目　　次

Chapter 1　量子力学のリテラシー

1.1　現代の物理学・・・・・・・・・・1
1.1.1　古典物理学と量子力学・・・1
1.1.2　ミクロな世界とマクロな世界・・・・・・・・・・・・・・2
1.2　粒子と波動の二重性・・・・・・4
1.2.1　二重性を表す式・・・・・・4
1.2.2　電子の二重スリットの実験・・・・・・・・・・・・・・5
1.3　量子力学の学び方・・・・・・・9
1.3.1　常識と非常識・・・・・・・9
1.3.2　古典物理学との比較　・・・10

Chapter 2　前期量子論

2.1　プランクのエネルギー量子仮説・・・・・・・・・・・・・・・13
2.1.1　19 世紀末の難問・・・・・13
2.1.2　プランクの放射公式　・・・17
2.1.3　エネルギー量子　・・・・・21
2.2　アインシュタインの光量子仮説・・・・・・・・・・・・・・・24
2.2.1　光電効果　・・・・・・・・・24
2.2.2　コンプトン効果　・・・・・27
2.3　水素原子の 2 つの謎　・・・・・29
2.3.1　電子の軌道の安定性　・・・29
2.3.2　線スペクトルの規則性　・・31
2.4　ボーアの量子論　・・・・・・・32
2.4.1　3 つの仮説　・・・・・・・32
2.4.2　水素原子の謎を解く　・・・33
章末問題・・・・・・・・・・・・・・36

Chapter 3　ミクロな世界を記述する式

3.1　ド・ブロイの物質波仮説　・・・38
3.1.1　アインシュタイン－ド・ブロイの関係式　・・・・・・・38
3.1.2　ド・ブロイ波の実証　・・・40
3.2　波動方程式　・・・・・・・・・43
3.2.1　普通の波　・・・・・・・・44
3.2.2　分散式から波の式をつくる・・・・・・・・・・・・45
3.3　シュレーディンガー方程式　・・46
3.3.1　シュレーディンガー方程式の導出　・・・・・・・・46
3.3.2　定常状態のシュレーディンガー方程式　・・・・・・49
3.3.3　シュレーディンガー方程式の特徴　・・・・・・・・51
章末問題・・・・・・・・・・・・・・53

Chapter 4 波 動 関 数

4.1 確率振幅 ・・・・・・・・・・・54
4.1.1 ボルンの確率解釈 ・・・・54
4.1.2 波動関数の規格化 ・・・・57
4.2 電子波 ・・・・・・・・・・・59
4.2.1 二重スリットの実験 ・・・59
4.2.2 確率振幅か確率密度か ・・61
4.3 量子力学の概要がわかる例題 ・・・・・・・・・・・・・・63
4.3.1 量子井戸の中の粒子 ・・・63
4.3.2 例題からわかる普遍的な性質 ・・・・・・・・・・・・67
章末問題・・・・・・・・・・・・・・71

Chapter 5 量子力学の前提

5.1 コペンハーゲン解釈 ・・・・・72
5.1.1 ボーアとアインシュタイン ・・・・・・・・・・・・72
5.1.2 系の時間発展（前提 1）・・73
5.2 波動関数と物理量と演算子 ・・74
5.2.1 波動関数は情報の源（前提 2） ・・・・・・・・・・・・74
5.2.2 物理量演算子（前提 3）・・76
5.3 測定値と固有値 ・・・・・・・77
5.3.1 オブザーバブルの期待値 （前提 4） ・・・・・・・78
5.3.2 測定値は固有値（前提 5）・80
5.4 状態の重ね合わせ ・・・・・・82
5.4.1 重ね合わせ状態の期待値 （前提 6） ・・・・・・・82
5.4.2 期待値 ・・・・・・・・・85
5.5 測定値は実数 ・・・・・・・・87
5.5.1 エルミート演算子 （前提 3 の補足）・・・・87
5.5.2 固有関数の規格直交完全性 ・・・・・・・・・・・・89
5.6 演算子の交換関係 ・・・・・・91
5.6.1 可換か非可換か ・・・・・91
5.6.2 可換な演算子と同時固有関数 ・・・・・・・・・・・・92
章末問題・・・・・・・・・・・・・・94

Chapter 6 量子力学と古典力学との関係

6.1 エーレンフェストの定理 ・・・95
6.1.1 ニュートンの運動方程式 ・95
6.1.2 波束の重心運動 ・・・・・97
6.2 ハイゼンベルクの不確定性原理 ・・・・・・・・・・・・・・101
6.2.1 波束のモデル・・・・・・102
6.2.2 不確定性原理・・・・・・104
6.3 波束の広がり・・・・・・・・107
6.3.1 波束の時間発展・・・・・107
6.3.2 マクロな実験と両立する理由 ・・・・・・・・・・・・109
章末問題 ・・・・・・・・・・・・・111

Chapter 7　ポテンシャル問題

7.1　確率密度と確率のフラックス・112
7.1.1　連続の方程式・・・・・・112
7.1.2　フラックスの反射と透過・114
7.2　ポテンシャル障壁の反射と透過・・・・・・・・・・・・・・117
7.2.1　壁面での反射と侵入・・・119
7.2.2　透過と反射・・・・・・・122
7.3　有限な厚みのポテンシャル障壁・・・・・・・・・・・・・・124
7.3.1　トンネル現象・・・・・・124
7.3.2　共鳴現象・・・・・・・・129
7.4　井戸型ポテンシャル・・・・・131
7.4.1　有限の深さの量子井戸・・131
7.4.2　解の構造・・・・・・・・133
章末問題　・・・・・・・・・・・・・134

Chapter 8　調 和 振 動 子

8.1　運動方程式・・・・・・・・・137
8.1.1　変数の無次元化・・・・・137
8.1.2　漸近解と厳密解・・・・・140
8.2　級数法で解を求める・・・・・142
8.2.1　無限級数の解・・・・・・142
8.2.2　エルミート多項式の解・・143
8.3　基底状態での運動・・・・・・146
8.3.1　振動子の存在確率・・・・147
8.3.2　ゼロ点振動と不確定性原理・・・・・・・・・・・・149
8.4　古典力学との比較・・・・・・150
8.4.1　励起状態の確率密度・・・150
8.4.2　対応原理・・・・・・・・151
8.5　剛体回転子・・・・・・・・・153
8.5.1　剛体回転子のシュレーディンガー方程式・・・153
8.5.2　ラプラス方程式と球面調和関数・・・・・155
章末問題　・・・・・・・・・・・・・157

Chapter 9　角運動量と固有関数

9.1　角運動量・・・・・・・・・・159
9.1.1　交換関係・・・・・・・・159
9.1.2　同時固有関数・・・・・・161
9.2　角運動量の固有値問題・・・・162
9.2.1　角運動量の 2 乗 $\hat{L}^2$ の固有関数と固有値・・・162
9.2.2　角運動量 $\hat{L}_z$ の固有関数と固有値　・・・・・・・164
9.3　角運動量の方向の量子化・・・169
9.3.1　角運動量の z 成分の量子化・・・・・・・・・・・・169
9.3.2　角運動量の x, y 成分の量子化・・・・・・・・・・・・170
9.4　角度方向のシュレーディンガー方程式・・・・・・・・・・171
9.4.1　θ 方向と ϕ 方向の式・・・171
9.4.2　ルジャンドル多項式の解・173
9.4.3　極図形と接球面図・・・・176
章末問題　・・・・・・・・・・・・・181

Chapter 10　水 素 原 子

10.1　球座標でのシュレーディンガー方程式 ・・・・・・・・・・182
10.2　動径方向のシュレーディンガー方程式 ・・・・・・・・・・184
10.2.1　水素型原子の基底状態 ・184
10.2.2　方程式の無次元化と級数法 ・・・・・・・・・・・189
10.3　厳密解はラゲールの多項式 ・191
10.3.1　基底状態の解 ・・・・・191
10.3.2　ラゲールの陪多項式 ・・193
10.4　動径方向の振る舞い ・・・・195
10.4.1　動径の波動関数 ・・・・195
10.4.2　動径分布関数 ・・・・・197
10.5　電子の可視化 ・・・・・・・198
10.5.1　電子の軌道 ・・・・・・198
10.5.2　電子の波動関数 ・・・・199
章末問題 ・・・・・・・・・・・・・201

Chapter 11　ディラックのブラ・ケット記法

11.1　ベクトルで考える ・・・・・203
11.1.1　普通のコインと量子コイン ・・・・・・・・・・・203
11.1.2　古典的状態と基底ベクトル ・・・・・・・・・・・206
11.2　ベクトル空間 ・・・・・・・207
11.2.1　ユークリッド空間 ・・・207
11.2.2　ヒルベルト空間 ・・・・210
11.3　固有ケットと正規直交完全系 ・・・・・・・・・・・・・213
11.3.1　離散スペクトル ・・・・213
11.3.2　連続スペクトル ・・・・215
11.4　状態ベクトルに対する２つの表示法 ・・・・・・・・・・218
11.4.1　x 表示と p 表示 ・・・・218
11.4.2　２つの表示の関係 ・・・220
11.5　状態ベクトルの運動方程式 ・222
11.5.1　シュレーディンガー方程式からの導出 ・・・・・222
11.5.2　ユニタリー演算子からの導出 ・・・・・・・・・224
11.5.3　エネルギー固有状態 ・・226
11.6　２つの描像 ・・・・・・・・228
11.6.1　シュレーディンガー描像とハイゼンベルク描像 ・228
11.6.2　ハイゼンベルク方程式 ・229
章末問題 ・・・・・・・・・・・・・231

Chapter 12　ス　ピ　ン

12.1　スピン角運動量 ・・・・・・233
12.1.1　シュテルン－ゲルラッハの実験 ・・・・・・・233
12.1.2　スピンのブラ・ケット記法 ・・・・・・・・・・・235
12.2　スピン状態の表し方 ・・・・239
12.2.1　スピンの方向 ・・・・・239
12.2.2　スピンの量子化軸 ・・・241
12.3　ラーモア歳差運動 ・・・・・244
12.4　２個の電子系とパウリ原理 ・246
章末問題 ・・・・・・・・・・・・・248

Chapter 13　摂　動　論

13.1　時間を含まない摂動（縮退なし）・・・・・・・・・・・・・250
13.1.1　基本的な考え方・・・・250
13.1.2　2次までの摂動の計算・252
13.2　時間を含まない摂動（縮退あり）・・・・・・・・・・・・・257
13.2.1　2重縮退の場合・・・・257
13.2.2　N 重縮退の場合・・・・259
13.3　時間を含む摂動・・・・・・261
13.3.1　基本的な考え方・・・・261
13.3.2　遷移確率とボーアの量子論・・・・・・・・・・・264
章末問題・・・・・・・・・・・・・267

Chapter 14　量子力学の検証と応用

14.1　量子もつれ状態（量子エンタングルメント）・・・・・・・269
14.1.1　粒子ペアの量子もつれ状態・・・・・・・・・・・269
14.1.2　電子スピンの相関・・・271
14.2　EPR パラドックス・・・・・272
14.2.1　実在の要素・・・・・・272
14.2.2　ベルの不等式・・・・・275
14.3　EPR 相関と量子情報科学・・277
14.3.1　ベルの不等式の破れ・・277
14.3.2　量子テレポーテーション・・・・・・・・・・・278

さらに勉強する人のために・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・282
章末問題の解答・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・284
索　引・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・308