

Índice

PARTE 1 Introdução à Relatividade e Física Quântica, 1

CAPÍTULO 1 Relatividade, 2

- 1.1 A Experiência de Michelson-Morley, 3
- 1.2 Conseqüências dos Postulados de Einstein, 6
- 1.3 A Dilatação do Tempo e a Contração dos Comprimentos, 7
- 1.4 Sincronização de Relógio e Simultaneidade, 11
- 1.5 O Efeito Doppler, 15
- 1.6 A Transformação de Lorentz, 17
- 1.7 O Paradoxo dos Gêmeos, 19
- 1.8 Momento Relativístico, 22
- 1.9 Energia Relativística, 24
- 1.10 Massa e Energia de Ligação, 27
- 1.11 Determinação Experimental do Momento Relativístico, 29
- 1.12 Algumas Equações Úteis e Aproximações, 30
- 1.13 Relatividade Geral, 33
 - Sumário e Referências, 36
 - Exercícios e Problemas, 38

CAPÍTULO 2 A Teoria Cinética da Matéria, 43

- 2.1 O Número de Avogrado, 44
- 2.2 A Pressão de um Gás, 45
- 2.3 O Teorema da Equipartição e Capacidades Específicas de Gases e Sólidos, 49
- 2.4 Funções Distribuição, 52
- 2.5 A Distribuição de Maxwell-Boltzmann, 56
- 2.6 Fenômenos de Transporte, 63
- 2.7 O Movimento Browniano e o Problema do Movimento ao Acaso (*opcional*), 68
 - Sumário e Referências, 70
 - Exercícios e Problemas, 71

CAPÍTULO 3 A Quantização da Eletricidade, da Luz e da Energia, 76

- 3.1 Primeiras Estimativas de e e e/m , 76
- 3.2 A Experiência de J. J. Thomson, 78
- 3.3 A Quantização da Carga Elétrica, 81
- 3.4 A Radiação de Corpo Negro, 85
- 3.5 O Efeito Fotoelétrico, 90
- 3.6 Os Raios X e o Efeito Compton, 93
- 3.7 A Quantização dos Estados de Energia da Matéria, 100
- 3.8 Cálculos das Somas nas Equações 3.26 e 3.27 (*opcional*), 104
 - Sumário e Referências, 105
 - Exercícios e Problemas, 106

CAPÍTULO 4 O Átomo Nucleado, 111

- 4.1 Fórmulas Espectrais Empíricas, 111
- 4.2 O Espalhamento de Rutherford, 112
- 4.3 O Modelo de Bohr do Átomo de Hidrogênio, 122
- 4.4 Espectros de Raios X, 129

- 4.5 A Experiência de Franck-Hertz, 132
- 4.6 A Regra de Quantização de Wilson-Sommerfeld (*opcional*), 133
- 4.7 Crítica à Teoria de Bohr e à "Velha Mecânica Quântica," 135
 - Sumário e Referências, 136
 - Exercícios e Problemas, 137

CAPÍTULO 5 Ondas de Elétrons, 142

- 5.1 As Relações de de Broglie, 142
- 5.2 Medidas de Comprimentos de Onda de Elétrons, 145
- 5.3 Propriedades de Ondas Clássicas, 149
- 5.4 Pacotes de Ondas, 153
- 5.5 Pacotes de Ondas de Elétrons, 156
- 5.6 A Interpretação Probabilística da Função de Onda, 158
- 5.7 O Princípio de Incerteza, 160
- 5.8 A Dualidade Partícula-onda, 162
- 5.9 Algumas Conseqüências do Princípio de Incerteza, 164
 - Sumário e Referências, 167
 - Exercícios e Problemas, 167

CAPÍTULO 6 A Equação de Schrödinger, 172

- 6.1 A Equação de Schrödinger em Uma Dimensão, 173
- 6.2 O Poço Quadrado Infinito, 177
- 6.3 O Poço Quadrado Finito, 181
- 6.4 Valores Esperados e Operadores, 184
- 6.5 Transições entre Estados de Energia (*opcional*), 186
- 6.6 O Oscilador Harmônico Simples, 188
- 6.7 Reflexão e Transmissão de Ondas, 192
- 6.8 A Equação de Schrödinger em Três Dimensões, 197
- 6.9 A Equação de Schrödinger para Duas ou Mais Partículas, 197
 - Sumário e Referências, 201
 - Exercícios e Problemas, 202

CAPÍTULO 7 Física Atômica, 205

- 7.1 A Equação de Schrödinger em Coordenadas Esféricas, 205
- 7.2 A Quantização do Momento Angular e Energia no Átomo de Hidrogênio, 207
- 7.3 Funções de Onda no Átomo de Hidrogênio, 211
- 7.4 Spin do Elétron, 214
- 7.5 Adição de Momentos Angulares e o Efeito Spin-Órbita, 219
- 7.6 Estados Fundamentais de Átomos; A Tabela Periódica, 221
- 7.7 Estados Excitados e Espectros de Átomos Alcalinos, 225
- 7.8 Estados Excitados e Espectros dos Átomos de Dois Elétrons (*opcional*), 230
- 7.9 O Efeito Zeeman, 232
 - Sumário e Referências, 236
 - Exercícios e Problemas, 237

PARTE 2 Aplicações, 243

CAPÍTULO 8 Estrutura Molecular e Espectros, 244

- 8.1 Ligação Molecular, 245
- 8.2 Moléculas Poliatômicas (*opcional*), 250
- 8.3 Níveis de Energia e Espectros de Moléculas Diatômicas, 253
- 8.4 Absorção, Espalhamento e Emissão Estimulada, 259
 - Sumário e Referências, 262
 - Exercícios e Problemas, 263

CAPÍTULO 9 Algumas Propriedades dos Sólidos, 265

- 9.1 Estrutura dos Sólidos, 265
- 9.2 Teoria Clássica de Elétrons Livres dos Metais, 269
- 9.3 O Gás de Elétron de Fermi, 274
- 9.4 Teoria Quântica da Condução, 279
- 9.5 Teoria de Banda dos Sólidos, 283
- 9.6 Semicondutores de Impureza, 288
- 9.7 Junções Semicondutoras e Dispositivos, 289
- 9.8 A Supercondutividade, 294
 - Sumário e Referências, 295
 - Exercícios e Problemas, 297

CAPÍTULO 10 Estatísticas Quânticas e Hélio Líquido, 301

- 10.1 As Funções de Distribuições Quânticas, 301
- 10.2 Hélio Líquido II, 306
 - Sumário e Referências, 311
 - Exercícios e Problemas, 312

CAPÍTULO 11 Física Nuclear, 313

- 11.1 A Descoberta do Nêutron, 314
- 11.2 Propriedades dos Núcleos no Estado Fundamental, 317
- 11.3 Radioatividade, 325
- 11.4 Reações Nucleares, 336
- 11.5 Fissão, Fusão e Reatores Nucleares, 343
- 11.6 A Interação de Partículas com a Matéria, 348
- 11.7 A Detecção de Partículas, 353
- 11.8 O Modelo de Camada (*opcional*), 361
 - Sumário e Referências, 366
 - Exercícios e Problemas, 367

CAPÍTULO 12 Partículas Elementares, 372

- 12.1 O Pósitron e Outras Antipartículas, 372
- 12.2 A Descoberta do Neutrino, 375
- 12.3 Os Mésons, 376
- 12.4 As Interações Básicas e a Classificação das Partículas, 377
- 12.5 As Leis de Conservação, 380
- 12.6 Partículas Ressonantes, 386
- 12.7 A Via Óctupla e os Quarks, 389
 - Sumário e Referências, 393
 - Exercícios e Problemas, 394

APÊNDICE A Propriedades dos Núcleos, 396

APÊNDICE B Integrais de Probabilidade, 406

APÊNDICE C A Separação da Equação de Schrödinger em Coordenadas Esféricas, 407

APÊNDICE D Constantes Físicas Gerais, Combinações Úteis, Fatores de Conversão e Dados Numéricos, 409

APÊNDICE E Tabela Periódica dos Elementos, 412

RESPOSTAS, 413

ÍNDICE ALFABÉTICO, 419

Título do Original em Inglês
Modern Physics
Copyright © 1978 by
Worth Publishers, Inc.
444 Park Avenue South
New York, NY 10016

Direitos exclusivos para a língua portuguesa
Copyright © by
EDITORA GUANABARA DOIS S.A.
Rio de Janeiro — RJ

1981 — 5 4 3 2

Reservados todos os direitos. É proibida a duplicação ou reprodução deste volume, ou de partes do mesmo, sob quaisquer formas ou por quaisquer meios (eletrônico, mecânico, gravação, fotocópia, ou outros), sem permissão expressa da Editora.

Fotocomposição da Editora Guanabara Koogan S.A.

Prefácio

A revisão deste livro reflete as muitas respostas úteis e sugestões daqueles que utilizaram a primeira edição. Nesta nova edição tentei manter o sabor histórico e cultural da primeira, reduzindo ao mesmo tempo a quantidade e o nível de dificuldade da matemática. Em particular, os materiais originalmente nos Caps. 6, 7 e 8 da primeira edição foram grandemente simplificados. Novos tópicos foram acrescentados. Um capítulo completamente novo sobre partículas elementares inclui material sobre mésons, partículas ressonantes, a via óctupla e os quarks. Há também novas seções sobre relatividade geral; moléculas poliatômicas; a estrutura dos sólidos; semicondutores por impureza; junções semicondutoras e dispositivos (incluindo transistores); fissão, fusão e reatores nucleares; e detectores nucleares.

Entre as características da primeira edição que foram conservadas estão:

1. A estrutura lógica — começando com uma introdução à relatividade e quantização e, então, seguindo com aplicações.
2. A discussão elementar da teoria cinética no Capítulo 2. Este tópico introduz os estudantes à física microscópica e ao uso das funções de distribuição de que vão necessitar mais tarde.
3. A apresentação qualitativa das ondas de Broglie e uma revisão das ondas clássicas no Capítulo 5, ilustradas com inúmeras fotografias dos padrões de difração dos elétrons em raios X.
4. Muitos exemplos com estimativas de ordem de grandeza e cálculos baseados em modelo simples.
5. O uso de quantidades combinadas, tais como hc , $\hbar c$, e ke^2 em e $V \cdot \text{Å}$, para simplificar cálculos numéricos.
6. Os sumários e a lista de referência no fim de cada capítulo.
7. Separação dos problemas em dois conjuntos, com base na dificuldade. Aumentou-se muito o número de problemas fáceis (agora chamados exercícios).
8. O uso de dados reais nas figuras, numerosas fotografias de pessoas e aparelhos e citações de trabalhos originais. Estas características mostram eventos na história da ciência e ajudam a refutar o ponto de vista prevalente entre os estudantes de que a física é uma coleção enfadonha e impessoal de fatos e fórmulas.

A nova edição foi dividida em duas partes: Parte 1, "Introdução à Relatividade e à Física Quântica", e Parte 2, "Aplicações". No Capítulo 1, o material sobre relatividade especial foi encurtado e levemente simplificado, e uma nova seção sobre relatividade geral foi acrescentada. Desde que somente a relação $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ é necessária para o entendimento dos capítulos posteriores, é possível omitir este primeiro capítulo. Os Capítulos de 2 a 5 foram reescritos para simplificar e melhorar a clareza. Aproximadamente todas as derivações matemáticas foram eliminadas ou colocadas no fim das seções ou capítulos e classificadas como opcionais. Simplifiquei o Capítulo 6 concentrando-me em problemas mais fáceis (tal como o poço quadrado infinito) e substituindo as derivações matemáticas dos problemas mais difíceis (por exemplo, o oscilador harmônico) com discussões qualitativas das suas características importantes. Duas novas seções foram acrescentadas a esse capítulo: a Seção 6.8 trata de uma única partícula em um poço quadrado tridimensional infinito, e a Seção 6.9 se refere a duas partículas idênticas em um poço quadrado infinito unidimensional. Estas duas discussões fornecem uma estrutura simples para introdução de resultados importantes que ocorrem a partir da extensão da equação de Schrödinger para três

dimensões e sistemas de mais de uma partícula, sem as complicações matemáticas dos Capítulos 7 e 8 da primeira edição. A Parte 1 conclui com um capítulo sobre física atômica. Esta discussão contém algum material que estava originalmente nos Capítulos 7 e 8, mas a apresentação foi arranjada de tal forma que, se desejado, o assunto poderá ser abordado breve e qualitativamente.

Na Parte 2, as idéias e métodos discutidos na Parte 1 são aplicados ao estudo de moléculas, sólidos, estatística quântica, hélio líquido II, o núcleo e partículas elementares. O Capítulo 8 ("Estrutura Molecular e Espectros") inclui material sobre moléculas diatômicas (originalmente apresentadas no Capítulo 9), além de uma nova seção sobre moléculas poliatômicas. O material sobre sólidos no Capítulo 9 foi grandemente expandido e reescrito, de forma que propriedades térmicas e elétricas dos sólidos podem ser compreendidas com apenas uma discussão qualitativa da energia de Fermi a $T = 0$. Um novo material sobre semicondutores de junção e transistores irá tornar esse capítulo mais útil e interessante, tanto para estudantes de engenharia como para especialistas em física. A estatística quântica e o hélio líquido II são examinados brevemente no Capítulo 10. O Capítulo 11 inclui uma seção completamente reescrita sobre radioatividade e duas novas seções: uma sobre fissão, fusão e reatores nucleares; outra sobre detectores nucleares. Os instrutores que optarem em abordar alguma física nuclear provavelmente desejarão selecionar somente certas seções deste longo capítulo. O livro conclui com um novo capítulo sobre partículas elementares.

Os capítulos na Parte 2 são completamente independentes um do outro, e podem ser tratados em qualquer ordem. Um curso de um semestre pode provavelmente abranger a maior parte do material da Parte 1 e alguns capítulos (ou ao menos partes dos capítulos) da Parte 2.

Algumas novas características pedagógicas nesta edição incluem:

1. Questões para discussão e revisão, dadas ao final das várias seções.
2. Comentários à margem focalizando conceitos importantes e equações.
3. Traços horizontais coloridos realçando as equações principais e assinalando resultados importantes no texto.
4. Material opcional, que é claramente colocado à parte na coluna da direita e marcado por traços coloridos verticais e um letreiro "Opcional" na margem. Grande parte do material classificado opcional da primeira edição foi removido. Agora há três espécies de material opcional: derivações matemáticas, seções mais difíceis e extensões das discussões que, enquanto não necessariamente difíceis, podem incluir mais detalhes do que alguns instrutores gostariam de tratar. Os capítulos são designados de forma que o material opcional usualmente fique no fim da seção.
5. Uma curta lista de objetivos de ensino no início de cada capítulo, para ajudar os estudantes a focalizar a importância da informação a ser apresentada e dar a eles uma idéia da profunda compreensão que será necessária. Os objetivos também servem como uma ajuda para revisão posterior. Além disso, como um crente entusiástico em questões de discussão em exames, espero que estes objetivos de aprendizado provem ser úteis em sugerir tais questões.

Agradecimentos

Muitas pessoas contribuíram para uma ou ambas as edições deste livro. Gostaria de agradecer a cada um que usou a primeira edição e a todos que provaram os primeiros rascunhos do livro. Algumas das pessoas cuja assistência à primeira edição particularmente apreciei foram: Marc Ross, Peter Roll, Jerry Griggs, Libor Velinsky, Doroth Hubert e Sue Nast. Gostaria também de agradecer à Universidade de Oakland por me ter concedido uma licença durante a qual foi feita a maior parte do trabalho relativo à nova edição, e ao Departamento de Física da Universidade da Califórnia, em Berkeley, pela sua gentil hospitalidade no mesmo período. Da mesma forma sou grato a Lyn Hlatky, que ajudou com os exercícios e problemas; a John McKinley, que sugeriu muitos aperfeiçoamentos no manuscrito final; e a Granvil C. Kyker, que leu a prova e propôs muitas melhorias.

Outros que revisaram algumas partes do manuscrito foram: Philip A. Chute, Universidade de Wisconsin, Eau Claire; F. Eugene Dunnam, Uni-

versidade da Flórida; William Eidson, Universidade de Drexel; E. Ni Foo, Universidade de Drexel; John Gardner, Universidade do Estado de Oregon; Donald Hall, Universidade do Estado da Califórnia, Sacramento; Roger Hanson, Universidade de Iowa do Norte; Louis V. Holroyd, Universidade de Missouri; Terry Kjeldaas, Instituto Politécnico de Brooklyn; Keneth Krane, Universidade do Estado de Oregon; Bob Rogers, Universidade de Colorado; Edwards Saunders, Academia Militar dos Estados Unidos, West Point; John Stewart, Universidade de Virgínia; Jay Strieb, Universidade de Villanova; Martin Tiersten, Colégio da Cidade de New York; e Robert Williamson, Universidade de Oakland. Muitos destes revisores leram várias versões do manuscrito e todos ofereceram sugestões valiosas para sua melhoria.

Agradeço a minha família, Sue, Beck e Ruth, por seu contínuo apoio e encorajamento. Finalmente, recebi muita ajuda e incentivo de Worth Publishers, particularmente de June Fox, cujos esforços incansáveis em coordenar este projeto tornaram possível e agradável sua conclusão.

PAUL A. TIPLER

Rochester, Michigan