

目次

第 0 章 序章	1
0.1 粒子の干渉と抽象化された自然観	1
0.2 本書の読み方—記号「♠」について	4
0.3 本書で用いる記法など	5
第 1 章 古典物理学の破綻	9
1.1 原子の大きさと安定性	9
1.2 電子のスピン測定	10
1.3 ベルの不等式	11
1.4 ♠ 量子論は論理的必然なのか?	13
第 2 章 基本的枠組み	15
2.1 古典論の基本的枠組み	15
2.2 量子論の基本的枠組み	16
2.3 自由度	19
2.4 閉じた系 / 開いた系	20
2.5 純粋状態 / 混合状態	20
2.5.1 純粋状態と混合状態の例	20
2.5.2 ♠ 一般の混合状態と純粋状態	22
2.5.3 ♠ 混合状態の分解の非一意性	23
2.5.4 ♠♠ 定義の一般性に関する注意	23
2.5.5 ♠♠ 古典論の混合状態	24
2.6 ♠♠ 「同じ状態・異なる状態」再考	24
第 3 章 閉じた有限自由度系の純粋状態の量子論	25
3.1 基本的な考え方	25
3.1.1 公理あるいは要請	25
3.1.2 抽象的な量による記述	26
3.2 複素ヒルベルト空間	26
3.3 量子状態	30
3.4 演算子とその固有値・固有ベクトル	32
3.5 自己共役演算子と可観測量	35

3.6	自己共役演算子の固有値	38
3.7	正規直交完全系と波動関数 – 離散固有値の場合	39
3.8	ブラとケット	43
3.9	射影演算子	46
3.10	スペクトル分解と演算子の関数	49
3.11	ボルの確率規則 – 離散固有値の場合	50
3.12	♣ ボルの確率規則についての注意	53
	3.12.1 ♣ アンサンブル	53
	3.12.2 ♣ なぜ物理量は実数か?	55
	3.12.3 ♣ 不定計量のヒルベルト空間	55
3.13	期待値	55
3.14	状態の重ね合わせと干渉効果	56
3.15	正規直交完全系と波動関数 – 連続固有値の場合	59
3.16	♣♣ 連続固有値に関する数学的注意	61
	3.16.1 ♣♣ 連続固有値の固有ベクトルはヒルベルト空間の元ではない	62
	3.16.2 ♣♣ 連続固有値の場合の射影演算子や積分の表し方	62
	3.16.3 ♣♣ 演算子の定義域の問題	62
3.17	ボルの確率規則 – 連続固有値の場合	62
3.18	ゆらぎ	66
3.19	交換関係と不確定性原理	68
3.20	♣ 不確定性原理にまつわる注意	71
	3.20.1 ♣ 交換子が定数でない場合の不確定性関係とその意味	71
	3.20.2 ♣♣ いろいろな不確定性関係	72
	3.20.3 ♣♣ 自己共役でない可観測量	73
3.21	同時固有ベクトル	76
3.22	交換する物理量の完全集合とヒルベルト空間の選択	76
3.23	閉じた量子系の時間発展 — シュレディンガー方程式	80
3.24	エネルギー固有状態	82
	3.24.1 エネルギー固有状態の時間発展	82
	3.24.2 一般の状態の時間発展	83
	3.24.3 確率の保存	85
	3.24.4 ♣ 確率の保存の別証明	86
3.25	測定直後の状態 — 射影仮説	86
3.26	♣ 射影仮説について	88
	3.26.1 ♣ 状態の用意	88
	3.26.2 ♣ 理想測定とは何か?	88
	3.26.3 ♣ 非ユニタリー発展	89
	3.26.4 ♣ 連続スペクトルの場合	89

3.26.5	♣♣ ボルンの確率規則に射影仮説を含める立場	91
第 4 章	有限自由度系の正準量子化	93
4.1	♣ 古典解析力学	93
4.1.1	♣ ラグランジュ形式	93
4.1.2	♣ ハミルトン形式	94
4.2	正準量子化	96
4.2.1	1 自由度系の正準量子化	96
4.2.2	♣ 多自由度系の正準量子化	98
4.3	正準交換関係のシュレディンガー表現	99
4.3.1	1 自由度系の場合	99
4.3.2	1 自由度系のシュレディンガー表現による計算法	102
4.3.3	♣♣ 数学的注意	103
4.3.4	♣ 多自由度系の場合	104
4.3.5	♣ 多自由度系のシュレディンガー表現による計算法	106
4.3.6	♣ 同種の粒子を複数個含む系の場合	107
4.4	♣ フォン・ノイマンの一意性定理	107
4.5	♣♣ 正準量子化の曖昧さ	108
4.6	行列表示	111
4.6.1	行列表示の基本	111
4.6.2	さまざまな行列表示	113
4.7	♣ 無限次元ヒルベルト空間の注意	114
4.7.1	♣ 対角和	114
4.7.2	♣♣ 強収束と弱収束	116
第 5 章	1 次元空間を運動する粒子の量子論	119
5.1	1 次元空間を運動する粒子のシュレディンガー方程式	119
5.2	シュレディンガーの波動関数に対する種々の条件	121
5.3	1 次元自由粒子	123
5.4	ド・プロイの関係式	125
5.5	連続固有値に属する固有関数のラベル付けの注意	127
5.6	波動関数の「次元」について	128
5.7	1 次元井戸型ポテンシャル—無限に高い障壁	128
5.7.1	解き方	129
5.7.2	解	130
5.7.3	エネルギーの量子化	132
5.8	物理量の値の「量子化」と量子論の名の由来	133

5.9	重ね合わせの例	134
5.10	不確定性関係による基底準位の見積もり	136
5.11	水素原子	137
5.12	1次元井戸型ポテンシャル—有限の高さの障壁	138
5.12.1	$0 \leq E < V_0$ の場合	140
5.12.2	$E \geq V_0$ の場合	141
5.13	波束	141
5.14	確率の流れ	144
5.15	トンネル効果	146
5.16	調和振動子	149
第 6 章	時間発展について	155
6.1	外場のかかった系の時間発展	155
6.2	時間発展演算子	156
6.2.1	一般論	156
6.2.2	ハミルトニアンが時間に依存しない場合	157
6.2.3	♣ ハミルトニアンが時間に依存する場合	158
6.3	ハイゼンベルク描像	159
6.3.1	シュレディンガー描像からハイゼンベルク描像への移行	160
6.3.2	ハイゼンベルクの運動方程式—シュレディンガー描像では時間に依存しない物理量の場合	161
6.3.3	保存則	162
6.3.4	♣ ハイゼンベルクの運動方程式—物理量がシュレディンガー描像でも時間に依存する場合	163
6.3.5	♣ $t_0 \neq 0$ でシュレディンガー描像と一致するハイゼンベルク描像	163
6.4	♣ いわゆる「時間とエネルギーの不確定性関係」	164
第 7 章	♣ 場の量子化—場の量子論入門	167
7.1	♣ 場の古典解析力学	167
7.1.1	♣ ラグランジュ形式	168
7.1.2	♣ ハミルトン形式	169
7.2	♣ 場の正準量子化	171
7.3	♣♣ 有限自由度系との違い	174
7.4	♣♣ 始めに何がありき?	175
第 8 章	ベルの不等式	179
8.1	遠く離れた 2 地点での実験	179
8.2	離れた地点での実験データの間の相関	181

8.3	局所性と因果律	183
8.4	局所実在論による記述	184
8.5	ベルの不等式	186
8.6	♣ 交換する物理量の同時測定の量子論	188
8.6.1	♣ 離散スペクトルの場合	188
8.6.2	♣ 連続スペクトルの場合	189
8.6.3	♣♣ 異時刻相関についての注意	191
8.7	♣ 量子論によるベルの不等式の破れ	192
8.8	ベルの不等式の意義	196
第 9 章	♣ 基本変数による記述のまとめ	199
9.1	♣ 基本変数	199
9.2	♣ 基本変数を用いた古典論の基本的仮定と枠組み	201
9.3	♣ 基本変数を用いた量子論の基本的仮定と枠組み	203
	さらに学びたい人のための指針	207
付録 A	複素数と複素ベクトル空間	209
A.1	複素数	209
A.2	複素ベクトル空間	211
付録 B	行列	213
付録 C	問題解答	217
	索引	227