$
04. $S = -1/(2\mu_0) \int F \wedge \star F$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R128. Dyadic Green 함수

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Dyadic Green 함수을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 나노포토닉스, 방출률, thermal radiation, inverse design의 핵심 도구다.

연구 체크식.

01. $\text{curl curl } G - k_0^2 \epsilon(r) G = I \delta(r-rp)$

02. $E(r) = i \omega \mu \int G(r, rp) J(rp) d^3rp$

03. $\text{LDOS} \sim \text{Im Tr } G(r, r)$

04. reciprocity: $G(r, rp) = G^T(rp, r)$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R129. Lorentz reciprocity

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Lorentz reciprocity을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 안테나 송수신 등가성, microwave network, photonic device 설계에 중요하다.

연구 체크식.

01. $\text{div}(\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2$

02. $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{S}_{ji}$ for reciprocal network

03. $\epsilon^T = \epsilon, \mu^T = \mu$

04. $\xi^T = -\zeta$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R130. FDTD와 Yee 격자

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

FDTD와 Yee 격자를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 안테나 transient, photonics, EMC, scattering simulation에 널리 쓰인다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + dt/\epsilon \text{ curl } \mathbf{H}^{n+1/2}$
02. $\mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - dt/\mu \text{ curl } \mathbf{E}^n$
03. $c \, dt \, \sqrt{(dx^{-2} + dy^{-2} + dz^{-2})} \leq 1$
04. numerical dispersion relation
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R131. FEM weak form

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

FEM weak form을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/_frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 상용 EM solver의 중심축이며 waveguide/cavity/eigenmode 문제에 강하다.

연구 체크식.

$$01. \int_V (\text{curl } \mathbf{v}) \cdot \mu^{-1} (\text{curl } \mathbf{E}) dV - \omega^2 \int_V \mathbf{v} \cdot \epsilon \mathbf{E} dV = \int_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{J}$$

02. edge elements

03. boundary terms

04. eigenfrequency problem

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R132. MoM과 적분방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

MoM과 적분방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 안테나, 레이더 단면적, open-region scattering에 유리하다.

연구 체크식.

- 01.** $E_{\text{scat}} = i \omega \mu \int G \mathbf{J}_s dS$
- 02.** $Z I = V$
- 03.** EFIE/MFIE/CFIE
- 04.** radiation condition built in
- 05.** objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R133. PML과 흡수경계

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

PML과 흡수경계를/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/_frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. FDTD/FEM 모두에서 방사조건을 구현하는 핵심 기술이다.

연구 체크식.

01. coordinate stretch $x \rightarrow \int s_x dx$

02. $s_x = 1 + \sigma_x/(i \omega \epsilon_0)$

03. reflection $\rightarrow 0$ ideally

04. anisotropic effective medium

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R134. 역설계와 adjoint 방법

논문 초록보다 먼저 표시할 검색 항목

역설계와 adjoint 방법을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. metasurface, photonic inverse design, topology optimization의 핵심이다.

연구 체크식.

01. $F = \text{objective}(\mathbf{E}, p)$
02. $dF/dp = \partial_p F - \lambda^T \partial_p \mathbf{A} \mathbf{E}$
03. $\mathbf{A}(p)\mathbf{E} = \mathbf{b}$
04. $\mathbf{A}^T \lambda = \partial_{\mathbf{E}} F$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R135. Vlasov-Maxwell 플라즈마

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Vlasov-Maxwell 플라즈마를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 우주플라즈마, fusion, beam instability, Landau damping의 기본 모델이다.

연구 체크식.

$$01. \quad df_s/dt + \mathbf{v} \cdot \text{grad } f_s + (q_s/m_s)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \text{grad}_v f_s = 0$$

$$02. \quad \rho = \sum q_s \int f_s d^3v$$

$$03. \quad \mathbf{J} = \sum q_s \int \mathbf{v} f_s d^3v$$

04. Maxwell coupled

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R136. Cold plasma waves

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Cold plasma waves을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전리층, plasma diagnostics, microwave propagation에 중요하다.

연구 체크식.

01. $\omega_p^2 = n e^2 / (\epsilon_0 m)$

02. $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$

03. $n^2 = \epsilon$

04. Appleton-Hartree form

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R137. MHD와 Alfven 파

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

MHD와 Alfven 파를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 태양풍, fusion confinement, liquid metal, astrophysical jet에 쓰인다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{J}$
02. $d\mathbf{B}/dt = \text{curl}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}$
03. $\rho d\mathbf{v}/dt = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \text{grad } p$
04. $\omega = k_{\text{parallel}} v_A$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R138. Metamaterial effective medium

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Metamaterial effective medium을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 음의 굴절률, absorber, cloak, metasurface 설계의 언어다.

연구 체크식.

01. $\mathbf{D} = \epsilon_{eff} \mathbf{E} + \boldsymbol{\xi} \mathbf{H}$
02. $\mathbf{B} = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{E} + \mu_{eff} \mathbf{H}$
03. n_{eff} may be negative
04. unit cell $\ll \lambda$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R139. Photonic crystal band theory

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Photonic crystal band theory을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. waveguide, cavity, slow light, topological photonics의 기반이다.

연구 체크식.

01. $E_k(r)=u_k(r) \exp(i k \cdot r)$
02. $\omega_n(k)$ eigenvalue
03. band gap $\Delta \omega$
04. group velocity = $\text{grad}_k \omega$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R140. Topological photonics

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Topological photonics을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. robust waveguide, chiral edge state, disorder-tolerant photonic routing에 쓰인다.

연구 체크식.

01. Berry curvature $\Omega_n(k)$
02. $C_n = 1/(2\pi i) \int_{\text{BZ}} \Omega_n d^2k$
03. edge modes from bulk invariant
04. nonreciprocal or synthetic gauge
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R141. 열복사와 LDOS

논문 초록보다 먼저 표시할 검색 항목

열복사와 LDOS을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. near-field heat transfer, thermophotovoltaics, thermal emission engineering에 중요하다.

연구 체크식.

01. $\Theta(\omega, T) = \hbar \omega / (\exp(\hbar \omega / kT) - 1)$
02. $\rho(r, \omega) \sim \text{Im Tr } G(r, r)$
03. $P = \int d\omega [\Theta_1 - \Theta_2] T(\omega)$
04. fluctuation-dissipation source
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R142. Casimir 효과와 진공 fluctuation

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Casimir 효과와 진공 fluctuation을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. MEMS stiction, 나노스케일 힘, 양자진공 공학의 기준 문제다.

연구 체크식.

01. $F/A = -\pi^2 \hbar c / (240 a^4)$

02. $\omega \rightarrow i \xi$

03. Lifshitz formula

04. stress tensor expectation

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R143. Lorentz 변환과 시공간 간격

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Lorentz 변환과 시공간 간격을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 시간지연, 길이수축, 동시성 상대성의 출발점이다.

연구 체크식.

01. $ct' = \gamma(ct - \beta x)$

02. $x' = \gamma(x - \beta ct)$

03. $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$

04. $s^2 = -c^2 t^2 + x^2 + y^2 + z^2$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R144. 4-벡터와 에너지-운동량

논문 초록보다 먼저 표시할 김산 항목

4-벡터와 에너지-운동량을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 입자물리, 상대론적 충돌, 전자기장 텐서의 기본이다.

연구 체크식.

01. $x^\mu = (ct, x, y, z)$
02. $p^\mu = (E/c, p)$
03. $p_\mu p^\mu = -m^2 c^2$
04. $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

김산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R145. 상대론적 action과 고유시간

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

상대론적 action과 고유시간을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 전자기 최소결합과 바로 연결된다.

연구 체크식.

01. $d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$

02. $S = -mc^2 \int d\tau$

03. $p = \gamma m v$

04. $L = -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - q\phi + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R146. 전자기장 텐서와 불변량

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

전자기장 텐서와 불변량을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 상대론적 전자기학과 gauge field theory의 공통 언어다.

연구 체크식.

01. $F^{0i} = -E_i/c$

02. $F^{ij} = -\varepsilon_{ijk} B_k$

03. $\partial_\mu F^{\mu\nu} = \mu_0 J^\nu$

04. $I1 = E^2 - c^2 B^2, I2 = E \cdot B$

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R147. 상대론적 Doppler와 aberration

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

상대론적 Doppler와 aberration을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 천체물리, synchrotron, CMB dipole에 중요하다.

연구 체크식.

01. $\nu' = \gamma\nu(1 - \beta \cos\theta)$
02. $\cos\theta' = (\cos\theta - \beta)/(1 - \beta \cos\theta)$
03. headlight effect
04. I_ν/ν^3 invariant
05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R148. 등가원리와 계량

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

등가원리와 계량을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ _ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 일반상대론의 출발점이다.

연구 체크식.

01. local free fall → special relativity

02. $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

03. proper time $d\tau^2 = -ds^2/c^2$

04. gravity as geometry

05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R149. 공변미분과 Christoffel 기호

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

공변미분과 Christoffel 기호을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. geodesic, curvature, Einstein equation의 계산 엔진이다.

연구 체크식.

- 01. $\nabla_\mu V^\nu = \partial_\mu V^\nu + \Gamma^\nu_{\mu\lambda} V^\lambda$
- 02. $\Gamma^\rho_{\mu\nu} = 1/2 g^{\rho\sigma} (\partial_\mu g_{\nu\sigma} + \partial_\nu g_{\mu\sigma} - \partial_\sigma g_{\mu\nu})$
- 03. $\nabla_\lambda g_{\mu\nu} = 0$
- 04. torsion-free $\Gamma^\rho_{\mu\nu} = \Gamma^\rho_{\nu\mu}$
- 05. objective / observable / residual

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

연구 문제와 논문 읽기 체크

R150. Geodesic 방정식

논문 초록보다 먼저 표시할 검산 항목

Geodesic 방정식을/를 실제 연구 문제로 읽을 때는 모델의 목적함수, 측정 observable, 가정한 ensemble/gauge/ _ frame, 수치 benchmark를 먼저 표시한다. 빛 휨, 궤도 precession, black hole lensing의 기본이다.

연구 체크식.

$$01. \quad d^2x^\mu/d\lambda^2 + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} dx^\alpha/d\lambda dx^\beta/d\lambda = 0$$

$$02. \quad \delta \int ds = 0$$

$$03. \quad u^\nu \nabla_\nu u^\mu = 0$$

$$04. \quad \text{null geodesic } ds^2 = 0$$

$$05. \quad \text{objective / observable / residual}$$

유도 뼈대. 논문 식을 그대로 따라가기 전에, (1) source와 response를 구분하고, (2) 단위계와 부호 convention을 적고, (3) 보존량 residual을 계산하고, (4) 실험 데이터가 무엇을 직접 측정하는지 확인한다.

검산. passivity, causality, unitarity, positivity, conservation 중 해당되는 조건을 최소 하나 확인한다.

자가 점검. 이 주제로 연구 질문을 하나 만들고, 필요한 물리량 세 개와 검증할 benchmark 하나를 적어보라.

부록 A. 초등-중등 수학 공식 I

수와 비, 비례, 기본 도형

초등학교에서 대학교 전공 초입까지 자주 쓰는 공식만 압축했다. 각 식은 원문 흐름을 방해하지 않도록 기존 마지막 반복훈련 영역에 넣었으며, 페이지 수는 그대로 유지했다.

핵심 공식

- 01. 비례식: $a:b = c:d \Leftrightarrow ad = bc$
- 02. 평균: $\mu = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$
- 03. 속력: $v = s/t$, 거리: $s = vt$, 시간: $t = s/v$
- 04. 비율: $p(\%) = (\text{부분/전체}) \times 100$
- 05. 삼각형 넓이: $A = (1/2)bh$
- 06. 직사각형/평행사변형: $A = bh$
- 07. 원 둘레: $C = 2\pi r$, 원 넓이: $A = \pi r^2$

검산 메모

단위가 붙은 문제는 숫자보다 단위 변환을 먼저 정리한다.

부록 A. 초등-중등 수학 공식 II

중등 대수와 방정식

핵심 공식

01. $(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$

02. $(a-b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$

03. $a^2 - b^2 = (a-b)(a+b)$

04. $ax + b = 0 \Rightarrow x = -b/a$

05. $ax^2 + bx + c = 0 \Rightarrow x = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/(2a)$

06. 기울기: $m = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$

07. 직선: $y - y_1 = m(x - x_1)$

검산 메모

판별식 $\Delta = b^2 - 4ac$ 의 부호로 실근 개수를 확인한다.

부록 A. 중등 기하와 삼각비

도형, 닮음, 원, 삼각비

핵심 공식

01. 피타고라스: $a^2 + b^2 = c^2$

02. 닮음비 $k \Rightarrow$ 넓이비 k^2 , 부피비 k^3

03. 부채꼴 호: $s = r\theta$, 넓이: $A = (1/2)r^2\theta$

04. $\sin \theta = \text{opposite/hypotenuse}$

05. $\cos \theta = \text{adjacent/hypotenuse}$

06. $\tan \theta = \sin \theta / \cos \theta$

07. $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$

검산 메모

각도 θ 는 미적분과 물리에서는 보통 radian으로 둔다.

부록 B. 고등수학 핵심 I

함수, 지수, 로그, 수열

핵심 공식

01. $a^m a^n = a^{m+n}$, $(a^m)^n = a^{mn}$

02. $\log_a(xy) = \log_a x + \log_a y$

03. $\log_a(x^r) = r \log_a x$

04. 등차수열: $a_n = a_1 + (n-1)d$

05. 등비수열: $a_n = a_1 r^{n-1}$

06. $\sum_{k=1}^n k = n(n+1)/2$

07. $\sum_{k=1}^n k^2 = n(n+1)(2n+1)/6$

검산 메모

로그의 밑 변환과 지수법칙은 물리 스케일링에서 자주 쓴다.

부록 B. 고등수학 핵심 II

삼각함수와 복소수

핵심 공식

- 01. $\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$
- 02. $\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$
- 03. $\tan(\alpha \pm \beta) = (\tan \alpha \pm \tan \beta) / (1 \mp \tan \alpha \tan \beta)$
- 04. $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$
- 05. $z = r e^{i\theta}$, $|z| = r$, $\arg z = \theta$
- 06. $z_1 z_2 = r_1 r_2 e^{i(\theta_1 + \theta_2)}$
- 07. roots of unity: $z_k = e^{2\pi i k/n}$

검산 메모

phasor와 Fourier 표기는 전자기학, 회로, 신호처리의 공통 언어다.

부록 B. 미적분 I

극한, 미분, 기본 도함수

핵심 공식

01. $f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} [f(x+h) - f(x)]/h$

02. $(x^n)' = n x^{n-1}$

03. $(e^x)' = e^x, (\ln x)' = 1/x$

04. $(\sin x)' = \cos x, (\cos x)' = -\sin x$

05. $(uv)' = u'v + uv'$

06. $(u/v)' = (u'v - uv')/v^2$

07. chain rule: $d f(g(x))/dx = f'(g)g'(x)$

검산 메모

물리량의 변화율을 볼 때는 독립변수와 고정된 조건을 함께 표시한다.

부록 B. 미적분 II

적분, 급수, 근사

핵심 공식

01. $\int x^n dx = x^{n+1}/(n+1) + C \quad (n \neq -1)$

02. $\int e^x dx = e^x + C$

03. $\int \sin x dx = -\cos x + C$

04. $\int \cos x dx = \sin x + C$

05. $\int_a^b f(x) dx = f(b) - f(a)$

06. Taylor: $f(x) = \sum f^{(n)}(a)(x-a)^n/n!$

07. $e^x = \sum x^n/n!, \sin x = \sum (-1)^n x^{2n+1}/(2n+1)!$

검산 메모

근사는 작은 매개변수 ε 와 버린 항의 크기를 같이 적어야 안전하다.

부록 B. 확률과 통계

자료, 확률, 분포

핵심 공식

- 01.** mean: $\mu = \mathbf{E}[X]$, variance: $\sigma^2 = \mathbf{E}[(X-\mu)^2]$
- 02.** $\text{Cov}(X,Y)=\mathbf{E}[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]$
- 03.** Bayes: $P(\mathbf{A}|\mathbf{B})=P(\mathbf{B}|\mathbf{A})P(\mathbf{A})/P(\mathbf{B})$
- 04.** Binomial: $P(k)=C(n,k)p^k(1-p)^{n-k}$
- 05.** Poisson: $P(k)=\lambda^k e^{-\lambda}/k!$
- 06.** Gaussian: $f(x)=1/(\sqrt{(2\pi)\sigma}) \exp[-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)]$
- 07.** standard error: $\text{SE} = \sigma/\sqrt{n}$

검산 메모

실험 데이터는 평균보다 오차막대, 분산, 상관을 먼저 확인한다.

부록 B. 기하와 벡터

좌표기하, 벡터, 평면

핵심 공식

01. distance: $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$

02. dot: $a \cdot b = |a||b|\cos\theta$

03. cross: $|a \times b| = |a||b|\sin\theta$

04. projection: $\text{proj}_b a = (a \cdot b / |b|^2)b$

05. line: $r = r_0 + tv$

06. plane: $n \cdot (r - r_0) = 0$

07. triple $\prod$: $a \cdot (b \times c) = \det[a \ b \ c]$

검산 메모

벡터식은 좌표를 바꿔도 같은 물리를 표현해야 한다.

부록 C. 대학수학 I

선형대수 기본

핵심 공식

- 01. $Ax=b, \det A \neq 0 \Rightarrow x=A^{-1}b$
- 02. eigenvalue: $Av=\lambda v$
- 03. $\det(A-\lambda I)=0$
- 04. trace $A = \sum_i A_{ii} = \sum_i \lambda_i$
- 05. orthogonal/unitary: $Q^T=I, U^\dagger U=I$
- 06. symmetric/Hermitian: $A^T=A, A^\dagger=A$
- 07. quadratic form: $x^T A x$

검산 메모

Hermitian 행렬의 고유값은 실수이며, 양자역학의 observable과 연결된다.

부록 C. 대학수학 II

벡터해석과 적분정리

핵심 공식

01. $\nabla f = \text{grad } f$

02. $\nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_i A_i$

03. $(\nabla \times \mathbf{A})_i = \varepsilon_{ijk} \partial_j A_k$

04. $\int_V \nabla \cdot \mathbf{A} \, dV = \oint_{\partial V} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \, dA$

05. $\int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{n} \, dA = \oint_{\partial S} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$

06. $\nabla \times (\nabla f) = 0, \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$

07. $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$

검산 메모

전자기학의 미분형과 적분형은 Gauss/Stokes 정리로 연결된다.

부록 C. 대학수학 III

상미분방정식과 시스템

핵심 공식

- 01.** first order: $y' + p(x)y = q(x)$
- 02.** integrating factor: $\mu(x) = \exp(\int p(x)dx)$
- 03.** harmonic oscillator: $x'' + \omega_0^2 x = 0$
- 04.** damped: $x'' + 2\gamma\omega_0 x' + \omega_0^2 x = 0$
- 05.** linear system: $x' = Ax \Rightarrow x(t) = e^{At}x(0)$
- 06.** Laplace: $L[f'] = sF(s) - f(0)$
- 07.** stability: $\text{Re } \lambda_i(\mathbf{A}) < 0$

검산 메모

회로, 진동, 제어, 양자 2준위계는 같은 선형 시스템 언어를 공유한다.

부록 C. 대학수학 IV

PDE, Fourier, Green 함수

핵심 공식

- 01.** wave: $\partial_t^2 u = c^2 \nabla^2 u$
- 02.** diffusion: $\partial_t u = \mathbf{D} \nabla^2 u$
- 03.** Laplace/Poisson: $\nabla^2 \phi = 0, \nabla^2 \phi = -\rho/\epsilon_0$
- 04.** Fourier: $f(x) = \int dk/(2\pi) \tilde{f}(k) e^{ikx}$
- 05.** $\partial_x \rightarrow ik, \partial_t \rightarrow -i\omega$
- 06.** Green: $L G(x, x') = \delta(x - x')$
- 07.** $u(x) = \int G(x, x') s(x') dx' + u_{\text{hom}}$

검산 메모

경계조건이 바뀌면 Green 함수도 바뀐다.

부록 C. 대학수학 V

복소해석과 특수함수

핵심 공식

01. Cauchy-Riemann: $u_x = v_y, u_y = -v_x$

02. $\oint f(z) dz = 2\pi i \sum \text{Res}[f, z_k]$

03. Laurent: $f(z) = \sum a_n (z - z_0)^n$

04. $\Gamma(n+1) = n!$

05. Bessel: $x^2 y'' + xy' + (x^2 - \nu^2)y = 0$

06. Legendre: $[(1-x^2)y']' + l(l+1)y = 0$

07. spherical harmonics: $Y_l^m(\theta, \varphi)$

검산 메모

파동, 도파관, 산란, 양자 각운동량에서 특수함수가 반복된다.

부록 D. 일반물리 공식 I

역학

핵심 공식

- 01. Newton: $\mathbf{F} = m\mathbf{a} = d\mathbf{p}/dt$
- 02. work-energy: $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \Delta K$
- 03. $K = (1/2)mv^2$, $U_g = mgh$
- 04. $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$, $\tau = d\mathbf{L}/dt$
- 05. central force: $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = -(dU/dr)\mathbf{e}_r$
- 06. Lagrange: $d/dt(\partial L/\partial \dot{q}_i) - \partial L/\partial q_i = 0$
- 07. Hamilton: $\dot{q} = \partial \mathbf{H}/\partial p$, $\dot{p} = -\partial \mathbf{H}/\partial q$

검산 메모

보존량은 대칭성의 결과이며 계산 검산의 핵심이다.

부록 D. 일반물리 공식 II

진동, 파동, 유체

핵심 공식

- 01. oscillator: $x'' + \omega_0^2 x = 0$, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$
- 02. driven response: $A(\omega) \propto 1/(\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega)$
- 03. wave speed: $v = f\lambda = \omega/k$
- 04. continuity: $\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho v) = 0$
- 05. Euler: $\rho(\partial_t v + v \cdot \nabla v) = -\nabla p + \rho g$
- 06. Bernoulli: $p + \rho v^2/2 + \rho g z = \text{const}$
- 07. Reynolds: $\text{Re} = \rho v L / \eta$

검산 메모

유체와 전자기파는 PDE와 경계조건으로 해석한다.

부록 D. 일반물리 공식 III

열역학과 통계

핵심 공식

- 01. first law: $dU = \delta Q - \delta W$
- 02. ideal gas: $PV = Nk_B T = nRT$
- 03. entropy: $dS = \delta Q_{rev}/T$
- 04. Helmholtz: $F=U-TS$, Gibbs: $G=H-TS$
- 05. Boltzmann: $p_i = e^{-\beta E_i}/Z$
- 06. partition function: $Z=\sum_i e^{-\beta E_i}$
- 07. $F = -k_B T \ln Z$

검산 메모

열역학 퍼텐셜은 고정한 자연변수에 따라 선택한다.

부록 D. 전자기학 공식 I

Maxwell 방정식과 힘

핵심 공식

01. Lorentz force: $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

02. $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$

03. $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

04. $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$

05. $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t$

06. continuity: $\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0$

07. $c = 1 / \sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)}$, $\eta_0 = \sqrt{(\mu_0 / \epsilon_0)}$

검산 메모

E, B, D, H, J는 수식 줄에서 벡터/장 기호로 bold italic 처리했다.

부록 D. 전자기학 공식 II

정전기와 정자기

핵심 공식

01. Coulomb: $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = 1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(\mathbf{r}')(\mathbf{r}-\mathbf{r}')/|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3 d^3r'$

02. $\phi(\mathbf{r}) = 1/(4\pi\epsilon_0) \int \rho(\mathbf{r}')/|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| d^3r'$

03. $\mathbf{E} = -\nabla\phi, \nabla^2\phi = -\rho/\epsilon_0$

04. $\mathbf{D} = \epsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P}, \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$

05. Biot-Savart: $\mathbf{B} = \mu_0/(4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r}-\mathbf{r}')/|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3 d^3r'$

06. $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}$

07. $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{M}, \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f$

검산 메모

경계값 문제에서는 해보다 경계조건을 먼저 쓴다.

부록 D. 전자기학 공식 III

파동, 에너지, 복사

핵심 공식

- 01.** wave: $\nabla^2 \mathbf{E} - (1/c^2) \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 = 0$
- 02.** plane wave: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$, $\omega = ck$
- 03.** Poynting: $\mathbf{S} = (1/\mu_0) \mathbf{E} \times \mathbf{B}$
- 04.** $u = (1/2)(\epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2/\mu_0)$
- 05.** momentum density: $\mathbf{g} = \mathbf{S}/c^2$
- 06.** phasor: $\partial_t \rightarrow -i\omega$, $\nabla \rightarrow ik$
- 07.** skin depth: $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$

검산 메모

복소수 표기는 실제 물리량의 real part를 취한다.

부록 D. 상대론 공식

특수상대론과 장의 공변표기

핵심 공식

- 01. $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$
- 02. Lorentz: $t'=\gamma(t-vx/c^2)$, $x'=\gamma(x-vt)$
- 03. interval: $s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$
- 04. energy-momentum: $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$
- 05. 4-current: $J^\mu=(c\rho, \mathbf{J})$
- 06. field tensor: $F^{\mu\nu}$
- 07. covariant Maxwell: $\partial_\mu F^{\mu\nu}=\mu_0 J^\nu$

검산 메모

부호 convention은 문헌마다 다르므로 metric을 먼저 확인한다.

부록 D. 양자역학 공식 I

상태, 연산자, 측정

핵심 공식

- 01.** Schroedinger: $i\hbar\partial_t|\psi\rangle = \mathbf{H}|\psi\rangle$
- 02.** Born: $P(a)=|\langle a|\psi\rangle|^2$
- 03.** expectation: $\langle \mathbf{A} \rangle = \langle \psi|\mathbf{A}|\psi\rangle$
- 04.** commutator: $[\mathbf{A},\mathbf{B}]=\mathbf{AB}-\mathbf{BA}$
- 05.** uncertainty: $\Delta A \Delta B \geq (1/2)|\langle [\mathbf{A},\mathbf{B}] \rangle|$
- 06.** momentum: $p = -i\hbar \nabla$
- 07.** density matrix: $\rho = \sum p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$

검산 메모

Hermitian 연산자는 관측량, unitary 연산자는 시간발전과 연결된다.

부록 D. 양자역학 공식 II

대표 모형과 섭동

핵심 공식

01. particle in box: $E_n = n^2\pi^2\hbar^2/(2mL^2)$
02. harmonic oscillator: $E_n = \hbar\omega(n+1/2)$
03. ladder: $[a, a^\dagger]=1$
04. spin: $\mathbf{S}_i = (\hbar/2)\sigma_i$
05. time-independent perturbation: $\Delta E_n^{(1)} = \langle n|V|n\rangle$
06. Fermi golden rule: $\Gamma = (2\pi/\hbar)|V_{fi}|^2\rho(E_f)$
07. minimal coupling: $p \rightarrow p - qA$

검산 메모

고전극한은 $\hbar \rightarrow 0$ 또는 큰 양자수에서 확인한다.

부록 E. 화학·재료 기초 공식

몰, 반응, 결합, 고체

핵심 공식

01. mole: $N = nN_A$

02. concentration: $c = n/V$

03. $pH = -\log_{10}[H^+]$

04. Arrhenius: $k = A \exp(-E_a/(RT))$

05. Bragg: $2d \sin\theta = n\lambda$

06. Hooke-like bond: $U \approx (1/2)k(r-r_0)^2$

07. Fick: $\mathbf{J} = -D\nabla c$

검산 메모

재료 물성은 미시 구조, 온도, 주파수, 결합에 의존한다.

부록 E. 전자공학 공식 I

회로 기본

핵심 공식

- 01. *Ohm*: $V = IR$
- 02. KCL: $\Sigma I=0$, KVL: $\Sigma V=0$
- 03. capacitor: $i=C dv/dt$, $Z_C=1/(i\omega C)$
- 04. inductor: $v=L di/dt$, $Z_L=i\omega L$
- 05. RC: $\tau=RC$, RL: $\tau=L/R$
- 06. RLC resonance: $\omega_0=1/\sqrt{LC}$
- 07. power: $P=VI=I^2R=V^2/R$

검산 메모

집중정수 회로는 $kL \ll 1$ 조건에서 신뢰할 수 있다.

부록 E. 전자공학 공식 II

신호, 시스템, 통신

핵심 공식

01. Fourier transform: $X(\omega) = \int x(t)e^{-i\omega t} dt$

02. convolution: $y = x \cdot h \Leftrightarrow Y = XH$

03. LTI response: $\mathbf{H}(\omega) = Y(\omega)/X(\omega)$

04. sampling: $f_s > 2f_{\max}$

05. $\text{SNR}_{dB} = 10\log_{10}(P_s/P_n)$

06. thermal noise: $v_n^2 = 4k_{BTR\Delta f}$

07. Shannon: $C = \mathbf{B} \log_2(1 + \mathbf{S}/N)$

검산 메모

주파수 영역에서는 크기와 위상을 함께 확인한다.

부록 E. 전자공학 공식 III

반도체와 전송선

핵심 공식

- 01. diode: $I = I_S(e^{V/(nV_T)} - 1)$
- 02. thermal voltage: $V_T = k_{BT}/q$
- 03. drift current: $\mathbf{J} = q n \mu \mathbf{E}$
- 04. diffusion current: $\mathbf{J} = qD\nabla n$
- 05. Einstein relation: $D/\mu = k_{BT}/q$
- 06. transmission line: $\partial V/\partial z = -(R + i\omega L)I$
- 07. $Z_0 = \sqrt{(R + i\omega L)/(G + i\omega C)}$, $\Gamma = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0)$

검산 메모

소자 공식은 동작 영역과 작은 신호 조건을 함께 표시한다.

부록 E. 상수와 단위 변환

SI 접두어, 기본 상수, 단위 계산

핵심 공식

01. SI prefixes: $k=10^3$, $M=10^6$, $G=10^9$, $m=10^{-3}$, $\mu=10^{-6}$, $n=10^{-9}$

02. $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$

03. $e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$

04. $k_B = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

05. $h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $\hbar = h/(2\pi)$

06. $1 \text{ eV} = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$

07. dimension check: $[\text{energy}] = \text{ML}^2\text{T}^{-2}$

검산 메모

상수값 자체보다 어떤 단위계와 convention을 쓰는지 먼저 확인한다.

부록 E. 실험·데이터 기본 공식

오차, fitting, 로그 스케일

핵심 공식

- 01.** relative error: $\delta x/|x|$
- 02.** propagation: $\sigma_f^2 \approx \sum_i (\partial f / \partial x_i)^2 \sigma_i^2$
- 03.** weighted mean: $x_{\text{mean}} = \sum w_i x_i / \sum w_i$, $w_i = 1/\sigma_i^2$
- 04.** least squares: minimize $\chi^2 = \sum_i [(y_i - f_i)/\sigma_i]^2$
- 05.** decibel power: $L_{dB} = 10 \log_{10}(P/P_0)$
- 06.** decibel amplitude: $L_{dB} = 20 \log_{10}(A/A_0)$
- 07.** linear fit: $y = ax + b$, residual $r_i = y_i - (ax_i + b)$

검산 메모

논문 수식은 실험 observable과 error budget까지 연결해야 완성된다.

부록 F. 검산 루틴

공식 사용 전후 체크

핵심 공식

- 01.** 1. dimensions(left)=dimensions(right)
- 02.** 2. sign convention and coordinate orientation
- 03.** 3. boundary/initial conditions close *the* problem
- 04.** 4. conservation residual = time change + flux – source
- 05.** 5. limit tests: $\varepsilon \rightarrow 0$, $kL \rightarrow 0$, $Re \rightarrow \infty$, $\hbar \rightarrow 0$
- 06.** 6. numerical convergence and benchmark
- 07.** 7. observable = measurement functional of solution

검산 메모

수식이 예뻐 보여도 조건과 극한 검산이 없으면 연구 노트로는 부족하다.

확장 부록 01. 확장 수학 공식 부록 안내

기존 1964쪽 이후에 추가한 초등-대학 수학 공식 색인

확장 부록 목차

02. 초등 산술과 수 체계	1966
03. 비, 비례, 백분율, 단위	1967
04. 평면도형 공식	1968
05. 입체도형 공식	1969
06. 좌표기하 기초	1970
07. 대수 항등식	1971
08. 방정식과 부등식	1972
09. 함수와 그래프	1973
10. 다항식과 유리식	1974
11. 지수와 로그	1975
12. 수열과 급수 기초	1976
13. 삼각함수 기본	1977
14. 삼각함수 항등식	1978
15. 복소수와 극형식	1979
16. 원뿔곡선	1980
17. 극한과 연속	1981
18. 미분 공식 I	1982
19. 미분 공식 II	1983
20. 미분 공식 III	1984
21. 적분 공식 I	1985
22. 적분 공식 II	1986
23. 정적분과 응용	1987
24. 무한급수와 Taylor	1988
25. 벡터 기초	1989
26. 행렬과 행렬식	1990
27. 선형연립과 고유값	1991
28. 내적공간과 분해	1992
29. 다변수 미분	1993
30. 다중적분과 좌표변환	1994
31. 벡터해석	1995
32. 1계 미분방정식	1996
33. 2계 ODE와 선형시스템	1997
34. Laplace와 Fourier	1998
35. PDE 기초	1999
36. 확률 기초	2000
37. 확률분포	2001
38. 통계와 회귀	2002
39. 조합과 이산수학	2003
40. 수론 기초	2004
41. 수치해석	2005
42. 최적화	2006
43. 복소해석	2007
44. 추상대수 기초	2008
45. 미분기하와 좌표	2009
46. 위상과 집합	2010
47. 대학수학-물리 연결 지도	2011
48. 최종 검산 루틴	2012
49. 참고한 공개 웹 자료	2013
50-60. 심화 수학 공식·그래프·도형 추가 목차	2014

확장 부록 02. 초등 산술과 수 체계

자연수-정수-유리수-실수와 기본 연산

핵심 공식

01. $a + b = b + a, ab = ba$
02. $a(b+c)=ab+ac$
03. $a/b + c/d = (ad+bc)/(bd)$
04. $a/b \times c/d = ac/bd$
05. $a/b \div c/d = ad/bc$
06. $|x| = x$ if $x \geq 0$, $|x| = -x$ if $x < 0$
07. rounding error $\leq 0.5 \times$ place value
08. $\gcd(a,b) \cdot \text{lcm}(a,b) = |ab|$
09. prime factorization: $n = \prod p_i^{\alpha_i}$
10. order of operations: parentheses $\rightarrow$ powers $\rightarrow$ multiply/divide $\rightarrow$ add/subtract

검산 메모

- 분수 계산은 물리 단위 변환과 같은 구조다.

확장 부록 03. 비, 비례, 백분율, 단위

초중등 실생활 계산의 핵심

핵심 공식

01. $a:b = c:d \Leftrightarrow ad=bc$
02. direct proportion: $y=kx$
03. inverse proportion: $y=k/x$
04. percent = part/whole $\times 100\%$
05. increase rate = $(new-old)/old \times 100\%$
06. density = mass/volume
07. speed = distance/time
08. unit conversion: $q_{new} = q_{old} \times (\text{unit}_{old}/\text{unit}_{new})$
09. scale factor k : length ratio k , area ratio k^2 , volume ratio k^3
10. average speed = total distance / total time

검산 메모

- 비례상수 k 의 단위가 무엇인지 항상 적는다.

확장 부록 04. 평면도형 공식

둘레, 넓이, 기본 기하

핵심 공식

01. rectangle: $A=ab$, $P=2(a+b)$
02. parallelogram: $A=bh$
03. triangle: $A=(1/2)bh$
04. trapezoid: $A=(1/2)(a+b)h$
05. rhombus/kite: $A=(1/2)d_1 d_2$
06. circle: $C=2\pi r$, $A=\pi r^2$
07. sector: $s=r\theta$, $A=(1/2)r^2\theta$
08. annulus: $A=\pi(R^2-r^2)$
09. regular n -gon: interior angle $=(n-2)\pi/n$
10. regular n -gon area: $A=(1/2)\text{apothem}\times\text{perimeter}$

검산 메모

- θ 는 radian일 때 호길이와 부채꼴 공식이 단순하다.

확장 부록 05. 입체도형 공식

부피와 겉넓이

핵심 공식

01. rectangular prism: $V=abc$, $S=2(ab+bc+ca)$
02. cube: $V=a^3$, $S=6a^2$
03. cylinder: $V=\pi r^2 h$, $S=2\pi r h+2\pi r^2$
04. cone: $V=(1/3)\pi r^2 h$, lateral area $=\pi r l$
05. sphere: $V=(4/3)\pi r^3$, $S=4\pi r^2$
06. pyramid: $V=(1/3)Bh$
07. frustum: $V=(h/3)(A_1+A_2+\sqrt{A_1 A_2})$
08. surface of revolution: $S=\int 2\pi y \, ds$
09. solid of revolution: $V=\pi \int [R(x)^2 - r(x)^2] dx$
10. Pappus: $V = \text{area} \times \text{centroid path length}$

검산 메모

- 구면 대칭 문제에서 $4\pi r^2$ 는 flux 계산의 핵심 면적이다.

확장 부록 06. 좌표기하 기초

거리, 직선, 원, 평면

핵심 공식

01. distance in 2D: $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$
02. distance in 3D: $d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$
03. midpoint: $M = ((x_1 + x_2)/2, (y_1 + y_2)/2)$
04. slope: $m = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$
05. line: $y - y_1 = m(x - x_1)$
06. line: $Ax + By + C = 0$
07. circle: $(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2$
08. plane: $n \cdot (r - r_0) = 0$
09. distance point-line: $|Ax_0 + By_0 + C| / \sqrt{A^2 + B^2}$
10. distance point-plane: $|n \cdot (r_0 - a)| / ||n||$

검산 메모

- 좌표계 선택은 계산량을 결정한다.

확장 부록 07. 대수 항등식

전개, 인수분해, 근호

핵심 공식

01. $(a+b)^2=a^2+2ab+b^2$
02. $(a-b)^2=a^2-2ab+b^2$
03. $a^2-b^2=(a-b)(a+b)$
04. $a^3+b^3=(a+b)(a^2-ab+b^2)$
05. $a^3-b^3=(a-b)(a^2+ab+b^2)$
06. $(a+b+c)^2=a^2+b^2+c^2+2ab+2bc+2ca$
07. $\sqrt{ab}=\sqrt{a}\sqrt{b}$ for $a,b\geq 0$
08. $a^m a^n=a^{m+n}$
09. $(a^m)^n=a^{mn}$
10. $a^{-n}=1/a^n$

검산 메모

- 근호와 지수 법칙은 정의역 조건이 붙는다.

확장 부록 08. 방정식과 부등식

일차, 이차, 절댓값, 부등식

핵심 공식

01. $ax+b=0 \Rightarrow x=-b/a$
02. $ax^2+bx+c=0 \Rightarrow x=(-b \pm \sqrt{b^2-4ac})/(2a)$
03. discriminant: $\Delta=b^2-4ac$
04. $|x-a|<r \Leftrightarrow a-r<x<a+r$
05. $|x-a|>r \Leftrightarrow x<a-r$ or $x>a+r$
06. AM-GM: $(a+b)/2 \geq \sqrt{ab}$ for $a,b \geq 0$
07. Cauchy-Schwarz: $|a \cdot b| \leq \|a\| \|b\|$
08. triangle inequality: $|x+y| \leq |x| + |y|$
09. Bernoulli: $(1+x)^r \geq 1+rx$ under standard conditions
10. Jensen: $f(E[X]) \leq E[f(X)]$ for convex f

검산 메모

- 부등식은 오차상한과 안정성 조건을 다룰 때 중요하다.

확장 부록 09. 함수와 그래프

정의역, 치역, 역함수, 합성

핵심 공식

01. function: $f: X \rightarrow Y$
02. composition: $(f \circ g)(x) = f(g(x))$
03. inverse: $f^{-1}(f(x)) = x$
04. linear: $y = mx + b$
05. quadratic vertex: $x = -b/(2a)$
06. even: $f(-x) = f(x)$
07. odd: $f(-x) = -f(x)$
08. periodic: $f(x+T) = f(x)$
09. monotone increasing: $x_1 < x_2 \Rightarrow f(x_1) \leq f(x_2)$
10. average rate: $(f(b) - f(a))/(b - a)$

검산 메모

- 역함수는 일대일 조건을 확인해야 한다.

확장 부록 10. 다항식과 유리식

나머지정리, 인수정리, 부분분수

핵심 공식

01. remainder theorem: $P(x)/(x-a)$ leaves $P(a)$
02. factor theorem: $P(a)=0 \Leftrightarrow (x-a)|P(x)$
03. $\text{degree}(PQ)=\text{degree}(P)+\text{degree}(Q)$
04. rational root test: p/q divides a_0/a_n
05. ∂ fraction: $P(x)/Q(x)=\text{polynomial} + \sum A/(x-a)^k + \dots$
06. complex roots of real polynomial occur in conjugate pairs
07. Vieta: $r_1+r_2=-b/a$, $r_1r_2=c/a$
08. binomial theorem: $(x+y)^n=\sum C(n,k)x^{n-k}y^k$
09. finite difference lowers polynomial degree by 1
10. interpolation: unique polynomial degree $\leq n$ through $n+1$ points

검산 메모

- 극점과 영점은 그래프의 물리적 해석과 연결된다.

확장 부록 11. 지수와 로그

성장, 감쇠, 스케일

핵심 공식

01. $a^{x+y} = a^x a^y$
02. $a^{x-y} = a^x / a^y$
03. $\log_a(xy) = \log_a x + \log_a y$
04. $\log_a(x/y) = \log_a x - \log_a y$
05. $\log_a(x^r) = r \log_a x$
06. change of base: $\log_a x = \ln x / \ln a$
07. $e^{\ln x} = x$, $\ln(e^x) = x$
08. exponential growth: $N(t) = N_0 e^{kt}$
09. half-life: $N(t) = N_0 2^{-t/T_{1/2}}$
10. dB power: $L = 10 \log_{10}(P/P_0)$

검산 메모

- 로그는 곱셈 스케일을 덧셈 스케일로 바꾼다.

확장 부록 12. 수열과 급수 기초

등차, 등비, 합

핵심 공식

- 01. arithmetic: $a_n = a_1 + (n-1)d$
- 02. arithmetic $\sum$: $S_n = n(a_1 + a_n)/2$
- 03. geometric: $a_n = a_1 r^{n-1}$
- 04. geometric $\sum$: $S_n = a_1(1-r^n)/(1-r)$
- 05. infinite geometric: $\sum_{k=0}^{\infty} ar^k = a/(1-r), |r| < 1$
- 06. $\sum_{k=1}^n k = n(n+1)/2$
- 07. $\sum_{k=1}^n k^2 = n(n+1)(2n+1)/6$
- 08. $\sum_{k=1}^n k^3 = [n(n+1)/2]^2$
- 09. harmonic: $H_n = \sum_{k=1}^n 1/k$
- 10. recurrence: $a_{n+1} = F(a_{n,n})$

검산 메모

- 급수의 수렴 조건은 무한합을 다룰 때 먼저 확인한다.

확장 부록 13. 삼각함수 기본

단위원, 각도, 기본 항등식

핵심 공식

01. $\sin\theta=y/r, \cos\theta=x/r, \tan\theta=y/x$
02. $\sin^2\theta+\cos^2\theta=1$
03. $1+\tan^2\theta=\sec^2\theta$
04. $1+\cot^2\theta=\csc^2\theta$
05. $\sin(-\theta)=-\sin\theta, \cos(-\theta)=\cos\theta$
06. $\sin(\pi/2-\theta)=\cos\theta$
07. $\tan\theta=\sin\theta/\cos\theta$
08. radian: arc length $s=r\theta$
09. angular frequency: $\omega=2\pi f$
10. period of $\sin(\omega t+\varphi)$: $T=2\pi/|\omega|$

검산 메모

- radian은 미분 공식이 가장 단순해지는 각도 단위다.

확장 부록 14. 삼각함수 항등식

덧셈, 배각, 반각, 곱-합

핵심 공식

01. $\sin(a \pm b) = \sin a \cos b \pm \cos a \sin b$
02. $\cos(a \pm b) = \cos a \cos b \mp \sin a \sin b$
03. $\tan(a \pm b) = (\tan a \pm \tan b) / (1 \mp \tan a \tan b)$
04. $\sin 2x = 2 \sin x \cos x$
05. $\cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x = 1 - 2\sin^2 x = 2\cos^2 x - 1$
06. $\sin^2(x) = (1 - \cos 2x) / 2$
07. $\cos^2(x) = (1 + \cos 2x) / 2$
08. $\sin a \sin b = [\cos(a-b) - \cos(a+b)] / 2$
09. $\cos a \cos b = [\cos(a-b) + \cos(a+b)] / 2$
10. $\sin a \cos b = [\sin(a+b) + \sin(a-b)] / 2$

검산 메모

- 파동 중첩과 beat 현상은 곱-합 공식과 연결된다.

확장 부록 15. 복소수와 극형식

Euler 공식과 roots of unity

핵심 공식

01. $z=a+bi$, $|z|=\sqrt{a^2+b^2}$
02. conjugate: $z^*=a-bi$
03. $zz^*=|z|^2$
04. $z=r(\cos\theta+i\sin\theta)=re^{i\theta}$
05. Euler: $e^{i\theta}=\cos\theta+i\sin\theta$
06. $z_1z_2=r_1r_2 e^{i(\theta_1+\theta_2)}$
07. $z^n=r^n e^{in\theta}$
08. n -th roots: $z_k=r^{1/n} e^{i(\theta+2\pi k)/n}$
09. $\text{Re } z=(z+z^*)/2$, $\text{Im } z=(z-z^*)/(2i)$
10. $|z_1z_2|=|z_1||z_2|$

검산 메모

- phasor 표기는 미분방정식을 대수식으로 바꾼다.

확장 부록 16. 원뿔곡선

포물선, 타원, 쌍곡선

핵심 공식

01. parabola: $y^2=4px$
02. ellipse: $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$
03. hyperbola: $x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$
04. ellipse focal relation: $c^2=a^2-b^2$
05. hyperbola focal relation: $c^2=a^2+b^2$
06. eccentricity: $e=c/a$
07. polar conic: $r=\frac{a}{1+e \cos\theta}$
08. circle as conic: $e=0$
09. parabola: $e=1$
10. ellipse area: $A=\pi ab$

검산 메모

- Kepler 궤도와 광학 반사 성질에 원뿔곡선이 나타난다.

확장 부록 17. 극한과 연속

해석학의 입구

핵심 공식

01. $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$
02. continuous at a : $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$
03. $\lim_{x \rightarrow 0} \sin x / x = 1$
04. $\lim_{x \rightarrow 0} (1 - \cos x) / x = 0$
05. $\lim_{n \rightarrow \infty} (1 + 1/n)^n = e$
06. squeeze theorem: $g \leq f \leq h$ and $\lim g = \lim h = L \Rightarrow \lim f = L$
07. intermediate value theorem: continuous f crosses intermediate values
08. ε - δ definition: $|x - a| < \delta \Rightarrow |f(x) - L| < \varepsilon$
09. asymptotic: $f(x) \sim g(x)$ if $f/g \rightarrow 1$
10. big-O: $f = O(g)$ if $|f| \leq C|g|$ eventually

검산 메모

- 극한 검산은 물리 공식이 맞는지 확인하는 가장 빠른 방법이다.

확장 부록 18. 미분 공식 I

기본 도함수와 연산법칙

핵심 공식

01. $d(c)/dx=0$

02. $d(x^n)/dx=nx^{n-1}$

03. $d(e^x)/dx=e^x$

04. $d(a^x)/dx=a^x \ln a$

05. $d(\ln x)/dx=1/x$

06. $d(\log_a x)/dx=1/(x \ln a)$

07. $(f+g)'=f'+g'$

08. $(cf)'=cf'$

09. $(fg)'=f'g+fg'$

10. $(f/g)'=(f'g-fg')/g^2$

검산 메모

- 독립변수를 바꾸면 미분 기호의 의미도 바뀐다.

확장 부록 19. 미분 공식 II

삼각, 역삼각, 쌍곡

핵심 공식

01. $(\sin x)' = \cos x$
02. $(\cos x)' = -\sin x$
03. $(\tan x)' = \sec^2 x$
04. $(\cot x)' = -\csc^2 x$
05. $(\sec x)' = \sec x \tan x$
06. $(\csc x)' = -\csc x \cot x$
07. $(\arcsin x)' = 1/\sqrt{1-x^2}$
08. $(\arctan x)' = 1/(1+x^2)$
09. $(\sinh x)' = \cosh x$
10. $(\cosh x)' = \sinh x$

검산 메모

- 각도 단위가 radian이 아니면 삼각함수 미분식이 달라진다.

확장 부록 20. 미분 공식 III

연쇄법칙, 음함수, 역함수, Taylor

핵심 공식

01. chain rule: $d f(g(x))/dx = f'(g(x))g'(x)$
02. implicit: $F(x,y)=0 \Rightarrow dy/dx = -F_x/F_y$
03. inverse: $(f^{-1})'(y) = 1/f'(x), y=f(x)$
04. linearization: $f(a+h) \approx f(a) + hf'(a)$
05. Taylor: $f(x) = \sum f^{(n)}(a)(x-a)^n/n!$
06. Maclaurin: $f(x) = \sum f^{(n)}(0)x^n/n!$
07. Newton method: $x_{n+1} = x_n - f(x_n)/f'(x_n)$
08. critical point: $f'(x)=0$ or undefined
09. second derivative test: $f''(a)>0$ min, $f''(a)<0$ max
10. curvature plane curve: $\kappa = |x'y'' - y'x''|/(x'^2 + y'^2)^{3/2}$

검산 메모

- 선형화는 작은 변화에서 가장 중요한 근사다.

확장 부록 21. 적분 공식 I

부정적분 기본

핵심 공식

01. $\int x^n dx = x^{n+1}/(n+1) + C, n \neq -1$

02. $\int dx/x = \ln|x| + C$

03. $\int e^x dx = e^{x+C}$

04. $\int a^x dx = a^x / \ln a + C$

05. $\int \sin x dx = -\cos x + C$

06. $\int \cos x dx = \sin x + C$

07. $\int \sec^2 x dx = \tan x + C$

08. $\int \csc^2 x dx = -\cot x + C$

09. $\int \sec x \tan x dx = \sec x + C$

10. $\int \csc x \cot x dx = -\csc x + C$

검산 메모

- 적분상수 C는 초기조건으로 결정된다.

확장 부록 22. 적분 공식 II

치환, 부분적분, 유리함수

핵심 공식

01. substitution: $\int f(g(x))g'(x)dx = \int f(u)du$
02. integration by parts: $\int u dv = uv - \int v du$
03. $\int dx/(x^2+a^2) = (1/a)\arctan(x/a) + C$
04. $\int dx/\sqrt{a^2-x^2} = \arcsin(x/a) + C$
05. $\int dx/(x^2-a^2) = (1/(2a))\ln|(x-a)/(x+a)| + C$
06. $\int \tan x dx = -\ln|\cos x| + C$
07. $\int \cot x dx = \ln|\sin x| + C$
08. $\int \sec x dx = \ln|\sec x + \tan x| + C$
09. ∂ fractions: rational functions $\rightarrow \sum s$ of simple terms
10. trig substitution: $x = a \sin\theta, a \tan\theta, a \sec\theta$

검산 메모

- 부분적분의 경계항은 물리 경계조건과 직접 연결된다.

확장 부록 23. 정적분과 응용

면적, 평균, 길이, 부피

핵심 공식

01. FTC: $\int_a^b f(x)dx = f(b) - f(a)$
02. area between curves: $A = \int_a^b (\text{top} - \text{bottom})dx$
03. average value: $f_{avg} = (1/(b-a)) \int_a^b f(x)dx$
04. arc length: $L = \int_a^b \sqrt{1 + (y')^2}dx$
05. surface area: $S = \int 2\pi y \sqrt{1 + (y')^2}dx$
06. disk/washer: $V = \pi \int (R^2 - r^2)dx$
07. shell: $V = 2\pi \int (\text{radius})(\text{height})dx$
08. center of mass: $x_{cm} = (1/M) \int x dm$
09. work: $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$
10. probability normalization: $\int p(x)dx = 1$

검산 메모

- 적분구간과 부호 convention을 먼저 고정한다.

확장 부록 24. 무한급수와 Taylor

수렴 판정과 표준 전개

핵심 공식

01. $\sum ar^n = a/(1-r), |r| < 1$
02. p -series: $\sum 1/n^p$ converges iff $p > 1$
03. ratio test: $L = \lim |a_{n+1}/a_n|$
04. root test: $L = \limsup |a_n|^{1/n}$
05. alternating test: decreasing $a_n \rightarrow 0 \Rightarrow \sum (-1)^n a_n$ converges
06. $e^x = \sum x^n/n!$
07. $\sin x = \sum (-1)^n x^{2n+1}/(2n+1)!$
08. $\cos x = \sum (-1)^n x^{2n}/(2n)!$
09. $\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} x^n/n, |x| \leq 1$ except $x = -1$
10. $1/(1-x) = \sum x^n, |x| < 1$

검산 메모

- 근사식을 쓸 때는 남은 항 또는 오차 차수를 함께 쓴다.

확장 부록 25. 벡터 기초

내적, 외적, 투영

핵심 공식

01. $a \cdot b = \sum a_i b_i = ||a|| ||b|| \cos \theta$
02. $||a|| = \sqrt{a \cdot a}$
03. $a \times b = (a_{2b3} - a_{3b2}, a_{3b1} - a_{1b3}, a_{1b2} - a_{2b1})$
04. $||a \times b|| = ||a|| ||b|| \sin \theta$
05. $a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)$
06. projection: $\text{proj}_b a = (a \cdot b / ||b||^2) b$
07. scalar triple: $a \cdot (b \times c) = \det[a \ b \ c]$
08. vector triple: $(a \times b) \times c = b(a \cdot c) - a(b \cdot c)$
09. orthogonal: $a \cdot b = 0$
10. unit vector: $a_{\text{hat}} = a / ||a||$

검산 메모

- 벡터 공식은 좌표계와 basis를 명시해야 안전하다.

확장 부록 26. 행렬과 행렬식

선형변환 계산

핵심 공식

01. $(AB)_{ij} = \sum_k A_{ik} B_{kj}$
02. $I A = A I = A$
03. $(AB)^T = B^T A^T$
04. $(AB)^{-1} = B^{-1} A^{-1}$
05. $\det(AB) = \det A \det B$
06. $\det(A^T) = \det A$
07. A invertible $\Leftrightarrow \det A \neq 0$
08. $\text{trace}(A+B) = \text{tr } A + \text{tr } B$
09. $\text{tr}(AB) = \text{tr}(BA)$
10. rank-nullity: $\text{rank}(A) + \text{nullity}(A) = n$

검산 메모

- 행렬은 basis를 정한 선형연산자다.

확장 부록 27. 선형연립과 고유값

$$Ax=b, Av=\lambda v$$

핵심 공식

01. linear system: $Ax=b$
02. homogeneous: $Ax=0$
03. solution unique *iff* $\text{null}(\mathbf{A})=\{0\}$
04. least squares: $\mathbf{A}^T \mathbf{A} x = \mathbf{A}^T b$
05. eigenvalue: $Av=\lambda v$
06. characteristic: $\det(\mathbf{A}-\lambda I)=0$
07. diagonalization: $\mathbf{A}=\mathbf{P}\mathbf{D}\mathbf{P}^{-1}$
08. Cayley–Hamilton: $p_{\mathbf{A}}(\mathbf{A})=0$
09. symmetric/Hermitian $\mathbf{A} \Rightarrow$ real eigenvalues
10. orthogonal Q : $Q^T Q=I$

검산 메모

- 정상모드 분석은 고유값 문제로 바뀐다.

확장 부록 28. 내적공간과 분해

직교성, Gram-Schmidt, SVD

핵심 공식

01. inner $\prod$: $\langle u, v \rangle$
02. Cauchy-Schwarz: $|\langle u, v \rangle| \leq \|u\| \|v\|$
03. Gram-Schmidt: $u_k = v_k - \sum_{j < k} \text{proj}_{e_j} v_k$
04. orthogonal projection: $P^2 = P, P = P^T$
05. spectral theorem: $A = Q \Lambda Q^T$ for real symmetric A
06. SVD: $A = U \Sigma V^T$
07. condition number: $\kappa(A) = \|A\| \|A^{-1}\|$
08. Moore-Penrose: $x = A^{+} b$
09. positive definite: $x^T A x > 0$ for $x \neq 0$
10. Cholesky: $A = L L^T$ for SPD A

검산 메모

- 직교기저는 에너지와 오차를 분해하기 쉽게 한다.

확장 부록 29. 다변수 미분

편미분, gradient, Jacobian, Hessian

핵심 공식

01. ∂ : $\partial f / \partial x_i$
02. gradient: $\nabla f = (\partial_{1f}, \dots, \partial_{nf})$
03. directional derivative: $\mathbf{D}_u f = \nabla f \cdot \mathbf{u}$
04. chain rule: $d f(x(t)) / dt = \nabla f \cdot dx / dt$
05. Jacobian: $\mathbf{J}_{ij} = \partial f_i / \partial x_j$
06. Hessian: $\mathbf{H}_{ij} = \partial^2 f / \partial x_i \partial x_j$
07. Clairaut: $f_{xy} = f_{yx}$ under smoothness
08. total differential: $df = \sum_i \partial_i f dx_i$
09. implicit function: $\mathbf{F}(x, y) = 0 \Rightarrow dy/dx = -\mathbf{F}_x / \mathbf{F}_y$
10. Taylor multi: $f(a+h) = f(a) + \nabla f(a) \cdot h + (1/2) h^T \mathbf{H} h + \dots$

검산 메모

- gradient는 가장 빠르게 증가하는 방향을 가리킨다.

확장 부록 30. 다중적분과 좌표변환

면적, 부피, Jacobian

핵심 공식

01. double integral: $\iint_D f(x,y) dA$
02. triple integral: $\iiint_V f(x,y,z) dV$
03. change variables: $dA = |J| du dv$
04. polar: $x=r \cos\theta, y=r \sin\theta, dA=r dr d\theta$
05. cylindrical: $dV=r dr d\theta dz$
06. spherical: $dV=r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi$
07. mass: $M=\iiint \rho dV$
08. center: $r_{cm}=(1/M)\iiint r\rho dV$
09. moment of inertia: $I=\int r_{\perp}^2 dm$
10. Fubini: order of integration *may be* exchanged under conditions

검산 메모

- 좌표변환은 Jacobian을 빼먹으면 차원이 틀어진다.

확장 부록 31. 벡터해석

grad, div, curl, 적분 정리

핵심 공식

01. $\nabla f = \text{gradient}$
02. $\nabla \cdot \mathbf{F} = \partial_i F_i$
03. $(\nabla \times \mathbf{F})_i = \varepsilon_{ijk} \partial_j F_k$
04. $\nabla \times \nabla f = 0$
05. $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = 0$
06. $\nabla \cdot (f\mathbf{F}) = \nabla f \cdot \mathbf{F} + f \nabla \cdot \mathbf{F}$
07. $\nabla \times (f\mathbf{F}) = \nabla f \times \mathbf{F} + f \nabla \times \mathbf{F}$
08. Gauss: $\iiint_V \nabla \cdot \mathbf{F} dV = \oint_{\partial V} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS$
09. Stokes: $\iint_S (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot \mathbf{n} dS = \oint_{\partial S} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$
10. Green: $\oint_C P dx + Q dy = \iint_D (Q_x - P_y) dA$

검산 메모

- 미분형 법칙과 적분형 법칙은 경계조건 해석에서 만난다.

확장 부록 32. 1계 미분방정식

분리, 선형, 정확, 안정성

핵심 공식

- 01. separable: $dy/dx=f(x)g(y)$
- 02. linear: $y'+p(x)y=q(x)$
- 03. integrating factor: $\mu=e^{\int p \, dx}$
- 04. solution: $(\mu y)'=\mu q$
- 05. exact: $Mdx+Ndy=0, M_y=N_x$
- 06. logistic: $y'=ry(1-y/K)$
- 07. equilibrium: $f(y_*)=0$
- 08. linear stability: $\delta'=f'(y_*)\delta$
- 09. Euler method: $y_{n+1}=y_n+h f(t_n, y_n)$
- 10. Picard–Lindelöf: Lipschitz $\Rightarrow$ local uniqueness

검산 메모

- 초기조건이 있어야 해가 하나로 정해진다.

확장 부록 33. 2계 ODE와 선형시스템

진동, 정상모드, 행렬지수

핵심 공식

01. linear homogeneous: $ay'' + by' + cy = 0$
02. characteristic: $ar^2 + br + c = 0$
03. undamped oscillator: $x'' + \omega_0^2 x = 0$
04. damped: $x'' + 2\gamma x' + \omega_0^2 x = 0$
05. forced: $x'' + 2\gamma x' + \omega_0^2 x = F_0 \cos \omega t / m$
06. Wronskian: $W = y_1 y_2' - y_1' y_2$
07. system: $x' = Ax$
08. solution: $x(t) = e^{At} x(0)$
09. matrix exponential: $e^{At} = \sum (A^{ntn}) / n!$
10. stability: $\text{Re}(\lambda_i) < 0 \Rightarrow \text{asymptotically stable}$

검산 메모

- 진동 문제의 해석은 고유값의 실수부와 허수부를 읽는 것이다.

확장 부록 34. Laplace와 Fourier

변환표와 convolution

핵심 공식

01. Laplace: $\mathbf{F}(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$
02. $L[f'] = sF(s) - f(0)$
03. $L[e^{at}] = 1/(s-a)$
04. $L[\sin \omega t] = \omega/(s^2 + \omega^2)$
05. $L[\cos \omega t] = s/(s^2 + \omega^2)$
06. Fourier: $f(t) = \int (d\omega/2\pi) \mathbf{F}(\omega) e^{-i\omega t}$
07. derivative: $\partial_t \leftrightarrow -i\omega$
08. convolution: $\mathbf{F}[f \cdot g] = \mathbf{F}[f] \mathbf{F}[g]$
09. Parseval: $\int |f|^2 dt = \int |\mathbf{F}|^2 d\omega / (2\pi)$
10. Dirac comb $\leftrightarrow$ Dirac comb under Fourier scaling

검산 메모

- 부호 convention은 문서마다 다르므로 첫 줄에 표시한다.

확장 부록 35. PDE 기초

분류, 표준 방정식, 경계조건

핵심 공식

01. first-order linear: $a u_x + b u_y = c$
02. second-order: $Au_{xx} + Buxy + Cuyy + \dots = 0$
03. classification: $B^2 - 4AC < 0$ elliptic, $= 0$ parabolic, > 0 hyperbolic
04. Laplace: $\nabla^2 u = 0$
05. Poisson: $\nabla^2 u = f$
06. heat: $u_t = \alpha \nabla^2 u$
07. wave: $u_{tt} = c^2 \nabla^2 u$
08. Schrodinger: $i\hbar \psi_t = H\psi$
09. Dirichlet: $u|_{\partial\Omega} = g$
10. Neumann: $\partial u / \partial n|_{\partial\Omega} = h$

검산 메모

- 경계조건이 틀리면 계산이 정확해도 물리가 틀린다.

확장 부록 36. 확률 기초

사건, 조건부확률, 독립

핵심 공식

01. $0 \leq P(\mathbf{A}) \leq 1, P(\Omega) = 1$
02. $P(\mathbf{A}^c) = 1 - P(\mathbf{A})$
03. $P(\mathbf{A} \cup \mathbf{B}) = P(\mathbf{A}) + P(\mathbf{B}) - P(\mathbf{A} \cap \mathbf{B})$
04. $P(\mathbf{A}|\mathbf{B}) = P(\mathbf{A} \cap \mathbf{B})/P(\mathbf{B})$
05. Bayes: $P(\mathbf{A}|\mathbf{B}) = P(\mathbf{B}|\mathbf{A})P(\mathbf{A})/P(\mathbf{B})$
06. independent: $P(\mathbf{A} \cap \mathbf{B}) = P(\mathbf{A})P(\mathbf{B})$
07. law total probability: $P(\mathbf{B}) = \sum_i P(\mathbf{B}|\mathbf{A}_i)P(\mathbf{A}_i)$
08. odds = $p/(1-p)$
09. expectation linearity: $\mathbf{E}[aX+bY] = a\mathbf{E}[X] + b\mathbf{E}[Y]$
10. Markov: $P(X \geq a) \leq \mathbf{E}[X]/a$ for $X \geq 0$

검산 메모

- 조건부확률은 표본공간이 바뀌는 것이다.

확장 부록 37. 확률분포

이산/연속, 평균, 분산

핵심 공식

01. $E[X] = \sum x p(x)$ or $\int x f(x) dx$
02. $Var(X) = E[X^2] - E[X]^2$
03. $Cov(X, Y) = E[XY] - E[X]E[Y]$
04. Bernoulli: $P(X=1)=p$, $E[X]=p$
05. Binomial: $P(X=k) = C(n, k)p^k(1-p)^{n-k}$
06. Poisson: $P(X=k) = e^{-\lambda} \lambda^k / k!$
07. Exponential: $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$
08. Normal: $f(x) = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}$
09. standardization: $Z = (X - \mu)/\sigma$
10. CLT: $(\sum - n\mu)/(\sigma\sqrt{n}) \Rightarrow N(0, 1)$

검산 메모

- 분포를 쓸 때 support와 parameter를 먼저 적는다.

확장 부록 38. 통계와 회귀

추정, 검정, 상관

핵심 공식

01. sample mean: $\bar{x} = (1/n) \sum x_i$
02. sample variance: $s^2 = (1/(n-1)) \sum (x_i - \bar{x})^2$
03. standard error: $SE = s/\sqrt{n}$
04. z-score: $z = (x - \mu)/\sigma$
05. confidence: estimate $\pm$ critical value $\times$ SE
06. correlation: $r = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}$
07. least squares slope: $b_1 = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sum (x_i - \bar{x})^2$
08. intercept: $b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}$
09. residual: $e_i = y_i - \hat{y}_i$
10. $R^2 = 1 - SSE/SST$

검산 메모

- 데이터 해석은 표본크기와 불확도부터 확인한다.

확장 부록 39. 조합과 이산수학

계수, 그래프, 논리

핵심 공식

01. permutation: $P(n,k)=n!/(n-k)!$
02. combination: $C(n,k)=n!/(k!(n-k)!)$
03. Pascal: $C(n,k)=C(n-1,k-1)+C(n-1,k)$
04. binomial: $(x+y)^n=\sum C(n,k)x^{n-k}y^k$
05. inclusion-exclusion: $|A\cup B|=|A|+|B|-|A\cap B|$
06. pigeonhole: n items into m boxes $\Rightarrow$ some $box \geq \text{ceil}(n/m)$
07. graph handshaking: $\sum \text{deg}(v)=2|E|$
08. Euler path criterion: 0 or 2 *odd* vertices
09. tree: $|E|=|V|-1$
10. De Morgan: $\neg(P\wedge Q)=\neg P\vee\neg Q$

검산 메모

- 조합 공식은 확률분포의 계수로 자주 등장한다.

확장 부록 40. 수론 기초

나눗셈, 합동, 정수론

핵심 공식

01. division: $a=bq+r, 0\leq r<|b|$
02. $a\equiv b \pmod m \Leftrightarrow m|(a-b)$
03. Euclidean algorithm: $\gcd(a,b)=\gcd(b, a \bmod b)$
04. Bezout: $ax+by=\gcd(a,b)$
05. Euler φ : $\varphi(n)=n\prod_{p|n}(1-1/p)$
06. Fermat: $a^{p-1}\equiv 1 \pmod p$ if $p\nmid a$
07. Euler theorem: $a^{\varphi(n)}\equiv 1 \pmod n$ if $\gcd(a,n)=1$
08. Chinese remainder theorem: coprime moduli $\Rightarrow$ unique $\pmod{\prod}$
09. modular inverse exists iff $\gcd(a,m)=1$
10. prime number theorem: $\pi(x)\sim x/\ln x$

검산 메모

- 합동식은 암호, 해시, 디지털 통신에서 자주 쓴다.

확장 부록 41. 수치해석

오차, 보간, 미분방정식 수치해

핵심 공식

01. absolute error: $|x - x'|$
02. relative error: $|x - x'|/|x|$
03. condition number: $\kappa \approx |\text{relative output error}|/|\text{relative input error}|$
04. bisection iterations: $\text{error} \leq (b-a)/2^n$
05. Newton: $x_{n+1} = x_n - f(x_n)/f'(x_n)$
06. secant: $x_{n+1} = x_n - f(x_n)(x_n - x_{n-1})/(f(x_n) - f(x_{n-1}))$
07. trapezoid: $\int_a^b f \approx (h/2)(f_0 + 2\sum f_i + f_n)$
08. Simpson: $\int \approx (h/3)(f_0 + 4\sum f_{\text{odd}} + 2\sum f_{\text{even}} + f_n)$
09. Euler ODE: $y_{n+1} = y_n + h f(t_n, y_n)$
10. RK4: weighted average of k_1, k_2, k_3, k_4

검산 메모

- 수치 결과는 grid/timestep convergence를 남겨야 한다.

확장 부록 42. 최적화

미분, 제약, convexity

핵심 공식

01. unconstrained optimum: $\nabla f(x) = 0$
02. second order sufficient: $\mathbf{H}(x)$ positive definite $\Rightarrow$ local min
03. gradient descent: $x_{k+1} = x_k - \eta \nabla f(x_k)$
04. Newton optimization: $x_{k+1} = x_k - \mathbf{H}^{-1} \nabla f$
05. Lagrange: $\nabla f = \lambda \nabla g$ for constraint $g=0$
06. KKT: stationarity + primal feasibility + dual feasibility + complementarity
07. convex: $f(tx + (1-t)y) \leq tf(x) + (1-t)f(y)$
08. strong convexity: $\mathbf{H} \succeq m\mathbf{I}$
09. least squares: minimize $\|Ax - b\|^2$
10. normal equation: $\mathbf{A}^{TA}x = \mathbf{A}^{Tb}$

검산 메모

- 최적화에서 스케일링과 조건수는 수렴성에 직접 영향을 준다.

확장 부록 43. 복소해석

해석함수, Cauchy, residue

핵심 공식

01. Cauchy–Riemann: $u_x=v_y, u_y=-v_x$
02. analytic $\Rightarrow$ complex differentiable in neighborhood
03. Cauchy integral: $f(a)=1/(2\pi i)\oint f(z)/(z-a) dz$
04. Cauchy derivative: $f^{(n)}(a)=n!/(2\pi i)\oint f(z)/(z-a)^{n+1} dz$
05. Laurent: $f(z)=\sum a_n(z-a)^n$
06. residue: $\text{Res}(f,a)=\text{coefficient of } (z-a)^{-1}$
07. residue theorem: $\oint f dz=2\pi i\sum \text{Res}(f,a_k)$
08. maximum modulus principle
09. Liouville: bounded entire $\Rightarrow$ constant
10. Rouché theorem compares zero counts

검산 메모

- pole과 branch cut은 Green 함수와 Fourier 역변환에서 자주 등장한다.

확장 부록 44. 추상대수 기초

군, 환, 체, 선형구조

핵심 공식

01. group: closure, associativity, identity, inverse
02. subgroup test: nonempty H , $ab^{-1} \in H$
03. order: $|G|$, $ord(g)$
04. Lagrange: $|H|$ divides $|G|$
05. homomorphism: $\varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b)$
06. kernel: $ker\varphi = \{g: \varphi(g) = e\}$
07. ring: addition abelian group + multiplication distributive
08. field: nonzero elements form multiplicative group
09. vector space over field F
10. linear map: $T(av+bw) = aT(v) + bT(w)$

검산 메모

- 대칭성은 군 구조로 정리되고 보존량으로 이어진다.

확장 부록 45. 미분기하와 좌표

곡선, 곡면, tensor 표기

핵심 공식

01. curve velocity: $v=dr/dt$
02. arc length: $s=\int ||r'(t)||dt$
03. unit tangent: $T=r'/||r'||$
04. curvature: $\kappa=||dT/ds||$
05. surface metric: $ds^2=g_{ij}du^i du^j$
06. Christoffel: $\Gamma^k_{ij}=(1/2)g^{k\ell}(\partial_i g_{j\ell}+\partial_j g_{i\ell}-\partial_\ell g_{ij})$
07. covariant derivative: $\nabla_i V^j=\partial_i V^j+\Gamma^j_{ik}V^k$
08. geodesic: $d^2x^k/ds^2+\Gamma^k_{ij}dx^i/ds dx^j/ds=0$
09. Riemann curvature: $[\nabla_i, \nabla_j]V^k=R^k_{\ell ij}V^\ell$
10. Einstein $\sum$: repeated upper/lower index is $\sum med$

검산 메모

- 좌표가 바뀌어도 물리량이 어떻게 변하는지 확인한다.

확장 부록 46. 위상과 집합

연속성의 일반 언어

핵심 공식

01. set operations: $A \cup B, A \cap B, A \setminus B, A^c$
02. function inverse image: $f^{-1}(B) = \{x: f(x) \in B\}$
03. equivalence relation: reflexive, symmetric, transitive
04. metric: $d(x, y) \geq 0, d=0 \text{ iff } x=y$, symmetry, triangle
05. open ball: $B_r(x) = \{y: d(x, y) < r\}$
06. continuity metric: $\forall \varepsilon \exists \delta d_X(x, a) < \delta \Rightarrow d_Y(f(x), f(a)) < \varepsilon$
07. compact in R^n : closed and bounded
08. connected: *not* union of two separated open sets
09. homeomorphism: continuous bijection with continuous inverse
10. fixed point idea: $T(x) = x$.

검산 메모

- 위상적 관점은 연속변형에 불변인 구조를 본다.

확장 부록 47. 대학수학-물리 연결 지도

공식이 과목을 건너는 방식

핵심 공식

01. symmetry $\rightarrow$ conserved charge
02. linear operator $\rightarrow$ eigenmodes
03. boundary condition $\rightarrow$ uniqueness
04. Green function $\rightarrow$ response to source
05. Fourier transform $\rightarrow$ mode diagonalization
06. variational principle $\rightarrow$ governing equation
07. dimensional analysis $\rightarrow$ scaling *law*
08. probability distribution $\rightarrow$ fluctuation
09. tensor equation $\rightarrow$ coordinate-independent *law*
10. stability $\rightarrow$ eigenvalue real part

검산 메모

- 이 페이지는 공식을 외우기보다 같은 구조를 인식하기 위한 지도다.

확장 부록 48. 최종 검산 루틴

공식 사용 전후 확인

핵심 공식

- 01.** 1. variables: known/unknown/state/control
- 02.** 2. domain and boundary/initial data
- 03.** 3. units and dimensions
- 04.** 4. sign convention and coordinate system
- 05.** 5. limiting cases: $\varepsilon \rightarrow 0$, $x \rightarrow 0$, $x \rightarrow \infty$
- 06.** 6. conservation residual
- 07.** 7. symmetry/invariance test
- 08.** 8. numerical convergence or analytic benchmark
- 09.** 9. uncertainty/error propagation
- 10.** 10. observable vs fitted parameter

검산 메모

- 검산 루틴을 통과하지 못한 결과는 아직 답이 아니다.

확장 부록 49. 참고한 공개 웹 자료

공식 범위 점검용 출처 노트

핵심 공식

OpenStax Elementary Algebra: quadratic formula and algebra procedures

OpenStax Prealgebra 2e: geometry applications, volume and surface area

OpenStax Precalculus: trigonometric identities, sequences, conics

OpenStax Calculus Vol. 1: differentiation and antiderivatives

OpenStax Calculus Vol. 3: Stokes and divergence theorem

OpenStax Introductory Statistics: binomial distribution and probability topics

Standard mathematical conventions: symbols, Greek letters, calculus notation

검산 메모

- 출처 문장 자체를 옮긴 것이 아니라, 표준 공식과 범위를 확인해 한국어 빠른 참조로 재구성했다.

확장 부록 50. 추가 수학 공식 목차 II

기존 1964쪽 이후에 덧붙인 초등-대학교 수학 공식 색인의 두 번째 목차이다. 앞쪽 본문과 레이아웃은 그대로 두고, 부록만 전공서적 부록처럼 더 촘촘하게 보강했다.

확장 부록 목차

50. 추가 수학 공식 목차 II	2014
51. 고급 적분법과 점화식 II	2015
52. 수열, 점화식, 생성함수	2016
53. 학원식 부등식과 최댓값/최솟값	2017
54. 행렬분해와 수치선형대수	2018
55. 특수함수 빠른 표	2019
56. 복소해석과 적분 변환	2020
57. ODE/PDE와 Green 함수	2021
58. 기본 그래프 스케치	2022
59. 도형, 좌표, 원뿔곡선 스케치	2023
60. 학문 수학 빠른 선택표와 참고 자료	2024

검산 메모

이 추가 목차의 항목은 앞쪽 내용과 중복되는 설명을 길게 반복하지 않고, 계산 중 바로 찾을 수 있는 공식과 판별 기준만 압축했다.

확장 부록 51. 고급 적분법과 점화식 II

삼각치환, 유리화, 감마형 적분

$$\begin{aligned}
 \sqrt{a^2 - x^2} : \quad x &= a \sin \theta, & dx &= a \cos \theta d\theta, \\
 \sqrt{a^2 + x^2} : \quad x &= a \tan \theta, & dx &= a \sec^2 \theta d\theta, \\
 \sqrt{x^2 - a^2} : \quad x &= a \sec \theta, & dx &= a \sec \theta \tan \theta d\theta, \\
 t = \tan \frac{x}{2} : \quad \sin x &= \frac{2t}{1+t^2}, \quad \cos x = \frac{1-t^2}{1+t^2}, & dx &= \frac{2dt}{1+t^2}, \\
 \int_0^\infty x^m e^{-ax} dx &= \frac{\Gamma(m+1)}{a^{m+1}}, \quad a > 0, \quad m > -1.
 \end{aligned}$$

대표 reduction formula

$$\begin{aligned}
 I_n &= \int \sin^n x dx = -\frac{\cos x \sin^{n-1} x}{n} + \frac{n-1}{n} I_{n-2}, \\
 J_n &= \int \cos^n x dx = \frac{\sin x \cos^{n-1} x}{n} + \frac{n-1}{n} J_{n-2}, \\
 K_n(a) &= \int x^n e^{ax} dx = \frac{x^n e^{ax}}{a} - \frac{n}{a} K_{n-1}(a), \\
 \int \frac{P(x)}{Q(x)} dx &= \text{polynomial part} + \sum_i \frac{A_i}{x - r_i} + \sum_j \frac{B_j x + C_j}{x^2 + p_j x + q_j}.
 \end{aligned}$$

검산 메모

루트 안이 $a^2 - x^2$, $a^2 + x^2$, $x^2 - a^2$ 중 어디에 속하는지 먼저 분류하면 치환 선택이 거의 자동으로 결정된다.

확장 부록 52. 수열, 점화식, 생성함수

수열과 선형 점화식

$$\begin{aligned}
 a_n &= a_1 + (n-1)d, \\
 S_n &= \frac{n}{2}\{2a_1 + (n-1)d\}, \quad G_n = a_1 r^{n-1}, \quad \sum_{k=0}^n r^k = \frac{1-r^{n+1}}{1-r}, \\
 a_n &= c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} \Rightarrow \lambda^2 - c_1 \lambda - c_2 = 0, \\
 F_n &= \frac{\varphi^n - \psi^n}{\sqrt{5}}, \quad \varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}, \quad \psi = \frac{1-\sqrt{5}}{2}.
 \end{aligned}$$

생성함수와 합성곱

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \sum_{n \geq 0} a_n x^n, \quad [x^n]A(x) = a_n, \\
 \left(\sum_{n \geq 0} a_n x^n \right) \left(\sum_{n \geq 0} b_n x^n \right) &= \sum_{n \geq 0} \left(\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \right) x^n, \\
 \frac{1}{1-x} &= \sum_{n \geq 0} x^n, \quad \frac{1}{(1-x)^m} = \sum_{n \geq 0} \binom{n+m-1}{m-1} x^n, \\
 C_n &= \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n}, \quad C(x) = \frac{1-\sqrt{1-4x}}{2x}.
 \end{aligned}$$

검산 메모

점화식 문제는 characteristic root, generating function, telescoping 중 하나로 갈라진다.

확장 부록 53. 학원식 부등식과 최댓값/최솟값

자주 쓰는 부등식

$$\begin{aligned}\frac{x_1 + \cdots + x_n}{n} &\geq (x_1 x_2 \cdots x_n)^{1/n} \quad (x_i > 0), \\ \left(\sum_i a_i^2 \right) \left(\sum_i b_i^2 \right) &\geq \left(\sum_i a_i b_i \right)^2, \\ \left(\sum_i |a_i b_i| \right) &\leq \left(\sum_i |a_i|^p \right)^{1/p} \left(\sum_i |b_i|^q \right)^{1/q}, \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, \\ f \left(\sum_i \lambda_i x_i \right) &\leq \sum_i \lambda_i f(x_i) \quad (f \text{ convex}, \lambda_i \geq 0, \sum_i \lambda_i = 1), \\ \ln x &\leq x - 1, \quad \sin x \leq x \leq \tan x \quad (0 < x < \pi/2).\end{aligned}$$

최댓값/최솟값 루틴

$$\begin{aligned}\nabla f &= 0, \quad H = (\partial_i \partial_j f), \quad H \succ 0 \Rightarrow \text{local min}, \quad H \prec 0 \Rightarrow \text{local max}, \\ \nabla f &= \lambda \nabla g \quad \text{under } g(x) = 0, \\ ax^2 + bx + c &= a \left(x + \frac{b}{2a} \right)^2 + c - \frac{b^2}{4a}, \\ \text{discriminant method: } f(x) &= y \text{ has real root} \Rightarrow \Delta(y) \geq 0.\end{aligned}$$

검산 메모

부등식은 등호 성립 조건을 먼저 찾으면 어떤 도구를 써야 하는지 빠르게 보인다.

확장 부록 54. 행렬분해와 수치선형대수

분해와 고유값

$$\begin{aligned}\det(AB) &= \det A \det B, & \operatorname{tr}(AB) &= \operatorname{tr}(BA), \\ A &= QR, \quad Q^T Q = I, & A &= U \Sigma V^T, \\ A &= A^T \Rightarrow A = Q \Lambda Q^T, \\ \det(A + uv^T) &= (1 + v^T A^{-1} u) \det A, \\ (A + uv^T)^{-1} &= A^{-1} - \frac{A^{-1} u v^T A^{-1}}{1 + v^T A^{-1} u}, \\ \kappa_2(A) &= \|A\|_2 \|A^{-1}\|_2 = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}.\end{aligned}$$

최소제곱과 투영

$$\begin{aligned}\min_x \|Ax - b\|_2^2 &\Rightarrow A^T A x = A^T b, \\ P_{\mathcal{C}(A)} &= A(A^T A)^{-1} A^T, \\ x_{k+1} &= x_k + \alpha_k r_k \quad \text{or} \quad x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k \quad (\text{iterative solvers}).\end{aligned}$$

검산 메모

고유값 문제에서는 대칭/정규 행렬 여부가 계산 안정성과 직교기저 존재를 결정한다.

확장 부록 55. 특수함수 빠른 표

감마, 베타, 베셀, 직교다항식

$$\begin{aligned}\Gamma(z) &= \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt, & \Gamma(z+1) &= z\Gamma(z), \\ B(x, y) &= \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt = \frac{\Gamma(x)\Gamma(y)}{\Gamma(x+y)}, \\ \Gamma(z)\Gamma(1-z) &= \frac{\pi}{\sin \pi z}, & \Gamma(z) &\sim \sqrt{2\pi} z^{z-1/2} e^{-z}, \\ x^2 y'' + xy' + (x^2 - \nu^2)y &= 0 \Rightarrow J_\nu(x), Y_\nu(x), \\ \frac{d}{dx} \{x^\nu J_\nu(x)\} &= x^\nu J_{\nu-1}(x), \\ P_n(x) &= \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n, \\ H_n(x) &= (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2}.\end{aligned}$$

물리에서 자주 만나는 위치

구면대칭 문제는 Legendre, 원통대칭 파동은 Bessel, 조화진동자는 Hermite, 수소 원자는 Laguerre와 구면 조화함수로 이어진다.

검산 메모

특수함수는 이름보다 미분방정식, 직교성, 경계조건을 먼저 확인한다.

확장 부록 56. 복소해석과 적분 변환

복소적분

$$\begin{aligned}
 f(z) &= u(x, y) + iv(x, y), & u_x &= v_y, & u_y &= -v_x, \\
 f^{(n)}(a) &= \frac{n!}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{(z-a)^{n+1}} dz, \\
 \oint_C f(z) dz &= 2\pi i \sum_k \text{Res}(f, z_k), \\
 \text{Res}\left(\frac{g}{h}, a\right) &= \frac{g(a)}{h'(a)} \quad (h(a) = 0, h'(a) \neq 0).
 \end{aligned}$$

Fourier, Laplace, Mellin, Z 변환

$$\begin{aligned}
 \widehat{f}(k) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx, & f(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{f}(k) e^{ikx} dk, \\
 \mathcal{L}\{f'(t)\} &= sF(s) - f(0), & \mathcal{L}\{f * g\} &= F(s)G(s), \\
 \mathcal{M}\{f\}(s) &= \int_0^{\infty} x^{s-1} f(x) dx, & X(z) &= \sum_{n=0}^{\infty} x_n z^{-n}.
 \end{aligned}$$

검산 메모

복소적분은 contour, pole 위치, branch cut 선택이 답을 결정한다.

확장 부록 57. ODE/PDE와 Green 함수

ODE 기본형

$$y' + p(x)y = q(x) \Rightarrow y = e^{-P(x)} \left(C + \int e^{P(x)} q(x) dx \right), \quad P' = p,$$

$$y'' + ay' + by = 0 \Rightarrow r^2 + ar + b = 0,$$

$$W[y_1, y_2] = y_1 y_2' - y_1' y_2, \quad y_p = -y_1 \int \frac{y_2 g}{W} dx + y_2 \int \frac{y_1 g}{W} dx.$$

PDE와 Green 함수

$$u_t = \alpha \nabla^2 u \quad (\text{heat}), \quad u_{tt} = c^2 \nabla^2 u \quad (\text{wave}),$$

$$\nabla^2 u = f \quad (\text{Poisson}), \quad \nabla^2 u = 0 \quad (\text{Laplace}),$$

$$LG(x, \xi) = \delta(x - \xi), \quad u(x) = \int G(x, \xi) f(\xi) d\xi + u_{\text{hom}},$$

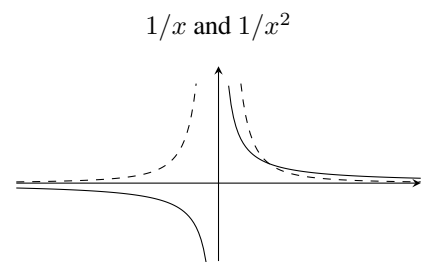
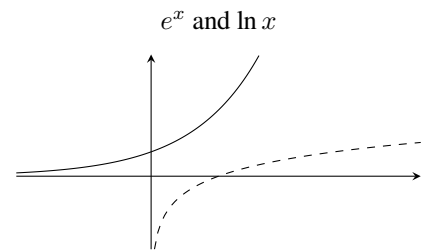
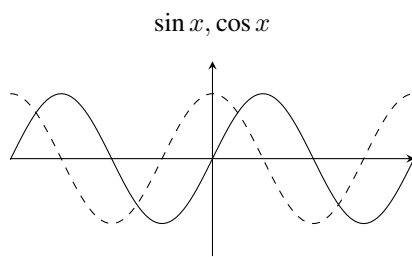
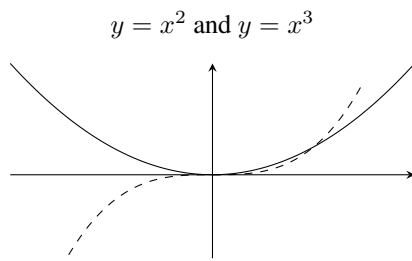
$$-\frac{d}{dx} \left(p \frac{dy}{dx} \right) + qy = \lambda wy, \quad \int_a^b w y_m y_n dx = 0 \quad (m \neq n).$$

검산 메모

경계조건이 Dirichlet, Neumann, Robin 중 무엇인지 먼저 적으면 Green 함수의 종류가 정해진다.

확장 부록 58. 기본 그래프 스케치

함수의 모양을 빠르게 기억하는 그림

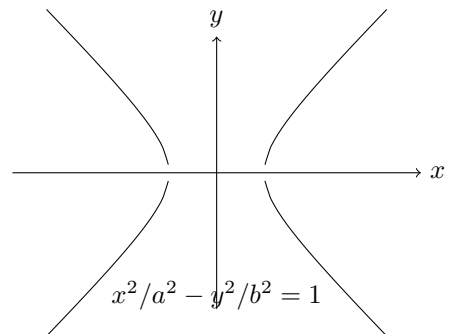
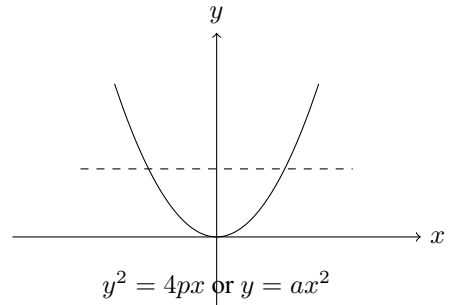
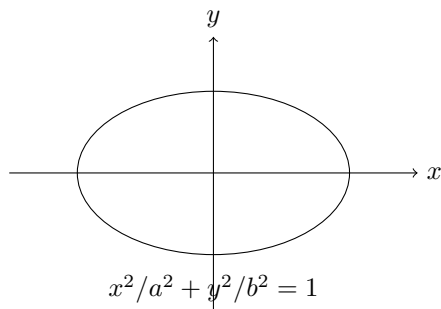
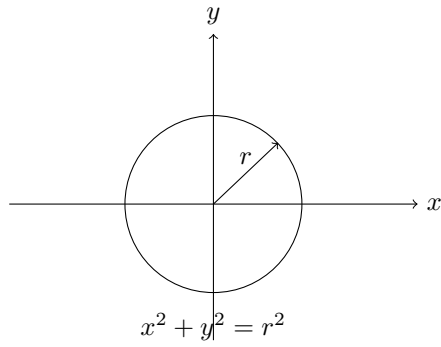


검산 메모

그래프는 미분 부호, 극한, 대칭성, 점근선을 함께 기억해야 계산 실수가 줄어든다.

확장 부록 59. 도형, 좌표, 원뿔곡선 스케치

기하 도형과 식의 연결



$$\text{line: } ax + by + c = 0, \quad d = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}},$$

$$\text{polar: } x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta, \quad dA = r dr d\theta.$$

검산 메모

도형 문제는 그림-방정식-범위-대칭성을 한 줄로 묶어 적는다.

확장 부록 60. 학문 수학 빠른 선택표와 참고 자료

문제를 보자마자 고르는 도구

문제의 모습	먼저 확인할 수학 도구
대칭과 보존량	군, Lie 대수, Noether, tensor 표기
경계값 문제	Green 함수, 고유함수 전개, 분리해
주파수 응답	Fourier/Laplace, pole, residue, convolution
작은 매개변수	섭동, Taylor, asymptotic, stationary phase
반복 구조	점화식, 생성함수, 행렬 거듭제곱
확률/잡음	moment, cumulant, characteristic function
곡면/좌표	metric, Jacobian, Stokes/Gauss theorem

참고한 공개 자료의 역할

OpenStax 계열 공개 교재는 초중고·학부 기본 공식 범위를 맞추는 기준으로, Paul’s Online Math Notes는 계산 루틴과 치환/급수/미분방정식 주제 배열을 확인하는 기준으로, NIST DLMF는 감마·베셀·르장드르·타원적분 같은 특수함수 범위를 확인하는 기준으로 삼았다. 문장 자체를 옮기지 않고 표준 공식과 빠른 계산용 표현으로 재구성했다.

검산 메모

부록은 외우는 표가 아니라, 문제를 풀 때 어떤 장으로 돌아가야 하는지 알려주는 빠른 색인이다.