

ÍNDICE

INTRODUÇÃO À FÍSICA ESTATÍSTICA **xiii**

1 PASSEIO ALEATÓRIO 1

- 1.1 Probabilidades: definições elementares 3
- 1.2 Variáveis aleatórias e funções de distribuição 5
- 1.3 Passeio aleatório simples 9
 - 1.3.1 Distribuição binomial 9
 - 1.3.2 Distribuição de Gauss 12
 - 1.3.3 Distribuição de Poisson 16
- 1.4 Passeio aleatório: caso geral 17
 - 1.4.1 Distribuições conjuntas para várias variáveis aleatórias 17
 - 1.4.2 Resultados gerais para o passeio aleatório a uma dimensão 19
 - 1.4.3 Passeio aleatório a três dimensões 21
- 1.5 Método de Monte Carlo de amostragem de passeios aleatórios * 25
- Apêndice A 33
 - A.1 — Cálculo de integrais da forma 33
 - A.2 — Cálculo de integrais da forma 34
 - A.3 — Cálculo de integrais da forma 36
- Apêndice B: Fórmula de Stirling 36
- Problemas 38
- Referências 41

2 TERMODINÂMICA ESTATÍSTICA — FUNDAMENTOS 43

- 2.1 Introdução 45
- 2.2 Revisão dos conceitos básicos da Termodinâmica do equilíbrio 47
 - 2.2.1 As Leis da Termodinâmica 47
 - 2.2.2 Potenciais termodinâmicos. Relações de Maxwell 53
 - 2.2.3 Funções de resposta termodinâmicas 56
 - 2.2.4 Sistemas magnéticos 59
 - 2.2.5 Sistemas eléctricos * 61
- 2.3 Postulados da Física Estatística 64
- 2.4 Sistema isolado 69
 - 2.4.1 Colectividade microcanónica 69
 - 2.4.2 Conexão com a Termodinâmica. Entropia 70
 - 2.4.3 Condições de equilíbrio num sistema isolado 72
 - 2.4.4 Processos infinitesimais quase-estáticos 79
 - 2.4.5 Sólido paramagnético isolado 81
- 2.5 Condições gerais de equilíbrio. Potenciais termodinâmicos 87
 - 2.5.1 Sistema isolado 87
 - 2.5.2 Critério geral de equilíbrio 88
 - 2.5.3 Sistema em equilíbrio com um reservatório de temperatura 90
 - 2.5.4 Sistema em equilíbrio com um reservatório de temperatura e de pressão 90
 - 2.5.5 Sistema isolado em equilíbrio com um reservatório de pressão 91

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.5.6 | Transformação de Legendre. Formulação geral das condições de equilíbrio * | 92 |
| 2.5.7 | Equilíbrio de fases | 94 |
| | Problemas | 100 |
| | Referências | 103 |

3 TERMODINÂMICA ESTATÍSTICA — DESENVOLVIMENTOS E APLICAÇÕES 105

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1 | Introdução | 107 |
| 3.2 | Sistema em equilíbrio com um reservatório de temperatura | 107 |
| 3.2.1 | Colectividade canónica | 107 |
| 3.2.2 | Valor médio e variância da energia | 111 |
| 3.2.3 | Processos infinitesimais quase-estáticos. Conexão com a Termodinâmica | 112 |
| 3.2.4 | Terceira Lei | 117 |
| 3.3 | Sólido ideal | 117 |
| 3.3.1 | Paramagnetismo | 118 |
| 3.3.2 | Arrefecimento magnético | 128 |
| 3.3.3 | Vibrações térmicas da rede cristalina. Modelo de Einstein | 130 |
| 3.4 | Sistema em equilíbrio com um reservatório de temperatura e de partículas | 133 |
| 3.4.1 | Colectividade macrocanónica | 133 |
| 3.4.2 | Termodinâmica da distribuição macrocanónica | 135 |
| 3.4.3 | Flutuações do número de partículas | 137 |
| 3.5 | Sistema em equilíbrio com um reservatório de temperatura e de pressão * | 140 |
| 3.5.1 | Colectividade isotérmica-isobárica | 140 |
| 3.5.2 | Conexão com a Termodinâmica | 141 |
| 3.5.3 | Flutuações do volume | 141 |
| 3.6 | Equivalência termodinâmica das colectividades | 142 |
| | Problemas | 144 |
| | Referências | 146 |

4 GÁS IDEAL CLÁSSICO 147

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.1 | Contagem dos estados | 149 |
| 4.2 | Estatística de Maxwell-Boltzmann | 152 |
| 4.3 | Função de partição do gás no regime clássico | 157 |
| 4.4 | Função de partição de uma partícula | 158 |
| 4.5 | Termodinâmica do gás ideal clássico | 162 |
| 4.6 | Critério de validade do regime clássico | 165 |
| 4.7 | Distribuição de Maxwell-Boltzmann | 167 |
| 4.8 | Gás num campo uniforme | 169 |
| 4.9 | Gás real | 171 |

Apêndice A: Espaço das fases. Densidade de estados 177

Apêndice B: Teorema de Liouville em mecânica clássica 182

Apêndice C: Teorema da equipartição 186

Problemas 187

Referências 189

5 GÁS IDEAL QUÂNTICO 191

- 5.1 Sistemas de partículas idênticas * 193
- 5.2 Estatísticas quânticas 195
- 5.3 Limite clássico 200
- 5.4 Aproximação dos estados contínuos 201
- 5.5 Gás ideal no limite clássico 202
- 5.6 Gás perfeito de férmions 205
 - 5.6.1 Gás de elétrons livres 208
- 5.7 Gás perfeito de bósons 212
 - 5.7.1 Condensação de Bose-Einstein 214
 - 5.7.2 Gás de fônons 219
 - 5.7.3 Gás de fótons 228
- Problemas 235
- Referências 238

6 MAGNETISMO 239

- 6.1 Modelo de Heisenberg * 242
- 6.2 Modelo de Weiss 250
- 6.3 Teoria de Landau 258
- 6.4 Ferrimagnetismo e antiferromagnetismo 266
- 6.5 Excitações elementares: ondas de *spin*, gás de magnões 270
- 6.6 Modelo de Ising 275
- 6.7 Simulações de Monte Carlo usando o modelo de Ising * 279
- 6.8 Outros modelos de Ising 292
- Problemas 295
- Referências 296

7 CRISTAIS LÍQUIDOS 299

- 7.1 Generalidades 301
- 7.2 Teoria e modelo de Maier-Saupe 305
- 7.3 Teoria e modelo de Onsager 316
- 7.4 Teoria de Landau-de Gennes 324
- 7.5 Simulações de Monte Carlo usando o modelo de Lebwohl-Lasher * 327
- Problemas 336
- Referências 336

8 TRANSIÇÕES DE FASE E FENÔMENOS CRÍTICOS 339

- 8.1 Fases e transições de fase 341
- 8.2 Ordem de uma transição de fase 342
- 8.3 Pontos críticos e expoentes críticos 345
 - 8.3.1 Definição de expoentes críticos 347
 - 8.3.2 Principais expoentes críticos 348
 - 8.3.3 Desigualdades envolvendo expoentes críticos 352

| | |
|--|-----|
| 8.4 Teorias clássicas das transições de fase: universalidade | 353 |
| 8.4.1 Teoria de Van der Waals da transição líquido-vapor | 353 |
| 8.4.2 Teoria de Curie-Weiss do ferromagnetismo | 361 |
| 8.4.3 Teoria de Landau das transições de fase: universalidade | 362 |
| 8.5 A revolução de Onsager | 362 |
| 8.5.1 Solução exacta do modelo de Ising a duas dimensões | 362 |
| 8.5.2 Outros resultados exactos e aproximados | 366 |
| 8.6 Reconciliação da teoria clássica com os resultados experimentais e com os resultados exactos: a hipótese de escala | 368 |
| 8.7 Critério de Ginzburg | 372 |
| 8.8 Breve referência às ideias do grupo de renormalização | 373 |
| Problemas | 374 |
| Referências | 375 |

9 PROCESSOS IRREVERSÍVEIS 377

| | |
|--------------------------------|-----|
| 9.1 Difusão | 379 |
| 9.2 Movimento Browniano | 384 |
| 9.3 Equação de Fokker-Planck * | 392 |
| Apêndice A: Função | |

de Dirac 402

Problemas 403

Referências 405