

# 目 次

## I. 基 礎

<b>1 力学</b> ..... [吉岡大二郎]... 3	
[歴史と意義]..... 3	
<b>1.1 運動の記述</b> ..... 3	
1.1.1 位置ベクトル..... 3	
1.1.2 速度ベクトル..... 5	
1.1.3 加速度ベクトル..... 6	
1.1.4 ベクトルの積..... 7	
1.1.5 座標の回転とベクトルの変換..... 8	
1.1.6 極座標..... 9	
<b>1.2 運動法則</b> ..... 11	
1.2.1 ニュートンの3法則..... 11	
1.2.2 基本的な力..... 11	
1.2.3 運動方程式の積分..... 15	
<b>1.3 エネルギー</b> ..... 16	
1.3.1 仕事..... 16	
1.3.2 力の場..... 17	
1.3.3 保存力..... 17	
1.3.4 力学的エネルギー..... 19	
<b>1.4 いろいろな運動</b> ..... 20	
1.4.1 放物運動..... 20	
1.4.2 単振動..... 21	
1.4.3 振り子..... 22	
1.4.4 減衰振動..... 23	
1.4.5 一般の1次元運動..... 24	
1.4.6 惑星の運動..... 25	
<b>1.5 運動座標系</b> ..... 27	
1.5.1 ガリレイ変換..... 27	
1.5.2 加速座標系..... 28	
1.5.3 回転座標系..... 28	
<b>1.6 質点系</b> ..... 31	
1.6.1 2質点系..... 31	
1.6.2 一般の質点系..... 32	
<b>1.7 剛体</b> ..... 34	
1.7.1 剛体と釣合い..... 34	
1.7.2 固定軸のある剛体の運動..... 35	
1.7.3 剛体の平面運動..... 37	
1.7.4 一般の剛体の運動..... 38	
1.7.5 外力がない場合の運動..... 40	
1.7.6 オイラー方程式..... 40	
<b>1.8 解析力学</b> ..... 45	
1.8.1 ダランベールの原理..... 45	
1.8.2 最小作用の原理..... 46	
1.8.3 ラグランジュの運動方程式..... 47	
1.8.4 保存則..... 49	
1.8.5 ハミルトンの正準運動方程式..... 50	
1.8.6 ポアソン括弧..... 50	
1.8.7 正準変換..... 51	
1.8.8 ポアソン括弧の不変性..... 52	
<b>2 電磁気学</b> ..... [伊東敏雄]... 53	
[歴史と意義]..... 53	
<b>2.1 電荷と電場</b> ..... 54	
2.1.1 電荷..... 54	
2.1.2 クーロンの法則..... 55	
2.1.3 電場..... 56	
2.1.4 平面角と立体角..... 57	
2.1.5 ガウスの法則..... 58	
2.1.6 ガウスの法則の応用..... 59	
2.1.7 電位..... 60	
2.1.8 電気双極子..... 62	
2.1.9 静電場の基本法則..... 64	
<b>2.2 導体</b> ..... 66	
2.2.1 導体の静電的特徴..... 66	
2.2.2 電気容量..... 66	
2.2.3 静電エネルギー..... 68	
2.2.4 導体に作用する力..... 70	

2.2.5 ポアソンの方程式..... 70	2.6 磁性体..... 94
2.2.6 鏡像法..... 71	2.6.1 磁化..... 95
<b>2.3 定常電流</b> ..... 73	2.6.2 磁化電流..... 95
2.3.1 電流..... 73	2.6.3 磁性体を含む静磁場の基本法則.. 96
2.3.2 オームの法則..... 74	2.6.4 物質の磁気的性質..... 97
2.3.3 ジュール熱..... 75	2.6.5 物質の磁性の微視的解釈..... 98
2.3.4 電気抵抗の微視的解釈..... 75	2.6.6 磁性体の境界条件..... 98
2.3.5 定常電流の場合..... 76	2.6.7 磁性体を含む系..... 99
2.3.6 起電力..... 76	2.6.8 磁気回路..... 100
2.3.7 キルヒホッフの法則..... 77	2.6.9 超伝導体の完全反磁性..... 101
<b>2.4 静磁場</b> ..... 78	<b>2.7 電磁誘導</b> ..... 101
2.4.1 磁気現象..... 78	2.7.1 電磁誘導の現象..... 101
2.4.2 電流と磁場..... 79	2.7.2 静磁場中を運動する回路..... 102
2.4.3 ローレンツ力..... 80	2.7.3 ファラデーの法則..... 103
2.4.4 ビオ-サバールの法則..... 81	2.7.4 自己誘導と相互誘導..... 104
2.4.5 静磁場の基本法則の積分表現..... 82	2.7.5 磁気エネルギー..... 105
2.4.6 アンペールの法則の応用..... 83	2.7.6 過渡現象..... 106
2.4.7 静磁場の基本法則の微分表現..... 85	2.7.7 交流回路..... 107
2.4.8 磁場のポテンシャル..... 85	<b>2.8 電磁波</b> ..... 110
2.4.9 磁気双極子..... 86	2.8.1 変位電流..... 110
2.4.10 静電場と静磁場の対応..... 88	2.8.2 マクスウェルの方程式..... 111
<b>2.5 誘電体</b> ..... 88	2.8.3 電磁波..... 113
2.5.1 誘電分極..... 88	2.8.4 電磁波の反射と透過..... 115
2.5.2 電気分極..... 88	2.8.5 導体による電磁波の反射..... 118
2.5.3 分極電荷..... 89	2.8.6 電磁ポテンシャル..... 119
2.5.4 電束密度..... 90	2.8.7 双極子放射..... 120
2.5.5 誘電体を含む静電場の法則..... 90	<b>2.9 付録</b> ..... 123
2.5.6 誘電体を含む系..... 91	2.9.1 電磁気学特有な単位..... 123
2.5.7 誘電体の境界条件..... 92	2.9.2 電磁気学で使うベクトル公式... 123
2.5.8 誘電体を含む電場のエネルギー.. 94	2.9.3 さらに勉強するために..... 124

### 3 量子力学 ..... [日笠健一]... 125

[歴史と意義] ..... 125

<b>3.1 量子力学の理論構造</b> ..... 126
3.1.1 量子力学における物理的状態... 126
3.1.2 状態空間の構造..... 126
3.1.3 運動量..... 127
3.1.4 演算子..... 128
3.1.5 交換関係式..... 128
3.1.6 時間発展..... 129
3.1.7 エネルギー固有状態..... 129
3.1.8 同時対角化..... 129

3.1.9 古典力学との対応..... 130
3.1.10 3次元空間内の粒子..... 130
3.1.11 電磁場中の荷電粒子..... 131
3.1.12 ゲージ変換..... 131
3.1.13 多自由度の系..... 131
3.1.14 2体問題..... 131
3.1.15 同種粒子系と統計性..... 132
3.1.16 パウリの排他律..... 132
3.1.17 ハイゼンベルク描像..... 133

<b>3.2 1次元固有値問題</b> ..... 133
-------------------------------

3.2.1	箱の中の自由粒子	133	3.6.4	断熱変化	151
3.2.2	井戸型ポテンシャル	134	3.6.5	周期的摂動	151
3.2.3	調和振動子	134	3.6.6	電磁波と光子	152
3.2.4	昇降演算子による解法	135	3.6.7	電磁波の吸収・放出	153
<b>3.3</b>	<b>角運動量</b>	135	3.6.8	選択則	154
3.3.1	軌道角運動量	135	3.6.9	不安定状態の崩壊	154
3.3.2	角運動量の代数と状態	136	<b>3.7</b>	<b>トンネル効果</b>	155
3.3.3	スピン	138	3.7.1	1次元散乱状態:矩形ポテンシャル	156
3.3.4	スピンと統計	138	3.7.2	ポテンシャル障壁の通過	156
3.3.5	スピン 1/2 の状態	138	3.7.3	WKB 近似	157
3.3.6	定常磁場中の電子スピンの運動	139	3.7.4	WKB 近似に対する接続公式	157
3.3.7	角運動量の合成	139	3.7.5	準古典的量子化条件	158
3.3.8	2つのスピン 1/2 の合成	140	3.7.6	WKB 近似とトンネル効果	158
3.3.9	軌道角運動量とスピン 1/2 の 合成	140	<b>3.8</b>	<b>散乱</b>	158
3.3.10	一般の2つの角運動量の合成	141	3.8.1	散乱断面積	159
3.3.11	複合粒子のスピンと統計	141	3.8.2	散乱振幅と断面積	159
<b>3.4</b>	<b>3次元固有値問題</b>	141	3.8.3	部分波	160
3.4.1	中心力場の中の粒子	141	3.8.4	散乱解に対する積分方程式と グリーン関数	160
3.4.2	自由粒子	142	3.8.5	摂動展開とボルン近似	161
3.4.3	水素原子	143	3.8.6	時間に依存する摂動論との関係	162
3.4.4	微細構造定数	144	3.8.7	時間発展演算子	162
<b>3.5</b>	<b>対称性と保存則</b>	144	3.8.8	遅延グリーン関数	163
3.5.1	状態空間とユニタリー変換	144	3.8.9	自由粒子に対するグリーン関数	163
3.5.2	対称性	145	3.8.10	グリーン関数の摂動展開	164
3.5.3	空間並進	145	3.8.11	S 行列	164
3.5.4	ハミルトニアンと空間並進	146	3.8.12	相互作用描像と S 行列	164
3.5.5	周期ポテンシャル中の粒子	146	<b>3.9</b>	<b>経路積分</b>	165
3.5.6	空間並進全体の数学的構造	147	3.9.1	経路積分表示の導出	165
3.5.7	空間回転	147	3.9.2	古典力学と量子力学の対応関係	166
3.5.8	角運動量の固有状態と回転	148	<b>3.10</b>	<b>量子力学の相対論的拡張</b>	166
<b>3.6</b>	<b>摂動論</b>	149	3.10.1	ディラック方程式	167
3.6.1	定常状態の摂動論	149	3.10.2	電磁場との相互作用	168
3.6.2	定常状態の摂動論 (縮退のある 場合)	150	3.10.3	相対論的不変性	169
3.6.3	時間依存性のある場合の摂動論	150	3.10.4	負エネルギー解の意味	170
			3.10.5	ニュートリノ振動	170
<b>4</b>	<b>熱・統計力学</b>	[岡部 豊] 173			
[歴史と意義]		173	4.1.3	熱力学第2法則	176
<b>4.1</b>	<b>熱力学</b>	174	4.1.4	熱力学関数	178
4.1.1	温度	174	4.1.5	熱力学第3法則	180
4.1.2	熱力学第1法則	175	4.1.6	理想気体	180
			4.1.7	ファンデルワールス気体	182

<b>4.2</b>	平衡系の統計力学の原理	183	4.3.5	理想フェルミ気体	194
4.2.1	ボルツマンの原理	183	4.3.6	理想ボース気体	196
4.2.2	アンサンブル理論	186	<b>4.4</b>	非平衡系	199
4.2.3	統計集団とゆらぎ	190	4.4.1	ブラウン運動	199
<b>4.3</b>	統計力学の手法	191	4.4.2	線形応答	200
4.3.1	量子統計	191	4.4.3	雑音	202
4.3.2	フェルミ統計	193	4.4.4	ボルツマン方程式	203
4.3.3	ボース統計	193	4.4.5	フォッカー-プランク方程式	203
4.3.4	古典統計	193	4.4.6	その他の理論について	204
<b>5</b>	連続体力学	[佐野 理] 205			
[歴史と意義]		205	<b>5.4</b>	いろいろな流れ	219
<b>5.1</b>	弾性体の運動	207	5.4.1	ポアズイユ流	219
5.1.1	弾性体の変形	207	5.4.2	低レイノルズ数の流れ	220
5.1.2	応力テンソル	210	5.4.3	境界層近似	220
5.1.3	弾性定数	211	5.4.4	物体にはたらく抵抗	221
5.1.4	運動方程式	212	5.4.5	乱流	222
<b>5.2</b>	弾性波	213	5.4.6	オイラー方程式とベルヌーイ の定理	223
5.2.1	平面波	213	5.4.7	渦定理	224
5.2.2	3次元の弾性波	213	5.4.8	渦なし運動とポテンシャル問題	224
5.2.3	自由境界における反射	213	5.4.9	2次元の渦なし流	226
<b>5.3</b>	流体の運動	214	5.4.10	渦度と循環	229
5.3.1	圧力と粘性率	214	5.4.11	湧き出し分布・渦度分布によ る流れ	230
5.3.2	応力とひずみ速度	215	5.4.12	水面波	231
5.3.3	基礎方程式	216			
5.3.4	レイノルズの相似則	218			
<b>6</b>	相対性理論	[小玉英雄] 235			
[歴史と意義]		235	6.2.3	計量テンソルによる添え字の 上げ下げ	242
<b>6.1</b>	特殊相対性理論における時空概念	236	6.2.4	レヴィ-チヴィタ擬テンソル	243
6.1.1	光速不変性	236	<b>6.3</b>	特殊相対性理論における物理法則	243
6.1.2	ローレンツ変換	237	6.3.1	粒子の運動方程式	243
6.1.3	速度の変換則	237	6.3.2	ボルツマン方程式	244
6.1.4	ローレンツ収縮	238	6.3.3	流体の方程式	245
6.1.5	同時性の相対化	238	6.3.4	電気力学	246
6.1.6	運動する時計の遅れ	239	6.3.5	一様静電磁場中の荷電粒子の 運動	247
6.1.7	ミンコフスキー時空	240	6.3.6	スピンの運動	247
<b>6.2</b>	ミンコフスキー時空のテンソル	240	6.3.7	電磁波	248
6.2.1	テンソルとテンソル場	241	6.3.8	スカラー場	249
6.2.2	テンソル代数	242			

<b>6.4</b>	<b>ローレンツ群とスピノール</b> .....	249	6.8.2	ニュートン極限.....	266
6.4.1	ローレンツ群の有限次元線形表現	249	6.8.3	変分原理による定式化	266
6.4.2	スピノール	250	6.8.4	初期値問題	267
6.4.3	ディラックスピノール	251	<b>6.9</b>	<b>重 力 波</b> .....	267
6.4.4	ディラック方程式	252	6.9.1	摂動方程式	267
<b>6.5</b>	<b>曲がった時空の幾何学</b> .....	252	6.9.2	重力場のエネルギー	268
6.5.1	多 様 体	252	<b>6.10</b>	<b>ブラックホール</b> .....	269
6.5.2	ベクトルと1形式	252	6.10.1	定常時空	269
6.5.3	テンソル	254	6.10.2	球対称時空	269
6.5.4	写像と変換	254	6.10.3	球対称ブラックホール	270
6.5.5	リー微分	255	6.10.4	エルンスト形式	271
6.5.6	微分形式	256	6.10.5	ワイルクラス	271
6.5.7	共変微分	256	6.10.6	定常軸対称ブラックホール	272
6.5.8	リーマン多様体	258	6.10.7	剛性定理と一意性定理	272
6.5.9	定曲率空間	259	6.10.8	ブラックホール熱力学	273
6.5.10	等長変換とキリングベクトル	260	<b>6.11</b>	<b>相対論的宇宙モデル</b> .....	273
6.5.11	向き付け可能性	260	6.11.1	ロバートソン-ウォーカー宇宙	273
6.5.12	ストークスの定理	261	6.11.2	宇宙赤方偏移	274
<b>6.6</b>	<b>一般相対性理論</b> .....	262	6.11.3	宇宙膨張の方程式	274
6.6.1	基本仮定	262	6.11.4	初期特異点と宇宙の地平線	274
6.6.2	特殊相対性理論との対応規則	263	6.11.5	フリードマンモデル	275
<b>6.7</b>	<b>曲がった時空における物理法則</b> ...	263	6.11.6	インフレーション宇宙モデル	275
6.7.1	運動方程式	263	6.11.7	ドジッター宇宙と反ドジッター宇宙	276
6.7.2	ボルツマン方程式	264	<b>6.12</b>	<b>一般相対性理論の実験的検証</b> .....	276
6.7.3	流体の方程式	264	6.12.1	基本仮定の検証	276
6.7.4	エネルギー運動量の局所保存則	264	6.12.2	水星の近日点移動	276
6.7.5	電気力学	265	6.12.3	重力による光の屈曲	277
6.7.6	スカラー場とスピノール場	265	6.12.4	レーダーエコーの遅れ	278
<b>6.8</b>	<b>重力場の方程式</b> .....	266	6.12.5	連星系からの重力波	278
6.8.1	アインシュタイン方程式	266			

## II. 発 展

<b>7 場の理論</b> .....	[佐々木 隆]... 283
[歴史と意義].....	283
<b>7.1 場の古典論</b> .....	285
7.1.1 ラグランジュ密度	285
7.1.2 ハミルトニアン密度	286
7.1.3 不変性とネーターの定理	286
<b>7.2 自由場の量子化・スピンと統計</b> ...	287
7.2.1 スカラー場	287
7.2.2 電 磁 場	289
7.2.3 ディラック場	292
7.2.4 ワイル場	296
<b>7.3 ゲージ理論とゲージ場</b> .....	296
7.3.1 可換ゲージ場：光子の場	297

7.3.2	非可換ゲージ理論： $SU(3)$ グ ルーオンの場	297	7.7.1	空間反転 (P)	312
7.4	相互作用と摂動論	300	7.7.2	荷電共役 (C)	312
7.4.1	相互作用表示	301	7.7.3	時間反転 (T)	313
7.4.2	ダイソン公式	301	7.7.4	CPT 定理	313
7.4.3	QED のファインマン則	302	7.8	くりこみ	313
7.5	経路積分	305	7.8.1	ウォード-高橋恒等式	316
7.5.1	ボソン	305	7.8.2	くりこみ群	318
7.5.2	フェルミオン	307	7.9	対称性の破れと南部-ゴールドス トン定理	320
7.6	非可換ゲージ場の量子化とファ インマン則	308	7.9.1	ヒグス機構	322
7.6.1	ファディエフ-ポポフゴースト	309	7.9.2	カイラル異常	323
7.6.2	BRS 不変性	310	7.10	因果律と解析性	325
7.7	C, P, T 変換と CPT 定理	311	7.11	有限温度の場の理論	327
8	素粒子	[太田信義] 331			
	[歴史と意義]	331	8.4.4	ニュートリノ振動	354
8.1	素粒子の発見 (実験を中心に): サイクロトロンなどの原理と役割	332	8.4.5	MSW 振動 — 太陽ニュート リノ問題	354
8.2	素粒子の対称性と分類	333	8.4.6	世代数	355
8.2.1	バリオン数	334	8.5	ハドロンの物理	356
8.2.2	アイソスピン	334	8.5.1	共鳴の分類	356
8.2.3	ストレンジネス	334	8.5.2	$SU(2)$	356
8.2.4	クォーク	334	8.5.3	$SU(3)$	357
8.2.5	レプトン	335	8.5.4	$SU(6)$	358
8.2.6	パリティ (P)	335	8.5.5	レッジ軌跡	359
8.2.7	C, CP	335	8.6	大統一理論	360
8.2.8	CPT, スピンと統計	336	8.6.1	最小 $SU(5)$ 模型	360
8.2.9	ゲージ場	336	8.6.2	電荷の量子化とワインバーグ角 の導出	360
8.2.10	パイ中間子	337	8.6.3	大統一のスケール	361
8.2.11	ヒグス場	338	8.6.4	陽子崩壊	361
8.2.12	ウィークボソン	338	8.6.5	磁気単極子 (モノポール)	362
8.3	ゲージ理論と標準模型	339	8.6.6	宇宙のバリオン数	363
8.3.1	QED	339	8.7	超対称性理論	363
8.3.2	電弱理論	341	8.7.1	ゲージ階層性の問題	363
8.3.3	QCD	347	8.7.2	テクニカラーの困難	364
8.4	レプトンの物理	352	8.7.3	超対称性理論の特徴	364
8.4.1	レプトンの質量	352	8.7.4	大統一のスケールと結合定数 の一致	364
8.4.2	大気ニュートリノ問題とニュー トリノ質量	353			
8.4.3	ニュートリノ質量とシーソー機構	353			

8.7.5 最小超対称標準模型 (minimal supersymmetric standard model (MSSM))	365	8.8.1 重力の量子論の発散	368
8.7.6 超対称性の破れ	365	8.8.2 超重力理論	368
8.7.7 ヒグスの質量	366	8.8.3 超弦理論の臨界次元	369
8.7.8 ソフトな破れと電弱相互作用の破れ	367	8.8.4 コンパクト化	370
8.7.9 超粒子	367	8.8.5 対称性の破れとヒグス場	371
8.8 超弦理論	367	8.8.6 D ブレインとヒグス場	372
		8.8.7 ホーキング放射	373
		8.8.8 M 理論	373
<b>9 原子核</b>	[松井哲男] 375		
[歴史と意義]	375	<b>9.4 対相関と原子核の超流動状態</b>	389
<b>9.1 核力</b>	379	9.4.1 対相関力と準粒子描像	389
9.1.1 アイソスピン対称性, 交換力	379	9.4.2 超流動状態と集団運動	391
9.1.2 核力の中間子論	380	<b>9.5 原子核の崩壊</b>	391
9.1.3 核子の内部構造と近距離核力, ハイペロン相互作用	381	9.5.1 $\alpha$ 崩壊	392
9.1.4 媒質効果と有効核力	382	9.5.2 $\beta$ 崩壊	392
<b>9.2 原子核の2つの描像</b>	382	9.5.3 $\gamma$ 線の放出	394
9.2.1 液滴模型: 質量公式と複合核反応	382	<b>9.6 極限状態の核物理</b>	396
9.2.2 殻模型: 魔法数と核子配位	383	9.6.1 低エネルギー原子核衝突と高励起・高スピン核, 超重核	396
<b>9.3 原子核の変形と集団運動</b>	385	9.6.2 中高エネルギー原子核衝突と高密度核物質, 不安定核	396
9.3.1 変形核と回転	386	9.6.3 超相対論的原子核衝突とクォーク-グルーオンプラズマ	397
9.3.2 表面変形と集団運動	387		
9.3.3 巨大共鳴	388		
9.3.4 原子核の分子的励起状態	389		
<b>10 原子・分子</b>	[山本 智] 401		
[歴史と意義]	401		
<b>10.1 原子の電子構造</b>	402	10.2.3 水素分子: 分子軌道法の考え方	410
10.1.1 水素原子	402	10.2.4 等核2原子分子の分子軌道	411
10.1.2 アルカリ原子	403	10.2.5 エネルギーの計算	413
10.1.3 ヘリウム原子	404	10.2.6 分子スペクトル	413
10.1.4 組立ての原理	404	<b>10.3 分子間相互作用</b>	414
10.1.5 角運動量の合成	405	10.3.1 中性分子同士にはたらく力	414
10.1.6 スピン軌道相互作用	406	10.3.2 分子間力の現れ	416
10.1.7 エネルギーの計算の一般化	407	10.3.3 ファンデルワールス分子	416
10.1.8 原子スペクトル	408	10.3.4 水素結合	417
<b>10.2 分子の電子状態と化学結合</b>	408	<b>10.4 分子衝突と化学反応</b>	417
10.2.1 電子と核の運動の分離	408	10.4.1 分子衝突と化学反応	417
10.2.2 水素分子: ハイトラナー-ロンドンの理論	409	10.4.2 イオン・分子反応	418
		10.4.3 化学平衡	419

<b>11 固体</b> .....	421
[歴史と意義] .....	[押山 淳]... 421
<b>11.1 結晶構造</b> .....	[押山 淳]... 421
<b>11.2 構造の決定</b> .....	[押山 淳]... 422
<b>11.3 格子の運動</b> .....	[押山 淳]... 424
11.3.1 断熱近似 .....	424
11.3.2 格子力学とフォノン .....	425
<b>11.4 ブロッホの定理と状態の数</b> .....	[押山 淳]... 427
11.4.1 ブロッホの定理 .....	427
11.4.2 ブリルアンゾーン中の状態の数	427
<b>11.5 電子のエネルギー帯</b> [押山 淳]... 428	
11.5.1 電子-電子相互作用と密度汎関数法 .....	428
11.5.2 エネルギー帯 .....	429
11.5.3 エネルギー帯の簡単な描像と固体の性質 .....	431
11.5.4 エネルギー帯と原子構造の計算手法 .....	432
<b>11.6 光学的応答</b> .....	[押山 淳]... 434
11.6.1 応答係数の量子論 .....	434
11.6.2 エネルギー帯間光学遷移 .....	435
<b>11.7 金属</b> .....	[押山 淳]... 436
11.7.1 金属における輸送係数 .....	436
11.7.2 フェルミ面 .....	438
<b>11.8 半導体</b> .....	[押山 淳]... 439
11.8.1 バンドとバンド .....	439
11.8.2 真性半導体 .....	440
11.8.3 光学的性質 .....	440
11.8.4 半導体へのドーピング .....	441
11.8.5 ドープされた半導体中のキャリア密度 .....	442
11.8.6 pn 接合 .....	443
11.8.7 半導体量子井戸と超格子 .....	444
<b>11.9 誘電体</b> .....	[押山 淳]... 445
11.9.1 調和振動子の誘電応答 .....	446
11.9.2 縦および横分極波 .....	446
11.9.3 局在電子と格子緩和 .....	447
11.9.4 強誘電体 .....	448
<b>11.10 磁性体</b> .....	[押山 淳]... 448
11.10.1 原子の磁気モーメントと磁性 .....	448
11.10.2 交換相互作用 .....	450
11.10.3 局在スピンの秩序状態 .....	451
11.10.4 エネルギー帯中の電子の磁気的応答 .....	451
11.10.5 遍歴電子による磁性 .....	452
11.10.6 ストナー励起とスピン波励起 .....	454
<b>11.11 表面</b> .....	[長谷川修司]... 455
11.11.1 表面に固有の基本概念 .....	455
11.11.2 表面に固有の現象 .....	457
11.11.3 表面の応用 .....	460
<b>11.12 アモルファス物質</b> [押山 淳]... 460	
11.12.1 構造的特徴 .....	461
11.12.2 電子状態の特徴 .....	462
<b>11.13 準結晶</b> .....	[石井 靖]... 462
11.13.1 準結晶の発見 .....	462
11.13.2 準結晶を形成する物質群 .....	463
11.13.3 準結晶の構造 .....	464
11.13.4 フェイゾン .....	465
11.13.5 安定化のメカニズムと電子構造 .....	466
11.13.6 電子物性 .....	467
<b>12 凝縮系</b> .....	[長岡洋介]... 469
[歴史と意義] .....	469
<b>12.1 金属電子系</b> .....	470
12.1.1 理想フェルミ気体 .....	470
12.1.2 電子気体とクーロン相互作用 .....	472
12.1.3 クーロン相互作用の遮蔽 .....	473
12.1.4 伝導電子系のプラズマ振動 .....	474
12.1.5 フェルミ液体 .....	475
<b>12.2 超流動</b> .....	477
12.2.1 液体ヘリウムの超流動 .....	477
12.2.2 理想ボース気体 .....	478
12.2.3 ボース-アインシュタイン凝縮と超流動 .....	480



12.2.4	ボース-アインシュタイン凝縮と対称性の破れ	481	12.5	電子相関	504
12.2.5	超流動ヘリウムの素励起	482	12.5.1	ハバード模型	504
<b>12.3</b>	<b>超伝導</b>	486	12.5.2	低密度における電子相関 (T 行列近似)	505
12.3.1	超伝導の現象	486	12.5.3	強い電子相関と金属絶縁体転移	507
12.3.2	超伝導の現象論	488	12.5.4	1次元ハバード模型	508
12.3.3	電子対の形成	491	<b>12.6</b>	<b>アンダーソン局在</b>	510
12.3.4	BCS 理論	493	12.6.1	不規則ポテンシャルと局在	510
12.3.5	電子間引力の機構	495	12.6.2	局在のスケーリング理論	511
<b>12.4</b>	<b>近藤効果</b>	497	12.6.3	弱局在の摂動理論	513
12.4.1	抵抗極小の理論	497	<b>12.7</b>	<b>量子ホール効果</b>	516
12.4.2	局在スピンのよる 1 重項束縛状態	500	12.7.1	ホール効果	516
12.4.3	アンダーソン模型	501	12.7.2	磁場中の 2 次元電子	517
12.4.4	アンダーソン模型からの摂動理論	503	12.7.3	整数量子ホール効果	519
<b>13</b>	<b>相転移</b>	525	12.7.4	分数量子ホール効果	520
<b>13.1</b>	<b>相転移の現象とその理論的取扱い</b>	525	13.2.1	相転移のメカニズム	534
	..... [高橋 實] ...	525	13.2.2	熱力学的極限と自発的対称性の破れ	535
13.1.1	相転移現象	525	13.2.3	臨界点近傍におけるゆらぎと相関関数の漸近的法則	536
13.1.2	平均場近似	526	13.2.4	量子相転移	536
13.1.3	スケーリング	526	13.2.5	平均場理論の一般化とコヒーレント異常法	537
13.1.4	くりこみ群の理論	527	13.2.6	非平衡と相転移	538
13.1.5	イジング模型の解	528	<b>13.3</b>	<b>共形場理論</b>	539
13.1.6	1次元 XY 模型の解	529		..... [川上則雄] ...	539
13.1.7	1次元ハイゼンベルク模型とベータ仮説	531	<b>13.4</b>	<b>スピングラス</b>	541
<b>13.2</b>	<b>相転移のメカニズムと自発的対称性の破れ</b>	534		..... [高山 一] ...	541
	..... [鈴木増雄] ...	534	<b>14</b>	<b>量子光学</b>	547
<b>14</b>	<b>量子光学</b>	547		..... [平野琢也] ...	547
	[歴史と意義]	547	14.3.1	$P$ 表示	553
<b>14.1</b>	<b>調和振動子の量子状態</b>	547	14.3.2	ウイグナー分布関数	553
14.1.1	フォック状態	547	14.3.3	$Q$ 関数	555
14.1.2	コヒーレント状態	548	<b>14.4</b>	<b>レーザー</b>	555
14.1.3	スクイーズド状態	549	<b>14.5</b>	<b>非線形光学</b>	556
<b>14.2</b>	<b>放射場の量子論</b>	550	<b>14.6</b>	<b>原子操作</b>	557
14.2.1	電磁場の量子化	550	14.6.1	レーザー冷却	557
14.2.2	放射場の量子状態	551	14.6.2	原子気体のボース-アインシュタイン凝縮	558
<b>14.3</b>	<b>放射場の統計</b>	553			

14.7 分子操作	559	14.8 観測問題	559
<b>15 高分子</b>	[川勝年洋] 563		
[歴史と意義]	563		
15.1 高分子	563	15.5.1 粘弾性	571
15.1.1 分子構造と集合状態	563	15.5.2 レプテーション	573
15.1.2 理想鎖の統計的性質	564	15.5.3 電気泳動	574
15.2 希薄溶液	565	<b>15.6 液晶</b>	575
15.2.1 希薄溶液の熱力学	565	15.6.1 液晶を形成する物質	575
15.2.2 希薄溶液における鎖の構造	566	15.6.2 多彩な液晶相と相転移	575
15.2.3 高分子鎖のブラウン運動	566	15.6.3 液晶相転移の理論	576
15.3 濃厚溶液	567	15.6.4 液晶の弾性理論	577
15.3.1 高分子濃厚系の熱統計力学	568	<b>15.7 高分子の折り畳み</b>	577
15.3.2 高分子ブレンド(高分子混合系)	569	15.7.1 生体高分子	577
15.3.3 ブロック共重合体のマイクロ相分離	569	15.7.2 タンパク質の高次構造	578
15.4 高分子ゲル	570	<b>15.8 高分子のトポロジカルな性質</b>	578
15.4.1 ゴム弾性のガウス網目理論	570	15.8.1 結び目・絡み目とトポロジー	578
15.4.2 弾性体の大変形の一般的記述	571	15.8.2 トポロジー不変量	579
15.5 絡み合い高分子系	571	<b>15.9 コンピューターシミュレーション</b>	580
		15.9.1 高分子系の分子シミュレーション	580
		15.9.2 高分子系の連続体シミュレーション	582
<b>16 流体・プラズマ</b>	[高部英明] 585		
[歴史と意義]	585		
16.1 流体とプラズマのマイクロな物理	585	16.3.2 リヒトマイヤー-メシュコフ不安定性	597
16.1.1 流体近似	585	16.3.3 界面不安定の物理機構	597
16.1.2 流体の基礎方程式	586	16.3.4 乱流混合	598
16.1.3 プラズマの平均自由行程	587	<b>16.4 プラズマとその支配方程式</b>	600
16.1.4 電氣的に中性な流体	587	16.4.1 ブラソフ方程式	601
16.1.5 プラズマ生成の素過程	588	16.4.2 プラズマの流体近似	603
16.2 圧縮性中性流体の力学	589	16.4.3 プラズマの流体近似の基礎方程式	604
16.2.1 音波	589	16.4.4 デバイ遮蔽	605
16.2.2 非線形波動と衝撃波	590	16.4.5 外磁場中のサイクロトロン運動	606
16.2.3 衝撃波	590	16.4.6 プラズマのドリフト運動	607
16.2.4 爆風波と自己相似解	592	<b>16.5 プラズマ中の波動と不安定</b>	608
16.2.5 弱い燃焼波と爆轟波	593	16.5.1 波動とその線形解析	608
16.2.6 衝撃波による分子解離や電離	595	16.5.2 電子プラズマ波	609
16.3 流体不安定と乱流混合	595	16.5.3 ランダウ減衰の運動論	610
16.3.1 レイリー-テイラー不安定性	595	16.5.4 ランダウ減衰の物理的イメージ	613

16.5.5	ランダウ減衰の応用と大振幅波での非線形現象	614	16.6	プラズマの閉じ込めと応用	624
16.5.6	プラズマ中のさまざまな波動	615	16.6.1	太陽プラズマ	624
16.5.7	背景磁場に対し斜め伝播する磁気流体波	618	16.6.2	地上での核融合	625
16.5.8	プラズマの不安定性	619	16.6.3	磁場閉じ込め核融合	627
16.5.9	磁気流体 (MHD) 不安定性	621	16.6.4	閉じた磁場中のプラズマ物理	628
16.5.10	波の分散性と非線形性—ソリトンと無衝突衝撃波	622	16.6.5	慣性閉じ込め核融合	630
			16.6.6	プラズマの工業応用	632
<b>17 宇宙</b> ..... [江里口良治]... 635					
[歴史と意義]..... 635			<b>17.4 銀河の世界</b> ..... 648		
<b>17.1 ハッブルの法則と膨張宇宙</b> ..... 635			17.4.1 銀河の構造..... 648		
17.1.1 宇宙原理..... 635			17.4.2 銀河の形成と進化..... 650		
17.1.2 宇宙膨張..... 635			17.4.3 銀河の活動と降着円盤..... 651		
17.1.3 宇宙の理論的モデル..... 636			<b>17.5 恒星の構造と進化</b> ..... 653		
17.1.4 一様等方宇宙のパラメータと観測による決定..... 637			17.5.1 恒星を支配する方程式：自己重力ガスの平衡状態..... 653		
<b>17.2 初期宇宙の現象</b> ..... 639			17.5.2 恒星の中心密度と中心温度..... 654		
17.2.1 宇宙背景放射と火の玉宇宙モデル..... 639			17.5.3 恒星の進化の基本的メカニズム..... 656		
17.2.2 宇宙初期の元素合成..... 641			17.5.4 恒星の進化の具体的現象..... 656		
17.2.3 物質と反物質の非対称性..... 641			<b>17.6 宇宙線の起源と加速</b> ..... 658		
17.2.4 インフレーションモデル..... 643			17.6.1 宇宙線の起源..... 658		
<b>17.3 宇宙の大規模構造とその物理</b> ..... 644			17.6.2 宇宙線の加速メカニズム..... 659		
17.3.1 大規模構造の観測と一様性..... 644			17.6.3 超高エネルギー宇宙線..... 660		
17.3.2 重力束縛系の存在とダークマター..... 645			<b>17.7 重力波</b> ..... 661		
17.3.3 構造形成の理論：重力不安定理論..... 646			17.7.1 アインシュタイン方程式の線形化と重力波..... 661		
17.3.4 宇宙背景放射の非等方性と宇宙論のパラメータ..... 647			17.7.2 平面重力波の性質..... 662		
			17.7.3 重力波の放出と 4 重極公式..... 662		
			17.7.4 重力波の観測..... 663		

### III. 展 開

<b>18 非線形</b> ..... 667	
<b>18.1 カオス</b> ..... [首藤 啓]... 667	<b>18.2 パターン形成</b> ..... [太田隆夫]... 677
18.1.1 カオスとは何か?..... 667	18.2.1 化学反応..... 677
18.1.2 保存力学系のカオス..... 670	18.2.2 反応拡散系..... 678
18.1.3 散逸力学系のカオス..... 671	18.2.3 対流系..... 679
18.1.4 量子カオス..... 674	18.2.4 結晶成長..... 680

18.2.5	界面・位相ダイナミクス	681	18.4.3	確率共鳴現象の応用	692
18.2.6	振幅方程式	681	18.4.4	カオスの発展と応用	695
<b>18.3</b>	<b>ソリトン</b> [国場敦夫]	682	<b>18.5</b>	<b>エコノフィジックス</b> [高安秀樹]	696
18.3.1	古典ソリトン	682	18.5.1	エコノフィジックスとは何か	696
18.3.2	場の古典論	684	18.5.2	金融市場の特性	697
18.3.3	量子ソリトン	684	18.5.3	市場メカニズムにおける自己 組織臨界現象	698
18.3.4	可解モデルと数理	687	18.5.4	ミクロな価格方程式	699
<b>18.4</b>	<b>確率共鳴：非線形系と雑音誘起 現象</b> [甲斐昌一]	689	18.5.5	マクロ方程式とインフレーション	700
18.4.1	はじめに	689	18.5.6	経済から社会へ	702
18.4.2	確率共鳴 (SR) 現象	690			
<b>19</b>	<b>情報と計算物理</b>	707			
<b>19.1</b>	<b>情報科学</b> [松本啓史]	707	19.2.9	量子強相関係のシミュレーション	722
19.1.1	情報科学とは	707	19.2.10	素粒子物理学における場の 理論 (量子色力学) の検証 (格子ゲージシミュレーション)	722
19.1.2	計算量の理論	707	19.2.11	増大する役割	723
19.1.3	通信理論 (情報理論)	710	<b>19.3</b>	<b>量子コンピューター</b> [細谷暁夫]	724
19.1.4	数理統計学	712	19.3.1	量子コンピューターとは何か	724
<b>19.2</b>	<b>計算物理</b> [小柳義夫・高山 一・鈴木増雄]	715	19.3.2	量子回路 (quantum circuit)	725
19.2.1	はじめに	715	19.3.3	いままでに知られているアル ゴリズム	726
19.2.2	初期の成果	715	19.3.4	量子誤り訂正	728
19.2.3	シミュレーションとは	716	19.3.5	量子素子の候補	730
19.2.4	古典多粒子系・流体のダイナ ミクスと分子動力学法	717	19.3.6	実在の世界から量子的な世界へ	730
19.2.5	メトロポリス法	718	<b>19.4</b>	<b>量子情報通信理論</b> [大矢雅則]	731
19.2.6	量子スピン系のシミュレーション の方法 (量子モンテカル ロ法)	720	19.4.1	情報と通信	731
19.2.7	分子軌道法	721	19.4.2	情報量・符号化・チャネル	733
19.2.8	第1原理 (非経験的) 電子状 態計算による物性予測 (カー パリネロ法)	721	19.4.3	量子系の情報量と通信過程	734
			19.4.4	究極的な量子通信：量子テレ ポーテーション	737
<b>20</b>	<b>生命</b>	743			
<b>20.1</b>	<b>脳</b> [篠本 滋]	743	<b>20.2</b>	<b>ニューラルネットワーク</b> [樺島祥介]	747
20.1.1	脳と神経系, 構造と機能	743	20.2.1	はじめに	747
20.1.2	現象：感覚, 記憶, 行動	744	20.2.2	連想記憶モデル	750
20.1.3	理論：ニューラルネットワーク モデルと脳, 興奮伝導のモデル	745	20.2.3	学習の理論	752

20.2.4	最近の動向と今後の展望	754	20.3.5	適応戦略と進化生態学	760
<b>20.3</b>	<b>数理生物学</b> [巖佐 庸]	755	20.3.6	社会生物学と進化ゲーム	762
20.3.1	生物の人口動態	755	20.3.7	進化遺伝学	764
20.3.2	空間構造	756	<b>20.4</b>	<b>分子モーター</b> [徳永万喜洋]	766
20.3.3	絶滅リスク	759	20.4.1	分子モーターと特性	766
20.3.4	群集と生態系	759	20.4.2	分子モーターのモデルと理論	772
<b>21</b>	<b>物質</b>	777			
<b>21.1</b>	<b>高温超伝導</b> [上田和夫]	777	21.2.2	ナノチューブ [齋藤理一郎]	789
21.1.1	超伝導研究の展開	777	<b>21.3</b>	<b>メソスコピック系</b> [樽茶清悟]	795
21.1.2	銅酸化物高温超伝導体の性質	778	21.3.1	メソスコピックとは	795
21.1.3	ミクロなモデル	782	21.3.2	2次元電子系	796
21.1.4	超伝導機構に関する理論	783	21.3.3	量子細線	798
21.1.5	残された問題——擬ギャップ について	785	21.3.4	量子ドット	799
<b>21.2</b>	<b>フラレンとナノチューブ</b>	785	<b>21.4</b>	<b>有機伝導体</b> [石黒武彦]	804
21.2.1	フラレン [谷垣勝己]	785	21.4.1	物質の開発	804
			21.4.2	電氣的性質	808
<b>22</b>	<b>エネルギーと環境</b>	815			
<b>22.1</b>	<b>エネルギー：エネルギー源，全 体の収支</b> [藤井直之]	815	22.3.2	燃料電池	830
22.1.1	はじめに	815	22.3.3	水素を利用するメリット(社 会的背景)	835
22.1.2	エネルギー源	816	22.3.4	展 望	835
22.1.3	エネルギーの収支	821	<b>22.4</b>	<b>原子力</b> [中沢正治]	836
<b>22.2</b>	<b>太陽電池</b> [齊藤 忠]	825	22.4.1	はじめに	836
22.2.1	はじめに	825	22.4.2	原子炉	836
22.2.2	太陽電池の原理	825	22.4.3	原子力システムの安全性	841
22.2.3	結晶 Si 型太陽電池	826	22.4.4	おわりに	843
22.2.4	薄膜型太陽電池	827	<b>22.5</b>	<b>環 境</b> [藤井直之]	844
22.2.5	今後の展開	829	22.5.1	はじめに	844
<b>22.3</b>	<b>燃料電池(水素，水溶液型，固体 電解質型)</b> [内田裕久・内田晴久]	829	22.5.2	地球環境の変動	844
22.3.1	水 素	829	22.5.3	地球環境問題とその具体例	848
			22.5.4	おわりに	851
<b>索 引</b>		853			

