目　　次

1　序　　論　*1*

1.1　統計力学とは　*1*

1.1.1　物質の世界と物理学　*1*

1.1.2　熱平衡　*2*

1.1.3　平衡統計力学と非平衡統計力学　*3*

1.1.4　古典統計力学と量子統計力学　*3*

1.1.5　熱力学と統計力学　*4*

1.2　コイン投げのたとえ　*5*

1.2.1　コイン投げ　*5*

1.2.2　コイン投げと確率　*7*

1.2.3　ガウス分布と中心極限定理　*11*

1.2.4　コイン投げと統計力学　*12*

1.2.5　微視的世界から巨視的世界へ　*15*

1.3　気体運動論と理想気体　*15*

1.3.1　気体の状態方程式と絶対温度　*16*

1.3.2　ベルヌーイの式　*17*

1.3.3　気体のエネルギーと平均2乗速度　*19*

2　統計力学の原理　*23*

2.1　等重率の原理　*23*

2.1.1　位相空間　23
2.1.2　等重率と統計力学　24
2.2　状態の数の計算例—理想気体　26
2.2.1　場合の数の計算　26
2.2.2　不確定性原理と作用量子　28
2.2.3　粒子の不可別性による補正　29
2.2.4　示量変数と示強変数　31
2.3　カノニカル分布　31
2.3.1　熱浴　31
2.3.2　カノニカル分布の導出　33
2.3.3　状態和とトレース　35
2.3.4　物理量の熱平均　37
2.3.5　物理量のゆらぎの熱平均　38
2.4　圧力とヘルムホルツの自由エネルギー　40
2.4.1　圧力　40
2.4.2　自由エネルギーと分配関数　42
2.5　エントロピー　43
2.6　ミクロカノニカルアンサンブル　45
2.7　開いた系　47
2.7.1　粒子をやりとりする系の熱平衡条件　47
2.7.2　化学ポテンシャル　48
2.8　グランドカノニカルアンサンブル　50
2.8.1　グランドカノニカル分布の導出　50
2.8.2　グランドカノニカル分布における粒子数　51
2.8.3　熱力学ポテンシャルと大分配関数　53

3　古典統計力学の応用　57

3.1　理想気体　57
3.1.1　理想気体の分配関数の計算　58
3.1.2　理想気体の速度分布関数　60
3.2　調和振動子系　62
3.2.1　調和振動子系の分配関数の計算　62
3.2.2　エネルギー等分配則　63

3.3　2原子分子理想気体　64
3.3.1　重心運動と回転運動　65
3.3.2　分子回転の寄与　66

4　量子統計力学の応用　71

4.1　2準位系　71
4.1.1　2準位系の分配関数の計算　71
4.1.2　外部磁場中の磁気モーメント　74
4.2　調和振動子系　76
4.2.1　調和振動子の量子力学　76
4.2.2　分配関数の計算　77
4.3　固体の比熱 (I) —アインシュタイン模型　80
4.3.1　固体の比熱　80
4.3.2　格子振動のアインシュタイン模型　81
4.4　箱の中の自由波動　83
4.5　固体の比熱 (II) —デバイ模型　86
4.6　熱放射　89
4.7　多粒子系の量子力学　93
4.7.1　自由粒子の量子力学— 1粒子の場合　94
4.7.2　自由粒子の量子力学— N 粒子の場合　94
4.7.3　波動関数の対称性と統計性— 2粒子の場合　96
4.7.4　波動関数の対称性と統計性— N 粒子の場合　97
4.7.5　内部自由度，スピン　97
4.7.6　相互作用がない場合の波動関数　98
4.7.7　粒子数表示　100
4.8　量子理想気体　101
4.8.1　大分配関数の計算　101
4.8.2　ボース分布とフェルミ分布　103
4.8.3　ボルツマン分布　104
4.9　理想フェルミ気体　104
4.9.1　フェルミ面とフェルミ・エネルギー　104
4.9.2　状態密度の計算　107
4.9.3　絶対零度の性質　108

4.9.4 白色矮星と中性子星 109
4.9.5 有限温度の性質 110
4.10 理想ボース気体 115
4.10.1 絶対零度の性質 116
4.10.2 有限温度の性質 116
4.10.3 ボース–アインシュタイン凝縮 119
4.10.4 ヘリウム4の超流動転移 121

5 相互作用系の統計力学 123

5.1 不完全気体の統計力学—摂動展開の方法 123
5.1.1 不完全気体 124
5.1.2 ビリアル展開 125
5.1.3 β_1の計算例 133
5.1.4 ジュール–トムソン効果 134
5.2 スピン模型 137
5.2.1 イジング・モデル 138
5.2.2 ベクトルスピンモデル 141
5.3 1次元イジング・モデル 144
5.3.1 伝送行列の方法 145
5.3.2 磁化と帯磁率 147
5.3.3 スピン相関関数と相関長 149
5.4 2次元イジング・モデル 152
5.5 厳密に解けるモデルの例 (I) —無限レンジモデル 154
5.5.1 分配関数の計算 155
5.5.2 零磁場での性質 157
5.5.3 有限磁場での性質 162
5.6 分子場近似 163
5.6.1 イジング・モデルの分子場近似 163
5.6.2 変分原理 165
5.7 厳密に解けるモデルの例 (II) —無限成分モデル 167
5.7.1 分配関数の計算 169
5.7.2 零磁場での性質 173
5.7.3 上部臨界次元と下部臨界次元 176

5.8 モンテカルロ法 176
5.8.1 モンテカルロ法の原理 177
5.8.2 メトロポリス法 180
5.8.3 熱浴法 181
5.8.4 モンテカルロ・シミュレーションの例 181

6 協力現象の統計力学 189

6.1 スケーリングとユニヴァーサリティ 190
6.1.1 臨界指数 190
6.1.2 ユニヴァーサリティ 195
6.1.3 臨界指数のスケーリング関係式 198
6.2 自発的対称性の破れ 199
6.3 スケーリング仮説 202
6.3.1 自由エネルギーに関するスケーリング仮説 202
6.3.2 相関関数のスケーリング 205
6.3.3 ハイパースケーリング 206
6.4 くり込み群の理論 (I) 207
6.4.1 くり込み群変換 209
6.4.2 1次元イジング・モデルの例 212
6.4.3 固定点とその安定性 214
6.4.4 線形化されたくり込み群変換—零磁場の場合 218
6.4.5 線形化されたくり込み群変換—有限磁場の場合 221
6.4.6 再び1次元イジング・モデルの例 222
6.5 くり込み群の理論 (II) 224
6.5.1 スケーリング場とスケーリング演算子 225
6.5.2 レレヴァント，イレレヴァント 225
6.5.3 自由エネルギーのスケーリング形とユニヴァーサリティ 227
6.5.4 危険なイレレヴァント変数 229
6.5.5 クロスオーバー 230
6.5.6 相関関数のくり込み 232
6.5.7 おわりに 233

さらに勉強するために　237

付録　熱力学の要約　241

問題の略解　249

索　　引　259

物理基本定数　262