



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS PARNAÍBA
CURSO LICENCIATURA EM FÍSICA

ANDREIA PEREIRA DE OLIVEIRA

A ROLETA DO TEMPO DA MECÂNICA QUÂNTICA: uma análise lúdica e histórica

PARNAÍBA
2025

ANDREIA PEREIRA DE OLIVEIRA

A ROLETA DO TEMPO DA MECÂNICA QUÂNTICA: uma análise lúdica e histórica

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obten-
ção do diploma do Curso de Licenciatura em
Física do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Piauí, Campus Parnaíba.

Orientador: Prof. Me. Marcos Antonio Matos
Souza

PARNAÍBA
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Oliveira, Andreia Pereira de

O48r A roleta do tempo da mecânica quântica: uma análise lúdica e histórica / Andreia Pereira de Oliveira. — 2025.
84 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física)
– Instituto Federal do Piauí, Campus Parnaíba, 2025.
Orientador: Profº. Me. Marcos Antonio Matos Souza.

1. Física. 2. Mecânica quântica. 3. Análise histórica. I. Título.

CDD - 530

Elaborado por Micheline Angélica Aragão Gouveia CRB 3/1244

ANDREIA PEREIRA DE OLIVEIRA

A ROLETA DO TEMPO DA MECÂNICA QUÂNTICA: uma análise lúdica e histórica

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obten-
ção do diploma do Curso de Licenciatura em
Física do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Piauí, Campus Parnaíba.

Aprovada em 20/02/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Marcos Antonio Matos Souza(Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Alexandro das Chagas de Sousa Nascimento
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Lucas Izidio de Sousa Sampaio
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

PARNAÍBA
2025

Dedico este trabalho aos meus pais,
os pilares da minha formação como
pessoa, meus maiores incentivadores
e exemplos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me deu forças nos momentos mais difíceis e iluminou o meu caminho quando tudo parecia incerto. Sem fé e determinação, essa jornada não teria sido possível.

À minha família, especialmente aos meus pais, Armando e Socorro, às minhas irmãs, Amanda e Alinne, aos meus cunhados, Luiz Eduardo e Leonardo, e aos meus sobrinhos, João Lucas, Isabele e João Gabriel, sou imensamente grata pelo amor incondicional, pela compreensão e pelo apoio ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Vocês sempre foram minha base e meu porto seguro. Sem o apoio de cada um, essa caminhada teria sido muito mais difícil.

Ao meu orientador, Me. Marcos Antonio Matos Souza, expresso minha profunda gratidão por todo o apoio, paciência e conhecimento compartilhado. Suas orientações precisas e seu incentivo constante foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para superar os desafios ao longo do caminho.

Ao meu namorado, Lucas Araujo, por estar sempre ao meu lado, oferecendo carinho, incentivo e força nos momentos mais difíceis. Sua presença tornou essa jornada ainda mais especial, pois pude contar com seu apoio incondicional e seu olhar motivador, que tantas vezes me ajudaram a seguir em frente.

Aos meus amigos Jéssica Lima, Dayla Carvalho, Marcus Vinicius, Val Rocha, Débora Miranda e Matheus Oliveira, que sempre estiveram ao meu lado apesar da minha ausência. Obrigada por cada palavra de incentivo, por respeitarem meu tempo e por me lembrarem de que a amizade verdadeira ultrapassa qualquer obstáculo.

Aos meus amigos de jornada, Douglas Sousa, João Lucas, Denilson Santos e Mário Pinho, agradeço de coração pelas conversas incríveis, pelo apoio nos momentos difíceis e pela motivação que nunca faltou. Cada dia ao lado de vocês tornou essa jornada mais leve, divertida e cheia de aprendizado. Nossos momentos de estudo, risadas e trocas de experiências ficarão para sempre na memória!

A todos os professores que cruzaram meu caminho, em especial Itamar Vieira, Alexandre Nascimento, Maria de Fátima, Janete Ribeiro, Diego Prudêncio, Lucas Izidio, Gelson Rodrigues e Iriane Rosa, minha sincera gratidão por compartilharem seus conhecimentos e ensinamentos. Cada um, à sua maneira, contribuiu significativamente para a minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço a todos os profissionais do IFPI - Campus Parnaíba que, direta ou indiretamente, acreditaram em mim e me incentivaram. Cada conversa, cada gesto de apoio e cada palavra de incentivo foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Muito obrigada!

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento histórico da Teoria Quântica de forma cronológica, destacando suas contribuições científicas e educacionais. A proposta central consiste em utilizar uma ferramenta lúdica, “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica”, como instrumento pedagógico, com o intuito de facilitar o aprendizado e a compreensão dos conceitos fundamentais dessa teoria. A metodologia adotada para a construção deste trabalho baseia-se em uma revisão bibliográfica das principais contribuições históricas no campo da Física Quântica, aliada à criação e implementação de um produto educacional que visa tornar o ensino da Mecânica Quântica mais acessível e envolvente. A pesquisa fornece uma visão abrangente sobre a evolução da Teoria Quântica, enfatizando sua relevância tanto no campo científico quanto educacional. Além disso, busca avaliar a eficácia da ferramenta proposta no processo de ensino-aprendizagem, por meio de uma avaliação qualitativa do impacto na compreensão dos alunos e sua capacidade de facilitar o ensino de conceitos complexos, como os da Mecânica Quântica.

Palavras-chaves: Teoria Quântica; Desenvolvimento Histórico; Ferramenta Lúdica.

ABSTRACT

The present work aims to present the historical development of Quantum Theory in a chronological manner, highlighting its scientific and educational contributions. The central proposal consists of using a playful tool, “Quantum Mechanics Time Roulette”, as a pedagogical instrument, with the aim of facilitating learning and understanding the fundamental concepts of this theory. The methodology adopted for the construction of this work is based on a bibliographical review of the main historical contributions in the field of Quantum Physics, combined with the creation and implementation of an educational product that aims to make the teaching of Quantum Mechanics more accessible and engaging. The research provides a comprehensive overview of the evolution of Quantum Theory, emphasizing its relevance in both the scientific and educational fields. Furthermore, it seeks to evaluate the effectiveness of the proposed tool in the teaching-learning process, through a qualitative assessment of the impact on students’ understanding and its ability to facilitate the teaching of complex concepts, such as Quantum Mechanics.

Keywords: Quantum Theory; Historical Development; Playful Tool.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	A VELHA TEORIA QUÂNTICA	11
2.1.1	Planck, a radiação do corpo negro e a quantização da energia	11
2.1.2	Einstein e a Teoria Quântica	13
2.1.3	Rutherford e uma breve história sobre a descoberta do núcleo	14
2.1.4	Bohr e o átomo de hidrogênio	15
2.1.5	Arthur Compton e o Efeito Compton	17
2.2	A NOVA TEORIA QUÂNTICA	19
2.2.1	De Broglie e as ondas de elétrons	19
2.2.2	Schrödinger e a equação de onda	20
2.2.3	Born e a interpretação da função de onda	22
2.2.4	Heisenberg e a Mecânica Quântica Matricial	23
2.2.5	Pauli e o spin do elétron	24
2.2.6	Dirac e a Mecânica Quântica Relativística	26
2.3	METODOLOGIAS DE ENSINO DA MECÂNICA QUÂNTICA	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	A ROLETA DO TEMPO DA MECÂNICA QUÂNTICA: UMA ABORDA- GEM LÚDICA	30
3.2	DESCRIÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO PRODUTO	32
3.2.1	Planejamento	33
3.2.2	Materiais	33
3.2.3	Montagem da roleta	35
3.2.4	Sistema de ponteiros, perguntas e penalidade	36
3.2.5	Funcionamento e dinâmica pedagógica	36
3.2.6	Avaliação e Resultados Esperados	37
4	DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DO PRODUTO	38
4.1	EXECUÇÃO DO JOGO: INSTRUÇÕES INICIAIS	38
4.2	EXECUÇÃO DO JOGO: RODADAS	39
4.3	AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA FERRAMENTA LÚDICA	46
4.4	LIMITAÇÕES E MELHORIAS FUTURAS	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A – REGULAMENTO - ROLETA DO TEMPO DA ME- CÂNICA QUÂNTICA	51
APÊNDICE B – PERGUNTAS DAS CARTAS	53
ANEXO A – CÓPIA DO ARTIGO ORIGINAL DO MAX PLANCK .	81
ANEXO B – CÓPIA DO ARTIGO ORIGINAL DO HEISENBERG . .	82
ANEXO C – CÓPIA DO ARTIGO ORIGINAL DO SCHRÖDINGER	83
ANEXO D – CÓPIA DO ARTIGO ORIGINAL DO DIRAC	84

1 INTRODUÇÃO

A história e o desenvolvimento da Teoria Quântica (TQ) começaram a surgir no final do século XIX e início do século XX, abrangendo uma ampla gama de descobertas científicas, revoluções conceituais, resultados experimentais e marcos históricos que desafiaram as concepções da Física Clássica. Este trabalho apresenta o desenvolvimento da Teoria Quântica de forma cronológica, desde suas origens até formulações mais sofisticadas, destacando avanços históricos fundamentais e as contribuições de cientistas renomados. A Teoria Quântica divide-se em dois momentos principais: a velha Teoria Quântica e a nova Teoria Quântica, correspondendo, respectivamente, à fase inicial e ao desenvolvimento posterior dessa teoria (Martins; Rosa, 2014).

A velha Teoria Quântica surgiu em 1900, com os primeiros indícios dos princípios quânticos. Max Planck, por meio de seus estudos sobre a radiação do corpo negro, propôs a quantização de energia. Posteriormente, Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico, demonstrando a natureza quantizada da luz. Ernest Rutherford, por meio de experimentos, concluiu que os átomos possuem um núcleo carregado positivamente, onde se concentra a maior parte de sua massa, descobrindo, assim, o núcleo atômico. Niels Bohr propôs o modelo do átomo de hidrogênio, no qual um elétron orbita o núcleo sem irradiar energia, de forma semelhante a um sistema planetário. Arthur Compton, por sua vez, observou o espalhamento de raio-X na colisão com o elétron em repouso, confirmando a natureza quântica da luz.

A nova Teoria Quântica é marcada pelas contribuições de diversos físicos. Em 1924, Louis de Broglie propôs o conceito de dualidade onda-partícula para os elétrons. Erwin Schrödinger formulou a equação de onda, fundamental para descrever o comportamento quântico de um sistema físico. Max Born contribuiu com a interpretação probabilística da função de onda, oferecendo uma visão estatística para a Mecânica Quântica. Werner Heisenberg introduziu a Mecânica Quântica Matricial e formulou o princípio da incerteza, que desafiou as noções determinísticas da Física Clássica. Wolfgang Pauli desenvolveu a teoria do spin do elétron e o princípio de exclusão. Por fim, Paul Dirac criou a Mecânica Quântica Relativística, que resultou na equação de Dirac.

A Teoria Quântica é uma das mais fundamentais e bem-sucedidas da Física Moderna, promovendo avanços revolucionários na ciência e na tecnologia. No entanto, sua compreensão e interpretação nem sempre são simples, o que pode levar a especulações e interpretações equivocadas, resultando na apropriação indevida de seus conceitos para outros contextos. Embora seja natural que teorias científicas sejam reinterpretadas e adaptadas a diferentes áreas do conhecimento, torna-se essencial distinguir apropriações legítimas daquelas realizadas de forma desinformada (Machado; Cruz, 2016). A complexidade dessa teoria, frequentemente mal interpretada, pode levar à criação de narrativas imprecisas que distorcem seus princípios fundamentais.

Apesar de sua importância e impacto, a Teoria Quântica também enfrenta desafios no ensino, especialmente devido à abstração de seus conceitos fundamentais, às interpretações complexas dos fenômenos quânticos e à dificuldade de relacioná-los ao cotidiano (Greca; Moreira; Herscovitz, 2001). Essas barreiras frequentemente contribuem para o distanciamento dos estudantes, dificultando a assimilação da teoria de maneira integrada e significativa. Diante desse cenário, torna-se essencial a produção de materiais didáticos que auxiliem na compreensão da evolução histórica e dos principais conceitos dessa área.

Diante desse desafio, metodologias interativas, como jogos educacionais, têm ganhado destaque por sua capacidade de tornar o aprendizado mais envolvente e acessível. Algumas abordagens inovadoras já foram exploradas nesse sentido, como o Jogo “*Cara a Cara com os Cientistas*”: *um recurso didático para o ensino de física moderna*, que aproxima os estudantes das figuras históricas da ciência e suas contribuições por meio de uma dinâmica interativa e lúdica. Outra iniciativa relevante é o Jogo de Física de Partículas: *Descobrimo o Bóson de Higgs*, que busca explorar conceitos fundamentais da Física de Partículas de maneira acessível e interativa, permitindo que os alunos compreendam, por meio do lúdico, aspectos teóricos e experimentais dessa área da ciência (Souza *et al.*, 2019 ; Reis; Silva; Santos, 2020).

Seguindo essa abordagem, a “ Roleta do Tempo da Mecânica Quântica ”, surge como um recurso didático interativo que organiza a cronologia dos principais marcos dessa teoria de forma lúdica. Dividida em doze marcos históricos, como o corpo negro, o modelo de Bohr e a equação de Dirac, a roleta utiliza um quiz de múltiplas perguntas para engajar os estudantes em equipes, promovendo uma competição saudável e consolidando o conhecimento. Dessa forma, além de facilitar o ensino dos conceitos fundamentais da Teoria Quântica, esse material busca estimular a interação entre os estudantes e o conteúdo científico de maneira dinâmica.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar o desenvolvimento histórico da Teoria Quântica em ordem cronológica, destacando suas contribuições científicas e educacionais por meio de uma ferramenta que facilite o aprendizado e a compreensão de seus conceitos fundamentais. Entre os objetivos específicos, destacam-se: tornar a teoria acessível a diferentes públicos, identificar os marcos históricos e os cientistas pioneiros, organizar os eventos históricos em ordem cronológica, definir os conceitos fundamentais da Mecânica Quântica, desenvolver e aplicar um produto educacional didático que auxilie no ensino dessa área complexa.

Para alcançar esses objetivos, este trabalho adota uma metodologia baseada na revisão bibliográfica das contribuições históricas, além da construção e aplicação de um produto educacional. Dessa forma, busca-se oferecer um panorama abrangente e acessível sobre a evolução da Teoria Quântica, enfatizando sua relevância científica e promovendo sua compreensão. A importância do estudo reside na criação de uma ferramenta inovadora que facilite o ensino dessa teoria, tornando a ciência mais acessível e compreensível. Apesar de mais de 120 anos de existência, a Teoria Quântica permanece um campo de estudo vasto e em constante evolução.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste referencial teórico, apresentam-se os fundamentos históricos e científicos que sustentam a evolução da Teoria Quântica. Abordam-se dois momentos principais: a Velha Teoria Quântica, que engloba os primeiros esforços para descrever fenômenos que desafiavam a Física Clássica, e a Nova Teoria Quântica, que consolidou os princípios fundamentais dessa área da Ciência. Por fim, exploram-se metodologias pedagógicas que auxiliam no ensino dessa temática.

2.1 A VELHA TEORIA QUÂNTICA

A Velha Teoria Quântica abrange os trabalhos pioneiros que estabeleceram as bases para o desenvolvimento da Teoria Quântica, como os de Max Planck, Albert Einstein, Ernest Rutherford, Niels Bohr e Arthur Compton. Entre o final do século XIX e o início do século XX, foram introduzidos conceitos que solucionaram problemas não explicados pela Física Clássica, proporcionando uma nova compreensão da natureza. Por esse motivo, esses conceitos não foram amplamente aceitos na época (Martins; Rosa, 2014).

2.1.1 Planck, a radiação do corpo negro e a quantização da energia

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) foi um físico alemão amplamente reconhecido como o pai da Teoria Quântica. Nascido em Kiel, Alemanha, em 23 de abril de 1858, Planck era filho de Julius Wilhelm, professor de Direito Constitucional, e Emma Patzig. Desde cedo, demonstrou um talento excepcional para os estudos, destacando-se em Matemática e Física. Ele estudou nas universidades de Munique e Berlim, onde foi aluno de grandes cientistas como Kirchhoff e Helmholtz, e concluiu seu doutorado em 1879 (Nobel, 1918). A Figura 1, mostra Max Planck, o homem cuja genialidade marcou o início de uma nova era na Física.

Figura 1 – Max Planck.



Fonte: (Nobel, 1918).

Planck iniciou sua carreira acadêmica como Privatdozent em Munique (1880-1885), um título conferido a professores habilitados, mas sem cátedra nem remuneração governamental. Em seguida, ocupou uma posição de professor associado de Física Teórica em Kiel (1885-1889). Em 1889, sucedeu Kirchhoff como professor na Universidade de Berlim, onde permaneceu até sua aposentadoria em 1926 (Nobel, 1918). Durante esse período, sua dedicação à pesquisa e ao ensino consolidou sua reputação como um dos maiores físicos de sua época.

Em 1900, Planck publicou o artigo intitulado “*Sobre a teoria da lei de distribuição de energia no espectro normal*”, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1918 e marcou o início da Mecânica Quântica. O estudo da radiação térmica emitida por corpos opacos, conhecida como radiação do corpo negro, forneceu as primeiras evidências da natureza quântica da radiação (Maia, 2009). Um corpo negro é um objeto idealizado que absorve toda a radiação incidente e emite radiação de forma eficiente em função da sua temperatura. A radiação emitida por esse corpo tem um espectro característico, crucial para o desenvolvimento da Teoria Quântica.

Planck determinou que a distribuição espectral da densidade de energia $u(\lambda)$ das ondas eletromagnéticas em uma cavidade é fundamental para calcular a distribuição espectral $R(\lambda)$ de um corpo negro (Planck, 1900). Ele observou que os modelos clássicos da época, como a Lei de Rayleigh-Jeans, contradiziam os dados experimentais, prevendo um aumento ilimitado da densidade de energia para comprimentos de onda curtos ($\lambda \rightarrow 0$), resultando na chamada *catástrofe ultravioleta* (Tipler; Llewellyn, 2017).

Para solucionar esse problema, Planck propôs que a energia média (E) dos osciladores não fosse emitida de forma contínua, mas em pacotes discretos chamados de *quanta* de energia. Ele afirmou que a energia de cada *quantum* é proporcional à frequência da radiação, conforme a equação :

$$E = nhf, \quad (2.1)$$

onde n é um número inteiro, $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ é a constante de Planck, f a frequência da radiação.

Com essa hipótese, derivou a Lei de Radiação de Planck, que descreve a distribuição espectral da densidade de energia em uma cavidade, ajustando-se perfeitamente aos dados experimentais da época. A equação é dada por:

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}, \quad (2.2)$$

onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo, λ é o comprimento de onda da radiação, k é a constante de Boltzmann, e T é a temperatura do corpo negro em Kelvin (K).

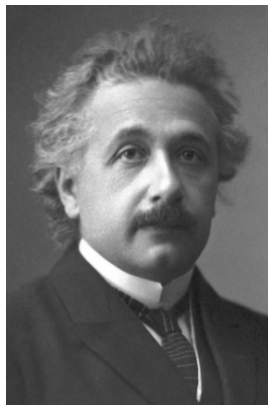
Essa formulação não apenas resolveu o problema da *catástrofe ultravioleta*, mas também marcou o início de uma nova era na Física. A hipótese de Planck demonstrou que a energia em sistemas físicos não é contínua, mas quantizada. Essa descoberta revolucionou o entendimento da natureza da radiação e abriu caminho para o desenvolvimento da Mecânica Quântica, cujos conceitos seriam ampliados por cientistas como Einstein, Bohr e Schrödinger.

Além de suas contribuições científicas, Planck enfrentou grandes desafios pessoais e profissionais. Durante o regime nazista, perdeu sua casa em bombardeios. Apesar das adversidades, permaneceu na Alemanha, contribuindo para a Ciência até seus últimos anos. Planck, que também era um pianista talentoso e chegou a considerar seguir carreira musical antes de se dedicar à Física, faleceu em Göttingen, em 4 de outubro de 1947, aos 89 anos (Nobel, 1918). Seu legado de descobertas revolucionou a Ciência e inspirou gerações futuras, inaugurando uma revolução científica cujos impactos se estendem até os dias atuais, sendo a base para o desenvolvimento da Mecânica Quântica.

2.1.2 Einstein e a Teoria Quântica

Albert Einstein (1879-1955), amplamente reconhecido como um dos maiores cientistas de todos os tempos, nasceu em 14 de março de 1879, em Ulm, Alemanha. Desde a infância, demonstrou uma curiosidade intelectual notável, embora tenha enfrentado dificuldades no rígido sistema escolar alemão. Após concluir seus estudos na Escola Politécnica Federal de Zurique, em 1900, iniciou sua carreira científica com uma série de artigos revolucionários publicados em 1905 (Nobel, 1921). Entre esses artigos, destaca-se sua explicação para o Efeito Fotoelétrico, fenômeno em que elétrons são ejetados de um material quando exposto a uma determinada frequência de radiação eletromagnética. A Figura 2 apresenta Albert Einstein.

Figura 2 – Albert Einstein.



Fonte: (Nobel, 1921).

Einstein propôs que a luz não é uma onda contínua, mas composta por quantas de energia discretos, chamados fótons. A energia desses fótons é dada pela equação $E = nhf$, onde n é um número inteiro, h é a constante de Planck e f é a frequência da luz (Tipler; Llewellyn, 2017). Esse conceito ampliou a quantização da energia proposta por Max Planck e introduziu, de forma implícita, o conceito de dualidade onda-partícula. O trabalho de Einstein foi experimentalmente confirmado por Robert Andrews Millikan entre 1914 e 1916 e, por sua contribuição para a Teoria Quântica, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1921.

O efeito fotoelétrico ocorre quando fótons incidem sobre a superfície de um material, transferindo sua energia para os elétrons. Cada material possui uma energia mínima necessária

para remover um elétron de sua superfície, conhecida como função trabalho (ϕ). Se a energia do fóton (E) for maior do que (ϕ), o elétron pode ser ejetado. A energia cinética máxima dos elétrons emitidos é dada pela diferença entre a energia do fóton incidente e a função trabalho (Tipler; Llewellyn, 2017), expressa pela equação:

$$E_{\text{máx}} = hf - \phi \quad (2.3)$$

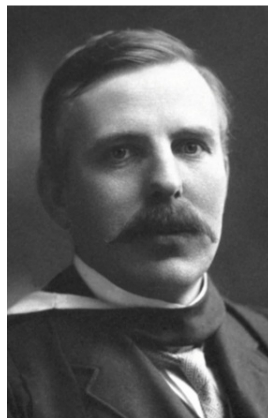
Além de sua explicação para o Efeito Fotoelétrico, Einstein fez contribuições essenciais para a Teoria da Relatividade, reformulando completamente a compreensão dos conceitos de espaço, tempo e gravidade. Em 1905, publicou a Teoria da Relatividade Especial e, em 1915, a Teoria da Relatividade Geral (Nobel, 1921). Ambas as teorias tiveram um impacto profundo na Física Moderna e são fundamentais para a descrição do universo em grandes escalas e altas velocidades.

Em 1933, devido a razões políticas, Albert Einstein emigrou para os Estados Unidos, onde continuou seu trabalho científico no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, permanecendo lá até sua aposentadoria. Ele faleceu em 18 de abril de 1955, em Princeton, Nova Jersey (Nobel, 1921). Seu trabalho revolucionou a Física, mudando a forma como entendemos o universo e deixando uma marca inapagável na história da Ciência.

2.1.3 Rutherford e uma breve história sobre a descoberta do núcleo

Ernest Rutherford (1871–1937), físico e químico neozelandês amplamente reconhecido como o pai da Física Nuclear, desempenhou um papel crucial na compreensão moderna da estrutura atômica. Nascido em Nelson, na Nova Zelândia, em uma família humilde com 12 filhos, Rutherford demonstrou, desde cedo, grande talento para as Ciências. Formou-se em Matemática e Ciências Físicas pela Universidade da Nova Zelândia e, graças a uma bolsa de estudos, ingressou no Trinity College, em Cambridge, onde trabalhou sob a supervisão de J.J. Thomson no Laboratório Cavendish (Nobel, 1908). A Figura 3 ilustra Ernest Rutherford.

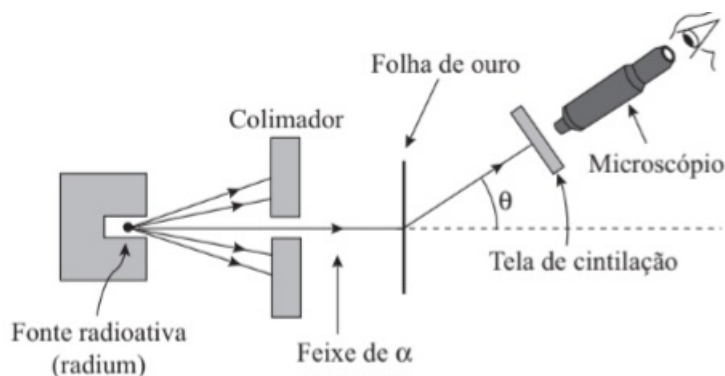
Figura 3 – Ernest Rutherford.



Fonte: (Nobel, 1908).

Em 1911, Rutherford conduziu experimentos pioneiros em seu laboratório, com a colaboração de Hans Geiger e Ernest Marsden. Seus estudos revolucionaram o entendimento da matéria e abriram caminho para futuras descobertas, incluindo a formulação do modelo nuclear do átomo (Maia, 2009). O famoso experimento da folha de ouro, também conhecido como experimento de Rutherford, foi fundamental para esse contexto. Durante o experimento, partículas alfa (α) foram disparadas contra uma fina lâmina de ouro. Observou-se que a maioria das partículas passava diretamente pela lâmina, mas algumas eram desviadas em grandes ângulos, e outras até retornavam na direção de origem. Essa análise revelou a existência de uma região extremamente pequena, densa e positivamente carregada no átomo: o núcleo (Nussenzveig, 2014). A Figura 4 ilustra a representação do experimento realizado por Rutherford.

Figura 4 – Representação do experimento de Rutherford.



Fonte: (Nussenzveig, 2014).

A partir dessa descoberta, Rutherford concluiu que os átomos possuem um núcleo compacto, onde está concentrada a maior parte de sua massa, com os elétrons orbitando ao redor. A descoberta de Rutherford não só alterou a visão da estrutura atômica, mas também pavimentou o caminho para o desenvolvimento da Física Nuclear (Souza; Dantas, 2010). Esse marco foi fundamental, pois abriu novas perspectivas para a compreensão das interações nucleares e contribuiu para a construção das bases teóricas da Física Moderna, influenciando diretamente as pesquisas que viriam a seguir nas décadas seguintes.

Rutherford recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1908 por suas investigações sobre a desintegração dos elementos radioativos, além de diversos outros reconhecimentos, como a Copley Medal e doutorados honorários. Faleceu em 19 de outubro de 1937, em Cambridge, Inglaterra (NOBEL, 1908). (Nobel, 1908). Seu legado permanece vivo, tanto pela importância de suas descobertas para a Mecânica Quântica quanto pela formação de cientistas cujas contribuições moldaram a Ciência do século XX.

2.1.4 Bohr e o átomo de hidrogênio

Niels Bohr (1885-1962), físico dinamarquês, nasceu em Copenhague, Dinamarca, em 7 de outubro de 1885. Filho do renomado fisiologista Christian Bohr e de Ellen Adler, oriunda de uma família com forte tradição educacional, foi desde a infância influenciado pelo pai e pelo

ambiente intelectual em sua casa, o que despertou seu grande interesse pela Ciência. Iniciou seus estudos na Universidade de Copenhague, onde foi orientado por C. Christiansen, um talentoso físico. Concluiu o mestrado em Física em 1909 e obteve o doutorado em 1911, com uma pesquisa teórica sobre as propriedades dos metais, utilizando a teoria dos elétrons (Nobel, 1922). Esse trabalho tornou-se um marco na Física Moderna.

Em 1913, Bohr desenvolveu um modelo teórico para o átomo de hidrogênio, combinando conceitos fundamentais das teorias de Planck, Einstein e Rutherford. Esse modelo propôs que os elétrons orbitavam o núcleo em órbitas estacionárias, sem irradiar energia, resolvendo a questão da instabilidade presente no modelo de Rutherford. Além disso, explicou com precisão as posições das linhas espectrais do hidrogênio, solucionando uma das questões mais intrigantes da época. Por essa contribuição, Bohr recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1922, consolidando sua posição como um dos pioneiros da Mecânica Quântica. A Figura 5 ilustra Niels Bohr.

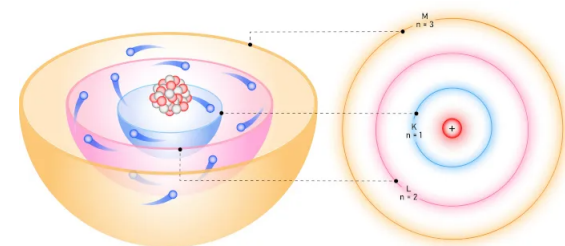
Figura 5 – Niels Bohr.



Fonte: (Nobel, 1922).

O modelo de Bohr foi revolucionário porque integrou a Teoria Quântica à estrutura atômica. Ele sugeriu que os elétrons ocupavam órbitas circulares ao redor do núcleo e podiam saltar entre essas órbitas, emitindo ou absorvendo energia de acordo com a diferença entre os níveis energéticos (Tipler; Llewellyn, 2017). O modelo também solucionou a instabilidade proposta no modelo de Rutherford, explicando como os elétrons poderiam orbitar o núcleo sem emitir radiação continuamente. A Figura 6 apresenta a representação do modelo atômico de Bohr (Lima, 2024).

Figura 6 – O modelo atômico de Bohr.



Fonte: (Lima, 2024).

Embora o modelo de Bohr tenha sido posteriormente refinado por desenvolvimentos da Mecânica Quântica Moderna, como as contribuições de Schrödinger e Heisenberg, ele continua sendo uma das maiores contribuições para a compreensão da natureza quântica da matéria. Suas pesquisas sobre a estrutura atômica e os núcleos atômicos foram fundamentais para o desenvolvimento da Física Nuclear.

Bohr chefiou o Instituto de Física Teórica em Copenhague, que se destacou como um centro de excelência científica mundial. Falecido em 1962, deixou um legado duradouro, com ideias sobre a estrutura atômica, a Teoria Quântica e a Física Nuclear que continuam a influenciar a Ciência Moderna (Nobel, 1922). Seu modelo atômico, especialmente no que diz respeito ao átomo de hidrogênio, permanece como uma das bases da Física Atômica e Quântica, sendo essencial para a compreensão da natureza da matéria e do universo.

2.1.5 Arthur Compton e o Efeito Compton

Arthur Holly Compton (1892-1962) foi um físico norte-americano, nascido em 10 de setembro de 1892, em Wooster, Ohio. Filho de Elias Compton, professor de Filosofia e reitor da College of Wooster, e de Betty Charity McCloskey, foi desde jovem influenciado pelo ambiente intelectual de sua casa. Ao longo de sua vida, demonstrou grande interesse pela Ciência. Compton graduou-se em Ciências em 1913, obteve seu mestrado em 1914 e o doutorado em 1916 pela Universidade de Princeton (Nobel, 1927).

Compton foi fundamental para o avanço da Física Moderna, especialmente no campo da Mecânica Quântica. Em 1923, ele realizou uma série de experimentos que forneceram evidências conclusivas da dualidade onda-partícula da luz, um conceito central para o desenvolvimento da Teoria Quântica. Demonstrou que os fótons, além de possuírem energia, também possuem momento linear, uma característica fundamental da Mecânica Quântica (Halliday; Resnick; Walker, 2016). Essa descoberta revolucionária elucidou o comportamento quântico da luz e sua interação com elétrons, consolidando a compreensão de que a luz pode se comportar tanto como onda quanto como partícula. A Figura 7 ilustra Arthur Compton.

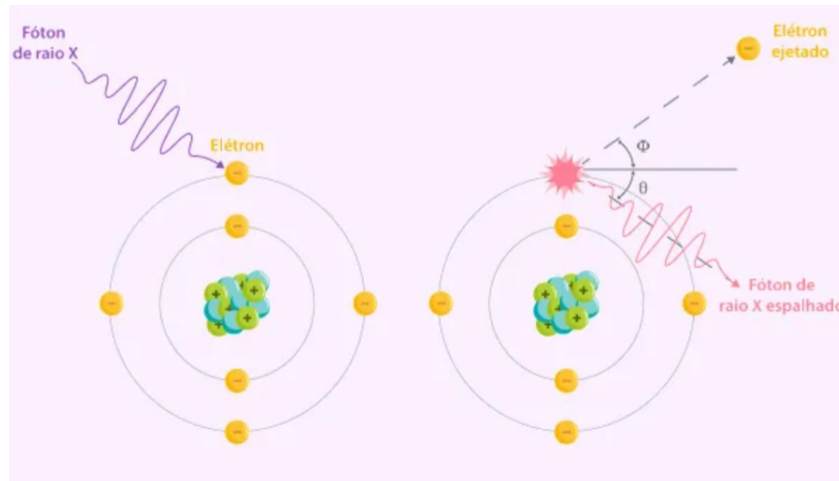
Figura 7 – Arthur Compton.



Fonte: (Nobel, 1927).

Por essa contribuição significativa, Compton foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1927. O Efeito Compton, como ficou conhecido, descreve a interação entre fótons e elétrons livres. Esse efeito ocorre quando um fóton de alta energia, como os raios X ou raios γ , colide com um elétron repouso, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Representação do efeito Compton.



Fonte: (Melo, 2024).

Após a colisão, o fóton é espalhado em uma direção diferente e com menor energia, resultando no aumento do comprimento de onda da radiação emitida. Esse fenômeno, chamado de deslocamento Compton (Melo, 2024), foi crucial para confirmar que os fótons possuem momento e podem transferir energia para partículas materiais, evidenciando a dualidade onda-partícula. A equação que descreve essa variação do comprimento de onda é dada por:

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (2.4)$$

onde λ_2 e λ_1 são os comprimentos de onda antes e depois da colisão, h a constante de Planck, m_e é a massa do elétron, c é a velocidade da luz, e θ é o ângulo de espalhamento do fóton.

A contribuição de Compton para o entendimento da natureza da luz e da radiação é um dos legados mais duradouros de sua carreira. Além disso, a descoberta também ajudou a consolidar a Teoria Quântica, essencial para descrever o comportamento de partículas subatômicas e para o desenvolvimento de tecnologias como a Física Nuclear e a Física de Partículas. Sua contribuição não se limitou ao Efeito Compton; ele também foi um líder acadêmico e um cientista importante, envolvido com a pesquisa de raios cósmicos, radiação e a estrutura atômica.

Durante sua carreira, Compton ocupou importantes cargos acadêmicos e ajudou a impulsionar o avanço da Física em todo o mundo. Compton faleceu em 1962 (Nobel, 1927). Mas seu legado científico e educacional permanece fundamental para a Física Moderna, especialmente no que se refere à natureza da luz e às interações entre radiação e matéria.

2.2 A NOVA TEORIA QUÂNTICA

A nova Teoria Quântica abrange o grupo de idealizadores que contribuíram para o desenvolvimento da teoria a partir da década de 1920, incluindo os trabalhos de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Max Born, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli e Paul Dirac. Esses cientistas construíram uma estrutura Matemática aprimorada para descrever o comportamento das partículas subatômicas, proporcionando uma compreensão mais completa e precisa dos fenômenos quânticos (Martins, 2021).

2.2.1 De Broglie e as ondas de elétrons

Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987) nasceu em 15 de agosto de 1892, em Dieppe, França. Filho de Victor, Duque de Broglie, e Pauline d'Armaillé, inicialmente seguiu uma trajetória voltada para as humanidades, obtendo, em 1910, um diploma em História após estudar no Lycée Janson de Sailly. No entanto, seu interesse pela Ciência, inspirado em parte por seu irmão mais velho, Maurice, levou-o a mudar de rumo, graduando-se em Física em 1913. Durante a Primeira Guerra Mundial, serviu na seção de comunicações por rádio do exército francês, aproveitando seu tempo livre para explorar problemas técnicos e científicos (Nobel, 1929). A Figura 9 apresenta Louis de Broglie.

Figura 9 – Louis de Broglie.



Fonte: (Nobel, 1929).

Em 1924, no auge de sua formação acadêmica, de Broglie defendeu sua tese de doutorado intitulada *Pesquisa sobre a Teoria dos Quanta*. Esse trabalho lhe rendeu o Prêmio Nobel em 1929, ao introduzir o conceito de dualidade onda-partícula (Tipler; Llewellyn, 2017). Nessa tese, ele propôs a revolucionária hipótese de que partículas materiais, como elétrons, poderiam apresentar comportamento ondulatório, assim como a luz exibe propriedades corpusculares (Martins; Rosa, 2014). Essa ideia ampliou significativamente o entendimento da natureza quântica da matéria.

De Broglie expressou sua hipótese por meio da equação de comprimento de onda

associada às ondas de matéria (λ), representada pela seguinte fórmula:

$$\lambda = \frac{h}{P}, \quad (2.5)$$

onde nessa equação, λ é o comprimento de onda, h é a constante de Planck e P é o momento linear da partícula (Tipler; Llewellyn, 2017). A ideia de De Broglie foi experimentalmente confirmada em 1927 por Clinton Davisson e Lester Germer, que observaram a difração de elétrons em cristais de níquel, validando a dualidade onda-partícula. Esse marco foi essencial para o desenvolvimento da Mecânica Ondulatória de Erwin Schrödinger, que formulou a famosa equação de Schrödinger, descrita em termos de funções de onda.

A relevância do trabalho de Louis de Broglie foi amplamente reconhecida. Em 1929, ele recebeu o Prêmio Nobel de Física por sua descoberta da natureza ondulatória dos elétrons. Além disso, foi agraciado com o Prêmio Henri Poincaré, o Prêmio Albert I de Mônaco e, em 1952, recebeu o primeiro Prêmio Kalinga da UNESCO por suas contribuições na divulgação científica. Louis de Broglie faleceu em 19 de março de 1987, aos 94 anos, deixando um legado inestimável para a Física Moderna (Nobel, 1929). Seu trabalho revolucionou a compreensão da natureza quântica da matéria e estabeleceu as bases para avanços fundamentais na Mecânica Quântica.

2.2.2 Schrödinger e a equação de onda

Erwin Schrödinger (1887-1961) foi um físico teórico austríaco amplamente reconhecido por suas contribuições fundamentais à Mecânica Quântica. Nascido em 12 de agosto de 1887, em Viena, foi filho único de Rudolf Schrödinger. Desde a infância, demonstrou grande interesse por Ciências Naturais, Filosofia e Literatura, destacando-se na educação escolar, onde desenvolveu sua paixão por disciplinas científicas e pela lógica das línguas clássicas (Nobel, 1933a). A Figura 10 apresenta Schrödinger, responsável por essas contribuições históricas.

Figura 10 – Erwin Schrödinger.



Fonte: (Nobel, 1933a).

Schrödinger iniciou seus estudos na Universidade de Viena, onde foi fortemente influenciado por Fritz Hasenöhl, sucessor de Boltzmann. Nesse período, aprofundou-se em Física,

Matemática e Química, além de demonstrar interesse por poesia alemã e pela lógica da gramática antiga. Após concluir seus estudos, dedicou-se a diversas pesquisas científicas (Nobel, 1933a). Um dos grandes marcos de sua carreira foi a formulação da equação de onda, em 1926, um momento decisivo para a Mecânica Quântica.

Inspirado pela hipótese de Louis de Broglie sobre a dualidade onda-partícula, em 1926, Erwin Schrödinger revolucionou a Mecânica Quântica, permitindo descrever o comportamento quântico dos sistemas físicos (Schrödinger, 1926). Esse desenvolvimento ocorreu durante um período de intensa criatividade, enquanto ele estava hospedado na Villa Herwig, um hotel em Arosa, nos Alpes suíços, um local que proporcionou a tranquilidade necessária para o surgimento de suas ideias revolucionárias. Curiosamente, essa fase decisiva da ciência não se deu de forma isolada, mas em meio a circunstâncias pessoais peculiares, já que Schrödinger estava acompanhado de uma mulher cuja identidade permanece desconhecida até hoje (Martins, 2021).

A equação de Schrödinger, que descreve o estado quântico de sistemas físicos, deu origem à Mecânica Quântica Ondulatória (Tipler; Llewellyn, 2017). Ela é apresentada em três formas principais:

1. Equação de Schrödinger independente do tempo:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + V(x) \psi(x) = E \psi(x) \quad (2.6)$$

2. Equação de Schrödinger dependente do tempo em uma dimensão:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} \quad (2.7)$$

3. Equação de Schrödinger tridimensional:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 \psi(r) + V(r) \psi(r) = E \psi(r) \quad (2.8)$$

Essas equações são fundamentais para a descrição das dinâmicas de sistemas quânticos. A forma tridimensional, em especial, é crucial para o entendimento das propriedades espectrais do átomo de hidrogênio. A equação de onda de Schrödinger representou um avanço significativo na Teoria Quântica. Em 1933, Schrödinger recebeu o Prêmio Nobel de Física, compartilhado com Paul Dirac, por suas contribuições à Teoria da Mecânica Quântica (Nobel, 1933a). Ele também foi amplamente respeitado por suas pesquisas e pelos impactos significativos em outros campos da Física.

Schrödinger faleceu em 4 de janeiro de 1961, em Viena (Nobel, 1933a). Seu legado é duradouro, com sua equação de onda sendo uma das bases fundamentais da Mecânica Quântica, consolidando seu nome como sinônimo de inovação intelectual. O conceito do "gato de Schrödinger", frequentemente utilizado como metáfora para fenômenos quânticos, continua a ser um dos mais conhecidos e debatidos na Física.

2.2.3 Born e a interpretação da função de onda

Max Born (1882-1970), físico e matemático alemão, é amplamente reconhecido como um dos fundadores da Mecânica Quântica, tendo contribuído de forma essencial para o avanço da ciência em escala microscópica. Nascido em Breslávia, atual Wrocław, Polônia, em uma família de intelectuais, foi filho de Gustav Born, anatomista e embriologista, e de Margarete Kauffmann. Estudou em algumas das mais renomadas universidades da Europa, como Breslávia, Heidelberg, Zurique e Göttingen. Foi em Göttingen que desenvolveu seu interesse pela Matemática aplicada à Física, sob a influência de grandes nomes como Hilbert, Klein e Minkowski (Nobel, 1954). A Figura 11 apresenta Max Born.

Figura 11 – Max Born.



Fonte: (Nobel, 1954).

Em 1926, Born realizou uma das suas mais importantes contribuições à Ciência ao interpretar a função de onda proposta por Erwin Schrödinger de forma probabilística. Ele sugeriu que a função de onda (ψ) não representa diretamente a posição de uma partícula, mas sim a probabilidade de encontrar a partícula em um ponto específico do espaço (Martins, 2021). A densidade de probabilidade é expressa pelo módulo ao quadrado da função de onda ($|\psi|^2$), conforme mostrado pela equação:

$$\rho(x,t) = |\psi(x,t)|^2 \quad (2.9)$$

Essa interpretação estatística revolucionou a Mecânica Quântica, oferecendo uma nova maneira de compreender os fenômenos quânticos e consolidando-se como um dos pilares fundamentais da teoria. Esse trabalho foi essencial para o progresso da Mecânica Quântica e rendeu a Born o Prêmio Nobel de Física em 1954. Durante sua carreira, Born colaborou com diversos cientistas que mais tarde se tornaram grandes nomes da Física, como Heisenberg, Pauli, Jordan e Dirac. Contudo, com a ascensão do nazismo em 1933, sendo de origem judaica, ele foi forçado a emigrar. Lecionou em Cambridge por três anos antes de se estabelecer em Edimburgo, onde trabalhou como professor até sua aposentadoria, em 1953 (Nobel, 1954).

Born recebeu diversos prêmios e honrarias, incluindo a Medalha Max Planck e a Hughes Medal, além de ser eleito membro de várias academias científicas internacionais. Max Born

faleceu em 5 de janeiro de 1970, em Göttingen, Alemanha (Nobel, 1954). Seu legado perdura como um dos pilares da Mecânica Quântica e da Física Moderna.

2.2.4 Heisenberg e a Mecânica Quântica Matricial

Werner Heisenberg (1901-1976) nasceu em 5 de dezembro de 1901, em Würzburg, na Alemanha, em uma família de intelectuais. Seu pai, Dr. August Heisenberg, era professor de línguas gregas na Universidade de Munique, o que influenciou o jovem Werner a seguir a educação superior. Estudou Física na Universidade de Munique, onde trabalhou com renomados cientistas como Arnold Sommerfeld, Max Wien e Philipp Pringsheim. Em 1923, mudou-se para Göttingen, onde colaborou com Max Born, Franck e David Hilbert, obtendo seu doutorado na Universidade de Munique. Em 1932, foi laureado com o Prêmio Nobel de Física (Nobel, 1932). A Figura 12 ilustra Werner Heisenberg.

Figura 12 – Werner Heisenberg.



Fonte: (Nobel, 1932).

Em 1926, Heisenberg desenvolveu a Mecânica Quântica Matricial, um formalismo inovador que se distinguia tanto da Física Clássica quanto da teoria ondulatória de Schrödinger, desenvolvidas simultaneamente. Ele propôs uma abordagem para descrever as propriedades observáveis de um sistema quântico, como a posição e o momento de uma partícula, utilizando matrizes (Heisenberg, 1925; Martins, 2021). Essa contribuição foi fundamental para a evolução da Mecânica Quântica.

Além disso, Heisenberg foi crucial para o desenvolvimento do princípio da incerteza, que estabelece que é impossível determinar simultaneamente, com precisão, a posição e o momento de uma partícula. Esse princípio é expresso pela fórmula:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (2.10)$$

onde Δx é a incerteza na posição, Δp é a incerteza no momento e $\hbar$ é a constante de Planck reduzida (Fogaça, 2024). Esse princípio revolucionou a Física e se tornou uma das bases da Teoria Quântica.

Após a Segunda Guerra Mundial, Heisenberg ajudou a reorganizar o Instituto de Física de Göttingen, que foi renomeado para Instituto Max Planck de Física. Em 1953, foi nomeado presidente da Fundação Alexander von Humboldt, promovendo a colaboração científica internacional. Nos últimos anos de sua carreira, concentrou-se no estudo das partículas elementares e suas interações fundamentais. Heisenberg faleceu em 1º de fevereiro de 1976, em Munique, deixando um legado imenso na Física Moderna (Nobel, 1932). A Mecânica Quântica Matricial e o princípio da incerteza continuam a influenciar a Física até os dias de hoje, consolidando-o como um dos pilares da Mecânica Quântica.

2.2.5 Pauli e o spin do elétron

Wolfgang Pauli (1900-1958), físico teórico austríaco nascido em 25 de abril de 1900, em Viena, é amplamente reconhecido por suas contribuições fundamentais para o desenvolvimento da Física Moderna, especialmente no campo da Mecânica Quântica. Pauli obteve seu doutorado em 1921 sob a orientação de Arnold Sommerfeld na Universidade de Munique, e, em seguida, trabalhou com cientistas renomados como Max Born e Niels Bohr. Ele é mais famoso por ter formulado o Princípio da Exclusão de Pauli, que afirma que dois férmions, como os elétrons, não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente (Nobel, 1945). Este princípio foi crucial para a compreensão da estrutura atômica e ajudou a estabelecer as bases para a Mecânica Quântica Moderna. A Figura 13 ilustra Wolfgang Pauli.

Figura 13 – Wolfgang Pauli.

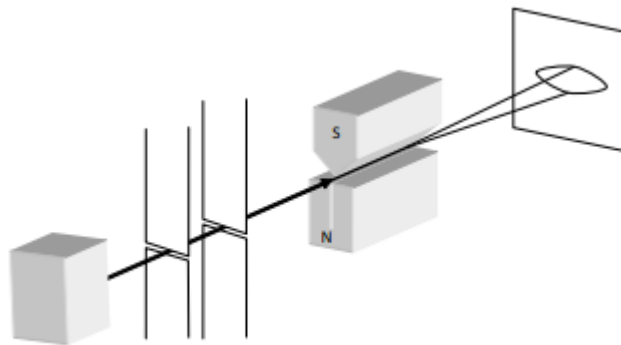


Fonte: (Nobel, 1945).

Em 1926, Pauli fez outra contribuição significativa ao sugerir que o spin é uma propriedade intrínseca das partículas elementares, como os elétrons, que possuem spin $\frac{1}{2}$. Essa descoberta surgiu a partir dos estudos sobre o comportamento de átomos complexos em campos magnéticos, particularmente após o experimento de Stern-Gerlach (Maia, 2009). O experimento de Stern-Gerlach, realizado por Otto Stern e Walther Gerlach em 1922, foi uma das primeiras evidências experimentais de que as propriedades das partículas subatômicas são regidas pelos princípios da Mecânica Quântica, contrariando a visão clássica da Física.

O experimento consistiu na utilização de um feixe de átomos de prata, que foi direcionado através de um campo magnético não uniforme. O aparato experimental era composto por um forno, responsável por aquecer os átomos de prata, um colimador para alinhar o feixe, um ímã com gradiente de campo magnético, que aplicava uma força diferencial sobre os momentos magnéticos das partículas, e uma placa de detecção para registrar a distribuição do feixe (Eisberg; Resnick, 1979). A Figura 14 apresenta a representação do experimento de Stern-Gerlach (Gomes; Pietrocola, 2011).

Figura 14 – Experimento de Stern-Gerlach.



Fonte: (Gomes; Pietrocola, 2011).

De acordo com a Física Clássica, esperava-se que os momentos magnéticos dos átomos de prata, assumindo distribuições contínuas, formassem uma única faixa na placa de detecção. No entanto, os resultados experimentais mostraram algo inesperado: o feixe de átomos se dividiu em duas regiões distintas. Esse resultado levou à formulação do conceito de spin, consolidando a ideia de que partículas de spin $\frac{1}{2}$ não podem compartilhar o mesmo estado quântico simultaneamente, conforme o Princípio de Exclusão de Pauli.

As matrizes de Pauli, fundamentais para o estudo do comportamento de partículas com spin $\frac{1}{2}$, são associadas a componentes do spin (ou momento angular) em direções específicas (x , y ou z). Elas descrevem como essas partículas se comportam em relação a medições nessas direções. As matrizes de Pauli são representadas abaixo:

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

$$\sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

$$\sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Essas matrizes são essenciais para descrever as propriedades do spin das partículas e sua interação com campos magnéticos, sendo uma das principais ferramentas Matemáticas usadas na Física Quântica. Ao longo de sua carreira, Pauli recebeu reconhecimento internacional

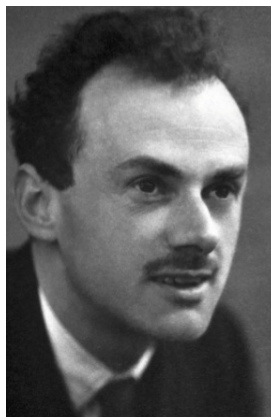
por suas realizações. Em 1945, foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física por sua contribuição ao desenvolvimento da teoria do spin. Além disso, foi eleito membro da Royal Society e recebeu a Medalha Lorentz em 1930 (Nobel, 1945).

Pauli continuou suas pesquisas em Zurique, mas também teve períodos como professor visitante em instituições prestigiadas, como o Institute for Advanced Study em Princeton. Wolfgang Pauli faleceu em 15 de dezembro de 1958, deixando um legado duradouro na Física Teórica (Nobel, 1945). Suas descobertas continuam a ser a base para muitas áreas da Física Moderna, o Princípio da Exclusão de Pauli e a teoria do spin, permanecem como marcos importantes na história da Ciência.

2.2.6 Dirac e a Mecânica Quântica Relativística

Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) nasceu em 8 de agosto de 1902, em Bristol, Inglaterra, filho de um pai suíço e uma mãe inglesa. Demonstrando desde jovem um grande interesse pela Matemática e pela Física, estudou na Merchant Venturer's Secondary School e, mais tarde, na Universidade de Bristol, onde se formou em Engenharia em 1921. No entanto, sua verdadeira paixão era a Matemática, e, após concluir o curso de Engenharia, dedicou-se ao estudo dessa disciplina, obtendo seu Ph.D. na Universidade de Cambridge em 1926. Dirac tornou-se o Professor Lucasiano de Matemática em Cambridge em 1932, uma das posições acadêmicas mais prestigiadas do mundo (Nobel, 1933b). A Figura 15 apresenta Paul Dirac.

Figura 15 – Paul Dirac.



Fonte: (Nobel, 1933b).

Dirac é amplamente reconhecido por suas contribuições à Mecânica Quântica. Em 1928, ele formulou a equação que leva seu nome, a equação de Dirac, para descrever o comportamento quântico das partículas de forma relativística. Esta equação foi uma das realizações mais importantes do século XX, pois unificou a Mecânica Quântica com a Teoria da Relatividade Restrita de Einstein (Dirac, 1928; Martins, 2021). Ela descreve o comportamento de partículas de spin $\frac{1}{2}$, como os elétrons, e incorpora os efeitos relativísticos, sendo um avanço em relação à equação de Schrödinger, que não considerava esses efeitos. A equação de Dirac, na forma

covariante, é expressa por:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0, \quad (2.14)$$

onde γ^μ são as matrizes de Dirac, ∂_μ é o operador derivada, m é a massa da partícula descrita pela equação, e ψ é a função de onda relativística, que descreve o estado quântico da partícula.

Apesar de sua genialidade, Paul Dirac era conhecido por sua personalidade introspectiva e reservada, frequentemente descrito como frio e silencioso. Contudo, sua clareza e precisão no trabalho garantiram-lhe uma influência profunda na Física Teórica. Por suas contribuições notáveis, foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1933, juntamente com Erwin Schrödinger. Dirac casou-se com Margit Wigner em 1937, e ao longo de sua brilhante carreira, recebeu várias distinções, incluindo a Medalha Real e a Medalha Copley pela Royal Society. Além disso, foi eleito membro da Academia Pontifícia de Ciências em 1961 (Nobel, 1933b).

Dirac faleceu em 20 de outubro de 1984, aos 82 anos (Nobel, 1933b). Sua equação, assim como suas contribuições à Física de Partículas e à Teoria Quântica Relativística, continuam a ser fundamentais para o entendimento moderno da Física. O legado de Dirac é duradouro, e suas ideias seguem moldando o campo da Física Teórica, especialmente no que diz respeito à unificação das Teorias Quântica e Relativística.

2.3 METODOLOGIAS DE ENSINO DA MECÂNICA QUÂNTICA

O ensino da Mecânica Quântica apresenta desafios significativos devido à sua natureza contraintuitiva e à necessidade de compreender conceitos profundamente abstratos. Conceitos fundamentais, como a quantização de energia, a dualidade onda-partícula, a densidade de probabilidade, o princípio da incerteza e as propriedades intrínsecas das partículas elementares frequentemente contrastam com a visão clássica do mundo e exigem esforços diferenciados para serem assimilados (Greca; Moreira; Herscovitz, 2001). Essa complexidade demanda abordagens didáticas inovadoras que promovam engajamento e facilitem a construção do conhecimento.

Dentro desse contexto, o uso de jogos educacionais, especialmente jogos de tabuleiro, destaca-se como uma ferramenta poderosa e inovadora, como o *Jogo de Física de partículas: Descobrindo o bóson de Higgs* (Souza *et al.*, 2019). Esses jogos não apenas tornam o aprendizado mais interativo e dinâmico, mas também ajudam os estudantes a se envolverem ativamente no processo de construção de conceitos. Estudos mostram que métodos lúdicos no ensino promovem maior retenção de conhecimento, desenvolvimento de habilidades cognitivas e sociais, além de proporcionarem um ambiente propício à discussão e ao pensamento crítico (Pereira; Fusinato; Neves, 2009). Dessa forma, quando combinados com o ensino tradicional, os jogos ampliam a capacidade dos alunos de compreender conceitos complexos, transformando o aprendizado em uma experiência mais envolvente e significativa.

A integração de jogos educacionais ao currículo não apenas contribui para a compreensão de conteúdos específicos, mas também estimula habilidades transversais, como raciocínio lógico, trabalho em equipe e resolução de problemas. Isso se alinha diretamente à Teoria da

Aprendizagem Significativa de Ausubel, que destaca a importância de ancorar novos conhecimentos nas estruturas cognitivas pré-existentes do aluno. Segundo Ausubel (2012), a aprendizagem significativa ocorre quando novos conceitos são organizados de forma hierárquica e integrados ao repertório mental do aprendiz, o que leva a uma compreensão mais profunda e duradoura dos conteúdos.

Para Ausubel, a aprendizagem significativa é mais eficaz quando os estudantes conseguem conectar as novas informações com algo que já sabem, formando assim uma rede de conhecimento mais robusta e organizada. Nesse processo, o papel do professor é fundamental, pois ele deve criar condições para que o aluno estabeleça essas conexões de maneira eficaz, utilizando exemplos concretos e modelos didáticos que facilitem a compreensão.

Além disso, a teoria de Ausubel sugere que a aprendizagem ocorre de forma mais eficiente quando os alunos têm um quadro de referência que os ajude a compreender os novos conceitos. Dessa maneira, os jogos educacionais, como a Roleta do Tempo da Mecânica Quântica, se encaixam perfeitamente, pois permitem que os estudantes estabeleçam conexões entre o conteúdo teórico e sua aplicação prática de maneira interativa. O jogo se torna, portanto, uma ferramenta que não apenas reforça o aprendizado de conceitos quânticos, mas também propicia uma forma concreta de compreender como esses conceitos se inter-relacionam e podem ser aplicados.

Uma aplicação prática dessa abordagem é o jogo “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica”. Esse recurso educacional foi concebido para explorar conceitos quânticos de maneira interativa e colaborativa, transformando o ambiente de sala de aula em um espaço de competição saudável e aprendizado ativo. No jogo, os estudantes, organizados em equipes, respondem a perguntas sobre a Teoria Quântica. A cada resposta correta, as equipes avançam; no entanto, cada resposta errada faz com que retrocedam uma casa ou percam a vez, incentivando tanto o estudo quanto a participação ativa. Essa dinâmica não apenas reforça os conteúdos discutidos, mas também promove o engajamento dos alunos, ao mesmo tempo em que proporciona um momento de avaliação formativa lúdica, permitindo ao professor identificar possíveis lacunas no entendimento.

Esse processo entre jogo e teoria fortalece a aprendizagem, oferecendo oportunidades para que os estudantes internalizem os conceitos de maneira mais eficaz. Portanto, a inserção de jogos como a Roleta do Tempo da Mecânica Quântica no ensino da Mecânica Quântica representa uma estratégia que alia inovação, interatividade e construção colaborativa de conhecimento, tornando o aprendizado de uma disciplina complexa mais acessível e envolvente.

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada na elaboração e aplicação do produto educacional “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” segue uma abordagem participativa e interativa, com ênfase no aprendizado colaborativo e na consolidação dos conceitos de Física Quântica. O processo de desenvolvimento do produto envolveu as seguintes etapas:

1. Pesquisa e referencial teórico: inicialmente, foi realizada uma pesquisa aprofundada sobre os principais marcos históricos da Mecânica Quântica, com base em fontes confiáveis da área da Física, a fim de garantir a veracidade e o rigor científico do conteúdo.
2. Planejamento do jogo: a partir da fundamentação teórica, foi elaborado um planejamento detalhado do jogo, que incluiu o layout da roleta, as cartas, as regras e os objetivos educacionais. O planejamento também buscou garantir a adequação do produto às necessidades pedagógicas.
3. Construção do produto: o produto foi projetado e desenvolvido com MDF e outros componentes estruturais e gráficos, garantindo funcionalidade e estética.
4. Aplicação do produto: o produto educacional foi aplicado em uma turma do Ensino Médio, com o objetivo de testar sua eficácia como ferramenta de ensino e promover o engajamento dos alunos com os conceitos de Física Quântica de maneira lúdica e interativa.

A aplicação do jogo “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” foi realizada com uma turma do 3º ano do Ensino Médio do Instituto Federal do Piauí (IFPI), no curso técnico em Edificações. Essa experiência revelou-se extremamente enriquecedora, tanto para o mediador quanto para os alunos participantes. O principal objetivo foi explorar o ensino de Mecânica Quântica de forma envolvente, promovendo a construção de conhecimento histórico e científico de maneira dinâmica e colaborativa.

A teoria da Aprendizagem Significativa, proposta por David Ausubel, foi uma das bases que orientaram a aplicação do produto educacional. Segundo Ausubel, a aprendizagem ocorre de forma significativa quando o novo conhecimento é relacionado a conceitos previamente adquiridos pelos alunos, ou seja, quando há uma conexão entre o conhecimento novo e o conhecimento prévio. Durante a aplicação do jogo, os estudantes foram incentivados a ativar seus conhecimentos prévios relacionados à Física e à História da Ciência. Dessa forma, os marcos históricos da Física Quântica apresentados no jogo ajudaram os alunos a visualizar a evolução do pensamento científico ao longo do tempo, promovendo uma aprendizagem significativa, conforme propõe Ausubel 2012.

3.1 A ROLETA DO TEMPO DA MECÂNICA QUÂNTICA: UMA ABORDAGEM LÚDICA

O produto educacional Roleta do Tempo da Mecânica Quântica pode ser aplicado diretamente ou após a discussão do conteúdo pelo professor, funcionando como uma ferramenta avaliativa e de investigação cognitiva. Seu principal objetivo é estimular a compreensão e a reflexão sobre os conceitos quânticos, relacionando marcos históricos à evolução da Teoria Quântica de forma interativa e dinâmica. Esse recurso didático foi desenvolvido para integrar a contextualização histórica ao aprendizado conceitual, promovendo uma melhor assimilação dos fundamentos da Mecânica Quântica.

Essa ferramenta foi estruturada para relacionar diferentes marcos históricos da Física Quântica, desde os primeiros avanços até as descobertas mais modernas, proporcionando uma experiência de aprendizado que explora a evolução conceitual da teoria ao longo do tempo. A roleta é dividida em doze seções, cada uma representando um marco significativo na história da Mecânica Quântica. Além disso, o jogo inclui perguntas que incentivam os alunos a aprofundar seu entendimento sobre as descobertas relacionadas a esses marcos. A Tabela 1 apresenta os marcos históricos associados a cada hora da roleta. Na Figura 16, é apresentado o layout.

Tabela 1 – Marcos Históricos da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica.

Hora	Marco Histórico
0h	Corpo negro
1h	Lei de Planck
2h	Efeito fotoelétrico
3h	Modelo de Rutherford
4h	Modelo de Bohr
5h	Efeito Compton
6h	Dualidade onda-partícula
7h	Teoria de Schrödinger
8h	Postulado de Born
9h	Teoria de Heisenberg
10h	Spin do elétron
11h	Equação de Dirac

Fonte: Autoria própria, 2025.

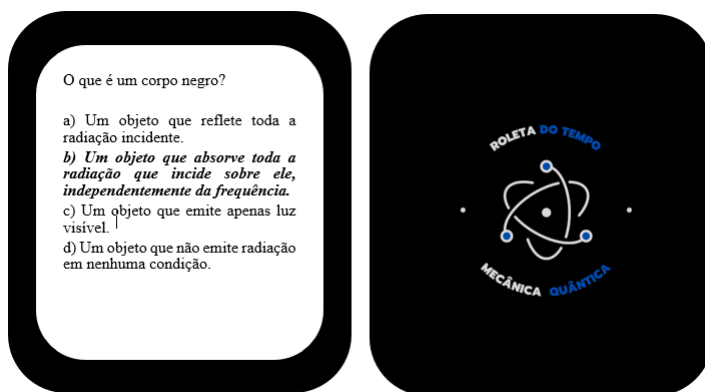
Figura 16 – Layout da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica.



Fonte: Autoria própria, 2025.

As cartas de perguntas da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica foram inspiradas nas do jogo *Drawing Science: An Interdisciplinary, Playful, and Inclusive Proposal*. Esse jogo foi projetado para integrar diferentes disciplinas de maneira interativa e inclusiva, utilizando elementos lúdicos para promover o aprendizado (Souza *et al.*, 2023). De forma similar, as cartas da roleta buscam envolver os estudantes de maneira criativa, proporcionando uma experiência educativa, divertida e colaborativa. As perguntas presentes nas cartas são baseadas nos marcos históricos da Mecânica Quântica e foram cuidadosamente elaboradas para refletir os conceitos essenciais dessa área da Física, incentivando a reflexão e a participação ativa dos alunos no processo de aprendizado. A Figura 17 apresenta-se o modelo das cartas de perguntas, elaborado para estimular o aprendizado de forma lúdica e interativa.

Figura 17 – Modelo de cartas de perguntas.



Fonte: Autoria própria, 2025.

O funcionamento e as regras gerais da roleta seguem as diretrizes abaixo:

- **Roleta:** dividida em doze seções, cada uma representando um marco histórico da Mecânica Quântica. Sua geometria circular possui um tamanho de 30x30 cm e cores variadas, que ajudam a distinguir as diferentes seções.
- **Quiz de múltiplas perguntas:** as perguntas, relacionadas a cada uma das seções da roleta, são organizadas em cartas de 10x9 cm, conforme ilustrado na Figura 17, e variam em níveis de dificuldade, conforme detalhado no Apêndice B.
- **Ponteiros:** cada equipe terá um ponteiro com o nome de um dos cientistas, como “Equipe Planck”, “Equipe Bohr”, “Equipe Schrödinger” e “Equipe Dirac”, para marcar sua posição na roleta.
- **Divisão de equipe:** cada equipe começará com seu ponteiro na posição inicial (0h).
- **Resposta correta:** a equipe avança para a próxima seção da roleta.
- **Resposta incorreta:** a equipe perde a rodada ou o ponteiro pode voltar uma seção anterior.
- **Penalidade:** voltar uma seção ao errar uma pergunta nas seções 2h, 5h, 8h e 11h.
- **Tempo Limite:** 1 minuto e 20 segundos para responder cada pergunta.
- **Vencedor:** a equipe que completar a volta na roleta primeiro. Em caso de empate, será feita uma pergunta extra, e a equipe que responder corretamente primeiro será declarada vencedora.

O principal objetivo da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica é estimular a competição saudável entre equipes, consolidar o conhecimento e tornar o estudo da Mecânica Quântica mais interessante. Essa ferramenta didática é voltada para o ensino de Física, especialmente no contexto de professores e estudantes. Para os professores, a roleta serve tanto para avaliação quanto como um meio de investigação cognitiva, tornando as aulas mais dinâmicas e envolventes. Para os estudantes, proporciona uma abordagem interativa do conteúdo, facilitando a compreensão dos conceitos quânticos.

3.2 DESCRIÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO PRODUTO

A construção da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica seguiu uma sequência de etapas interligadas, abrangendo o planejamento inicial, a escolha de materiais, a montagem e a validação de seu funcionamento. A seguir, apresenta-se o detalhamento de cada etapa, destacando os elementos visuais que contribuem para a criação de um ambiente de aprendizagem envolvente e interativo.

3.2.1 Planejamento

O planejamento da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica estrutura-se como uma ferramenta interativa e educativa voltada para o ensino da Mecânica Quântica. A dinâmica do jogo é dividida em etapas que promovem o aprendizado colaborativo e lúdico. Durante as discussões teóricas sobre os marcos históricos dessa área da Física, as equipes interagem com a roleta ao responder perguntas e avançam conforme suas respostas. A roleta é projetada para conter 12 seções, cada uma representando um marco histórico relevante da Física Quântica, Figura 18.

Figura 18 – Representação gráfica da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica.



Fonte: Autoria própria, 2025.

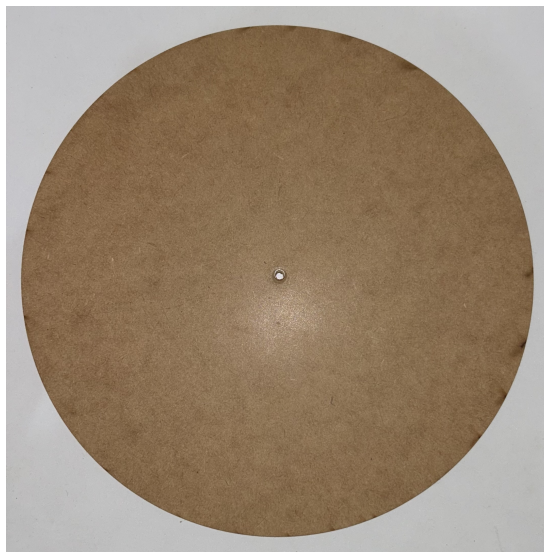
3.2.2 Materiais

Os materiais selecionados para a construção da roleta aliam funcionalidade, durabilidade e acessibilidade. São eles:

- **Placa de MDF:** utilizada para a base circular com dimensões de 30x30 cm e espessura de 6 mm (Figura 19).
- **Papel adesivo vinil:** aplicado na base da roleta para identificar as seções e também na tampa da caixa.
- **PVC:** material empregado na produção dos ponteiros.
- **Tinta:** utilizada para a pintura dos ponteiros.

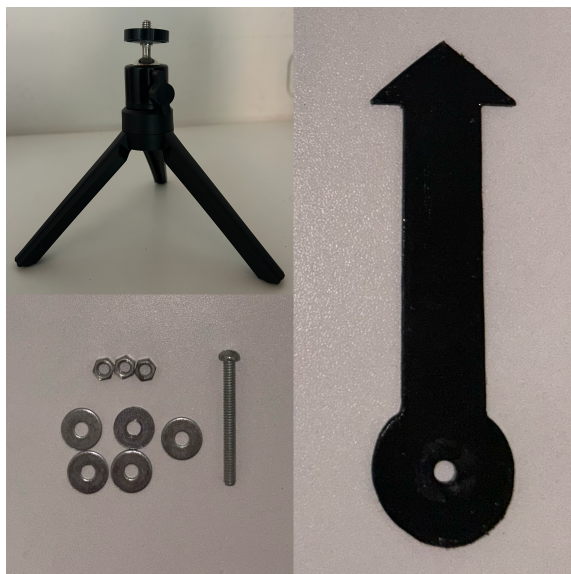
- **Parafuso, arruelas e porcas:** necessários para o eixo central da roleta, assegurando um giro eficiente (Figura 20).
- **Tripé:** utilizado como suporte da roleta.
- **Papel AP 240g:** utilizado para a impressão das cartas e dos regulamentos.
- **Caixa de MDF:** com dimensões de 34x34x8 cm, utilizada para armazenar a roleta, as cartas e outros componentes do jogo.

Figura 19 – Base base circular da roleta, confeccionada com placa de MDF nas dimensões de 30x30 cm e espessura de 6 mm.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 20 – Componentes estruturais: tripé, parafuso, arruelas, porcas e ponteiros em PVC.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.2.3 Montagem da roleta

A Roleta do Tempo da Mecânica Quântica é composta por um disco circular dividido em 12 seções coloridas, cada uma representando um marco histórico da Mecânica Quântica e acompanhada por um quiz com perguntas de diferentes níveis de dificuldade. Seu eixo central possui um rolamento que garante o giro preciso dos ponteiros. A etapa final da construção envolve a integração de todos os componentes, garantindo que a estrutura seja funcional e estável, incluindo a aplicação do adesivo, a instalação do eixo e dos ponteiros, além da fixação no tripé de suporte. Testes são realizados para assegurar sua estabilidade e funcionamento adequado, tornando-a pronta para uso educacional.

Os passos dessa montagem são:

1. Aplicação do adesivo vinil: o adesivo é cuidadosamente aplicado na base de MDF, garantindo divisões precisas e visíveis, o que facilita a leitura pelos participantes.
2. Instalação do eixo central e dos ponteiros: o eixo central é fixado ao disco com parafusos, arruelas e porcas. Os ponteiros são integrados ao eixo central, assegurando estabilidade e movimentação eficiente.
3. Fixação da roleta no tripé: após a instalação dos ponteiros, a roleta é fixada ao tripé de suporte, que é ajustado para garantir nivelamento e estabilidade.
4. Testes finais: são realizados testes para verificar a estabilidade da base, o giro dos ponteiros e o funcionamento geral da roleta. Ajustes são feitos, se necessário.

Figura 21 – Modelo final da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica.



Fonte: Autoria própria, 2025.

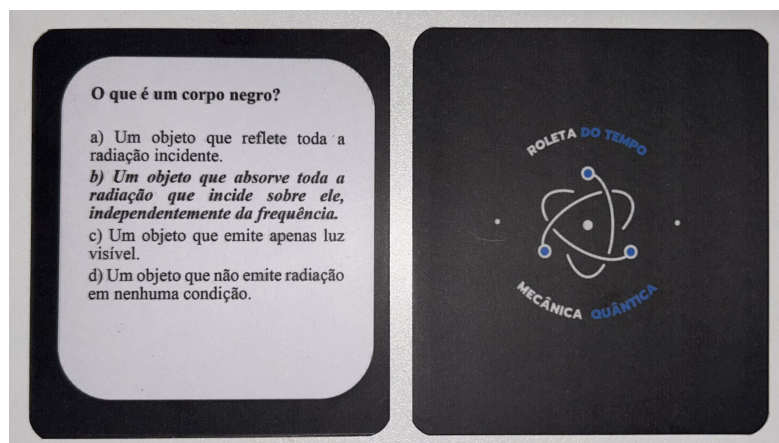
A Figura 21 ilustra a montagem final, que visa assegurar que todos os componentes da roleta, incluindo o eixo central e os ponteiros, estejam corretamente integrados e funcionem de maneira eficaz, garantindo sua durabilidade e eficiência como ferramenta pedagógica.

3.2.4 Sistema de ponteiros, perguntas e penalidade

Os ponteiros desempenham um papel essencial na identificação do progresso das equipes durante o jogo. Cada ponteiro é associado a uma equipe e contém uma denominação, permitindo que os jogadores acompanhem o desempenho em tempo real. Fabricados em PVC, os ponteiros movem-se conforme o desempenho das equipes: avançam quando as respostas estão corretas, retrocedem ou fazem a equipe perder a vez quando as respostas estão incorretas. Essas penalidades promovem equilíbrio na competição, incentivando maior atenção ao conteúdo abordado.

As perguntas, organizadas por meio de cartas de múltipla escolha, abrangem marcos históricos da Mecânica Quântica, como ilustrados na Figura 22. Cada seção da roleta possui cartas com perguntas relacionadas ao marco correspondente. As equipes que acertam suas respostas avançam uma seção na roleta, enquanto aquelas que erram enfrentam penalidades específicas: nas seções 2h, 5h, 8h e 11h, retrocedem uma casa; em outras seções, perdem a vez. Esse sistema de perguntas e penalidades reforça a mecânica do jogo, equilibrando a competição e tornando o aprendizado mais dinâmico e envolvente.

Figura 22 – Exemplo de carta de múltipla escolha.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.2.5 Funcionamento e dinâmica pedagógica

A roleta conta com quatro ponteiros, um para cada equipe, e a dinâmica do jogo consiste em equipes que giram o ponteiro correspondente ao seu grupo, respondendo perguntas sobre marcos históricos da Mecânica Quântica. Cada acerto permite o avanço para o próximo marco, enquanto um erro penaliza com retrocesso ou perda de vez, conforme detalhado no regulamento

do jogo (Apêndice A). A equipe vencedora será a primeira a completar uma volta inteira na roleta.

A roleta foi planejada para ser uma ferramenta pedagógica que alia interatividade e ludicidade, estimulando os alunos a aprender de maneira colaborativa e engajante. Durante o jogo, as equipes são incentivadas a refletir sobre os conceitos históricos e teóricos da Mecânica Quântica enquanto competem para avançar.

O professor tem um papel central, ajustando a complexidade das perguntas de acordo com o nível de conhecimento da turma. Para alunos mais avançados, as questões podem incluir deduções matemáticas ou análises críticas de fenômenos quânticos, enquanto para turmas iniciais o foco é a compreensão dos marcos históricos.

Além disso, a roleta promove habilidades transversais como trabalho em equipe, respeito ao tempo de resposta e organização para resolver problemas. O professor pode integrar o uso da roleta com outras atividades pedagógicas, como debates, resumos escritos ou apresentações orais, ampliando as formas de aprendizado.

3.2.6 Avaliação e Resultados Esperados

A aplicação da roleta será avaliada por meio de observação direta, análise do engajamento dos alunos e feedbacks observados. Espera-se que a atividade contribua para:

- Maior compreensão dos conceitos fundamentais da Mecânica Quântica.
- Desenvolvimento de habilidades de trabalho em equipe.
- Valorização do aprendizado histórico e teórico.

Além disso, será importante avaliar como a roleta facilita a interação dos alunos com os conceitos, estimulando o pensamento crítico e a construção de uma visão integradora sobre a história e o impacto da Mecânica Quântica. O objetivo é observar não só a retenção de conteúdo, mas também a capacidade dos alunos de aplicá-lo em contextos práticos e teóricos.

4 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DO PRODUTO

Nesta seção, detalham-se as etapas de aplicação da “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica”, com foco em sua execução no ambiente educacional. Inicialmente, apresentam-se as instruções iniciais, que orientam os participantes quanto às regras e à estrutura do jogo. Em seguida, descreve-se a dinâmica das rodadas, abordando o funcionamento das perguntas e a movimentação dos ponteiros. Além disso, a seção apresenta a avaliação da eficácia da ferramenta lúdica como estratégia de ensino. Por fim, identificam-se possíveis limitações e sugerem-se melhorias para otimizar a experiência pedagógica.

4.1 EXECUÇÃO DO JOGO: INSTRUÇÕES INICIAIS

Antes da dinâmica do jogo, a roleta foi cuidadosamente montada, representando os marcos históricos da Mecânica Quântica. Cada seção recebeu a marcação de uma contribuição significativa de cientistas como Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg e Schrödinger. Além disso, cartas foram preparadas e organizadas por marcos históricos, contendo perguntas relacionadas a cada tema, conforme ilustrado na Figura 23. O uso dessas cartas permitiu que cada aluno se aprofundasse em diferentes aspectos da história da Mecânica Quântica durante as rodadas.

Figura 23 – Roleta montada para a aplicação do jogo.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A dinâmica teve início com uma breve apresentação sobre o funcionamento do jogo. O regulamento foi explicado, destacando os quatro ponteiros nomeados, que representavam as equipes, e a roleta, dividida em seções sobre marcos históricos importantes da Mecânica Quântica. Antes do início da atividade, os grupos foram formados de maneira aleatória, considerando a afinidade entre os alunos, com o intuito de promover maior cooperação. Dessa forma, três equipes ficaram com quatro participantes, enquanto uma equipe ficou com cinco. Ao todo, 17 alunos participaram da dinâmica. Cada grupo elegeu um líder, responsável por tomar decisões estratégicas e coordenar a equipe.

O regulamento do jogo, apresentado no Apêndice A, foi entregue a cada equipe para que todos tivessem ciência das regras e das penalidades para respostas incorretas, Figura 24. Para determinar qual equipe iniciaria a primeira rodada, os líderes participaram de uma disputa de “zerinho ou um”. O grupo vencedor obteve a vantagem de escolher a primeira pergunta da rodada, introduzindo um elemento estratégico ao jogo. Além disso, cada líder selecionou o ponteiro correspondente à sua equipe na roleta.

Figura 24 – Alunos lendo o regulamento do jogo antes do início da execução.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2 EXECUÇÃO DO JOGO: RODADAS

Após a definição das informações iniciais, a primeira rodada teve início com a seleção da pergunta, conforme as seções da roleta, e a participação da equipe na dinâmica interativa, conforme a Figura 25. A equipe Bohr, vencedora da disputa de “zerinho ou um” escolheu uma pergunta da seção 0h (corpo negro), ponto de partida do jogo. A pergunta foi apresentada simultaneamente, e cada equipe teve 1 minuto e 20 segundos para respondê-la.

Figura 25 – Execução do jogo: equipe Bohr participando da dinâmica do jogo.



Fonte: Autoria própria, 2025.

O jogo “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” teve um início empolgante, com todas as equipes competindo para avançar pelos marcos históricos da Teoria Quântica. Na primeira rodada, as equipes estavam nervosas, mas prontas para enfrentar as perguntas desafiadoras do mediador. As respostas foram rápidas, e as equipes começaram a se posicionar nas seções da roleta.

À medida que o jogo avançava, algumas equipes começaram a se destacar, avançando rapidamente, enquanto outras enfrentavam mais dificuldades. Esse movimento gradual fez com que as seções da roleta se tornassem um reflexo direto do conhecimento e das estratégias adotadas por cada equipe. No início da terceira rodada, o cenário estava configurado da seguinte maneira:

- Equipes Planck e Dirac: seção 1h (Lei de Planck).
- Equipes Schrödinger e Bohr: seção 2h (Efeito Fotoelétrico).

Como mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Configuração dos ponteiros da roleta no início da terceira rodada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A rodada teve início com as equipes Schrödinger e Bohr, que responderam a uma pergunta sobre o Efeito Fotoelétrico. O mediador, responsável por conduzir o jogo, leu a seguinte questão para as equipes:

“ O que é o Efeito Fotoelétrico? ”

E apresentou as seguintes opções de resposta:

- a) A absorção de luz por um átomo.
- b) A mudança de frequência da luz ao atravessar um prisma.
- c) A criação de prótons por incidência de luz.
- d) A emissão de elétrons por um material ao absorver luz.

O mediador acionou o cronômetro, dando 1 minuto e 20 segundos para as equipes responderem. As equipes Schrödinger e Bohr, ambas com boa compreensão do tema, escolheram corretamente a alternativa “d”, explicando que o efeito fotoelétrico ocorre quando a luz incide sobre um material, fazendo com que elétrons sejam liberados. Com isso, as equipes avançaram para a seção 3h (Modelo de Rutherford), continuando sua jornada na roleta.

Em seguida, as equipes Planck e Dirac enfrentaram uma questão sobre a Lei de Planck, que trata da relação entre a radiação de corpo negro e a quantização da energia, um conceito fundamental na Mecânica Quântica introduzido por Max Planck. A pergunta feita foi:

“ O que a Lei de Planck descreve? ”

E apresentou as seguintes opções de resposta:

- a) O comportamento de partículas subatômicas.
- b) A distribuição de energia emitida por um corpo negro em função da frequência.
- c) A interação entre a gravidade e a luz.
- d) A velocidade da luz em diferentes meios.

Após 1 minuto e 20 segundos de discussão, as equipes acertaram a questão, escolhendo a alternativa “b”, que é a resposta correta. A Lei de Planck descreve a distribuição de energia emitida por um corpo negro em função da frequência da radiação. Como resultado, a equipe avançou para a seção 2h (Efeito Fotoelétrico).

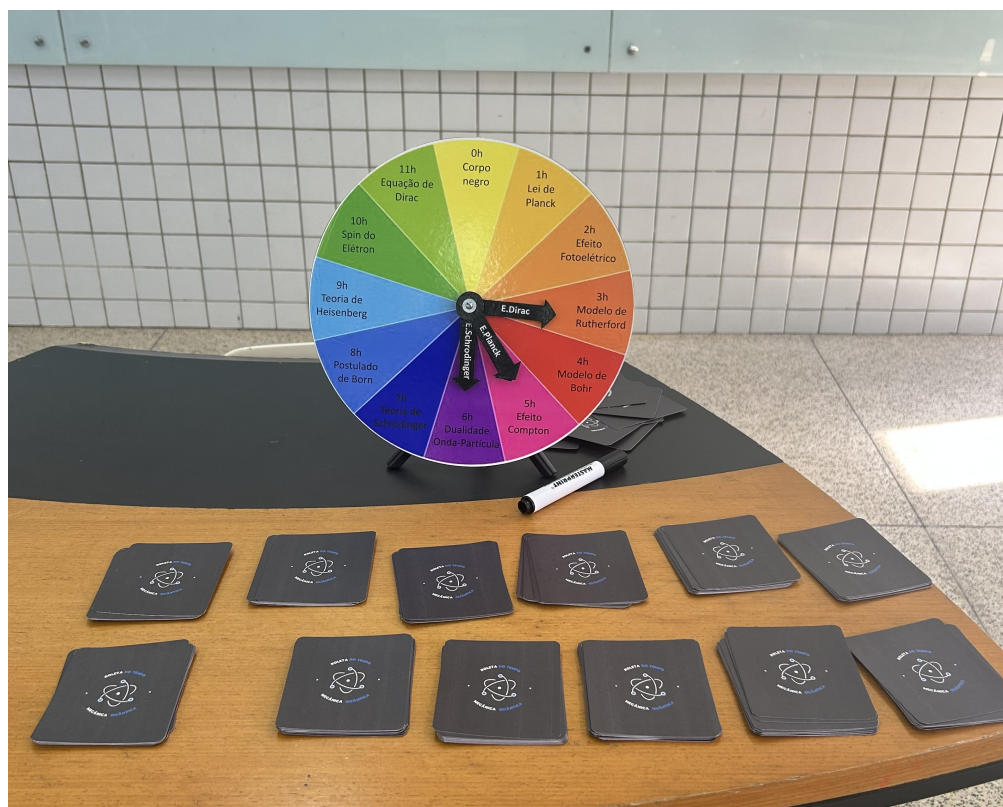
As equipes Schrödinger e Bohr demonstraram maior cautela nessa rodada, cientes de que um erro nessa etapa resultaria em uma penalidade, obrigando-as a retornar uma posição. Esse fator intensificou a tensão entre os participantes, que passaram a revisar detalhadamente suas respostas antes de tomar qualquer decisão.

Antes do início da sétima rodada, o jogo “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” já havia se intensificado, com as equipes cada vez mais focadas em suas respostas e estratégias. As questões estavam mais desafiadoras, e cada rodada chamava ainda mais a atenção dos participantes, que precisavam estar atentos não apenas ao conteúdo, mas também à dinâmica do jogo. A configuração da sétima rodada era a seguinte:

- Equipe Schrödinger: seção 6h (Dualidade Onda-Partícula).
- Equipes Planck e Bohr: seção 5h (Efeito Compton).
- Equipe Dirac: seção 3h (Modelo de Rutherford).

Como mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Configuração dos ponteiros da roleta no início sétima rodada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A primeira pergunta da rodada foi direcionada à equipe Schrödinger, que estava na seção de Dualidade Onda-Partícula. A dualidade é um dos pilares da Mecânica Quântica e descreve como partículas subatômicas, como elétrons, podem exibir características tanto de partículas quanto de ondas. Nessa rodada, a pergunta feita foi:

“ O que significa a constante h na equação de De Broglie? ”

E apresentou as seguintes opções de resposta:

- a) Velocidade da luz.
- b) Energia potencial.
- c) Constante de Planck.
- d) Fator de proporcionalidade.

A equipe forneceu a resposta correta, que foi a alternativa “c” e avançou para a seção 7h (Teoria de Schrödinger).

Em seguida, as equipes Planck e Bohr enfrentaram uma questão sobre o Efeito Compton, um fenômeno quântico que ocorre quando fótons de luz interagem com elétrons. Esse efeito foi um dos experimentos que comprovaram a quantização da luz, mostrando que os fótons possuem propriedades tanto de partículas quanto de ondas. A pergunta feita nessa rodada foi:

“ Qual foi a importância do Efeito Compton para a Física Quântica? ”

E apresentou as seguintes opções de resposta:

- a) Confirmou a teoria da relatividade restrita.
- b) Desafiou o modelo atômico de Rutherford.
- c) Introduziu a teoria das cordas.
- d) Proporcionou uma confirmação experimental da natureza quântica da luz.

Após uma breve discussão, a equipe acertou ao escolher a alternativa “d” e avançou para a seção 6h (Dualidade Onda-Partícula).

Por fim, a equipe Dirac foi desafiada com uma pergunta sobre o modelo atômico de Rutherford. O experimento de dispersão de partículas alfa realizado por Ernest Rutherford levou à descoberta do núcleo atômico, revolucionando o entendimento sobre a estrutura do átomo. A pergunta feita nessa rodada foi:

“ Qual experimento levou Rutherford a propor seu modelo atômico? ”

E apresentou as seguintes opções de resposta:

- a) Experimento da dupla fenda.
- b) Experimento da gota de óleo.
- c) Experimento do tubo de raios catódicos.
- d) Experimento de dispersão de partículas alfa.

Com a resposta correta “d”, a equipe avançou para a seção 4h (Modelo de Bohr).

A rodada manteve um clima competitivo, uma vez que as equipes estavam cada vez mais próximas do objetivo final. Além disso, a complexidade crescente das questões exigia maior atenção e estratégia por parte dos participantes.

Na última rodada da competição, as equipes estavam cada vez mais próximas da vitória. A roleta havia levado as equipes para seções mais avançadas do jogo, com perguntas desafiadoras sobre conceitos fundamentais da Mecânica Quântica. Cada rodada exigia não só conhecimento profundo, mas também estratégia. A décima segunda rodada foi decisiva, com a equipe Schrödinger prestes a conquistar a vitória, dependendo de sua resposta. Nessa rodada, os ponteiros estavam configurados da seguinte maneira:

- Equipe Schrödinger: seção 11h (Equação de Dirac).
- Equipe Bohr: seção 10h (Spin do Elétron).

- Equipe Planck: seção 9h (Teoria de Heisenberg).
- Equipe Dirac: seção 7h (Teoria de Schrödinger).

Como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Configuração dos ponteiros da roleta no início da décima segunda rodada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Nesta rodada, a equipe Schrödinger respondeu primeiro, pois já estava na seção 11h (Equação de Dirac). A pergunta foi direcionada exclusivamente a ela. Se acertasse, avançaria diretamente para a vitória, caso errasse, a equipe Bohr teria a chance de empatar, tornando a disputa ainda mais acirrada. A pergunta da rodada foi:

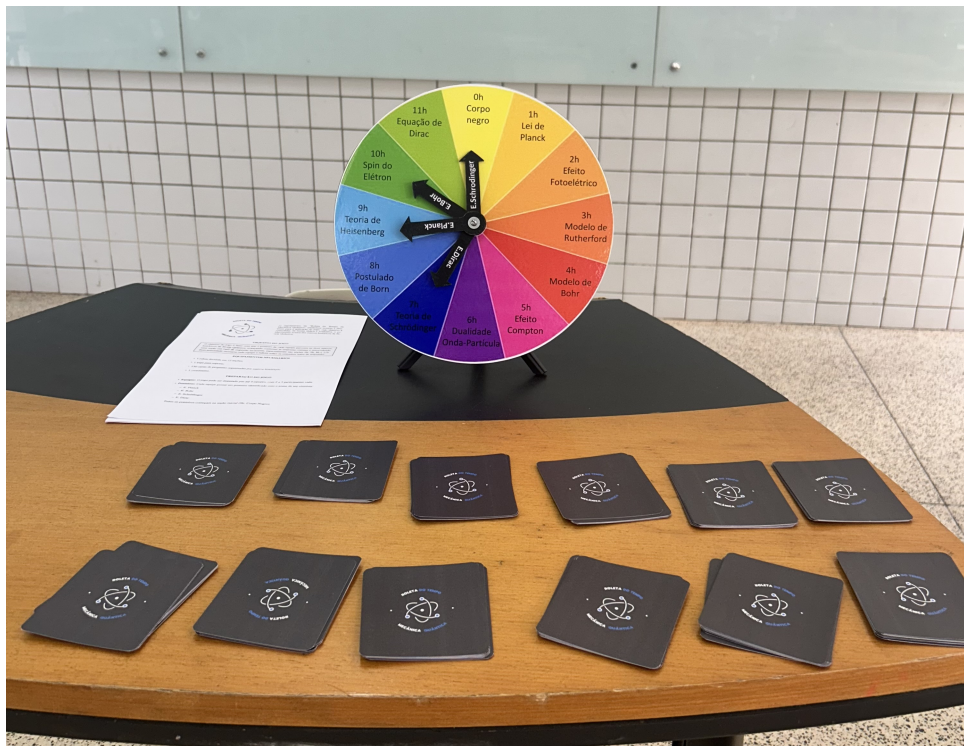
“ Qual fenômeno quântico a equação de Dirac ajuda a explicar? ”

E apresentou as seguintes opções de resposta:

- Efeito túnel.
- Spin intrínseco das partículas.
- Efeito fotoelétrico.
- Radiação de corpo negro.

Com a resposta correta “b”, a equipe Schrödinger avançou à vitória, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Configuração dos ponteiros da roleta após a ultima rodada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Ao final da última rodada, a roleta foi ajustada, e a equipe consagrou-se campeã ao alcançar a posição 0h, enquanto as outras equipes, apesar do bom desempenho, não conseguiram o mesmo avanço.

4.3 AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA FERRAMENTA LÚDICA

Após a conclusão da última rodada e a vitória da equipe Schrödinger, foi realizada uma avaliação da dinâmica do jogo e do impacto da “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” no aprendizado dos alunos. A análise da aplicação do produto educacional teve como objetivo mensurar sua eficácia no processo de ensino-aprendizagem. A avaliação considerou não apenas a compreensão dos conceitos de Mecânica Quântica, mas também a interação dos alunos com a proposta lúdica do jogo.

A eficácia da ferramenta foi avaliada com base na participação dos alunos, na qualidade das respostas e no envolvimento durante o jogo. A análise mostrou que a roleta engajou os estudantes e facilitou a compreensão dos conceitos de Mecânica Quântica. Além disso, a competição saudável entre as equipes contribuiu para um aprendizado dinâmico, estimulando a colaboração, a estratégia e o pensamento crítico. A implementação da ferramenta foi bem-sucedida, pois estimulou o aprendizado ativo e uma abordagem interativa no ensino de Física.

4.4 LIMITAÇÕES E MELHORIAS FUTURAS

Embora a “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” tenha se mostrado uma ferramenta promissora para o ensino da Mecânica Quântica, algumas limitações foram identificadas após sua aplicação. Destacam-se, entre elas, a dificuldade de adaptação do jogo a turmas com níveis de conhecimento heterogêneos, o tempo necessário para a preparação da atividade e a dependência de uma mediação eficaz por parte do professor. Com base nessas observações, algumas melhorias futuras podem ser propostas:

- Inclusão de perguntas com maior diversidade temática e níveis de dificuldade adaptáveis, permitindo ajustes conforme o perfil dos alunos.
- Treinamento prévio para os professores, para que possam entender a dinâmica do jogo e saibam como aplicá-lo de maneira eficaz nas aulas.
- Ampliação da aplicação da roleta para outros tópicos da física, possibilitando sua utilização em diferentes áreas do conhecimento.
- Desenvolvimento de uma versão digital, aumentando seu alcance e facilitando sua utilização em ambientes presenciais e virtuais

A implementação dessas melhorias poderá ampliar ainda mais o potencial pedagógico da Roleta do Tempo da Mecânica Quântica, tornando-a uma ferramenta mais flexível e amplamente aplicável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise histórica e lúdica, juntamente com a construção e a aplicação do produto educacional, refletem um esforço significativo para tornar o ensino da Mecânica Quântica mais acessível, dinâmico e interativo. Ao integrar uma abordagem dos marcos históricos da Teoria Quântica, o produto não apenas apresenta conceitos técnicos, mas também os contextualiza dentro do desenvolvimento científico e histórico. Dessa forma, permite que os alunos compreendam a evolução da teoria e reconheçam como as ideias de cientistas como Planck, Einstein e Schrödinger se desenvolveram ao longo do tempo.

A abordagem lúdica da “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” incentiva o envolvimento ativo dos alunos, indo além da instrução teórica ao oferecer um ambiente interativo para a aplicação prática e colaborativa do conhecimento. A competição saudável entre as equipes e o raciocínio estratégico na resolução das questões sobre os marcos históricos da Mecânica Quântica favorecem o aprendizado ativo. Além disso, a ludicidade do jogo motiva os alunos a se aprofundarem nos conteúdos, compreendendo e aplicando as informações de maneira mais significativa.

A construção do produto baseia-se em uma análise criteriosa dos marcos históricos da área, e a criação de perguntas diversificadas e bem estruturadas contribui para o desenvolvimento de um material educacional que, além de engajar, auxilia na consolidação da aprendizagem. A interatividade e a diversão proporcionadas pelo jogo complementam as aulas tradicionais, permitindo que os alunos se envolvam ativamente com o conteúdo e reforcem o conhecimento adquirido de forma dinâmica.

A avaliação em sala de aula foi essencial para mensurar, de forma qualitativa, o impacto do produto no aprendizado. Os resultados indicam que o jogo envolveu os estudantes, estimulou a participação ativa e facilitou a compreensão da Mecânica Quântica. A competição e a interação favoreceram o aprendizado colaborativo, enquanto a abordagem lúdica consolidou o conhecimento de forma eficaz. Além de assimilarem melhor os conceitos, os alunos conseguiram relacioná-los aos avanços científicos, tornando o aprendizado mais relevante.

Em suma, a análise histórica, a abordagem lúdica e a construção do produto educacional demonstram o potencial da “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” como uma ferramenta pedagógica eficaz. Além de facilitar a compreensão de conceitos complexos, o jogo torna o ensino da Física mais dinâmico, estimulando a colaboração, o pensamento crítico e a curiosidade dos alunos. Com aprimoramentos, o produto pode se tornar ainda mais acessível e aplicável a diferentes contextos educacionais, fortalecendo o ensino e incentivando a participação ativa de alunos e educadores.

REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P. **The Acquisition and Retention of Knowledge: A Cognitive View**. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- DIRAC, P. A. M. The quantum theory of the electron. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 117, n. 778, p. 610–624, 1928.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979.
- FOGAÇA, J. R. V. **O princípio da incerteza de Heisenberg**. 2024. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/quimica/o-principio-incerteza-heisenberg.htm>> Acesso em: 19 ago. 2024.
- GOMES, G. G.; PIETROCOLA, M. O experimento de stern-gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, p. 2604, 2011.
- GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, p. 444–457, 2001.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Óptica E Física Moderna**. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2016. v. 4.
- HEISENBERG, W. Über quantentheoretische umdeutung kinematischer und mechanischer beziehungen. **Zeitschrift für Physik**, v. 33, n. 1, p. 879–893, 1925.
- LIMA, A. L. L. **Átomo**. 2024. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/atomo.htm>>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- MACHADO, S. D. S. L.; CRUZ, F. D. F. D. S. A teoria quântica e a apropriação do conhecimento científico: o uso da história e filosofia da ciência pelos misticismos. In: **Anais Eletrônicos do 15º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia**. Florianópolis, SC: Sociedade Brasileira de História da Ciência, 2016.
- MAIA, N. B. **O caminho para a Física Quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009.
- MARTINS, R. D. A. O surgimento da mecânica quântica—uma ou duas teorias? In: **Ensaio sobre História e Filosofia das Ciências I**. Extrema: Quamcumque Editum, 2021. p. 43–123.
- MARTINS, R. D. A.; ROSA, P. S. **História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.
- MELO, P. R. **Efeito Compton**. 2024. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/efeito-compton.htm.l/>>. Acesso em: 02 set. 2024.
- NOBEL. **Ernest Rutherford - Biographical**. 1908. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1908/rutherford/>>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- NOBEL. **Max Planck – Biographical**. 1918. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/planck/biographical/>>. Acesso em: 18 dez. 2024.

NOBEL. **Albert Einstein – Biographical**. 1921. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/biographical/>>. Acesso em: 18 dez. 2024.

NOBEL. **Niels Bohr - Biographical**. 1922. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/bohr/biographical/>>. Acesso em: 21 dez. 2024.

NOBEL. **Arthur Holly Compton - Biographical**. 1927. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/compton/biographical/>>. Acesso em: 22 dez. 2024.

NOBEL. **Louis de Broglie - Biographical**. 1929. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1929/broglie/biographical/>>. Acesso em: 22 dez. 2024.

NOBEL. **Werner Heisenberg – Biographical**. 1932. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1932/heisenberg/biographical/>>. Acesso em: 23 dez. 2024.

NOBEL. **Erwin Schrödinger – Biographical**. 1933. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/schrodinger/biographical/>>. Acesso em: 22 dez. 2024.

NOBEL. **Paul Dirac – Biographical**. 1933. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/dirac/biographical/>>. Acesso em: 23 dez. 2024.

NOBEL. **Wolfgang Pauli – Biographical**. 1945. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1945/pauli/biographical/>>. Acesso em: 23 dez. 2024.

NOBEL. **Max Born – Biographical**. 1954. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1954/born/biographical/>>. Acesso em: 23 dez. 2024.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica**. São Paulo: Editora Blucher, 2014. v. 4.

PEREIRA, R. F.; FUSINATO, P. A.; NEVES, M. C. D. Desenvolvendo um jogo de tabuleiro para o ensino de física. **Anais do VII ENPEC**, p. 1–12, 2009.

PLANCK, M. Ueber das gesetz der verteilung der energie im normalspectrum. **Annalen der Physik**, v. 4, n. 553, p. 553–563, 1900.

REIS, J. S. D.; SILVA, V. C.; SANTOS, A. S. Jogo “cara a cara com os cientistas”: um recurso didático para o ensino de física moderna. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 2, n. 2, p. 873–885, 2020.

SCHRODINGER, E. Quantisierung als eigenwertproblem. **Annalen der Physik**, v. 79, n. 4, p. 361–376, 1926.

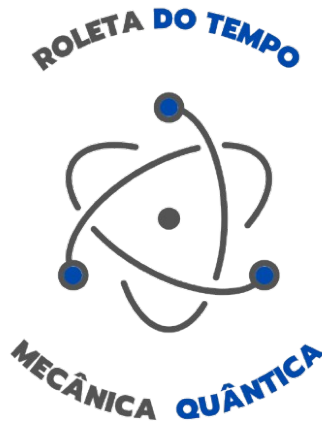
SOUZA, M. A. M.; DANTAS, J. D. Fenomenologia nuclear: uma proposta conceitual para o ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 136–158, abr 2010.

SOUZA, M. A. M. *et al.* Drawing science: An interdisciplinary, playful, and inclusive proposal. **REPPE - Revista de Produtos Educacionais e Pesquisas em Ensino**, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Cornélio Procópio (PR), v. 7, n. 2, p. 54–75, 2023.

SOUZA, M. A. M. *et al.* Jogo de física de partículas: Descobrimos o bóson de higgs. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 2, 2019.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física moderna**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

APÊNDICE A – REGULAMENTO - ROLETA DO TEMPO DA MECÂNICA QUÂNTICA



O regulamento da “Roleta do Tempo da Mecânica Quântica” estabelece normas e diretrizes para a aplicação do jogo, cujo objetivo é consolidar, de forma lúdica e avaliativa, o conhecimento sobre os marcos históricos da Teoria Quântica.

OBJETIVO DO JOGO

O objetivo do jogo é fazer com que o ponteiro de cada equipe percorra os 12 marcos históricos da Teoria Quântica, avançando conforme as respostas corretas e retrocedendo uma seção em caso de respostas incorretas, especialmente nas seções 2h, 5h, 8h e 11h. Essa penalidade incentiva cada equipe a refletir sobre os conceitos antes de responder.

EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

- 1 roleta dividida em 12 seções;
- 1 tripé para suporte;
- 150 cartas de perguntas organizadas por marcos históricos;
- 1 cronômetro.

PREPARAÇÃO DO JOGO

- **Equipes:** o jogo pode ser disputado por até 4 equipes, com 2 a 5 participantes cada.
- **Ponteiros:** cada equipe possui um ponteiro identificado com o nome de um cientista:
 - E. Planck
 - E. Bohr
 - E. Schrödinger
 - E. Dirac

Todos os ponteiros começam na seção inicial (0h: Corpo Negro).

COMO JOGAR

- **Sorteio de ordem:** a ordem de jogo é definida por sorteio inicial.
- **Rodada de perguntas:**
 - Na primeira rodada, todas as equipes respondem à mesma pergunta.
 - A partir da segunda rodada, cada equipe responde a uma pergunta referente ao marco histórico em que seu ponteiro se encontra.
- **Movimentação dos ponteiros:**
 - Resposta correta: o ponteiro avança para a próxima seção da roleta.
 - Resposta incorreta: o ponteiro permanece na mesma posição e a equipe perde a vez.

PENALIDADE

- **Seções com penalidade:** se uma equipe errar a resposta nas seções 2h, 5h, 8h ou 11h, ela será penalizada e terá que retornar à seção anterior.
- **Motivo das penalidades:** essas seções representam marcos fundamentais na Teoria Quântica, incentivando maior reflexão antes de responder.

TEMPO DE RESPOSTA

- **Limite de tempo:** cada equipe dispõe de até 1 minuto e 20 segundos para responder à pergunta. Caso ultrapasse esse tempo, a resposta será automaticamente considerada incorreta.

EXEMPLO DA PRIMEIRA RODADA

- Todas as equipes começam na seção 0h (Corpo Negro).
- O mediador faz uma pergunta sobre o Corpo Negro, e a cada resposta:
 - Correta: o ponteiro da equipe avança para a próxima seção (1h: Lei de Planck).
 - Incorreta: o ponteiro não se move, e a equipe perde a vez.

CRITÉRIOS DE VITÓRIA

Vencedor: a equipe que percorrer todas as 12 seções da roleta primeiro.

Desempate: se mais de uma equipe alcançar a última seção na mesma rodada, uma pergunta extra será feita. A equipe que responder corretamente primeiro será declarada vencedora.

APÊNDICE B – PERGUNTAS DAS CARTAS

1. O que é um corpo negro?
 - a) Um objeto que reflete toda a radiação incidente.
 - b) **Um objeto que absorve toda a radiação que incide sobre ele, independentemente da frequência.**
 - c) Um objeto que emite apenas luz visível.
 - d) Um objeto que não emite radiação em nenhuma condição.
2. Quem foi o físico que resolveu o problema da radiação do corpo negro?
 - a) Albert Einstein.
 - b) James Clerk Maxwell.
 - c) **Max Planck.**
 - d) Niels Bohr.
3. O que é a radiação de corpo negro?
 - a) **Radiação emitida por um corpo que absorve toda a radiação incidente.**
 - b) Radiação emitida por um corpo em movimento.
 - c) Radiação emitida por um corpo que reflete toda a luz.
 - d) Radiação emitida apenas no espectro visível.
4. Qual é o papel da radiação de corpo negro na teoria quântica?
 - a) Explica o comportamento das partículas em movimento.
 - b) Estabeleceu a teoria da relatividade.
 - c) Definiu as propriedades do núcleo atômico.
 - d) **Permitiu o desenvolvimento do conceito de quantização da energia.**
5. O que é a Lei de Wien?
 - a) Relaciona a energia de radiação com a frequência.
 - b) **Determina o comprimento de onda em que a radiação de corpo negro é máxima para cada temperatura.**
 - c) Descreve o espectro de radiação ultravioleta.
 - d) Descreve a forma de uma onda eletromagnética.
6. Como a radiação de corpo negro foi usada para o desenvolvimento do conceito de quantização de energia?

- a) Ela ajudou a definir a velocidade da luz.
 - b) Ela explicou a estrutura do átomo.
 - c) **Ela levou à ideia de que a energia é emitida em pacotes discretos.**
 - d) Ela descreveu o movimento das partículas.
7. O que é a “catástrofe do ultravioleta”?
- a) O aumento inesperado da energia total nas baixas frequências.
 - b) O desvio da radiação para o infravermelho.
 - c) A absorção completa de radiação em altas frequências.
 - d) **A previsão incorreta de energia infinita em altas frequências.**
8. Por que um corpo negro ideal absorve toda a radiação incidente?
- a) **Porque não reflete nenhuma radiação.**
 - b) Porque tem uma superfície metálica.
 - c) Porque é feito de material. supercondutor.
 - d) Porque é uma fonte de radiação infravermelha.
9. Por que o modelo de Rayleigh-Jeans falhou ao explicar a radiação de corpo negro em altas frequências?
- a) Porque descrevia apenas baixas frequências.
 - b) Porque utilizava a teoria da relatividade.
 - c) **Porque previa valores infinitos de energia para altas frequências.**
 - d) Porque não incluía a velocidade da luz na fórmula.
10. Como a radiação de corpo negro é observada na natureza?
- a) Nos reflexos dos metais.
 - b) Na terra.
 - c) Nos objetos translúcidos.
 - d) **Em estrelas e corpos aquecidos.**
11. A Lei de Planck foi fundamental para o desenvolvimento de qual teoria?
- a) Teoria da relatividade.
 - b) Eletromagnetismo.
 - c) **Mecânica Quântica.**

d) Física Clássica.

12. O que a Lei de Planck descreve?

- a) O comportamento de partículas subatômicas.
- b) **A distribuição de energia emitida por um corpo negro em função da frequência.**
- c) A interação entre a gravidade e a luz.
- d) A velocidade da luz em diferentes meios.

13. Qual teoria anterior ao trabalho de Planck falhou ao descrever a radiação do corpo negro?

- a) **Lei de Rayleigh-Jeans.**
- b) Teoria da Relatividade Restrita.
- c) Teoria da Gravidade Universal.
- d) Teoria da Causalidade.

14. O que Max Planck propôs para resolver o problema da radiação do corpo negro?

- a) O efeito Compton.
- b) O efeito fotoelétrico.
- c) O princípio da incerteza.
- d) **A quantização da energia.**

15. O que diferencia a Lei de Planck da Lei de Rayleigh-Jeans?

- a) **A Lei de Planck é baseada na quantização da energia, enquanto a de Rayleigh-Jeans não.**
- b) A Lei de Planck só se aplica a altas frequências.
- c) A Lei de Rayleigh-Jeans prevê corretamente o espectro de radiação.
- d) A Lei de Rayleigh-Jeans foi desenvolvida antes da Lei de Wien.

16. Qual equação representa a Lei de Planck para a energia de um fóton?

- a) $E = mc^2$
- b) **$E = hf$**
- c) $E = kT$
- d) $E = pV$

17. Qual é o valor aproximado da constante de Planck?

- a) $9,8 \text{ m/s}^2$

- b) $3 \times 10 \text{ m/s}$
- c) $1,602 \times 10^1 \text{ C}$
- d) $6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

18. Por que a Lei de Planck foi revolucionária para a ciência?

- a) Descartou a necessidade de experimentos laboratoriais.
- b) Descreveu os átomos como indivisíveis.
- c) **Propôs que a energia não é contínua, mas quantizada.**
- d) Introduziu o modelo de universo em expansão.

19. O que ocorre com a energia de um fóton se sua frequência aumenta?

- a) Diminui.
- b) Permanece a mesma.
- c) Depende da temperatura.
- d) **Aumenta.**

20. O que é um “quantum” de energia segundo Planck?

- a) **A menor quantidade de energia que pode ser emitida ou absorvida.**
- b) Uma partícula de luz.
- c) A velocidade de um fóton.
- d) A constante de interação entre partículas.

21. O que é o efeito fotoelétrico?

- a) A absorção de luz por um átomo.
- b) A mudança de frequência da luz ao atravessar um prisma.
- c) A criação de prótons por incidência de luz.
- d) **A emissão de elétrons por um material ao absorver luz.**

22. Quem foi o responsável por explicar o efeito fotoelétrico e qual foi sua contribuição para a Teoria Quântica?

- a) Max Planck: por introduzir a ideia de quantização da energia.
- b) **Albert Einstein: por propor que a luz seja composta de quanta, chamados fótons.**
- c) Niels Bohr: por desenvolver o modelo atômico.
- d) Werner Heisenberg: por formular o princípio da incerteza.

23. Qual é a importância da função trabalho no efeito fotoelétrico?
- a) **Determina a frequência mínima necessária para a emissão de elétrons.**
 - b) Calcula a velocidade dos elétrons emitidos.
 - c) Define a intensidade da luz necessária para causar a emissão de elétrons.
 - d) Estima a quantidade total de luz absorvida pelo material.
24. Qual é o nome da partícula de luz associada ao efeito fotoelétrico?
- a) Nêutron.
 - b) Próton.
 - c) **Fóton.**
 - d) Íon.
25. O efeito fotoelétrico prova que a luz se comporta como:
- a) Uma onda.
 - b) **Uma partícula.**
 - c) Um campo magnético.
 - d) Uma linha reta.
26. Qual é a fórmula da energia cinética dos elétrons emitidos no efeito fotoelétrico?
- a) **$E = hf - \phi$**
 - b) $E = mc^2$
 - c) $E = hf + W$
 - d) $E = \frac{p^2}{2m}$
27. O que representa o termo ϕ na fórmula do efeito fotoelétrico?
- a) O número de fótons emitidos.
 - b) A velocidade dos elétrons.
 - c) A resistência elétrica.
 - d) **O trabalho ou energia mínima para liberar um elétron (função trabalho).**
28. Qual material costuma ser usado para estudos do efeito fotoelétrico?
- a) Alumínio.
 - b) Silício.
 - c) **Lítio.**

- d) Ouro.
29. O que ocorre se a frequência da luz é inferior à frequência de corte no efeito fotoelétrico?
- a) Elétrons são emitidos com energia menor.
 - b) **Nenhum elétron é emitido.**
 - c) A intensidade da luz aumenta.
 - d) A luz se torna visível.
30. Quem ganhou Prêmio Nobel pela explicação do efeito foto elétrico?
- a) Max Planck.
 - b) Isaac Newton.
 - c) **Albert Einstein.**
 - d) Marie Curie.
31. O modelo de Rutherford foi proposto em qual ano?
- a) **1911.**
 - b) 1897.
 - c) 1905.
 - d) 1920.
32. Quem desenvolveu o modelo atômico conhecido como "modelo nuclear"?
- a) Niels Bohr.
 - b) Albert Einstein.
 - c) **Ernest Rutherford.**
 - d) John Dalton.
33. Qual experimento levou Rutherford a propor seu modelo atômico?
- a) Experimento da dupla fenda.
 - b) Experimento da gota de óleo.
 - c) Experimento do tubo de raios catódicos.
 - d) **Experimento de dispersão de partículas alfa.**
34. No experimento de Rutherford, partículas alfa foram direcionadas para qual material?
- a) Folha de alumínio.
 - b) **Folha de ouro.**

- c) Folha de prata.
 - d) Folha de cobre.
35. De que maneira Hans Geiger e Ernest Marsden influenciaram o modelo de Rutherford?
- a) Desenvolveram a teoria da relatividade.
 - b) Introduziram a equação de Planck.
 - c) Criaram o modelo de nuvens eletrônicas.
 - d) **Conduziram o experimento de dispersão de partículas alfa, que resultou na descoberta do núcleo.**
36. Segundo o modelo de Rutherford, onde se encontra a maior parte da massa do átomo?
- a) Distribuída igualmente pelo átomo.
 - b) Na periferia do átomo.
 - c) **No núcleo.**
 - d) No espaço vazio entre os elétrons.
37. O núcleo do átomo, segundo Rutherford, possui qual carga elétrica?
- a) Neutra.
 - b) **Positiva.**
 - c) Negativa.
 - d) Variável.
38. Qual foi a principal limitação do modelo de Rutherford?
- a) **Não explicava a estabilidade dos elétrons em órbita ao redor do núcleo.**
 - b) Não explicava a existência do núcleo.
 - c) Não previa o espalhamento de partículas alfa.
 - d) Não incluía elétrons no modelo.
39. O que aconteceu com a maioria das partículas alfa no experimento de Rutherford?
- a) Foram completamente absorvidas pelo núcleo.
 - b) Voltaram ao ponto de origem.
 - c) **Passaram direto pela folha de ouro, sem desvio.**
 - d) Reagiram quimicamente com o material.
40. Qual a principal conclusão do experimento de Rutherford sobre a estrutura do átomo?

- a) O átomo é formado apenas por elétrons em movimento.
 - b) **O átomo possui um núcleo denso e positivo, com elétrons ao redor.**
 - c) O átomo é uma esfera sólida com carga positiva.
 - d) O átomo é formado apenas por quarks.
41. Em que ano Niels Bohr propôs seu modelo atômico?
- a) 1905.
 - b) **1913.**
 - c) 1925.
 - d) 1930
42. Qual é a principal diferença entre o modelo de Bohr e o modelo de Rutherford?
- a) **Bohr sugeriu que os elétrons giram em órbitas fixas com energias quantizadas.**
 - b) Bohr mostrou que os elétrons estão espalhados pelo átomo.
 - c) Rutherford acreditava que os elétrons estavam em órbitas estacionárias.
 - d) Rutherford não incluía um núcleo denso.
43. Qual foi a principal falha no modelo atômico de Rutherford, que mais tarde foi solucionado pelo modelo de Bohr?
- a) Não incluía o conceito de elétrons.
 - b) Não descrevia o núcleo do átomo.
 - c) **Não explicava a estabilidade dos elétrons em órbitas estacionárias.**
 - d) Falhava em explicar a presença de isótopos.
44. Como Bohr explicou a emissão e absorção de radiação em seu modelo atômico?
- a) Através da interação contínua entre elétrons e núcleos.
 - b) Pela colisão de elétrons com partículas subatômicas.
 - c) Pelo movimento aleatório dos elétrons em torno do núcleo.
 - d) **Pela transição dos elétrons entre órbitas quantizadas, emitindo ou absorvendo quanta de energia.**
45. O modelo de Bohr foi fundamental para a explicação da emissão de radiação devido ao conceito de:
- a) **Transições entre níveis de energia quantizados.**

- b) Partículas subatômicas em constante movimento.
 - c) Interações com o campo elétrico.
 - d) Ondas estacionárias.
46. O modelo de Bohr explicou corretamente os espectros de emissão de qual elemento?
- a) Oxigênio.
 - b) Hélio.
 - c) **Hidrogênio.**
 - d) Carbono.
47. Qual conceito foi introduzido por Bohr para explicar os níveis de energia discretos dos elétrons?
- a) Função de onda.
 - b) **Níveis de energia quantizados.**
 - c) Orbitais atômicos.
 - d) Dualidade da matéria.
48. Como Bohr resolveu o problema da estabilidade dos elétrons em órbitas?
- a) Atribuindo uma carga negativa aos elétrons.
 - b) Colocando os elétrons em órbitas circulares de forma contínua.
 - c) Propondo que os elétrons estão em constante aceleração.
 - d) **Propondo que os elétrons não emitem radiação enquanto estão em órbitas fixas.**
49. Quem propôs o modelo atômico que introduziu órbitas quantizadas para os elétrons?
- a) J.J. Thomson.
 - b) Albert Einstein.
 - c) **Niels Bohr.**
 - d) Ernest Rutherford
50. O modelo de Bohr foi importante para o desenvolvimento da Mecânica Quântica porque introduziu o conceito de:
- a) Elétrons como partículas ondulatórias.
 - b) **Energia quantizada em sistemas atômicos.**
 - c) Interferência de ondas estacionárias.
 - d) A existência de antipartículas.

51. Em que ano o efeito Compton foi descoberto?

- a) **1923.**
- b) 1905.
- c) 1911.
- d) 1930.

52. O que é o Efeito Compton?

- a) A mudança na frequência da luz quando ela passa por um prisma.
- b) A absorção de fótons por um material e a emissão de elétrons.
- c) **O fenômeno que demonstra a interação entre fótons e elétrons.**
- d) A emissão de luz por átomos excitados em um gás.

53. O efeito Compton ocorre quando:

- a) Elétrons são emitidos de um átomo devido à luz ultravioleta.
- b) **Raios X ou raios gama são espalhados por elétrons em repouso.**
- c) A luz visível é refletida em um espelho.
- d) Fótons se combinam para formar partículas.

54. O que acontece com a energia do fóton no efeito Compton?

- a) A energia é absorvida completamente pelo átomo.
- b) O fóton não perde energia e é refletido.
- c) O fóton aumenta sua energia durante o espalhamento.
- d) **A energia do fóton é transferida para o elétron, fazendo com que o fóton perca energia.**

55. Qual das seguintes partículas é envolvida no efeito Compton?

- a) Próton.
- b) **Elétron.**
- c) Nêutron.
- d) Neutrino.

56. O efeito Compton é uma demonstração experimental de que a luz pode se comportar como:

- a) Uma onda de matéria.
- b) Uma onda longitudinal.

- c) Uma onda estática.
 - d) **Uma partícula, em algumas situações.**
57. O efeito Compton confirmou a teoria de que a luz possui:
- a) Somente características de partículas.
 - b) Somente características de ondas.
 - c) **Características tanto de partículas quanto de ondas.**
 - d) Nenhuma das anteriores.
58. Qual é o nome da equação que descreve o efeito Compton?
- a) **Equação de dispersão Compton.**
 - b) Equação de Schrödinger.
 - c) Equação de Planck.
 - d) Equação de Einstein
59. O efeito Compton foi uma das primeiras evidências experimentais que demonstrou a:
- a) Teoria da relatividade de Einstein.
 - b) Existência de partículas subatômicas.
 - c) **Dualidade onda-partícula da luz.**
 - d) Existência do campo magnético.
60. Qual foi a importância do Efeito Compton para a Física Quântica?
- a) Confirmou a teoria da relatividade restrita.
 - b) Desafiou o modelo atômico de Rutherford.
 - c) Introduziu a teoria das cordas.
 - d) **Proporcionou uma confirmação experimental da natureza quântica da luz.**
61. Quem foi o físico que introduziu a ideia de que partículas têm propriedades de ondas?
- a) **Louis de Broglie.**
 - b) Max Born.
 - c) Werner Heisenberg.
 - d) Paul Dirac.
62. Qual partícula foi inicialmente proposta por de Broglie para exibir comportamento ondulatório?

- a) Fótons.
 - b) **Elétrons.**
 - c) Prótons.
 - d) Neutrons.
63. De acordo com de Broglie, qual grandeza Física está associada ao comprimento de onda de uma partícula?
- a) Massa.
 - b) Energia.
 - c) **Momento.**
 - d) Velocidade.
64. Qual experimento confirmou a hipótese de de Broglie sobre o comportamento ondulatório dos elétrons?
- a) Experimento de Michelson-Morley.
 - b) Experimento da dupla fenda.
 - c) Experimento de Franck-Hertz.
 - d) **Experimento de difração por cristais.**
65. Quem realizou os primeiros experimentos para comprovar a hipótese de de Broglie?
- a) Max Born.
 - b) **Davisson e Germer.**
 - c) Niels Bohr.
 - d) Max Planck
66. Qual é a equação de Broglie?
- a) $E = mc^2$
 - b) $f = \frac{1}{T}$
 - c) $\lambda = \frac{h}{p}$
 - d) $p = mv$
67. O que significa a constante h na equação de de Broglie?
- a) Velocidade da luz.
 - b) Energia potencial.

- c) **Constante de Planck.**
 - d) Fator de proporcionalidade.
68. A dualidade onda-partícula sugere que:
- a) **Todas as partículas possuem propriedades ondulatórias.**
 - b) Partículas podem se transformar em ondas.
 - c) Ondas e partículas são conceitos opostos.
 - d) O comportamento ondulatório ocorre apenas no vácuo.
69. Qual foi o prêmio recebido por de Broglie por sua contribuição à física?
- a) **Prêmio Nobel de Física.**
 - b) Medalha Fields.
 - c) Prêmio Planck.
 - d) Prêmio Einstein.
70. O que é a dualidade onda-partícula?
- a) A ideia de que partículas e ondas são dois tipos distintos de matéria.
 - b) A teoria de que ondas podem ser convertidas em partículas de forma irreversível.
 - c) **A noção de que partículas subatômicas podem se comportar tanto como ondas quanto como partículas.**
 - d) A hipótese de que ondas e partículas não interagem entre si.
71. Quem formulou a equação que descreve o comportamento das partículas subatômicas em termos de ondas?
- a) Albert Einstein.
 - b) Niels Bohr.
 - c) **Erwin Schrödinger.**
 - d) Louis de Broglie.
72. O que a equação de Schrödinger descreve?
- a) A posição exata de uma partícula.
 - b) **O estado quântico de um sistema físico.**
 - c) A interação entre elétrons e fótons.
 - d) O efeito da gravidade em sistemas quânticos.

73. Qual das opções abaixo é uma característica da equação de Schrödinger?
- a) Ela é determinística e não leva em conta a incerteza.
 - b) Ela descreve apenas o movimento de partículas macroscópicas.
 - c) Ela descreve o movimento de partículas relativísticas.
 - d) **Ela é probabilística e envolve uma função de onda.**
74. A equação de Schrödinger é fundamental para o desenvolvimento de qual teoria?
- a) **Teoria quântica.**
 - b) Teoria da relatividade especial.
 - c) Mecânica clássica.
 - d) Teoria de campos quânticos.
75. A equação de Schrödinger tem uma versão dependente do tempo e outra independente do tempo. Qual delas descreve a evolução temporal de um sistema?
- a) Equação independente do tempo.
 - b) Equação de Heisenberg.
 - c) **Equação dependente do tempo.**
 - d) Equação de Einstein.
76. Qual é o princípio que está intimamente relacionado com a equação de Schrödinger e descreve a impossibilidade de determinar simultaneamente a posição e o momento de uma partícula com precisão infinita?
- a) Princípio da relatividade.
 - b) **Princípio da incerteza de Heisenberg.**
 - c) Princípio da superposição quântica.
 - d) Princípio da indeterminação de Schrödinger.
77. Na equação de Schrödinger, o operador Hamiltoniano (H) está relacionado com:
- a) **A energia total do sistema.**
 - b) O momento de uma partícula.
 - c) A posição de uma partícula.
 - d) A velocidade de uma partícula.
78. No contexto da teoria de Schrödinger, o que significa "quantização de energia"?
- a) A energia de uma partícula pode assumir apenas valores contínuos.

- b) A energia de uma partícula não pode ser calculada.
 - c) A energia de uma partícula não existe.
 - d) **A energia de uma partícula é quantizada e só pode assumir certos valores discretos.**
79. A função de onda em mecânica quântica, representada pela equação de Schrödinger, fornece:
- a) A posição exata de uma partícula em qualquer instante.
 - b) A energia total de uma partícula.
 - c) **A probabilidade de encontrar uma partícula em uma região específica do espaço.**
 - d) O momento de uma partícula.
80. Qual foi o impacto da teoria de Schrödinger na mecânica quântica?
- a) Rejeitou a quantização de energia.
 - b) Introduziu a relatividade restrita para partículas.
 - c) Explicou o colapso da função de onda.
 - d) **Descreveu matematicamente o comportamento ondulatório das partículas.**
81. Quem formulou o postulado que estabelece a interpretação probabilística da função de onda?
- a) Erwin Schrödinger.
 - b) **Max Born.**
 - c) Werner Heisenberg.
 - d) Wolfgang Pauli.
82. O Postulado de Born é relacionado a qual aspecto da mecânica quântica?
- a) Determinação precisa da posição das partículas.
 - b) Descrição da trajetória das partículas subatômicas.
 - c) **Interpretação probabilística da função de onda.**
 - d) Determinação da energia total do sistema.
83. De acordo com o Postulado de Born, a probabilidade de encontrar uma partícula em uma região específica do espaço é proporcional a:
- a) A função de onda.
 - b) A constante de Planck.

- c) A velocidade da partícula.
 - d) **O quadrado da função de onda.**
84. No contexto do Postulado de Born, o conceito de "função de onda" é fundamental para entender o comportamento de:
- a) **Partículas subatômicas e sistemas quânticos.**
 - b) Partículas macroscópicas.
 - c) Ondas eletromagnéticas.
 - d) Sistemas termodinâmicos
85. O Postulado de Born afirma que a função de onda ψ de um sistema está associada a:
- a) A velocidade das partículas no sistema.
 - b) A posição exata das partículas no sistema.
 - c) **A probabilidade de encontrar uma partícula em uma determinada posição.**
 - d) A energia potencial do sistema.
86. Qual das afirmações abaixo é verdadeira sobre a interpretação probabilística do Postulado de Born?
- a) **A função de onda é uma ferramenta para calcular probabilidades de encontrar a partícula em uma região específica do espaço.**
 - b) A função de onda sempre fornece a posição exata da partícula.
 - c) A função de onda fornece apenas uma descrição qualitativa do comportamento das partículas.
 - d) A função de onda determina com precisão a energia da partícula.
87. Qual é a principal implicação do Postulado de Born na mecânica quântica?
- a) Determina a trajetória das partículas com precisão.
 - b) **Permite a descrição de sistemas quânticos em termos de probabilidades e não certezas.**
 - c) Calcula a energia total de um sistema quântico.
 - d) Relaciona a posição e a velocidade das partículas com precisão.
88. Segundo o postulado de Born, o que o módulo da função de onda $|\psi|^2$ representa a:
- a) A densidade de carga elétrica da partícula.
 - b) A força atuando sobre a partícula.

- c) A energia cinética da partícula.
 - d) **A densidade de probabilidade.**
89. O postulado de Born associa o comportamento probabilístico à função de onda. Qual é a consequência desse postulado para a Física Quântica?
- a) Introdução da incerteza nos valores de energia.
 - b) **A rejeição do determinismo clássico em favor de probabilidades.**
 - c) A impossibilidade de calcular comprimentos de onda.
 - d) A definição de estados quantizados em termos de órbitas circulares.
90. Qual é o impacto da interpretação probabilística de Born no entendimento da mecânica quântica?
- a) Eliminar a necessidade de medir as propriedades das partículas.
 - b) Introduzir a ideia de que as partículas têm trajetórias definidas e previsíveis.
 - c) **Propôs uma visão estatística da mecânica quântica.**
 - d) Estabelecer uma nova abordagem clássica.
91. Qual é o princípio fundamental da Mecânica Quântica formulado por Werner Heisenberg?
- a) **O princípio da incerteza: é impossível determinar simultaneamente a posição e o momento de uma partícula.**
 - b) Relatividade restrita: constância da velocidade da luz.
 - c) Teoria dos quanta: energia em unidades discretas.
 - d) Relatividade geral: gravidade como curvatura do espaço-tempo.
92. O Princípio da Incerteza de Heisenberg afirma que é impossível conhecer simultaneamente com precisão:
- a) A velocidade e a posição de uma partícula.
 - b) A energia e a frequência de uma partícula.
 - c) **A posição e o momento de uma partícula.**
 - d) A fase e a amplitude da função de onda.
93. Qual das seguintes afirmações é uma implicação do princípio da incerteza de Heisenberg?
- a) A posição de uma partícula pode ser determinada com precisão infinita.
 - b) **Quanto mais precisamente medimos a posição de uma partícula, menos precisão teremos sobre seu momento.**

- c) A velocidade de uma partícula pode ser medida com precisão sem limite.
 - d) A função de onda determina com exatidão tanto a posição quanto o momento de uma partícula.
94. O Princípio da Incerteza de Heisenberg é um reflexo da natureza:
- a) Determinística das partículas subatômicas.
 - b) Relativística das partículas de alta energia.
 - c) Ondulatória das partículas macroscópicas.
 - d) **Probabilística da mecânica quântica.**
95. Segundo o Princípio da Incerteza, o que acontece quando tentamos medir a posição de uma partícula com extrema precisão?
- a) A partícula fica mais estável.
 - b) **A incerteza sobre seu momento aumenta.**
 - c) A partícula perde sua natureza ondulatória.
 - d) A partícula se torna uma onda estacionária.
96. O que significa a expressão $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$ no contexto do princípio da incerteza?
- a) Que o produto da incerteza de duas grandezas é igual à constante de Planck.
 - b) Que a constante de Planck é a menor unidade de energia possível.
 - c) Que a probabilidade de encontrar uma partícula é sempre constante.
 - d) **Que a incerteza no momento é inversamente proporcional à incerteza na posição.**
97. Heisenberg desenvolveu seu princípio da incerteza como uma crítica à interpretação clássica da física. Qual é o ponto central dessa crítica?
- a) **A Física Clássica não era compatível com o comportamento de partículas subatômicas.**
 - b) A Física Clássica era baseada em uma visão de mundo probabilística.
 - c) A Mecânica Quântica negava os experimentos de partículas.
 - d) A Física Clássica não tinha lugar para a ideia de dualidade onda-partícula.
98. Qual é a principal consequência filosófica do princípio da incerteza de Heisenberg?
- a) O universo é completamente determinístico.
 - b) O comportamento das partículas subatômicas é inteiramente previsível.
 - c) **Não podemos conhecer todas as propriedades de um sistema ao mesmo tempo, apenas probabilisticamente.**

- d) As partículas não existem até serem observadas.
99. O Princípio da Incerteza de Heisenberg implica que a Mecânica Quântica é uma teoria:
- a) Determinística.
 - b) **Probabilística.**
 - c) Relativística.
 - d) Newtoniana.
100. Qual foi a contribuição de Werner Heisenberg para a interpretação da Mecânica Quântica além do princípio da incerteza?
- a) Desenvolveu a teoria do caos quântico.
 - b) Introduziu a relatividade para sistemas quânticos.
 - c) Estabeleceu a gravidade quântica.
 - d) **Formulou a Mecânica Quântica Matricial, usando matrizes para descrever observáveis.**
101. O que é o spin na mecânica quântica?
- a) Uma propriedade que descreve a trajetória orbital de uma partícula ao redor de um núcleo.
 - b) **Uma propriedade intrínseca das partículas, como os elétrons.**
 - c) A velocidade com que uma partícula se move em uma trajetória retilínea.
 - d) Uma forma de energia associada ao movimento vibracional de uma partícula.
102. Qual é o valor do spin do elétron?
- a) 0
 - b) 1
 - c) $-1/2$
 - d) **$1/2$**
103. O spin é uma propriedade de que tipo de partículas?
- a) Somente partículas com massa.
 - b) Somente partículas com carga elétrica.
 - c) **Somente partículas subatômicas, como elétrons, nêutrons e prótons.**
 - d) Somente partículas com velocidade constante.

104. O spin do elétron é uma característica fundamental que está relacionada a qual conceito físico?
- a) **Momento angular.**
 - b) Frequência.
 - c) Energia potencial.
 - d) Velocidade de movimento.
105. Em um átomo, o spin do elétron é importante para determinar:
- a) A órbita do elétron.
 - b) **As propriedades magnéticas da matéria.**
 - c) O número de nêutrons no núcleo.
 - d) A interação com a luz.
106. Qual é a consequência do spin no comportamento magnético de materiais?
- a) **Elétrons com spin alinhado podem gerar um campo magnético.**
 - b) Elétrons com spin oposto se atraem, causando magnetismo.
 - c) O spin não tem efeito no magnetismo.
 - d) Elétrons com spin oposto não podem gerar magnetismo.
107. O spin do elétron também está relacionado com qual efeito observável em física?
- a) Efeito Doppler.
 - b) Efeito fotoelétrico.
 - c) **Magnetismo de materiais.**
 - d) Efeito Compton.
108. Em um átomo, os elétrons com spins opostos são encontrados:
- a) Em orbitais diferentes.
 - b) Sempre no núcleo.
 - c) No mesmo nível de energia, mas com diferentes números quânticos de momento angular.
 - d) **No mesmo orbital.**
109. O spin de um elétron pode ser medido em termos de:
- a) **Seu momento angular.**

- b) Sua energia.
- c) Sua velocidade.
- d) Sua posição.

110. O que é o princípio de exclusão de Pauli e como ele está relacionado ao spin?

- a) Não há limite para partículas no mesmo estado quântico.
- b) Partículas com spins diferentes podem compartilhar o mesmo estado quântico.
- c) **Duas partículas idênticas (como elétrons) não podem ocupar o mesmo estado quântico.**
- d) Todas as partículas devem ter o mesmo spin.

111. Qual é a principal contribuição da equação de Dirac para a mecânica quântica?

- a) **Unificar a Mecânica Quântica e a Relatividade Especial, para descrever o comportamento quântico das partículas subatômicas.**
- b) Descrever o movimento das partículas em campos eletromagnéticos.
- c) Introduzir a teoria da gravidade quântica.
- d) Explicar o comportamento das partículas em um potencial harmônico.

112. Qual foi o impacto da equação de Dirac na física?

- a) O desenvolvimento da teoria da relatividade geral.
- b) A criação da Teoria Quântica de campos.
- c) A substituição da teoria da mecânica clássica por uma nova teoria unificada.
- d) **O impulso no desenvolvimento da Mecânica Quântica Relativística.**

113. O que a equação de Dirac descreve?

- a) O comportamento de partículas clássicas em campos gravitacionais.
- b) **O comportamento de partículas subatômicas relativísticas com spin $1/2$.**
- c) Ondas estacionárias de elétrons.
- d) O colapso da função de onda.

114. O que a equação de Dirac introduz para partículas com spin $1/2$?

- a) A relação de incerteza de Heisenberg.
- b) A quantização do campo eletromagnético.
- c) **O conceito de antipartículas.**

- d) O princípio da complementaridade.
115. Qual fenômeno quântico a equação de Dirac ajuda a explicar?
- a) Efeito túnel.
 - b) **Spin intrínseco das partículas.**
 - c) Efeito fotoelétrico.
 - d) Radiação de corpo negro.
116. Como a equação de Dirac resolve o problema de energia negativa?
- a) Introduzindo o conceito de partículas virtuais.
 - b) Eliminando as soluções de energia negativa.
 - c) Associando spin com cargas elétricas.
 - d) **Prevendo a existência de antipartículas.**
117. A Equação de Dirac é fundamental para descrever qual tipo de partículas?
- a) Partículas com massa zero.
 - b) Partículas de spin 1.
 - c) **Partículas de spin 1/2.**
 - d) Partículas com massa muito grande.
118. Qual é a principal diferença entre a equação de Dirac e a equação de Schrödinger?
- a) **A equação de Dirac é relativística e descreve partículas de spin 1/2.**
 - b) A equação de Dirac é não-relativística, enquanto a de Schrödinger é relativística.
 - c) A equação de Dirac descreve partículas de spin 0, enquanto a de Schrödinger descreve partículas de spin 1/2.
 - d) A equação de Dirac é apenas para partículas com massa zero.
119. Qual fenômeno é previsto pela Equação de Dirac que não é explicado pela equação de Schrödinger?
- a) A existência de partículas com carga negativa.
 - b) **A existência de antipartículas.**
 - c) O comportamento das partículas em um vácuo perfeito.
 - d) O movimento de partículas em orbitais discretos.
120. Qual a principal implicação filosófica e Física que surge com a equação de Dirac?

- a) Ela elimina a necessidade de antipartículas na Teoria Quântica.
- b) Ela prevê a dualidade onda-partícula para todas as partículas.
- c) **Ela introduz a ideia de que a Física Quântica e a Relatividade podem ser unificadas.**
- d) Ela resolve todos os paradoxos da Mecânica Quântica.

121. Como a Teoria Quântica alterou a visão de mundo das pessoas?

- a) Defendeu a ideia do universo previsível.
- b) **Introduziu eventos probabilísticos, desafiando o determinismo.**
- c) Confirmou que as leis clássicas de Newton são suficientes.
- d) Negou qualquer possibilidade de incerteza nos fenômenos naturais.

122. Qual filósofo se inspirou na Teoria Quântica para questionar a realidade objetiva?

- a) Platão.
- b) Kant.
- c) **David Bohm.**
- d) Aristóteles.

123. A computação quântica pode impactar a sociedade principalmente ao:

- a) **Resolver problemas complexos em diversas áreas.**
- b) Substituir todos os computadores convencionais.
- c) Eliminar a necessidade de criptografia em redes.
- d) Tornar obsoletos todos os sistemas de inteligência artificial atuais.

124. Como a Teoria Quântica contribui para debates sobre o livre-arbítrio?

- a) Ela prova que todas as ações humanas são predeterminadas.
- b) Ela nega qualquer influência do acaso nas decisões humanas.
- c) Ela apenas confirma o determinismo clássico de Newton.
- d) **Ela sugere que eventos podem ter múltiplos desfechos a serem observados, desafiando o determinismo.**

125. O que é a criptografia quântica?

- a) Uma forma de armazenamento em nuvem.
- b) **Um método que utiliza partículas quânticas para criar comunicações ultra seguras.**

- c) Um algoritmo de inteligência artificial para jogos.
 - d) Um tipo de rede social baseada em tecnologia de blockchain.
126. Como a computação quântica poderia revolucionar a inteligência artificial?
- a) Criando personagens de jogos com gráficos melhores.
 - b) Substituindo as redes neurais convencionais por redes clássicas.
 - c) Tornando obsoletos todos os computadores tradicionais.
 - d) **Processando grandes quantidades de dados em paralelo, melhorando o aprendizado de máquinas.**
127. Qual filme explora a ideia de múltiplos universos de maneira inspirada na teoria quântica?
- a) **Doutor Estranho no Multiverso da Loucura.**
 - b) Avatar.
 - c) Jurassic Park.
 - d) Star Wars: A Ascensão Skywalker.
128. Em qual filme o conceito de manipulação da realidade e percepção do tempo, que pode ser associado a princípios da Física Quântica, é central para a trama?
- a) De Volta para o Futuro.
 - b) Interestelar.
 - c) **Matrix.**
 - d) O Exterminador do Futuro.
129. O jogo Quantum Break é baseado em qual conceito da Física Quântica?
- a) Emaranhamento quântico.
 - b) Supercondutividade.
 - c) **Manipulação do tempo e eventos temporais.**
 - d) Força gravitacional.
130. Como a computação quântica pode melhorar a criação de jogos eletrônicos?
- a) Apenas melhorando os gráficos dos jogos.
 - b) **Ajudando a criar simulações físicas mais realistas e tornando os personagens não jogáveis (NPCs) mais inteligentes e realistas.**
 - c) Eliminando a necessidade de usar placas de vídeo (GPUs).
 - d) Reduzindo a quantidade de memória RAM que os jogos precisam para funcionar.

131. Quais os dois ramos da Física que surgiram no começo do século XX e revolucionaram toda a concepção científica criada na área até então?
- a) **Mecânica Quântica e Mecânica Relativística.**
 - b) Cosmologia e Astronomia.
 - c) Física do estado sólido e Mecânica.
 - d) Termodinâmica e Eletromagnetismo.
132. A Física Quântica pode ser utilizada para descrever fenômenos relacionado a:
- a) Colisões de automóveis.
 - b) Máquinas Térmicas.
 - c) Eletricidade.
 - d) **Partículas subatômicas.**
133. Qual o nome do pesquisador que afirmou: "A Física está fechada! Não há novas descobertas a serem feitas, apenas aperfeiçoar as medições."?
- a) Isaac Newton.
 - b) Galileu Galilei.
 - c) **Lorde Kelvin.**
 - d) Max Planck.
134. Qual o outro nome recebido por um único "pacotinho de energia"descrito por Planck e posteriormente usado na explicação do Efeito Fotoelétrico de Einstein?
- a) Átomo.
 - b) Partícula.
 - c) Íon.
 - d) **Fóton.**
135. A proposta de Planck sobre os quanta de energia (ou fótons, como descritos por Einstein) ajudou a apoiar uma ideia da época. Qual era essa ideia?
- a) A energia se transforma, como os quanta.
 - b) **Os quanta são a energia liberada por elétrons em órbitas (modelo de Rutherford-Bohr).**
 - c) O calor se transfere de quente para frio, relacionado aos fótons.
 - d) Os quanta geram um campo gravitacional no modelo heliocêntrico.

136. De acordo com a dualidade onda-partícula, qual é a natureza da luz?
- a) **A luz é uma onda eletromagnética e uma partícula chamada fóton.**
 - b) A luz é uma onda eletromagnética.
 - c) A luz é uma partícula chamada fóton.
 - d) A luz é uma onda mecânica.
137. De acordo com o princípio da incerteza e o comportamento ondulatório das partículas quânticas:
- a) É possível medir simultaneamente, mas com perda de precisão.
 - b) O comportamento ondulatório impede a medição simultânea de posição e momento.
 - c) **Não é possível medir com exatidão simultaneamente.**
 - d) Posição e momento são independentes e não se influenciam.
138. Qual é o objetivo do exemplo do gato de Schrödinger na mecânica quântica?
- a) **Descrever a evolução temporal de sistemas quânticos.**
 - b) Mostrar o comportamento do gato na caixa.
 - c) Destacar a diferença entre Mecânica Quântica e Física Clássica.
 - d) Ilustrar a previsão de medições na mecânica quântica.
139. Qual conceito da Teoria Quântica influenciou o pensamento sobre a natureza da realidade?
- a) Lei da gravitação universal de Newton.
 - b) **Princípio da incerteza de Heisenberg.**
 - c) Segunda lei da termodinâmica.
 - d) Princípio da exclusão de Pauli.
140. Como a Teoria Quântica pode influenciar o desenvolvimento de energias renováveis?
- a) Reduzindo a necessidade de energia solar.
 - b) Tornando as turbinas eólicas mais eficientes.
 - c) Acelerando o desenvolvimento de energia nuclear clássica.
 - d) **Através do uso de painéis solares que exploram o efeito fotoelétrico.**
141. No filme Homem-Formiga e Homem-Formiga e a Vespa, qual conceito quântico é utilizado para explicar a viagem ao Reino Quântico?
- a) Efeito fotoelétrico.

- b) Emaranhamento quântico.
 - c) Superposição.
 - d) **Túnel quântico.**
142. Qual foi o impacto da descoberta do efeito fotoelétrico para o desenvolvimento da teoria quântica?
- a) Mostrou que a luz é só ondas.
 - b) Indica que partículas podem ter múltiplos estados.
 - c) **Comprovou que a luz tem comportamento de partículas (fótons).**
 - d) Afirmou que elétrons não têm massa ao serem emitidos.
143. Na série Arquivo X, a ideia de realidades paralelas é explorada. Qual interpretação da Mecânica Quântica sugere a existência de múltiplos universos?
- a) Interpretação de Copenhague.
 - b) **Interpretação de muitos mundos.**
 - c) Princípio da incerteza.
 - d) Teoria das supercordas.
144. O filme Oppenheimer trata do desenvolvimento da bomba atômica. Qual princípio da Física Quântica foi crucial para o entendimento das reações nucleares envolvidas?
- a) **Dcaimento radioativo e fissão nuclear.**
 - b) Princípio da incerteza de Heisenberg.
 - c) Dualidade onda-partícula.
 - d) Supercondutividade.
145. Em Efeito Borboleta, qual conceito de Mecânica Quântica poderia ajudar a explicar a influência de pequenas mudanças em diferentes realidades?
- a) Princípio da superposição.
 - b) Efeito túnel.
 - c) **Princípio da incerteza de Heisenberg.**
 - d) Dcaimento radioativo.
146. No filme Núcleo: Missão ao Centro da Terra, a falha no campo magnético da Terra é um tema central. Como a Teoria Quântica pode se relacionar com o estudo do magnetismo?
- a) **Através do entendimento do comportamento das partículas em campos magnéticos, como no caso do efeito Zeeman.**

- b) Pela aplicação direta da Mecânica Quântica na gravidade da Terra.
- c) Por ser responsável pelo movimento das placas tectônicas.
- d) Pela influência direta sobre a temperatura do núcleo da Terra.

147. Qual é a aplicação prática da equação de Dirac na sociedade moderna?

- a) A criação de simuladores quânticos para modelar reações químicas.
- b) **O uso de antipartículas em tecnologias médicas, como a tomografia por emissão de pósitrons (PET).**
- c) A substituição de métodos clássicos na engenharia estrutural.
- d) A invenção de lasers semicondutores.

148. Como a Física Quântica influenciou a cultura contemporânea?

- a) **Inspirou obras literárias, filmes e debates sobre a natureza da realidade.**
- b) Trouxe aceitação universal do determinismo clássico.
- c) Desconectou a ciência da filosofia moderna.
- d) Não teve influência significativa além da academia.

149. Quais avanços tecnológicos foram influenciados diretamente pela equação de Dirac?

- a) A eliminação completa das incertezas em medições quânticas.
- b) A descoberta de partículas que seguem leis clássicas da física.
- c) A criação de tecnologias que ignoram os princípios da relatividade.
- d) **O desenvolvimento de dispositivos semicondutores e computadores quânticos.**

150. Como a dualidade onda-partícula influenciou a tecnologia moderna?

- a) Demonstrou que partículas não possuem aplicação tecnológica prática.
- b) Contribuiu apenas para debates filosóficos, sem impactos tecnológicos.
- c) **Foi fundamental para o desenvolvimento de tecnologias como microscópios eletrônicos.**
- d) Sustenta a teoria de que as partículas não podem ser medidas experimentalmente.

ANEXO A – CÓPIA DO ARTIGO ORIGINAL DO MAX PLANCK

553

**9. Ueber das Gesetz
der Energieverteilung im Normalspectrum;
von Max Planck.**

(In anderer Form mitgeteilt in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft,
Sitzung vom 19. October und vom 14. December 1900, Verhandlungen
2. p. 202 und p. 237. 1900.)

Einleitung.

Die neueren Spectralmessungen von O. Lummer und E. Pringsheim¹⁾ und noch auffälliger diejenigen von H. Rubens und F. Kurlbaum²⁾, welche zugleich ein früher von H. Beckmann³⁾ erhaltenes Resultat bestätigten, haben gezeigt, dass das zuerst von W. Wien aus molecular-kinetischen Betrachtungen und später von mir aus der Theorie der elektromagnetischen Strahlung abgeleitete Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum keine allgemeine Gültigkeit besitzt.

Die Theorie bedarf also in jedem Falle einer Verbesserung, und ich will im Folgenden den Versuch machen, eine solche auf der Grundlage der von mir entwickelten Theorie der elektromagnetischen Strahlung durchzuführen. Dazu wird es vor allem nötig sein, in der Reihe der Schlussfolgerungen, welche zum Wien'schen Energieverteilungsgesetz führten, dasjenige Glied ausfindig zu machen, welches einer Abänderung fähig ist; sodann aber wird es sich darum handeln, dieses Glied aus der Reihe zu entfernen und einen geeigneten Ersatz dafür zu schaffen.

Dass die physikalischen Grundlagen der elektromagnetischen Strahlungstheorie, einschliesslich der Hypothese der „natürlichen Strahlung“, auch einer geschärften Kritik gegenüber Stand halten, habe ich in meinem letzten Aufsatz⁴⁾ über diesen

1) O. Lummer u. E. Pringsheim, Verhandl. der Deutsch. Physikal. Gesellsch. **2.** p. 163. 1900.

2) H. Rubens und F. Kurlbaum, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin vom 25. October 1900, p. 929.

3) H. Beckmann, Inaug.-Dissertation, Tübingen 1898. Vgl. auch H. Rubens, Wied. Ann. **69.** p. 582. 1899.

4) M. Planck, Ann. d. Phys. **1.** p. 719. 1900.

ANEXO B – CÓPIA DO ARTIGO ORIGINAL DO HEISENBERG

879

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von **W. Heisenberg** in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z. B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z. B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), daß also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht werden könnten. Diese Hoffnung könnte als berechtigt angesehen werden, wenn die genannten Regeln in sich konsequent und auf einen bestimmt umgrenzten Bereich quantentheoretischer Probleme anwendbar wären. Die Erfahrung zeigt aber, daß sich nur das Wasserstoffatom und der Starkeffekt dieses Atoms jenen formalen Regeln der Quantentheorie fügen, daß aber schon beim Problem der „gekreuzten Felder“ (Wasserstoffatom in elektrischem und magnetischem Feld verschiedener Richtung) fundamentale Schwierigkeiten auftreten, daß die Reaktion der Atome auf periodisch wechselnde Felder sicherlich nicht durch die genannten Regeln beschrieben werden kann, und daß schließlich eine Ausdehnung der Quantenregeln auf die Behandlung der Atome mit mehreren Elektronen sich als unmöglich erwiesen hat. Es ist üblich geworden, dieses Versagen der quantentheoretischen Regeln, die ja wesentlich durch die Anwendung der klassischen Mechanik charakterisiert waren, als Abweichung von der klassischen Mechanik zu bezeichnen. Diese Bezeichnung kann aber wohl kaum als sinngemäß angesehen werden, wenn man bedenkt, daß schon die (ja ganz allgemein gültige) Einstein-Bohrsche Frequenzbedingung eine so völlige Absage an die klassische Mechanik oder besser, vom Standpunkt der Wellentheorie aus, an die dieser Mechanik zugrunde liegende Kinematik darstellt, daß auch bei den einfachsten quantentheoretischen Problemen an

3. *Quantisierung als Eigenwertproblem; von E. Schrödinger.*

(Erste Mitteilung.)

§ 1. In dieser Mitteilung möchte ich zunächst an dem einfachsten Fall des (nichtrelativistischen und ungestörten) Wasserstoffatoms zeigen, daß die übliche Quantisierungsvorschrift sich durch eine andere Forderung ersetzen läßt, in der kein Wort von „ganzen Zahlen“ mehr vorkommt. Vielmehr ergibt sich die Ganzzahligkeit auf dieselbe natürliche Art, wie etwa die Ganzzahligkeit der *Knotenzahl* einer schwingenden Saite. Die neue Auffassung ist verallgemeinerungsfähig und rührt, wie ich glaube, sehr tief an das wahre Wesen der Quantenvorschriften.

Die übliche Form der letzteren knüpft an die Hamiltonsche partielle Differentialgleichung an:

$$(1) \quad H\left(q, \frac{\partial S}{\partial q}\right) = E.$$

Es wird von dieser Gleichung eine Lösung gesucht, welche sich darstellt als *Summe* von Funktionen je einer einzigen der unabhängigen Variablen q .

Wir führen nun für S eine neue unbekannte ψ ein derart, daß ψ als ein *Produkt* von eingriffigen Funktionen der einzelnen Koordinaten erscheinen würde. D. h. wir setzen

$$(2) \quad S = K \lg \psi.$$

Die Konstante K muß aus dimensionellen Gründen eingeführt werden, sie hat die Dimension einer *Wirkung*. Damit erhält man

$$(1') \quad H\left(q, \frac{K}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial q}\right) = E.$$

Wir suchen nun *nicht* eine Lösung der Gleichung (1'), sondern wir stellen folgende Forderung. Gleichung (1') läßt sich bei Vernachlässigung der Massenveränderlichkeit stets, bei Berücksichtigung derselben wenigstens dann, wenn es sich um das *Ein*-elektronenproblem handelt, auf die Gestalt bringen: quadratische

ANEXO D – CÓPIA DO ARTIGO ORIGINAL DO DIRAC

610

The Quantum Theory of the Electron.

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge.

(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received January 2, 1928.)

The new quantum mechanics, when applied to the problem of the structure of the atom with point-charge electrons, does not give results in agreement with experiment. The discrepancies consist of "duplexity" phenomena, the observed number of stationary states for an electron in an atom being twice the number given by the theory. To meet the difficulty, Goudsmit and Uhlenbeck have introduced the idea of an electron with a spin angular momentum of half a quantum and a magnetic moment of one Bohr magneton. This model for the electron has been fitted into the new mechanics by Pauli,* and Darwin,† working with an equivalent theory, has shown that it gives results in agreement with experiment for hydrogen-like spectra to the first order of accuracy.

The question remains as to why Nature should have chosen this particular model for the electron instead of being satisfied with the point-charge. One would like to find some incompleteness in the previous methods of applying quantum mechanics to the point-charge electron such that, when removed, the whole of the duplexity phenomena follow without arbitrary assumptions. In the present paper it is shown that this is the case, the incompleteness of the previous theories lying in their disagreement with relativity, or, alternatively, with the general transformation theory of quantum mechanics. It appears that the simplest Hamiltonian for a point-charge electron satisfying the requirements of both relativity and the general transformation theory leads to an explanation of all duplexity phenomena without further assumption. All the same there is a great deal of truth in the spinning electron model, at least as a first approximation. The most important failure of the model seems to be that the magnitude of the resultant orbital angular momentum of an electron moving in an orbit in a central field of force is not a constant, as the model leads one to expect.

* Pauli, 'Z. f. Physik,' vol. 43, p. 601 (1927).

† Darwin, 'Roy. Soc. Proc.,' A, vol. 116, p. 227 (1927).