

量子場の理論

一問一答 完全版

QFTの基礎からゲージ理論・繰り込み・標準模型・QCD・CFT・SUSY
・格子・曲がった時空・現代的対称性まで
全 352 問

構成	概念確認を中心に、数式・物理的意味・計算法・非摂動論まで段階的に収録。
対象	大学学部～大学院初年級。超弦理論・素粒子論へ進む前のQFT総復習にも対応。
使い方	問いだけを見て30～60秒で説明し、その後に答えを確認する。数式導出は標準教科書と併用する。

著者 t

本書の範囲

量子場理論を『自由場 → 経路積分 → 摂動論 → 正則化・繰り込み → RG → ゲージ理論 → 標準模型/QCD → 非摂動論 → CFT/SUSY → 格子・曲がった時空 → 現代QFT』の順に横断する。用語暗記ではなく、各概念が何を解決するために導入されるかを短い解説に含めた。

目次

- 第1章 量子場理論への入口（16問）
- 第2章 古典場と作用原理（15問）
- 第3章 自由スカラー場の量子化（15問）
- 第4章 Dirac場とフェルミオン（15問）
- 第5章 電磁場とAbelianゲージ理論（14問）
- 第6章 非Abelianゲージ理論（15問）
- 第7章 経路積分（15問）
- 第8章 摂動論とFeynman図（17問）
- 第9章 発散と正則化（12問）
- 第10章 繰り込み（14問）
- 第11章 繰り込み群とスケール（15問）
- 第12章 有効場理論（14問）
- 第13章 自発的対称性の破れ（12問）
- 第14章 標準模型の場の理論（15問）
- 第15章 QCDと非摂動物理（15問）
- 第16章 有限温度・有限密度場の理論（10問）
- 第17章 対称性・電流・異常（13問）
- 第18章 共形場理論（14問）
- 第19章 超対称場の理論（15問）
- 第20章 トポロジーと非摂動効果（13問）
- 第21章 格子場理論（15問）
- 第22章 曲がった時空のQFT（12問）
- 第23章 量子重力への接続（11問）
- 第24章 高度な計算・形式（14問）
- 第25章 現代QFTの概念（16問）

第1章 量子場理論への入口

Q1. 量子場理論 (QFT) とは何か。

答：特殊相対論と量子力学を両立させ、粒子の生成・消滅を含む現象を場の量子として記述する理論。

Q2. 場とは何か。

答：時空の各点に数・ベクトル・スピノルなどの値を対応させる対象。

Q3. 粒子はQFTでどう理解されるか。

答：量子化された場の励起状態として理解される。

Q4. 自然単位系とは何か。

答：通常 $\hbar=c=1$ と置き、質量・エネルギー・長さ・時間の次元関係を簡潔にする単位系。

Q5. 局所性とは何か。

答：相互作用が同一または無限小近傍の時空点にある場から構成されるという性質。

Q6. Lorentz不変性とは何か。

答：Lorentz変換をしても物理法則が同じ形を保つ性質。

Q7. ユニタリティとは何か。

答：時間発展が確率を保存すること。S行列では $S^\dagger S=1$ と表される。

Q8. 因果律はQFTでどう表されるか。

答：空間的に離れた点の局所可観測量が可換となる微視的因果律などで表される。

Q9. 真空とは何か。

答：Hamiltonianの最低エネルギー状態。相互作用理論では単純な『無粒子状態』以上の構造を持つ。

Q10. Fock空間とは何か。

答：0粒子、1粒子、2粒子...の状態を直和して構成する多粒子Hilbert空間。

Q11. 生成演算子とは何か。

答：ある量子状態に粒子励起を一つ加える演算子。

Q12. 消滅演算子とは何か。

答：ある量子状態から粒子励起を一つ取り除く演算子。

Q13. ボソンとは何か。

答：整数スピンを持ち、同種粒子の多粒子状態が対称化される粒子。

Q14. フェルミオンとは何か。

答：半整数スピンを持ち、同種粒子の多粒子状態が反対称化される粒子。

Q15. スピン統計定理とは何か。

答：相対論的局所QFTで整数スピンとBose統計、半整数スピンとFermi統計を結びつける定理。

Q16. CPT定理とは何か。

答：適切な局所Lorentz不変QFTが、電荷共役C・空間反転P・時間反転Tを同時に行うCPT変換に不変であるという定理。

第2章 古典場と作用原理

Q17. 作用 S とは何か。

答：ラグランジアン密度を時空積分した量。場の古典運動方程式は作用の停留条件から得られる。

Q18. ラグランジアン密度とは何か。

答：場とその微分から作る局所関数で、運動項・質量項・相互作用項を符号化する。

Q19. 作用原理とは何か。

答：境界条件を固定して作用の一次変分をゼロにする配置が古典運動を与えるという原理。

Q20. 場のEuler-Lagrange方程式とは何か。

答： $\partial L / \partial \phi - \partial_\mu [\partial L / \partial (\partial_\mu \phi)] = 0$ という場の運動方程式。

Q21. 実スカラー場とは何か。

答：各時空点に実数 $\phi(x)$ を対応させるLorentzスカラー場。

Q22. 複素スカラー場とは何か。

答：複素値をとるスカラー場。U(1)対称性と保存電荷を持たせられる。

Q23. Klein-Gordon方程式とは何か。

答：自由相対論的スカラー場が満たす $(\square + m^2)\phi = 0$ 。

Q24. d'Alembertian $\square$ とは何か。

答：Minkowski時空の波動演算子 $\square = \partial_\mu \partial^\mu$ 。

Q25. 共役運動量場とは何か。

答： $\pi(x) = \partial L / \partial (\partial_0 \phi)$ と定義され、正準量子化で ϕ と対をなす。

Q26. Hamiltonian密度とは何か。

答： $H = \pi \dot{\phi} - L$ の場理論版で、空間積分するとHamiltonianを与える。

Q27. エネルギー運動量テンソルとは何か。

答：時空並進対称性に対応する保存流で、エネルギー密度・運動量密度・応力を含む。

Q28. Noetherの定理とは何か。

答：連続対称性から保存電流・保存電荷が得られるという定理。

Q29. 全微分項が作用に与える影響は何か。

答：適切な境界条件では運動方程式を変えないが、境界やトポロジーが重要な場合には物理的意味を持ち得る。

Q30. 境界条件はなぜ重要か。

答：変分原理、スペクトル、保存量、表面項などを定めるため。

Q31. 改善されたエネルギー運動量テンソルとは何か。

答：保存量を変えずに全微分型の項を加え、対称性やトレース特性を改善したテンソル。

第3章 自由スカラー場の量子化

Q32. 正準量子化とは何か。

答：古典場と共役運動量を演算子にし、等時交換関係を課す量子化。

Q33. スカラー場の等時交換関係は何か。

答： $[\varphi(t, x), \pi(t, y)] = i \delta^3(x - y)$ を基本とする。

Q34. モード展開とは何か。

答：場を平面波モードと生成・消滅演算子で展開すること。

Q35. オンシェル条件とは何か。

答：自由粒子の四元運動量が $p^2 = m^2$ などの運動方程式を満たす条件。

Q36. オフシェルとは何か。

答：内部線などで四元運動量が質量殻条件を満たす必要がない状態。

Q37. 零点エネルギーとは何か。

答：各量子調和振動子モードが持つ基底エネルギー。場では形式的に無限和になる。

Q38. 正規順序とは何か。

答：生成演算子を消滅演算子より左へ並べる処方。自由場の真空エネルギーなどを整理する。

Q39. 一粒子状態はどう作るか。

答：真空 $|0\rangle$ に生成演算子 $a^\dagger(p)$ を作用させる。

Q40. 多粒子状態の規格化で δ 関数が現れる理由は何か。

答：無限体積で運動量が連続変数となり、直交規格化が Dirac δ 関数で表されるため。

Q41. Wightman関数とは何か。

答：時間順序を取らない真空相関関数 $\langle 0 | \varphi(x) \varphi(y) | 0 \rangle$ 。

Q42. Pauli-Jordan関数とは何か。

答：自由場の交換子を表す分布で、微視的因果律の確認に用いられる。

Q43. Feynmanプロパゲーターとは何か。

答：時間順序二点関数。運動量空間では典型的に $i/(p^2 - m^2 + i\epsilon)$ 。

Q44. $i\epsilon$ 処方とは何か。

答：極の回避方向を指定し、真空境界条件と因果的積分処方を定める微小虚数項。

Q45. Euclideanプロパゲーターとは何か。

答：Wick回転後のEuclidean運動量で通常 $1/(p^2 + m^2)$ 型になる二点関数。

Q46. 質量ゼロスカラー場で赤外問題が起こり得る理由は何か。

答：低運動量モードが強く寄与し、次元や観測量によって積分が赤外発散し得るため。

第4章 Dirac場とフェルミオン

Q47. Dirac方程式とは何か。

答：相対論的スピン1/2場の一次方程式 $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$ 。

Q48. γ 行列とは何か。

答：Clifford代数 $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2\eta^{\mu\nu}$ を満たす行列。

Q49. Diracスピノルとは何か。

答：Lorentz群のスピノル表現で変換する4成分場。粒子と反粒子の自由度を含む。

Q50. Dirac共役とは何か。

答： $\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$ 。Lorentzスカラーの双線形を作るために使う。

Q51. フェルミオン場で反交換関係を使う理由は何か。

答：スピン統計定理、正のエネルギー、Pauli排他原理と整合させるため。

Q52. γ_5 とは何か。

答：4次元で $\gamma_5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$ と定義され、カイラリティを分類する。

Q53. 左手・右手スピノルとは何か。

答：射影 $P_L = (1 - \gamma_5)/2$ 、 $P_R = (1 + \gamma_5)/2$ で得られるカイラル成分。

Q54. Weylスピノルとは何か。

答：4次元で一定のカイラリティを持つ2成分スピノル。

Q55. Majoranaスピノルとは何か。

答：適切な次元・署名で粒子と反粒子を同一視する現実条件を満たすスピノル。

Q56. フェルミオン質量項とは何か。

答：Dirac質量なら $m \bar{\psi} \psi$ 。カイラル成分の左・右を結ぶ。

Q57. フェルミオン数電流とは何か。

答：Dirac場の大域U(1)対称性から得られる $j^\mu = \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$ 。

Q58. スピン和とは何か。

答：外部フェルミオンの偏極を和するとき、 $u \bar{u}$ や $v \bar{v}$ を運動量と γ 行列で表す恒等式。

Q59. Fermion propagatorとは何か。

答：Dirac演算子の逆で、運動量空間では $i(\not{p}+m)/(p^2-m^2+i\epsilon)$ 。

Q60. Grassmann数とは何か。

答：反可換する数 $\theta_i \theta_j = -\theta_j \theta_i$ 。フェルミオン経路積分に使う。

Q61. Berezin積分とは何か。

答：Grassmann変数に対する積分。微分と類似し、フェルミオンGaussian積分の基礎となる。

第5章 電磁場とAbelianゲージ理論

Q62. Maxwell場をQFTでどう表すか。

答：4元ポテンシャル A_μ を量子場として扱う。

Q63. 場の強度 $F_{\{\mu \nu\}}$ とは何か。

答：Abelian理論では $F_{\{\mu \nu\}} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ 。

Q64. U(1)ゲージ変換とは何か。

答： $A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \alpha$ 、荷電場 $\psi \rightarrow e^{iq\alpha} \psi$ の局所変換。

Q65. 共変微分とは何か。

答：ゲージ変換に共変に変換する $D_\mu = \partial_\mu + iqA_\mu$ などの微分。

Q66. QEDとは何か。

答：DiracフェルミオンとU(1)ゲージ場の量子場理論で、量子電磁力学。

Q67. 最小結合とは何か。

答： ∂_μ を D_μ に置換してゲージ場との相互作用を導入する処方。

Q68. 光子が質量ゼロであることとゲージ対称性の関係は何か。

答：単純な $A_\mu A^\mu$ 質量項はゲージ不変でなく、非破れU(1)では質量ゼロが保護される。

Q69. Lorenzゲージとは何か。

答： $\partial_\mu A^\mu = 0$ を課すゲージ条件。

Q70. Feynmanゲージとは何か。

答：共変ゲージ固定パラメータ $\xi=1$ の選択で、光子プロパゲーターが簡単になる。

Q71. Ward恒等式とは何か。

答：ゲージ対称性から散乱振幅・相関関数に課される恒等式。

Q72. Ward-Takahashi恒等式とは何か。

答：Ward恒等式をオフシェルGreen関数へ一般化した関係。

Q73. 真空偏極とは何か。

答：仮想荷電粒子対によってゲージ場の二点関数が量子補正を受けること。

Q74. 電荷の遮蔽とは何か。

答：QED真空偏極により長距離で観測される有効電荷が短距離より小さくなる現象。

Q75. Landau poleとは何か。

答：摂動的QEDのrunning couplingを高エネルギーへ外挿すると有限スケールで発散する形式的現象。

第6章 非Abelianゲージ理論

Q76. Yang-Mills理論とは何か。

答：非可換Lie群をゲージ群とするゲージ場理論。

Q77. 非Abelian場の強度は何か。

答： $F^a_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu + g f^{abc} A^b_\mu A^c_\nu$ 。

Q78. 構造定数 f^{abc} とは何か。

答：Lie代数の交換関係 $[T^a, T^b] = if^{abc} T^c$ を定める係数。

Q79. ゲージボソンの自己相互作用はなぜ生じるか。

答：非可換場の強度に $A A$ 項が含まれ、Yang-Mills作用から3点・4点頂点が生じるため。

Q80. 随伴表現とは何か。

答：Lie代数自身に作用する表現。ゲージ場は通常ゲージ群の随伴表現に属する。

Q81. 基本表現とは何か。

答： $SU(N)$ なら N 成分ベクトルに自然に作用する表現。QCDのクォークが例。

Q82. Wilson線とは何か。

答：ゲージ接続を経路に沿ってpath-orderして指数化した平行移動演算子。

Q83. Wilson loopとは何か。

答：閉曲線上のWilson線のトレース。ゲージ不変で閉じ込めの診断に使われる。

Q84. ゲージ固定が必要な理由とは何か。

答：ゲージ等価な配置を重複積分すると経路積分が発散・特異になるため。

Q85. Faddeev-Popov行列式とは何か。

答：ゲージ条件とゲージ変換のJacobianから生じる行列式。

Q86. Faddeev-Popovゴーストとは何か。

答：その行列式を局所作用で表す反可換スカラー場。非Abelian理論では相互作用する。

Q87. BRST変換とは何か。

答：ゲージ変換・ゴーストを統合した冪零なフェルミオンの対称変換。

Q88. BRSTコホモロジーとは何か。

答：BRST閉状態をBRST完全状態で割った空間。物理状態の抽出に使われる。

Q89. Gribov ambiguityとは何か。

答：非Abelianゲージ理論で一つのゲージ条件が同一ゲージ軌道と複数回交わり得る問題。

Q90. 背景場法とは何か。

答：場を背景場と量子揺らぎに分け、背景ゲージ不変性を保ちながら量子補正を計算する方法。

第7章 経路積分

Q91. 経路積分とは何か。

答：すべての場配置を $\exp(iS)$ の重みで積分して量子振幅を構成する定式化。

Q92. 生成汎関数 $Z[J]$ とは何か。

答：外部源 J を導入した経路積分で、 J 微分により時間順序相関関数を生成する。

Q93. 連結生成汎関数 $W[J]$ とは何か。

答：通常 $Z=e^{iW}$ と定義し、連結相関関数を生成する。

Q94. 有効作用 $\Gamma[\varphi]$ とは何か。

答： $W[J]$ のLegendre変換で得られ、1PI頂点関数を生成する量子作用。

Q95. 古典場 φ_c とは何か。

答：外部源存在下での場の期待値 $\delta W / \delta J$ 。

Q96. Gaussian積分が重要な理由とは何か。

答：自由理論の経路積分がGaussianで厳密に計算でき、相互作用論の摂動展開の基礎になるため。

Q97. Wickの定理とは何か。

答：自由場の時間順序積を正規順序積と全ての縮約の和に分解する定理。

Q98. 縮約とは何か。

答：二つの自由場の時間順序積から正規順序積を引いたもの。プロパゲーターに等しい。

Q99. Euclidean経路積分とは何か。

答：Wick回転により重みを $\exp(-S_E)$ とした経路積分。統計力学との対応が明瞭になる。

Q100. Wick回転とは何か。

答：実時間を虚時間へ解析接続し、Lorentzian積分をEuclidean積分へ移す操作。

Q101. 鞍点近似とは何か。

答：作用の停留配置の近傍で二次展開し、経路積分を半古典的に近似する方法。

Q102. functional determinantとは何か。

答：微分演算子の無限次元行列式。1-loop量子補正などに現れる。

Q103. sourceとは何か。

答：場に線形結合させる外部関数 $J(x)$ 。相関関数を生成するための補助変数。

Q104. Schwinger-Dyson方程式とは何か。

答：経路積分の変数変換不変性から得られる相関関数の無限階層方程式。

Q105. Osterwalder-Schrader再構成とは何か。

答：適切なEuclidean相関関数からLorentzian量子場理論を再構成する枠組み。

第8章 摂動論とFeynman図

Q106. 摂動論とは何か。

答：小さな結合定数について物理量を級数展開する近似法。

Q107. 自由作用と相互作用作用の分離とは何か。

答： $S=S_0+S_{\text{int}}$ と分け、 S_0 を厳密に扱い S_{int} を展開する。

Q108. Feynman則とは何か。

答：作用からプロパゲーター、頂点因子、対称因子、積分測度などを読み取る規則。

Q109. 外線とは何か。

答：散乱過程の入射・出射粒子に対応するFeynman図の線。

Q110. 内線とは何か。

答：頂点間を結ぶ仮想粒子のプロパゲーター。

Q111. loopとは何か。

答：独立な内部運動量積分を生む閉じた経路。量子補正の次数を表す。

Q112. tree diagramとは何か。

答：loopを含まないFeynman図。通常、半古典的・最低次の寄与。

Q113. 1PI図とは何か。

答：内部線を一本切っても二つに分離しない one-particle-irreducible 図。

Q114. vacuum bubble とは何か。

答：外線を持たない真空図。規格化された相関関数ではしばしば相殺される。

Q115. tadpole 図とは何か。

答：一つの頂点から loop が出て戻る形の図。真空期待値のシフトなどに関係する。

Q116. 対称因子とは何か。

答：同一の Wick 縮約を重複して数えることを補正する組合せ係数。

Q117. crossing symmetry とは何か。

答：散乱振幅の外部粒子を入射と出射の間で解析接続して関連づける性質。

Q118. Mandelstam 変数とは何か。

答：2→2 散乱で s, t, u と定義される Lorentz 不変な運動量組合せ。

Q119. LSZ 還元公式とは何か。

答：時間順序相関関数の極の留数からオンシェル S 行列要素を抽出する公式。

Q120. amputation とは何か。

答：Green 関数から外部プロパゲーター因子を取り除く操作。

Q121. 光学定理とは何か。

答：S 行列のユニタリティから全断面積と前方散乱振幅の虚部を結ぶ関係。

Q122. Cutkosky 則とは何か。

答：loop 振幅の不連続性・虚部を、内部線をオンシェルに切った位相空間積分で求める規則。

第9章 発散と正則化

Q123. UV 発散とは何か。

答：loop 積分の大運動量領域から生じる短距離発散。

Q124. IR 発散とは何か。

答：小運動量や質量ゼロ粒子の soft/collinear 領域から生じる長距離発散。

Q125. 正則化とは何か。

答：発散式を一時的に有限または制御可能な形へ変える手続き。

Q126. cutoff 正則化とは何か。

答：運動量積分に上限 Λ を設ける正則化。

Q127. 次元正則化とは何か。

答：時空次元を $d=4-\epsilon$ へ解析接続して発散を $1/\epsilon$ 極として扱う方法。

Q128. Pauli-Villars正則化とは何か。

答：重い補助場を導入して高運動量発散を相殺する方法。

Q129. lattice正則化とは何か。

答：時空を格子化してUV cutoffを導入する非摂動的な正則化。

Q130. 正則化と繰り込みの違いは何か。

答：正則化は発散を制御する中間手段、繰り込みは物理パラメータを定義して正則化依存性を除く手続き。

Q131. power divergenceとは何か。

答：cutoffの正のべき Λ^n で発散する項。

Q132. log divergenceとは何か。

答： $\log \Lambda$ または次元正則化の $1/\epsilon$ として現れる対数発散。

Q133. superficial degree of divergenceとは何か。

答：Feynman図がUVでどの程度発散し得るかをpower countingで見積もる次数。

Q134. power countingとは何か。

答：運動量次元を数えて演算子の重要度や発散次数を判定する方法。

第10章 繰り込み

Q135. 繰り込みとは何か。

答：裸のパラメータを再定義し、有限な物理量を用いて予言を表す手続き。

Q136. 裸の質量とは何か。

答：正則化された作用に現れる未繰り込み質量パラメータ。

Q137. 裸の結合定数とは何か。

答：正則化された作用に現れる未繰り込み結合。

Q138. countertermとは何か。

答：量子補正の発散を相殺するため作用に加える局所項。

Q139. 波動関数繰り込みとは何か。

答：場を $\phi_0 = Z^{1/2} \phi_R$ のように再スケールすること。

Q140. on-shell schemeとは何か。

答：物理質量や極の留数などを直接繰り込み条件に使うscheme。

Q141. MS schemeとは何か。

答：次元正則化で $1/\epsilon$ 極だけを引く minimal subtraction。

Q142. MS-bar schemeとは何か。

答：MSに $\log 4\pi - \gamma_E$ の定数も含めて引く広く使われる scheme。

Q143. 繰り込み可能とは何か。

答：有限個のパラメータ・演算子の再定義で全次数のUV発散を吸収できること。

Q144. super-renormalizableとは何か。

答：結合が正の質量次元を持ち、発散する図が有限種類に限られる理論。

Q145. non-renormalizableとは何か。

答：従来の意味では無限個のcountertermが必要な理論。ただしEFTとしては秩序立てて予言可能。

Q146. renormalization conditionとは何か。

答：繰り込み済みパラメータを物理量や特定運動量点で定義する条件。

Q147. scheme dependenceとは何か。

答：中間的なrunning

parameter等が繰り込みschemeに依存すること。完全な物理観測量はschemeに依存しない。

Q148. naturalnessとは何か。

答：低エネルギーの小さなパラメータが高エネルギー補正に対して不自然な微調整を要求しないという考え。

第11章 繰り込み群とスケール

Q149. 繰り込み群 (RG) とは何か。

答：観測スケールを変えたときに結合や演算子がどう流れるかを記述する枠組み。

Q150. β 関数とは何か。

答： $\beta(g) = \mu \, dg/d\mu$ 。結合定数のスケール依存性を与える。

Q151. running couplingとは何か。

答：繰り込みスケール μ に依存して変化する有効結合定数。

Q152. 固定点とは何か。

答：全 β 関数がゼロとなり、スケール変換で理論が不変となる点。

Q153. UV fixed pointとは何か。

答：高エネルギー極限でRG流が近づく固定点。

Q154. IR fixed point とは何か。

答：低エネルギー極限でRG流が近づく固定点。

Q155. relevant operator とは何か。

答：固定点近傍でIRへ向かうと効果が増大する演算子。

Q156. irrelevant operator とは何か。

答：IRで効果が抑制される演算子。EFTの高次演算子が典型。

Q157. marginal operator とは何か。

答：古典的スケーリングでは無次元結合を持つ演算子。量子補正でrelevant/irrelevantになり得る。

Q158. anomalous dimension とは何か。

答：量子補正により古典的次元からずれるスケーリング次元の補正。

Q159. Callan-Symanzik方程式とは何か。

答：相関関数の μ 依存性を β 関数と異常次元で記述するRG方程式。

Q160. dimensional transmutation とは何か。

答：古典的に無次元な結合が量子効果によって物理的質量スケールへ置き換わる現象。

Q161. asymptotic freedom とは何か。

答：高エネルギーで結合が弱くなる性質。非Abelianゲージ理論QCDが代表例。

Q162. asymptotic safety とは何か。

答：高エネルギーで非自明なUV固定点へ流れることで理論をUV完成するシナリオ。

Q163. Wilsonian RG とは何か。

答：高運動量自由度を積分消去し、cutoffを下げながら有効作用の流れを追う考え方。

第12章 有効場理論

Q164. 有効場理論 (EFT) とは何か。

答：特定の低エネルギー領域で必要な自由度と対称性だけを使う場の理論。

Q165. EFTで高次元演算子はどう現れるか。

答： O_d/Λ^{d-4} のように高エネルギースケール Λ で抑制される。

Q166. decoupling とは何か。

答：十分重い自由度の低エネルギー効果が逆質量のべきで抑制される性質。

Q167. matching とは何か。

答：UV理論とEFTが共通の低エネルギー観測量を再現するようWilson係数を決めること。

Q168. Wilson係数とは何か。

答：EFT中の局所演算子に掛かる係数で、積分消去した短距離物理を符号化する。

Q169. operator basisとは何か。

答：対称性と部分積分・運動方程式等の冗長性を考慮して選んだ独立演算子集合。

Q170. integrating outとは何か。

答：重い場などの自由度を経路積分して低エネルギー有効作用を得る操作。

Q171. Euler-Heisenberg作用とは何か。

答：電子を積分消去した低エネルギーQEDで、光子の非線形自己相互作用を記述するEFT。

Q172. Fermi理論とは何か。

答：Wボソンを積分消去した低エネルギー弱相互作用の4フェルミオンEFT。

Q173. chiral perturbation theoryとは何か。

答：QCDの低エネルギーで擬Goldstone粒子を自由度とするEFT。

Q174. SMEFTとは何か。

答：標準模型の場と対称性を保ち、高次元演算子を加えたStandard Model EFT。

Q175. HEFTとは何か。

答：電弱対称性の非線形実現などを許す、SMEFTより一般的なHiggs EFT。

Q176. EFTの予言可能性は何から来るか。

答：所望の精度・ E/Λ 次数を固定すれば必要な演算子数が有限になるpower countingから来る。

Q177. threshold correctionとは何か。

答：重い粒子の質量スケールを跨ぐ際にEFTパラメータへ加わる有限なmatching補正。

第13章 自発的対称性の破れ

Q178. 自発的対称性の破れとは何か。

答：作用は対称だが選ばれた真空がその対称性を保たない現象。

Q179. order parameterとは何か。

答：相を識別し、対称性の破れを示す期待値などの量。

Q180. 真空期待値 (VEV) とは何か。

答：真空での演算子期待値 $\langle 0|O|0\rangle$ 。

Q181. Goldstone定理とは何か。

答：連続大域対称性が自発的に破れると、破れた生成子に対応して質量ゼロモードが現れるという定理。

Q182. Goldstone bosonとは何か。

答：自発的に破れた連続大域対称性に伴う低エネルギー質量ゼロ励起。

Q183. Mexican-hat potentialとは何か。

答：原点でなく環状の縮退真空を持つ典型的対称性破れポテンシャル。

Q184. Higgs機構とは何か。

答：局所ゲージ対称性の自発的破れによりゲージ場がGoldstone自由度を取り込み質量を得る機構。

Q185. unitary gaugeとは何か。

答：Goldstone場を明示的に消し、物理的な massive gauge boson を直接表すゲージ。

Q186. R_ξ gaugeとは何か。

答：ゲージ場とGoldstoneの混合を制御し、繰り込み計算に便利な共変ゲージ族。

Q187. Elitzurの定理とは何か。

答：ゲージ対称性そのものは局所ゲージ非不変演算子のVEVによって通常の大域対称性のようには自発的破れを定義できないという定理。

Q188. 擬Goldstone bosonとは何か。

答：対称性が近似的で明示的破れもあるため小さな質量を持つGoldstone様粒子。

Q189. 非線形 σ 模型とは何か。

答：Goldstone自由度を真空多様体上の座標として記述する低エネルギーEFT。

第14章 標準模型の場の理論

Q190. 標準模型のゲージ群は何か。

答： $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 。

Q191. QCDとは何か。

答： $SU(3)_C$ をゲージ群とする強相互作用の量子色力学。

Q192. 電弱理論とは何か。

答： $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ理論がHiggs機構で $U(1)_{em}$ へ破れる理論。

Q193. hyperchargeとは何か。

答： $U(1)_Y$ に対する量子数。電荷は $Q=T_3+Y$ の規約などで関係づけられる。

Q194. Higgs doubletとは何か。

答：標準模型で $SU(2)_L$ 二重項として変換する複素スカラー場。

Q195. Yukawa相互作用とは何か。

答：スカラー場と左右フェルミオンを結ぶ相互作用。Higgs VEV後にフェルミオン質量を生む。

Q196. CKM行列とは何か。

答：クォークの弱相互作用で質量固有状態と弱固有状態のずれを表すunitary混合行列。

Q197. PMNS行列とは何か。

答：ニュートリノ振動で荷電レプトンとニュートリノ質量固有状態の混合を表す行列。

Q198. QCDの色とは何か。

答：SU(3)_C基本表現の3成分内部量子数。

Q199. gluonとは何か。

答：QCDの質量ゼロゲージボソン。SU(3)随伴表現の8成分を持つ。

Q200. quark confinementとは何か。

答：低エネルギーで色荷を持つクォークやグルーオンが孤立した漸近状態として観測されない性質。

Q201. hadronizationとは何か。

答：高エネルギーのクォーク・グルーオンが低エネルギーでハドロンへ変換される非摂動過程。

Q202. partonとは何か。

答：高エネルギー散乱でハドロン内部の点状構成要素として振る舞うクォークやグルーオン。

Q203. parton distribution functionとは何か。

答：ハドロン中で特定運動量分率を持つpartonの分布を表す非摂動関数。

Q204. factorization theoremとは何か。

答：高エネルギー過程を短距離摂動部分と長距離PDF等に分離する定理・枠組み。

第15章 QCDと非摂動物理

Q205. QCDが漸近的自由である理由とは何か。

答：非Abelianゲージボソン自己相互作用が反遮蔽効果を生み、十分少ない物質場では β 関数が負になるため。

Q206. Λ_{QCD} とは何か。

答：running couplingが強くなるQCDの動的スケール。dimensional transmutationで生じる。

Q207. chiral symmetry breakingとは何か。

答：軽いクォークの近似カイラル対称性がQCD真空で自発的に破れる現象。

Q208. quark condensateとは何か。

答：の非零VEV。カイラル対称性破れのorder parameterとして使われる。

Q209. pionが軽い理由とは何か。

答：近似的カイラル対称性の自発的破れに伴う擬Goldstone bosonだから。

Q210. instantonsとは何か。

答：Euclidean Yang-Mills方程式の有限作用トポロジカル古典解。非摂動効果に寄与する。

Q211. θ vacuumとは何か。

答：異なるトポロジカルsectorの重ね合わせで特徴づけられるYang-Mills真空。

Q212. strong CP problemとは何か。

答：QCDで許される θ 項の係数が実験的に極めて小さい理由の問題。

Q213. axionとは何か。

答：Peccei-Quinn機構でstrong CP問題を動的に解く擬Goldstone boson。

Q214. large-N QCDとは何か。

答：色数 N を大きくし't Hooft coupling g^2N を固定してQCDを整理する展開。

Q215. 't Hooft double-line notationとは何か。

答：随伴場の色添字を二本線で描き、Feynman図を曲面トポロジーで分類する記法。

Q216. planar limitとは何か。

答：large-Nで平面図が支配的になる極限。

Q217. glueballとは何か。

答：主としてグルーオンからなる色一重項束縛状態。

Q218. Wilson loopのarea lawとは何か。

答：大きなloop期待値が囲む面積に指数的に依存する挙動で、静的クォーク閉じ込めの指標。

Q219. Polyakov loopとは何か。

答：有限温度Euclidean時間方向を一周するWilson線。純粋ゲージ理論で非閉じ込め転移のorder parameterとなる。

第16章 有限温度・有限密度場の理論

Q220. 有限温度QFTとは何か。

答：量子場理論を熱平衡状態で扱う枠組み。

Q221. imaginary-time formalismとは何か。

答：Euclidean時間を周期 $\beta = 1/T$ にコンパクト化する有限温度形式。

Q222. Matsubara周波数とは何か。

答：有限温度Euclidean時間方向の離散周波数。ボソンは $2\pi nT$ 、フェルミオンは $(2n+1)\pi T$ 。

Q223. thermal propagatorとは何か。

答：温度依存の占有数・境界条件を含む有限温度二点関数。

Q224. real-time formalismとは何か。

答：実時間上で有限温度相関関数や非平衡過程を扱う形式。

Q225. chemical potentialとは何か。

答：保存電荷の平均値を制御する熱力学変数。Hamiltonianに $-\mu Q$ を加える形で現れる。

Q226. QCD phase diagramとは何か。

答：温度とバリオン化学ポテンシャル等に対するQCD物質の相構造。

Q227. quark-gluon plasmaとは何か。

答：高温・高密度でハドロン閉じ込めが解けたクォーク・グルーオン物質。

Q228. Debye screeningとは何か。

答：熱媒質中で静的電場が遮蔽される現象。

Q229. thermal massとは何か。

答：媒質中の自己エネルギー補正により生じる温度依存の有効質量尺度。

第17章 対称性・電流・異常

Q230. 大域対称性とは何か。

答：変換パラメータが時空に依存しない対称性。Noether電荷を伴うことが多い。

Q231. 局所対称性とは何か。

答：変換パラメータが時空点ごとに変わる記述の冗長性。ゲージ場を導く。

Q232. discrete symmetryとは何か。

答：連続パラメータを持たない有限・離散群による対称性。

Q233. charge conjugation Cとは何か。

答：粒子と反粒子を交換する変換。

Q234. parity Pとは何か。

答：空間座標を反転する変換。

Q235. time reversal Tとは何か。

答：時間方向を反転する変換。量子論では反unitary性が重要。

Q236. anomalyとは何か。

答：古典対称性が量子化・正則化後に保存されなくなる現象。

Q237. chiral anomalyとは何か。

答：古典的軸性電流の保存則が量子loopで破れる異常。

Q238. gauge anomalyが危険な理由は何か。

答：ゲージ冗長性の量子的破れはユニタリティや整合性を損なうため、相殺が必要。

Q239. anomaly cancellationとは何か。

答：全フェルミオン内容からのゲージ異常係数が打ち消し合う条件。

Q240. 't Hooft anomalyとは何か。

答：大域対称性を背景ゲージ場に結合したとき現れる異常。RG流を通じて保存される。

Q241. 't Hooft anomaly matchingとは何か。

答：UVとIRで大域対称性の異常が一致しなければならないという強い非摂動制約。

Q242. trace anomalyとは何か。

答：古典的にスケール不変でも量子効果によりエネルギー運動量テンソルのトレースが非零になる現象。

第18章 共形場理論

Q243. 共形場理論 (CFT) とは何か。

答：共形変換に不変な量子場理論。RG固定点の記述として現れる。

Q244. scale invarianceとは何か。

答：座標の一樣スケール変換に対して理論が不変である性質。

Q245. conformal invarianceとは何か。

答：局所的な角度を保つ変換まで含む、scale invarianceより強い対称性。

Q246. primary operatorとは何か。

答：共形群の特殊共形変換に対して基本的な変換則を持つ演算子。

Q247. descendant operatorとは何か。

答：primaryに並進生成子、すなわち微分を作用させて得る演算子。

Q248. scaling dimensionとは何か。

答：スケール変換下での演算子の重み Δ 。

Q249. unitarity boundとは何か。

答：CFTで正ノルムを要求することで演算子次元に課される下限。

Q250. OPEとは何か。

答：近接した演算子積を局所演算子の和として展開するoperator product expansion。

Q251. OPE coefficientとは何か。

答：OPEに現れる係数。演算子次元とともにCFTデータを構成する。

Q252. crossing symmetryとは何か。

答：4点関数を異なるOPE channelで展開しても同じになるという整合条件。

Q253. conformal bootstrapとは何か。

答：対称性、crossing、unitarityからCFTデータを制約する非摂動的方法。

Q254. central chargeとは何か。

答：二次元Virasoro代数の中心拡張係数。高次元にも類似のCFTデータがある。

Q255. radial quantizationとは何か。

答：原点からの半径をEuclidean時間としてCFTを量子化する方法。

Q256. state-operator correspondenceとは何か。

答：CFTで局所演算子と球面上の量子状態を対応させる原理。

第19章 超対称場の理論

Q257. 超対称性 (SUSY) とは何か。

答：ボソンとフェルミオンを交換する時空対称性。

Q258. supercharge Q とは何か。

答：SUSY変換を生成するフェルミオンの生成子。

Q259. SUSY algebraとは何か。

答： Q の反交換子が運動量生成子などに閉じる超Lie代数。

Q260. supermultipletとは何か。

答：SUSY変換で互いに移り合う場・状態の集合。

Q261. chiral multipletとは何か。

答：4次元 $N=1$ SUSYで複素スカラーとWeylフェルミオン等を含む多重項。

Q262. vector multipletとは何か。

答：ゲージ場とgaugino等を含むSUSY多重項。

Q263. superfieldとは何か。

答：通常座標とGrassmann座標からなるsuperspace上の場。

Q264. superspaceとは何か。

答： x^μ に反可換座標 $\theta, \bar{\theta}$ を加えた超空間。

Q265. superpotentialとは何か。

答：chiral superfieldの正則関数 W で、F-term相互作用を決める。

Q266. Kähler potentialとは何か。

答：chiral multipletの運動項やKähler幾何を定める実関数 K 。

Q267. F-termとは何か。

答：chiral superfieldの最高 θ 成分から得られる作用項。

Q268. D-termとは何か。

答：vector/superfieldの $\theta^2 \bar{\theta}^2$ 成分などから得られる作用項。

Q269. non-renormalization theoremとは何か。

答：一定のSUSY理論でsuperpotentialが摂動的に強く保護される定理。

Q270. BPS stateとは何か。

答：超対称代数の質量・電荷境界を飽和し、一部SUSYを保存する状態。

Q271. Witten indexとは何か。

答： $\text{Tr}(-1)^F e^{-\beta H}$ 。SUSYの自発的破れを診断する位相的指標。

第20章 トポロジーと非摂動効果

Q272. topological sectorとは何か。

答：連続変形では互いに移れない場配置の分類。

Q273. winding numberとは何か。

答：写像が標的空間を何回巻くかを表す整数トポロジカル数。

Q274. instantonとは何か。

答：Euclidean作用が有限な非自明古典解で、トンネル効果など非摂動寄与を与える。

Q275. bounce solutionとは何か。

答：偽真空崩壊のEuclidean鞍点解。

Q276. false vacuum decayとは何か。

答：準安定真空が量子トンネルによりより低い真空へ崩壊する過程。

Q277. Coleman bounceとは何か。

答：スカラー場の偽真空崩壊率を決める $O(4)$ 対称Euclidean解。

Q278. solitonとは何か。

答：非線形場の方程式が持つ局在した安定古典解。

Q279. kinkとは何か。

答：1空間次元で異なる真空を結ぶトポロジカルsoliton。

Q280. vortexとは何か。

答：位相が空間中で巻き付く線状・点状トポロジカル欠陥。

Q281. monopoleとは何か。

答：磁気荷を持つ粒子的トポロジカルsoliton。

Q282. 't Hooft-Polyakov monopoleとは何か。

答：非Abelianゲージ理論の自発的対称性破れから生じる滑らかな磁気単極子解。

Q283. domain wallとは何か。

答：離散的に縮退した真空領域の境界となる欠陥。

Q284. topological chargeとは何か。

答：連続変形で変わらない整数等の保存量。

第21章 格子場理論

Q285. 格子場理論とは何か。

答：時空を離散格子に置き換えてQFTを非摂動的に定義・数値計算する方法。

Q286. lattice spacing a とは何か。

答：格子点間隔で、UV cutoffの逆尺度に対応する。

Q287. continuum limitとは何か。

答： $a \rightarrow 0$ を取りながら物理量を固定し連続QFTを回収する極限。

Q288. link variableとは何か。

答：格子ゲージ理論で格子辺に置く群要素 $U_\mu(x)$ 。

Q289. plaquetteとは何か。

答：最小格子正方形を一周するlink積。連続極限で場の強度に対応する。

Q290. Wilson actionとは何か。

答：plaquetteを用いた標準的格子Yang-Mills作用。

Q291. Monte Carlo法とは何か。

答：Euclidean経路積分の確率重みから場配置をサンプリングして期待値を推定する方法。

Q292. importance samplingとは何か。

答：寄与の大きい確率分布に従ってサンプルし積分効率を上げる方法。

Q293. sign problemとは何か。

答：重みが正の確率として解釈できず、激しい位相相殺でMonte Carlo推定が困難になる問題。

Q294. fermion doublingとは何か。

答：単純な格子離散化で不要なフェルミオン種が複数現れる問題。

Q295. Wilson fermionとは何か。

答：Wilson項を加えてdoublersを重くする格子フェルミオン定式化。

Q296. staggered fermionとは何か。

答：スピノル成分を格子点へ分散しdoublingを部分的に減らす定式化。

Q297. overlap fermionとは何か。

答：Ginsparg-Wilson関係を満たし、格子上で改善されたカイラル対称性を持つ定式化。

Q298. finite-size effectとは何か。

答：有限格子体積により物理量が無限体積値からずれる効果。

Q299. lattice QCDとは何か。

答：格子上でQCDを非摂動的に数値解析する理論・計算手法。

第22章 曲がった時空のQFT

Q300. curved spacetime QFTとは何か。

答：時空計量を古典背景として固定し、その上の量子場を扱う理論。

Q301. 一般共変性とは何か。

答：座標変換によらず物理法則をテンソル形式で記述できる性質。

Q302. covariant derivativeとは何か。

答：曲率やゲージ接続を考慮した微分。

Q303. minimal coupling to gravityとは何か。

答： $\eta_{\{\mu\nu\}} \rightarrow g_{\{\mu\nu\}}$ 、 $\partial \rightarrow \nabla$ 、 $d^4x \rightarrow \sqrt{(-g)} d^4x$
などで平坦時空作用を曲がった時空へ拡張する処方。

Q304. non-minimal coupling $\xi R \phi^2$ とは何か。

答：スカラー場とRicci scalarを直接結合する一般に許される局所項。

Q305. conformal couplingとは何か。

答：質量ゼロスカラー作用が特定次元でWeyl不変になる特別な ξ の値。

Q306. Bogoliubov変換とは何か。

答：異なる正負周波数モード基底間の線形変換。粒子概念の背景依存性を表す。

Q307. Unruh効果とは何か。

答：一様加速観測者がMinkowski真空を熱浴として観測する現象。

Q308. Hawking放射とは何か。

答：ブラックホール背景で量子場が地平面温度に対応する熱放射を生む現象。

Q309. de Sitter量子揺らぎとは何か。

答：膨張時空で量子場の揺らぎが引き伸ばされ、宇宙論的摂動の種となる現象。

Q310. semiclassical Einstein equationとは何か。

答： $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G$ のように量子物質の期待値を古典重力源とする方程式。

Q311. trace anomaly in curved spacetimeとは何か。

答：古典的Weyl不変理論でも曲がった時空で量子効果により $T^\mu{}_\mu$ が非零になる現象。

第23章 量子重力への接続

Q312. 重力を通常のQFTとして量子化すると何が起こるか。

答：Einstein重力は摂動論的に非繰り込み可能だが、低エネルギーEFTとしては系統的に扱える。

Q313. Newton定数の質量次元は何か。

答：4次元自然単位系で $[G_N] = -2$ 。これが摂動的な非繰り込み可能性に関係する。

Q314. gravity EFTとは何か。

答：Einstein-Hilbert作用に R^2 など高曲率演算子を加え、 E/M_{Pl} で展開する低エネルギー量子重力。

Q315. Planck massとは何か。

答：重力相互作用が強くなる尺度。規約により $M_{\text{Pl}} = G_N^{-1/2}$ や reduced Planck massを使う。

Q316. gravitonとは何か。

答：平坦背景周りの計量摂動を量子化した質量ゼロspin-2粒子。

Q317. spin-2 gauge symmetryとは何か。

答：線形化重力で微分同相変換が $h_{\mu\nu}$ のゲージ冗長性として現れること。

Q318. cosmological constant problemとは何か。

答：QFTの真空エネルギー見積りと観測される宇宙定数の小ささの間の巨大な不一致。

Q319. UV completionとは何か。

答：低エネルギーEFTを高エネルギーまで整合的に完成させる理論。

Q320. holographyとは何か。

答：重力系の情報が低次元境界理論で記述できるという量子重力の原理・双対性。

Q321. AdS/CFTとは何か。

答：AdS時空の重力・弦理論と境界CFTを同一の量子系の別記述とみなす対応。

Q322. large-N gauge theoryが弦理論と関係する理由は何か。

答：二重線Feynman図の $1/N$ 展開が世界面の種数展開と同型のトポロジー分類を持つため。

第24章 高度な計算・形式

Q323. 1-loop effective potentialとは何か。

答：一定背景場周りのGaussian量子揺らぎを積分して得る有効ポテンシャルの1-loop補正。

Q324. Coleman-Weinberg機構とは何か。

答：古典的質量尺度がない理論で量子補正により対称性破れのスケールが生成される機構。

Q325. background field methodの利点は何か。

答：有効作用の背景ゲージ不変性を保ち、 β 関数などを効率的に計算できる。

Q326. heat kernelとは何か。

答：微分演算子 Δ に対する $\exp(-s\Delta)$ の核。functional determinantや曲がった時空の量子補正に使う。

Q327. zeta-function regularizationとは何か。

答：固有値和を ζ 関数へ解析接続して行列式・真空エネルギーを定義する正則化。

Q328. dimensional analysisとは何か。

答：質量次元の整合性から式の形やスケーリングを制約する方法。

Q329. dispersion relationとは何か。

答：解析性と因果律を用いて振幅の実部と虚部などを積分関係で結ぶ。

Q330. Källén-Lehmann spectral representationとは何か。

答：相互作用する場の二点関数を正のspectral densityを用いて自由プロパゲーターの重ね合わせとして表す表示。

Q331. spectral densityとは何か。

答：二点関数に寄与する質量スペクトルの重み。unitarityにより正值性を持つ場合がある。

Q332. reflection positivityとは何か。

答：Euclidean相関関数がunitary Lorentzian理論へ対応するための正值性条件。

Q333. Schwinger parameterizationとは何か。

答： $1/A^n$ を積分 $\int ds s^{n-1} e^{-sA}$ に変換しloop積分を扱いやすくする方法。

Q334. Feynman parameterizationとは何か。

答：複数の分母をパラメータ積分で一つにまとめるloop積分技法。

Q335. Passarino-Veltman reductionとは何か。

答：1-loop tensor積分を標準的scalar積分へ還元する方法。

Q336. regularization-independent observableとは何か。

答：正則化・schemeを除去した後に実験と比較できる物理量。

第25章 現代QFTの概念

Q337. generalized global symmetryとは何か。

答：通常の点演算子でなく線・面など拡張演算子に作用する一般化された対称性。

Q338. p-form symmetryとは何か。

答：p次元荷電演算子に作用し、保存電流が(p+1)形式として表される高次形式対称性。

Q339. 1-form symmetryの例は何か。

答：純粋SU(N) Yang-Millsのcenter symmetryが代表例。Wilson loopに作用する。

Q340. topological operatorとは何か。

答：連続変形しても相関関数が変わらない欠陥・演算子。

Q341. symmetry defectとは何か。

答：対称変換を時空内の余次元1などの欠陥として実装する演算子。

Q342. non-invertible symmetryとは何か。

答：融合しても必ずしも逆元を持たず、群ではなく融合圈的構造をなす一般化対称性。

Q343. higher group symmetryとは何か。

答：0-form対称性と高次形式対称性が非自明に結合した対称構造。

Q344. anomaly inflowとは何か。

答：高次元bulkの変分が境界理論のanomalyを相殺する仕組み。

Q345. SPT phaseとは何か。

答：対称性により保護された短距離エンタングル相。境界に異常を持つ理論が現れることがある。

Q346. topological QFTとは何か。

答：局所的な計量に依存せず位相的不変量を記述するQFT。

Q347. Chern-Simons理論とは何か。

答：3次元の代表的TQFTで、ゲージ接続のChern-Simons形式を作用とする。

Q348. BF theoryとは何か。

答：B形式場と曲率Fを $B \wedge F$ で結合したトポロジカル場理論。

Q349. dualities in QFTとは何か。

答：異なる場・結合・自由度で書かれた理論が同じ量子物理を記述する関係。

Q350. electric-magnetic dualityとは何か。

答：電氣的自由度と磁氣的自由度を交換する双対性。

Q351. bosonizationとは何か。

答：特定の低次元でフェルミオン理論とボソン理論を等価に写す双対性。

Q352. Seiberg dualityとは何か。

答：4次元N=1 supersymmetric gauge theoryで異なるゲージ群の理論が同じIR物理へ流れる双対性。

総復習：QFTを一本の流れで説明する

自由場を量子化してプロパゲーターを得る → 相互作用を加えてFeynman図で摂動展開する →

loop発散を正則化・繰り込みする → RGでスケール依存性を理解する →

ゲージ対称性と自発的対称性の破れから標準模型を構成する → QCDの強結合領域では格子・EFT・対称性・双対性などの非摂動的方法を使う、という流れを自分の言葉で説明できれば、本書の主要概念はつながっている。

収録：25章・352問 / 著者：t