

目 次

第 1 部 熱力学

第 1 章 平衡状態と状態量	3
1.1 はじめに	3
1.2 系, 相および状態量	4
1.3 平衡状態と温度——熱力学第 0 法則	6
1.4 理想気体の分子運動論	10
1.5 圧力, 仕事および化学ポテンシャル	13
1.6 熱と熱容量	16
1.7 実在気体の状態方程式	17
1.8 比熱	20
1.9 状態の変化——可逆および不可逆過程	23
1.10 完全および不完全微分形式, 線積分	25

【例】

【問題】

1.1 理想気体	9	1.1 完全および不完全微分	29
1.2 マクスウェルの速度分布	12		
1.3 等温膨張	23		
1.4 微分形式の簡単な例	27		
1.5 積分因子	28		

第 2 章 熱力学法則	33
2.1 熱力学第 1 法則	33
2.2 カルノー・サイクルとエントロピー	37
2.3 エントロピーと熱力学第 2 法則	41

2.4	エントロピーと熱力学第2法則の微視的な解釈	43
2.5	大域および局所平衡	51
2.6	熱機関	52
2.7	オイラー方程式とギブズ-デュエムの関係	59
【例】		
2.1	内部エネルギーと全微分	34
2.2	理想気体の断熱方程式	35
2.3	理想気体のエントロピー	42
2.4	単純な系の微視的状态	46
2.5	すべての微視的状态が等確率であることに ついて	49
2.6	理想気体の化学ポテンシャル	60
【問題】		
2.1	温度の混合	56
2.2	暖房	57
2.3	理想気体のオイラー方程式	61
第3章	相転移と化学反応	63
3.1	ギブズの相律	63
3.2	相平衡とマクスウェル則	68
3.3	質量作用の法則	71
3.4	熱力学法則の応用	81
【例】		
3.1	クラウジウス-クラペイロンの式	65
【問題】		
3.1	液体の蒸気圧	67
3.2	ラウールの法則と沸点上昇	74
3.3	蒸気圧	76
3.4	ヘンリー-ドルトンの法則	78
3.5	混合液の蒸気圧	79
3.6	浸透圧	80
3.7	ファン・デル・ワールス気体の内 部エネルギー	83
3.8	ファン・デル・ワールス気体のエ ントロピー	83
第4章	熱力学ポテンシャル	85
4.1	エントロピー最大の原理	85
4.2	熱力学ポテンシャルとしてのエントロピーとエネルギー	86
4.3	ルジャンドル変換	88
4.4	自由エネルギー	92
4.5	エンタルピー	96

4.6	自由エンタルピー	102
4.7	グランドポテンシャル	108
4.8	すべての変数の変換	109
4.9	マクスウェルの関係式	110
4.10	ヤコビ変換	116
4.11	熱力学的安定性	119
【例】		
4.1	理想気体のエントロピー	87
4.2	$f(x) = x^2$ のルジャンドル変換	90
4.3	$f(x) = x$ のルジャンドル変換	90
4.4	ルジャンドル逆変換	91
4.5	溶液からの沈殿	94
4.6	理想気体の自由エネルギー	95
4.7	理想気体のエンタルピー	98
4.8	反応エンタルピー	101
4.9	理想気体の自由エンタルピー	104
4.10	熱容量	112
4.11	ジュール-トムソンの実験	113
4.12	エントロピーから C_p を求める	116
4.13	ジュール-トムソン係数	119
【問題】		
4.1	エンタルピーから状態方程式を 計算する	99
4.2	ギブズ-ヘルムホルツの式	104

第2部 統計力学

第5章	微視的な状態の数とエントロピー	123
5.1	はじめに	123
5.2	位相空間	124
5.3	エントロピーの統計力学的な定義	127
5.4	ギブズのパラドックス	132
5.5	Ω の量子力学的数え上げ	135
【例】		
5.1	調和振動子	125
5.2	理想気体のエントロピーの、統 計力学に基づく計算	130
【問題】		
5.1	理想気体の状態方程式	141

第 6 章 アンサンブル理論とマイクロカノニカルアンサンブル	143
6.1 位相空間上の分布とエルゴード仮説	143
6.2 リュービルの定理	146
6.3 ミクロカノニカルアンサンブル	148
6.4 アンサンブルのエントロピー	150
6.5 不確かさ関数	151

【例】

6.1 1次元での運動	153
6.2 超相対論的気体	154

【問題】

6.1 調和振動子	158
-----------	-----

第 7 章 カノニカルアンサンブル	161
7.1 ギブズの修正因子の基礎	166
7.2 相互作用をしない粒子の系	172
7.3 アンサンブル平均による物理量の計算	178
7.4 ミクロカノニカルアンサンブルとカノニカルアンサンブルとの関係	187
7.5 揺らぎ	192
7.6 ビリアル定理と等分配則	196
7.7 さらなる理解のために：あらゆる分布の平均としてのカノニカル分布	201

【例】

7.1 理想気体のカノニカルアンサンブルでの扱い	168
7.2 理想気体	173
7.3 理想気体の $\rho_i(\vec{r})$	180
7.4 理想気体	190
7.5 ビリアル定理と理想気体	200

【問題】

7.1 超相対論的気体	170
7.2 カノニカルアンサンブルでの調和振動子の扱い	171
7.3 平均の速さと最頻の速さ	174
7.4 蒸発する気体の速度分布	176
7.5 大気の分布	181
7.6 理想気体の相対運動量	183
7.7 2 粒子の平均距離	184
7.8 N 個の調和振動子の状態密度	192

第 8 章 カノニカルアンサンブルの応用	209
8.1 ボルツマン統計による量子系の扱い	209
8.2 常磁性	215
8.3 2 準位系の負の温度	223
8.4 分子が内部自由度をもつ気体	226

8.5 相対論的な理想気体	234
---------------	-----

【例】

8.1 量子力学的な調和振動子 N 個からなる系	210
----------------------------	-----

第 9 章 グランドカノニカルアンサンブル	241
-----------------------	-----

9.1 グランドカノニカルアンサンブルでの揺らぎ	249
--------------------------	-----

【例】

9.1 グランドカノニカルアンサンブルでの理想気体	247
---------------------------	-----

第 3 部 量子統計

第 10 章 密度演算子	257
10.1 基礎	257
10.2 純粋状態と混合状態	260
10.3 密度行列の性質	265
10.4 量子統計と密度行列	269

【例】

10.1 自由な電子	264
10.2 運動量表示での自由粒子	273
10.3 座標表示での自由粒子	274

【問題】

10.1 ウィグナー変換	275
10.2 自由粒子の $\langle \hat{H} \rangle$ の計算	277
10.3 N 個の自由粒子の系のカノニカル密度行列	278
10.4 調和振動子の密度行列	280

第 11 章 多粒子系の波動関数の対称性	285
----------------------	-----

【例】

11.1 2 粒子の対称波動関数の規格化	289
11.2 理想気体	293

第12章 理想量子系のグランドカノニカルアンサンブルでの記述 297

【例】

- 12.1 占有数の分布 308
- 12.2 平均占有数の導出 310

第13章 理想ボーズ気体 313

- 13.1 超相対論的ボーズ気体 324

【例】

- 13.1 ^4He の λ 点 323
- 13.2 プランクの輻射の公式 327
- 13.3 宇宙の 3K 背景輻射 331
- 13.4 キルヒホッフの法則の導出 333
- 13.5 固体の格子振動：アインシュタイン模型とデバイ模型 333

第14章 理想フェルミ気体 341

- 14.1 縮退したフェルミ気体 347
- 14.2 補足：自然単位 384

【例】

- 14.1 熱電子放出：リチャードソン効果 350
- 14.2 $T = 0$ での相対論的フェルミ気体 355
- 14.3 パウリ常磁性 362
- 14.4 ランダウ反磁性 366
- 14.5 ド・ハース-ファン・アルフェン効果 370
- 14.6 超相対論的フェルミ気体 377

【問題】

- 14.1 光電効果：ハルヴァックス効果 353
- 14.2 ショットキー効果 354
- 14.3 白色矮星・超新星・中性子星・クォーク星・ブラックホール 359
- 14.4 ランダウ反磁性の状態密度の計算 374
- 14.5 例 14.5 の積分 (14.119) の計算 376

第15章 相対論的ボーズおよびフェルミ気体の応用 387

- 15.1 ビッグバンや重イオン衝突の際のクォーク・グルオンプラズマ 387

【例】

- 15.1 重イオン衝突でのクォーク・グルオンプラズマとハドロンの相転移 397

【問題】

- 15.1 相互作用する量子気体 392

第4部 実在気体と相転移

第16章 実在気体 401

- 16.1 メイヤーのクラスター展開 404
- 16.2 ビリアル展開 414

【例】

- 16.1 サザランドポテンシャル 403

第17章 相転移の分類 417

- 17.1 対応状態の原理 423
- 17.2 臨界指数 424
- 17.3 相転移の例 426

第18章 イジング模型とハイゼンベルグ模型 437

【例】

- 18.1 1次元のイジング模型 439
- 18.2 イジング模型の平均場近似 444
- 18.3 イジング模型における秩序-無秩序相転移 454

【問題】

- 18.1 ハイゼンベルグ模型の平均場近似 451

索引 458