

超弦理論

一問一答 完全版

量子場理論・一般相対論・超対称性・Dブレーン・双対性・コンパクト化・AdS/CFT・M理論・数学基礎
全 250 問

目的	超弦理論を読むために必要な用語を、短い問いと解説で横断的に確認する。
対象	高校数学・大学初年級物理から、量子場理論・弦理論を学び始める読者まで。
使い方	まず質問だけを読み、自分の言葉で答えてから解説を確認する。未知語は章をまたいで相互参照する。

著者 t

本書の読み方

本書は、超弦理論そのものだけでなく、その言語となる量子場理論、一般相対論、超対称性、二次元共形場理論、微分幾何、群論、代数幾何、量子情報までを一問一答形式で整理した用語ドリルである。各解説は「厳密な教科書的定義」と「何のために使う概念か」の中間を狙い、短時間で概念間の地図を作れる長さになっている。

注意：これは学習用概説であり、各分野の定理の仮定・符号規約・正規化・例外をすべて記載した専門書ではない。数式を本格的に導出する段階では、量子場理論・一般相対論・CFT・弦理論の標準的教科書を併用すること。

目次

- 第1章 量子場理論の基礎（20問）
- 第2章 特殊相対論・一般相対論・量子重力（15問）
- 第3章 古典弦理論（20問）
- 第4章 二次元共形場理論（15問）
- 第5章 超対称性と超弦（15問）
- 第6章 5種類の超弦理論（10問）
- 第7章 Dブレーンと非摂動効果（12問）
- 第8章 コンパクト化と内部幾何（17問）
- 第9章 弦の摂動論と散乱振幅（10問）
- 第10章 AdS/CFTとホログラフィー（15問）
- 第11章 M理論・行列模型・非摂動定式化（12問）
- 第12章 弦現象論・真空・宇宙論（12問）
- 第13章 数学基礎Ⅰ - 線形代数・群・表現（14問）
- 第14章 数学基礎Ⅱ - 微分幾何・位相（15問）
- 第15章 数学基礎Ⅲ - 複素解析・代数幾何（13問）
- 第16章 量子・統計・情報の関連概念（10問）
- 第17章 異常・トポロジー・高次構造（10問）
- 第18章 発展的概念（15問）

第1章 量子場理論の基礎

Q1. 場 (field) とは何か。

答：時空の各点に物理量を対応させる対象。スカラー場、ベクトル場、スピノル場などがあり、量子場理論では粒子は場の量子的励起として記述される。

Q2. 作用 (action) とは何か。

答：ラグランジアン密度を時空で積分した量

S 。古典論では作用を停留させる配置が運動方程式を満たし、量子論では経路積分の重み $\exp(iS/\hbar)$ を決める。

Q3. ラグランジアン密度とは何か。

答：場とその微分から作られる局所的な関数で、理論の運動項・質量項・相互作用項をまとめて記述する。

Q4. オイラー・ラグランジュ方程式とは何か。

答：作用の変分 $\delta S=0$ から得られる場の運動方程式。場 ϕ について $\partial L/\partial \phi - \partial_\mu (\partial L/\partial (\partial_\mu \phi))=0$ の形をとる。

Q5. 正準量子化とは何か。

答：古典的な場と共役運動量を演算子に昇格させ、ポアソン括弧を交換関係または反交換関係に置き換える量子化法。

Q6. 経路積分とは何か。

答：すべての場の配置を重み $\exp(iS/\hbar)$

で足し合わせて量子振幅を求める定式化。ゲージ理論や弦理論で中心的に使われる。

Q7. 生成汎関数とは何か。

答：相関関数を外部源に関する汎関数微分として生成する量。通常 $Z[J]$ と書かれる。

Q8. 相関関数とは何か。

答：複数の時空点における場の量子的相関を表す期待値。散乱振幅や物理的観測量の基礎になる。

Q9. プロパゲーターとは何か。

答：粒子や場の励起がある点から別の点へ伝播する振幅。自由理論では運動演算子の逆作用素として現れる。

Q10. ファインマン図とは何か。

答：摂動展開の各項を図式化したもの。線がプロパゲーター、頂点が相互作用に対応する。

Q11. 繰り込みとは何か。

答：量子補正に現れる発散を、物理的に定義されたパラメータへ吸収して有限な予言を得る手続き。

Q12. 繰り込み群とは何か。

答：観測するエネルギースケールを変えたとき、結合定数や有効理論がどう変化するかを記述する枠組み。

Q13. β 関数とは何か。

答：結合定数 g のスケール依存性 $\mu \, dg/d\mu$ を表す関数。 $\beta=0$ は共形固定点の候補となる。

Q14. 有効場の理論 (EFT) とは何か。

答：あるエネルギー以下に必要な自由度だけを用い、高エネルギー効果を高次演算子として整理する理論。

Q15. 自発的対称性の破れとは何か。

答：作用は対称でも真空がその対称性を保たない現象。南部・ゴールドストーン粒子やヒッグス機構につながる。

Q16. Noetherの定理とは何か。

答：連続対称性ごとに保存電流・保存量に対応するという定理。時空並進ならエネルギー運動量保存に対応する。

Q17. ゲージ対称性とは何か。

答：局所的な変換に対する記述の冗長性。電磁気学の $U(1)$ 、標準模型の $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ などが代表例。

Q18. ゲージ固定とは何か。

答：ゲージ冗長性を除いて経路積分や量子化を定義するため、代表元を選ぶ操作。

Q19. Faddeev-Popovゴーストとは何か。

答：非可換ゲージ理論の経路積分でゲージ固定のヤコビアンを表現するため導入される反可換補助場。

Q20. BRST対称性とは何か。

答：ゲージ固定後の理論に残るフェルミオンの対称性。物理状態をBRSTコホモロジーとして特徴づける。

第2章 特殊相対論・一般相対論・量子重力

Q21. Minkowski時空とは何か。

答：特殊相対論の平坦な時空。通常、計量は符号規約に応じて $\text{diag}(-,+,+,+)$ など表される。

Q22. Lorentz変換とは何か。

答：Minkowski計量を不変に保つ時空変換。回転とブーストを含む。

Q23. 計量テンソルとは何か。

答：時空上の距離・角度・因果構造を定めるテンソル $g_{\mu\nu}$ 。一般相対論では動的自由度である。

Q24. 共変微分とは何か。

答：曲がった空間やゲージ束上でテンソル等を微分するための微分。接続を含む。

Q25. Christoffel記号とは何か。

答：Levi-Civita接続の局所成分。計量から構成され、測地線方程式や曲率に現れる。

Q26. Riemann曲率テンソルとは何か。

答：共変微分の非可換性を測るテンソルで、時空の局所的な曲がりを記述する。

Q27. RicciテンソルとRicciスカラーとは何か。

答：Riemannテンソルを縮約して得られる曲率量。Einstein方程式やEinstein-Hilbert作用に現れる。

Q28. Einstein-Hilbert作用とは何か。

答：一般相対論の基本作用。 $\int \sqrt{-g} R$ を時空積分した形で、変分するとEinstein方程式を与える。

Q29. Einstein方程式とは何か。

答：時空曲率とエネルギー運動量を結ぶ方程式 $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$ 。

Q30. Planck長とは何か。

答： G 、 $\hbar$ 、 c から作られる長さ尺度。約 1.6×10^{-35} mで、量子重力効果が重要になる尺度の目安。

Q31. 量子重力とは何か。

答：重力場そのものを量子的に扱う理論。超弦理論はその有力な候補の一つ。

Q32. 重力子とは何か。

答：弱い重力場を量子化したときに現れる質量ゼロ・スピン2の量子。閉弦スペクトルにも自然に現れる。

Q33. ブラックホールエントロピーとは何か。

答：ブラックホールの地平面面積 A に比例するエントロピー $S = A/(4G)$ 。量子重力の微視的自由度を探る重要な手掛かり。

Q34. ホーキング放射とは何か。

答：量子場の効果によりブラックホールが熱放射を行う現象。ブラックホール蒸発と情報問題につながる。

Q35. ブラックホール情報問題とは何か。

答：ブラックホール蒸発が量子情報のユニタリティと両立するかという問題。弦理論・ホログラフィーの中心課題の一つ。

第3章 古典弦理論

Q36. 点粒子と弦の基本的な違いは何か。

答：点粒子は世界線を描くのに対し、一次元の弦は時間発展によって二次元の世界面を描く。

Q37. 開弦とは何か。

答：端点を持つ弦。端点にはゲージ自由度を持たせることができ、低エネルギーでゲージ場が現れる。

Q38. 閉弦とは何か。

答：端点のないループ状の弦。質量ゼロスペクトルにスピン2状態が含まれ、重力子と解釈される。

Q39. 弦の張力とは何か。

答：弦の単位長さ当たりのエネルギー。通常 $T=1/(2\pi\alpha')$ と書かれ、 α' は弦の長さ尺度を定める。

Q40. Regge slope α' とは何か。

答：弦の張力の逆数に比例するパラメータ。弦長 ℓ_s は概ね $\sqrt{\alpha'}$ で与えられる。

Q41. 世界面とは何か。

答：弦が時空中を運動するときに掃く二次元曲面。弦理論は世界面上の二次元場の理論として定式化される。

Q42. 標的空間 (target space) とは何か。

答：弦が伝播する時空。世界面座標 σ, τ から標的空間座標 X^μ への写像として弦の埋め込みを記述する。

Q43. Nambu-Goto作用とは何か。

答：弦の世界面の面積に比例する作用。点粒子の世界線長に対応する弦版の作用。

Q44. Polyakov作用とは何か。

答：独立な世界面計量 h_{ab} を導入してNambu-Goto作用を扱いやすくした等価な定式化。

Q45. 世界面再パラメータ不変性とは何か。

答：世界面座標の取り方を変えても物理が変わらない対称性。

Q46. Weyl対称性とは何か。

答：世界面計量を局所的に $h_{ab} \rightarrow e^{2\omega} h_{ab}$ とスケールしても古典的Polyakov作用が不変である性質。

Q47. 共形ゲージとは何か。

答：再パラメータ変換とWeyl変換を用いて世界面計量を局所的に平坦な形へ固定するゲージ。

Q48. 弦の境界条件には何があるか。

答：代表的にはNeumann境界条件とDirichlet境界条件。後者はDブレーンの概念につながる。

Q49. Neumann境界条件とは何か。

答：開弦端点が指定方向に自由に動ける境界条件。法線方向微分をゼロにする。

Q50. Dirichlet境界条件とは何か。

答：開弦端点の位置を指定方向で固定する境界条件。その固定超曲面がDブレーンとして解釈される。

Q51. 弦のモード展開とは何か。

答： $X^\mu(\sigma, \tau)$ を世界面上の振動モードに分解すること。零モードは重心運動、高次モードは弦の振動に対応する。

Q52. Virasoro制約とは何か。

答：世界面計量の運動方程式から得られるエネルギー運動量テンソル $T_{ab}=0$ に対応する制約。

Q53. Virasoro代数とは何か。

答：二次元共形変換の無限次元代数。量子論では中心拡張を持ち、中心電荷 c が現れる。

Q54. 臨界次元とは何か。

答：量子Weyl異常を消すために要求される標的空間次元。ボソニック弦では26次元、超弦では10次元。

Q55. ボソニック弦の問題点とは何か。

答：26次元を必要とし、フェルミオンを自然に含まず、基底状態にタキオンが存在する。

第4章 二次元共形場理論

Q56. 共形変換とは何か。

答：局所的に角度を保存し、計量を位置依存のスケール因子まで保つ変換。二次元では無限次元対称性になる。

Q57. 共形場理論 (CFT) とは何か。

答：共形対称性を持つ量子場理論。弦の世界面理論とAdS/CFTの両方で中心的役割を持つ。

Q58. 中心電荷 c とは何か。

答：Virasoro代数の中心拡張を特徴づける数。世界面理論の自由度や量子異常を測る。

Q59. 一次場 (primary field) とは何か。

答：共形変換に対して基本的な変換則を持つ局所演算子。共形重み $(h, \bar{h})$ で特徴づけられる。

Q60. 共形次元とは何か。

答：局所演算子のスケール変換に対する重み。二次元では $\Delta = h + \bar{h}$ 、スピンは $h - \bar{h}$ 。

Q61. OPEとは何か。

答：operator product expansion。近接した二つの局所演算子の積を局所演算子の和として展開する方法。

Q62. 状態-演算子対応とは何か。

答：CFTで局所演算子とHilbert空間の状態を一对一に対応させる原理。

Q63. Ward恒等式とは何か。

答：対称性から相関関数に課される恒等式。保存電流やエネルギー運動量テンソルを含む。

Q64. モジュラー不変性とは何か。

答：トーラス世界面の複素構造に対するモジュラー変換で分配関数が不変である条件。弦理論の整合性に重要。

Q65. トーラス分配関数とは何か。

答：種数1の閉じた世界面上でのCFT分配関数。弦の1ループ振幅に対応する。

Q66. 自由ボソンCFTとは何か。

答：二次元自由スカラー場 X のCFT。弦座標 X^μ の各成分の基本モデル。

Q67. 自由フェルミオンCFTとは何か。

答：二次元自由フェルミオン場からなるCFT。超弦のRNS形式で重要。

Q68. ゴーストCFTとは何か。

答：ゲージ固定に伴うbcゴースト等からなるCFT。物質場の中心電荷と合わせて異常を相殺する。

Q69. 頂点演算子とは何か。

答：弦の外部状態を世界面上の局所演算子として表すもの。散乱振幅は頂点演算子の相関関数として計算される。

Q70. 共形ブートストラップとは何か。

答：OPEの結合則、交差対称性、ユニタリティなどからCFTデータを制約・決定する方法。

第5章 超対称性と超弦

Q71. 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対称性。生成子 Q は時空対称性と内部対称性を結ぶ。

Q72. 超多重項とは何か。

答：超対称変換で互いに移り合うボソン状態とフェルミオン状態の集合。

Q73. 超空間とは何か。

答：通常の時空座標 x に反可換Grassmann座標 θ を加えた空間。超対称性を幾何学的に記述できる。

Q74. Grassmann変数とは何か。

答： $\theta_i \theta_j = -\theta_j \theta_i$ を満たす反可換変数。フェルミオン自由度の記述に用いる。

Q75. 超場とは何か。

答：超空間上の場。 θ 展開の各係数として一つの超多重項の成分場をまとめて表す。

Q76. RNS形式とは何か。

答：世界面超対称性を用いて超弦を記述するRamond-Neveu-Schwarz形式。

Q77. NSセクターとは何か。

答：世界面フェルミオンに反周期境界条件を課すセクター。ボソンの時空状態を生む。

Q78. Rセクターとは何か。

答：世界面フェルミオンに周期境界条件を課すセクター。時空フェルミオン状態を生む。

Q79. GSO射影とは何か。

答：スペクトルから不整合な状態を除き、時空超対称性やモジュラー不変性を実現する射影。

Q80. 世界面超対称性とは何か。

答：世界面上で X^μ とそのフェルミオンパートナー ψ^μ を結ぶ超対称性。

Q81. 時空超対称性とは何か。

答：標的時空でボソンとフェルミオンを結ぶ超対称性。GSO射影後の超弦で現れる。

Q82. 超重力とは何か。

答：一般相対論を局所超対称化した場の理論。超弦理論の低エネルギー有効理論として現れる。

Q83. グラビティーノとは何か。

答：重力子の超対称パートナーで、スピン3/2の場。

Q84. BPS状態とは何か。

答：超対称代数の質量・電荷境界を飽和し、一部の超対称性を保存する状態。量子補正に対して保護されやすい。

Q85. 超対称性の自発的破れとは何か。

答：作用はSUSYを持つが真空がSUSYを保たない現象。現実的模型では低エネルギーでのSUSY非観測と関係する。

第6章 5種類の超弦理論

Q86. Type IIA超弦理論とは何か。

答：10次元の閉じた向き付き超弦理論。左右の時空カイラリティが反対で、非カイラル。強結合極限は11次元M理論に関係する。

Q87. Type IIB超弦理論とは何か。

答：10次元の閉じた向き付き超弦理論。左右が同じカイラリティを持ち、カイラル。SL(2,Z) S双対性を持つ。

Q88. Type I超弦理論とは何か。

答：開弦と閉弦を含む非向き付き10次元超弦理論。整合的なゲージ群としてSO(32)が現れる。

Q89. ヘテロティックSO(32)弦とは何か。

答：左移動モードにボソニック弦、右移動モードに超弦を組み合わせた理論で、SO(32)ゲージ対称性を持つ。

Q90. ヘテロティックE8 × E8弦とは何か。

答：E8 × E8ゲージ対称性を持つヘテロティック弦。Calabi-Yauコンパクト化による粒子模型構築で重要。

Q91. 弦理論の双対性とは何か。

答：一見異なる弦理論が、結合定数や幾何の変換後に同一の物理を記述する関係。

Q92. S双対性とは何か。

答：強結合と弱結合を交換する双対性。典型的に $g_s \rightarrow 1/g_s$ のような変換を伴う。

Q93. T双対性とは何か。

答：コンパクト化半径 R と α'/R を交換する双対性。運動量モードと巻き付きモードを交換する。

Q94. U双対性とは何か。

答：S双対性とT双対性を統合するより大きな非摂動的な双対性群の総称。

Q95. 弦結合定数 g_s とは何か。

答：弦の分裂・結合の強さを決める無次元結合。ディラトンの真空期待値により $g_s = e^{\langle \Phi \rangle}$ と表される。

第7章 Dブレーンと非摂動効果

Q96. Dブレーンとは何か。

答：開弦端点がDirichlet境界条件で拘束される動的なp次元超曲面。D p-brane と呼ぶ。

Q97. Dpブレーンの p は何を表すか。

答：ブレーンの空間次元。時間を含めた世界体積は p+1 次元。

Q98. ブレーン世界体積とは何か。

答：Dブレーンが時空中を運動して掃く p+1 次元の時空。そこに開弦由来のゲージ理論が生じる。

Q99. Chan-Paton因子とは何か。

答：開弦端点に付随する内部自由度。N枚の重なったDブレーンからU(N)型ゲージ対称性が現れる。

Q100. DBI作用とは何か。

答：Dirac-Born-Infeld作用。Dブレーン上のゲージ場と埋め込み自由度を非線形に記述する低エネルギー作用。

Q101. Wess-Zumino項とは何か。

答：DブレーンとRamond-Ramond場の電荷結合を記述する作用項。

Q102. RR場とは何か。

答：Ramond-Ramondセクターに由来する微分形式ゲージ場。Dブレーンはその電荷源になる。

Q103. NS-NS場とは何か。

答：Neveu-Schwarzセクター由来の場。計量 g 、反対称2形式 B 、ディラトン ϕ を含む。

Q104. ブレーン間の開弦とは何か。

答：異なるDブレーン間に伸びる開弦。低エネルギーでは物質場やゲージ対称性の破れを表すことがある。

Q105. ブレーンの交差とは何か。

答：複数のDブレーンが時空内で交わる構成。交差部にカイラルフェルミオンなどが局在し得る。

Q106. Dインスタントンとは何か。

答：ユークリッド時間方向も局在したD(-1)ブレーンなど。非摂動的寄与を生成する。

Q107. 弦理論のインスタントンとは何か。

答：世界面インスタントンやDブレーンインスタントンなど、摂動展開では見えない指数関数的効果を与える古典解。

第8章 コンパクト化と内部幾何

Q108. コンパクト化とは何か。

答：余剰次元を小さなコンパクト空間に巻き込み、低エネルギーで4次元などの有効理論を得ること。

Q109. Kaluza-Klein機構とは何か。

答：コンパクト次元方向の運動量が離散化され、低次元から見ると質量の異なるKKモードとして現れる仕組み。

Q110. Calabi-Yau多様体とは何か。

答：Ricci平坦なKähler多様体で、適切なホロノミーを持つ。超弦の超対称コンパクト化で重要。

Q111. Kähler多様体とは何か。

答：複素構造、シンプレクティック構造、Riemann計量が整合的に共存する多様体。

Q112. 複素構造とは何か。

答：局所的に複素座標を導入できる幾何構造。演算子 J が $J^2 = -1$ を満たす。

Q113. ホロノミーとは何か。

答：ベクトルを閉曲線に沿って平行移動した際に生じる変換の群。保存されるスピノルや超対称性数を制御する。

Q114. Kählerモジュライとは何か。

答：Calabi-Yauの大きさや2-cycleの体積など、Kähler構造の連続変形を表すスカラー自由度。

Q115. 複素構造モジュライとは何か。

答：Calabi-Yauの複素構造の連続変形を表すモジュライ。

Q116. モジュライとは何か。

答：古典的にポテンシャルが平坦で連続的な真空の族をパラメータ化する場合。現象論では安定化が必要。

Q117. モジュライ安定化とは何か。

答：フラックス、量子補正、非摂動効果などによりモジュライにポテンシャルを与え、真空期待値を固定すること。

Q118. フラックスコンパクト化とは何か。

答：内部空間のサイクルにp形式場のフラックスを通し、モジュライ安定化や真空構造を生成するコンパクト化。

Q119. オリエンティフォールドとは何か。

答：世界面向き反転と時空対称操作を組み合わせることで弦理論を商にした構成。Oプレーンが現れる。

Q120. Oプレーンとは何か。

答：オリエンティフォールド固定面。負の張力やRR電荷を持ち、タドポール相殺で重要。

Q121. タドポール相殺条件とは何か。

答：コンパクト空間で総RR電荷などが整合的に相殺されることを要求する条件。

Q122. Hodge数とは何か。

答：複素多様体の微分形式コホモロジーの次元 $h^{p,q}$ 。Calabi-Yauのモジュライ数などを数える。

Q123. サイクルとは何か。

答：内部空間中の閉じた部分多様体やホモロジー類。プレーンの巻き付きやフラックス積分の対象となる。

Q124. コホモロジーとは何か。

答：閉形式を完全形式で割って得る位相的不変量。ゲージ場・フラックス・サイクルの分類に広く使われる。

第9章 弦の摂動論と散乱振幅

Q125. 弦摂動論とは何か。

答：世界面のトポロジー、特に種数によって展開する摂動論。各ハンドルは概ね g_s^2 の次数に対応する。

Q126. 世界面の種数とは何か。

答：閉曲面のハンドル数。球面は0、トーラスは1。弦ループ展開の次数を分類する。

Q127. tree-level弦振幅とは何か。

答：閉弦なら球面、開弦なら円板など最小トポロジーの世界面で計算される最低次振幅。

Q128. Veneziano振幅とは何か。

答：開弦4点散乱の代表的振幅。無限個の共鳴極とRegge挙動を持ち、弦理論誕生の契機となった。

Q129. Virasoro-Shapiro振幅とは何か。

答：閉弦の4点tree-level散乱振幅。

Q130. モジュライ空間とは何か。

答：同値でない複素構造などの幾何構造をパラメータ化する空間。弦振幅では世界面モジュライを積分する。

Q131. 弦散乱振幅のUV挙動が比較的穏やかな理由とは何か。

答：相互作用が点ではなく広がった世界面として記述され、世界面双対性・モジュラー性が短距離領域を再編成するため。

Q132. Regge軌道とは何か。

答：粒子のスピン J と質量二乗 m^2 の関係がほぼ線形になる系列。弦の励起スペクトルで自然に現れる。

Q133. ソフト定理とは何か。

答：低エネルギーの光子・重力子などを一つ追加した散乱振幅が普遍的に因数分解する関係。

Q134. 振幅の因数分解とは何か。

答：中間状態がオンシェルになる極付近で高点振幅が低点振幅の積へ分解する性質。ユニタリティと関係する。

第10章 AdS/CFTとホログラフィー

Q135. ホログラフィック原理とは何か。

答：重力を含むある領域の物理が、より低次元の境界上の自由度で記述できるという考え。

Q136. AdS空間とは何か。

答：負の宇宙定数を持つ最大対称時空 Anti-de Sitter space。境界を持つ幾何としてCFTとの対応に適する。

Q137. AdS/CFT対応とは何か。

答：AdS上の重力・弦理論と、その境界上の共形場理論が等価だとするゲージ/重力双対性。

Q138. 代表的なAdS5/CFT4対応とは何か。

答：Type IIB弦理論 on $AdS_5 \times S^5$ と4次元 $N=4$ $SU(N)$ 超Yang-Mills理論の対応。

Q139. 't Hooft結合とは何か。

答：大Nゲージ理論で $\lambda = g_{YM}^2 N$ と定義される結合。AdS/CFTでは弦側の曲率尺度と関係する。

Q140. 大N極限とは何か。

答：ゲージ群 $SU(N)$ などで $N \rightarrow \infty$ を取り、適切な結合を固定する極限。Feynman図が世界面トポロジーで整理される。

Q141. 平面図 (planar diagram) とは何か。

答：大N展開で先頭に寄与する、平面上に交差なく描ける二重線Feynman図。

Q142. GKPW辞書とは何か。

答：境界CFTの生成汎関数をAdS側の場の境界値を固定した重力分配関数と同一視する基本関係。

Q143. bulk-boundary対応とは何か。

答：AdS内部の場と境界CFTの局所演算子を対応させる辞書。

Q144. Ryu-Takayanagi公式とは何か。

答：静的AdS/CFTで境界領域のエンタングルメントエントロピーをbulkの極小曲面面積で与える公式。

Q145. エンタングルメントエントロピーとは何か。

答：量子系を部分系に分けたとき、縮約密度行列 ρ_A から $S_A = -\text{Tr } \rho_A \log \rho_A$ と定義される量。

Q146. ホログラフィック繰り込みとは何か。

答：AdS境界近傍の発散を局所カウンター項で処理し、有限な境界相関関数を得る方法。

Q147. AdSブラックホールと熱場理論の関係は何か。

答：境界CFTの有限温度状態がbulk側のAdSブラックホールで記述されることがある。

Q148. Hawking-Page転移とは何か。

答：熱AdSとAdSブラックホールの間の相転移。境界ゲージ理論では閉じ込め/非閉じ込め転移と対応する例がある。

Q149. ゲージ/重力双対性とは何か。

答：量子ゲージ理論と高次元重力理論の等価性を指す一般概念。AdS/CFTは最も具体的な例。

第11章 M理論・行列模型・非摂動定式化

Q150. M理論とは何か。

答：5種類の超弦理論を非摂動的に統合すると期待される11次元理論。低エネルギー極限は11次元超重力。

Q151. Type IIAとM理論の関係は何か。

答：Type IIA弦の強結合極限で11番目の次元が開き、半径 R_{11} が g_s に比例して増大する。

Q152. M2ブレーンとは何か。

答：M理論に現れる2次元空間的ブレーン。11次元3形式場に電氣的に結合する。

Q153. M5ブレーンとは何か。

答：M理論に現れる5次元空間的ブレーン。M2と磁氣的に双対な性質を持つ。

Q154. BFSS行列模型とは何か。

答：M理論のlight-cone量子化を大N量子力学として記述する提案。D0ブレーンの行列量子力学に基づく。

Q155. IKKT行列模型とは何か。

答：Type IIB超弦理論の非摂動的定式化候補として提案された0次元超対称行列模型。IIB matrix modelとも呼ばれる。

Q156. 行列座標とは何か。

答：行列模型で時空座標 X^μ を通常の数ではなく $N \times N$ 行列として扱う考え。非可換幾何や創発時空につながる。

Q157. 非可換時空とは何か。

答：座標演算子が $[X^\mu, X^\nu] \neq 0$ を満たすような時空概念。

Q158. 創発時空とは何か。

答：時空を基本的背景として仮定せず、より基礎的な量子自由度・行列・エンタングルメントなどから有効的に出現させる考え。

Q159. 行列模型における大 N 極限の意味は何か。

答：有限 N の行列自由度から連続時空や古典幾何が現れる極限として重要。

Q160. Eguchi-Kawai還元とは何か。

答：大 N ゲージ理論が一定条件下で時空体積を縮約した行列模型と等価になり得るという考え。

Q161. 非摂動的定式化とは何か。

答：小さな結合定数に関する摂動級数に依存せず、理論を原理的に定義する枠組み。

第12章 弦現象論・真空・宇宙論

Q162. string phenomenologyとは何か。

答：弦理論から標準模型、粒子スペクトル、結合定数、宇宙論など観測可能な低エネルギー物理を導く研究分野。

Q163. 弦のランドスケープとは何か。

答：コンパクト化、フラックス、ブレーン配置などによって非常に多数の有効真空が生じ得るという構図。

Q164. スワンブランドとは何か。

答：低エネルギーEFTとしては整合的に見えても、量子重力へUV完成できない理論の領域を指す概念。

Q165. de Sitter空間とは何か。

答：正の宇宙定数を持つ最大対称時空。現在の宇宙加速やインフレーションとの関係で重要。

Q166. KKLT構成とは何か。

答：Type IIBフラックスコンパクト化でモジュライ安定化とde Sitter真空構成を目指す代表的シナリオ。

Q167. Large Volume Scenarioとは何か。

答：Type IIBコンパクト化で α' 補正と非摂動効果を利用し、内部体積を指数関数的に大きく安定化するシナリオ。

Q168. 弦インフレーションとは何か。

答：プレーン位置やモジュライなど弦理論由来の自由度をインフラトン候補として用いる宇宙初期模型。

Q169. 宇宙ひもとfundamental stringの違いは何か。

答：宇宙ひもは宇宙論的線状欠陥の総称で、弦理論のF-stringやD-stringが宇宙ひもとして残る可能性もある。

Q170. アクシオンとは何か。

答：周期的な擬スカラー場。弦コンパクト化ではp形式場をサイクル上で積分することで多数のaxion-like fieldsが現れ得る。

Q171. ミラー対称性とは何か。

答：異なるCalabi-Yau多様体上の弦コンパクト化が同じ物理を与える双対性。複素構造とKähler構造を交換する。

Q172. F理論とは何か。

答：Type IIBの $SL(2, \mathbb{Z})$ 双対性を幾何学化する12次元補助記述。楕円ファイバー化多様体を用いる。

Q173. 弦ガス宇宙論とは何か。

答：初期宇宙を弦の熱的ガスとして扱い、巻き付きモードなど弦固有の効果を利用する宇宙論。

第13章 数学基礎 I - 線形代数・群・表現

Q174. ベクトル空間とは何か。

答：ベクトルの加法とスカラー倍が定義され、線形性の公理を満たす集合。量子状態や場の自由度の基礎。

Q175. 線形写像とは何か。

答：加法とスカラー倍を保存する写像。行列は有限次元線形写像の表示。

Q176. 固有値・固有ベクトルとは何か。

答： $Av = \lambda v$ を満たす λ と非零ベクトル v 。質量行列、Hamiltonian、ラブラシアンなどの解析に現れる。

Q177. テンソルとは何か。

答：座標変換に対して一定の変換則を持つ多重線形対象。計量、曲率、場の強度などに使われる。

Q178. Lie群とは何か。

答：群構造と滑らかな多様体構造を併せ持つ群。連続対称性を記述する。

Q179. Lie代数とは何か。

答：Lie群の単位元近傍の無限小変換を記述する代数。交換子 $[T_a, T_b] = i f_{ab}^c T_c$ を持つ。

Q180. 表現とは何か。

答：抽象的な群や代数の元をベクトル空間上の線形変換として実現すること。粒子の量子数分類に不可欠。

Q181. 既約表現とは何か。

答：非自明な不変部分空間へ分解できない表現。素粒子は対称群の既約表現で分類される。

Q182. $SU(N)$ とは何か。

答：行列式1の $N \times N$ ユニタリ行列からなるLie群。QCDや大Nゲージ理論で重要。

Q183. $SO(N)$ とは何か。

答： N 次元実ベクトル空間の向きを保つ直交変換群。

Q184. $Sp(N)$ とは何か。

答：シンプレクティック形式を保存する群。弦理論のゲージ群や双対性で現れる。

Q185. Cartan部分代数とは何か。

答：Lie代数の最大可換部分代数。ランクや根系の定義に使われる。

Q186. 根 (root) とウェイト (weight) とは何か。

答：Lie代数の随伴表現や一般表現をCartan生成子の固有値で分類するベクトル。

Q187. Casimir演算子とは何か。

答：Lie代数の全生成子と可換する不変演算子。表現を特徴づける量。

第14章 数学基礎 II - 微分幾何・位相

Q188. 多様体とは何か。

答：局所的にはユークリッド空間に見えるが、大域的には曲がったり複雑な位相を持てる空間。

Q189. 接空間とは何か。

答：多様体上の一点で可能な接ベクトル全体が作るベクトル空間。

Q190. 微分形式とは何か。

答：接ベクトルに反対称多重線形に作用する幾何学的対象。p形式ゲージ場やフラックスの記述に自然。

Q191. 外微分 d とは何か。

答：p形式を(p+1)形式へ写す微分作用素で $d^2=0$ を満たす。

Q192. 閉形式と完全形式とは何か。

答： $d\omega=0$ なら閉形式、 $\omega=d\eta$ なら完全形式。完全なら必ず閉だが、逆は大域的には成立しないことがある。

Q193. de Rhamコホモロジーとは何か。

答：閉p形式を完全p形式で割った空間。多様体の位相情報を微分形式で捉える。

Q194. ホモロジーとは何か。

答：閉じたサイクルを境界で同一視して空間の穴を分類する代数的位相不変量。

Q195. 基本群 π_1 とは何か。

答：閉曲線を連続変形で分類する群。非自明な1-cycleやWilson loopなどに関係する。

Q196. ファイバー束とは何か。

答：各基底点にファイバー空間を付随させた幾何構造。ゲージ場は主束上の接続として理解できる。

Q197. 接続とは何か。

答：異なる点のファイバーや接空間のベクトルを比較し、平行移動を定義する構造。

Q198. 曲率2形式とは何か。

答：接続 A に対して $F=dA+A^2$ と定義される曲率。Yang-Mills場の強度に対応する。

Q199. Chern類とは何か。

答：複素ベクトル束の位相的不変量。ゲージ束、異常、Dブレーン電荷などで重要。

Q200. 指数定理とは何か。

答：微分作用素の解析的指数を多様体や束の位相的不変量に結びつける定理。Atiyah-Singer指数定理が代表的。

Q201. スピン構造とは何か。

答：多様体上でスピノル場を大域的に定義するための追加構造。

Q202. Dirac演算子とは何か。

答：スピノルに作用する一次微分演算子。フェルミオン運動項、指数定理、超対称性で中心的。

第15章 数学基礎 III - 複素解析・代数幾何

Q203. 複素多様体とは何か。

答：座標変換が正則関数となる複素座標で覆われた多様体。Calabi-Yau幾何の基礎。

Q204. 正則関数とは何か。

答：複素微分可能な関数。複素解析では非常に強い解析的性質を持つ。

Q205. Riemann面とは何か。

答：複素1次元多様体。弦のユークリッド世界面はRiemann面として扱われる。

Q206. 複素構造モジュライ空間とは何か。

答：同値でない複素構造の連続的な変形をパラメータ化する空間。

Q207. 代数多様体とは何か。

答：多項式方程式の解集合として定義される幾何学的対象。Calabi-Yau構成に頻出する。

Q208. 射影空間とは何か。

答：非零ベクトルを全体スカラー倍で同一視して得られる空間。代数幾何で自然なコンパクト化を与える。

Q209. 因子 (divisor) とは何か。

答：複素多様体上の余次元1部分多様体の形式和。線束やDプレーン配置と密接に関係する。

Q210. 線束とは何か。

答：各点に1次元ベクトル空間を付随させたベクトル束。場の電荷や因子と関係する。

Q211. 楕円曲線とは何か。

答：種数1の滑らかな代数曲線。F理論の楕円ファイバーとして重要。

Q212. 楕円ファイブレーションとは何か。

答：基底空間の各点上に楕円曲線をファイバーとして持つ幾何。F理論の基本構造。

Q213. 特異点とは何か。

答：多様体や代数多様体が滑らかでなくなる点・部分集合。弦理論ではゲージ対称性増大や軽い状態と関係する。

Q214. 特異点解消とは何か。

答：特異空間を滑らかな空間へ置き換える幾何学的操作。

Q215. orbifoldとは何か。

答：滑らかな空間を離散群で割って得られる空間。固定点に特異性を持つことがある。

第16章 量子・統計・情報の関連概念

Q216. Hilbert空間とは何か。

答：内積を備え完備なベクトル空間。量子状態を記述する数学的舞台。

Q217. 密度行列とは何か。

答：純粋状態と混合状態を統一的に記述する演算子 ρ 。 $\text{Tr} \rho = 1$ 、 $\rho \geq 0$ を満たす。

Q218. ユニタリティとは何か。

答：時間発展が内積・全確率を保存する性質。S行列では $S^\dagger S = 1$ 。

Q219. 量子もつれとは何か。

答：複合系の状態が部分系状態の積に分解できない量子的相関。ホログラフィーと時空創発研究でも重要。

Q220. von Neumannエントロピーとは何か。

答：密度行列に対し $S = -\text{Tr} \rho \log \rho$ と定義される量子エントロピー。

Q221. Rényiエントロピーとは何か。

答： $S_n = -(1/(1-n)) \log \text{Tr} \rho^n$ で定義されるエントロピー族。レプリカ法と相性がよい。

Q222. レプリカ法とは何か。

答： $\text{Tr} \rho^n$ を整数 n で計算し、解析接続 $n \rightarrow 1$ によりエンタングルメントエントロピーを求める方法。

Q223. 熱分配関数とは何か。

答： $Z = \text{Tr} \exp(-\beta H)$ 。熱力学量とユークリッド量子場理論を結ぶ。

Q224. ユークリッド化とは何か。

答：実時間 t を虚時間 τ に回転して Lorentzian 理論を Euclidean 理論へ移す操作。経路積分の収束を改善する。

Q225. 鞍点近似とは何か。

答：作用の停留点近傍を展開して積分を近似する方法。半古典展開、インスタントン、重力経路積分で重要。

第17章 異常・トポロジー・高次構造

Q226. 量子異常とは何か。

答：古典作用の対称性が量子化後に保たれない現象。ゲージ異常は理論の不整合につながるため相殺が必要。

Q227. カイラル異常とは何か。

答：古典的なカイラル電流保存が量子効果で破れる現象。

Q228. Green-Schwarz機構とは何か。

答：超弦理論で特定のゲージ・重力異常を高次形式場の変換により相殺する機構。

Q229. Chern-Simons項とは何か。

答：奇数次元で現れるトポロジカルなゲージ作用。境界異常やブレーン作用とも関係する。

Q230. トポロジカル場の理論とは何か。

答：局所的な計量に依存せず、主に位相的不変量を記述する場の理論。

Q231. Wilson loopとは何か。

答：ゲージ接続を閉曲線に沿って平行移動したホロノミーのトレース。閉じ込めの診断や AdS/CFT で重要。

Q232. 't Hooft loopとは何か。

答：磁氣的な線演算子。Wilson loop と電磁双対的な役割を持つ。

Q233. p-form対称性とは何か。

答：点状演算子ではなく p 次元演算子に作用する一般化された大域対称性。

Q234. 高次形式ゲージ場とは何か。

答：通常の1形式ゲージ場を p 形式へ一般化したもの。弦やブレーンが自然な電荷源になる。

Q235. アノマリー流入とは何か。

答：高次元bulkの作用変分が境界・ブレーン上の異常を相殺する機構。

第18章 発展的概念

Q236. 弦場理論とは何か。

答：単一弦ではなく弦そのものを場として量子化し、弦の生成・消滅を記述する第二量子化的枠組み。

Q237. 開弦場理論とは何か。

答：開弦状態を弦場として扱う理論。Wittenのcubic open string field theoryが代表的。

Q238. 閉弦場理論とは何か。

答：閉弦の相互作用を弦場として記述する理論。ゲージ構造が複雑で高次積を伴う。

Q239. タキオン凝縮とは何か。

答：不安定な弦背景のタキオン場がポテンシャルの安定点へ移る現象。Dブレーン消滅などを記述する。

Q240. double field theoryとは何か。

答：T双対性を明示するため通常座標と双対座標を倍化した有効場理論。

Q241. generalized geometryとは何か。

答：接束 T と余接束 T^* を統合して扱う幾何。フラックス背景や双対性の記述に有用。

Q242. exceptional field theoryとは何か。

答：U双対性を明示するため座標・場を拡張した高次元超重力の再定式化。

Q243. 非幾何学的背景とは何か。

答：通常の多様体として大域的に記述できず、T双対性などを遷移関数として必要とする弦背景。

Q244. T-foldとは何か。

答：局所的には幾何学的だが、パッチ間の貼り合わせにT双対性を用いる非幾何学的背景。

Q245. topological string theoryとは何か。

答：物理的弦理論をトポロジカルにツイストして得る簡約理論。BPS量やCalabi-Yau不変量を計算する。

Q246. A-modelとは何か。

答：Calabi-YauのKähler構造に依存するトポロジカル弦。正則曲線やGromov-Witten不変量と関係する。

Q247. B-modelとは何か。

答：Calabi-Yauの複素構造に依存するトポロジカル弦。ミラー対称性でA-modelと対応する。

Q248. 弦理論における背景独立性とは何か。

答：特定の固定時空背景に依存せず理論を定義できるかという問題。完全な非摂動定式化と関係する。

Q249. UV completionとは何か。

答：低エネルギー理論を任意の高エネルギーまで整合的に拡張する理論。弦理論は重力を含むUV completion候補。

Q250. 量子重力の低エネルギー極限とは何か。

答：Planck尺度より十分低いエネルギーで一般相対論と量子場理論を有効場理論として回収する極限。

総復習チェック

次の語を、1語につき30秒以内で説明できるか確認する。説明できなければ該当章へ戻る。

作用	経路積分	繰り込み群	ゲージ対称性
BRST	Einstein-Hilbert作用	Planck長	重力子
世界面	Polyakov作用	Weyl対称性	Virasoro代数
臨界次元	CFT	中心電荷	OPE
頂点演算子	SUSY	RNS	GSO射影
BPS	Type IIA	Type IIB	ヘテロティック弦
S双対性	T双対性	Dブレーン	Chan-Paton因子
DBI作用	RR場	Calabi-Yau	Kähler
ホロノミー	モジュライ	フラックス	オリエンティフォールド
Veneziano振幅	AdS/CFT	't Hooft結合	GKPW
Ryu-Takayanagi	M理論	BFSS	IKKT
創発時空	ランドスケープ	スワンプランド	KKLT
ミラー対称性	F理論	Lie群	表現
微分形式	コホモロジー	ファイバー束	Dirac演算子
Riemann面	楕円ファイブレーション	量子もつれ	レプリカ法
Green-Schwarz機構	Wilson loop	p-form対称性	弦場理論
double field theory	topological string		

収録：18章・250問 / 著者：t