

Mecânica Quântica

100 anos: 1924/27 – 2024/27



Salomon S Mizrahi



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

Mecânica Quântica

100 anos: 1924/27 – 2024/27

Salomon S Mizrahi

Apoio



2026

Copyright © 2026 os autores
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)

Mizrahi, Salomon S
Mecânica quântica 100 anos: 1924/27 - 2024/27 / Salomon S Mizrahi. – 1. ed. – São Paulo, SP:
LF Editorial, 2026.

Bibliografia
ISBN 978-65-5563-736-6

1. Física - História 2. Física quântica 3. Mecânica quântica I. Título.

26-349236.0

CDD-530.12

Índices para catálogo sistemático:

1. Mecânica quântica: Física 530.12

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964

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



Capa, nomes dos principais protagonistas

Nomes dos personagens na capa frontal, por linha, da esquerda para a direita

Max Planck, Albert Einstein, Ernest Rutherford, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Louis de Broglie, Satyendra-Nath Bose,

Otto Stern, Max Born, Werner Heisenberg, Pacual Jordan, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Paul Dirac,

Paul Ehrenfest, Enrico Fermi, George Uhlenbeck, Hendrik Kramers, Samuel Goudsmit, Hideki (Ogawa) Yukawa, Vladimir Fock (Fok), Lev Landau,

Arthur Compton, Eugene Wigner, John Von Neumann, Edward Teller, Leó Szilárd, Hans Bethe, John Wheeler,

Willis Lamb, Shin'ichiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman, David Bohm, John Bell, Roy Glauber,

Anthony Leggett, David Deutsch, Charles Bennett, Peter Schor, Alain Aspect, John Clauser, Anton Zeilinger.



Agradecimentos

- Ao CNPq pelo financiamento, processo No. 301977/2024-0, inserido no Projeto “Desenvolvimento de um Transceiver para Distribuição Quântica de Chaves e de um Gerador Quântico de Números Aleatórios para Aplicações Comerciais”, CNPq, processo 422316/2023-7, coordenado pelo Prof. Dr. Celso Jorge Villas-Boas, da Universidade Federal de São Carlos.
- Ao *Centro de Pesquisas Avançadas Wernher von Braun* pela cessão de parte de sua cota no projeto coordenado pelo Prof. Dr. Celso Jorge Villas-Boas.
- Ao amigo e colega Celso Jorge Vilas-Boas, da UFSCar, pela sua criteriosa e minuciosa leitura do livro em sua integridade, e pelas mui proveitosas discussões que procederam.
- Pelo apoio, incentivo e valiosas argumentações, agradeço os amigos e colegas, Miled Hassan Youssef Moussa, do Instituto de Física de São Carlos, USP; Norton Gomes de Almeida, da Universidade Federal de Goiás; Paulo de Tarso Muzy, do Instituto de Estudos Avançados, USP; Alexandre Dodonov, da Universidade de Brasília, UnB; Dino Otero, da Facultad Regional General Pacheco, UTN, Buenos Aires, Argentina.
- A Matheus da Silva Fonseca, pós graduando no Departamento de Física, UFSCar, pela leitura atenta de alguns capítulos e por críticas e sugestões oportunas.
- Ao Dr. Clodoaldo Valverde, UFG, por ter, gentilmente, cedido o modelo (*template*) em código Latex para a diagramação do livro.



Dedicatórias

A meus remotos ancestrais até meus genitores, Elie e Marcelle, que sobrepujaram adversidades e transpuseram obstáculos encontrados ao longo do caminho, bem como às gerações seguintes,

Helio, André Victor,

Bruno, Eduardo, Rafael, Maya, Daniela

In Memoriam ✧ Denise Mizrahi Z"L, 1976-2023.



Alocações

A mecânica quântica é muito mais do que apenas uma teoria; é uma forma totalmente nova de olhar para o mundo, ocasionando uma mudança no paradigma, talvez mais radical que qualquer outra na história do pensamento humano.

Sir Anthony J. Leggett, Prêmio Nobel de Física, 2003

Em vez de propor uma nova teoria ou descobrir um novo fato, muitas vezes a contribuição mais importante que um cientista pode dar é descobrir uma nova forma de ver velhas teorias ou fatos. O importante na ciência não é tanto obter novos fatos, mas sim descobrir novas formas de pensar sobre eles.

Sir William Lawrence Bragg, Prêmio Nobel de Física, 1915.

Aqueles dentre nós que não estão dispostos a expor suas ideias ao risco de serem refutadas não participam do jogo científico.

Karl Raimund Popper, filósofo.

Uma coisa é os cientistas se oporem ao criacionismo, que é comprovadamente falso, mas outra bem diferente é fazer pronunciamentos que ofendem a fé e a religião das pessoas – essa é uma forma de falta de tato que apenas leva a ciência ao descrédito. Minha visão sobre religião e ética é simples: mesmo que não acreditemos em Deus, deveríamos tentar viver como se acreditássemos.

Max Perutz, Prêmio Nobel de Química, 1962.

Apresentação

A Organização das Nações Unidas (ONU) designou 2025 como Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas (AIQ); (IYQ em inglês, de *International Year of Science and Quantum Technologies*) [1] para comemorar um século de nascimento da Mecânica Quântica, e criou um logotipo para marcar o evento.



**INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology**

Logotipo para o Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quântica.

A revista *Physics Today online* dedicou um número especial com artigos selecionados pelo editor [2–4], e as revistas *Nature*, *Physics World*, *Science News* e *Science* [5–8] apontam que, de acordo com a cronologia das descobertas¹, foi no período de 1924 a 1927 que, em sua essência, a mecânica quântica se configurou da mesma forma como ela é atualmente creditada no meio acadêmico. A sua emergência, como novo paradigma epistemológico, impulsionou a pesquisa científica, a inovação na teoria do conhecimento, a filosofia e, hoje, além da pesquisa pura, ela contribui em projetos que impelem avanços tecnológicos em setores industriais, comerciais e econômico-financeiros.

¹Em sua tese de doutorado, apresentada em 1924, Louis de Broglie propôs a hipótese de que o elétron poderia ser tanto uma partícula quanto uma onda; em 1925, Werner Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan propõem a Mecânica de Matrizes; em janeiro de 1926, nasce a Mecânica Ondulatória, Erwin Schrödinger divulga a sua emblemática equação com a função de onda para o elétron; em 1927, Wolfgang Pauli insere o grau de liberdade spin na equação de Schrödinger, que se torna a equação Pauli-Schrödinger; em 1927, Paul Dirac inventa a equação relativística que generaliza as anteriores.

Historicamente, entre tropeços e acertos, na década de 1920, algumas dezenas de perspicazes observadores/pensadores notabilizaram-se pela invenção da mecânica quântica, que tem o atributo de ser formalmente lógica, provendo, portanto, uma explanação bastante razoável para aqueles fenômenos físicos que estavam sob escrutínio. Por essa razão, ela foi plenamente acolhida pela comunidade científica da época. Em uma fotografia histórica da quinta conferência Solvay (Bélgica) de 1927 (página vii) estão os protagonistas do evento; a foto foi colorizada por tecnologia digital a partir da original, capturada em filme preto e branco. Nesse contexto, talvez não seria exagero recorrer ao aforismo atribuído ao estadista inglês Winston Churchill² “Nunca tantos deveram tanto a tão poucos”.

Quando é oficialmente estabelecida uma data única para celebrar algum evento, 1925 para o nascimento da mecânica quântica, a escolha pode levar a pensar que uma invenção/descoberta inovadora aconteceu repentinamente, devendo então receber todo o reconhecimento por haver elucidado uma faceta da natureza que, até então, se mantinha enigmática. Na realidade, a escolha de uma data é apenas um marco temporal para recordar que aconteceu uma descoberta ou uma invenção bastante significativa em uma certa ocasião, mas não, necessariamente, de maior importância do que outras que a antecederam ou que aconteceram posteriormente. Nos dizeres do físico e filósofo francês Gaston Bachelard, em *La Formation de l'Esprit Scientifique*³, a descoberta deve ser entendida como um evento que causou uma ruptura com o paradigma prevalente.

Factualmente, as raízes da mecânica quântica estão fincadas nos anos 1899-1900, quando ocorreu um “surto” isolado que não contou, naquele momento, com o devido reconhecimento pela comunidade científica da época, mas que, posteriormente, se tornou decisivo para o progresso, não apenas da física, mas também das ciências naturais e da tecnologia. Sem intenção em inovar, o físico Max Planck, (i) desvendou uma fórmula surpreendentemente precisa (a fórmula de Planck) que emulava dados resultantes de experimentos relativos à emissão e absorção de radiação do *corpo negro* (um corpo que absorve toda a radiação que nele incide); (ii) ele revelou para a Ciência uma constante universal (a constante de Planck, $h \approx 6,626 \times 10^{-34}$ joule-segundo e, ainda, (iii) descobriu que, sob determinadas condições, a energia de osciladores pode se apresentar em múltiplos de $h\nu$, sendo ν a frequência de oscilação. Esta última revelação, inerente à sua fórmula, não induziu em Planck a confiança necessária para cogitar sobre a importância dessa descoberta, pois a sua concepção filosófica sobre a natureza estava inabalavelmente arraigada na física clássica, isto é, a energia não poderia ser emitida ou armazenada em valores discretos. Esta convicção levou-o a repudiar sua própria criação por tê-la considerado desconexa dos dogmas prevalentes. Anos mais tarde, em 1908, Planck voltou a fitar a sua criação sob novo olhar, foi quando ele aceitou a inegável conexão das revelações de 1900 com a física dos quanta de luz (pacotes individuais ou discretos) como fora proposta por outro protagonista de porte. Três anos antes, em 1905, as premissas de 1900 foram apreciadas por alguém que tinha uma nata predisposição para enxergar na natureza novos padrões e descrevê-los a seu modo, este foi Albert Einstein. Ele acolheu com apreço as descobertas de Planck e

²*Never was so much owed by so many to so few*, locução dirigida aos pilotos da *Royal Air Force* após haverem vencido a Batalha da Grã-Bretanha em 1940. Ela expressa a gratidão e o reconhecimento da nação à bravura e ao sacrifício dos aviadores oriundos de diversos países, que foram cruciais para defender a Grã-Bretanha de uma invasão pela Alemanha.

³Gaston Bachelard destaca a ocorrência de “choques” ou “rupturas” na história da ciência, quando surgem novas teorias e métodos que desafiam o conhecimento vigente. Essas rupturas não são divisões nítidas [9], mas conduzem a momentos de profundas transformações.

usou-as de forma elegante para enunciar uma ideia revolucionária, a luz poderia ser considerada como formada por pacotes (ou grânulos) de pura energia $\epsilon_n = n(h\nu)$ com $n = 1, 2, \dots$. Devido a sua perspicácia e audacidade em propor conceitos inovantes em setores estagnados das ciências físicas, atribui-se a Einstein o título de impulsionador e divulgador da teoria dos quanta, que destarte começou a sair da hibernação. De 1905 a 1924 a teoria dos quanta ficou conhecida como a “velha mecânica quântica” e entre seus principais protagonistas estão Albert Einstein, Ernest Rutherford, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, William Wilson, Max Born, Peter Debye, entre outros. Um relato histórico detalhado é encontrado na referência [https://mwolf.pracownicy.uksw.edu.pl/MK/ter%20Haar%20and%20D.%20ter%20Haar%20\(Auth.\)%20-%20The%20Old%20Quantum%20Theory%20\(1967,%20Pergamon%20Press\).pdf](https://mwolf.pracownicy.uksw.edu.pl/MK/ter%20Haar%20and%20D.%20ter%20Haar%20(Auth.)%20-%20The%20Old%20Quantum%20Theory%20(1967,%20Pergamon%20Press).pdf).

Além dos já veteranos Albert Einstein, Niels Bohr, Max Born, a teoria quântica atraiu vários jovens pesquisadores que fizeram contribuições de vulto, entre os quais destacaram-se Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Pascual Jordan, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, John von Neumann, Otto Stern, Ralph Kronig, George Uhlenbeck, Hendrik Kramers, Samuel Goudsmit, Eugene Wigner, cujas realizações ocorreram no período 1924-1932. Eles participaram da construção da mecânica quântica com novas descobertas, e novos conceitos foram agregados à sua fundamentação. Não obstante, também afloraram discussões acaloradas e polêmicas questionando a presença de probabilidades e do acaso na teoria. Maiores detalhes históricos são apresentados nos Capítulos: *Prolegômenos* [1], *Da descoberta do fogo à mecânica quântica, uma linha do tempo* [2] e *A não-localidade na mecânica quântica, uma metáfora* [4].

O objetivo deste livro é oferecer, a partir da perspectiva do autor, a estudantes de ciências exatas e outros interessados na temática, uma gama de tópicos que pode complementar aquilo que é regularmente ensinado em cursos oficiais ou o que é divulgado nas mídias, escrita e digital.

Organizados em capítulos, alguns tópicos abordam assuntos instigantes, enquanto outros contêm uma mescla de história, ideias relevantes, conjecturas e opiniões pessoais do autor, de acordo com sua compreensão da matéria.

Capítulo 1. *Prolegômenos*

Na forma de um caleidoscópio temático, são apresentadas opiniões, narrativas, alocações, mensagens enunciadas por físicos, matemáticos e filósofos, sobre mecânica quântica e assuntos correlatos.

Capítulo 2. *Da descoberta do fogo à mecânica quântica, uma linha do tempo*

São apresentadas algumas das principais descobertas e invenções concebidas desde nossos remotos ancestrais até o advento da mecânica quântica.

Capítulo 3. *Formalismo matemático da mecânica quântica*

As essenciais ferramentas matemáticas da mecânica quântica, postulados e teoremas são elencados e discutidos.

Capítulo 4. *A não-localidade na mecânica quântica, uma metáfora*

No molde de uma metáfora, cujos protagonistas são crianças gêmeas e geneticistas, o problema da não-localidade e do acaso, inerentes à mecânica quântica, e a polêmica acerca da existência, ou não, de um paradoxo, são discutidos.

Capítulo 5. *Sistemas bipartites emaranhados*

O fenômeno de emaranhamento de estados de sistemas físicos bipartites, e multipartites, supostamente independentes, é um indício de que em algum passado remoto ocorreu uma interação de duração indeterminada, que depois cessou. Diversas situações que ilustram o assunto são apresentadas e discutidas.

Capítulo 6. *Aleatoriedade, probabilidades, variáveis ocultas, desigualdades Bell*

São apresentados e discutidos os tópicos, evento aleatório na mecânica quântica, o conceito de “variáveis escondidas” (ou ocultas) de David Bohm, as desigualdades matemáticas propostas por John Bell e outras similares, como as Clauser-Horne-Shimony-Holt, Clauser-Horne e Scully-Zubairy.

Capítulo 7. *A teleportação quântica da informação*

A teleportação quântica da informação é uma descoberta teórica feita por uma equipe de seis físicos. Eles demonstraram que é possível teleportar informação de um remetente a um destinatário usando recursos da mecânica quântica, mais uma comunicação de natureza clássica. A proposta foi confirmada por um experimento realizado em 1997, depois, outros seguiram. A proposta original é apresentada neste capítulo.

Capítulo 8. *De um qubit a uma equação de Schrödinger; quando o spin pilota a partícula que o carrega.*

Invertendo a ordem do procedimento usualmente adotado em diversos livros-texto, a equação de Schrödinger é deduzida sob uma perspectiva diferenciada. A partir de um único *qubit*, e com base no formalismo do espaço de Hilbert, (i) é deduzida a equação dinâmica geral para esta unidade de informação fundamental, (ii) é, então, introduzido o seu portador físico (uma partícula clássica com massa) na equação, o que a torna similar àquela descoberta/inventada por Schrödinger em 1926. Depreende-se, então, que o qubit força a partícula a abandonar a descrição clássica, compelindo-a a um estado de indeterminação quanto à sua localização no espaço euclidiano; passando, portanto, a ser representada por uma “função de onda” ou “amplitude de probabilidade/informação”. Suplementarmente, essa equação irá depender de duas constantes sem precisar, necessariamente, identificá-las com a constante de Planck, o que permite, portanto, introduzir, *ab initio*, uma massa efetiva na equação de Schrödinger.

Capítulo 9. *A medição em mecânica quântica, uma breve introdução*

Na mecânica quântica, a medição de alguma propriedade física é entendida como um processo irreversível, cuja representação formal visa explicitar algum mecanismo que descreva a extração de informação do sistema de interesse. A primeira proposta de um tratamento formal partiu do matemático John von Neumann, contudo, outros procedimentos vieram a seguir. Além de uma breve introdução ao tema, algumas das abordagens propostas são apresentadas e discutidas.

Capítulo 10. *A grande “sacada” de Dirac para a equação relativística; massas efetivas para férmions, leves e pesados.*

A partir de uma equação algébrica contendo termos quadráticos apenas, o físico britânico Paul Dirac inventou uma equação linear quântica relativística para o elétron, na qual revelaram-se dois graus de liberdade dicotômicos, (*i*) o spin 1/2 que já estava presente na equação Pauli-Schrödinger e, (*ii*) a inédita partícula de antimatéria, o pósitron, que se diferencia do elétron pelo grau de liberdade *paridade intrínseca*; + para o elétron e – para o pósitron. O processo construtivo da equação de Dirac é reconstituído a partir de uma abordagem alternativa à usual. É usado um conjunto de dezesseis objetos matemáticos, os hexadecânios; assim, a equação adquire uma forma mais inequívoca, que permite conjecturar a presença de uma massa secundária. Conjuntamente, as duas massas apresentam diferentes massas efetivas distintas entre si, o que permite caracterizar dois tipos de férmions, o leve e o pesado. O valor experimental do momento dipolar anômalo do elétron possibilita estimar um valor para a massa secundária, assim como um presumido "tamanho" para o elétron.

Capítulo 11. *A evolução da antimatéria fermiônica primordial, sua redução, de 1 : 1 aos atuais 1 : 10²⁰*

Admitindo que nos estágios iniciais de sua formação, o Universo era composto por férmions e de antiférmions (como elétrons e neutrinos) em iguais proporções, todavia, em consequência de sua expansão e do concomitante resfriamento, cálculos embasados na teoria de Dirac indicam, como estimativa para a época atual, a existência de 10²⁰ férmions para 1 antiférmion primordial.

Capítulo 12. *Desemaranhamento de um sistema bipartido em uma variedade de Minkowski de suporte compacto, semelhanças e diferenças com a relatividade especial*

Na relatividade especial, trajetórias de partículas podem ser traçadas na variedade espaço-temporal de Minkowski. Por outro lado, na mecânica quântica, trajetórias no espaço de fases não são estritamente definidas porque a coordenada de posição e o momentum linear não podem ser medidos, simultaneamente, com precisão arbitrária. Sob outro enfoque, a matriz densidade da mecânica quântica contém toda a informação sobre as propriedades de um sistema físico. Em particular, para certos sistemas físicos bipartidos, há aqueles que admitem uma descrição na variedade de Minkowski com domínio restrito de coordenadas "espaço-tempo" virtuais. Neste caso, ao partilhar este espaço quadridimensional, pode-se atribuir uma descrição, região *tipo separável* e outra *tipo emaranhamento* para estados quânticos, em analogia a *tipo tempo* e *tipo espaço* da relatividade especial.

Capítulo 13. *O computador, portas lógicas, clássicas e quânticas*

Todo computador manipula dados que são introduzidos na forma de correntes em circuitos elétricos. Esses dados passam por alterações à medida que uma sequência limitada de procedimentos específicos é realizada, o que constitui o *algoritmo*. Este é organizado em blocos, rotinas, subrotinas e em linhas elementares chamadas *instruções* que, fisicamente, se traduzem em operações com *portas lógicas*. Esta denominação procede do inglês *logic gates*. Neste capítulo, discute-se, sucintamente, o funcionamento de um computador e são apresentadas algumas operações para ilustrar o *modus operandi* das principais portas lógicas, as clássicas e as quânticas.

Apêndice A. *A relatividade de Galileu na equação de Schrödinger*

O princípio da relatividade de Galileu é introduzido na equação de Schrödinger. Como resultado, obtém-se o "gauge", ou calibre galileano, que é um fator de fase que multiplica a função de onda. Este fator permite a cada observador, em seu próprio referencial inercial, escrever a função de onda de uma partícula que outro observador, em outro referencial, está anotando.

Apêndice B. *Cópia e deleção de estados quânticos*

A discussão centra sobre os estados quânticos que podem, ou não, ser fielmente copiados ou deletados.

Apêndice C. *O algoritmo de Deutsch*

Em 1985, o físico britânico David Deutsch demonstrou que é viável fazer cálculos de forma mais eficiente se os algoritmos forem escritos utilizando as propriedades matemáticas do espaço de Hilbert. A vantagem reside na possibilidade de processar cálculos em paralelo, ou seja, operar vários registros simultaneamente. A fim de ilustrar o procedimento, neste apêndice é apresentado um exemplo ilustrativo, desenvolvido pelo físico N. David Mermin, que ficou conhecido como algoritmo de Deutsch.

Apêndice D. *Fótons incidentes sobre um divisor de feixe*

É apresentada a expressão geral da relação entre os estados quânticos de feixes de fótons que incidem sobre um divisor e aqueles que dele emergem. É uma transformação unitária que envolve operadores de criação de fótons. Um exemplo ilustra o procedimento.

Apêndice E. *Ação não local a distância (AAD) com um único fóton*

É mostrada a situação contextual, apontada pelo físico israelense Asher Peres, sobre o papel determinante do vácuo quântico quando considerado no formalismo de Fock. É um recurso que permite exibir o efeito de não-localidade de um único fóton.

Apêndice F. *Decomposição em valores singulares ou, expansão biortogonal de um sistema bipartite*

A Decomposição em Valores Singulares (DVS, ou SVD no inglês) é um artifício matemático que permite decompor uma matriz em um produto de três matrizes, das quais, duas são unitárias e a terceira é diagonal. O método permite desenvolver uma "engenharia" de emaranhamento de sistemas, *a priori*, independentes.

Apêndice G. *Unidades/escala de Planck em termos das constantes c , \hbar , G , uma análise dimensional.*

Em 1899, Max Planck propôs certas unidades físicas fundamentais (ou unidades naturais) para descrever a natureza em uma escala particular: comprimento, tempo e massa, ou energia. Neste apêndice, é mostrado como essas quantidades dependem da velocidade da luz no vácuo cósmico c , da constante fundamental da mecânica quântica \hbar e da constante da gravitação newtoniana G . As unidades de Planck são fundamentais na pesquisa em cosmologia e física teórica, especialmente para compreender o universo primordial e fenômenos onde a gravidade e a mecânica quântica poderiam se unir para formar uma única estrutura formal lógica para descrever a Natureza.

Certamente, a mecânica quântica não é uma doutrina esotérica, nem irrefutável. Ela nasceu por premência histórica, afirmando-se, paulatinamente, como uma sólida estrutura inserida na teoria do conhecimento. Assim como em outras áreas das ciências exatas, ela despontou a partir de observações argutas, vindas de práticas experimentais, e com propostas teóricas engenhosas. Desta forma, ela assumiu um papel fundamental para perscrutar a natureza, possibilitando decodificar fenômenos físicos, sejam eles naturais ou produzidos em laboratório. É de fundamental importância reconhecer que indivíduos dotados de exímia capacidade criativa fizeram uso da maior das invenções no âmbito do raciocínio abstrato, a matemática, para a elaboração de teorias, por vezes contraditórias, porém, sem receio de se expor a refutações. Pela sua estrutura formal abrangente, a mecânica quântica tampouco é hermética e nem restritiva, além de descrever átomos, moléculas e fótons, ela possibilita a elaboração de teorias para especular sobre variados temas, como, por exemplo, economia, finanças, sistemas planetários, gravitação, função de onda do universo, internet quântica, computação quântica, inteligência artificial para computação quântica, multiversos e até parapsicologia⁴.

Em relação aos retratos dos físicos escolhidos para a capa do livro, o autor considerou aqueles a quem tanto devemos; no entanto, houve a sensação de que algumas figuras importantes ficaram de fora. De qualquer forma, considerou-se que colocar retratos na capa seria a melhor maneira de homenagear aqueles que contribuíram decisivamente para uma compreensão mais abrangente do mundo em que vivemos e do universo em que estamos inseridos.

São Paulo, abril 2026

⁴Parapsicologia e mecânica quântica, foi uma junção de termos díspares que chamou a atenção até da agência de inteligência americana, CIA *Central Intelligence Agency*, como pode ser comprovado pelo documento [10], mantido, anteriormente, sob sigilo e que, posteriormente, foi tornado público.



Referências Bibliográficas

- [1] *100 YEARS OF QUANTUM IS JUST THE BEGINNING*; <https://quantum2025.org/>
- [2] *On the Cover*, *Physics Today*, **78**, 1 (2025); <https://pubs.aip.org/physicstoday/issue/78/1>
- [3] R. Dahn, *Demythologizing quantum history*, *Physics Today*, April (2025); <https://pubs.aip.org/physicstoday/article-abstract/78/4/38/3340767/Demythologizing-quantum-historyCelebrating-the?redirectedFrom=fulltext>
- [4] R. J. Fitzgerald, Editor, *Our Quantum World*, *Physics Today*, **78** 1, (2025); <https://pubs.aip.org/physicstoday/article/78/1/6/3326760/Our-quantum-world>
- [5] *Quantum mechanics 100 years on: an unfinished revolution*; <https://www.nature.com/articles/d41586-025-00014-5>.
- [6] *Return fo Helegoland: celebrating 100 years of quantum mechanics*; <https://physicsworld.com/a/return-to-helgoland-celebrating-100-years-of-quantum-mechanics/>.
- [7] *Quantum mechanics was born 100 years ago. Physicists are celebrating*; <https://www.sciencenews.org/article/quantum-mechanics-physics-turns-100>.
- [8] *One Hundred Years of Quantum Physics*; <https://www.science.org/doi/10.1126/science.289.5481.893>.
- [9] G. Bachelard, *La Formation de l'Esprit Scientifique*, (1934); https://gastonbachelard.org/wp-content/uploads/2015/07/formation_esprit.pdf.
- [10] *Quantum Physics and Parapsychology Conference*, relatório da CIA, EUA, (1974); <https://www.cia.gov/readingroom/docs/CIA-RDP96-00787R000200180002-1.pdf>.



Sumário

| | |
|------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Nomes dos personagens | i |
| Agradecimentos | ii |
| Dedicatória | iii |
| Alocações | iv |
| Apresentação | v |
| Referências Bibliográficas | xiii |
| Apresentacao | xiv |
| Sumário | xiv |
| Lista de Figuras | xxi |
| Lista de Tabelas | xxv |
| 1 Prolegômenos | 1 |
| 1.1 Mecânica Quântica, 1925 ou 1924-1927? | 1 |
| 1.2 Planck, Einstein e os quanta, | 4 |
| 1.2.1 A argumentação de Helge Kragh | 5 |
| 1.3 Fragmentos de eventos da revolução quântica | 6 |
| 1.3.1 Einstein e a mecânica quântica | 8 |
| 1.4 Considerações epistemológicas | 9 |
| 1.5 A mecânica quântica em suas diferentes formulações | 10 |
| 1.6 Paul Dirac revela a equação relativística para o elétron | 11 |
| 1.7 A computação quântica | 13 |
| 1.8 O ato de criação | 14 |
| 1.9 O embate, 1935-1982 | 14 |
| 1.9.1 David Bohm e John S. Bell | 15 |
| 1.10 Dois livros-texto históricos | 16 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.10.1 | E. Fermi | 17 |
| 1.10.2 | L. D. Landau e E. Lifschitz | 18 |
| 1.11 | Físicos no vale da perplexidade. Alguns de seus aforismos. | 18 |
| 1.11.1 | Niels Bohr | 18 |
| 1.11.2 | Roger Penrose | 19 |
| 1.11.3 | Richard Feynman | 19 |
| 1.11.4 | Albert Einstein | 20 |
| 1.11.5 | Wolfgang Pauli | 21 |
| 1.11.6 | John A. Wheeler | 22 |
| 1.11.7 | Erwin Schrödinger | 22 |
| 1.11.8 | Jagdish Mehra* | 22 |
| 1.11.9 | N. David Mermin | 22 |
| 1.11.10 | Steven Weinberg | 23 |
| 1.11.11 | Charles A. Coulson* | 23 |
| 1.11.12 | Karl Popper* | 24 |
| 1.11.13 | Max Perutz* | 24 |
| 1.11.14 | Freeman Dyson* | 25 |
| 1.11.15 | Frank Wilczek* | 26 |
| 1.11.16 | John S. Bell | 26 |
| 1.11.17 | Lev D. Landau e Evgeny M. Lifschitz | 27 |
| 1.11.18 | Max Planck | 28 |
| 1.11.19 | Ciência e Fé, Richard Dawkins* versus Max Perutz | 28 |
| 1.12 | Os matemáticos e a mecânica quântica | 29 |
| 1.12.1 | Matemáticos na penumbra da lógica. Algumas sinopses do matemático Jacob Bronowski | 30 |
| 1.13 | O Observador e o ato de medir | 33 |
| 1.14 | Determinismo e acaso | 35 |
| 1.15 | Platonismo e Realidade | 35 |
| 1.16 | O Tempo | 37 |
| 1.16.1 | O Tempo em tempos progressos | 40 |
| 1.16.2 | O Tempo em Edmund Husserl | 42 |
| | Referências Bibliográficas | 44 |
| 2 | Da descoberta do fogo à mecânica quântica, uma linha do tempo | 53 |
| 2.1 | Da descoberta do fogo a Francis Bacon | 53 |
| 2.2 | Das teorias do calor à física atômica | 56 |
| 2.3 | Atividades antecedentes a 1925 | 60 |
| 2.4 | Mecânica clássica | 70 |
| 2.5 | Mecânica quântica | 71 |
| 2.5.1 | Características essenciais da Mecânica Quântica | 73 |
| 2.5.2 | Medição, emaranhamento e decoerência | 73 |
| | Referências Bibliográficas | 77 |
| 3 | Formalismo matemático da mecânica quântica | 80 |

| | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1 | A matemática da mecânica quântica | 80 |
| Referências Bibliográficas | | 86 |
| 4 | Não-localidade na mecânica quântica, uma metáfora | 87 |
| 4.1 | Contexto histórico | 87 |
| 4.2 | O Problema | 89 |
| 4.3 | A Metáfora dos Gêmeos | 91 |
| 4.3.1 | A aleatoriedade e a instantaneidade da AAD evitam a ocorrência de es- tranhos fenômenos e paradoxos na própria mecânica quântica | 93 |
| 4.4 | Epílogo | 96 |
| Referências Bibliográficas | | 98 |
| 5 | Sistemas bipartites emaranhados | 102 |
| 5.1 | Graus de liberdade acoplados, sistemas bipartites correlacionados e emaranhados | 102 |
| 5.2 | Operações com qubits e o processo de medição | 107 |
| 5.2.1 | Cenário clássico: um sistema bipartido no espaço euclidiano | 107 |
| 5.2.2 | Cenário quântico: um sistema bipartido no espaço de Hilbert | 108 |
| 5.3 | Operadores de medição e não-localidade | 109 |
| 5.3.1 | Ação fantasmagórica à distância e aleatoriedade | 111 |
| Apêndices | | 115 |
| 5.A | Rotação de estados/vetores no espaço de Hilbert | 115 |
| Referências Bibliográficas | | 116 |
| 6 | Aleatoriedade, probabilidades, variáveis ocultas, desigualdades Bell | 117 |
| 6.1 | O que seria um evento aleatório? | 117 |
| 6.1.1 | O que eles disseram, Einstein, Velleman, Mermin e Bell | 118 |
| 6.2 | Saga das “variáveis ocultas” – critérios para atestar ou refutar a validade da aná- lise da estatística clássica para a mecânica quântica | 122 |
| 6.2.1 | Probabilidades clássicas | 123 |
| 6.2.2 | Mecânica quântica | 125 |
| Referências Bibliográficas | | 131 |
| 7 | Teleportação | 133 |
| 7.1 | Prólogo | 133 |
| 7.2 | Os onipresentes e inseparáveis Alice e Beto (<i>Bob</i>), em todos seus estados | 134 |
| 7.3 | Comunicação, via um canal clássico, entre Alice e Beto | 136 |
| Referências Bibliográficas | | 138 |
| 8 | De um qubit a uma equação de Schrödinger – o spin pilota a mobilidade da partícula que o carrega | 139 |
| 8.1 | Prólogo | 140 |
| 8.2 | Mapas e ações | 142 |