目　　次

(上　巻)

まえがき

第Ⅰ章　量子力学の物理的基礎

1. 実験的背景 …… 2
   1-1 古典物理学の破綻 …… 2
   1-2 主要な実験と考え方の一覧 …… 3
2. 前期量子論 …… 4
   2-1 Bohr-Sommerfeld の量子化の規則 …… 4
   2-2 実際上の難点 …… 5
   2-3 考え方の上での難点 …… 6
   2-4 量子力学の考え方 …… 7
3. 不確定性と相補性 …… 8
   3-1 不確定性原理 …… 8
   3-2 相補性原理 …… 10
   3-3 実験についての制限 …… 10
4. 測定についての吟味 …… 11
   4-1 位置決定の実験 …… 11
   4-2 運動量決定の実験 …… 13
   4-3 回折実験の分析 …… 14
   4-4 回折実験の吟味 …… 16
5. 空間および時間についての波束 …… 16
   5-1 空間についての波束 …… 17
   5-2 時間についての波束 …… 18
   5-3 理論の波動論形式 …… 19
   問　題 …… 20

第Ⅱ章　Schrödinger の波動方程式

6. 波動方程式をつくること …… 22

6-1　伝播する調和振動波 …… 23
6-2　波動方程式の必要性 …… 23
6-3　一次元の波動方程式 …… 25
6-4　三次元への拡張 …… 26
6-5　外力を含む場合 …… 26

7.　波動関数の解釈 …… 27

7-1　統計的解釈 …… 28
7-2　ψ の規格化 …… 29
7-3　確率の流れの密度 …… 30
7-4　期　待　値 …… 31
7-5　Ehrenfest の定理 …… 33

8.　エネルギーの固有関数 …… 34

8-1　波動方程式の分離 …… 35
8-2　分離定数 E の意味 …… 35
8-3　遠方における境界条件 …… 36
8-4　連 続 条 件 …… 37
8-5　無限大のポテンシャルエネルギーに対する境界条件 …… 37
8-6　一次元でのエネルギー固有値 …… 39
8-7　離散的なエネルギー準位 …… 41
8-8　連続的なエネルギー固有値 …… 43
8-9　三次元での離散的固有値と連続的固有値 …… 43

9.　一次元の井戸型ポテンシャル …… 44

9-1　完全剛体の壁 …… 45
9-2　有限な階段ポテンシャル …… 46
9-3　エネルギー準位 …… 47
9-4　パ リ テ ィ …… 49
9-5　簡単化された解き方 …… 50

問　　題 …… 51

第Ⅲ章　固有関数と固有値

10.　波動関数解釈に関する要請とエネルギー固有関数 …… 53

10-1　演算子としての力学変数 …… 53
10-2　固有関数による展開 …… 54

10-3　全エネルギーの演算子 …… 55
10-4　箱の中での規格化 …… 55
10-5　エネルギー固有関数の規格直交性 …… 56
10-6　エネルギー固有値の実数性 …… 58
10-7　エネルギー固有関数による展開 …… 59
10-8　完　備　性 …… 59
10-9　確率関数と期待値 …… 60
10-10 Schrödinger 方程式の一般解 …… 61

11. 運動量の固有関数 …… 62

11-1　固有関数の形 …… 62
11-2　箱を用いた規格化 …… 63
11-3　Dirac の δ 関数 …… 64
11-4　δ 関数の表わし方 …… 65
11-5　δ 関数を用いた規格化 …… 65
11-6　δ 関数の性質 …… 66
11-7　完　備　性 …… 67
11-8　運動量固有関数による展開 …… 68
11-9　確率関数と期待値 …… 68

12. 自由な波束の一次元運動 …… 69

12-1　不確定性の積の最小値 …… 70
12-2　最小波束の形 …… 71
12-3　運動量固有関数による展開係数 …… 72
12-4　最小波束の時間による変化 …… 73
12-5　古典論的極限 …… 75
問　　題 …… 75

第IV章　離散的な固有値：束縛状態

13. 一次元調和振動子 …… 77

13-1　解の漸近的な振舞い …… 78
13-2　エネルギー準位 …… 79
13-3　零点エネルギー …… 80
13-4　Hermite の多項式 …… 81
13-5　調和振動子の波動関数 …… 82
13-6　古典論との対応 …… 84

13-7 振動する波束 …… 86

14. 三次元の球対称なポテンシャル …… 88

14-1 波動方程式の分離 …… 89
14-2 Legendre の多項式 …… 90
14-3 球面調和関数 …… 92
14-4 パリティ …… 93
14-5 角運動量 …… 94

15. 三次元の角井戸型のポテンシャル …… 96

15-1 角運動量 0 の場合の解 …… 96
15-2 任意の l に対する内部の解 …… 97
15-3 任意の l に対する外部の解 …… 100
15-4 エネルギー準位 …… 101

16. 水素原子 …… 102

16-1 換算質量 …… 102
16-2 漸近形 …… 104
16-3 エネルギー準位 …… 105
16-4 Laguerre の多項式 …… 106
16-5 水素原子の波動関数 …… 107
16-6 縮退 …… 108
16-7 放物線座標での分離 …… 109
16-8 エネルギー準位 …… 111
16-9 波動関数 …… 112
問題 …… 113

第V章 連続固有値：衝突の理論

17. 一次元の箱型ポテンシャルの障壁 …… 115

17-1 波動関数の漸近的な振舞い …… 116
17-2 規格化 …… 117
17-3 散乱係数 …… 117
17-4 波束の散乱 …… 120

18. 三次元での衝突 …… 125

18-1 散乱の断面積 …… 126
18-2 実験室系と重心系での散乱角の関係 …… 127

18-3 実験室系と重心系での散乱断面積の関係 ……129
18-4 散乱角の γ による変化……130
18-5 波動関数の漸近形 ……131
18-6 波動関数の規格化 ……132

19. 球対称ポテンシャルによる散乱 ……133

19-1 漸　近　形 ……134
19-2 散乱の微分断面積 ……136
19-3 散乱の全断面積 ……137
19-4 位相のずれ ……138
19-5 δ_l の計算……139
19-6 δ_l と $V(r)$ の符号の関係……140
19-7 Ramsauer-Townsend 効果……142
19-8 完全剛体球による散乱 ……143
19-9 井戸型ポテンシャルによる散乱 ……145
19-10 共鳴散乱 ……146
19-11 低エネルギーの角分布 ……148

20. 複素ポテンシャルによる散乱 ……149

20-1 確率の保存 ……150
20-2 複素位相のずれ ……151
20-3 漸近的な関係 ……153
20-4 相反定理 ……155
20-5 一般化された光学定理 ……156
20-6 光学定理 ……158

21. クーロン場による散乱……159

21-1 放物線座標 ……160
21-2 合流型超幾何関数 ……161
21-3 散乱面積と規格化 ……162
21-4 球座標での解 ……163
21-5 修正クーロン場 ……165
21-6 純粋のクーロン場に対する古典論的な極限 ……167
問　　題 ……168

第VI章　量子力学の行列形式

22. 行 列 代 数 ……171
22-1 行列の加法と乗法 ……171
22-2 零行列，単位行列，および定数行列 ……172
22-3 行列の跡，行列式，および逆行列 ……172
22-4 エルミット行列とユニタリー行列 ……173
22-5 行列の変換と対角化 ……174
22-6 行列の関数 ……175
22-7 無限次数の行列 ……176
23. 変 換 理 論 ……177
23-1 ユニタリー行列 W ……178
23-2 W によるハミルトニアンの変換 ……179
23-3 U によるハミルトニアンの変換 ……181
23-4 V によるハミルトニアンの変換 ……183
23-5 演算子の表示 ……183
23-6 便利な一つの恒等式 ……184
23-7 一行および一列の行列 ……185
23-8 ヒルベルト空間 ……187
23-9 Dirac のブラおよびケット記法 ……188
23-10 射影演算子 ……191
23-11 行列要素の物理的意味 ……193
24. 運 動 方 程 式 ……193
24-1 Schrödinger 流の見方 ……194
24-2 Heisenberg 流の見方 ……196
24-3 相互作用からの見方（Dirac 流の見方） ……198
24-4 エネルギー表示 ……200
24-5 古典論のラグランジアンとハミルトンの運動方程式 ……200
24-6 ポアッソン括弧と交換関係 ……202
24-7 古典系の量子化 ……203
24-8 電磁場内での粒子の運動 ……204
24-9 交換関係を求めること ……205
24-10 荷電粒子の速度と加速度 ……206
24-11 ローレンツ力 ……206

24-12 ヴィリアルの定理 ……207

25. 調和振動子の行列理論……208

25-1 エネルギー表示 ……209
25-2 上昇および下降の演算子 ……210
25-3 a, x および p の行列 ……212
25-4 座標表示 ……213
問　題 ……214

第VII章　量子力学における対称性

26. 空間および時間についての変位(ずれ) ……217

26-1 ユニタリーな変位(ずれ)の演算子 ……217
26-2 運動方程式 ……219
26-3 対称性と縮退 ……220
26-4 ずらされた状態に対する行列要素 ……220
26-5 群の概念 ……221
26-6 時間についての変位(ずれ) ……222

27. 回転, 角運動量およびユリタリー群 ……224

27-1 固有回転群 ……225
27-2 幾何学的同形 ……226
27-3 無限小回転 ……227
27-4 ベクトル粒子のスピン ……228
27-5 生成元に対する交換関係 ……230
27-6 表示の選び方 ……231
27-7 $m, f(j)$ および λ_m の値 ……233
27-8 角運動量の行列 ……234
27-9 球関数との関連 ……235
27-10 スピン角運動量 ……236
27-11 被覆群 ……237
27-12 二次元ユニタリー群および特殊ユニタリー群 ……238
27-13 群 $U(n)$ および $SU(n)$ ……239
27-14 $U(n)$ および $SU(n)$ の生成元 ……241
27-15 群 $SU(3)$ ……242
27-16 座標および運動量を用いた表現 ……243

28. 角運動量状態の組み合わせとテンソル演算子 ……245
28-1 全角運動量の固有値 ……246
28-2 Clebsch-Gordan 係数 ……248
28-3 漸化関係式 ……248
28-4 係数をつくる手つづき ……249
28-5 特定の Clebsch-Gordan 係数の例 ……251
28-6 回転された状態についての行列要素 ……253
28-7 既約テンソル演算子 ……254
28-8 テンソル演算子の積 ……255
28-9 演算子と固有状態の組み合わせ ……257
28-10 Wigner-Eckart の定理 ……258
29. 空間反転と時間反転 ……259
29-1 空間反転 ……260
29-2 ユニタリー反転演算子 ……261
29-3 固有パリティ ……262
29-4 反転状態と演算子 ……262
29-5 時間反転 ……263
29-6 反線型演算子 ……264
29-7 反ユニタリー演算子 ……265
29-8 スピンが零の粒子に対する T ……266
29-9 スピンが零でない粒子に対する T ……267
29-10 数個の粒子を含む系 ……269
29-11 固有関数の実数性 ……270
30. 力学的対称性 ……271
30-1 古典的 Kepler 問題 ……272
30-2 水素原子 ……274
30-3 群 $O(4)$ ……275
30-4 水素のエネルギー準位 ……276
30-5 古典的等方振動子 ……278
30-6 量子的等方振動子 ……279
問 題 ……281
第VIII章 束縛状態に対する近似法
31. 定常的な摂動論 ……283

31-1 縮退のない場合 ……284
31-2 一次の摂動 ……285
31-3 二次の摂動 ……286
31-4 振動子の摂動 ……287
31-5 縮退のある場合 ……288
31-6 縮退の二次での除去 ……289
31-7 電子スピンを考慮しない Zeeman 効果……291
31-8 水素の一次 Stark 効果……292
31-9 摂動におけるエネルギー準位のずれ ……293
31-10 電気的永久双極子能率のあらわれ方 ……293

32. 変　分　法 ……295

32-1 エネルギーの期待値 ……295
32-2 励起状態への応用 ……297
32-3 ヘリウムの基底状態 ……297
32-4 電子間相互作用のエネルギー ……298
32-5 パラメーター Z の変分……299
32-6 van der Waals の相互作用 ……300
32-7 摂動論による計算 ……302
32-8 変分法による計算 ……303

33. 摂動級数の別の取り扱い ……304

33-1 水素原子の二次の Stark 効果 ……305
33-2 水素原子の分極率 ……307
33-3 Dalgarno-Lewis の方法 ……307
33-4 三次の摂動によるエネルギー ……309
33-5 水素原子と点荷電との相互作用 ……309

34. WKB 近 似 ……311

34-1 古典論への極限 ……311
34-2 近　似　解 ……312
34-3 解の漸近的な性質 ……313
34-4 転回点の近傍での解 ……314
34-5 一次の転回点 ……316
34-6 転回点での接続 ……317
34-7 漸近的な接続公式 ……318
34-8 ポテンシャルの凹みのもつエネルギー準位 ……318

34-9 量子化の規則 ……320
34-10 特別の境界条件 ……321
34-11 障壁の貫通 ……321

35. 時間を含む問題に対する方法 ……323

35-1 時間を含む摂動論 ……324
35-2 相互作用からの見方 ……325
35-3 一次の摂動 ……326
35-4 調和振動的な摂動 ……327
35-5 遷移確率 ……328
35-6 水素原子の電離 ……330
35-7 終状態の密度 ……331
35-8 電離確率 ……332
35-9 二次の摂動 ……333
35-10 断熱近似 ……335
35-11 位相の選び方 ……336
35-12 摂動論との関連 ……337
35-13 H の不連続な変化 ……338
35-14 瞬間近似 ……339
35-15 振動子の攪乱 ……340
問 題 ……341
付録：基本的な物理量の数値 ……345