

Sumário

Prefácio à segunda edição	ix
Prefácio à primeira edição	xi
Apresentação	xiii
1 A estrutura da matéria: concepções filosóficas na Antiguidade	1
1.1 As primeiras especulações sobre a constituição da matéria	1
1.2 Átomos e vazio: Leucipo, Demócrito e Epicuro	7
1.3 Pitágoras, o idealismo de Platão e a geometrização da Física	9
1.3.1 A Escola Pitagórica	9
1.3.2 A geometrização de Platão	10
1.3.3 A influência de Platão na Física	11
1.4 Aristóteles e o antiatomismo	14
1.5 As propriedades da matéria e o vazio: especulação ou realidade?	16
1.6 Fontes primárias	19
1.7 Outras referências e sugestões de leitura	19
1.8 Exercícios	20
2 As origens do atomismo científico: contribuições da Química	21
2.1 Descartes contra o atomismo	21
2.2 O atomismo de Galileu, Gassendi e Boyle	23
2.3 A cosmovisão mecanicista e o átomo de Newton	26
2.4 A combustão: o flogístico e o calórico	28
2.5 O átomo químico	29
2.5.1 O átomo de Dalton	30
2.5.2 As massas atômicas	34
2.5.3 A hipótese de Prout e os isótopos	36

2.5.4	A hipótese de Avogadro e o conceito de molécula	37
2.5.5	A classificação dos elementos químicos: de Lavoisier a Mendeleiev	41
2.6	O legado de Mendeleiev	48
2.7	Fontes primárias	52
2.8	Outras referências e sugestões de leitura	53
2.9	Exercícios	55
3	O atomismo na Física: o triunfo do mecanicismo	57
3.1	A Teoria Cinética dos Gases	58
3.1.1	Os postulados básicos	59
3.1.2	O gás ideal	59
3.1.3	A compreensão da hipótese de Avogadro	64
3.1.4	A distribuição de Maxwell-Boltzmann	64
3.1.5	Os calores específicos dos gases	72
3.2	Evidências experimentais das distribuições moleculares	74
3.2.1	A fórmula de Arrhenius	75
3.2.2	A efusão de moléculas	77
3.2.3	Os primeiros experimentos sobre as distribuições moleculares	78
3.2.4	Os experimentos da década de 1940	79
3.2.5	O experimento de Miller-Kush	81
3.3	O conceito de seção de choque	83
3.3.1	O livre caminho médio	84
3.3.2	A lei de distribuição dos livres caminhos	87
3.3.3	A equação da continuidade	88
3.3.4	A definição experimental de seção de choque	90
3.3.5	A definição probabilística de seção de choque	91
3.4	Fontes primárias	94
3.5	Outras referências e sugestões de leitura	94
3.6	Exercícios	95
4	O movimento browniano e a hipótese molecular	99
4.1	O movimento aleatório ratifica a visão corpuscular da matéria	99
4.2	As contribuições de Einstein e Langevin	101
4.2.1	Os trabalhos de Einstein	101

4.2.2	A abordagem de Langevin	104
4.2.3	O passeio aleatório	106
4.3	Os experimentos de Perrin	107
4.4	Fontes primárias	112
4.5	Outras referências e sugestões de leitura	113
4.6	Exercícios	113
5	A natureza da luz: concepções clássicas	115
5.1	A natureza da luz: discreta ou contínua?	115
5.2	Fenômenos ondulatórios	118
5.2.1	A equação de onda clássica de d'Alembert	119
5.2.2	Meios não dispersivos	120
5.2.3	A solução geral da equação de d'Alembert	122
5.2.4	Ondas monocromáticas	122
5.2.5	Velocidade de fase	124
5.2.6	Velocidade de grupo	124
5.2.7	Meios dispersivos	124
5.2.8	Ondas planas monocromáticas	125
5.2.9	Ondas esféricas	126
5.2.10	Energia e <i>momentum</i> de uma onda monocromática	127
5.2.11	Ondas estacionárias	128
5.2.12	Reflexão e transmissão de ondas planas	131
5.3	A polêmica Newton-Huygens	133
5.4	Os experimentos de Young e de Fresnel	134
5.4.1	Difração da luz por uma fenda estreita	135
5.4.2	O experimento da dupla fenda	138
5.4.3	Coerência temporal	141
5.4.4	Múltiplas fendas e redes de difração	143
5.5	Fourier e a propagação do calor	146
5.6	A descrição eletromagnética da luz	148
5.6.1	As equações de Maxwell	148
5.6.2	A Eletrodinâmica Clássica de Lorentz	151
5.6.3	As equações das ondas eletromagnéticas	152
5.6.4	A energia de uma onda eletromagnética	155

5.6.5	O <i>momentum</i> de uma onda plana eletromagnética	158
5.6.6	A pressão da luz	159
5.6.7	A fórmula de Larmor	160
5.6.8	A seção de choque de Thomson	162
5.7	A propagação da luz e o éter, segundo Maxwell e Einstein	165
5.8	Fontes primárias	167
5.9	Outras referências e sugestões de leitura	168
5.10	Exercícios	169
6	A Eletrodinâmica e a Teoria da Relatividade Restrita de Einstein	171
6.1	O movimento e o espaço	171
6.2	As duas nuvens de Lord Kelvin	173
6.3	Os experimentos de Michelson e Morley	173
6.4	A covariância das leis físicas	176
6.4.1	As transformações de Galileu	177
6.4.2	As transformações de Lorentz	179
6.5	A Relatividade Restrita	181
6.5.1	Medidas próprias e não próprias	182
6.5.2	Sincronismo, simultaneidade e escalas de tempo	183
6.5.3	O não sincronismo de relógios em movimento e a simultaneidade relativa	184
6.5.4	Medidas de comprimento ao longo do movimento	185
6.5.5	A invariância da medida de comprimento na direção transversal ao movimento	186
6.5.6	A dilatação temporal	187
6.5.7	A contração da medida de comprimento na direção do movimento	189
6.5.8	O efeito Doppler	192
6.5.9	As transformações espaço-temporais entre referenciais inerciais	194
6.5.10	As transformações de velocidades	196
6.5.11	As transformações dos campos eletromagnéticos	197
6.6	A Eletrodinâmica Relativística de Einstein	200
6.6.1	A Eletrodinâmica da partícula relativística	201
6.6.2	A energia e o <i>momentum</i> de uma partícula relativística	202
6.6.3	Algumas consequências das equações de Einstein	205
6.7	A conservação de energia e de momento linear em sistemas de partículas	207
6.7.1	O referencial do centro de massa	208

6.7.2	Gases relativísticos	209
6.7.3	Sistemas nucleares	210
6.7.4	Colisões de partículas em altas energias	211
6.8	O impacto da Relatividade	213
6.9	Fontes primárias	214
6.10	Outras referências e sugestões de leitura	214
6.11	Exercícios	215
7	A desconstrução do átomo: algumas evidências do século XIX	219
7.1	O átomo de eletricidade: Faraday e a eletrólise	219
7.1.1	Os átomos de eletricidade	219
7.1.2	As leis de Faraday	223
7.2	A espectroscopia dos elementos químicos	225
7.2.1	O espectro do átomo de hidrogênio	228
7.2.2	O efeito Zeeman	229
7.3	Fontes primárias	233
7.4	Outras referências e sugestões de leitura	234
7.5	Exercícios	235
8	Os raios catódicos: a descoberta do elétron e dos raios X	237
8.1	A descoberta do elétron	237
8.1.1	Os raios catódicos	237
8.1.2	Os experimentos de Thomson	241
8.1.3	A gota fugidia de Wilson	246
8.1.4	Os experimentos de Millikan	248
8.1.5	Existem cargas fracionárias?	254
8.1.6	O modelo de Drude	255
8.1.7	As primeiras teorias do elétron	257
8.2	A descoberta dos raios X	259
8.2.1	Uma janela indiscreta: os raios X	259
8.2.2	A difração de raios X e a lei de Bragg	261
8.2.3	Medida do número de elétrons	265
8.2.4	Moseley e os espectros de raios X	266
8.3	Fontes primárias	267

8.4	Outras referências e sugestões de leitura	269
8.5	Exercícios	270
9	A Radioatividade	273
9.1	As primeiras descobertas	273
9.2	Os raios α , β e γ	277
9.3	A teoria da transmutação	279
9.3.1	A contribuição de Rutherford e Soddy	279
9.3.2	O decaimento β e a conservação de energia	281
9.3.3	A Lei de Decaimento Radioativo	282
9.4	O número de Avogadro	285
9.5	Datação radiológica	286
9.6	Fontes primárias	288
9.7	Outras referências e sugestões de leitura	288
9.8	Exercícios	289
10	A radiação de corpo negro e o retorno à concepção corpuscular da luz	291
10.1	A Mecânica Estatística	292
10.1.1	Boltzmann e o problema da irreversibilidade	296
10.2	A radiação de corpo negro	298
10.2.1	As leis de Stefan e Wien	299
10.2.2	Os osciladores de Planck	305
10.2.3	Rayleigh e os modos de vibração da radiação	308
10.2.4	A fórmula de Planck	310
10.2.5	Planck e o <i>quantum</i> de energia	311
10.2.6	Einstein e a lei de Planck	313
10.3	Einstein e a quantização da luz	318
10.3.1	O efeito fotoelétrico	320
10.3.2	Os calores específicos dos sólidos	322
10.3.3	O efeito Compton	326
10.4	Fontes primárias	330
10.5	Outras referências e sugestões de leitura	331
10.6	Exercícios	332

11 Os modelos atômicos clássicos	335
11.1 O átomo de Thomson	335
11.1.1 A emissão de energia por cargas aceleradas	336
11.1.2 As hipóteses de Thomson	337
11.1.3 As predições do modelo de Thomson	337
11.1.3.1 A emissão de radiação por um átomo	337
11.1.3.2 A estabilidade atômica	340
11.1.3.3 As linhas espectrais	344
11.1.3.4 Os anéis de elétrons e a Tabela Periódica	344
11.1.3.5 O espalhamento de partículas α por um átomo	346
11.2 O átomo de Nagaoka	348
11.2.1 As hipóteses de Nagaoka	348
11.2.2 Os problemas do modelo de Nagaoka	349
11.3 Um exemplo do método da observação indireta	349
11.4 O átomo de Rutherford	352
11.4.1 As hipóteses de Rutherford	352
11.4.2 O problema da estabilidade do átomo	353
11.4.3 Estimativa do raio nuclear	354
11.4.4 O movimento sob ação de uma força central	355
11.5 O espalhamento de partículas α pelos núcleos atômicos	359
11.6 Fontes primárias	361
11.7 Outras referências e sugestões de leitura	362
11.8 Exercícios	362
12 Os modelos quânticos do átomo	363
12.1 O átomo de Bohr	363
12.1.1 Os primórdios da descrição quântica da matéria	363
12.1.2 Os postulados de Bohr	364
12.1.3 A fórmula de Balmer como consequência dos postulados de Bohr	365
12.1.4 A origem da quantização do momento angular	368
12.1.5 Os níveis de energia de átomos como consequência da quantização do momento angular	371
12.1.6 O átomo de Bohr como um oscilador harmônico	372
12.1.7 O postulado desnecessário	373

12.1.8	Moseley, o modelo de Bohr e o número atômico	376
12.1.9	O efeito Doppler	379
12.2	A velha Mecânica Quântica	381
12.2.1	Os invariantes adiabáticos	381
12.2.2	A regra de quantização de Wilson-Sommerfeld	383
12.2.3	A estrutura fina dos espectros atômicos	385
12.2.4	A teoria relativística de Sommerfeld	388
12.3	De que é feito o núcleo atômico?	389
12.4	Fontes primárias	391
12.5	Outras referências e sugestões de leitura	391
12.6	Exercícios	392
13	A Mecânica Quântica Matricial	393
13.1	Os novos argumentos probabilísticos de Einstein	394
13.1.1	As probabilidades de transição e a radiação de corpo negro	394
13.1.2	Fontes de laser	396
13.2	A Mecânica Matricial de Heisenberg, Born e Jordan	397
13.2.1	A regra de comutação entre a posição e o <i>momentum</i>	400
13.2.2	As equações de movimento de Heisenberg	400
13.2.3	O oscilador harmônico: as intensidades das linhas espectrais do hidrogênio	401
13.3	Fontes primárias	405
13.4	Outras referências e sugestões de leitura	405
13.5	Exercícios	406
14	A Mecânica Quântica Ondulatória	407
14.1	As hipóteses de Louis de Broglie	407
14.1.1	Os pacotes de ondas-piloto	410
14.1.2	A quantização de Wilson-Sommerfeld segundo Louis de Broglie	414
14.2	A difração de elétrons	415
14.2.1	Os experimentos de Davisson, Kunsman e Germer	416
14.2.2	Os experimentos de G.P. Thomson	418
14.2.3	O efeito Kapitza-Dirac	419
14.3	A equação de Schrödinger	421
14.3.1	A analogia de Hamilton e a equação independente do tempo	421

14.3.2	A equação de Schrödinger dependente do tempo	423
14.3.3	O limite das órbitas clássicas	425
14.4	A interpretação probabilística de Born	426
14.4.1	A normalização da função de onda	429
14.4.2	Incertezas e valores médios da posição	430
14.4.3	A invariância da equação de Schrödinger	431
14.5	O movimento da partícula em campos conservativos	433
14.5.1	Os estados estacionários	434
14.5.2	Os estados não estacionários	435
14.5.3	A ortogonalidade dos autoestados de energia	435
14.5.4	A conservação de energia	437
14.5.5	Os estados quase estacionários	439
14.5.6	A relação entre as formulações matricial e ondulatória	439
14.5.7	A partícula livre	440
14.5.8	O operador <i>momentum</i>	441
14.5.9	Incertezas e valores médios do <i>momentum</i>	443
14.6	As relações de incerteza de Heisenberg	444
14.6.1	Aplicações das relações de incerteza	447
14.7	As equações de Ehrenfest	451
14.7.1	O limite clássico da Mecânica Quântica	453
14.8	Generalizações e sistemas de partículas	456
14.8.1	O operador momento angular orbital	456
14.8.2	O acoplamento do momento angular orbital com o campo magnético	458
14.8.3	A equação de Schrödinger para N partículas	460
14.9	Fontes primárias	461
14.10	Outras referências e sugestões de leitura	462
14.11	Exercícios	463
15	Aplicações da equação de Schrödinger	469
15.1	A analogia entre a Mecânica Quântica e a Óptica	469
15.2	Problemas de potenciais descontínuos: poços e barreiras de potenciais	471
15.2.1	Espectros discretos de energia: autoestados ligados	472
15.2.2	Espectros contínuos de energia: estados não ligados	474
15.2.3	O poço de potencial infinito	475

15.2.4	A barreira de potencial retangular	479
15.3	O oscilador harmônico simples	482
15.3.1	Os níveis de energia do oscilador	483
15.3.2	Os autoestados de energia do oscilador	486
15.3.2.1	A função geratriz dos polinômios de Hermite	487
15.3.2.2	A fórmula de Rodrigues para os polinômios de Hermite	488
15.3.2.3	Relações de recorrência para os polinômios de Hermite	489
15.3.2.4	A ortogonalidade e a normalização dos autoestados de energia	490
15.4	O átomo de hidrogênio	492
15.4.1	A separação das variáveis	494
15.4.2	A parte angular	494
15.4.2.1	Os polinômios de Legendre e as funções harmônicas esféricas	494
15.4.2.2	Determinação dos primeiros polinômios e das funções associadas de Legendre não normalizadas	499
15.4.2.3	Diagramas polares dos polinômios e das funções associadas de Legendre	502
15.4.2.4	A normalização dos primeiros polinômios e das funções associadas de Legendre	503
15.4.2.5	A função geratriz, a fórmula de Rodrigues e as relações de recorrência para os polinômios de Legendre	505
15.4.2.6	A ortogonalidade e a normalização dos polinômios de Legendre	505
15.4.2.7	A fórmula de Rodrigues e as relações de recorrência para as funções associadas de Legendre	507
15.4.2.8	A ortogonalidade e a normalização das funções associadas de Legendre	507
15.4.3	A parte radial	509
15.4.3.1	Comportamento assintótico e espectro de energia do átomo de hidrogênio	511
15.4.3.2	O estado fundamental e os primeiros estados excitados	514
15.4.3.3	As distribuições de probabilidade de presença radiais do elétron no átomo de hidrogênio	516
15.4.3.4	Notação espectroscópica	518
15.4.3.5	As funções radiais e os polinômios e funções associadas de Laguerre	520
15.4.3.6	Fórmulas de recorrência, de Rodrigues e função geratriz dos polinômios de Laguerre	522
15.4.3.7	Ortogonalidade dos polinômios de Laguerre e das funções radiais	523
15.4.4	Regras de seleção	524
15.5	Fontes primárias	527
15.6	Outras referências e sugestões de leitura	527

15.7 Exercícios	527
16 A equação de Dirac	531
16.1 O milho e a pérola	532
16.2 A equação relativística de Dirac	533
16.3 A descoberta do pósitron	538
16.4 A pérola e o milho: moral da fábula	541
16.5 A equação de Pauli como limite não relativístico da equação de Dirac	543
16.6 O <i>spin</i> do elétron	545
16.6.1 As origens do conceito de <i>spin</i>	545
16.6.2 O experimento de Stern-Gerlach	546
16.6.3 O <i>spin</i> e a Tabela Periódica	547
16.7 Fontes primárias	549
16.8 Outras referências e sugestões de leitura	550
16.9 Exercícios	550
17 Os indivisíveis de hoje	551
17.1 Os <i>quarks</i>	551
17.2 Uma herança de Rutherford	553
17.3 Fontes primárias	558
17.4 Outras referências e sugestões de leitura	558
17.5 Exercícios	559
Constantes e unidades físicas	561
Referências Bibliográficas	563
Índice Onomástico	573
Índice de Assuntos	581