



Física Quântica ^{Para} Leigos

Esta Folha de Cola tem o objetivo de complementar o *Física Quântica Para Leigos*, tradução da 3ª edição, de Andrew Zimmerman Jones. Ela começa com uma revisão de alguns operadores úteis usados nos cálculos de mecânica quântica. Em seguida, aborda um método útil para resolver a equação de Schrödinger para a função de onda quântica e como você pode usar essa função de onda para calcular probabilidades na física quântica. Por fim, apresenta alguns momentos fundamentais de uma das descobertas mais importantes da física quântica: a compreensão da dualidade onda-partícula.

COMO DENOTAR VETORES E OPERADORES EM CÁLCULOS DE FÍSICA QUÂNTICA

A notação matemática usada na física quântica é conhecida como *notação bra-ket* e *notação de Dirac*. É uma forma de escrever vetores quânticos em uma notação simplificada que lhe permite atuar sobre eles sem precisar entrar em detalhes da função de onda, exceto pelas características específicas com as quais deseja lidar.

OPERADORES

Um *operador* é uma regra matemática que, ao operar em um ket, transforma-o em um novo ket.

$$A|\psi\rangle = |\psi'\rangle$$

$$\langle\psi|A^\dagger = \langle\psi'|$$

Aqui estão vários exemplos dos tipos de operadores que você verá nos cálculos de mecânica quântica:

- **Hamiltoniano (H).** Ao aplicar este operador (que é diferente para cada situação física), obtemos E, a energia da partícula representada pelo ket. Veja que E é uma quantidade escalar:

$$H|\psi\rangle = E|\psi\rangle$$

- **Unidade ou identidade (I).** O operador de unidade ou identidade deixa os kets inalterados:

$$I|\psi\rangle = |\psi\rangle$$

- **Gradiente (∇).** Este operador emprega derivadas (a taxa variável de mudança de uma função com relação às diferentes variáveis de posição) e funciona da seguinte forma:

$$\nabla|\psi\rangle = \frac{\partial}{\partial x}|\psi\rangle \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}|\psi\rangle \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}|\psi\rangle \mathbf{k}$$



Física Quântica ^{Para} leigos

- **Momento linear (P).** Este operador é usado para encontrar o momento linear; na mecânica quântica, ele fica assim:

$$P|\psi\rangle = -i\hbar\nabla|\psi\rangle$$

- **Laplaciano (∇^2).** Você usa este operador, que é muito parecido com um gradiente de segunda ordem, para criar o operador hamiltoniano para calcular a energia:

$$\nabla^2|\psi\rangle = \nabla \cdot \nabla|\psi\rangle = \frac{\partial^2}{\partial x^2}|\psi\rangle + \frac{\partial^2}{\partial y^2}|\psi\rangle + \frac{\partial^2}{\partial z^2}|\psi\rangle$$

Um operador A é considerado *linear* se atender à seguinte condição:

$$A(c_1|\psi\rangle + c_2|\phi\rangle) = c_1A|\psi\rangle + c_2A|\phi\rangle$$

OPERADORES HERMITIANOS

Para um operador A, o adjunto hermitiano é denotado. Veja algumas relações úteis relacionadas aos adjuntos hermitianos:

$$(aA)^\dagger = a^* A^\dagger$$

$$(A^\dagger)^\dagger = A$$

$$(A+B)^\dagger = A^\dagger + B^\dagger$$

$$(AB)^\dagger = B^\dagger A^\dagger$$

$$(AB|\psi\rangle)^\dagger = \langle\psi|B^\dagger A^\dagger$$

COMUTADOR

O comutador dos operadores A e B é definido da seguinte forma:

$$[A, B] = AB - BA$$

Consideramos que dois operadores comutam-se quando:

$$[A, B] = 0$$



Física Quântica

Para
leigos

Física Quântica Para Leigos

Copyright © 2025 STARLIN ALTA EDITORA E CONSULTORIA LTDA.

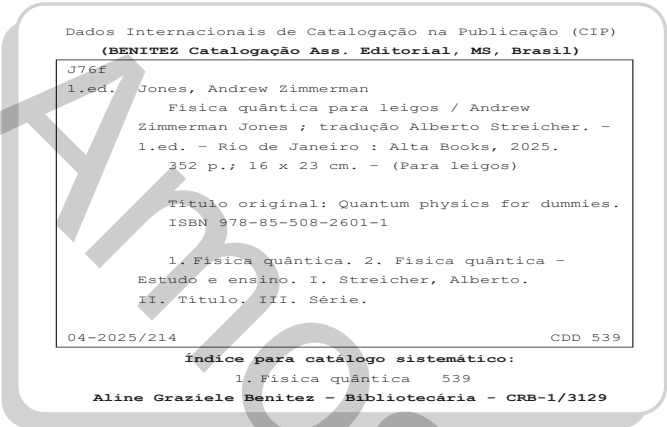
Copyright ©2024 Andrew Zimmerman Jones.

ISBN: 978-85-508-2601-1

Alta Books é uma Editora do Grupo Editorial Alta Books.

Translated from original Quantum Physics For Dummies © 2024 by Wiley Publishing, Inc. ISBN 978-1-394-22550-7. This translation is published and sold by John Wiley, the owner of all rights to publish and sell the same. PORTUGUESE language edition published by Starlin Alta Editora e Consultoria Eireli, Copyright © 2025 by STARLIN ALTA EDITORA E CONSULTORIA LTDA.

Impresso no Brasil – 1ª Edição, 2025 – Edição revisada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 2009.



Todos os direitos estão reservados e protegidos por Lei. Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da editora, poderá ser reproduzida ou transmitida. A violação dos Direitos Autorais é crime estabelecido na Lei nº 9.610/98 e com punição de acordo com o artigo 184 do Código Penal.

O conteúdo desta obra foi formulado exclusivamente pelo(s) autor(es).

Marcas Registradas: Todos os termos mencionados e reconhecidos como Marca Registrada e/ou Comercial são de responsabilidade de seus proprietários. A editora informa não estar associada a nenhum produto e/ou fornecedor apresentado no livro.

Material de apoio e erratas: Se parte integrante da obra e/ou por real necessidade, no site da editora o leitor encontrará os materiais de apoio (download), errata e/ou quaisquer outros conteúdos aplicáveis à obra. Acesse o site www.altabooks.com.br e procure pelo título do livro desejado para ter acesso ao conteúdo.

Suporte Técnico: A obra é comercializada na forma em que está, sem direito a suporte técnico ou orientação pessoal/exclusiva ao leitor.

A editora não se responsabiliza pela manutenção, atualização e idioma dos sites, programas, materiais complementares ou similares referidos pelos autores nesta obra.

Grupo Editorial Alta Books

Produção Editorial: Grupo Editorial Alta Books
Diretor Editorial: Anderson Vieira
Editor da Obra: Gorki Starlin
Vendas Governamentais: Cristiane Mutüs
Gerência Comercial: Claudio Lima

Produtor Editorial: Thiê Alves
Tradução: Alberto Streicher
Copidesque: Carlos Bacci
Revisão Gramatical: Kamila Wozniak
Revisão Técnica: Sedy Nascimento
Diagramação: Catia Soderi



Rua Viúva Cláudio, 291 – Bairro Industrial do Jacaré
CEP: 20.970-031 – Rio de Janeiro (RJ)
Tels.: (21) 3278-8069 / 3278-8419
www.altabooks.com.br – altabooks@altabooks.com.br
Ouvidoria: ouvidoria@altabooks.com.br



Editora
afiliada à:



ASSOCIADO





Física Quântica

Para
leigos

Tradução da 3ª Edição

Andrew Zimmerman Jones



ALTA BOOKS
GRUPO EDITORIAL
Rio de Janeiro, 2025

Amostra

Sobre o Autor

Andrew Zimmerman Jones é formado em física pelo Wabash College. É membro da National Association of Science Writers, da National Science Teachers Association e da Mensa. Concluiu seu mestrado em ensino de matemática na Purdue University e obteve sua certificação em design aplicado de jogos na Central Michigan University. Trabalha há mais de duas décadas com publicação educacional criando e editando avaliações e currículos de matemática e ciências em nível estadual e nacional dos EUA, incluindo o Departamento de Educação de Indiana. Por mais de dez anos, foi o físico responsável e editor do About.com, atualmente ThoughtCo. É o coautor de *Teoria das Cordas Para Leigos*, escreveu para o blog NOVA Physics da NPR e também criou o roteiro do vídeo TED-Ed, “Does Time Exist?”.

Dedicatória

Para minha amada esposa, Amber, por emaranhar sua função de onda com a minha.

Agradecimentos do Autor

Gostaria de agradecer inicialmente à minha esposa, Amber, e meus filhos, Elijah e Gideon, por todo o apoio concedido, mesmo quando eu estava doido com os prazos, as extensivas revisões e os caprichos do cotidiano. Também gostaria de agradecer a todos os professores, mentores, cientistas e autores que me ensinaram ao longo dos anos. Há pessoas demais para nomeá-las individualmente.

Este livro não seria possível sem o trabalho do falecido Dr. Steven Holzner, autor de *Quantum Physics For Dummies*, Edição Revisada. Seu vasto trabalho com as iterações anteriores deste livro ofereceram uma base sólida sobre a qual construir. Também expresso aqui meu mais profundo apreço à maravilhosa equipe editorial que se esforçou para tornar esta obra uma realidade. Agradeço ainda a Elizabeth Stilwell por confiar em mim, tanto para me oferecer esta oportunidade quanto por minhas recomendações sobre como proceder com o projeto. É impossível mensurar todo o trabalho que a editora do projeto, Leah Michael, e a revisora, Marylouise Wiack, tiveram para transformar rascunhos prolixos e repletos de jargão técnico em explicações claras e concisas desses conceitos difíceis. Foi realmente um prazer trabalhar com vocês em todos os momentos.

Amostra

Sumário Resumido

Introdução	1
Parte 1: Primeiros Passos com a Física Quântica	5
CAPÍTULO 1: O que É Física Quântica, Afinal?	7
CAPÍTULO 2: Sobre os Ombros de Gigantes: Física Clássica	15
CAPÍTULO 3: A Revolução Quântica	43
Parte 2: Fundamentos: Princípios e Teorias da Física Quântica	73
CAPÍTULO 4: Mecânica Quântica: Estados e Dualidades das Partículas	75
CAPÍTULO 5: Eletrodinâmica Quântica e Além	83
CAPÍTULO 6: Gatos Quânticos e Ação Fantasmagórica: Interpretações da Física Quântica	95
Parte 3: Números: Matemática Básica da Física Quântica	109
CAPÍTULO 7: Entrando na Matriz: Bem-vindo aos Vetores de Estado	111
CAPÍTULO 8: Caindo nos Poços de Energia	141
CAPÍTULO 9: Balança mas Não Cai: Osciladores Harmônicos	173
CAPÍTULO 10: Trabalhando com o Momento Angular no Nível Quântico	191
CAPÍTULO 11: Ficando Tonto com o Spin	215
Parte 4: 3D com os Cálculos da Física Quântica	227
CAPÍTULO 12: Coordenadas Cartesianas: Resolvendo Problemas em 3D	229
CAPÍTULO 13: Resolvendo Problemas de Coordenadas Esféricas	247
CAPÍTULO 14: O Átomo Mais Simples: Entendendo o Hidrogênio	263
CAPÍTULO 15: Lidando com Muitas Partículas e Dinâmicas de Grupo	285
Parte 5: A Parte dos Dez	313
CAPÍTULO 16: Dez Pioneiros Importantes da Física Quântica	315
CAPÍTULO 17: Dez Triunfos da Física Quântica	323
Índice	329

Amostra

Sumário

INTRODUÇÃO	1
Sobre Este Livro	1
Penso que.....	2
Ícones Usados Neste Livro	3
Além Deste Livro.	3
De Lá para Cá, Daqui para Lá	4
PARTE 1: PRIMEIROS PASSOS COM A FÍSICA QUÂNTICA	5
CAPÍTULO 1: O que É Física Quântica, Afinal?	7
O Clássico: Física Pré-Quântica.	8
O que Faz a Física Ser Quântica?	8
Uma Matéria de Escala ou uma Escala da Matéria	9
Mensurações e Observáveis: Como os Cientistas Sabem que a Física Quântica É Verdadeira.	10
Realizando os testes certos.	11
Confiando nos testes certos, mas comprovando-os.	11
CAPÍTULO 2: Sobre os Ombros de Gigantes: Física Clássica	15
Objetos em Movimento: Mecânica Clássica.	16
Newton cria as regras	16
Energia cinética e momento	18
Pegando as Ondas	20
Algumas propriedades da frente de onda	20
Superposição e interferência de onda	23
Haja Luz: Eletromagnetismo.	24
Uma disputa iluminada: Corpúsculos contra vibrações.	24
Young: A contradição da fenda dupla	26
As maravilhosas equações de Maxwell.	27
Michelson-Morley e o misterioso éter faltante	31
Átomos: Os Pilares da Matéria	33
Atomismo antigo	33
Os químicos descobrem o átomo (talvez).	34
E o elétron	34
Termodinâmica: Outro Tema Quente.	36
Jogos da Vida: Incógnitas e Incertezas.	37
Um lance de dados: Probabilidade clássica	37
Incertezas e desvios.	39

CAPÍTULO 3: A Revolução Quântica	43
Sendo Discreto: O Problema com a Radiação de Corpo Negro	44
Um salto (quântico) intuitivo: Espectro de Max Planck	46
Vendo a Luz como Partículas	48
Resolvendo o efeito fotoelétrico	48
Dispersando a luz dos elétrons: O efeito Compton	50
Modelo Atômico de Bohr	53
A mudança das órbitas dos elétrons	53
Explicando resultados com o modelo de Bohr	55
Identidade Dupla: Observando as Partículas como Ondas	55
Pósitron de Prova? Dirac e a Produção de Pares	57
Você Não Pode Saber Tudo (Mas Pode Calcular as Probabilidades)	58
Posição versus momento: O princípio da incerteza de Heisenberg	58
Jogando dados quânticos: Uma nova visão da probabilidade	60
Uma Nova Visão da Luz: Eletrodinâmica Quântica	63
O que causa as ondulações?	63
Primeiros lampejos da QED	65
O fóton ganha um novo emprego	65
Escancarando as Partes do Átomo	68
Colidindo as partículas para extrair informações	69
Mantendo o núcleo atômico unido	70

PARTE 2: FUNDAMENTOS: PRINCÍPIOS E TEORIAS DA FÍSICA QUÂNTICA 73

CAPÍTULO 4: Mecânica Quântica: Estados e Dualidades das Partículas	75
Quantificando com os Números Quânticos	76
O spinning eterno do elétron	76
Férmions e bósons	78
Reverendo a Dualidade Onda-Partícula	78
Origens da dualidade onda-partícula	79
Implicações da dualidade onda-partícula	79
Descobrimos o que É a Antimatéria	80

CAPÍTULO 5: Eletrodinâmica Quântica e Além	83
Teoria Quântica de Campos: Explicando a Matéria e a Energia	84
Reverendo a eletrodinâmica quântica	84
Analisando as forças nucleares e a cromodinâmica quântica	85
Recorrendo ao bóson de Higgs	86
Descobrimos como a Física Quântica Mudou o Mundo	88
Que haja luz com os lasers	88
Controlando o fluxo com semicondutores e transistores	89
Aproveitando o poder da energia nuclear	90
Energia solar	91

Olhando para o Futuro: Computadores Quânticos.	92
Calculando com estados de superposição.	92
Manutenção e evolução de computadores quânticos.	92

CAPÍTULO 6: **Gatos Quânticos e Ação Fantasmagórica:**

Interpretações da Física Quântica.	95
Questionando o que Precisa de Interpretação.	96
Interpretando probabilidade e medição.	96
Interpretando o efeito do observador.	97
Revisitando o emaranhamento.	98
Descobrimos que a Interpretação Mais Comum É Dar de Ombros.	99
Esboçando Três Interpretações da Física Quântica.	99
A popular: Interpretação de Copenhague.	100
A divertida: Interpretação de muitos mundos.	100
A responsável: Variáveis ocultas.	101
Debates Duradouros, Rixas e Outros Contra-argumentos.	102
Falando sobre o gato (morto?) na sala.	102
Os fantasmas de Einstein.	104
Explorando os Experimentos Emaranhados.	106
A desigualdade de Bell.	106
O grande experimento de Alain Aspect.	107

PARTE 3: NÚMEROS: MATEMÁTICA BÁSICA DA FÍSICA QUÂNTICA.

109

CAPÍTULO 7: **Entrando na Matriz: Bem-vindo aos Vetores de Estado.**

111

Criando Seus Próprios Vetores no Espaço de Hilbert.	112
Facilitando a Vida com a Notação de Dirac.	114
Abreviando os vetores de estado em kets.	115
Escrevendo o conjugado hermitiano como um bra.	115
Multiplicando bras e kets: Uma probabilidade de 1.	117
Cobrimos todas as suas bases: Bras e kets como vetores de estado sem base.	117
Compreendendo algumas relações usando kets.	119
Dançando com os Operadores.	120
<i>Hello, operator:</i> Como os operadores funcionam.	120
Por essa eu já esperava: Encontrando valores esperados.	121
Analisando os operadores lineares.	123
Tornando-se hermitiano com operadores e adjuntos hermitianos.	124
Para a Frente e para Trás: Encontrando o Comutador.	125
Comutando.	125
Encontrando os operadores anti-hermitianos.	126
Começando do Zero e Terminando com Heisenberg.	127
Autovetores e Autovalores: São Naturalmente Autásticos!	129
Entendendo como eles funcionam.	131

Encontrando autovetores e autovalores	132
Vem Aí a Inversão: Simplificando com Operadores Unitários.....	134
Comparando Representações Contínuas e Matriciais	136
Tornando-se contínuo com o cálculo	137
Fazendo a onda	137
CAPÍTULO 8: Caindo nos Poços de Energia.....	141
Observando um Poço Quadrado	142
Prendendo Partículas em Poços de Potencial	144
Ligando partículas em poços de potencial	144
Escapando dos poços de potencial	145
Prendendo Partículas em Poços Potenciais de Quadrado Infinito	146
Encontrando a equação da função de onda	146
Determinando os níveis de energia.....	149
Normalizando a função de onda	150
Adicionando dependência do tempo às funções de onda.....	152
Alterando para poços potenciais de quadrado simétrico	153
Potencial Limitado: Analisando as Partículas e os Degraus de Potencial ..	154
Supondo que a partícula tenha bastante energia.....	155
Supondo que a partícula não tenha energia suficiente	159
Tunelamento em Regiões Proibidas	163
Atingindo a Parede: Partículas e Barreiras de Potencial.....	163
Atravessando barreiras de potencial quando $E > V_0$	164
Tunelamento adentro: Barreiras de potencial quando $E < V_0$	166
Partículas Desligadas: Resolvendo a Equação de Schrödinger para	
Partículas Livres	167
Obtendo uma partícula física com um pacote de onda	169
Analisando um exemplo gaussiano.....	170
CAPÍTULO 9: Balança mas Não Cai: Osciladores Harmônicos	173
Solucionando os Hamiltonianos do Oscilador Harmônico	174
Classicamente: A oscilação harmônica	174
Entendendo a energia total na oscilação quântica	175
Criação e Aniquilação: Incluindo os Operadores do Oscilador Harmônico.	177
Atenção ao p e ao q: Obtendo as Equações de Estado de Energia.....	178
Encontrando os Autoestados	179
Encontrando a energia de $a n\rangle$	180
Encontrando a energia de $a^\dagger n\rangle$	181
Derivando a e $a^\dagger$ diretamente.....	181
Encontrando os autoestados de energia do oscilador harmônico.....	182
O mundo real: Inserindo alguns números	188
CAPÍTULO 10: Trabalhando com o Momento Angular no Nível	
Quântico.....	191
Estabelecendo o Hamiltoniano	192
Rodeando os Operadores: Círculos com o Momento Angular	193

Encontrando os Comutadores de L_x , L_y e L_z	194
Criando os Autoestados do Momento Angular	195
Encontrando os Autovalores do Momento Angular	196
Derivando equações de autoestado com $\beta_{\max}$ e $\beta_{\min}$	196
Obtendo a energia rotacional de uma molécula diatômica.	199
Encontrando os Autovalores dos Operadores de Criação e Aniquilação ..	201
Interpretando o Momento Angular com Matrizes.	202
Operadores de criação e aniquilação	203
Passando para outros operadores L	204
Um Passo Além: Mudando para o Sistema de Coordenadas Esféricas ...	204
Estabelecendo as bases (esféricas)	205
As autofunções de L_z em coordenadas esféricas	207
As autofunções de L^2 em coordenadas esféricas	209
Voltando às coordenadas cartesianas.	213
CAPÍTULO 11: Ficando Tonto com o Spin	215
Investigando o Experimento de Stern-Gerlach e o Caso do Ponto Faltante	216
Tirando Vantagem do Spin e dos Autoestados	217
Metades e Números Inteiros: Dizendo Olá aos Férmions e Bósons.	218
Operadores de Spin: De um Lado para o Outro com o Momento Angular.	220
Definindo os operadores de spin.	221
Operadores de aumento e redução do spin	221
Trabalhando com o Spin $\frac{1}{2}$ e com Matrizes de Pauli	222
Matrizes de Spin $\frac{1}{2}$	222
Matrizes de Pauli	224
PARTE 4: 3D COM OS CÁLCULOS DA FÍSICA QUÂNTICA	227
CAPÍTULO 12: Coordenadas Cartesianas: Resolvendo Problemas em 3D	229
Visualizando a Equação de Schrödinger em 3D!	230
Convertendo a equação de Schrödinger em coordenadas cartesianas	230
Separando a equação de Schrödinger	231
Resolvendo Problemas de Partículas Livres em 3D	232
Encontrando a equação de energia total	234
Adicionando a dependência do tempo.	235
Encontrando uma solução física	235
Organizando Tudo com Potenciais Retangulares em 3D.	237
Determinando os níveis de energia.	239
Normalizando a função de onda	240
Usando um potencial cúbico	242
Saltando para Osciladores Harmônicos 3D	243
Potencial de uma mola 3D	243
Resolvendo Schrödinger para a mola 3D	244
Energia do oscilador 3D.	245