
Introdução à Mecânica Quântica

conceitos fundamentais e aplicações

Volume 1



CONSELHO EDITORIAL DA LF EDITORIAL

Amílcar Pinto Martins – Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell – Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva – Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes – UNED, Madri

Iran Abreu Mendes – Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford – Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida – Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo – Universidade Estadual Paulista – UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa – Universidade Federal do Ceará

Maria Luisa Oliveras – Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia – Universidade de Lisboa

Teresa Vergani – Universidade Aberta de Portugal

Introdução à Mecânica Quântica

conceitos fundamentais e aplicações

Volume 1

José Roberto Pinheiro Mahon

Instituto de Física Armando Dias Tavares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro



2026

Copyright © 2026 o autor
1ª Edição

Direção editorial: Victor Pereira Marinho e José Roberto Marinho

Capa: Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Mahon, José Roberto Pinheiro
Introdução à mecânica quântica: conceitos fundamentais e aplicações: volume 1 /
José Roberto Pinheiro Mahon. – São Paulo: LF Editorial, 2026.

Bibliografia.
ISBN 978-65-5563-795-3

1. Física 2. Mecânica quântica I. Título.

26-374147.1

CDD-530.12

Índices para catálogo sistemático:
1. Mecânica quântica: Física 530.12

Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida
sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.
Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107
da Lei Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



EDITORIAL

LF Editorial

www.livrariadafisica.com.br

www.lfeditorial.com.br

(11) 2648-6666 | Loja do Instituto de Física da USP

(11) 3936-3413 | Editora

A meus pais, José e Zélia.

A Geisa, com amor e sempre presente.

A meus mestres,

Armando Turtelli Jr.,

Carlos Ourivio Escobar e

Cesare Mansueto Giulio Lattes.

Sobre o Autor



José Roberto Pinheiro Mahon, nascido em Bauru, no Estado de São Paulo, em 1955, é professor e pesquisador do Departamento de Física Nuclear e Altas Energias, no Instituto de Física Armando Dias Tavares da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Graduado em matemática e tecnologia mecânica em Sorocaba (FAFI e FATEC-UNESP), fez seu mestrado em física na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e obteve seu doutorado em física pela Universidade de São Paulo (USP). Com formação científica na área de física de partículas e campos, desenvolveu pesquisas em física experimental de altas energias e trabalhou em colaborações internacionais tanto no Fermilab, Estados Unidos, como no CERN, na Europa. Atualmente dedica-se as teorias clássica e quântica de campos e fundamentos de física (eletromagnetismo, mecânica quântica e mecânica estatística). Publicou mais de 135 trabalhos em periódicos científicos internacionais, além de apresentações em congressos internacionais. Orienta alunos de graduação e de pós-graduação. É coautor dos livros *Estimativas e erros em experimentos de Física*, já na terceira edição (2013) publicado pela EdUERJ e *Introdução à QCD perturbativa* (2013) publicado pela LTC Editora, é autor dos livros *Mecânica Quântica - desenvolvimento contemporâneo com aplicações* (2011) também publicado pela LTC Editora, *Mecânica Clássica - fundamentos teóricos e aplicações* (2020), *Teoria do Campo Eletromagnético e da Relatividade* (2021) e *Mecânica Estatística - desenvolvimento teórico e suas aplicações* (2024) publicados pela Editora Livraria da Física.

Prefácio

A mecânica quântica é um dos pilares fundamentais da física moderna. Forma com a mecânica clássica, o eletromagnetismo e a mecânica estatística a base fundamental na formação de um físico. Este texto está baseado em um curso de pós-graduação em mecânica quântica que ministrei nos últimos anos no INSTITUTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.

O objetivo do texto é apresentar a mecânica quântica numa forma moderna, desde os conceitos fundamentais, passando pelas ferramentas matemáticas da mecânica quântica, a dinâmica quântica, a equação de onda de Schrödinger – Fundamentos e Aplicações, método WKB, integrais de caminho de Feynman, propriedades gerais do *momentum* angular, espalhamento e simetrias, teorema de Bell e suas consequências, até as equações relativísticas. Ainda incluímos vários exemplos atuais, suas aplicações (técnico - científica) e experimentos recentes. Tento colocar no texto as informações que deverão ser úteis aos estudantes que irão utilizá-lo. Os tópicos introduzidos são tratados de forma compreensiva, procurando-se expor claramente as deduções dos principais resultados. Espera-se que o estudante tenha familiaridade com o material básico de um curso de estrutura da matéria (um ano) e mecânica analítica (nível de graduação), bem como de álgebra linear e de física matemática abordados nos cursos de Física.

Neste texto, os temas da mecânica quântica foram divididos em 15 capítulos, distribuídos em dois volumes. No volume 1, temos: Introdução aos Conceitos Fundamentais; Ferramentas Matemáticas da Mecânica Quântica; Dinâmica Quântica; A Equação de Schrödinger - Teoria e Aplicações; Método de Aproximação WKB; Integrais de Caminho de Feynman; Teoria do *Momentum* Angular e Propriedades Gerais; Espalhamento. No volume 2, temos: Simetrias na Mecânica Quântica; Emaranhamento Quântico, EPR, Teorema de Bell e Suas Consequências; Métodos de Aproximação - Métodos Perturbativos; Teoria Formal do Espalhamento; Partículas Idênticas; Quantização do Campo Eletromagnético e Equações Relativísticas. Este texto poderá ser usado por estudantes avançados de graduação e por estudantes de pós-graduação, além de ser usado para consultas e preparação de tópicos especiais.

Agradecimentos Desejo agradecer aos estudantes que proporcionaram a motivação para escrever este texto. Em especial André Calvet Correa solucionando problemas em teoria de perturbação e colisões, Ana Thereza Bastos Garcia da Rosa desenvolvendo através das integrais de caminho o problema do oscilador harmônico forçado, Alan Guzmán colaborando com teoria de gauge e monopolos magnéticos, Márcio Capri (hoje professor do Instituto de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro) que solucionou os problemas propostos durante o período em que foi meu monitor no curso de graduação, Jordan Martins que propôs problemas interessantes quando foi meu estudante de graduação, André Sá de Mattos e Tais Dias Izidoro que estudaram com detalhes a solução do oscilador harmônico usando as funções hipergeométricas, além de Marcello Fernandes Malvão Luciano pela discussões dos fundamentos da mecânica quântica.

Agradeço também aos colegas docentes do Instituto que incentivaram na preparação deste trabalho. Em especial aos Profs. José Umberto Cinelli Lobo de Oliveira (já falecido), pelas discussões dos aspectos fundamentais da mecânica quântica e valiosa ajuda na apresentação do texto; Vitor Oguri, pelas valiosas sugestões, discussões dos aspectos fundamentais, conceituais e da matemática usada na mecânica quântica, longas horas de discussão sobre os experimentos básicos e suas interpretações. Também um agradecimento especial ao Prof. Cesar Linhares pelas discussões sobre WKB e das interpretações da mecânica quântica relativística e propagadores de Feynman. Minhas longas conversas com esses amigos e colegas de trabalho foram um grande estímulo para realização deste novo texto de mecânica quântica. Finalmente, um agradecimento especial ao Eduardo de Mattos pela realização e cuidado com as figuras.

UERJ, Rio de Janeiro, 2026.

J. R. P. Mahon

Sumário

Sobre o Autor	vii
Prefácio	ix
1 Introdução aos Conceitos Fundamentais	1
1.1 Estrutura da Matéria	1
Escalas de Comprimento: da Cosmologia às Partículas Elementares	1
Estados da Matéria	2
Constituintes Elementares	5
Interações Fundamentais	7
1.2 Física Clássica e Quântica	8
1.3 Radiação do Corpo Negro	10
Lei de Stefan-Boltzmann	11
Lei de Wien	11
Densidade Espectral de Rayleigh-Jeans	11
Distribuição Espectral de Planck	13
Calor Específico dos Sólidos	15
1.4 Efeito Fotoelétrico	16
1.5 Efeito Compton	17
1.6 Espectros Atômicos e Séries Espectrais	19
1.7 O Modelo de Bohr para o Átomo de Hidrogênio	20
Experiência de Franck-Hertz	22
1.8 Regras de Quantização de Wilson-Sommerfeld	24
1.9 Mecânica Quântica Matricial	25
1.10 Postulados de de Broglie	30
Experimento de Davisson e Germer	31
1.11 Interferência em um Sistema de Duas Fendas	32
1.12 O Princípio da Superposição	35
Experimentos de Jönsson e de Tonomura	36
Difração e Interferência de Nêutrons Frios e Átomos	38
Interpretação dos Experimentos	40
Desigualdade de Heisenberg	43
Interferômetro de Mach-Zehnder	46
1.13 Pacotes de Onda e Relação de Incerteza	48
Princípio da Complementaridade	49

1.14	Equação de Onda	49
	Problemas	52
	Leitura Recomendada	55
2	Ferramentas Matemáticas da Mecânica Quântica	56
2.1	Espaço da Função de Onda de uma Partícula	56
	Estrutura do Espaço da função de onda $\mathcal{F}$	57
	Bases Ortonormais Discretas em $\mathcal{F}$	59
2.2	Espaço de Estado e Notação de Dirac – <i>Bra</i> e <i>Ket</i>	60
	<i>Kets</i>	61
	<i>Bra</i> e Produto Interno	62
2.3	Operadores Lineares	64
2.4	Base dos <i>Kets</i> e Representação Matricial	66
	Base dos <i>Kets</i>	67
	Representação Ortonormal de Base Discreta ou Contínua	68
	Representação Matricial	69
2.5	Mudança de Base – Transformação Unitária	72
	Transformação Unitária	72
	Mudança de Base	73
	Matriz Unitária	74
	Transformação Unitária de Operadores	74
	Transformação Unitária Infinitesimal	74
2.6	Comutadores e Regras de Comutação	76
2.7	Observáveis e Relação da Incerteza	78
	Autovalores Degenerados	79
	Princípio de Incerteza – Relação Geral	79
	Princípio de Incerteza – Nota Especial	81
	Pacotes de Mínima Dispersão	82
	Desigualdade de Schwarz	82
2.8	Posição, <i>Momentum</i> e Translação	83
	Translação	84
	Espaço de <i>Momentum</i>	85
	Pacotes de Onda Gaussianas	86
2.9	Polarização: Fóton e Partículas de $Spin\ \frac{1}{2}$	87
	Polarização da Luz e Polarização do Fóton	87
	Partículas de $spin\ \frac{1}{2}$	97
	Aplicações no Experimento de Stern-Gerlach	102
	Preparação dos Estados $ \pm\rangle_x$, $ \pm\rangle_y$ e $ \pm\rangle_u$	104
	Problemas	107
	Leitura Recomendada	110
3	Dinâmica Quântica	111
3.1	Postulados da Mecânica Quântica	111
	Introdução	111
	Enunciados dos Postulados da Mecânica Quântica	113
3.2	Evolução Temporal	119
3.3	Derivação da Equação de Schrödinger	120
3.4	Solução Formal para $U(t, t_0)$	121

Primeiro Caso	121
Segundo Caso	121
Terceiro Caso	121
3.5 Dependência Temporal do Valor Esperado	122
3.6 Representações de Schrödinger, Heisenberg e Interação	123
Representação de Schrödinger	123
Representação de Heisenberg	124
Equação de Movimento de Heisenberg	124
Representação de Interação	125
3.7 Precessão do <i>Spin</i>	127
Nota sobre o Fator g	129
3.8 Ressonância Magnética – Parte 1	130
Experimento de Rabi	132
3.9 Oscilações de Neutrinos	133
3.10 Oscilador Harmônico	134
<i>Autokets</i> e Autovalores de Energia	135
Elementos de Matriz dos Operadores $a^\dagger$ e a	137
Funções de Onda no Espaço de Posição	139
Propriedades Estatísticas do Oscilador Quântico	140
Incertezas na Posição e no <i>Momentum</i>	141
3.11 Evolução Temporal do Oscilador Harmônico	142
3.12 Estados Coerentes	143
3.13 Oscilador Harmônico Forçado	146
3.14 Matriz Densidade	150
Operador Matriz Densidade	151
Matriz Densidade – Sistemas de <i>Spin</i> $\frac{1}{2}$	155
Evolução Temporal de um Sistema	157
Sistemas de Dois Níveis	158
Polarização	166
Mecânica Estatística Quântica	168
3.15 Equação de Onda de Schrödinger	173
Problemas	175
Leitura Recomendada	178
4 A Equação de Schrödinger – Teoria e Aplicações	179
4.1 A Equação de Onda e a Interpretação de ψ	179
4.2 Estados Estacionários e Estados Não Estacionários	184
Estados Estacionários	184
Estados Não Estacionários	186
Ortogonalidade dos Autoestados	186
4.3 Valor Esperado – Espaços de Coordenada e de <i>Momentum</i>	188
A Função Delta	190
4.4 Operadores	193
Adição e Multiplicação de Operadores	197
A Derivada Temporal de um Operador	198
Operadores Unitários – Operador Deslocamento	199
4.5 Propagador Para a Equação de Schrödinger	201
Partícula Livre	201

Propagador da Partícula Livre	206
Funções de Green e Delta de Dirac	207
Propagador no Caso Geral	210
Função de Green do Oscilador Harmônico	213
4.6 Teorema de Ehrenfest	215
4.7 Teorema Virial	216
4.8 Teorema de Feynman-Hellmann	217
4.9 Analogia entre a Quântica e a Óptica	218
4.10 Potencial Degrau – Barreira de Potencial	219
Caso 1: $E > V_0$	219
Caso 2: $0 < E < V_0$	221
Caso Especial: $E < 0$	223
4.11 Barreira de Potencial Retangular	223
Caso 1: $E < V_0$	223
Caso 2: $E > V_0$	228
4.12 Poço Quadrado Unidimensional	229
Caso 1: $-V_0 < E < 0$	229
Caso 2: $E > 0$	234
4.13 Potencial Delta	234
4.14 Potenciais Periódicos	235
Exemplo: Potencial de Kronig-Penney	237
4.15 Oscilador Harmônico Linear	241
Equações Hipergeométrica e Hipergeométrica Confluente	247
Solução da Equação do Oscilador	250
Problemas	251
Leitura Recomendada	257
5 Método de Aproximação WKB	258
5.1 O limite clássico	258
5.2 Esquema da Aproximação WKB, de Wentzel, Kramers e Brillouin	260
Condição de Validade da Aproximação WKB	264
5.3 Fórmulas de Conexão	266
Funções de Airy e Fórmulas de Conexão	268
Soluções WKB da Equação de Airy $\psi'' = z\psi$	270
Fenômeno de Stokes	274
5.4 Barreira de Potencial – Efeito Túnel	276
5.5 Estados Ligados	282
5.6 Exemplos Adicionais	287
Problemas	299
Leitura Recomendada	301
6 Integrais de Caminho de Feynman	302
6.1 Propagadores	302
6.2 Evolução da Amplitude de Transição	305
6.3 Integrais de Caminho de Feynman	306
6.4 Aproximação Semiclássica	308
6.5 Partícula Livre	311
6.6 Oscilador Harmônico	312

Oscilador Harmônico com Frequência Dependente do Tempo	319
Oscilador Harmônico com Massa e Frequência Dependentes do Tempo	321
Oscilador Harmônico Forçado	325
6.7 Integral de Caminho Radial	328
Oscilador Harmônico Radial	332
6.8 Efeito Aharonov-Bohm	336
Sumário	343
6.9 Monopolos Magnéticos	344
6.10 Método Semiclássico	348
Método do Ponto de Sela	348
Métodos Semiclássicos nas Integrais de Caminho	350
6.11 Integral de Caminho para o Poço Duplo	353
Ístantons	353
Modos Zero	357
Integral de Ístanton	360
6.12 Mecânica Estatística	365
Problemas	367
Leitura Recomendada	369
7 Teoria do <i>Momentum</i> Angular e Propriedades Gerais	370
7.1 <i>Momentum</i> Angular Orbital	370
Energia Cinética e <i>Momentum</i> Angular	373
7.2 Problema de Autovalores do <i>Momentum</i> Angular	374
Método Algébrico	376
Representação Matricial do Operador <i>Momentum</i> Angular	378
7.3 Autofunções do <i>Momentum</i> Angular	380
Função Geratriz	381
Função Associada de Legendre	382
Harmônicos Esféricos	382
Determinação dos Harmônicos Esféricos	383
Relações de Recorrência	385
Teorema da Adição	386
7.4 Movimento de um Rotor Rígido	388
7.5 Redução do Problema de Força Central	388
Partícula Livre como Problema de Força Central	391
7.6 Ondas Planas em Termos dos Harmônicos Esféricos	393
Caixa Esférica	395
7.7 Potencial de Coulomb – Átomo de Hidrogênio	397
Polinômios de Laguerre	399
Autovalores e Autofunções Normalizadas	400
7.8 Teoria Geral do <i>Momentum</i> Angular	403
7.9 Rotações e <i>Momentum</i> Angular – Parte 1	409
Rotações na Mecânica Quântica	410
7.10 Sistema de $Spin \frac{1}{2}$ e Rotações Finitas	412
Precessão do <i>Spin</i> – Revisado	414
Interferômetro de Nêutrons	415
7.11 Formalismo de Pauli	417
Rotações no Formalismo de Pauli	419

7.12	Os Grupos $SO(3)$, $SU(2)$ e $SU(3)$	420
	Alguns Grupos Matriciais Importantes	420
	Grupo Ortogonal	420
	Grupo Unimodular Unitário	421
	Forma Geral das Matrizes de $SU(2)$	422
	Relação entre $SO(3)$ e $SU(2)$	423
	O Grupo $SU(3)$	424
7.13	Rotações de Euler	425
7.14	Rotações e <i>Momentum</i> Angular – Parte 2	427
	Representação do Operador de Rotação para $\vec{J}$	428
	Harmônicos Esféricos como Matrizes de Rotação	429
7.15	Adição de <i>Momentum</i> Angular	430
	<i>Momentum</i> Angular Orbital e $Spin \frac{1}{2}$	430
	Duas Partículas de $Spin \frac{1}{2}$	432
	Teoria Formal – Caso Geral	433
	Relação de Recorrência para os Coeficientes de Clebsch-Gordan	437
	Coeficientes de Racah	439
	Séries de Clebsch-Gordan	440
7.16	Teorema de Wigner-Eckart	441
7.17	Átomo de Hidrogênio via Integrais de Caminho	445
	Problemas	458
	Leitura Recomendada	462
8	Espalhamento	464
8.1	Introdução – Importância dos Fenômenos de Colisão	465
8.2	Amplitude de Espalhamento	466
8.3	Seção de Choque Diferencial	467
8.4	Método de Ondas Parciais	469
	Espalhamento por um Poço de Potencial Esférico	478
	Espalhamento por uma Esfera Rígida	479
8.5	Teorema Óptico	480
8.6	Espalhamento Elástico e Inelástico	481
8.7	Espalhamento Ressonante	483
	Potencial Delta de Casca	484
8.8	Efeito Ramsauer-Townsend	484
8.9	Espalhamento – Função de Green – Parte 1	485
8.10	Aproximação de Born	487
	Potencial Coulombiano Blindado	488
	Espalhamento de Elétrons por um Átomo	489
8.11	Aproximação Eikonal	490
8.12	Espalhamento de Partículas Idênticas	492
8.13	Espalhamento em um Campo Coulombiano	493
8.14	Espalhamento de Partículas com $Spin$	496
	Problemas	498
	Leitura Recomendada	500

Capítulo 1

Introdução aos Conceitos Fundamentais

A *mecânica quântica* é um tratamento teórico na qual podemos descrever, relacionar e prever vasto campo de sistemas físicos, desde partículas através do núcleo, átomos e radiação até moléculas e matéria condensada. Esta disciplina é um dos pilares da física contemporânea.

A mecânica quântica se aplica a sistemas microscópicos, em que a *mecânica clássica* perde a validade, como, por exemplo, a dualidade onda-partícula ou partícula-onda. A descrição quântica é de tal natureza que dá margem, em particular, a que um mesmo sistema físico tenha comportamento contraditório em situações observáveis diferentes. Novamente usamos o exemplo do comportamento ondulatório e do comportamento corpuscular.

Não é possível deduzir a mecânica quântica de noções ou esquemas clássicos, muito menos construí-la como uma extensão da mecânica clássica. O objetivo deste capítulo é apresentar uma introdução aos conceitos fundamentais da mecânica quântica.

1.1 Estrutura da Matéria

Escala de Comprimento: da Cosmologia às Partículas Elementares A Tabela 1.1 apresenta a ordem de grandeza em metros das dimensões de alguns objetos típicos, partindo das dimensões do universo e descendo até as da física subatômica.¹ Uma unidade de comprimento conveniente para distâncias astrofísicas é ano-luz: $1 \text{ ano-luz} = 0,95 \times 10^{16} \text{ m}$. Os submúltiplos úteis do metro usados em física microscópica são o micrômetro: $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$, o nanômetro: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, e o femtômetro (ou fermi, F): $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$. A exploração de objetos em escala microscópica é frequentemente realizada por meio de radiação eletromagnética,² cujo comprimento de onda é da ordem de grandeza das dimensões características do objeto a ser estudado (por meio de um microscópio, raios-X, etc.). Sabemos que o limite de resolução é fixado pelo comprimento de onda usado: algumas frações de μm para um microscópio usando luz visível, algumas frações de nanômetro quando usamos raios-X. A faixa de comprimentos de onda da

¹ Bactéria *Escherichia coli*, mais conhecida pela abreviatura *E. coli*, é uma bactéria bacilar Gram-negativa que se encontra normalmente no trato gastrointestinal inferior dos organismos de sangue quente (endotérmicos). A maioria das estirpes de *E. coli* são inofensivas, mas alguns sorotipos podem causar graves intoxicações alimentares nos seres humanos, e são ocasionalmente responsáveis pela recolha de produtos alimentícios devido à sua contaminação. As estirpes inofensivas constituem parte da microbiota intestinal humana normal, e podem ser benéficas para os seus hospedeiros ao produzirem vitamina K₂, e impedirem que ali se estabeleçam bactérias patogénicas.

Os *fulerenos* são uma forma alotrópica do carbono, a terceira mais estável após o diamante e a grafite. Tornaram-se populares entre os químicos, tanto pela sua beleza estrutural quanto pela sua versatilidade para a síntese de novos compostos químicos e propriedades físicas e químicas específicas.

² Outras técnicas de exploração são o espalhamento de nêutrons, microscopia eletrônica, microscopia de tunelamento, etc.

Tabela 1.1 Ordens de grandeza de algumas distâncias típicas em metros.

	Tamanho (m)
Universo conhecido	$1,3 \times 10^{26}$
Raio da Via Láctea	$\sim 5 \times 10^{20}$
Distância Sol-Terra	$1,5 \times 10^{11}$
Raio da Terra	$6,4 \times 10^6$
Homem	$\sim 1,7$
Inseto	0,01 a 0,001
Bactéria Escherichia coli	$\sim 2 \times 10^{-6}$
Vírus HIV	$1,1 \times 10^{-7}$
Fulereo C_{60}	$0,7 \times 10^{-9}$
Átomo	$\sim 10^{-10}$
Núcleo de chumbo	7×10^{-15}
Próton	$0,8 \times 10^{-15}$

radiação eletromagnética (infravermelho, visível, *etc.*) está resumida na Fig. 1.1.

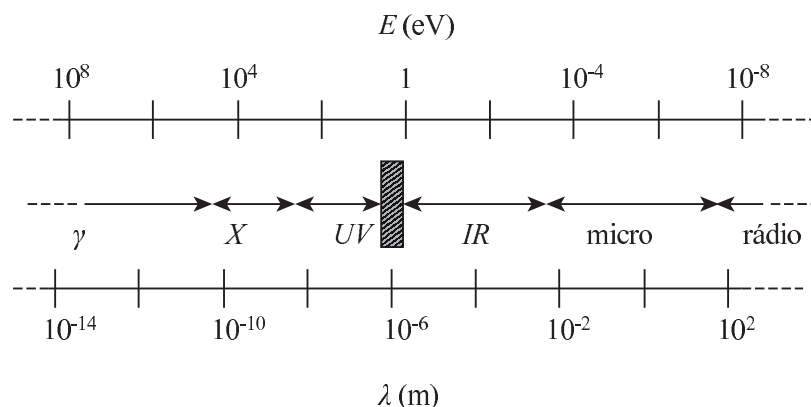


Figura 1.1 Comprimentos de onda da radiação eletromagnética e as energias de fótons correspondentes. Os limites entre os diferentes tipos de radiação (por exemplo, entre raios- γ e raios- X) não são estritamente definidos. Um fóton de energia $E = 1$ eV tem comprimento de onda $\lambda = 1,24 \times 10^{-6}$ m, frequência $\nu = 2,42 \times 10^{14}$ Hz e frequência angular $\omega = 1,52 \times 10^{15}$ rad s $^{-1}$.

Estados da Matéria Estamos particularmente interessados em fenômenos que ocorrem em escala microscópica e, por isso, é útil lembrar algumas das noções básicas sobre a descrição microscópica da matéria. A matéria pode existir em duas formas diferentes: uma *forma ordenada*, *i.e.*, um *sólido cristalino*, e uma *forma não ordenada*, tais como um líquido, um gás ou um *sólido amorfo*.

O sólido cristalino exibe ordenação de longo alcance. A Fig. 1.2 dá um exemplo da estrutura microscópica do cloreto de sódio: vemos que o padrão do cristal se repete com uma periodicidade $l = 0,56$ nm, formando a rede cristalina. Partindo de um íon de cloro ou de sódio, e seguindo uma das bordas da estrutura cúbica, encontraremos um íon de cloro ou um íon de sódio a uma distância $n \times 0,56$ nm, em que n é um inteiro. Isso é chamado de *ordem de longo alcance*.

Líquidos, gases e sólidos amorfos não possuem ordem de longo alcance. Tomamos como exemplo um líquido monoatômico, tal como o argônio líquido. Para uma primeira aproximação, os átomos de argônio podem ser representados como esferas impenetráveis de diâmetro $\sigma \simeq 0,36$ nm. Na Fig. 1.3, mostramos esquematicamente uma configuração atômica para um líquido em que as esferas praticamente se tocam, mas estão dispostas de forma desordenada. Tomando o centro de um átomo como origem, a probabilidade