



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VII-GOVERNADOR ANTÔNIO MARIZ
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS E APLICADAS-CCEA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

REGIVAN SILVA RAMALHO

UM ESTUDO SOBRE OS CONCEITOS CENTRAIS DA MECÂNICA
QUÂNTICA: DUALIDADE, PRINCÍPIO DA INCERTEZA E O
PROBLEMA DA MEDIDA

PATOS
2024

REGIVAN SILVA RAMALHO

**UM ESTUDO SOBRE OS CONCEITOS CENTRAIS DA MECÂNICA
QUÂNTICA: DUALIDADE, PRINCÍPIO DA INCERTEZA E O
PROBLEMA DA MEDIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física do Centro de Ciências Sociais e Aplicadas da Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física

Orientador: Prof. Dr. Thiago Brito Gonçalves Guerra

**PATOS
2024**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

R166e Ramalho, Regivan Silva.

Um estudo sobre os conceitos centrais da mecânica quântica [manuscrito] : dualidade, princípio da incerteza e o problema da medida / Regivan Silva Ramalho. - 2024.

41 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas, 2024.

"Orientação : Prof. Dr. Thiago Brito Gonçalves Guerra, Coordenação do Curso de Física - CCEA".

1. Mecânica quântica. 2. Dualidade onda-partícula. 3. Princípio da incerteza. 4. Colapso da função de onda. I. Título

21. ed. CDD 530.12

REGIVAN SILVA RAMALHO

UM ESTUDO SOBRE OS CONCEITOS CENTRAIS DA MECÂNICA
QUÂNTICA: DUALIDADE, PRINCÍPIO DA INCERTEZA E O
PROBLEMA DA MEDIDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Física do Centro de
Ciências Sociais e Aplicadas da Universidade
Estadual da Paraíba como requisito parcial à
obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física

Aprovado em: 29/11/2024

BANCA EXAMINADORA

THIAGO BRITO GONÇALVES GUERRA

Prof. Dr. Thiago Brito Gonçalves Guerra (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Valdeci Mestre da Silva Júnior

Prof. Dr. Valdeci Mestre da Silva Júnior
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Marcelo da Silva Vieira

Prof. Dr. Marcelo da Silva Vieira
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A minha mãe, por
seu amor e dedicação,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Thiago Brito Gonçalves Guerra por sua orientação e apoio inestimáveis ao longo da elaboração deste trabalho. Sua constante disponibilidade para tirar minhas dúvidas e sua ajuda na busca por materiais, incluindo artigos e livros em inglês que eu não conseguia acessar, foram fundamentais para a realização deste projeto. Sua gentileza e dedicação em cada etapa do processo foram essenciais para o sucesso desta pesquisa.

Estendo também meus agradecimentos aos demais professores do curso de Física do campus VII da Universidade Estadual da Paraíba, que, mesmo de forma indireta, contribuíram para este trabalho, pois desempenharam um papel importante na minha formação acadêmica e no desenvolvimento das habilidades que me permitiram concluir esta pesquisa.

Agradeço também aos meus colegas que, ao longo da jornada acadêmica, se tornaram verdadeiros amigos. Sua companhia foi fundamental não apenas nos momentos de estudo e apoio mútuo, mas também para tornar essa caminhada mais leve e divertida. A partilha de experiências, risadas e desafios fez toda a diferença e tornou essa trajetória memorável.

Agradeço, de forma especial, à minha mãe, por sempre me apoiar e me incentivar a estudar. Sua presença constante e inabalável nos momentos mais difíceis foi uma fonte de força e inspiração. Seu amor e dedicação foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios e concluir essa etapa tão importante da minha vida.

“O comportamento da matéria em seu nível mais fundamental é misterioso, mas não incompreensível.”

Richard Feynman

RESUMO

Neste trabalho, abordam-se os principais conceitos da mecânica quântica, contextualizando as primeiras ideias que deram origem a essa teoria revolucionária e que marcaram uma ruptura com a física clássica. Com uma ênfase especial na dualidade onda-partícula, no princípio da incerteza de Heisenberg e no colapso da função de onda, esta pesquisa explora as bases teóricas que sustentam a mecânica quântica. A análise é conduzida principalmente por meio do experimento da dupla fenda, que ilustra o comportamento quântico único da matéria, evidenciando suas propriedades ondulatórias e corpusculares. Como resultado, observou-se que esses conceitos desafiam as noções clássicas de determinismo e previsibilidade, introduzindo uma abordagem probabilística e interdependente para os sistemas microscópicos. Este estudo visa contribuir para uma compreensão mais profunda dos fundamentos da mecânica quântica e oferecer uma base sólida para o ensino e aprendizado desses temas essenciais.

Palavras-chave: Mecânica quântica. Dualidade onda-partícula. Princípio da incerteza. Colapso da função de onda.

ABSTRACT

This paper addresses the main concepts of quantum mechanics, contextualizing the first ideas that gave rise to this revolutionary theory and that marked a break with classical physics. With a special emphasis on wave-particle duality, Heisenberg's uncertainty principle, and the collapse of the wave function, this research explores the theoretical foundations that support quantum mechanics. The analysis is conducted mainly through the double-slit experiment, which illustrates the unique quantum behavior of matter, evidencing its wave and corpuscular properties. As a result, it was observed that these concepts challenge the classical notions of determinism and predictability, introducing a probabilistic and interdependent approach to microscopic systems. This study aims to contribute to a more profound understanding of the foundations of quantum mechanics and to offer a solid foundation for teaching and learning these essential topics.

Keywords: Quantum Mechanics. Uncertainty principle. Wave-Particle Duality, Wave Function Collapse

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Contexto Histórico	12
2.2	A radiação de Corpo Negro	12
2.3	Efeito fotoelétrico	14
2.4	A Hipótese de Louis de Broglie	15
2.5	A Mecânica Ondulatória	17
3	FUNÇÃO DE ONDA E ESTRUTURAS MATEMÁTICAS NA MECÂNICA QUÂNTICA	18
4	EXPERIMENTO DA DUPLA FENDA	22
4.1	O Experimento da Dupla Fenda no Contexto Clássico	22
4.1.1	O Experimento da Dupla Fenda com Partícula	22
4.1.2	O Experimento da Dupla Fenda com Ondas	23
4.2	Experimento da Dupla Fenda com Elétrons	24
4.2.1	Duas Fendas Abertas	25
4.2.2	Duas Fendas e um Detector no Caminho	25
5	A DUALIDADE ONDA - PARTÍCULA	27
6	O PRINCÍPIO DA INCERTEZA DE HEISENBERG	28
7	O COLAPSO DA FUNÇÃO DE ONDA E O PROBLEMA DA MEDIDA	30
8	“EXPERIMENTO” DO GATO DE SCHRÖDINGER	34
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

A mecânica quântica surgiu no início do século XX para lidar com fenômenos que a física clássica (mecânica clássica, termodinâmica e teoria eletromagnética), não conseguia explicar. Esse novo ramo da física foi revolucionário ao desafiar ideias previamente estabelecidas e introduzir conceitos fundamentais que mudaram profundamente nosso entendimento sobre a natureza da matéria e seu comportamento no nível microscópico. Conforme discutido por Feynman (2008), a física quântica aborda o comportamento peculiar da matéria em escalas atômicas, onde características típicas das teorias clássicas não se aplicam, evidenciando a necessidade de uma nova abordagem teórica.

Um dos problemas que a física clássica não conseguia explicar era a radiação do corpo negro, onde, segundo previsões clássicas, a energia emitida por um corpo negro deveria se tornar infinita em altas frequências. Além disso, o efeito fotoelétrico, onde a luz de certas frequências ejeta elétrons de um material, também não podia ser explicado pela teoria clássica, que tratava a luz apenas como uma onda. Outro desafio era o espectro do átomo de hidrogênio, que exibia linhas discretas que o modelo atômico de Rutherford, baseado em um sistema planetário de elétrons, não conseguia explicar (Eisberg e Resnick, 1985).

A teoria quântica trouxe novas ideias para lidar com esses problemas. Max Planck, em 1900, introduziu a quantização da energia ao propor que ela era emitida ou absorvida em pacotes discretos chamados “quanta”, resolvendo o problema da radiação do corpo negro. Poucos anos depois, em 1905, Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico ao sugerir que a luz também podia ser tratada como partículas, os fótons, além de sua natureza ondulatória, introduzindo a dualidade onda-partícula (Saito, 2019). Em 1913, Niels Bohr apresentou um modelo atômico em que os elétrons orbitam o núcleo em níveis de energia quantizados, explicando as linhas espectrais do hidrogênio. Esse modelo, embora tenha sido um grande avanço, ainda misturava conceitos clássicos com a nova visão quântica (Raicik, 2023).

A partir daí, a teoria continuou a se expandir com o trabalho de outros cientistas. Erwin Schrödinger, em 1926, desenvolveu uma equação que descreve a evolução de um sistema quântico como uma onda de probabilidade, fornecendo uma base matemática robusta para a mecânica quântica. Já Werner Heisenberg, em 1927, formulou o princípio da incerteza, que afirma ser impossível determinar simultaneamente a posição e o momento de uma partícula com precisão absoluta, desafiando a ideia clássica de previsibilidade total (Dorai et al., 2018). A chamada interpretação de Copenhague, defendida por Bohr e Heisenberg, complementou esses avanços ao afirmar que o estado de uma partícula é descrito por uma função de onda que colapsa em um valor definido apenas no momento da medição, o que contestava a noção clássica de uma realidade objetiva e independente do *observador* (Levada et al., 2020).

O pensamento quântico trouxe um novo entendimento do universo que se distanciava das ideias clássicas, como o determinismo, que acreditava na possibilidade de prever o futuro de um sistema físico com base nas suas condições iniciais. Em vez disso, a quântica introduziu o conceito de probabilidade, onde apenas as chances de diferentes resultados podem ser previstas. Além disso, enquanto a física clássica postulava que as interações físicas ocorriam de forma localizada, a física quântica trouxe à tona fenômenos como o emaranhamento quântico, onde partículas podem se conectar instantaneamente, independentemente da distância, desafiando a noção de localidade.

Outro ponto essencial é a relação entre *observação* e sistemas quânticos. Na física clássica, acreditava-se que os sistemas físicos existiam de forma objetiva e independente de qualquer *observação*. No entanto, a mecânica quântica revelou que o ato de medir certas propriedades de um sistema quântico pode alterar seu estado.

A mecânica quântica não apenas abriu portas para novas áreas de pesquisa, como a química quântica, a computação quântica e a criptografia quântica, mas também foi crucial para a compreensão da estrutura atômica, das interações nucleares e das propriedades dos materiais, tornando-se um dos pilares da física moderna. Sua teoria tem sido extremamente bem-sucedida em explicar diversos fenômenos, incluindo o espectro de radiação de corpo negro, espectros atômicos, química molecular, supercondutividade, física de semicondutores e aplicações em nanotecnologia e cosmologia, sem ter sido refutada por qualquer experimento até o momento, expandindo assim nossa compreensão do universo e transformando a prática e a compreensão científica Bassi et al. (2013).

No entanto, embora o formalismo matemático da mecânica quântica seja robusto e preveja resultados experimentais com alta precisão, a interpretação dos fenômenos subjacentes permanece um desafio. Isso se deve principalmente ao fato de a teoria apresentar conceitos que contrariam a intuição e as experiências cotidianas, criando dificuldades para entender os princípios fundamentais que governam o comportamento microscópico da matéria (Velásquez-Toribio, 2022).

Alguns dos conceitos fundamentais que estruturam essa teoria incluem a dualidade onda-partícula, o colapso da função de onda e o princípio da incerteza. Esses conceitos frequentemente não são discutidos de maneira adequada nos livros didáticos, o que resulta em interpretações equivocadas por parte do público em geral. Nesse sentido, como destaca Lima (2023), é lamentável que a maioria dos livros didáticos, tanto do ensino superior quanto da Educação Básica, trate o tema de maneira inadequada, focando na apresentação de equações e resolução de exercícios, e com discussões conceituais usualmente superficiais.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo explorar os conceitos centrais da mecânica quântica, traçando seu desenvolvimento histórico, suas interpretações teóricas e suas implicações para a física moderna. De forma mais específica, serão abordados os conceitos de dualidade onda-partícula, o colapso da função de onda e o princípio da incerteza.

A escolha do tema se justifica pela necessidade de uma investigação detalhada, uma vez que, como já mencionado, muitos livros didáticos e materiais educacionais tratam esses conceitos de forma simplificada ou inadequada. A abordagem superficial frequentemente encontrada em tais fontes pode levar a mal-entendidos e interpretações incorretas, o que reforça a importância de uma análise mais rigorosa e crítica. Ao preencher essas lacunas e promover uma compreensão mais precisa, este trabalho contribui para a formação acadêmica de estudantes e profissionais e melhora a comunicação científica sobre a mecânica quântica.

Dada a natureza da pesquisa proposta, que tem o intuito de investigar conceitos fundamentais da mecânica quântica e suas interpretações teóricas, optou-se pelo método de pesquisa bibliográfica. Segundo Gil (2002), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, principalmente composto por livros e artigos científicos. Na perspectiva de Marconi e Lakatos (2017), a pesquisa bibliográfica é fundamental, pois permite ao pesquisador conhecer e analisar as principais contribuições teóricas existentes sobre determinado tema, o que proporciona uma compreensão abrangente e crítica sobre o conhecimento disponível.

Dessa forma, o presente trabalho irá, inicialmente, evidenciar os primeiros sinais de comportamento quântico observados no início do século XX, que levaram à introdução do conceito de quantização da energia. Em seguida, abordaremos o trabalho pioneiro de Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger, cujas contribuições foram cruciais para o estabelecimento da mecânica quântica como uma teoria coerente e abrangente. Posteriormente, discutiremos com mais detalhes a dualidade onda-partícula, o princípio da incerteza de Heisenberg, o colapso da função de onda e os debates que se abrem na tentativa de interpretar sua natureza.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Contexto Histórico

Antes de adentrarmos na formulação da Mecânica Quântica, se faz necessária uma breve contextualização. A história da mecânica quântica começou no início do século XX, quando os fenômenos que regiam o mundo atômico e subatômico não podiam ser explicados pelas leis da física clássica.

Max Planck, em 1900, deu o primeiro passo ao sugerir que a energia era emitida em quantidades discretas, ou “quanta”, para explicar a radiação do corpo negro. Em 1905, Albert Einstein aprofundou essa ideia ao descrever o efeito fotoelétrico, mostrando que a luz também se comportava como partículas, os fótons. Ao longo das décadas seguintes, contribuições de físicos como Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger e Max Born consolidaram o campo, introduzindo conceitos fundamentais como quantização de energia, dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza. Esses desenvolvimentos revolucionaram nossa compreensão da natureza, levando a uma nova era da física.

2.2 A radiação de Corpo Negro

Em meados do século XIX, a física se encontrava num entrave. Naquela época, sabia-se que todos os corpos emitem radiação eletromagnética num intervalo de comprimentos de onda cujo ponto de emissão máxima dependia da sua temperatura. A medida que a temperatura de um corpo aumenta, observa-se um deslocamento desse pico para menores comprimentos de onda (Eisberg e Resnick, 1985).

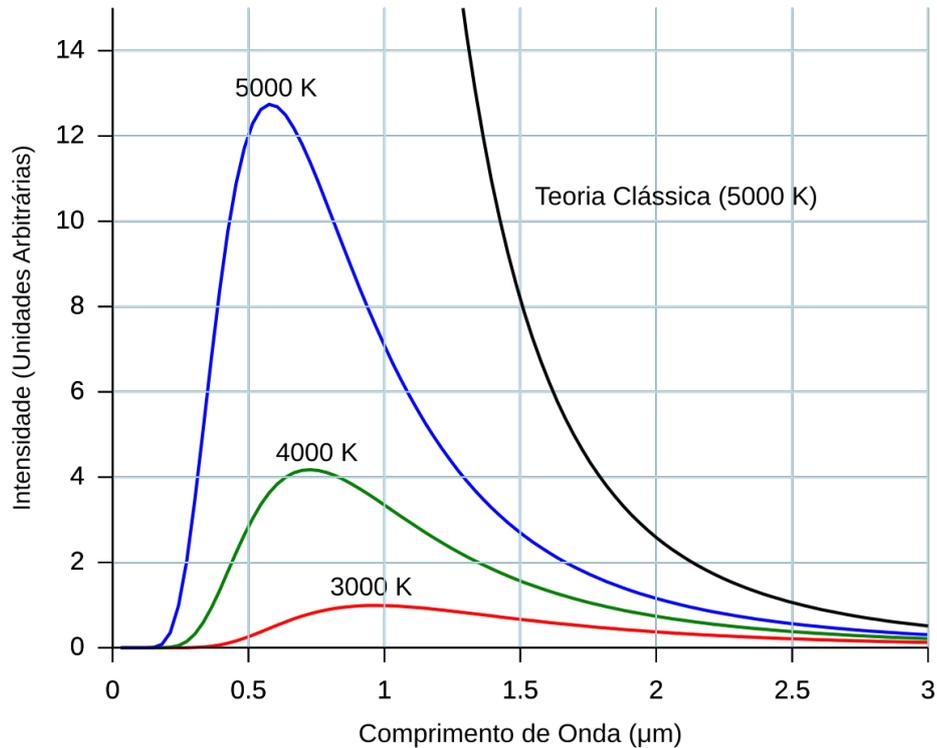
Na interação luz-matéria, parte da luz é absorvida e parte é refletida pelo corpo. Considerando uma situação de equilíbrio termodinâmico, devemos ter a taxa de absorção e de emissão de radiação iguais. Assim, um corpo que absorve bem energia, também emite bem energia. Kirchhoff, em 1859, introduziu o conceito de *corpo negro*, um objeto ideal que absorve completamente toda a radiação incidente sobre ele (Kirchhoff, 1859). Como se trata de uma idealização, um modelo que se aproxima dessa ideia é considerarmos uma caixa de interior escurecido com um pequeno furo, de forma que praticamente toda a radiação que entra nessa cavidade não consegue escapar, ou seja, é absorvida.

Classicamente, a frequência da radiação emitida por um corpo negro é relacionada à sua temperatura pela lei de Rayleigh-Jeans:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2 K_B T}{c^3} . \quad (2.1)$$

Essa equação prevê o que observamos experimentalmente para baixas frequências. No entanto, ao percorremos o espectro a discrepância entre o previsto e o observado se torna cada vez maior, até se dissociar completamente na região do ultravioleta.

Figura 1: Curvas de emissão de um corpo negro, destacando a discrepância entre resultados experimentais e previsões clássicas para altas frequências.



Fonte: Wikipédia, 2024.

Isso por que, classicamente, uma vez que essa radiação provém das ondas estacionárias presas dentro da “caixa”, a medida que a frequência aumenta devemos ter também um aumento da energia emitida. De modo que, considerando todas as frequências, teríamos uma densidade de energia infinita.

$$u(T) = \int_0^{\infty} u(\nu, T) d\nu = \infty \quad (2.2)$$

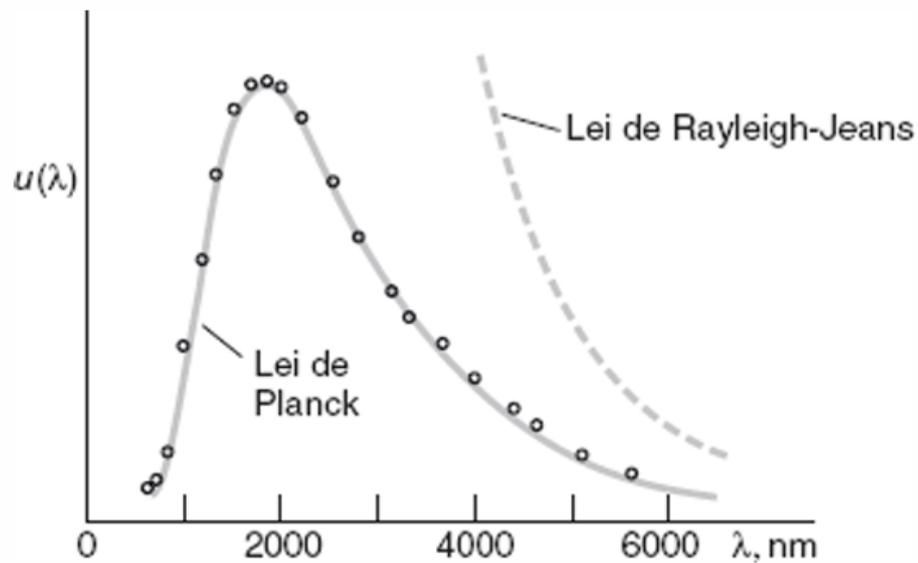
Esse resultado ficou conhecido como *a catástrofe do ultravioleta* e não havia aparente solução para esse problema. Até que em 1900, Max Planck propôs uma função $u(\lambda)$ que se ajustava aos resultados experimentais ao adotar hipóteses inovadoras. Inicialmente, ele encontrou uma função empírica capaz de reproduzir os dados e, posteriormente, identificou como modificar os cálculos clássicos para derivá-la. A necessidade de ajustes decorre do fato de que, em uma cavidade, o número de modos estacionários aumenta com a diminuição do comprimento de onda, tendendo ao infinito quando $\lambda \rightarrow 0$. Para que a densidade de energia $u(\lambda)$ também tendesse a zero nesse limite, era necessário que a energia média por modo dependesse de λ e diminuísse a zero para $\lambda \rightarrow 0$, ao contrário da previsão clássica de uma energia constante kT para todos os comprimentos de onda (Tipler e Llewellyn, 2008).

Planck conseguiu evitar a catástrofe do ultravioleta ao propor uma descrição precisa da radiação do corpo negro. Diferentemente da suposição de Rayleigh-Jeans, que afirmava que uma onda estacionária poderia trocar qualquer quantidade contínua de energia com a matéria, Planck sugeriu que a troca de energia entre a radiação e a matéria deveria ser discreta. Para isso, ele postulou que a energia da radiação de frequência ν , emitida pelas cargas oscilantes das paredes da cavidade, deveria ser quantizada e dada apenas em múltiplos inteiros de \hbar (Zettili, 2009). Assim, Planck supôs que a energia era dada por:

$$E = nh\nu \quad , \quad (2.3)$$

em que n é u número inteiro e $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ é a chamada *constante de Planck*.

Figura 2: Comparação da lei de Planck e da lei de Rayleigh-Jeans com os resultados experimentais.



Fonte: Tipler, 2008.

Dessa forma, a hipótese da quantização da energia de Planck, ao resolver o problema do infinito e prever corretamente a curva de intensidade em função da temperatura, abriu caminho para as futuras ideias que formariam a estrutura da física quântica

2.3 Efeito fotoelétrico

Tempos depois, Albert Einstein assumiu que essa *quantização* é, na verdade, uma particularidade da luz, e que os *pacotes* poderiam ser vistos como partículas, os *fótons*. Esse foi o resultado do seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico (Einstein, 1905).

Nesse fenômeno havia sido observado que ao incidir luz num material seus elétrons poderiam ser ejetados. No entanto, isso acontecia apenas quando a luz atingia uma frequência mínima específica, independente da intensidade considerada. Não havia um

modo de explicar esse resultado classicamente, uma vez que a energia deveria aumentar continuamente com a intensidade da luz, a despeito da frequência.

Para Einstein, quando a luz incide sobre um material, são os fótons que transferem energia para os elétrons do mesmo. Cada fóton carrega uma energia específica, de acordo com a frequência da luz (eq. 2.3). Se essa energia for maior que a quantidade mínima de energia necessária para remover um elétron da superfície do material (chamada função trabalho), o elétron é ejetado (Eisberg e Resnick, 1985).

A função trabalho é específica para cada material e está relacionada com a energia de ligação dos elétrons no metal. A equação básica que descreve o efeito fotoelétrico é dada por:

$$E_f = h\nu - \phi \quad (2.4)$$

onde E_f é a energia cinética dos elétrons ejetados, h é a constante de Planck, ν é a frequência da luz incidente e ϕ é a função trabalho, que representa a energia mínima necessária para remover o elétron. Se a energia do fóton $h\nu$ for menor que a função trabalho ϕ , nenhum elétron será ejetado, independentemente da intensidade da luz.

No contexto do efeito fotoelétrico, a luz, que era tradicionalmente vista como uma onda, revelou um comportamento de partícula ao ser capaz de ejetar elétrons de um metal. Essa observação indicou que a luz se comporta como uma coleção de partículas discretas, chamadas fótons, que possuem energia quantizada. Albert Einstein, ao explicar esse fenômeno, mostrou que a energia dos fótons é proporcional à sua frequência, o que implica que a luz tem uma natureza quântica (Tipler e Llewellyn, 2008).

2.4 A Hipótese de Louis de Broglie

O efeito fotoelétrico, assim como experimentos posteriores, como o efeito Compton e a produção de pares, revelaram que a radiação, além de sua natureza ondulatória, também apresenta características de partículas (Zettili, 2009).

De acordo com Eisberg e Resnick (1985), a hipótese de de Broglie estabelece que o comportamento dual, caracterizado pela dualidade onda-partícula, não se limita à radiação, mas também se aplica à matéria. Eles explicam que, assim como um fóton possui uma onda de luz que governa seu movimento, uma partícula material, como um elétron, é associada a uma onda material que também influencia seu movimento. Essa proposta de de Broglie sugere uma simetria fundamental na natureza, onde os aspectos ondulatórios e corpusculares da matéria se relacionam de maneira quantitativa, semelhante ao que ocorre com a radiação. De acordo com essa hipótese, a energia total E de uma entidade está ligada à frequência ν da onda correspondente ao seu movimento dada pela equação:

$$E = h\nu \quad (2.5)$$

e o momento p da entidade está relacionado ao comprimento de onda λ da onda associada pela equação:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.6)$$

Assim, os conceitos de partícula, energia E e momento p estão conectados através da constante de Planck h aos conceitos de onda, frequência ν e comprimento de onda λ . A equação, na forma a seguir, é chamada de relação de de Broglie (Eisberg e Resnick, 1985; Kramers, 2018):

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.7)$$

Ela prevê o comprimento de onda de de Broglie λ de uma onda material associada ao movimento de uma partícula material que possui um momento p .

A hipótese de Louis de Broglie, que sugeria a existência de ondas associadas às partículas, era inicialmente uma construção teórica, sem evidências experimentais diretas que a respaldassem (Lima, 2023). No entanto, essa ideia foi confirmada experimentalmente em 1927 pelos físicos Clinton Davisson e Lester Germer. Eles realizaram um experimento em que bombardearam uma superfície de níquel com um feixe de elétrons, observando que esses elétrons sofriam difração, produzindo padrões de interferência semelhantes aos observados com ondas de luz. A ideia de de Broglie foi, assim, corroborada por Davisson e Germer, e posteriormente por George Paget Thomson, filho do famoso físico J.J. Thomson, que também obteve padrões de interferência com elétrons (Zettili, 2009).

A questão que se coloca é: se a hipótese de de Broglie é verdadeira e a matéria exibe um comportamento ondulatório, por que não observamos esse fenômeno em objetos do dia a dia? Como evidenciado na equação 2.7, a resposta está relacionada com o momento dos objetos em questão. Enquanto partículas microscópicas, como os elétrons, apresentam características ondulatórias claramente discerníveis devido ao seu pequeno momento, objetos macroscópicos possuem momento grande, logo os comprimentos de onda associados são extremamente pequenos, tornando esses efeitos indetectáveis.

Nesse sentido, Zettili (2009), afirma que objetos macroscópicos, devido às suas massas elevadas, possuem comprimentos de onda de de Broglie extremamente pequenos em relação ao tamanho do sistema, o que torna indetectável seu comportamento ondulatório. No entanto, em nível microscópico, as ondas associadas às partículas materiais são comparáveis ou superiores ao tamanho do sistema, permitindo que suas propriedades ondulatórias sejam claramente observáveis. Assim, a detecção da natureza ondulatória de um objeto depende de seu comprimento de onda estar na faixa ou exceder o seu próprio tamanho.

Esse avanço representou uma mudança radical na maneira de pensar, especialmente porque, no caso de partículas com massa (e não relativísticas), a descrição usada para os fótons não se aplica diretamente. No entanto, as previsões obtidas a partir dessa

abordagem estão em total concordância com os resultados experimentais. Então, embora contraintuitivo, de fato toda partícula está associada a uma onda levando ao conceito da dualidade onda-partícula.

2.5 A Mecânica Ondulatória

Vimos que o comportamento do elétron revela que, apesar de ser uma partícula ¹ indivisível, detectada em um único ponto e com massa, ele pode apresentar características ondulatórias em determinadas condições experimentais. Essa dualidade levou à representação das partículas por meio de uma função de onda na mecânica quântica, formalismo proposto inicialmente por Erwin Schrödinger (Lima, 2023).

Erwin Schrödinger desenvolveu uma abordagem da mecânica quântica fundamentada em ondas, resultando na famosa equação de Schrödinger, que descreve a evolução dessas ondas no espaço e no tempo (Eisberg e Resnick, 1985). Embora estivesse correta, Schrödinger interpretava a equação de forma equivocada, pois acreditava que a onda representava a densidade de carga e que deveria estar associada a uma onda fisicamente existente, similar a uma onda eletromagnética (Lima, 2023).

Em 1926, Max Born forneceu a interpretação correta, identificando a onda de Schrödinger como uma amplitude de probabilidade. Ou seja, uma vez que a onda é geralmente uma função complexa, deve-se calcular o quadrado do valor absoluto da onda (Born, 1953). Isso nos dá a probabilidade de encontrar uma partícula em uma determinada posição (considerando que a onda é função da posição).

Essa probabilidade não surge de uma falta de conhecimento, como nos casos tradicionais de probabilidade. Por exemplo, ao lançar uma moeda, se conhecermos todos os detalhes do lançamento inicial (como velocidade e rotação), além das condições externas (como correntes de ar e a superfície onde ela vai cair), podemos prever o lado que ficará para cima. Já as probabilidades na mecânica quântica não funcionam dessa forma; elas não se originam de informações ausentes. As probabilidades são intrinsecamente aleatórias, sem variáveis adicionais que possam torná-las previsíveis. O que é previsível é qual o espaço amostral terá o sistema. Na mecânica quântica, esse conceito pode ser entendido como a totalidade dos resultados possíveis de uma medição associada ao sistema quântico.

¹Em 1906, foi concedido o prêmio Nobel da Física a J.J. Thompson por ter mostrado que os raios catódicos, agora chamados de elétrons, são partículas com carga elétrica e massa bem definidas.

3 FUNÇÃO DE ONDA E ESTRUTURAS MATEMÁTICAS NA MECÂNICA QUÂNTICA

Neste capítulo, vamos introduzir alguns dos principais conceitos associados a descrição matemática da mecânica quântica. Esses conceitos antecedem uma discussão mais extensa sobre os problemas e as consequências do papel da *medida*, na mecânica quântica.

- **Função de onda:** a função de onda, denotada por ψ , é a descrição matemática de um estado quântico, que corresponde a qualquer estado possível em que um sistema possa se encontrar. Além disso, a função de onda contém toda a informação sobre o sistema. Em geral, a função de onda é uma função complexa cuja amplitude determina as probabilidades associadas às medidas do sistema (Griffiths e Schroeter, 2018);
- **O princípio da superposição:** O princípio da superposição na mecânica quântica afirma que se ψ e ψ' são dois estados no espaço de um sistema, e a e b são dois números complexos quaisquer, então $a\psi + b\psi'$ também é um estado;
- **Operadores:** são transformações lineares de um espaço vetorial nele mesmo. Na mecânica quântica são os operadores que conectam a função de onda com quantidades observáveis (posição, momento, energia, etc.) (Griffiths e Schroeter, 2018). Aqui, estamos interessados em operadores autoadjuntos ou hermitianos. Esses operadores são lineares em espaços de Hilbert e são iguais ao seu adjunto (ou conjugado transposto), ou seja, um operador \hat{A} é hermitiano se $\hat{A} = \hat{A}^\dagger$, onde \hat{A}^\dagger é o adjunto de \hat{A} . Além disso, operadores hermitianos têm autovalores reais, o que é essencial para que os observáveis físicos, como energia e posição, tenham valores mensuráveis; e os seus autovetores são ortogonais (Zettili, 2009).

Abaixo, listaremos alguns dos operadores mais comuns:

Tabela 1: Relação entre os observáveis clássicos e operadores quânticos, com as respectivas operações matemáticas.

Observável	Símbolo clássico	Operador quântico	Operação
posição	\mathbf{r}	$\hat{\mathbf{r}}$	multiplicar por \mathbf{r}
momento	\mathbf{p}	$\hat{\mathbf{p}}$	$-i\hbar \left(\hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \right)$
energia cinética	T	\hat{T}	$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$
energia potencial	$V(\mathbf{r})$	$\hat{V}(\mathbf{r})$	multiplicar por $V(\mathbf{r})$
energia total	E	\mathcal{H}	$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + V(\mathbf{r})$
3*momento angular	l_x	\hat{l}_x	$-i\hbar \left(y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y} \right)$
	l_y	\hat{l}_y	$-i\hbar \left(z \frac{\partial}{\partial x} - x \frac{\partial}{\partial z} \right)$
	l_z	\hat{l}_z	$-i\hbar \left(x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x} \right)$

Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

- **Comutação de operadores:** Sejam \hat{A} e \hat{B} , operadores hermitianos que atuam no espaço de Hilbert, definimos o comutador de \hat{A} com \hat{B} como:

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} \quad (3.1)$$

Quando esses operadores são aplicados a uma função ψ , podemos definir a seguinte composição:

$$[\hat{A}, \hat{B}]\psi = \hat{A}\hat{B}\psi - \hat{B}\hat{A}\psi \quad (3.2)$$

Se $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$, dizemos que \hat{A} e \hat{B} comutam, o que significa que a ordem em que os operadores são aplicados não altera o resultado. Por outro lado, se $[\hat{A}, \hat{B}] \neq 0$, então os operadores não comutam (Zettili, 2009).

Para exemplificar, vamos obter a relação de comutação entre os operadores de posição \hat{x} e momento \hat{p} . Consideremos que esses operadores atuam em uma função $\psi(x)$:

$$[\hat{x}, \hat{p}]\psi(x) = \hat{x}\hat{p}\psi(x) - \hat{p}\hat{x}\psi(x)$$

então,

$$[\hat{x}, \hat{p}]\psi(x) = x \left(-i\hbar \frac{d}{dx}(\psi(x)) \right) - \left(-i\hbar \frac{d}{dx} \right) x\psi(x)$$

$$[\hat{x}, \hat{p}]\psi(x) = -i\hbar x \frac{d}{dx}(\psi(x)) + i\hbar x \frac{d}{dx}(\psi(x)) + i\hbar x \frac{dx}{dx}$$

Assim, temos:

$$[\hat{x}, \hat{p}]\psi(x) = i\hbar\psi(x).$$

Como a relação obtida deve ser verdadeira para qualquer função de onda $\psi(x)$, temos que:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar \quad (3.3)$$

Desse modo, conclui-se que os operadores posição \hat{x} e momento \hat{p} não comutam. Discutiremos o significado físico desse fato na seção 6, na qual abordaremos o princípio da incerteza.

- **A equação de Schrodinger:** a função de onda de um sistema quântico evolui no tempo de acordo com a equação de Schrodinger (Zettili, 2009).

Vamos partir da expressão clássica não-relativística para a energia de uma partícula,

que é a soma das energias cinética e potencial. Por simplicidade, vamos considerar um movimento unidimensional, mas a generalização para o caso 3D é direta. Temos:

$$H = E = T + V = \frac{1}{2}mv^2 + V(x) = \frac{p^2}{2m} + V(x). \quad (3.4)$$

Mas, segundo de Broglie, todas as partículas podem ser representadas como ondas (*dualidade onda-partícula*) com frequência ω e número de onda k . Além disso, temos as relações $E = \hbar\omega$ e $p = \hbar k$. Nossa equação se torna, então:

$$\hbar\omega = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + V(x). \quad (3.5)$$

Uma onda com frequência ω e número de onda k pode ser escrita como $\Psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}$. Agora, observamos que

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -i\omega \Psi \quad \Longrightarrow \quad \omega \Psi = i \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad \text{e} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -k^2 \Psi \quad \Longrightarrow \quad k^2 \Psi = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}. \quad (3.7)$$

Se multiplicarmos a equação Eq. (3.2) por Ψ , e substituirmos as relações acima, ficamos com

$$\hbar \left(i \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right) = \frac{\hbar^2}{2m} \left(-\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \right) \Psi + V(x) \Psi. \quad (3.8)$$

Esta é a *equação de Schrödinger dependente do tempo*. Voltando para as variáveis x e t , temos:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x) \Psi(x, t) = H \Psi(x, t). \quad (3.9)$$

Para sistemas conservativos, escrevermos $\Psi(x, t) = \psi(x)e^{-iEt/\hbar}$, então temos a equação independente do tempo:

$$E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + V(x)\psi(x) \quad (3.10)$$

Essa equação é mais restritiva do que a equação de Schrödinger dependente do tempo original, porque assume que a partícula/onda tem uma energia definida. Em geral, uma partícula pode estar em um estado que é a superposição de estados com várias energias definidas, ou seja, a solução geral é uma combinação linear das soluções para as diferentes energias:

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \psi_n(x) e^{-iE_n t/\hbar}. \quad (3.11)$$

Basicamente, a função de onda total é a soma dos possíveis estados associados às possíveis energias, e a probabilidade da partícula ser encontrada em um desses estados específicos após uma medida (da posição, no caso) é dada por $|c_n|^2$.

Como dissemos, a interpretação de $\Psi(x, t)$ é que $|\Psi(x, t)|^2$ está associada com a probabilidade de encontrar a partícula na posição x (Born, 1953). Essa interpretação estatística confronta com a mecânica clássica, pois mesmo que a função de onda seja conhecida (ou seja, tenhamos toda a informação do sistema), ainda assim não se consegue prever com precisão o resultado de um experimento simples para medir sua posição, já que a mecânica quântica fornece apenas informações estatísticas sobre os possíveis resultados. Essa incerteza é um dos pontos de partida para discussões mais profundas sobre a teoria: a natureza não é determinística ou a teoria está incompleta?

A desigualdade de Bell é o critério decisivo para a resolução desse problema. Na década de 1950, David Bohm propôs uma interpretação da mecânica quântica com “variáveis ocultas”, sugerindo que certas propriedades não seriam descritas pela função de onda (Lima, 2023). Contudo, em 1964, John Bell desenvolveu a desigualdade de Bell, mostrando que havia diferenças experimentais entre teorias com variáveis ocultas locais e a mecânica quântica completa, o que revolucionou a discussão sobre as interpretações da teoria (Freire, 2015).

Segundo Griffiths (2011), muitos experimentos para testar a desigualdade de Bell foram realizados a partir dos anos 1960. Os resultados desses experimentos indicam a completude da mecânica quântica. Inclusive, o Nobel de Física 2022 foi dado aos físicos que desenvolveram esses experimentos. Desse modo, conclui-se que a mecânica quântica é um teoria não-determinista (Lima, 2023).

4 EXPERIMENTO DA DUPLA FENDA

Nas seções 2.3 e 2.4, discutimos o efeito fotoelétrico e a hipótese de Louis de Broglie, que introduzem o conceito de dualidade onda-partícula. Agora, vamos explorar o experimento clássico de dupla fenda para entendermos melhor esses conceitos. De acordo com Bach et al. (2013), “a difração de fenda dupla é uma pedra angular da mecânica quântica. Ela ilustra as principais características da mecânica quântica: interferência e a dualidade partícula-onda da matéria”. Além disso, esse experimento será a base para introduzirmos outros conceitos fundamentais da mecânica quântica, como o princípio da incerteza e o problema da medida.

4.1 O Experimento da Dupla Fenda no Contexto Clássico

Antes de explorar o experimento da dupla fenda no que diz respeito ao comportamento quântico do elétron e de partículas quânticas de modo geral, vamos analisar esse experimento do ponto de vista clássico. Vamos comparar o comportamento de partículas com o comportamento de ondas quando submetidos ao experimento da dupla fenda, para posteriormente contrastar com o experimento realizado com elétrons.

4.1.1 O Experimento da Dupla Fenda com Partícula

No caso das partículas clássicas, como descrito por Feynman (2008), imagine uma arma que dispara projéteis em direção a uma parede com duas fendas. Atrás dessa parede, há um anteparo que absorve os projéteis, e um detector pode se mover ao longo do eixo horizontal para medir onde os projéteis atingem.

Os projéteis chegam ao detector em unidades inteiras, e a probabilidade de um projétil atingir uma determinada posição é proporcional ao número de projéteis que chegam naquela região ao longo do tempo. Ao bloquear uma das fendas, é possível medir a probabilidade de um projétil passar apenas pela fenda aberta, o que gera uma distribuição de probabilidade em torno de uma posição central.

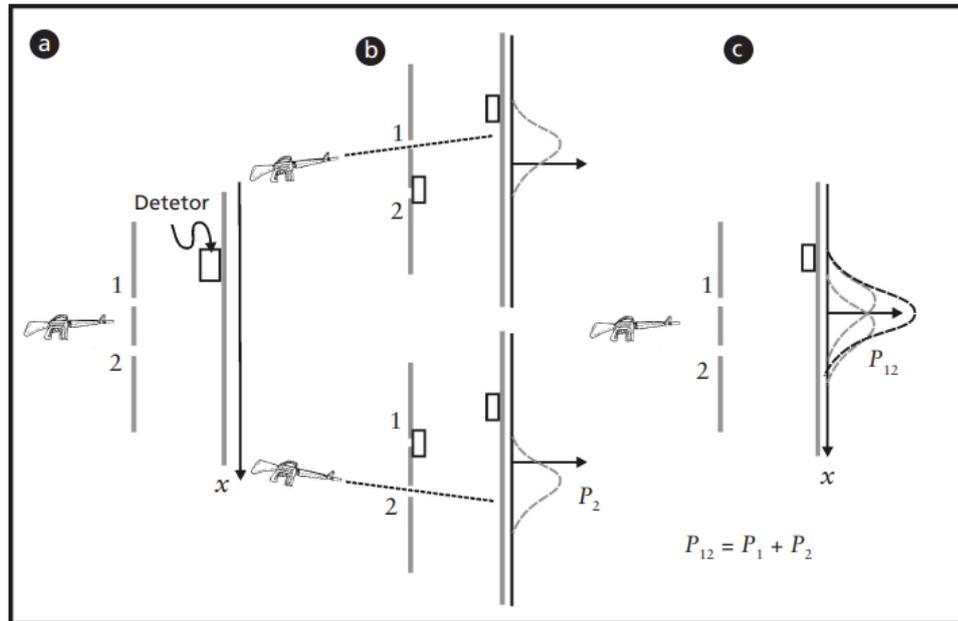
Quando as duas fendas estão abertas, o resultado obtido é simplesmente a soma das probabilidades individuais de cada fenda, sem qualquer interferência entre os projéteis:

$$P = P_1 + P_2 \quad (4.1)$$

ou seja, o efeito obtido quando temos duas fendas abertas é a soma dos efeitos de cada fenda individualmente. Esse comportamento é caracterizado pela ausência de efeitos interferentes, o que reflete o comportamento clássico das partículas.

Conforme Donangelo e Capaz (2009), “isto resume nosso entendimento sobre projéteis incidindo em uma fenda dupla: primeiro, eles chegam em pacotes idênticos; segundo, não apresentam interferência”.

Figura 3: (a) Esquema do experimento de fenda dupla com projéteis. (b) Situação experimental e distribuições de probabilidades obtidas quando uma das fendas é fechada. (c) Situação experimental e distribuição de probabilidade obtida quando as duas fendas estão abertas.



Fonte: Donangelo e Capaz, 2009.

4.1.2 O Experimento da Dupla Fenda com Ondas

No caso de ondas, como destacado por Feynman (2008) e Lima (2023), o experimento da dupla fenda apresenta um comportamento completamente diferente em relação às partículas clássicas. Quando realizamos o experimento com ondas, como as ondas de água ou a luz, observamos um fenômeno de interferência. Feynman (2008) explica que, ao medir a intensidade da onda em diversos pontos ao longo do anteparo, observamos que as ondas se sobrepõem, criando regiões de interferência construtiva, onde as amplitudes se somam, e destrutiva, onde elas se cancelam parcialmente ou totalmente. Esse fenômeno gera um padrão de múltiplos picos e vales ao longo do anteparo.

Lima (2023) complementa, afirmando que, ao invés de observar apenas dois picos como no caso de partículas, o gráfico resultante mostra uma variação contínua de intensidade com vários picos, refletindo a superposição das ondas. Esse padrão de interferência é uma característica essencial do comportamento ondulatório, e o gráfico obtido é uma função da intensidade ao longo do eixo x , ao invés do número de partículas.

Na figura 2, a curva I_1 corresponde à situação em que apenas a fenda 1 é deixada aberta, já a curva I_2 , apenas a fenda 2 é aberta e a curva I_{12} . Quando ambas as fendas estão abertas, a intensidade total não é mais igual à soma de I_1 e I_2 , havendo a adição de um termo oscilante.

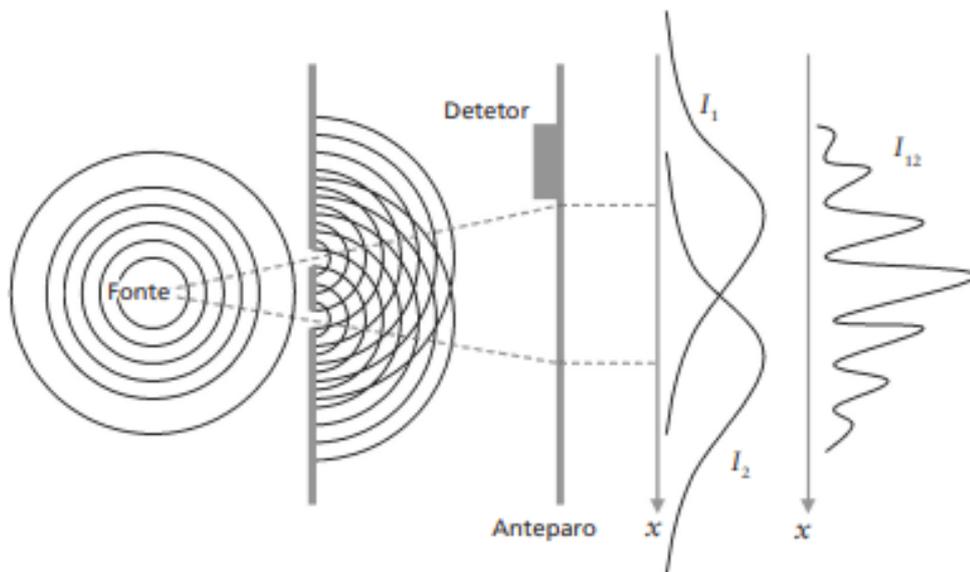
Conforme Zettili (2009), uma onda é representada por uma função ψ , que pode ser complexa, e sua intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude: $I_1 = |\psi_1|^2$ e $I_2 = |\psi_2|^2$.

Na situação em que as duas fendas estão abertas, as amplitudes ψ_1 e ψ_2 se somam, e a intensidade total é:

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad (4.2)$$

onde δ é a diferença de fase entre ψ_1 e ψ_2 , e $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta)$ é um termo oscilante responsável pelo padrão de interferência.

Figura 4: Esquema do experimento de fenda dupla com ondas. As intensidades I_1 e I_2 correspondem às situações onde apenas os buracos 1 ou 2 estão abertos, respectivamente. Já a intensidade I_{12} corresponde à situação em que os dois buracos estão abertos simultaneamente.



Fonte: Donangelo e Capaz, 2009.

Em síntese, no contexto clássico, como apontado por Zettili (2009), ondas e partículas se comportam de maneira distinta no experimento da dupla fenda. Enquanto partículas apenas somam suas intensidades, ondas combinam suas amplitudes, resultando em padrões de interferência. Assim, ondas criam um padrão de interferência na tela, enquanto partículas geram apenas dois picos correspondentes às fendas.

4.2 Experimento da Dupla Fenda com Elétrons

Quando o experimento da dupla fenda é realizado com elétrons e apenas uma das fendas está aberta, os elétrons se comportam como partículas. A distribuição dos impactos no detetor revela um único pico de intensidade, alinhado com a posição da fenda aberta, semelhante ao que ocorre em experimentos clássicos com partículas. Nesse cenário, cada

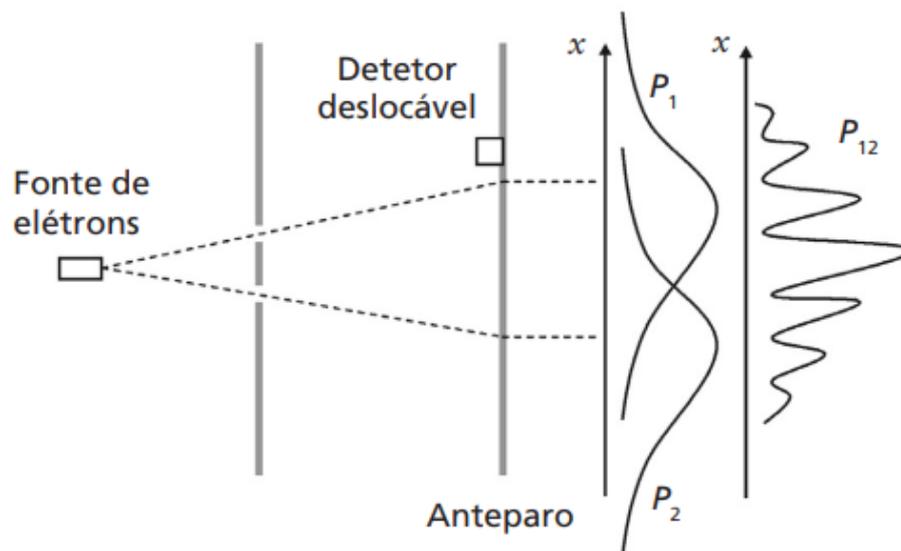
elétron é detectado individualmente, sem qualquer padrão de interferência, indicando que, ao passar por uma única fenda, eles não interferem entre si.

4.2.1 Duas Fendas Abertas

Quando o experimento da dupla fenda com elétrons é realizado com as duas fendas abertas, conforme discutido por Lima (2023) e Feynman (2008), observamos comportamentos que ilustram a dualidade onda-partícula. Quando os elétrons são detectados, eles sempre aparecem de forma pontual e indivisível, refletindo seu comportamento como partículas. No entanto, o padrão de interferência formado ao abrir ambas as fendas sugere que eles também se propagam como ondas.

Segundo Feynman (2008), embora os elétrons passem por apenas uma fenda, a distribuição de chegadas no detector não é a soma das probabilidades associadas a cada fenda separadamente. Em vez disso, a probabilidade de detecção quando ambas as fendas estão abertas P_{12} não é igual a $P_1 + P_2$, o que indica a presença de interferência. Isso sugere que os elétrons não se comportam estritamente como partículas que transitam por uma fenda ou outra, mas sim que suas trajetórias são influenciadas pela superposição de estados quânticos.

Figura 5: Esquema do experimento de fenda dupla com elétrons. As probabilidades P_1 e P_2 correspondem, respectivamente, às situações nas quais apenas os buracos 1 ou 2 estão abertos. Já a probabilidade P_{12} corresponde à situação em que os dois buracos estão abertos simultaneamente.



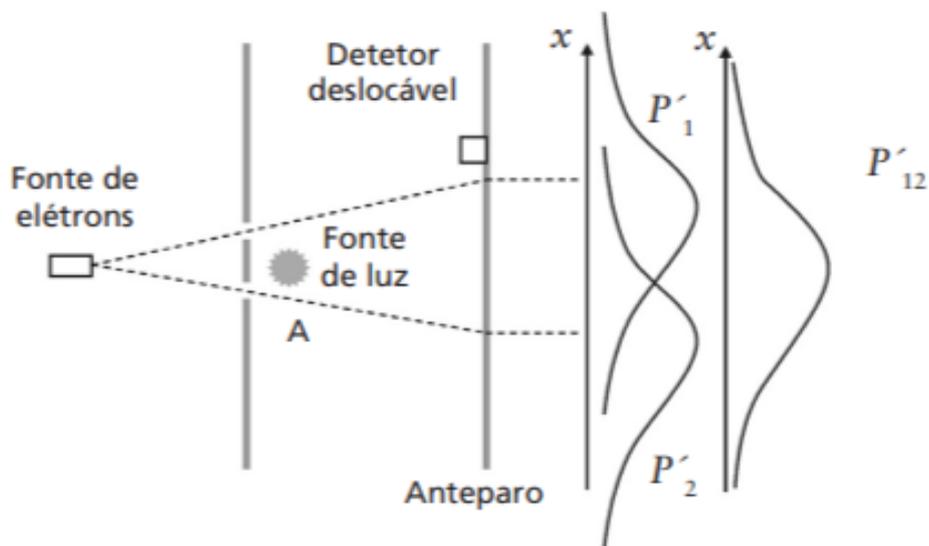
Fonte: Donangelo e Capaz, 2009.

4.2.2 Duas Fendas e um Detector no Caminho

No experimento da fenda dupla com elétrons, quando ambas as fendas estão abertas e um detector é colocado no caminho, a situação se altera significativamente. Vimos

que sem qualquer tipo de detecção, os elétrons exibem um padrão de interferência ao serem projetados na tela, indicando um comportamento ondulatório. No entanto, ao introduzir um detector para identificar por qual fenda o elétron passou, a configuração muda: o padrão de interferência desaparece, e os elétrons começam a se comportar como partículas, formando um padrão correspondente a duas bandas distintas, uma para cada fenda. Isso ocorre porque o detector, ao interagir com os elétrons, revela sua trajetória, eliminando a superposição de estados que leva ao padrão de interferência.

Figura 6: Diagrama do experimento de fenda dupla com elétrons e um detector de caminho. As probabilidades P'_1 e P'_2 correspondem às situações nas quais apenas as fendas 1 ou 2 estão abertas, respectivamente. Já a probabilidade P'_{12} corresponde à situação em que os dois buracos estão abertos simultaneamente..



Fonte: Donangelo e Capaz, 2009.

Como explica Lima (2023), o detector não é apenas um dispositivo passivo de observação; ele atua como uma fonte de radiação eletromagnética que interage diretamente com o elétron ao atravessar as fendas. Essa interação provoca um espalhamento da radiação, o que permite determinar o caminho do elétron. O ponto fundamental é que, para saber por qual fenda o elétron passou, é necessário interagir com ele. A medição implica em uma perturbação do sistema, de modo que não é possível obter informações sobre o caminho do elétron sem alterar seu comportamento. Portanto, a ideia de simplesmente “observar” o experimento sem modificar o sistema é inviável, pois medir é, essencialmente, interagir e, conseqüentemente, alterar a configuração inicial do experimento.

5 A DUALIDADE ONDA - PARTÍCULA

Classicamente ondas e partículas são conceitos mutuamente excludentes, com propriedade físicas e descrição matemática distintas. Além disso, na física clássica, todos os objetos físicos são completamente descritos em termos de propriedades intrínsecas (ou seja, propriedades que possuíam em si mesmos independentemente de serem ou não observadas) e leis que especificavam como essas propriedades mudavam quando os objetos interagiam entre si. A medição é concebida como o registro passivo dessas propriedades intrínsecas (Villars, 1986).

Vimos, no entanto, através do experimento da fenda dupla que os elétrons apresentam tanto aspecto corpuscular quanto ondulatório. De modo que, segundo Zettili (2009), as ideias clássicas de partícula e onda não se aplicam a sistemas microscópicos. Por exemplo, para observar o comportamento corpuscular de um elétron no experimento da dupla fenda, pode-se obstruir uma das fendas ou colocar um aparelho de observação; no entanto, para observar suas características ondulatórias, deve-se deixar ambas as fendas em aberto e não permitir interações de medição. Isso nos mostra que tanto os aspectos de partícula quanto os de onda são intrinsecamente presentes no elétron e que podemos suprimir um desses aspectos de acordo o aparato experimental.

Nesse sentido, Villars (1986) afirma que na física quântica, os observáveis quânticos não são propriedades intrínsecas, ou seja, não são propriedades do objeto observado sozinho. Assim, os observáveis quânticos são propriedades de interação, ou seja, propriedades de interações com instrumentos de observação, e não propriedades intrínsecas.

Conforme Donangelo e Capaz (2009), um outro princípio que está estritamente relacionado com o conceito de dualidade onda-partícula e o *Princípio da Complementaridade* de Niels Bohr. Ao todo Bohr propôs três tipos de complementaridade (Jammer, 1966). O primeiro refere-se justamente os conceitos de onda e partícula (Lima, 2023).

Com já mencionado, em sistemas quânticos qualquer medição fornece ou a propriedade corpuscular ou ondulatória, mas nunca ambas ao mesmo tempo. No entanto, as manifestações de partícula e de onda não se contradizem nem se excluem. Na perspectiva de (Bohr, 1928), em sistemas quânticos, as características de onda e partícula são complementares e ambas são necessárias e igualmente importantes para que se tenha uma descrição completa do sistema.

Em síntese, como salienta (Silveira et al., 2011), “O princípio de complementaridade, além de afirmar a dualidade, declarava que quanto mais um dos dois aspectos é realçado, tanto mais o seu complemento é ofuscado”.

6 O PRINCÍPIO DA INCERTEZA DE HEISENBERG

O experimento da fenda dupla com elétrons, discutido na seção 4, evidenciou que não é possível medir de forma simultânea e com precisão arbitrária a posição (por qual fenda o elétron passou) e o momento (expresso no padrão de interferência) de uma partícula quântica. Esse, resultado está diretamente relacionado com um dos princípios mais fundamentais da mecânica quântica: o Princípio da Incerteza de Heisenberg.

O princípio da incerteza, proposto por Werner Heisenberg em 1927, é uma das bases centrais da mecânica quântica. Ele estabelece que é impossível medir com precisão absoluta duas propriedades complementares de uma partícula ao mesmo tempo, como a posição e o momento linear Heisenberg (1927). De acordo com esse princípio, quanto mais exata for a determinação da posição de uma partícula, menos exato será o conhecimento do seu momento, e vice-versa. Essa relação é por

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (6.1)$$

onde Δx representa a incerteza na posição, Δp é a incerteza no momento linear, e \hbar é a constante de Planck dividida por 2π .

Essa relação de incerteza é uma consequência direta da não comutatividade de operadores na mecânica quântica. De acordo com a equação 3.3 os operadores momento e posição não comutam, isso implica que existe uma relação de incerteza entre essas grandezas.

De modo geral, se dois operadores \hat{A} e \hat{B} quaisquer comutam, isso implica que os observáveis correspondentes podem ser medidos simultaneamente com precisão (ou seja, possuem autovetores comuns). Por outro lado, se os operadores não comutam, significa que existe uma relação de incerteza entre as grandezas físicas correspondentes. Por consequência, temos que a ordem de aplicação dos operadores é importante e que os dois observáveis não podem ser medidos simultaneamente com precisão arbitrária.

Deve-se enfatizar que as relações de incerteza na se restringe aos observáveis posição e momento. Efetivamente, existe uma relação de incerteza para cada par de observáveis cujos operadores não comutam, esses são ditos observáveis incompatíveis. Em contrapartida, observáveis que comutam, ditos compatíveis, admitem conjuntos completos de autofunções simultâneas Griffiths e Schroeter (2018).

Dessa forma, conforme (Zettili, 2009), para dois observáveis quânticos representados por operadores \hat{A} e \hat{B} , a incerteza associada à medição de cada um deles é limitada pela relação denominada de *Princípio da Incerteza Generalizado*, matematicamente expresso da seguinte forma:

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq \frac{1}{2} | \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle | \quad (6.2)$$

No qual, as incertezas ΔA e ΔB referem-se às medições dos observáveis A e B , respectivamente. Essas incertezas são definidas como as raízes quadradas das variâncias, que são dadas pelas expressões:

$$\Delta A = \sqrt{\langle \hat{A}^2 \rangle - \langle \hat{A} \rangle^2} \quad \text{e} \quad \Delta B = \sqrt{\langle \hat{B}^2 \rangle - \langle \hat{B} \rangle^2} \quad (6.3)$$

Desse modo, o princípio da incerteza para a posição e o momento e uma forma específica da relação de incerteza generalizada e pode ser obtido de maneira direta a partir dessa relação geral. Basta escolhermos $\hat{A} = \hat{x}$ (posição) e $\hat{B} = \hat{p}$ (momento), aplicamos o comutador $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ e substituímos na relação generalizada:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2} |i\hbar| \quad (6.4)$$

Como $|i\hbar| = \hbar$, obtemos o princípio de incerteza para posição e momento:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (6.5)$$

É importante salientar que o princípio da incerteza não se deve a limitações técnicas ou experimentais, mas sim a uma característica fundamental do comportamento das partículas no nível quântico. As relações de incerteza é uma característica a priori das medições, ou seja, existe uma incerteza intrínseca associada as grandezas físicas complementares, que independe do ato de medir. Dito de outra forma, a incerteza não surge no processo de medição, apenas é revelada.

É importante frisar também que o princípio da incerteza não implica em um estado de completa aleatoriedade e caos no mundo quântico. Como esclarece Feynman (1985), o princípio da incerteza não significa que não podemos prever o comportamento das partículas quânticas, mas sim que há limites para a precisão com que podemos conhecer suas propriedades simultaneamente. Nas palavras de Griffiths e Schroeter (2018), “o princípio da incerteza não é uma suposição extra na teoria quântica, mas, sim, uma consequência da interpretação estatística”.

Além disso, conforme Neto (2022), “O princípio de incerteza é considerado por vários autores como uma expressão do princípio de complementaridade”. De acordo com Lima (2023), o segundo tipo de complementaridade proposto por Bohr, refere-se aos conceitos de posição e momento. Ele enfatiza que embora no mundo macroscópico essas grandezas possam ser definidas com exatidão, no âmbito quântico elas se mostram interdependentes, o que significa que, assim como não conseguimos observar simultaneamente o comportamento puramente ondulatório e puramente corpuscular em um único experimento, também não é possível determinar a posição e o momento com precisão no mesmo experimento.

7 O COLAPSO DA FUNÇÃO DE ONDA E O PROBLEMA DA MEDIDA

De acordo com Gibbins (1987) e conforme citado por Arroyo (2023), a medição é um dos conceitos centrais em mecânica quântica, e está atrelada à maioria—talvez todos—os paradoxos da mecânica quântica. Jammer (1974) também destaca que a medição é fundamental na teoria quântica, independentemente da interpretação escolhida, pois serve como um elo entre a teoria e a experiência.

Segundo Lima (2023), o colapso da função reflete o terceiro tipo de complementaridade proposto por Bohr. Neto (2022), explica que há uma complementaridade entre “definição” e “observação” na mecânica quântica.

Para entendermos melhor o papel da medida na mecânica quântica, partiremos do ponto em que já discutimos: o experimento da dupla fenda com elétrons. Agora, vamos focar no que ocorre no processo de medida.

Ao realizarmos uma medida da posição de uma partícula e descobrirmos que ela está num ponto P , a mecânica clássica nos diria exatamente onde a partícula estava antes e onde estará no futuro, se tivermos as equações do movimento. Porém, a função de onda quântica nos fornece apenas probabilidades, e não uma certeza determinística (Bohr, 1935). Inicialmente, a partícula estaria em uma superposição de estados, descrita pela função de onda total. A pergunta que surge é: onde estava a partícula imediatamente antes da medida? Esta é uma questão fundamental, ainda alvo de debate (Bassi et al., 2013).

As escolas de pensamento sobre a questão se dividem em três posições principais (Griffiths, 2011):

Posição realista: a partícula estava exatamente no ponto onde foi medida. Essa é a posição mais ‘intuitiva’ ou ‘clássica’ e, de fato, foi a proposta defendida por Einstein (que tinha certa dificuldade em aceitar a quebra de paradigma que o pensamento quântico introduziu (D’Espagnat, 1979)). No entanto, é lógico que, se essa posição estiver correta, então a mecânica quântica é uma teoria restrita ou inacabada, uma vez que a partícula realmente estava no ponto P , mas a função de onda não nos deu essa informação. Do ponto de vista realista, a indeterminação não é uma característica intrínseca da natureza, mas sim uma consequência da nossa falta de conhecimento. Dessa posição, surgem algumas interpretações da mecânica quântica, como por exemplo a interpretação das *variáveis ocultas*.

Posição agnóstica: prefere não tentar responder. Essa posição não é absurda: de um ponto de vista lógico, é inútil fazer afirmações sobre o estado de uma partícula antes de uma medição, quando a única forma de verificar se você estava certo é justamente realizando essa medida. Nesse sentido, como cita Griffiths (2011), Wolfgang Pauli afirmou

que não é produtivo desperdiçar neurônios tentando determinar se algo que não podemos conhecer existe constantemente (Pauli, 1955).

Posição ortodoxa: a partícula não estava realmente em lugar nenhum, ou, em outras palavras, ela estava *distribuída* no espaço. A medida foi o que realmente *colapsou* o estado da partícula para que ela assumisse a posição encontrada. Essa visão se alinha com a Interpretação de Copenhague, desenvolvida por Bohr, Heisenberg, Born e outros. Nesse sentido, é interessante não pensar na partícula de forma clássica, mas sim como uma entidade física que carrega informações.

Nem todas as posições sobreviveram ao longo dos anos. Em 1964, John Bell mostrou que faz uma diferença observável se a partícula tinha uma posição precisa (embora desconhecida) antes de a medição ou não. A descoberta de Bell praticamente descartou o agnosticismo como uma opção viável e transformou a questão em um problema experimental: podemos medir e concluir se a posição ortodoxa ou a realista é a correta. Na prática, os experimentos evidenciam que a posição ortodoxa parece ser a correta (Aspect, Grangier e Roger, 1982).

Seguindo com o raciocínio, suponha que uma segunda medida foi realizada logo após a primeira. O resultado da medida será a mesma posição (ponto P) ou cada processo de medida retorna diferentes valores ?

Sobre isso, há um consenso nas diferentes visões e interpretações: um processo de medida repetido (na mesma partícula) deve fornecer o mesmo resultado. Claro, essa é a maneira que temos para confirmar o resultado da primeira medida. Do ponto de vista ortodoxo, a explicação para isso se suceder (a segunda medida retornar o mesmo valor que a primeira) é que a primeira medida altera drasticamente a função de onda, fazendo com que ela tenha um pico acentuado ao redor da posição medida. Daí vem o nome “colapso” da função de onda. Apesar desse colapso, com o passar do tempo a função de onda se distribui novamente no espaço e a partícula entra novamente numa superposição de estados (a segunda medida para confirmar a posição precisa ser mais rápida do que esse tempo de relaxação do sistema). Concluímos então que existem dois tipos de processos físicos no contexto da mecânica quântica: processos “usuais”, onde a função de onda evolui de maneira gradual (ou natural) de acordo com a dinâmica da equação de Schrödinger, e as “medidas”, que colapsam a função de onda abruptamente (Griffiths e Schroeter, 2018).

Como já mencionado o colapso da função de onda pode ser ilustrado no experimento da dupla fenda com elétrons (Yousif, 2016). O princípio de de Broglie atribui um comprimento de onda à qualquer partícula que carregue momento (Zettili, 2009). Como já discutido, ao reproduzir o experimento clássico de Young da dupla fenda observamos o comportamento ondulatório do elétron. No experimento clássico de Young, com a luz, observa-se o fenômeno de interferência: ondas que estão em fase se combinam de forma construtiva, enquanto ondas fora de fase se combinam de forma destrutiva. No caso quântico, a função de onda se evolui de acordo com a equação de Schrodinger sob a

influência dos potenciais, que neste caso consiste em uma região de barreira com duas fendas.

Segundo (Gribbin, 2011), no experimento com duas fendas, a interferência de probabilidades pode ser interpretada como se o elétron se “dividissem” em uma matriz de elétrons “fantasmas”, cada um seguindo um caminho distinto em direção à tela do detector. Esses “fantasmas” interferem entre si e, ao detectar a posição do elétron, somente um deles se solidifica como partícula “real”, enquanto os demais desaparecem. Em termos da função de onda, cada um desses “fantasmas” corresponde a uma onda ou pacote de ondas que representa uma medida de probabilidade. O colapso ocorre quando o aparelho de medição solidifica uma dessas possibilidades, levando ao desaparecimento das demais ondas de probabilidade e à materialização de um único pacote de ondas que descreve o elétron “real”.

Conforme Lima (2023), esse processo está associado ao que é conhecido como o “problema da medida” na mecânica quântica, e apresenta grandes desafios para a teoria quântica, em especial com relação a como e quando ocorre esse colapso. De acordo com esse autor, apesar da solução tradicionalmente dada atribuir ao aparato macroscópico a função de causar o colapso da função de onda, surge a seguinte questão: o que caracteriza um sistema físico como quântico ou um aparato de medição como clássico e qual o limite entre sistemas macroscópicos e microscópicos?

Como discutido por Bassi et al. (2013), a delimitação entre sistemas quânticos e aparatos de medição clássicos permanece um desafio sem resposta clara. A questão central reside em identificar os critérios que definem um sistema como quântico ou clássico, especialmente em termos de massa ou graus de liberdade. Embora a ausência de superposição de estados em um aparato seja uma condição necessária, a escala em que essa transição ocorre ainda não é compreendida. Experimentos de interferometria têm demonstrado que a superposição linear se mantém em moléculas com aproximadamente mil átomos, enquanto o comportamento clássico é observado até cerca de 10^{18} átomos, revelando uma vasta área não explorada de 15 ordens de magnitude onde a superposição quântica ainda precisa ser investigada experimentalmente.

Na perspectiva de Lima (2023), mais problemático do não saber o limite entre sistemas macroscópicos e microscópicos é o fato de que o elétron não interage com o aparato de medida como um todo, mas apenas com um ou alguns poucos elétrons na região de contato. Ele explica que como os elétrons são descritos por funções de onda, de modo que uma interação entre esses elétrons pode ser descrita por uma nova função de onda, ou seja, não ocorria colapso. Como cada elétron pode interagir com outros elétrons e partículas de modo geral, isso não levaria ao colapso da função de onda, mas sim à criação de mais funções ondas compostas, o que contraria a ideia de Bohr de uma redução abrupta.

Assim, alguns pesquisadores propuseram, então, que o colapso da função de onda talvez dependa de algo não material, dado que a interação material, por si só, não parece

suficiente para produzi-lo. Além disso, alguns autores sugeriram que o “observador” influencia o comportamento do elétron. Nesse contexto, a função de onda, enquanto descrição probabilística, pode ser vista como uma medida do conhecimento sobre o sistema, indicando que a mecânica quântica pode tratar não apenas do mundo material, mas também da relação entre a consciência humana e esse mundo. Essas ideias deram origem a interpretações subjetivistas da mecânica quântica.

No entanto, essas interpretações subjetivistas formuladas na década de 1930 não conseguiram desenvolver um programa de pesquisa que demonstrasse a necessidade de envolver a consciência no colapso da função de onda. Todas as tentativas de estabelecer uma relação experimental entre a mecânica quântica e a consciência falharam. Atualmente, o fenômeno do colapso pode ser explicado de maneira estritamente material, fundamentando-se apenas nos princípios da própria mecânica quântica, em especial através do conceito de *decoerência quântica* (Lima, 2023).

Segundo Velásquez-Toribio (2022), a teoria da decoerência é atualmente amplamente aceita como a explicação padrão para o problema da medida na mecânica quântica. Essa teoria descreve a decoerência como o processo de destruição da coerência ou interferência quântica em um sistema. Esse processo é essencial para explicar a transição entre o comportamento quântico e o clássico, ajudando a entender por que não observamos superposições em escalas macroscópicas.

Novaes e Studart (2016), explica que um sistema quântico simples, como um único átomo ou um único fóton, pode em algumas situações ser considerado completamente isolado, ou seja, livre de interações com outros objetos. Por outro lado, um sistema clássico nunca está perfeitamente isolado, pois sempre haverá alguma interação com o ambiente. Sendo justamente a interação permanente com o ambiente o que provoca a decoerência no sistema.

8 “EXPERIMENTO” DO GATO DE SCHRÖDINGER

Como dissemos no capítulo anterior, podemos separar os processos dentro da mecânica quântica em dois tipos, os usuais e as medidas. Se a teoria fosse composta apenas pelos processos usuais, seria relativamente simples, bastando resolver a equação de Schrödinger, que tem uma forma semelhante à de uma equação de difusão e envolve apenas uma função escalar. No entanto, é no segundo tipo de processo — as medições — que a mecânica quântica se torna notoriamente complexa e contraintuitiva.

O físico austríaco Erwin Schrödinger propôs, em 1935, o experimento mental conhecido como “gato de Schrödinger” (Schrödinger, 1935). Com essa experiência, Schrödinger destacou os aspectos paradoxais das superposições quânticas, desafiando a “interpretação de Copenhague”, que era a dominante na época. Ele utilizou um objeto macroscópico, um gato, para evidenciar o problema da medida e a transição clássico-quântico (Leite, 2024). Como ressalta Krause (2019), embora superposições sejam fenômenos observados em escalas quânticas, não se aplicam a objetos macroscópicos como um gato.

No experimento, Schrödinger imagina um gato colocado em uma caixa fechada junto com um dispositivo que contém uma substância radioativa, um contador Geiger (detector de radiação), um martelo e um frasco de veneno. Se um átomo da substância radioativa se desintegrar, o contador Geiger detecta a radiação, o martelo é acionado, quebra o frasco e libera o veneno, matando o gato. Se o átomo não se desintegrar, o veneno não é liberado, e o gato permanece vivo (Myhre e Bungum, 2016).

O átomo radioativo é um sistema quântico. Pelas leis da mecânica quântica, o núcleo do átomo está em uma superposição de múltiplos estados - o átomo pode ter decaído ou não, mas a função de onda que o caracteriza contém as duas possibilidades com as respectivas probabilidades. Então, seguindo o raciocínio, talvez poderíamos dizer que o frasco de veneno está em uma superposição de liberado e não liberado. E, por fim, o gato estaria numa superposição de vivo e morto, com uma função de onda dada por (Leite, 2024):

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{vivo} + \psi_{morto}) \quad (8.1)$$

No entanto, conforme discutido por Krause (2019), a interpretação comum, que sugere que antes da medição o gato estaria simultaneamente vivo e morto, compartilhando ambos os estados possíveis ao mesmo tempo, é equivocada.

Ora, os átomos, o frasco e o gato consistem todos de partículas que, fundamentalmente, obedecem às regras da mecânica quântica, então o caminho lógico que fizemos é razoável. Ainda assim, nossa experiência diária com a natureza nos faz concluir que é absurda a própria ideia de um objeto macroscópico estar em uma superposição de dois estados tão diferentes. Um átomo pode estar em uma combinação linear de diversos níveis

de energia, mas um gato não pode estar em uma combinação linear de vivo e morto. Portanto, em algum momento essa conexão da escala quântica com o comportamento clássico se perdeu.

Esse experimento foi concebido para ilustrar como os fenômenos quânticos podem parecer absurdos quando aplicados ao mundo macroscópico. Embora o gato de Schrödinger não seja uma situação realista, ele levanta questões sobre o papel do observador na mecânica quântica e a natureza da realidade. O paradoxo obriga-nos a confrontar o problema da medida. Ela de fato ocorre quando observamos o gato para conferirmos se ele está vivo ou morto? Ou a medida ocorre quando o átomo decai ou deixa de decair? Ou em algum outro processo intermediário (detecção da radiação pelo contador Geiger, o veneno ser liberado)? Os grandes físicos da época atacaram essa questão, com várias ideias diferentes. Por exemplo, a interpretação de von Neumann-Wigner, postula a consciência como pré-requisito para a conclusão do processo de medida (Zurek, 2003); Bohr classificava a medida nesse contexto como produto da interação entre um sistema microscópico (governado pela da mecânica quântica) e um detector macroscópico (descrito pelas leis clássicas) (Griffiths e Schroeter, 2018); Heisenberg e outros físicos e pensadores associaram a medida com uma perturbação irreversível no sistema. Essas e muitas outras ideias foram propostas, mas até hoje não há consenso sobre qual é a natureza da medida.

Por fim, retornando à discussão sobre a conexão quântico-clássico, como dissemos, fundamentalmente o próprio sistema macroscópico deve ser descrito pelas leis da mecânica quântica. Mas as funções de onda do modo que apresentamos representam elementos individuais, de modo que a função de onda de um sistema macroscópico seria uma tarefa muito complexa que precisaria associar o número muito grande de partículas. O sistema macroscópico está submetido à muitas perturbações, que em alguns pontos de vista caracterizam processos de medida. Nesse contexto, a função de onda colapsa com frequência e os estados “clássicos” são estatisticamente favorecidos e, na prática, a superposição de incontáveis estados colapsa para as configurações macroscópicas que observamos rotineiramente. Esse fenômeno é o que chamamos anteriormente de decoerência.

Em resumo, o experimento mental do gato de Schrödinger impactou significativamente a física de modo geral, gerando debates sobre o conceito da superposição quântica e o papel do observador. O experimento influenciou linhas de pensamento que geraram diferentes interpretações da teoria quântica.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou os principais fundamentos da mecânica quântica, apresentando os problemas e ideias que levaram à formulação dessa teoria. Discutimos detalhadamente os conceitos de dualidade onda-partícula, o princípio da incerteza de Heisenberg e o colapso da função de onda. Com esses temas, evidenciamos as complexidades da mecânica quântica, que, apesar de seu sucesso em prever fenômenos, desafia as noções clássicas de realidade, por apresentar diversos conceitos complexos e contraintuitivos, o que resulta muitas vezes em mal-entendidos e conceitos transmitidos equivocadamente.

A dualidade onda-partícula, ilustrada pelo experimento da dupla fenda, desafia a visão clássica de que os aspectos corpusculares e ondulatórios são opostos inconciliáveis. No experimento com elétrons, observamos que eles formam um padrão de interferência – característico de ondas – ao atravessar as fendas sem medição. No entanto, quando um dispositivo de medição é posicionado para detectar a passagem do elétron por uma das fendas, o comportamento ondulatório desaparece, revelando sua natureza de partícula. Esse fenômeno leva à reflexão sobre o que define o comportamento da matéria, pois suas características quânticas parecem depender diretamente das condições de medição.

No entanto, é um equívoco pensar que as partículas quânticas alternam entre serem ondas ou partículas. A dualidade partícula-onda significa que entidades quânticas exibem simultaneamente propriedades tanto de partículas quanto de ondas, dependendo da experiência realizada. Elas não se transformam entre uma forma e outra; essas propriedades são inerentes à sua natureza quântica.

O princípio da incerteza de Heisenberg representa uma característica fundamental da natureza quântica das partículas, indicando limites intrínsecos na precisão com que certos pares de grandezas complementares, como posição e momento, podem ser conhecidos simultaneamente. Muitas vezes, esse princípio é interpretado de forma equivocada como sendo resultado de limitações tecnológicas de medição. No entanto, sua formulação matemática, dada por $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$, demonstra que essa incerteza é inerente aos sistemas quânticos. Esse entendimento rompe com a ideia de previsibilidade absoluta e impõe um limite ao conhecimento exato das propriedades microscópicas, independentemente das tecnologias de medição empregadas.

O colapso da função de onda e o problema da medida são conceitos fundamentais na mecânica quântica. Quando um sistema quântico é medido, a função de onda, que descreve a superposição de todos os estados possíveis, parece “colapsar” para um estado específico. Essa ideia, introduzida na interpretação de Copenhague, sugere que o processo de medição não é apenas um registro passivo, mas uma interação ativa que altera o estado do sistema, destacando o papel crucial dos instrumentos de medição e dos sistemas com os quais interagem.

Entretanto, é um equívoco pensar que o simples ato de observar uma partícula faz com que a função de onda colapse. O termo “observação” em mecânica quântica refere-se a uma interação física entre a partícula e um aparelho de medição, não à observação consciente por um ser humano. É a interação com o ambiente ou com um detector que leva ao colapso da função de onda, não a consciência.

Por fim, abordamos o paradoxo do gato de Schrödinger, frequentemente mal interpretado como a ideia de que o gato está simultaneamente vivo e morto até ser observado. No entanto, essa interpretação é equivocada. O paradoxo foi concebido como uma ilustração dos problemas interpretativos da mecânica quântica quando aplicada a objetos macroscópicos. A superposição quântica, que é uma propriedade fundamental dos sistemas microscópicos, descreve a coexistência de múltiplos estados possíveis até que uma medição seja realizada. O paradoxo do gato ilustra a dificuldade de aplicar os conceitos da mecânica quântica diretamente ao mundo macroscópico, onde as leis clássicas dominam e o comportamento quântico, como a superposição, não se manifesta da mesma forma.

Em conclusão, evidenciou-se que os principais conceitos da mecânica quântica, como a dualidade onda-partícula, o princípio da incerteza de Heisenberg e o colapso da função de onda, desafiam a visão clássica da realidade. O paradoxo do gato de Schrödinger, por exemplo, ilustra as dificuldades de aplicar conceitos quânticos, como a superposição, ao mundo macroscópico, ressaltando a complexidade dos sistemas quânticos, onde o ato de medir e interagir define o comportamento da matéria.

Referências Bibliográficas

- ARROYO, Raoni Wohnrath. **Felinos inseparáveis: considerações históricas e filosóficas acerca do problema da medição em mecânica quântica**. Revista Ética e Filosofia Política, v. 1, n. 26, p. 209-238, 2023.
- ASPECT, Alain; GRANGIER, Philippe; ROGER, Gérard. **Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities**. Physical Review Letters, v. 49, n. 2, p. 91, 1982.
- BACH, Roger; et al. **A difração de fenda dupla é uma pedra angular da mecânica quântica: ela ilustra as principais características da mecânica quântica: interferência e a dualidade partícula-onda da matéria**. Physical Review Letters, v. 111, n. 18, p. 183603, 2013.
- BASSI, Angelo et al. **Models of wave-function collapse, underlying theories, and experimental tests**. Reviews of Modern Physics, v. 85, n. 2, p. 471-527, 2013.
- BELL, John S. **On the Einstein Podolsky Rosen paradox**. Physics Physique Fizika, v. 1, n. 3, p. 195, 1964.
- BOHR, Niels. **The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory**. Nature, v. 121, p. 580-590, 1928.
- BOHR, N. **Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?** Physical Review, v. 48, 1935, p. 696-702.
- BORN, Max. **The interpretation of quantum mechanics**. The British Journal for the Philosophy of Science, v. 4, n. 14, p. 95-106, 1953.
- BOHM, David. **A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables**. I. Physical Review, v. 85, n. 2, p. 166, 1952.
- DIRAC, Paul Adrien Maurice. **The principles of quantum mechanics**. Oxford University Press, 1981.
- D'ESPAGNAT, Bernard. **The quantum theory and reality**. Scientific American, v. 241, n. 5, p. 158-181, 1979.
- DONANGELO, Raul José; CAPAZ, Rodrigo Barbosa. **Introdução à Mecânica Quântica**. v. 1. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2009.
- DORAI, Kavita et al. **The Development of Quantum Mechanics**. Resonance: Journal of Science Education, v. 23, n. 10, 2018.

EINSTEIN, Albert. **On a heuristic viewpoint concerning the emission and transformation of light**. *Annalen der Physik*, v. 17, p. 132, 1905.

EISBERG, Robert M.; RESNICK, Robert. **Física Quântica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1985.

EVERETT, Hugh. **Theory of the Universal Wavefunction**. Thesis, Princeton University, 1957, pp. 1–140.

FERRAIOLI, Alessio Giuseppe; NOCE, Canio. **The measurement problem in quantum mechanics**. *Science Philosophy*, v. 7, n. 1, p. 41-58, 2019.

FEYNMAN, Richard P.; LEIGHTON, Robert; SAXON, Matthew. **Lições de Física**, Volume 3. São Paulo: Editora Moderna, 2008.

FEYNMAN, Richard P. **QED - The Strange Theory of Light and Matter**. Princeton: Princeton University Press, 1985.

FREIRE, Olival. **The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)**. New York: Springer, 2015.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-44662-1>.

GIBBINS, Peter. **Particles and Paradoxes: The Limits of Quantum Logic**. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRIBBIN, John. **In search of Schrödinger's cat: Quantum physics and reality**. Bantam, 2011.

GRIFFITHS, David J.; SCHROETER, Darrell F. **Introduction to quantum mechanics**. Cambridge University Press, 2018.

GRIFFITHS, David J. **Mecânica Quântica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 347 p.

HEISENBERG, Werner. **The physical content of quantum kinematics and mechanics**. *Quantum Theory and Measurement*, p. 62-84, 1927.

HEISENBERG, W. **Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science**. Harper Row, 1958.

JAMMER, Max. **The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective**. New York: Wiley and Sons, 1974.

- JAMMER, Max. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.
- KRAMERS, Hendrik Anthony. **Quantum mechanics**. Courier Dover Publications, 2018.
- KRAUSE, Décio. **O gato de Schrödinger não está vivo e morto antes da medição: sobre a interpretação dos resultados quânticos**. In: ALMEIDA, Edgar; COSTA-LEITE, Alexandre (orgs.). *Anais do Seminário Lógica no Avião*, p. 2013-2018, 2019.
- KIRCHHOFF, Gustav. **Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme**. Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, p. 783-787, 1859.
- LEITE, Lucas Bezerra de Oliveira. **A medição na Mecânica Quântica**. 2024.
- LEVADA, Celso; LEVADA, Miriam; MISSIATO, Osvaldo. **O colapso da função de onda e suas implicações filosóficas**. 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.11881.31841.
- LIMA, Nathan W. **A ruptura fundamental: afinal, do que fala a mecânica quântica?**. 1. ed. Lageado, RS: Editora Libélula, 2023.
- MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MYHREHAGEN, Henning Vinjusveen; BUNGUM, Berit. **'From the cat's point of view': upper secondary physics students' reflections on Schrödinger's thought experiment**. Physics Education, v. 51, n. 5, p. 055009, 2016.
- NETO, Rodolfo Carvalho. **A dualidade onda-partícula na perspectiva de Niels Bohr**. Perspectivas, v. 7, n. 2, p. 218-232, 2022.
- NOVAES, Marcel; STUDART, Nelson. **Mecânica Quântica Básica**. 2016. São Paulo: Editora Livraria da Física.
- PAULI, Wolfgang. **Die allgemeine Wissenschaftliche Weltanschauung und die Einheit der Wissenschaften**. In: *Writings on Physics and Philosophy*. 1955.
- SAITO, Marcia Tiemi. **A gênese e o desenvolvimento da relação entre Física Quântica e misticismo e suas contribuições para o Ensino de Ciências**. 2019. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo.
- PLANCK, Max. **On the theory of the energy distribution law of the normal spectrum**. Verh. Deut. Phys. Ges, v. 2, n. 237, p. 237-245, 1900.

RAIČIK, A. C. **Um resgate histórico-epistemológico do átomo de Bohr: uma gênese nem sempre contada e suas implicações ao ensino de ciências.**

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 45, p. e20230039, 2023.

ROVELLI, Carlo. **Relational quantum mechanics.** International Journal of Theoretical Physics, v. 35, p. 1637-1678, 1996.

SCHLOSSHAUER, M. **Decoherence, the Measurement Problem, and Interpretations of Quantum Mechanics.** Reviews of Modern Physics, v. 76, n. 4, 2004, p. 1267-1305.

SCHRÖDINGER, Erwin. **Discussion of probability relations between separated systems.** Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. Cambridge University Press, 1935, p. 555-563.

SHANKAR, Ramamurti. **Principles of quantum mechanics.** Springer Science and Business Media, 2012.

SILVEIRA, A. F. et al. **Os princípios de complementaridade e de incerteza na obra Copenhague de Michael Frayn: a arte e a teoria quântica.** In: FREIRE JR., O.; PESSOA JR., O.; BROMBERG, J.L. (Orgs.). **Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais.** Campina Grande: EDUEPB, p. 321-337, 2011.

TESCHE, Claudia. **Schrödinger's cat is out of the hat.** Science, v. 290, n. 5492, p. 720-721, 2000.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física Moderna.** 6. ed. São Paulo: Bookman, 2008.

VELÁSQUEZ-TORIBIO, Alan M. **Teoria da medida, decoerência e a interpretação de Montevideu da mecânica quântica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 44, p. e20210384, 2022.

VILLARS, C. N. **Schrödinger's cat and the nature of quantum reality.** Physics Education, v. 21, n. 4, p. 232-236, 1986. DOI: 10.1088/0031-9120/21/4/007.

WIKIPÉDIA. **Representação de um corpo negro.** Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Corpo_negro. Acesso em: 24 nov. 2024.

YOUSIF, Mahmoud E. **The double slit experiment-explained.** 2016.

ZETTILI, Nouredine. **Quantum Mechanics: Concepts and Applications.** 2. ed. Chichester: John Wiley Sons, 2009.

ZUREK, W. H. **Decoherence, einselection, and the existential interpretation.** Philosophy of Science, v. 70, n. 5, p. 720-731, 2003.