

SUMÁRIO

Prefácio	xiii
1. Dificuldades com as teorias clássicas e a solução quântica.....	1
1.1 Radiação de corpo negro: contexto clássico e a hipótese de Planck	3
1.2 Trabalhos de Einstein e Bohr	8
1.2.1 A “velha Mecânica Quântica” do átomo de hidrogênio: frequências	10
1.2.2 Intensidades	14
1.2.3 Einstein, os princípios de Bohr e a radiação de corpo negro ..	15
1.3 A nova mecânica de Heisenberg.....	17
1.3.1 A teoria de Heisenberg passada a limpo: as matrizes de Born e Jordan	23
1.3.2 O oscilador harmônico unidimensional segundo a mecânica das matrizes	26
1.4 Opções determinantes e decorrências da teoria de Heisenberg, Born e Jordan.....	29
Exercícios	31
Bibliografia adicional	34
2. Estrutura algébrica da teoria de Heisenberg e postulados interpretativos.....	37
2.1 Estrutura algébrica da teoria de Heisenberg: discussão heurística.....	38

2.2	Estrutura formal e interpretação da teoria	42
2.2.1	Espaços de Hilbert	43
2.2.2	Operadores lineares	47
2.2.3	Espectro de operadores lineares e a interpretação da mecânica quântica	52
2.2.4	Compatibilidade de observáveis e relações de incerteza	62
2.2.5	Muitos graus de liberdade, espaços-produto e sistemas compostos	68
2.3	Avatares da dinâmica	71
2.3.1	O operador de evolução e as descrições de Heisenberg, de Schrödinger e “de interação”	72
2.3.2	Extensão para hamiltonianos que dependem explicitamente do tempo	76
2.3.3	Relações de incerteza energia-tempo	78
2.4	A “redução do pacote de ondas”	80
2.4.1	Medidas reprodutíveis, o “efeito Zenon” e a redução do pacote de ondas	83
	Exercícios	90
	Bibliografia adicional	97
3.	Sistemas quânticos simples	99
3.1	O oscilador harmônico	99
3.1.1	Espectro e autovetores do hamiltoniano do oscilador	100
3.1.2	Dinâmica do oscilador forçado	103
3.2	Sistemas de dois níveis	107
3.2.1	Estados estacionários e o operador de evolução	109
3.2.2	“Tunelamento” e interferência de estados estacionários	112
3.3	A representação de Schrödinger	115
3.3.1	Propriedades gerais da dinâmica de uma partícula em um potencial externo	119
3.3.2	Funções de onda estacionárias para o oscilador harmônico ..	122
3.3.3	Comportamento quântico de uma partícula livre	127
3.3.4	Partícula sujeita a potencial externo em uma dimensão	141
	Exercícios	152
	Bibliografia adicional	157
4.	Métodos de aproximação	159
4.1	Métodos perturbativos	161

4.1.1	Perturbação de estados não degenerados em espectros discretos	162
4.1.2	Perturbação de um estado degenerado ou quase-degenerado.....	179
4.1.3	Perturbação da equação de movimento.....	185
4.1.4	Transições num espectro contínuo ou quase-contínuo: a “regra áurea” de Fermi	194
4.2	Formulação variacional do problema de autovalores para espectros discretos	203
4.3	Aproximação semiclássica para a função de onda.....	207
4.3.1	Aproximação de Wentzel, Kramers e Brillouin (WKB)	209
4.3.2	Tratamento de regiões perigosas: fórmulas de conexão.....	214
4.3.3	Uso das fórmulas de conexão: penetração de barreiras de potencial e regras de quantização de Bohr	221
	Exercícios	227
	Bibliografia adicional	234
5.	Momento angular, potenciais centrais	237
5.1	Momento angular na dinâmica de uma partícula sujeita a um potencial central	240
5.1.1	Autovalores e autovetores do momento angular	242
5.1.2	Partícula livre com momento angular bem definido.....	244
5.1.3	Poço de potencial quadrado em três dimensões.....	247
5.1.4	Espectro contínuo de um potencial central de curto alcance, defasagens	250
5.1.5	Condições de contorno, amplitudes e seção de choque de espalhamento.....	252
5.1.6	Espalhamento a muito baixas energias, expansão de alcance efetivo.....	257
5.2	Problema de dois corpos com forças centrais, átomo de hidrogênio.....	261
5.2.1	Correlações de dois corpos e raios de estados ligados	265
5.2.2	Propriedades empíricas do espectro do átomo de hidrogênio e insuficiência do modelo simples	267
	Exercícios	268
6.	Estrutura fina e campos externos no átomo de hidrogênio.....	273
6.1	Realização explícita das variáveis de spin, álgebra das matrizes de Pauli.....	274
6.1.1	Direção de polarização do vetor de estado geral de spin 1/2.....	277

6.1.2	Matrizes de Pauli como base de operadores no espaço de spin.....	279
6.2	Estados de uma partícula com spin 1/2.....	280
6.2.1	Momento angular de uma partícula com spin 1/2, adição de momentos angulares.....	282
6.3	Momentos magnéticos e interações dependentes do spin.....	287
6.3.1	Interação spin-órbita e estrutura fina.....	288
6.3.2	Interação spin-spin e estrutura hiperfina.....	294
6.4	Campos eletromagnéticos externos, efeitos Stark e Zeeman no hidrogênio.....	299
6.4.1	Efeito Stark no hidrogênio.....	301
6.4.2	Efeito Zeeman no hidrogênio.....	316
	Exercícios.....	326
	Bibliografia adicional.....	329
7.	Sistemas de partículas idênticas.....	331
7.1	Férmions e bósons.....	335
7.1.1	Sistemas de muitas partículas idênticas.....	337
7.1.2	Exemplos simples: Indistinguibilidade quântica e clássica ..	341
7.2	A tabela periódica: Aproximações autoconsistentes para a estrutura atômica.....	349
7.2.1	Potenciais médios autoconsistentes: aproximação de Thomas-Fermi.....	353
7.2.2	Aproximações de Hartree e de Hartree-Fock.....	356
7.3	Métodos de “segunda quantização” para sistemas de muitas partículas idênticas.....	365
7.3.1	Estados no espaço de Fock e funções de onda de muitas partículas idênticas.....	369
7.3.2	Variáveis dinâmicas no espaço de Fock.....	374
7.3.3	Exemplos de aplicação: gás de Fermi livre e com forças de dois corpos.....	382
	Exercícios.....	390
	Bibliografia adicional.....	399
8.	Interação da matéria com a radiação.....	401
8.1	O campo de radiação livre.....	401
8.1.1	Quantização do campo de radiação livre.....	404
8.1.2	Energia, momento e momento angular do campo livre.....	407
8.2	Interação com um sistema de partículas carregadas.....	415

8.2.1	Espalhamento Thomson	418
8.2.2	Radiação de freiamento (Bremsstrahlung)	428
8.2.3	Transições radiativas em sistemas ligados	435
8.2.4	Análise multipolar das transições radiativas	446
	Exercícios	450
	Bibliografia adicional	452
9.	Transformações, simetrias e leis de conservação	453
9.1	Grupos de transformações	454
9.1.1	Grupos contínuos, geradores	455
9.1.2	Representações	456
9.2	Translações espaciais e momento	460
9.3	Rotações, momento angular e spin	464
9.3.1	Spin	467
9.3.2	Representação de rotações gerais em termos de ângulos de Euler	472
9.3.3	Matrizes de rotação, tensores esféricos, teorema de Wigner-Eckart	474
9.4	Isospin	481
9.5	Paridade e paridade intrínseca	491
9.6	Invariança por translações temporais e a lei dinâmica de evolução	494
9.7	Inversão temporal	496
9.7.1	Sistemas com spin	500
9.7.2	Invariança sob inversão temporal	501
	Exercícios	505
	Bibliografia adicional	509
10.	Espalhamento por um potencial de curto alcance	511
10.1	A equação de Lippmann-Schwinger	512
10.1.1	A expansão de Born	514
10.2	Descrição dependente do tempo de um processo de espalhamento por um potencial	516
10.2.1	Escala típica em processos de espalhamento	516
10.2.2	Tratamento dependente do tempo do espalhamento de um pacote de ondas por um potencial de curto alcance	520
10.2.3	Conservação de norma e o teorema óptico	528
10.3	Estados de espalhamento no espaço de momentos	530

10.4	Equação de Lippmann-Schwinger formal e operador de transição.....	535
10.4.1	Normalização das soluções da equação de Lippmann-Schwinger	540
10.4.2	A “fórmula de dois potenciais” de Gell-Mann e Goldberger	541
10.5	Operador de espalhamento S , propriedades formais	544
10.6	Diagonalização do operador de espalhamento para potenciais invariantes sob rotações: ondas parciais e defasagens.....	547
10.6.1	Ingredientes cinemáticos	548
10.6.2	Transformação de S e $T(k)$ para a base esférica.....	551
10.6.3	Reconstrução da amplitude de espalhamento e da forma assintótica da função de onda	552
	Exercícios	553
	Bibliografia adicional	557
11.	Equações de onda relativísticas	559
11.1	Sumário da cinemática da relatividade restrita.....	560
11.1.1	O eletromagnetismo de Maxwell como exemplo de uma “boa” teoria.....	564
11.2	A equação de Klein-Gordon	567
11.3	A equação de Dirac	572
11.3.1	Forma hamiltoniana e soluções da equação de Dirac livre .	574
11.3.2	Propriedades algébricas das matrizes gama.....	580
11.3.3	Transformações de Lorentz e rotações.....	581
11.3.4	Inversão espacial	587
11.3.5	Momento angular na equação de Dirac livre	588
11.4	Propriedades eletromagnéticas de uma partícula de Dirac carregada	590
11.5	Estados ligados de um elétron de Dirac em um campo coulombiano externo, atrativo	594
11.5.1	Simetrias e funções angulares	595
11.5.2	Equações radiais acopladas	597
11.5.3	Soluções para o espectro discreto	599
	Exercícios	603
	Bibliografia adicional	605