

量子力学

一問一答 完全版

基礎公理から水素原子・摂動論・散乱・量子情報・開放系・経路積分・量子基礎論
まで
全30章・450問

対象	大学初年級 - 大学院基礎。量子場理論・素粒子論へ進む前の総復習にも対応。
構成	一問一答で定義・数式・物理的意味・近似法・現代的话题を広く横断。
推奨法	問いを見て自力で説明 → 答えを確認 → 重要式は自分で導出、の順で使用する。

著者 t

目次

基礎 → 標準的な波動力学 → 角運動量・原子 → 近似法 → 多体系・量子情報 → 相対論・基礎論 → 現代的話題、という順で配置しています。

- 第1章 量子論の成立と基本概念（15問）
- 第2章 Hilbert空間とDirac記法（15問）
- 第3章 演算子・固有値・測定（15問）
- 第4章 不確定性関係（15問）
- 第5章 Schrödinger方程式と時間発展（15問）
- 第6章 1次元波動力学（15問）
- 第7章 井戸型ポテンシャル（15問）
- 第8章 障壁・トンネル・散乱（15問）
- 第9章 調和振動子（15問）
- 第10章 角運動量（15問）
- 第11章 スピン1/2とPauli行列（15問）
- 第12章 角運動量の合成（15問）
- 第13章 3次元中心力と水素原子（15問）
- 第14章 近似法：時間非依存摂動論（15問）
- 第15章 変分法・WKB・半古典近似（15問）
- 第16章 時間依存摂動論（15問）
- 第17章 同種粒子と量子統計（15問）
- 第18章 密度演算子と混合状態（15問）
- 第19章 EntanglementとBell非局所性（15問）
- 第20章 量子情報・qubit・量子計算（15問）
- 第21章 開放量子系とデコヒーレンス（15問）
- 第22章 経路積分と作用（15問）
- 第23章 対称性と保存則（15問）
- 第24章 幾何学的位相・断熱量子論（15問）
- 第25章 散乱理論（15問）
- 第26章 多体系量子力学（15問）
- 第27章 相対論的量子力学への入口（15問）
- 第28章 量子基礎論・測定問題（15問）
- 第29章 量子光学・原子物理の応用（15問）
- 第30章 高度な数学・現代的話題（15問）

第1章 量子論の成立と基本概念

Q1. 量子力学が必要になった主な理由は何か。

答：黒体放射、光電効果、原子スペクトルなど、古典物理では説明できない現象を記述するため。

Q2. Planckの量子仮説とは何か。

答：振動子がエネルギーを連続ではなく $E=n \cdot \omega$ の離散単位で交換するとする仮説。

Q3. 光子とは何か。

答：電磁場の量子で、エネルギー $E=\hbar \omega$ 、運動量 $p=\hbar k$ を持つ。

Q4. de Broglie波長とは何か。

答：粒子の運動量 p に対して $\lambda=h/p$ で与えられる物質波の波長。

Q5. 波動粒子二重性とは何か。

答：量子の対象が実験条件に応じて波動的干渉と粒子的検出の双方を示すこと。

Q6. 量子状態とは何か。

答：系について可能な測定結果の確率を決定する数学的対象。純粋状態はHilbert空間のrayで表す。

Q7. 重ね合わせの原理とは何か。

答：許された状態の線形結合もまた許された状態になるという量子論の基本原則。

Q8. 確率振幅とは何か。

答：測定確率そのものではなく、絶対値二乗によって確率を与える複素振幅。

Q9. Born則とは何か。

答：状態 $|\psi\rangle$ で射影 P に対応する事象の確率が $\langle\psi|P|\psi\rangle$ で与えられる規則。

Q10. 古典極限とは何か。

答：量子論が適切な条件で古典力学の予言へ近づく極限。 $\hbar \rightarrow 0$ という形式的極限だけでなくデコヒーレンス等も重要。

Q11. 対応原理とは何か。

答：量子論が大きな量子数など適切な領域で古典論と整合すべきだという原理。

Q12. 量子化とは何か。

答：古典系から量子系を構成する手続き、または物理量が離散値を取る現象を指す。

Q13. 観測量とは何か。

答：理想的量子力学では自己共役演算子で表される測定可能な物理量。

Q14. 量子揺らぎとは何か。

答：量子状態で観測量が確定値を持たず分散を持つこと。

Q15. 量子力学と古典確率論の本質的違いは何か。

答：確率振幅が複素数で干渉し、非可換観測量やentanglementが存在する点。

第2章 Hilbert空間とDirac記法

Q16. Hilbert空間とは何か。

答：内積を備え、Cauchy列が収束する完備な複素ベクトル空間。量子状態を表す。

Q17. $\text{ket } |\psi\rangle$ とは何か。

答：Hilbert空間の状態ベクトルを表すDirac記法。

Q18. $\text{bra } \langle\psi|$ とは何か。

答： $\text{ket } |\psi\rangle$ のHermitian共役で、双対空間のベクトル。

Q19. 内積 $\langle\phi|\psi\rangle$ の意味は何か。

答：二状態の重なりを表す複素数。絶対値二乗は適切な測定確率に関係する。

Q20. 状態の規格化とは何か。

答： $\langle\psi|\psi\rangle=1$ とすること。

Q21. rayとは何か。

答：非零複素数倍だけ異なる状態ベクトルを同一物理状態とみなした同値類。

Q22. 直交状態とは何か。

答：内積が0となる二つの状態。完全に識別可能な純粋状態に対応する。

Q23. 正規直交基底とは何か。

答：互いに直交し各ノルムが1で、空間を張る基底。

Q24. 完全性関係とは何か。

答：正規直交基底 $\{|n\rangle\}$ に対して $\sum_n |n\rangle\langle n| = I$ となる関係。連続基底では積分になる。

Q25. 基底変換とは何か。

答：同じ状態を別の完全基底で展開すること。物理状態自体は変わらない。

Q26. 位置基底とは何か。

答：位置演算子の一般化固有状態 $|x\rangle$ を用いる基底。

Q27. 運動量基底とは何か。

答：運動量演算子の一般化固有状態 $|p\rangle$ を用いる基底。

Q28. 波動関数 $\psi(x)$ とは何か。

答：状態 $|\psi\rangle$ の位置表示 $\langle x|\psi\rangle$ 。

Q29. Parseval型の関係とは何か。

答：規格化された状態では基底成分の絶対値二乗の総和・積分が1になること。

Q30. global phaseが観測されない理由は何か。

答： $|\psi\rangle$ と $e^{i\alpha}|\psi\rangle$ は全ての期待値・測定確率を同じにするため。

第3章 演算子・固有値・測定

Q31. 線形演算子とは何か。

答： $A(a|\psi\rangle+b|\phi\rangle)=aA|\psi\rangle+bA|\phi\rangle$ を満たす写像。

Q32. 自己共役演算子とは何か。

答：適切な定義域を含め $A=A^\dagger$ を満たす演算子。観測量を表す。

Q33. Hermitianとself-adjointの違いは何か。

答：有限次元ではほぼ同じだが、無限次元では定義域まで一致するself-adjoint性が物理的に重要。

Q34. 固有値方程式とは何か。

答： $A|a\rangle=a|a\rangle$ 。 a を固有値、 $|a\rangle$ を固有状態と呼ぶ。

Q35. スペクトルとは何か。

答：演算子を取り得る固有値・連続スペクトルなどの集合。

Q36. 縮退とは何か。

答：同じ固有値に線形独立な複数の固有状態が対応すること。

Q37. 期待値とは何か。

答：規格化状態で $\langle A \rangle = \langle \psi | A | \psi \rangle$ 。多数回測定の平均に対応する。

Q38. 分散とは何か。

答： $(\Delta A)^2 = \langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2$ 。測定値の量子揺らぎを表す。

Q39. 射影演算子とは何か。

答： $P^2=P=P^\dagger$ を満たす演算子。部分空間への射影を表す。

Q40. 射影測定とは何か。

答：互いに直交する射影 $\{P_a\}$ で記述される理想測定。結果 a の確率は $\langle \psi | P_a | \psi \rangle$ 。

Q41. 測定後状態はどう表されるか。

答：理想的射影測定で結果 a を得た後は $P_a | \psi \rangle / \sqrt{\langle \psi | P_a | \psi \rangle}$ 。

Q42. POVMとは何か。

答：正作用素 $E_a \geq 0$ で $\sum E_a = I$ を満たす一般化測定。確率は $\text{Tr}(\rho E_a)$ 。

Q43. 交換子とは何か。

答： $[A, B] = AB - BA$ 。二観測量の非可換性を測る。

Q44. 可換な観測量の特徴は何か。

答：適切な条件で同時固有基底を持ち、同時に確定値を持ち得る。

Q45. スペクトル定理とは何か。

答：自己共役演算子を固有射影の和または積分として分解できるという定理。

第4章 不確定性関係

Q46. Heisenbergの不確定性関係とは何か。

答：位置と運動量について $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ 。状態の統計的広がりに関する関係。

Q47. Robertson不確定性関係とは何か。

答：任意の自己共役 A, B に対し $\Delta A \Delta B \geq (1/2) |\langle [A, B] \rangle|$ 。

Q48. Schrödinger型不確定性関係とは何か。

答：交換子に加え反交換子の共分散も含む、Robertson関係より強い不等式。

Q49. 不確定性は測定器の精度不足なのか。

答：一般には違う。標準偏差型不確定性関係は量子状態そのものの分布幅を表す。

Q50. minimum uncertainty stateとは何か。

答：不確定性関係の下限を飽和する状態。調和振動子のcoherent stateなど。

Q51. 位置と運動量が同時に固有値を持ってない理由は何か。

答： $[x, p] = i\hbar$ で非可換だから。

Q52. energy-time uncertaintyはx-p関係と同じか。

答：一般には同じではない。通常の量子力学で時間は外部パラメータであり、複数の時間-エネルギー関係がある。

Q53. Mandelstam-Tamm関係とは何か。

答：状態変化の時間尺度 τ とエネルギー分散に $\Delta E \tau \geq \hbar/2$ 型の制約を与える関係。

Q54. 共役変数とは何か。

答：Fourier変換で結ばれ、正準交換関係を持つ位置と運動量のような変数。

Q55. squeezed stateとは何か。

答：一方のquadratureの揺らぎを標準量子限界以下に減らし、共役側を増やした状態。

Q56. 標準量子限界とは何か。

答：独立量子系の統計などから生じる典型的感度限界。文脈により定義が異なる。

Q57. 非可換性が量子論で重要な理由は何か。

答：測定順序依存性、干渉、不確定性、量子ダイナミクスの構造を生むため。

Q58. 共分散とは何か。

答：二観測量の揺らぎの相関を対称積の期待値で表した量。

Q59. 不確定性積がゼロになり得る条件は何か。

答：少なくとも一方が状態上で確定値を持ち、交換子期待値等の制約と整合する場合。xとpでは不可能。

Q60. Fourier変換と不確定性の関係は何か。

答：波動関数と運動量波動関数がFourier対であり、一方を局在させると他方が広がる。

第5章 Schrödinger方程式と時間発展

Q61. 時間依存Schrödinger方程式とは何か。

答： $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = H |\psi\rangle$ 。量子状態の時間発展を定める。

Q62. Hamiltonianとは何か。

答：時間発展の生成子で、閉じた系では通常エネルギー観測量でもある。

Q63. 時間発展演算子とは何か。

答： $|\psi(t)\rangle = U(t, t_0) |\psi(t_0)\rangle$ を満たすunitary演算子。

Q64. 時間独立Hamiltonianの $U(t)$ は何か。

答: $U(t)=\exp[-iH(t-t_0)/\hbar]$ 。

Q65. unitary時間発展が重要な理由は何か。

答: 内積と全確率を保存するため。

Q66. 定常状態とは何か。

答: Hamiltonian固有状態。時間依存は全体位相だけで確率密度が時間不変。

Q67. 時間独立Schrödinger方程式とは何か。

答: $H\psi=E\psi$ 。定常状態とエネルギー固有値を求める方程式。

Q68. 保存量とHamiltonianの関係は何か。

答: 明示的時間依存がない A で $[A,H]=0$ なら期待値は時間保存される。

Q69. Ehrenfestの定理とは何か。

答: 期待値の運動が古典Hamilton方程式に似た形を満たす定理。

Q70. Heisenberg pictureとは何か。

答: 状態を固定し、演算子を時間発展させる描像。

Q71. Schrödinger pictureとは何か。

答: 演算子を基本的に固定し、状態を時間発展させる描像。

Q72. interaction pictureとは何か。

答: 自由部分による時間発展を演算子へ移し、相互作用部分だけで状態を発展させる描像。

Q73. Heisenberg方程式とは何か。

答: $dA/dt=(i/\hbar)[H,A]+\partial A/\partial t$ 。

Q74. 時間順序演算子とは何か。

答: 複数の時刻の演算子を遅い時刻ほど左に並べる記号 T 。

Q75. Dyson seriesとは何か。

答: 時間依存相互作用の発展演算子を時間順序積の級数として展開したもの。

第6章 1次元波動力学

Q76. 1次元自由粒子のHamiltonianは何か。

答: $H=p^2/(2m)=-\hbar^2/(2m)d^2/dx^2$ 。

Q77. 平面波とは何か。

答: $\psi(x)=Ae^{ikx}$ 型の運動量固有状態。無限空間では通常 δ 関数規格化する。

Q78. 波束とは何か。

答: 異なる運動量の平面波を重ね合わせた局在状態。

Q79. 群速度とは何か。

答: 波束包絡の伝播速度 $v_g=d\omega/dk$ 。非相対論自由粒子では p/m 。

Q80. 位相速度とは何か。

答：一定位相面の速度 $v_p = \omega/k$ 。

Q81. 波束の拡散とは何か。

答：自由粒子で異なるk成分の位相が異なる速度で進み、位置分布が時間とともに広がること。

Q82. 確率密度とは何か。

答：位置表示で $|\psi(x,t)|^2$ 。区間積分が位置測定確率を与える。

Q83. 確率流とは何か。

答：Schrödinger方程式から得られる確率保存流 $j = (\hbar/m)\text{Im}(\psi^* \partial_x \psi)$ 。

Q84. 連続の式とは何か。

答： $\partial \rho / \partial t + \partial j / \partial x = 0$ 。確率保存を局所的に表す。

Q85. 境界条件が固有値を量子化する理由は何か。

答：微分方程式の解のうち境界条件を満たすものだけが許され、許容Eが離散化されるため。

Q86. 節とは何か。

答：波動関数が0になる点。束縛状態では励起順位と節数に関係がある。

Q87. parityとは何か。

答： $x \rightarrow -x$ の空間反転。対称ポテンシャルでは固有状態を偶・奇に選べる。

Q88. 偶関数状態とは何か。

答： $\psi(-x) = \psi(x)$ を満たすparity +1の状態。

Q89. 奇関数状態とは何か。

答： $\psi(-x) = -\psi(x)$ を満たすparity -1の状態。

Q90. 無限遠で束縛状態が満たす条件は何か。

答：規格化可能であるため通常 $\psi \rightarrow 0$ 。

第7章 井戸型ポテンシャル

Q91. 無限深井戸とは何か。

答：有限区間で $V=0$ 、外側で $V=\infty$ とする理想化ポテンシャル。

Q92. 無限深井戸のエネルギー準位はどうなるか。

答：幅Lなら $E_n = n^2 \pi^2 \hbar^2 / (2mL^2)$, $n=1,2,\dots$ 。

Q93. 無限深井戸に $E=0$ 状態がない理由は何か。

答：境界条件と不確定性により非自明な定数波動関数が許されないため。

Q94. 零点エネルギーとは何か。

答：基底状態でも残る非零エネルギー。閉じ込めと不確定性の結果として現れる。

Q95. 有限深井戸とは何か。

答：井戸外のポテンシャルが有限のため、束縛状態波動関数が外側へ指数関数的にしみ出す井戸。

Q96. 束縛状態とは何か。

答：通常、規格化可能で粒子が有限領域に局在する離散エネルギー状態。

Q97. 散乱状態とは何か。

答：連続スペクトルに属し、無限遠まで伝播する状態。

Q98. 有限井戸の束縛状態数は何で決まるか。

答：井戸の深さ・幅・粒子質量・ $\hbar$ に依存する無次元組合せ。

Q99. 対称有限井戸で偶奇分解が有効な理由は何か。

答：Hamiltonianがparityと可換し、固有状態を偶・奇に分類できるため。

Q100. delta関数井戸とは何か。

答： $V(x)=-g\delta(x)$ 型の零幅ポテンシャル。1次元では $g>0$ なら一つの束縛状態を持つ。

Q101. deltaポテンシャルで ψ' が不連続になる理由は何か。

答：Schrödinger方程式を δ 点の微小区間で積分すると導関数に有限ジャンプ条件が生じるため。

Q102. 箱の中の粒子の運動量期待値はどうなるか。

答：定常固有状態では典型的に $\langle p \rangle = 0$ だが $\langle p^2 \rangle$ は非零。

Q103. 量子井戸とは何か。

答：半導体などで粒子を一方方向に閉じ込め、離散サブバンドを作る構造。

Q104. 境界で波動関数が連続である理由は何か。

答：有限な通常ポテンシャルではSchrödinger方程式の整合性から ψ と ψ' が連続になる。

Q105. 無限壁で $\psi=0$ となる理由は何か。

答：壁外に有限確率を許さず、境界条件としてDirichlet条件を課すため。

第8章 障壁・トンネル・散乱

Q106. 量子トンネル効果とは何か。

答：古典的には越えられない $V>E$ 領域を波動関数が指数減衰しつつ通過する現象。

Q107. 透過係数とは何か。

答：入射確率流に対する透過確率流の比 T 。

Q108. 反射係数とは何か。

答：入射確率流に対する反射確率流の比 R 。保存系では $R+T=1$ 。

Q109. step potentialとは何か。

答：ある位置でポテンシャルが一定値だけ不連続に変化するモデル。

Q110. $E>V$ のstepでも反射が起こる理由は何か。

答：波数が変わる境界で波動のmatchingが必要となり、量子的反射が生じるため。

Q111. 矩形障壁とは何か。

答：有限幅領域で一定の高いポテンシャルを持つモデル。

Q112. トンネル確率のWKB的依存性は何か。

答：禁制領域で概ね $\exp[-2 \int \kappa(x) dx]$ 、 $\kappa = \sqrt{2m(V-E)}$ 。

Q113. 共鳴透過とは何か。

答：多重障壁等で内部位相条件が合うと透過率が大きくなる現象。

Q114. Gamow因子とは何か。

答： α 崩壊などのCoulomb障壁トンネル確率を指数的に支配する因子。

Q115. α 崩壊を量子力学でどう説明するか。

答：核内 α 粒子がCoulomb障壁をトンネルして外へ出る過程として説明する。

Q116. 走査型トンネル顕微鏡の原理は何か。

答：探針と表面間のトンネル電流が距離に指数的に敏感なことを利用する。

Q117. transfer matrix法とは何か。

答：区分一定ポテンシャルで各領域の波係数を行列で接続して散乱を計算する方法。

Q118. S行列とは何か。

答：漸近的な入射状態を出射状態へ写す演算子。散乱確率と位相を含む。

Q119. 1次元散乱の位相シフトとは何か。

答：ポテンシャルにより漸近波の位相が自由波からずれる量。

Q120. 準束縛状態とは何か。

答：有限寿命を持ち、散乱振幅の共鳴極として現れる状態。

第9章 調和振動子

Q121. 量子調和振動子のHamiltonianは何か。

答： $H = p^2/(2m) + (1/2)m\omega^2 x^2$ 。

Q122. 調和振動子のエネルギー準位は何か。

答： $E_n = \hbar\omega(n+1/2)$ 。

Q123. 生成演算子 $a^\dagger$ とは何か。

答：数状態 $|n\rangle$ を $\sqrt{n+1}|n+1\rangle$ へ上げる ladder operator。

Q124. 消滅演算子 a とは何か。

答： $|n\rangle$ を $\sqrt{n}|n-1\rangle$ へ下げる ladder operator。

Q125. 数演算子とは何か。

答： $N = a^\dagger a$ で、 $N|n\rangle = n|n\rangle$ 。

Q126. $[a, a^\dagger]$ はいくつか。

答： $[a, a^\dagger] = 1$ 。

Q127. 基底状態は a でどう特徴づけられるか。

答： $a|0\rangle = 0$ 。

Q128. 基底状態の波動関数はどのような形か。

答：Gaussian型 $\exp[-m\omega x^2/(2\hbar)]$ 。

Q129. 調和振動子の零点エネルギーは何か。

答： $\hbar\omega/2$ 。

Q130. coherent stateとは何か。

答： $a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$ を満たす状態。最小不確定性を持ち、古典振動に近い。

Q131. coherent stateの数分布は何か。

答：Poisson分布。平均粒子数は $|\alpha|^2$ 。

Q132. squeezed vacuumとは何か。

答：quadratureの一方の揺らぎを減少させた非古典状態。

Q133. Hermite多項式はどこに現れるか。

答：調和振動子の位置波動関数の多項式部分。

Q134. ladder operator法の利点は何か。

答：微分方程式を直接解かず代数的に全スペクトルと行列要素を求められる。

Q135. 調和振動子が広く重要な理由は何か。

答：安定平衡点近傍の多くの系が二次ポテンシャルで近似でき、場の各モードも振動子になるため。

第10章 角運動量

Q136. 軌道角運動量とは何か。

答： $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ で定義される回転の生成子。

Q137. 角運動量の交換関係は何か。

答： $[L_i, L_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} L_k$ 。

Q138. L^2 と L_z の固有値は何か。

答： $L^2 \rightarrow \hbar^2 l(l+1)$ 、 $L_z \rightarrow \hbar m$ 、 $m = -l, \dots, l$ 。

Q139. 角運動量ladder operatorとは何か。

答： $L_{\pm} = L_x \pm iL_y$ で m を ± 1 変える。

Q140. 球面調和関数とは何か。

答： $Y_l^m(\theta, \varphi)$ 。 L^2 と L_z の同時固有関数。

Q141. 回転演算子はどう書かれるか。

答：軸 n 周り角 θ なら $U = \exp(-i\theta \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}/\hbar)$ 。

Q142. 回転の生成子とは何か。

答：全角運動量 $\mathbf{J}$ 。無限小回転を生成する。

Q143. 軌道角運動量子数 l はどの値を取るか。

答： $0, 1, 2, \dots$ の非負整数。

Q144. 磁気量子数 m はどの値を取るか。

答： $-l$ から l まで1刻み。

Q145. 角運動量固有状態の縮退度は何か。

答：固定 l に対し $2l+1$ 。

Q146. 中心力ポテンシャルで角運動量が保存される理由は何か。

答：Hamiltonianが回転不変で $[L, H]=0$ だから。

Q147. 遠心力項とは何か。

答：動径方程式に現れる $-\hbar^2 l(l+1)/(2mr^2)$ の有効ポテンシャル項。

Q148. $SO(3)$ と $SU(2)$ の関係は何か。

答： $SU(2)$ は $SO(3)$ の二重被覆で、半整数スピン表現を自然に含む。

Q149. 角運動量のCasimir演算子とは何か。

答： J^2 。全生成子と可換し、既約表現を j で分類する。

Q150. 量子化軸とは何か。

答： J_z など一成分を対角化するために選ぶ基準方向。物理的回転対称性自体を破るとは限らない。

第11章 スピン1/2とPauli行列

Q151. スピンとは何か。

答：粒子が持つ内在的角運動量。空間軌道運動とは独立の量子自由度。

Q152. スピン1/2の S^2 固有値は何か。

答： $s(s+1)\hbar^2=3/4\hbar^2$ 。

Q153. S_z の測定値は何か。

答： $\pm \hbar/2$ 。

Q154. Pauli行列とは何か。

答： $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ の3つの 2×2 Hermitian行列で、spin-1/2演算子 $S=(\hbar/2)\sigma$ を表す。

Q155. Pauli行列の積の公式は何か。

答： $\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} I + i \epsilon_{ijk} \sigma_k$ 。

Q156. Bloch sphereとは何か。

答：純粋qubit状態を単位球面上の点として表す幾何学的表示。

Q157. Stern-Gerlach実験は何を示すか。

答：磁場勾配中で原子ビームが離散的に分裂し、角運動量成分の量子化を示す。

Q158. spinorが 2π 回転で符号反転するとはどういうことか。

答：spin-1/2状態ベクトルは 2π 回転で-1倍され、 4π で元に戻る。global phase単独では観測不能だが干渉で相対位相は検出可能。

Q159. 任意方向 n のspin測定演算子は何か。

答： $S_n=(\hbar/2)n \cdot \sigma$ 。

Q160. spin up along n とは何か。

答： $n \cdot \sigma$ の固有値+1の状態。

Q161. Larmor precessionとは何か。

答：磁場中の磁気モーメントが磁場軸周りに歳差運動する量子時間発展。

Q162. Zeeman効果とは何か。

答：外部磁場により磁気量子数に応じてエネルギー準位が分裂する現象。

Q163. spin magnetic momentとは何か。

答：スピンの比例する磁気モーメント。電子では g 因子を含む。

Q164. density matrixでspin混合状態をどう表すか。

答： $\rho = (I + r \cdot \sigma)/2$ 、 $|r| \leq 1$ 。 r がBloch vector。

Q165. pure qubitとmixed qubitの違いは何か。

答：pureでは $|r|=1$ 、mixedでは $|r|<1$ 。

第12章 角運動量の合成

Q166. 二つの角運動量の全角運動量とは何か。

答： $J = J_1 + J_2$ 。

Q167. 許される全角運動量 j は何か。

答： $|j_1 - j_2|$ から $j_1 + j_2$ まで整数刻み。

Q168. Clebsch-Gordan係数とは何か。

答：積基底 $|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle$ と結合基底 $|j m\rangle$ を結ぶ展開係数。

Q169. spin-1/2二個の合成で何が得られるか。

答：triplet $j=1$ とsinglet $j=0$ 。

Q170. singlet stateとは何か。

答： $(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$ 。全スピン0で回転不変なentangled state。

Q171. triplet stateとは何か。

答：二spin-1/2の対称な $j=1$ 多重項。

Q172. 交換対称性とsingletの関係は何か。

答：spin singletは二粒子交換に対して反対称。

Q173. 3j symbolとは何か。

答：Clebsch-Gordan係数と密接に関係し、回転対称性計算を対称な形で表す記号。

Q174. 6j symbolとは何か。

答：三つ以上の角運動量を異なる順序で結合した基底間の変換係数。

Q175. Wigner-Eckart定理とは何か。

答：tensor operatorの行列要素を幾何学的CG係数とreduced matrix elementに分離する定理。

Q176. tensor operatorとは何か。

答：回転の下で一定の角運動量表現として変換する演算子集合。

Q177. selection ruleとは何か。

答：対称性により行列要素が必ず0になる遷移条件。

Q178. spin-orbit couplingとは何か。

答：軌道角運動量 L とspin S の相互作用 $L \cdot S$ 。

Q179. LS couplingとは何か。

答：多電子原子で各軌道角運動量と各spinを先に合成し $J=L+S$ を作る近似。

Q180. jj couplingとは何か。

答：各電子で $l_i + s_i$ を先に合成し、それらを全 J へ合成する結合scheme。

第13章 3次元中心力と水素原子

Q181. 中心力問題とは何か。

答： $V(r)$ のように距離 r だけに依存するポテンシャルの量子問題。

Q182. 変数分離はどう行うか。

答： $\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)Y_l^m(\theta, \varphi)$ と分ける。

Q183. 動径波動関数とは何か。

答：中心力問題で半径 r への依存を表す $R(r)$ 。

Q184. reduced radial function $u(r)$ とは何か。

答： $u=rR$ と置き、動径方程式を1次元Schrödinger型にする関数。

Q185. 水素原子のCoulomb potentialは何か。

答： $V(r) = -e^2/(4\pi\epsilon_0 r)$ 。

Q186. 水素原子の非相対論的エネルギーは何に依存するか。

答：理想的Coulomb問題では主量子数 n だけに依存し $E_n \propto -1/n^2$ 。

Q187. 主量子数 n とは何か。

答：水素様原子でエネルギー準位を主に分類する正整数。

Q188. 軌道量子数 l の範囲は何か。

答： n に対し $l=0,1,\dots,n-1$ 。

Q189. 磁気量子数 m の範囲は何か。

答： $m=-l,\dots,l$ 。

Q190. Bohr半径とは何か。

答：水素基底状態の代表的長さ $a_0 = 4\pi\epsilon_0 \hbar^2/(m_e e^2)$ 。

Q191. 水素原子の縮退が大きい理由は何か。

答：回転対称性に加えRunge-Lenz vectorに関係する隠れた対称性があるため。

Q192. Runge-Lenz vectorとは何か。

答：Coulomb問題の追加保存量で、古典軌道と量子縮退の対称性を説明する。

Q193. fine structureとは何か。

答：相対論的運動エネルギー補正、spin-orbit結合、Darwin項などによる微細な準位分裂。

Q194. hyperfine structureとは何か。

答：電子と原子核の磁気モーメント相互作用などによるさらに細かな分裂。

Q195. Lamb shiftとは何か。

答：QED量子補正によりDirac理論で縮退する準位がずれる現象。

第14章 近似法：時間非依存摂動論

Q196. 摂動論とは何か。

答：厳密に解ける H_0 に小さな λV を加え、固有値・固有状態を λ の級数で求める方法。

Q197. 非縮退一次エネルギー補正とは何か。

答： $E_n^{(1)} = \langle n | V | n \rangle$ 。

Q198. 非縮退一次状態補正とは何か。

答： $m \neq n$ について $|m\rangle \langle m | V | n\rangle / (E_n^{(0)} - E_m^{(0)})$ を和したもの。

Q199. 二次エネルギー補正の特徴とは何か。

答：他の固有状態とのvirtual mixingを含み、分母に未摂動エネルギー差が現れる。

Q200. 縮退摂動論が必要な理由とは何か。

答：縮退部分空間内で分母が0となるため、まず摂動をその部分空間で対角化する必要がある。

Q201. degenerate subspaceとは何か。

答： H_0 で同じ固有値を持つ状態が張る部分空間。

Q202. Stark効果とは何か。

答：外部電場による原子エネルギー準位のshift・splitting。

Q203. linear Stark effectはいつ起こるか。

答：縮退状態間に電気双極子演算子の一次行列要素が存在する場合など。

Q204. quadratic Stark effectとは何か。

答：一次補正が消えるとき、二次摂動で電場の二乗に比例するshift。

Q205. 異常Zeeman効果とは何か。

答：spinを含む磁気相互作用により単純な軌道Zeeman分裂以上の構造を示す現象。

Q206. Rayleigh-Schrödinger摂動論とは何か。

答：固有値・固有状態を結合定数のべき級数として展開する標準的定常摂動論。

Q207. 摂動級数は必ず収束するか。

答：しない。漸近級数である場合も多い。

Q208. small denominator問題とは何か。

答：近接準位でエネルギー分母が小さくなり、単純摂動展開が破綻する問題。

Q209. level repulsionとは何か。

答：同じ対称性を持つ準位が結合すると、一般に交差を避けて反発する現象。

Q210. avoided crossingとは何か。

答：パラメータ変化で二準位が接近しても結合により有限gapを保つ現象。

第15章 変分法・WKB・半古典近似

Q211. 変分原理とは何か。

答：任意の規格化試行状態に対し $\langle H \rangle \geq E_0$ 。基底エネルギーの上限を与える。

Q212. trial wavefunctionとは何か。

答：変分法でパラメータを含めて仮定する規格化可能な近似波動関数。

Q213. Rayleigh quotientとは何か。

答： $\langle \psi | H | \psi \rangle / \langle \psi | \psi \rangle$ 。最小化により基底状態近似を得る。

Q214. 変分法は励起状態にも使えるか。

答：既知の低い状態への直交条件などを課せば使える。

Q215. WKB近似とは何か。

答：波長がポテンシャル変化尺度より短い領域で位相を作用積分で近似する半古典法。

Q216. classically allowed regionとは何か。

答： $E > V(x)$ で古典運動量 $p(x)$ が実数となる領域。

Q217. classically forbidden regionとは何か。

答： $E < V(x)$ で古典運動量が虚数となり波動関数が指数型になる領域。

Q218. turning pointとは何か。

答： $E = V(x)$ となる点。通常のWKB式が破綻し接続公式が必要。

Q219. WKB量子化条件とは何か。

答：二つのturning point間で概ね $\int p \, dx = (n+1/2)\pi$ 。

Q220. connection formulaとは何か。

答：turning pointを跨いで振動解と指数解を正しく接続する公式。

Q221. 半古典極限とは何か。

答：作用 S がより十分大きく、量子振幅を古典軌道周りで近似できる領域。

Q222. Bohr-Sommerfeld量子化とは何か。

答：古典作用変数の積分を 2π の整数倍程度に量子化する旧量子論・WKB型条件。

Q223. instanton近似との共通点とは何か。

答：経路積分を非自明な古典Euclidean解周りの鞍点展開で評価する半古典法である点。

Q224. variational parameterとは何か。

答：試行状態の形を調整し期待エネルギーを最小化する自由パラメータ。

Q225. Hellmann-Feynman定理とは何か。

答： $H(\lambda)$ の固有状態で $dE/d\lambda = \langle \partial H / \partial \lambda \rangle$ を与える定理。

第16章 時間依存摂動論

Q226. 時間依存摂動論とは何か。

答：時間依存相互作用 $V(t)$ による状態間遷移を摂動的に計算する方法。

Q227. interaction pictureが便利な理由とは何か。

答： H_0 による既知の時間発展を分離し、 $V_I(t)$ だけを摂動展開できるため。

Q228. 一次遷移振幅とは何か。

答：概ね $-(i/\hbar) \int dt \langle f | V_I(t) | i \rangle$ 。

Q229. Fermiの黄金律とは何か。

答：連続終状態への長時間遷移率 $\Gamma = (2\pi/\hbar) |V_{fi}|^2 \rho(E_f)$ 。

Q230. 状態密度 $\rho(E)$ とは何か。

答：単位エネルギー当たりの利用可能な量子状態数。

Q231. selection ruleは時間依存摂動でどう現れるか。

答：相互作用演算子の行列要素が対称性により0となる遷移が禁止される。

Q232. dipole approximationとは何か。

答：光の波長が原子サイズより十分長いとき空間依存を展開し最低次の電気双極子相互作用を残す近似。

Q233. Rabi oscillationとは何か。

答：共鳴駆動された二準位系で占有確率が周期的に交換する現象。

Q234. Rabi frequencyとは何か。

答：二準位間のcoherent oscillationの角周波数。結合強度とdetuningに依存する。

Q235. detuningとは何か。

答：外部駆動周波数と遷移共鳴周波数との差。

Q236. rotating wave approximationとは何か。

答：高速に振動するcounter-rotating項を無視して二準位駆動問題を簡単化する近似。

Q237. sudden approximationとは何か。

答：Hamiltonian変化が系の固有時間より十分速いとき、直後の状態がほぼ変化しないとする近似。

Q238. adiabatic approximationとは何か。

答：Hamiltonianが十分ゆっくり変化すると、非縮退固有状態が対応する瞬間固有状態を追従する近似。

Q239. Landau-Zener遷移とは何か。

答：時間的に接近する二準位のavoided crossingを通過するときの非断熱遷移。

Q240. adiabatic theoremとは何か。

答：十分遅いHamiltonian変化の下で、gapを保つ固有状態は位相を除き瞬間固有状態を追従するという定理。

第17章 同種粒子と量子統計

Q241. 同種粒子とは何か。

答：質量・電荷・spinなど内在的性質が同一で、原理的に個体識別できない粒子。

Q242. bosonの多粒子波動関数はどうなるか。

答：粒子交換に対して対称。

Q243. fermionの多粒子波動関数はどうなるか。

答：粒子交換に対して反対称。

Q244. Pauli排他原理とは何か。

答：同種fermion二個は同じ一粒子状態を占有できない。

Q245. Slater determinantとは何か。

答：一粒子軌道から反対称fermion多体波動関数を作る行列式。

Q246. permanentとは何か。

答：boson対称化に対応する、符号を伴わない行列式類似の和。

Q247. 交換演算子とは何か。

答：二粒子のラベルを入れ替える演算子 P_{12} 。

Q248. 交換相互作用とは何か。

答：粒子の不可識別性と波動関数の対称性から生じる有効的なエネルギー差。

Q249. Fermi-Dirac統計とは何か。

答：fermionの熱平衡占有数を与える統計。

Q250. Bose-Einstein統計とは何か。

答：bosonの熱平衡占有数を与える統計。

Q251. Bose-Einstein凝縮とは何か。

答：低温で多数のbosonが同一一粒子状態を巨視的に占有する現象。

Q252. Fermi energyとは何か。

答： $T=0$ の理想Fermi気体で占有される最高一粒子エネルギー。

Q253. Fermi seaとは何か。

答： $T=0$ でFermi energy以下の状態が埋まった多fermion基底状態。

Q254. exchange degeneracyとは何か。

答：同種粒子の交換が新しい物理状態を作らないという不可識別性。

Q255. anyonとは何か。

答：2次元で交換にboson/fermion以外の位相または非可換変換を許す準粒子。

第18章 密度演算子と混合状態

Q256. 密度演算子とは何か。

答：量子状態を ρ で表す一般形式。純粋状態では $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ 。

Q257. mixed stateとは何か。

答：純粋状態の古典確率混合 $\rho = \sum p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$ で、rankが1より大きい状態。

Q258. 密度行列の条件は何か。

答： $\rho \geq 0$ 、 $\rho^\dagger = \rho$ 、 $\text{Tr} \rho = 1$ 。

Q259. 期待値を密度行列でどう書くか。

答： $\langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$ 。

Q260. purityとは何か。

答： $\text{Tr} \rho^2$ 。純粋状態で1、混合状態で1未満。

Q261. von Neumann entropyとは何か。

答： $S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \ln \rho)$ 。混合度・量子情報量の基本指標。

Q262. partial traceとは何か。

答：複合系の一部自由度をtrace outして部分系のreduced density matrixを得る操作。

Q263. reduced density matrixとは何か。

答：全系 ρ_{AB} から $\rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$ で得る部分系状態。

Q264. improper mixtureとは何か。

答：entangled pure stateの部分系をtraceしたことで生じる混合状態。単なる無知によるensembleとは起源が異なる。

Q265. ensemble decompositionは一意か。

答：一般に一意でない。同じ ρ を異なる純粋状態ensembleで表せる。

Q266. maximally mixed stateとは何か。

答： d 次元で $\rho = I/d$ 。全純粋状態方向に偏りが無い。

Q267. quantum fidelityとは何か。

答：二つの量子状態の近さを測る量。純粋状態なら $|\langle\psi|\phi\rangle|^2$ に帰着する規約が多い。

Q268. trace distanceとは何か。

答： $D(\rho, \sigma) = 1/2 \|\rho - \sigma\|_1$ 。二状態の最適識別可能性と関係する。

Q269. Bloch vector表示とは何か。

答：qubit密度行列を $\rho = (I + \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\sigma})/2$ と書く表示。

Q270. thermal density matrixとは何か。

答： $\rho = e^{-\beta H}/Z$ 。canonical ensembleの量子状態。

第19章 EntanglementとBell非局所性

Q271. entanglementとは何か。

答：複合系状態が部分系状態の積またはその古典混合として表せない量子的相関。

Q272. separable stateとは何か。

答： $\rho_{AB} = \sum_i p_i \rho_A^i \otimes \rho_B^i$ と書ける非entangled状態。

Q273. Bell stateとは何か。

答：二qubitの代表的な4つのmaximally entangled states。

Q274. Schmidt decompositionとは何か。

答：任意の二体系純粋状態を $\sum_i \sqrt{\lambda_i} |i_A\rangle |i_B\rangle$ と書く分解。

Q275. Schmidt rankとは何か。

答：非零Schmidt係数の個数。純粋二体系のentanglement有無を判定する。

Q276. entanglement entropyとは何か。

答：純粋二体系で部分系のvon Neumann entropy。

Q277. Bell不等式とは何か。

答：局所隠れ変数理論が満たす相関の制約。量子論は一部状態・測定で破る。

Q278. CHSH不等式とは何か。

答：二者二設定二値測定の代表的Bell不等式。局所实在論では $|S| \leq 2$ 。

Q279. Tsirelson boundとは何か。

答：量子論でCHSH量の最大値が $2\sqrt{2}$ であるという上限。

Q280. EPR paradoxとは何か。

答：entanglement相関を用いて量子力学の完全性を問うEinstein-Podolsky-Rosenの議論。

Q281. no-signallingとは何か。

答：局所測定選択だけで遠隔側へ超光速情報を送れない性質。

Q282. entanglement swappingとは何か。

答：直接entangleしていない二系を、中間系の共同測定によってentangleさせるprotocol。

Q283. monogamy of entanglementとは何か。

答：一つの系が別系と最大にentangleすると第三系とは同時に最大entangleできない制約。

Q284. entanglement witnessとは何か。

答：separable stateでは非負だが特定entangled stateで負となる観測量。

Q285. quantum steeringとは何か。

答：一方の局所測定により他方の条件付き状態ensembleを遠隔的に準備できる量子相関で、Bell非局所性とentanglementの中間概念。

第20章 量子情報・qubit・量子計算

Q286. qubitとは何か。

答：二次元Hilbert空間で表される量子情報の基本単位。

Q287. quantum gateとは何か。

答：qubitに作用するunitary演算。

Q288. Pauli-X gateとは何か。

答： $|0\rangle$ と $|1\rangle$ を交換する量子NOT。

Q289. Hadamard gateとは何か。

答：計算基底と $\pm$ 重ね合わせ基底を結ぶ一qubit gate。

Q290. phase gateとは何か。

答： $|1\rangle$ 成分に相対位相を与える一qubit gate。

Q291. CNOT gateとは何か。

答：control qubitが1のときtargetを反転する二qubit gate。entanglement生成に使える。

Q292. universal gate setとは何か。

答：任意のunitaryを任意精度で近似できる有限種類のgate集合。

Q293. no-cloning theoremとは何か。

答：未知の任意量子状態を完全複製するunitary操作は存在しないという定理。

Q294. quantum teleportationとは何か。

答：共有entanglementと2 classical bitsを使って未知qubit状態を遠隔転送するprotocol。

Q295. superdense codingとは何か。

答：共有entanglementを使い1 qubit送信で2 classical bitsを伝えるprotocol。

Q296. quantum error correctionとは何か。

答：冗長なentangled encodingで量子情報をnoiseから保護し、状態を直接測らず誤りsyndromeを検出する方法。

Q297. decoherence-free subspaceとは何か。

答：特定の環境noiseに対して相対位相が保護される部分空間。

Q298. quantum circuitとは何か。

答：初期状態、gate、測定を時間順に配置した量子計算モデル。

Q299. quantum supremacy/advantageとは何か。

答：特定計算で量子装置が古典手法に対し実用的または計算量的優位を示すこと。用語の意味は文脈依存。

Q300. quantum algorithmで干渉が重要な理由は何か。

答：正解に対応する振幅を強め、不要な振幅を打ち消す設計が高速化の核心になるため。

第21章 開放量子系とデコヒーレンス

Q301. 開放量子系とは何か。

答：環境と相互作用し、部分系単独ではunitaryでない有効時間発展を示す量子系。

Q302. decoherenceとは何か。

答：環境とのentanglementにより特定基底間の位相coherenceが実効的に失われる現象。

Q303. decoherenceは波動関数収縮そのものか。

答：同一ではない。decoherenceは干渉抑制を説明するが、単一結果の選択解釈は別問題。

Q304. pointer stateとは何か。

答：環境相互作用に対して比較的安定で古典的記録として残りやすい状態。

Q305. quantum channelとは何か。

答：密度演算子を密度演算子へ写す完全正值trace-preserving(CPTP) map。

Q306. Kraus representationとは何か。

答：量子channelを $\rho \rightarrow \sum_k K_k \rho K_k^\dagger$, $\sum K_k^\dagger K_k = I$ と表す形式。

Q307. Lindblad equationとは何か。

答：Markov近似下の連続時間CPTP dynamicsを生成する最も一般的なmaster equation。

Q308. master equationとは何か。

答：環境を消去した部分系密度行列の有効時間発展方程式。

Q309. Markov approximationとは何か。

答：環境記憶時間が短く、現在の系状態だけで将来の発展を近似する仮定。

Q310. amplitude dampingとは何か。

答：励起状態が基底状態へ緩和するnoise channel。

Q311. phase dampingとは何か。

答：populationを保ちつつoff-diagonal coherenceを減衰させるnoise。

Q312. T1とは何か。

答：エネルギー緩和時間。励起populationが平衡へ戻る時間尺度。

Q313. T2とは何か。

答：位相coherenceの減衰時間。通常 $T_2 \leq 2T_1$ 。

Q314. quantum Zeno effectとは何か。

答：非常に頻繁な測定により状態遷移が抑制される現象。

Q315. anti-Zeno effectとは何か。

答：測定条件によって逆に崩壊・遷移が加速される現象。

第22章 経路積分と作用

Q316. 量子力学の経路積分とは何か。

答：始点から終点へ至る全経路を位相重み $\exp(iS/\hbar)$ で足し合わせる遷移振幅の定式化。

Q317. 作用Sとは何か。

答： $S = \int L dt$ 。古典軌道は通常 $\delta S = 0$ を満たす。

Q318. propagatorとは何か。

答： $K(x_f, t_f; x_i, t_i) = \langle x_f | U | x_i \rangle$ 。ある位置から別位置への量子遷移振幅。

Q319. 経路積分とSchrödinger形式は等価か。

答：適切な条件の下で同じ量子力学を与える別定式化。

Q320. stationary phase approximationとは何か。

答： $\hbar$ が小さいと作用が停留する古典経路近傍の寄与が支配的になる近似。

Q321. Euclidean timeとは何か。

答： $t = -i\tau$ などのWick rotationで得る虚時間。重みが $\exp(-S_E/\hbar)$ になる。

Q322. Euclidean path integralの利点とは何か。

答：振動積分が減衰重みになり、統計力学・基底状態計算・数値法との対応が良い。

Q323. imaginary-time evolutionは何をするか。

答： $e^{-H\tau/\hbar}$ により高エネルギー成分を指数抑制し、長時間で基底状態を抽出する。

Q324. semiclassical propagatorとは何か。

答：古典経路とその周りのGaussian揺らぎで近似したpropagator。

Q325. Van Vleck determinantとは何か。

答：半古典propagatorの振幅prefactorに現れ、近接古典軌道の収束・発散を表す行列式。

Q326. Maslov indexとは何か。

答：turning pointやcaustic通過で生じる半古典位相補正を数える指数。

Q327. Feynman-Kac formulaとは何か。

答：Euclidean量子力学の発展kernelを確率過程の期待値と結ぶ公式。

Q328. instanton in QMとは何か。

答：Euclidean時間で異なる古典真空間を結ぶ有限作用解。トンネル分裂を記述する。

Q329. double-wellで準位分裂が起こる理由とは何か。

答：左右井戸に局在した状態がトンネルで混成し、対称・反対称状態に分裂するため。

Q330. path integral measureとは何か。

答：全経路に対する形式的積分測度 Dx 。厳密化には離散化や測度論的構成が必要。

第23章 対称性と保存則

Q331. 量子力学で対称変換はどう表されるか。

答：Wignerの定理によりtransition probabilityを保つ変換はunitaryまたはantiunitaryで表される。

Q332. 連続unitary対称性の生成子とは何か。

答： $U(\epsilon) = \exp(-i\epsilon G/\hbar)$ に現れる自己共役 G 。

Q333. 並進の生成子とは何か。

答：運動量 P 。

Q334. 時間並進の生成子とは何か。

答：Hamiltonian H 。

Q335. 回転の生成子は何か。

答：角運動量 J 。

Q336. parity演算子とは何か。

答：位置を $x \rightarrow -x$ へ反転するunitary演算子。

Q337. time reversal演算子はunitaryか。

答：通常antiunitary。複素共役を含む。

Q338. antiunitaryとは何か。

答：内積を複素共役して保存し、複素係数を共役する反線形演算子。

Q339. Kramers degeneracyとは何か。

答：半整数spinで $T^2=-1$ かつtime-reversal symmetryがある系では全準位が少なくとも二重縮退する定理。

Q340. Noetherの定理は量子力学でどう現れるか。

答：連続対称性の生成子がHamiltonianと可換すると対応する量が保存される。

Q341. superselection ruleとは何か。

答：特定sector間のcoherent superpositionが物理的観測で意味を持たないという制約。

Q342. gauge transformation in QMとは何か。

答：電磁ポテンシャルの記述冗長性に伴い波動関数の局所位相も変換する。

Q343. Aharonov-Bohm効果とは何か。

答：粒子が局所的に磁場ゼロの領域を通ってもvector potentialのholonomyにより干渉位相が変化する現象。

Q344. conserved operatorの期待値はなぜ一定か。

答： $\partial A / \partial t = 0$ かつ $[A, H] = 0$ ならHeisenberg方程式で $d\langle A \rangle / dt = 0$ だから。

Q345. symmetry breaking in finite QMとは何か。

答：有限自由度では厳密な非縮退基底状態が対称なことが多く、熱力学極限の自発的対称性破れとは区別が必要。

第24章 幾何学的位相・断熱量子論

Q346. Berry phaseとは何か。

答：Hamiltonianを断熱的に閉路変化させたとき、動力学的位相とは別に状態が獲得する幾何学的位相。

Q347. Berry connectionとは何か。

答：パラメータ空間で $A_n = i \langle n(R) | \nabla_n | n(R) \rangle$ と定義される接続。

Q348. Berry curvatureとは何か。

答：Berry connectionのcurlに相当するゲージ不変な曲率。

Q349. geometric phaseとは何か。

答：状態空間やパラメータ空間の幾何に依存し、経過時間の詳細に依らない位相。

Q350. Aharonov-Anandan phaseとは何か。

答：断熱条件を必要としないcyclic quantum evolutionの幾何学的位相。

Q351. Berry phaseのgauge dependenceはどうなるか。

答：connection自体はgauge依存だが、閉路のholonomyは 2π 整数の曖昧さを除き物理的。

Q352. Chern numberとは何か。

答：閉じた2次元パラメータ空間上でBerry curvatureを積分して得る整数位相不変量。

Q353. Thouless pumpとは何か。

答：1次元系の周期的断熱変化で、1周期当たり輸送量がChern数で量子化される現象。

Q354. Born-Oppenheimer approximationとは何か。

答：重い原子核と軽い電子の時間尺度差を利用して電子状態を核配置に断熱追従させる近似。

Q355. Born-OppenheimerでBerry connectionが現れることはあるか。

答：ある。縮退やパラメータ依存電子状態を消去すると核の有効運動に幾何学的ゲージ場が現れ得る。

Q356. adiabatic quantum computationとは何か。

答：簡単な基底状態から問題Hamiltonianへゆっくり変形し、断熱定理で解状態へ到達する計算モデル。

Q357. quantum geometric tensorとは何か。

答：実部がFubini-Study metric、虚部がBerry curvatureを与える状態空間の幾何学的tensor。

Q358. Fubini-Study metricとは何か。

答：純粋量子状態のray空間上の自然な距離構造。

Q359. holonomyとは何か。

答：接続に従って閉路を平行移動したときに残る位相またはunitary変換。

Q360. non-Abelian Berry phaseとは何か。

答：縮退部分空間を断熱輸送した際に得られる行列値holonomy。Wilczek-Zee phaseとも呼ばれる。

第25章 散乱理論

Q361. 散乱理論の目的は何か。

答：遠方で自由な入射状態と出射状態を結び、断面積や位相シフトを予言すること。

Q362. differential cross sectionとは何か。

答：単位立体角当たりの散乱確率を入射fluxで規格化した量 $d\sigma/d\Omega$ 。

Q363. scattering amplitude $f(\theta, \phi)$ とは何か。

答：遠方波動関数の球面散乱波係数で、 $d\sigma/d\Omega = |f|^2$ 。

Q364. Born approximationとは何か。

答：弱いポテンシャルで散乱状態を自由波で近似し、振幅をVのFourier変換で求める一次近似。

Q365. partial wave expansionとは何か。

答：中心力散乱振幅を角運動量 l ごとの部分波に展開する方法。

Q366. phase shift δ_l とは何か。

答：ポテンシャルにより l 部分波の漸近位相が自由波からずれる量。

Q367. optical theoremとは何か。

答：全断面積を前方散乱振幅の虚部に結びつけるunitarity関係。

Q368. scattering lengthとは何か。

答：低エネルギーs-wave散乱を特徴づける長さ a 。

Q369. effective range expansionとは何か。

答：低エネルギーで $k \cot \delta_0 = -1/a + (r_e/2)k^2 + \dots$ と展開する方法。

Q370. resonanceとは何か。

答：特定エネルギーで散乱断面積が増大する準束縛状態。

Q371. Breit-Wigner形とは何か。

答：孤立共鳴近傍の断面積・振幅を共鳴エネルギーと幅 Γ で表すLorentzian型。

Q372. resonance width Γ と寿命 τ の関係は何か。

答：概ね $\tau = \hbar / \Gamma$ 。

Q373. Møller operatorとは何か。

答：自由漸近状態を相互作用するin/out状態へ写す $\Omega_{\pm}$ 。

Q374. Lippmann-Schwinger equationとは何か。

答：散乱状態を $|\psi_{\pm}\rangle = |\varphi\rangle + (E - H_0 \pm i0)^{-1} V |\psi_{\pm}\rangle$ と表す積分方程式。

Q375. T-matrixとは何か。

答：散乱遷移振幅をまとめる演算子で、S行列と密接に関係する。

第26章 多体系量子力学

Q376. many-body quantum mechanicsとは何か。

答：多数の相互作用する量子粒子を扱う理論。

Q377. Hartree approximationとは何か。

答：多体波動関数を一粒子軌道の単純積で近似するmean-field法。

Q378. Hartree-Fock法とは何か。

答：fermion多体状態を単一Slater determinantで近似し、交換効果を含める変分法。

Q379. exchange termとは何か。

答：反対称化によりHartree-Fock方程式へ現れる非局所項。

Q380. correlation energyとは何か。

答：厳密基底エネルギーとHartree-Fock極限との差。

Q381. configuration interactionとは何か。

答：複数のSlater determinantを線形結合して電子相関を系統的に改善する方法。

Q382. Hubbard modelとは何か。

答：格子上的fermion hoppingとon-site相互作用 U を持つ強相関系の基本模型。

Q383. tight-binding approximationとは何か。

答：局在軌道間のhoppingを用いて結晶中の電子を記述する近似。

Q384. Bloch theoremとは何か。

答：周期ポテンシャル中の一粒子固有状態が $e^{ik \cdot r} u_{\{nk\}}(r)$ の形を持つ定理。

Q385. band structureとは何か。

答：結晶中の電子エネルギー $E_n(k)$ の許容帯と禁制帯の構造。

Q386. Fermi surfaceとは何か。

答： $T=0$ で占有状態と非占有状態を分ける運動量空間上の面。

Q387. mean-field theoryとは何か。

答：他粒子の効果を平均場で置き換え、多体問題を有効一体問題へ簡略化する方法。

Q388. Bogoliubov transformationとは何か。

答：生成・消滅演算子を線形混合し、quadratic many-body Hamiltonianを対角化する変換。

Q389. BCS stateとは何か。

答：Cooper pairのcoherent superpositionで表される超伝導基底状態。

Q390. Cooper pairとは何か。

答：Fermi面近傍で有効引力により対形成した二fermion状態。

第27章 相対論的量子力学への入口

Q391. Klein-Gordon方程式とは何か。

答：相対論的エネルギー関係 $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ を波動方程式化したspin-0方程式。

Q392. Klein-Gordon単粒子解釈が難しい理由とは何か。

答：自然な保存密度が正定値でなく、粒子生成消滅も相対論では不可避だから。

Q393. Dirac方程式とは何か。

答：エネルギーと運動量に一次の相対論的spin-1/2波動方程式。

Q394. Dirac Hamiltonianとは何か。

答： $H = c \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + \beta mc^2$ 。

Q395. Dirac方程式がspinを自然に含む理由とは何か。

答：Lorentz対称性と一次方程式化に必要なspinor表現からspin-1/2自由度が現れるため。

Q396. negative-energy solutionの意味とは何か。

答：単粒子論だけでは問題を生むが、量子場理論では反粒子として自然に解釈される。

Q397. antiparticleとは何か。

答：粒子と同じ質量・spinを持ち、内部量子数が反対の励起。

Q398. Dirac seaとは何か。

答：歴史的な負エネルギー状態解釈。現代では量子場理論の生成消滅演算子形式が標準。

Q399. Zitterbewegungとは何か。

答：Dirac単粒子位置演算子で正負エネルギー成分干渉により現れる高速振動。

Q400. Foldy-Wouthuysen transformationとは何か。

答：Dirac Hamiltonianを正負エネルギーsectorに近似的にblock diagonal化し、非相対論極限を明瞭にする変換。

Q401. Pauli equationとは何か。

答：spin-1/2粒子の非相対論的Schrödinger方程式に磁気モーメント結合を加えた方程式。

Q402. 相対論的量子論でQFTが必要な理由は何か。

答：高エネルギーでは粒子数が保存されず生成・消滅が起こるため。

Q403. Compton wavelengthとは何か。

答： $\lambda_C = h/(mc)$ 。粒子をこれ以下へ局在させると相対論的粒子生成が重要になる尺度。

Q404. Lorentz covarianceとは何か。

答：異なる慣性系で方程式が同じ物理内容を保つこと。

Q405. spinorとは何か。

答：Lorentz群または回転群のspin表現で変換し、 2π 回転で符号が変わり得る対象。

第28章 量子基礎論・測定問題

Q406. 測定問題とは何か。

答：unitaryなSchrödinger発展から、なぜ測定で一つの結果が得られるように見えるかという問題。

Q407. Copenhagen interpretationとは何か。

答：量子状態を測定予測の道具として扱い、測定時の結果確率をBorn則で与える標準的解釈群。

Q408. Many-Worlds interpretationとは何か。

答：普遍的unitary発展を保ち、測定で異なる結果branchが分岐すると解釈する立場。

Q409. Bohmian mechanicsとは何か。

答：波動関数に加え粒子の実在配置とguidance equationを導入する決定論的量子理論。

Q410. objective collapse modelとは何か。

答：Schrödinger方程式を修正し、巨視的重ね合わせが物理的に自発崩壊するとする模型。

Q411. hidden variable theoryとは何か。

答：量子状態以外の変数を導入し測定結果を説明しようとする理論。

Q412. Bellの定理とは何か。

答：量子論の全予言を局所隠れ変数理論で再現できないことを示す定理。

Q413. Kochen-Specker定理とは何か。

答：次元3以上で、全観測量に文脈非依存の確定値を整合的に割り当てることが不可能であることを示す定理。

Q414. contextualityとは何か。

答：測定結果の統計が、その観測量と同時測定される互換な観測量の文脈から独立な古典値割当では説明できない性質。

Q415. wavefunctionは実在か。

答：解釈依存の問題。量子力学の実験予測自体は特定の存在論を一意に要求しない。

Q416. PBR theoremとは何か。

答：一定の独立性仮定の下で、量子状態を単なる同一基礎状態上の情報として扱う ψ -epistemicモデルを強く制限する定理。

Q417. consistent historiesとは何か。

答：decoherence条件を満たす歴史集合に確率を割り当てる量子論の定式化。

Q418. relational quantum mechanicsとは何か。

答：状態や物理量の値を系間関係に相対的なものとして捉える解釈。

Q419. QBismとは何か。

答：量子状態をagentの経験に関する個人的確率判断として捉えるBayesian系解釈。

Q420. decoherenceが古典性に果たす役割は何か。

答：環境が特定basisの干渉を急速に抑え、安定な古典的記録が現れる仕組みを説明する。

第29章 量子光学・原子物理の応用

Q421. spontaneous emissionとは何か。

答：励起原子が外部古典場なしに光子を放出して低い状態へ遷移する現象。完全な説明には量子化電磁場が必要。

Q422. stimulated emissionとは何か。

答：入射光に誘導され、同じmodeへ光子を放出する遷移。laserの基礎。

Q423. absorptionとは何か。

答：光子エネルギーを吸収して系が高いエネルギー状態へ遷移する過程。

Q424. Einstein A coefficientとは何か。

答：自発放出率を表す係数。

Q425. Einstein B coefficientとは何か。

答：吸収・誘導放出の放射場密度に比例する遷移率係数。

Q426. laserのpopulation inversionとは何か。

答：上準位のpopulationが下準位より実効的に多い非平衡状態。

Q427. Raman transitionとは何か。

答：中間準位をvirtualに介して二つの長寿命状態間を二光子で結ぶ遷移。

Q428. AC Stark shiftとは何か。

答：振動電場とのoff-resonant couplingによるエネルギー準位shift。

Q429. optical pumpingとは何か。

答：光吸収・放出を繰り返して原子populationを特定内部状態へ偏らせる操作。

Q430. Jaynes-Cummings modelとは何か。

答：二準位原子と単一量子化光modeのcoherent couplingを記述する基本模型。

Q431. vacuum Rabi oscillationとは何か。

答：共振器QEDで一励起が原子と光modeの間をcoherentに交換する現象。

Q432. photon antibunchingとは何か。

答：光子検出が時間的に反 bunchingし、 $g^{(2)}(0) < 1$ となる非古典光の特徴。

Q433. Hanbury Brown-Twiss相関とは何か。

答：二次相関 $g^{(2)}$ を測定し光の統計性を調べる方法。

Q434. coherent lightの $g^{(2)}(0)$ はいくつか。

答：理想coherent stateでは1。

Q435. single-photon stateの $g^{(2)}(0)$ はどうなるか。

答：理想的には0で、完全なantibunchingを示す。

第30章 高度な数学・現代的话题

Q436. rigged Hilbert spaceとは何か。

答：Hilbert空間を $\Phi \subset H \subset \Phi'$ と拡張し、位置・運動量の δ 規格化固有状態を一般化関数として扱う枠組み。

Q437. self-adjoint extensionとは何か。

答：対称演算子の定義域を拡張してself-adjoint演算子を構成すること。境界条件と密接に関係する。

Q438. deficiency indicesとは何か。

答：対称演算子がself-adjoint extensionを持つか、その自由度を判定する指標。

Q439. spectral decompositionとは何か。

答：自己共役演算子をprojection-valued measureで $A = \int \lambda dP(\lambda)$ と表す分解。

Q440. resolventとは何か。

答： $R(z) = (z - H)^{-1}$ 。スペクトル・Green関数・散乱理論を解析する基本対象。

Q441. Green functionとは何か。

答：微分演算子の逆kernel。量子力学ではresolventやpropagatorと密接に関係する。

Q442. quantum chaosとは何か。

答：古典的にchaoticな系の量子スペクトル・固有状態・時間発展に現れる統計的特徴を研究する分野。

Q443. level statisticsとは何か。

答：隣接エネルギー準位間隔などの統計。integrable系とchaotic系で典型分布が異なる。

Q444. random matrix theoryと量子chaosの関係は何か。

答：chaotic量子系の局所スペクトル統計が適切なrandom matrix ensembleで普遍的に記述されることがある。

Q445. Loschmidt echoとは何か。

答：わずかに異なるHamiltonianで前後発展した状態のoverlapから量子dynamicsの感度を測る量。

Q446. out-of-time-order correlatorとは何か。

答：演算子の非可換性の時間成長を測る相関関数で、量子情報scramblingの診断に使われる。

Q447. topological quantum mechanicsとは何か。

答：局所dynamicsより位相的・cohomological構造を強調する0+1次元理論。SUSY QMがMorse理論と結びつく例がある。

Q448. supersymmetric quantum mechanicsとは何か。

答：bosonic/fermionic sectorをsuperchargeで結ぶ量子力学。factorization法、index、Morse理論等に応用される。

Q449. Witten indexとは何か。

答： $\text{Tr}[(-1)^F e^{-\beta H}]$ 。SUSY基底状態の差を数え、連続変形に安定な指標。

Q450. quantum field theoryへの橋渡しは何か。

答：多自由度化と粒子数可変化を進めると、各modeが量子振動子となり生成消滅演算子を持つ量子場理論へつながる。

最終チェック：量子力学の全体像

状態をHilbert空間のrayで表し、観測量をself-adjoint operatorで表す。Born則が測定統計を与え、閉じた系の時間発展はHamiltonianが生成するunitary変換である。非可換性から不確定性が生じ、対称性は保存量と量子数を組織する。厳密解が難しい系には摂動論・変分法・WKB・断熱近似を用い、多体系では不可識別性とentanglementが中心的役割を持つ。開放系ではdensity matrixとquantum channelを使い、相対論的高エネルギー領域では粒子生成・消滅を扱う量子場理論へ移行する。

収録：30章・450問 / 著者：t