

RAFAEL FILGUEIRA PIMENTEL

**A LINGUAGEM E O ENSINO CONCEITUAL DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA
NO ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Pimentel, Rafael Filgueira, 1994-

P644L
2022

A linguagem e o ensino conceitual da dualidade
onda-partícula no Ensino Médio / Rafael Filgueira Pimentel. –
Viçosa, MG, 2022.

1 dissertação eletrônica (111 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Física, 2022.

Referências bibliográficas: f. 86-90.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.459>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Física - Estudo e ensino. 2. Objetos quânticos.
3. Dualidade onda-partícula. 4. Óptica quântica. I. Carvalho,
Alexandre Tadeu Gomes de, 1959-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Física. Programa de Pós-Graduação
em Ensino de Física. III. Título.

CDD 22. ed. 530.07

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB6/2552

RAFAEL FILGUEIRA PIMENTEL

A LINGUAGEM E O ENSINO CONCEITUAL DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA
NO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 06 de maio de 2022.

Assentimento:


Rafael Filgueira Pimentel
Autor


Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho
Orientador

AGRADECIMENTO

Agradeço ao professor Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho pelas excelentes orientações e conselhos, que muito me foram valiosos e acrescentaram grandemente em minha formação profissional e pessoal, e a professora Regina Simplício Carvalho pela imprescindível ajuda com as teorias de aprendizagem e das linguagens.

Gratidão aos meus pais Maria Onice e Damasio por todo amor, carinho e dedicação para comigo todos esses anos, por sempre me apoiarem e aconselharem tão sabiamente, pelos momentos de alegrias e suporte em horas difíceis. Também, por estarem sempre presentes em minha vida.

Agradeço aos meus irmãos Alexandre, Fernanda, Carla e Mirian por estarem sempre presentes e por todo apoio. Em especial, agradeço a minha irmã Mirian pelos bons conselhos, trocas de conhecimento e descontrações com boas conversas que muito me ajudaram nessa jornada.

Agradeço à UFV, instituição que me acolheu num ambiente caloroso e profissionalmente efervescente em meio a um dos campi universitários mais bonitos do país, que propicia tranquilidade e paz a seus estudantes.

Por fim, mas não menos importante agradeço a vida e aos dons que pude lapidar até aqui. Agradeço a todos aqueles que não foram citados, mas que estiveram presentes de alguma forma nessa jornada.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

RESUMO

PIMENTEL, Rafael Filgueira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2022. **A linguagem e o ensino conceitual da dualidade onda-partícula no Ensino Médio**. Orientador: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho.

No início do século XX, compreender a matéria em escala microscópica demandou romper com paradigmas fortemente estabelecidos da Física Clássica, dando origem ao que conhecemos hoje como Física Quântica. Os conceitos de realidade física precisaram ser rediscutidos, considerando o estranho objeto dual sobre o qual a Física Quântica estava sendo erguida, para o qual um novo formalismo estruturante precisou ser desenvolvido. O presente trabalho relata o desenvolvimento e aplicação de uma sequência didática que visa ensinar a base da Física Quântica no Ensino Médio, superando a desconfortável e turva noção de “dualidade onda-partícula”, oferecendo ao aluno um efetivo auxílio pedagógico, que enfatiza a radical novidade que a teoria quântica se constitui, assim como o risco que o quadro clássico e ingênuo oferece. Utilizamos uma abordagem centrada na linguagem multimídia, estruturada em torno de experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais. O ensino por investigação foi empregado, de modo que, os alunos pudessem observar e analisar de forma investigativa e problematizadora os fenômenos e conceitos apresentados. Resultados coletados por meio da observação dos aplicadores da sequência didática em suas aulas, sugerem o aprendizado dos conceitos estudados, evidenciando que a sequência, tal como organizada e estruturada, teve impacto positivo nos alunos e os auxiliou fortemente no processo de aprendizagem.

Palavras-chave: Ensino de Física. Objetos quânticos. Dualidade onda-partícula.

ABSTRACT

PIMENTEL, Rafael Filgueira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2022. **Language and conceptual teaching of wave-particle duality in High School**. Advisor: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho.

At the beginning of the 20th century, understanding matter on a microscopic scale demanded breaking with strongly established paradigms of Classical Physics, giving rise to what we know today as Quantum Physics. The concepts of physical reality needed to be re-discussed, considering the strange dual object on which Quantum Physics was being built, for which a new structuring formalism needed to be developed. The present work reports the development and application of a didactic sequence that aims to teach the basis of Quantum Physics in High School, overcoming the uncomfortable and blurred notion of “wave-particle duality”, offering the student an effective pedagogical aid, which emphasizes the radical novelty that the quantum theory is constituted, as well as the risk that the classical and naive framework offers. We use an approach centered on multimedia language, structured around experiments shown in short videos, images, animations and computer simulations. Teaching by investigation was used, so that students could observe and analyze in an investigative and problematizing way the phenomena and concepts presented. Results collected through the observation of the applicators of the didactic sequence in their classes, suggest the learning of the studied concepts, evidencing that the sequence, as organized and structured, had a positive impact on the students and helped them strongly in the learning process.

Keywords: Teaching Physics. Quantum objects. Wave-particle duality.

Sumário

1	Introdução	8
2	O problema gerador	11
2.1	A luz segundo Isaac Newton e Christiaan Huygens	11
2.2	O definidor experimento de Thomas Young	13
2.3	James C. Maxwell	16
2.4	Efeito fotoelétrico	18
2.5	Efeito Compton	20
2.6	Difração de elétrons	23
2.7	O princípio da complementaridade	25
2.8	Interferência de um feixe de baixíssima intensidade	25
3	A Física e a Óptica Quântica	27
3.1	Uma breve descrição do formalismo	27
3.2	Interferômetro de Mach-Zehnder - IMZ	30
3.3	A Óptica Quântica do IMZ	31
3.4	Visibilidade, distinguibilidade e fenômenos intermediários entre onda e partícula	38
3.5	Interpretações da Física Quântica	39
4	O papel da linguagem e sua lógica no Ensino de Física	42
4.1	A linguagem e os Signos	43
4.2	Teoria da mediação de Vygotsky	44
4.3	Teoria da aprendizagem Significativa	47
4.4	A linguagem a lógica e os níveis de realidade	48
4.5	Teoria cognitiva de Dewey e o Ensino por investigação	52
4.6	Momentos pedagógicos de Delizoicov e Angotti	53
4.7	Teoria construtivista de Piaget	54
5	Metodologia	57
5.1	Desenvolvimento das aulas	58
5.2	Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder - IVMZ	69

6	Resultados e Discussão	76
6.1	Abordagem didática	77
6.2	Percepções à aplicação da sequência didática	81
7	Considerações finais	84
	Referências	86
	Apêndice	92
A	Produto Educacional	94
A.1	Primeira aula	95
A.2	Segunda aula	102
A.3	Atividades propostas	107
A.4	Analogia mecânica à interpretação Dualista Realista	109

Capítulo 1

Introdução

Segundo o princípio da complementaridade, enunciado por Niels Bohr (1885 - 1962) em 1927, objetos quânticos, como elétrons e fótons, exibem aspectos de ondas clássicas e de partículas clássicas, sem exibi-los simultaneamente; assim, de forma estrita, não são nem ondas nem partículas clássicas. Esta característica dual está no cerne da Física Quântica e, muitas vezes, é abordada nos textos de física básica como “dualidade onda-partícula” (YOUNG; FREEDMAN, 2016). A apresentação da Física Quântica usando-se tal abordagem suscita uma contradição lógica capaz de dificultar a construção conceitual do objeto quântico pois, envolve a ideia de unir em um único objeto dois objetos clássicos distintos e dispares, onda e partícula. Uma partícula clássica se comporta como uma bala de revólver; pode ser localizada e desviada, transfere energia bruscamente, através de colisões, e não exibe as propriedades de difração e interferência. Uma onda clássica se comporta como uma onda do mar; não tem localização precisa, transfere energia de forma gradual e exibe os fenômenos de difração e interferência.

Em razão dos objetos quânticos possuírem propriedades específicas, que fogem ao escopo da Física Clássica, há autores como Levich (1974) e Ohanian (1995) que os nomeiam de “micro-partículas” ou “wavicles”. Esta última denominação foi cunhada por Arthur Stanley Eddington, em seu livro publicado em 1927, “The Nature of the Physical World” (EDDINGTON, 2019) e resulta do cruzamento dos vocábulos da língua inglesa, “wave”, e “particle”, correspondentes a onda e partícula, na língua portuguesa. Interpreta-se, então, um objeto quântico nem como onda nem partícula, mas sim um outro objeto, que pode ser nomeado como se queira, que carrega consigo aspectos de ondas clássicas e de partículas clássicas. As ondas e as partículas são então manifestações de aspectos deste objeto. Outros autores propuseram outros nomes, como quanticle, quanton ou quon, mas nenhum desses nomes alcançou muita popularidade, incluído

micropartículas e wávicles.

Até onde sabemos estas denominações não objetivaram criar explicitamente uma nova rota didática para a construção dos conhecimentos da Física Quântica, entretanto, assim pode ser encarada. Uma denominação específica para o objeto quântico elimina a contradição lógica associada ao termo “dualidade onda-partícula”, na medida em que não mais remete aos objetos clássicos.

Está última perspectiva está em acordo com a teoria de Vygotsky (2001) que considera a linguagem o agente capaz de exercer influência na construção do pensamento, por meio da interiorização do diálogo que o indivíduo estabelece com o meio. É a interiorização do diálogo, mediado pela linguagem, que capacita o indivíduo a abstrair, imaginar e aprender. A escolha da linguagem e seu uso preciso é fator central na construção dos conceitos de Física pelos alunos.

A análise deste panorama associado ao ensino da Física Quântica conduziu-nos a elaborar uma metodologia de ensino dos fundamentos da Física Moderna, na abordagem do ensino por investigação, mediada pela linguagem multimídia e desenvolvida em torno de vídeos de experimentos e de simulações computacionais. Esta linguagem, presente na vida dos estudantes através do seu convívio com celulares e computadores, quando empregada criteriosamente pelos professores se transforma numa ferramenta de valor inestimável ao aprendizado e numa fonte de estímulo à criatividade. Mintzes, Wandersee e Novak (2004) consideram a linguagem multimídia um auxiliar precioso para que os estudantes construam melhores modelos científicos da natureza e pode ser especialmente útil na construção de conceitos que fogem à nossa percepção direta, como a do conceito de objeto quântico.

Neste capítulo 1, buscamos situar o leitor acerca de nosso trabalho e nossa motivação, além de oferecer-lhe um panorama geral da dissertação. No capítulo 2, apresentamos o problema gerador da investigação que originou esta dissertação, sobre o qual a Física Quântica estava sendo erguida. O conceito de “dualidade onda-partícula” é delineado e o princípio da complementaridade apresentado. No capítulo 3, abordamos brevemente o formalismo da Física Quântica, da Óptica Quântica aplicada à análise de um Interferômetro de Mach-Zehnder - IMZ, operando na condição clássica ou quântica. Segue uma seção curta sobre os fenômenos intermediários de onda-partícula. Finalizamos o capítulo discutindo algumas interpretações da Física Quântica. No capítulo 4, discutimos o papel da linguagem e da lógica na produção de significados conceituais na Física Quântica e sua correlação com os processos de ensino e aprendizagem. Tratamos também das teorias de aprendizagem que nortearam a construção da sequência didá-

tica bem como da análise dos resultados, apresentados nos capítulos posteriores. No capítulo 5, apresentamos a metodologia empregada na construção de nossa sequência didática e abordamos uma simulação computacional intitulada Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder - IVMZ. No capítulo 6, apresentamos nossos resultados e discussões sobre a aplicação da sequência didática e finalizamos com as considerações finais a respeito de nosso trabalho no capítulo 7. Segue a bibliografia consultada. O produto educacional desenvolvido como parte das exigências do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física é apresentado como apêndice, sendo composto de uma exposição detalhada da construção da sequência didática com dicas e suporte para sua reprodução por outros professores de educação básica.

A sequência didática, vídeos de curta duração e o produto educacional desenvolvidos por nós ao longo deste trabalho podem ser acessados livremente no seguinte endereço eletrônico:

<<https://rafaelpimentell.wixsite.com/website>>

Parte do trabalho desta dissertação foi apresentada no XXIV Simpósio Nacional de Ensino de Física - SNEF realizado entre 19 a 30 de julho de 2021 - online, <<http://sbfisica.org.br/~snef/xxiv/>>, em formato de vídeo e resumo expandido como referenciado a seguir:

“UMA ABORDAGEM DIDÁTICA ALTERNATIVA PARA O ENSINO DO PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIDADE”, resumo da autoria de Rafael Filgueira Pimentel e Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho.

Capítulo 2

O problema gerador

A Física Clássica é estruturada basicamente sobre dois entes quais sejam: a onda e a partícula. A onda é um ente que uma vez emitido, propaga-se preenchendo todo o espaço, sem localização definida, troca energia suavemente, e exhibe as propriedades de difração e interferência. A partícula é um ente material concentrado, altamente localizado no espaço, troca energia de forma abrupta, e não exhibe as propriedades de difração e interferência. Ambos entes possuem comportamentos muito distintos, dispares, devido às suas características e propriedades particulares. Dessa forma, fenômenos naturais podem ser classificados como sendo ondulatórios ou corpusculares. Ao longo da história da ciência, argumentos e observações experimentais demandaram revisão desta perspectiva clássica.

2.1 A luz segundo Isaac Newton e Christiaan Huygens

Entre o final do século XVII e início do século XVIII o estudo da óptica foi pautado pelas teorias de Isaac Newton (1642-1727) e de Christiaan Huygens (1629-1695) que, na perspectiva da mecânica clássica, defenderam teorias distintas com respeito as propriedades da luz. Ambas exitosas em escrever os fenômenos de reflexão e da refração para a luz. As duas principais obras no período foram “O Tratado sobre a Luz” (1678) de Huygens e o “Óptica” (1704) de Newton.

Moura (2016) reporta que nunca ocorreu uma disputa entre Newton e Huygens acerca de suas ideias sobre os fenômenos luminosos. O que ficou marcado na história como embate entre as teorias corpuscular e ondulatória atribuídas, respectivamente, a Newton e a Huygens ficou a cargo de seus seguidores ao longo das décadas posteriores.

Newton nunca defendeu abertamente uma concepção corpuscular para a luz, sua ideia ape-

nas ficou implícita no questionamento: “Os raios de luz não são corpos minúsculos emitidos pelas substâncias que brilham?” (NEWTON, 1996 apud MOURA, 2016, p. 117). Para Newton a materialidade da luz seria apenas uma hipótese. Porém, seguidores de Newton ao reproduzirem seus escritos, propagaram (de suas próprias interpretações) um caráter corpuscular para a luz.

Que a luz é um corpo, aparece de sua reflexão, refração, composição, divisão, e seu movimento no tempo; mas especialmente por ser propagada em linhas retas, e por ser parada por um obstáculo (o quão fino for, se não transparente), o que mostra que ela não pode ser uma ação sobre o meio, que seria propagada além de um obstáculo, como no caso do som. (DESAGULIERS, 1717 apud MOURA, 2016, p. 126).

Já Huygens propôs o conceito da luz como pulsos não periódicos propagados pelo éter. As ideias de Huygens se enquadravam melhor numa concepção vibracional do que ondulatória.

Baseando-se em sua concepção de luz como pulsos não periódicos propagados pelo éter, Huygens foi hábil em construir explicações bastante sofisticadas sobre a refração e a reflexão. Por meio do “princípio de Huygens”, ele conseguiu derivar o comportamento dos raios de luz nestes dois fenômenos, explicando-os de maneira coerente do ponto de vista geométrico. (MOURA, 2016, p. 114).

“No início do século XIX, a concepção vibracional e a corpuscular já haviam passado por tantas transformações que mal poderiam ser comparadas com aquelas propostas por Huygens e Newton” (MOURA, 2016, p. 129). Como os partidários dos corpúsculos e das vibrações buscaram desenvolver suas próprias concepções acabou por se instalar um contexto de debates. “A concepção vibracional começava a dar lugar à ondulatória. A corpuscular assimilou novas propriedades e buscou explicar fenômenos que Newton não poderia imaginar que existiam” (MOURA, 2016, p. 129).

A literatura propagou debates com argumentos defensáveis a uma ou outra teoria. Aqueles que defendiam concepções ondulatórias para a luz argumentavam que:

[...]. Se a luz fosse feita de corpúsculos, como essas partículas se cruzariam no ar sem uma atrapalhar o movimento da outra? Isso não poderia estar de acordo com os fenômenos naturais. Podemos enxergar um objeto mesmo com a luz proveniente de inúmeros outros se cruzando pelo ar à nossa frente. (FORATO, 2009, vol. 2, p. 50).

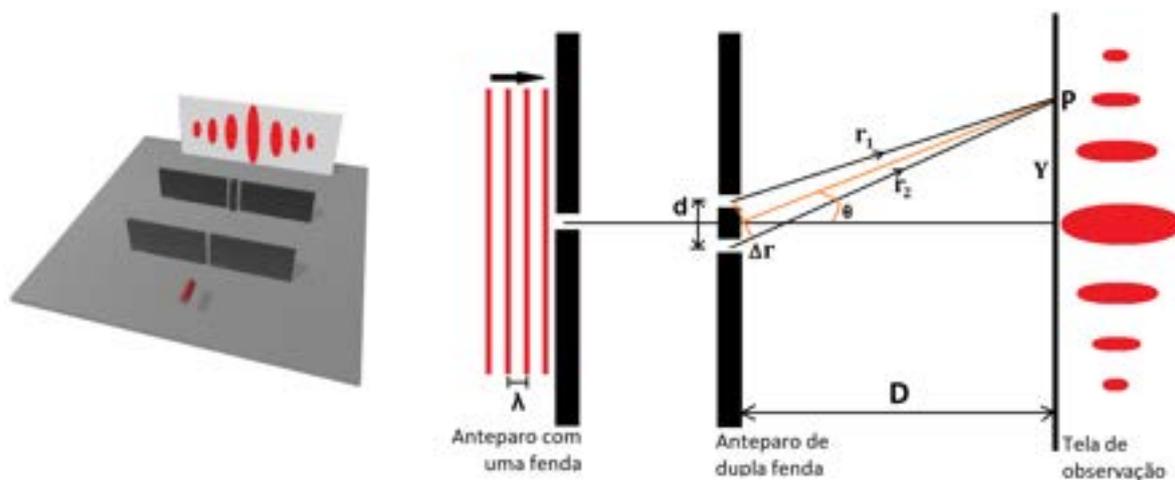
Por outro lado, partidários das concepções corpusculares defendiam que:

[...]. A luz não poderia ser uma onda no éter ..., pois, se fosse, ela contornaria os obstáculos como faz o som. O som de um sino ou de um canhão é ouvido atrás de uma montanha, mas não é possível vê-los. As ondas na água que passam margeando um obstáculo grande se curvam em direção às águas paradas do outro lado do obstáculo, mas as estrelas fixas deixam de ser vistas quando um planeta fica entre elas e a Terra. Como a luz poderia ser uma onda no éter se ela não contorna os obstáculos como o som e como as ondas na água? (FORATO, 2009, vol. 2, p. 52).

2.2 O definidor experimento de Thomas Young

No início do século XIX, os experimentos de interferência da luz em fendas duplas como representado pela ilustração na figura 1, realizados por Thomas Young (1773-1829), ofereceram sustentação à uma teoria ondulatória da luz.

Figura 1 – Ilustração de um experimento de dupla fenda evidenciando raios de luz atingindo uma tela de observação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 1 está representado um feixe de luz monocromático, que incide em um anteparo com uma fenda, compondo então um feixe colimado que incide em outro anteparo, este último dotado de duas fendas, que então dá origem a dois feixes de luz coerentes propagando-se em frentes de ondas esféricas. Na tela observa-se a formação de franjas claras e escuras devido a interferência totalmente construtiva e totalmente destrutiva, respectivamente, das ondas esféricas produzidas pelas duas fendas na segunda barreira.

Sendo D a distância entre o anteparo de dupla fenda e a tela do observação, e d a distância entre as duas fendas no anteparo, para $D \gg d$, a diferença de caminho Δr percorrido pelos

feixes de luz coerentes, em função de um ângulo θ com a horizontal, que define um ponto P a uma altura Y a partir do ponto central da tela, será:

$$\Delta r = d \sin(\theta). \quad (2.1)$$

Para interferência totalmente construtiva (franjas claras) temos: $d \sin \theta = n\lambda$. Onde n é um número inteiro e λ o comprimento da onda incidente. Se θ for pequeno, então: $\sin(\theta) \approx \tan(\theta) \approx \theta$. Logo:

$$\tan(\theta) = \frac{Y}{D} \approx \sin(\theta) = \frac{n\lambda}{d}$$

$$Y \approx \frac{Dn\lambda}{d}. \quad (2.2)$$

Para interferência totalmente destrutiva (franjas escuras) temos: $d \sin(\theta) = (n + \frac{1}{2})\lambda$, onde n é um número inteiro. Analogamente, se θ é pequeno então:

$$Y \approx \frac{D}{d}(n + \frac{1}{2})\lambda. \quad (2.3)$$

Como é possível medir D, d e as posições Y na tela de observação, das equações 2.2 e 2.3 pode-se obter experimentalmente, por uma medida direta, o comprimento de onda λ . “Na realidade, a experiência de Young foi a primeira medida direta do comprimento de onda da luz”. (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

Intensidade das figuras de interferência na tela de observação:

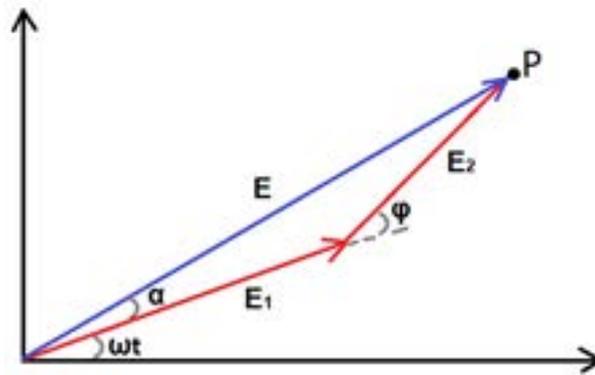
Em um ponto (P) na tela de observação, o campo elétrico resultante da superposição de duas ondas de mesma amplitude E_0 (figura 2), pode ser expresso como:

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) = E_0 \sin(\omega t) + E_0 \sin(\omega t + \varphi) = E_m \sin(\omega t + \alpha), \quad (2.4)$$

onde $E_m = \sqrt{(E_0 \cos(\omega t) + E_0 \cos(\omega t + \varphi))^2 + (E_0 \sin(\omega t) + E_0 \sin(\omega t + \varphi))^2}$ é a amplitude do campo elétrico resultante. Desenvolvendo os termos dentro da raiz chega-se a:

$$E_m = E_0 \sqrt{2 + 2 \cos(\varphi)}. \quad (2.5)$$

A intensidade é uma grandeza proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico,

Figura 2 – Ilustração do vetor campo elétrico resultante.

Fonte: Elaborada pelo autor.

assim, comparando $I(\theta)$ com a intensidade das ondas antes de considerar a interferência, I_0 , temos:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{E_m}{E_0} \right)^2. \quad (2.6)$$

Naturalmente, da equação 2.5 obtemos:

$$I(\theta) = 2I_0(1 + \cos(\varphi)) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right),$$

em que: θ é o ângulo que indica um ponto ao longa da tela de observação e $\varphi = \frac{2\pi \cdot d \sin(\theta)}{\lambda}$ indica a diferença de fase entre os campos. Portanto:

$$I(\theta) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi \cdot d \sin(\theta)}{\lambda}\right). \quad (2.7)$$

Um modelo ondulatório como expresso pela equação 2.7, é capaz de reproduzir os resultados experimentais da intensidade luminosa das figuras de interferência detectados numa tela de observação, como ilustrado na figura 1. Assim, a luz pode ser descrita como uma onda. Esta é capaz de difratar, contornar obstáculos da ordem de seu comprimento de onda, e sofre interferência consigo mesma, pois, no fenômeno da difração cada fonte luminosa produz uma frente de onda esférica que quando superpostas interferem uma com a outra, formando um padrão de interferência típico de fenômenos ondulatórios.

2.3 James C. Maxwell

Ainda no século XIX o físico e matemático James Clerk Maxwell (1831 - 1879) organizou as relações que descreviam os fenômenos elétricos e magnéticos e, associando argumentos de simetria, formulou um conjunto de equações que levaram o seu nome e que revolucionaram a física, dando surgimento a era do eletromagnetismo. As famosas “Equações de Maxwell” descrevem o comportamento das ondas eletromagnéticas. Elas podem ser expressas para o vácuo como seguem (GRIFFITHS, 1999, p. 226):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}; \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (2.11)$$

Onde, os termos representam: \vec{E} o vetor campo elétrico; ρ uma densidade volumétrica de carga elétrica; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$ uma constante chamada permissividade no vácuo; \vec{B} o vetor campo magnético; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$ uma constante intitulada permeabilidade no vácuo e \vec{J} a corrente de deslocamento.

“No tempo de Maxwell a análise vetorial não estava formalizada como a temos hoje. [...]. As Equações de Maxwell, na forma vetorial, em quatro equações, somente surgiriam após a morte de Maxwell, nos trabalhos de Oliver Heaviside (1850-1925)” (LIMA, 2019, p. 2).

As Equações de Maxwell não são apenas um belo conjunto de equações teóricas, todas foram desenvolvidas com base em experimentos laboratoriais. Três pontos importantes sobre a teoria são: primeiro - a simetria - A inclusão da corrente de deslocamento por Maxwell na equação de Ampère faz aumentar a simetria na teoria. Por outro lado, a não observação de monopolos magnéticos na natureza deixam as equações menos simétricas; segundo - a descrição das ondas eletromagnéticas - As quatro equações individuais eram conhecidas antes da época de Maxwell, e além da corrente de deslocamento nenhuma nova predição surgiu de nenhuma das equações individuais. Quando as equações de Maxwell são combinadas surge uma nova predição - a existência de ondas eletromagnéticas e um valor para a sua velocidade (a velocidade da luz); terceiro - a consistência com a relatividade - o conjunto de equações é plenamente consistente com a relatividade especial de Einstein. Em contraste com as leis de Newton, que

necessitam de consideráveis alterações para descreverem movimentos com velocidades próximas à velocidade da luz, as equações de Maxwell permanecem as mesmas para todos os observadores, independentemente das suas velocidades relativas (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2003, p. 322–323).

Equação de Onda no vácuo:

A partir da formulação das quatro equações de Maxwell é possível chegarmos numa equação de onda, demonstrando-se que a luz é uma onda eletromagnética, podendo a velocidade da luz ser calculada através de medições de grandezas puramente eletromagnéticas. Considere uma região do espaço livre de cargas ou correntes elétricas. Nesse caso, as equações de Maxwell se apresentam como (GRIFFITHS, 1999, p. 261–262):

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0; \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad (2.13)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (2.14)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (2.15)$$

Aplicando o rotacional nas duas últimas equações temos:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)$$

$$= -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \vec{B}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2},$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = \nabla \times \left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}.$$

Como $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ e $\nabla \cdot \vec{B} = 0$,

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}. \quad (2.17)$$

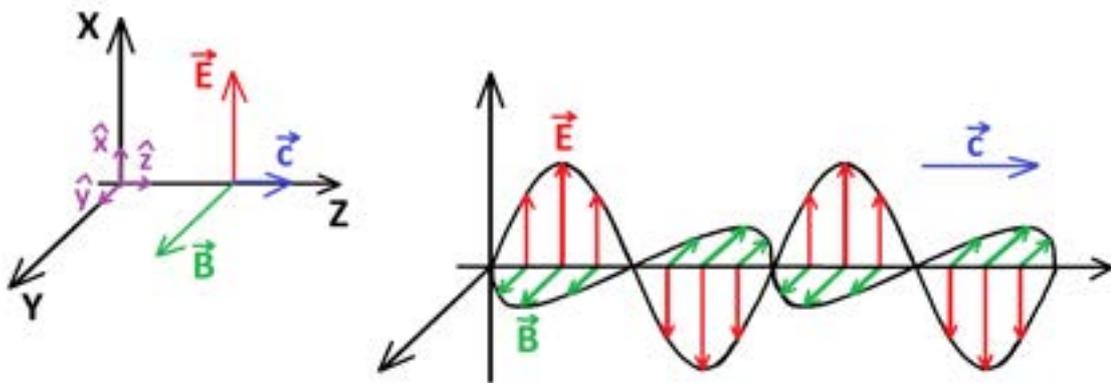
Tais expressões satisfazem a equação de onda tridimensional,

$$\nabla^2 f = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}. \quad (2.18)$$

E portanto é possível concluir que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo, livre de cargas e correntes elétricas é:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s} \equiv c. \quad (2.19)$$

Figura 3 – Ilustração da propagação de um campo eletromagnético.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A luz é uma onda eletromagnética, viaja no vácuo com velocidade de aproximadamente $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. A figura 3 representa uma ilustração da propagação do campo eletromagnético, satisfazendo a relação:

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \hat{z} \times \vec{E}. \quad (2.20)$$

2.4 Efeito fotoelétrico

Por volta de 1890, Heinrich Hertz (1857 - 1894) buscando determinar experimentalmente a geração e detecção das ondas eletromagnéticas propostas por Maxwell, observa a emissão de elétrons de uma superfície devido à incidência de luz sobre ela (figura 4). Philipp Lenard (1862 - 1947) e Wilhelm Hallwachs (1859 - 1922) observam o mesmo fenômeno de forma independente. Esse fenômeno mais tarde ficaria conhecido como efeito fotoelétrico (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 51).

Em 1905, Albert Einstein (1879 - 1955) ao tentar explicar o efeito fotoelétrico propôs que

a quantização da energia usada por Max Planck (1858 - 1947) no problema do corpo negro fosse uma característica universal da luz. Assim, qualquer energia radiante seria quantizada e transferida em pacotes concentrados, que mais tarde vieram a ser chamados fótons. Ou seja, “supôs que um tal pacote de energia está inicialmente localizado em um pequeno volume de espaço, e que permanece localizado à medida que se afasta da fonte com velocidade c . Ele supôs que a energia E do pacote, ou fóton, está relacionada com sua frequência ν pela equação” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 55).

$$E = h\nu, \quad (2.21)$$

em que, $h = 6,626,10^{-34} J.s$ é a constante de Planck.

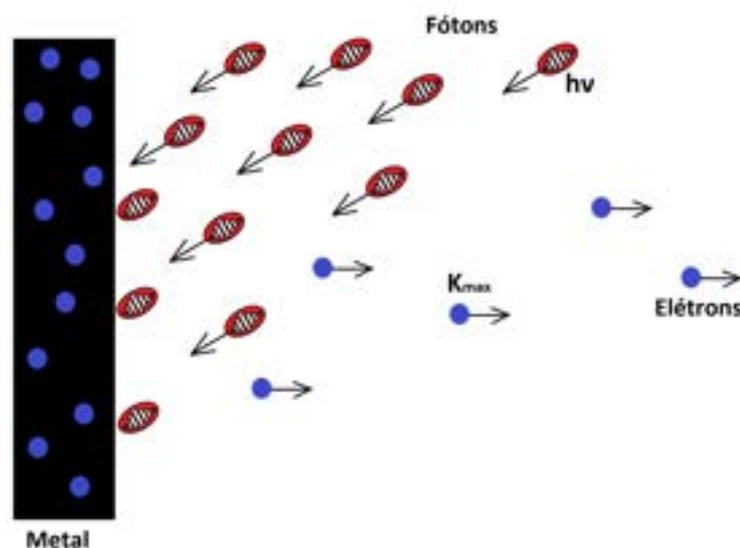
Um elétron emitido de uma superfície metálica devido ao efeito fotoelétrico, tem energia cinética máxima dada por:

$$K_{max} = E - \phi; \quad (2.22)$$

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{max} = eV_0 = h\nu - \phi. \quad (2.23)$$

Onde: m é a massa de repouso do elétron; v é a velocidade do elétron ejetado; $e = 1,602.10^{-19}C$ é a carga elementar; V_0 é um potencial de corte, aquele em que torna nula a corrente medida devido aos elétrons foto gerados e ϕ a função trabalho do metal, que corresponde a energia mínima necessária para um elétron ser ejetado da superfície do metal.

Figura 4 – Ilustração do efeito fotoelétrico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.5 Efeito Compton

Em 1923, Arthur Holly Compton (1892 - 1962) observa experimentalmente o espalhamento de raios-x por um alvo de grafite, detectando o surgimento de um comprimento de onda espalhado que difere do incidente, o que não era classicamente esperado. Para explicar o fenômeno foi preciso ir além do formalismo ondulatório para a radiação eletromagnética, pois, classicamente a onda incidente atua sobre os elétrons livres do alvo fazendo-os oscilar com a mesma frequência, assim, a onda espalhada teria a mesma frequência e conseqüentemente mesmo comprimento de onda do campo eletromagnético incidente. O fenômeno ficou conhecido como efeito Compton.

Vamos analisar alguns pontos importantes da teoria de Compton. Considere um arranjo experimental de modo que um feixe de raios-x incidente sobre um alvo de grafite é analisado por um espectrômetro em variados ângulos após a interação com o alvo. Uma curva de intensidade por comprimento de onda pode ser obtida para diferentes ângulos analisados como apresentado na figura 5.

Para modelar os resultados das observações experimentais vamos assumir que a radiação incidente é um feixe de fótons, cada fóton com energia $E = h\nu$ sendo cada um deles espalhado elasticamente por um elétron (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 61–63). Assim:

$$E^2 = c^2p^2 + (m_0c^2)^2, \quad (2.24)$$

como a massa de repouso para o fóton é nula $m_0 = 0$, então:

$$E^2 = c^2p^2 \Rightarrow p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (2.25)$$

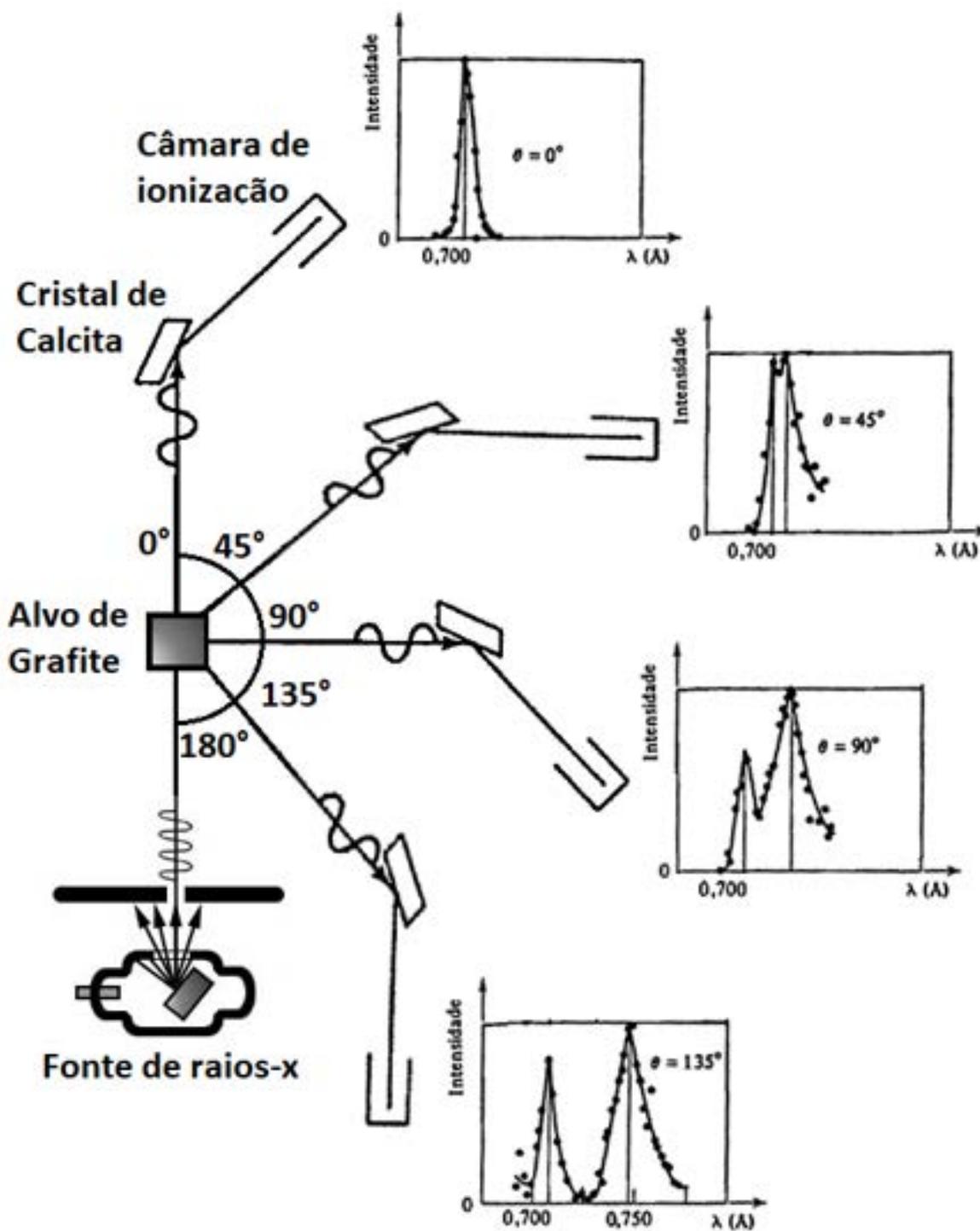
Assim, no espalhamento Compton, um fóton de momento linear:

$$p_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{h\nu_0}{c} = \frac{h}{\lambda_0},$$

incide sobre um elétron em repouso. Após a colisão, o fóton tem momento:

$$p_1 = \frac{E_1}{c} = \frac{h\nu_1}{c} = \frac{h}{\lambda_1},$$

Figura 5 – Resultados experimentais de Compton.

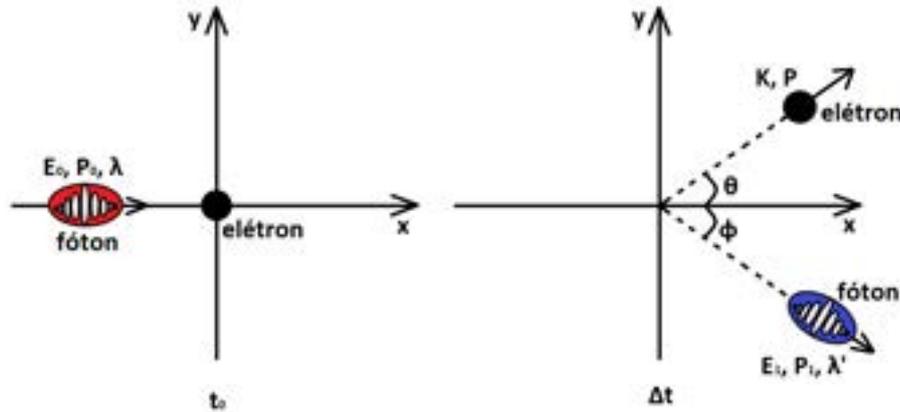


Fonte: Adaptado de Eisberg e Resnick (1979, p. 60).

enquanto o elétron tem momento p e energia:

$$E = \sqrt{c^2 p^2 + (m_e c^2)^2}.$$

Figura 6 – Ilustração da interpretação do efeito Compton, evidenciando, um fóton que colide elasticamente com um elétron.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A conservação de energia impõe que:

$$h\nu_0 + m_e c^2 = h\nu_1 + \sqrt{c^2 p^2 + (m_e c^2)^2}$$

$$(h\nu_0 - h\nu_1)^2 + (m_e c^2)^2 + 2(h\nu_0 - h\nu_1)m_e c^2 = p^2 c^2 + (m_e c^2)^2$$

$$(h\nu_0 - h\nu_1)^2 + 2(h\nu_0 - h\nu_1)m_e c^2 = p^2 c^2. \quad (2.26)$$

A conservação do momento impõe que:

$$\vec{p}_0 = \vec{p}_1 + \vec{p} \Rightarrow \vec{p} = \vec{p}_0 - \vec{p}_1$$

$$\vec{p} \cdot \vec{p} = (\vec{p}_0 - \vec{p}_1) \cdot (\vec{p}_0 - \vec{p}_1) = \vec{p}_0 \cdot \vec{p}_0 + \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 - 2\vec{p}_0 \cdot \vec{p}_1$$

O modulo dos vetores momento se relacionam como:

$$p^2 = p_0^2 + p_1^2 - 2p_0 p_1 \cos(\theta) = \left(\frac{h}{\lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda_1}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{\lambda_0}\right)\left(\frac{h}{\lambda_1}\right)\cos(\theta)$$

$$\Rightarrow p^2 c^2 = (h\nu_0)^2 + (h\nu_1)^2 - 2(h\nu_0)(h\nu_1)\cos(\theta). \quad (2.27)$$

Substituindo 2.27 em 2.26, obtemos:

$$\begin{aligned}
 (h\nu_0 - h\nu_1)^2 + 2(h\nu_0 - h\nu_1)m_e c^2 &= (h\nu_0)^2 + (h\nu_1)^2 - 2(h\nu_0)(h\nu_1) \cos(\theta) \\
 (h\nu_0)^2 + (h\nu_1)^2 - 2(h\nu_0)(h\nu_1) + 2(h\nu_0 - h\nu_1)m_e c^2 &= (h\nu_0)^2 + (h\nu_1)^2 - 2(h\nu_0)(h\nu_1) \cos(\theta) \\
 2(h\nu_0 - h\nu_1)m_e c^2 &= 2(h\nu_0)(h\nu_1)(1 - \cos(\theta)) \\
 \left(\frac{\nu_0 - \nu_1}{\nu_0 \nu_1}\right) &= \left(\frac{h}{m_e c^2}\right) (1 - \cos(\theta)) \\
 \Delta\lambda = (\lambda_1 - \lambda_0) &= \left(\frac{h}{m_e c}\right) (1 - \cos(\theta)) = \lambda_c(1 - \cos(\theta)) \\
 \Rightarrow \Delta\lambda &= \lambda_c(1 - \cos(\theta)), \tag{2.28}
 \end{aligned}$$

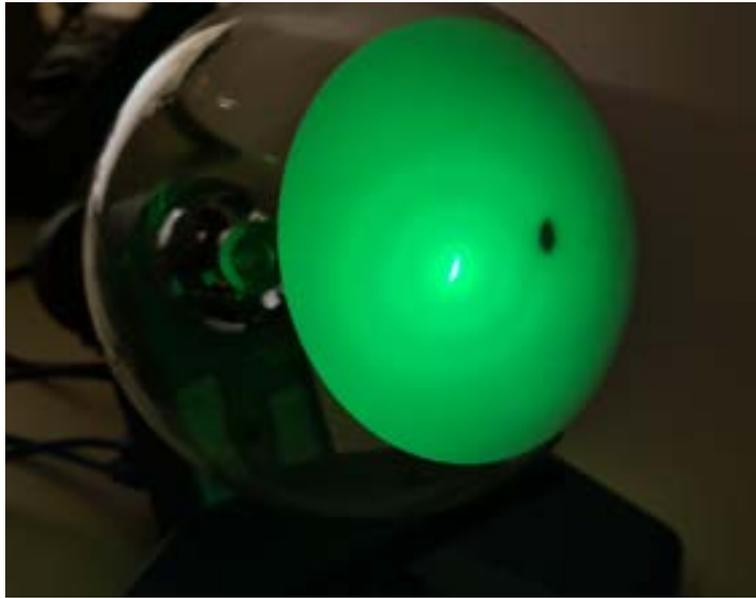
onde λ_c é o comprimento de onda de Compton ($\lambda_c \simeq 0,0243 \text{ \AA}$).

Tal resultado teórico concorda muito bem com as medidas experimentais apresentado na figura (5). Portanto, segundo o modelo proposto, no efeito Compton, um fóton colide elasticamente com um elétron (figura 6) revelando a natureza corpuscular da luz.

2.6 Difração de elétrons

Não foi apenas a luz a apresentar características estranhas para à mecânica clássica. Os elétrons também desafiaram essa teoria. Elétrons são conhecidos como partículas elementares de massa $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, carga elementar $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ e spin $S = \frac{1}{2}$. Todavia, foi observado experimentalmente uma figura de interferência quando elétrons difrataram por um alvo de grafite como mostrado no resultado experimental da figura 7.

Para Louis de Broglie (1892 - 1987) “assim como um fóton tem associado a ele uma onda luminosa que governa seu movimento, também uma partícula material (por exemplo um elétron) tem associada a ela uma onda de matéria que governa seu movimento” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 87). Ele postula que tanto matéria, quanto radiação eletromagnética, possuem energia E relacionada à frequência ν associada ao seu movimento, assim como, o momento P é relac-

Figura 7 – Imagem de um experimento de difração de elétrons.

Fonte: Elaborada pelo autor.

onado com o comprimento de onda λ da onda associada, respectivamente, pelas equações:

$$E = h\nu; \quad (2.29)$$

$$P = \frac{h}{\lambda}. \quad (2.30)$$

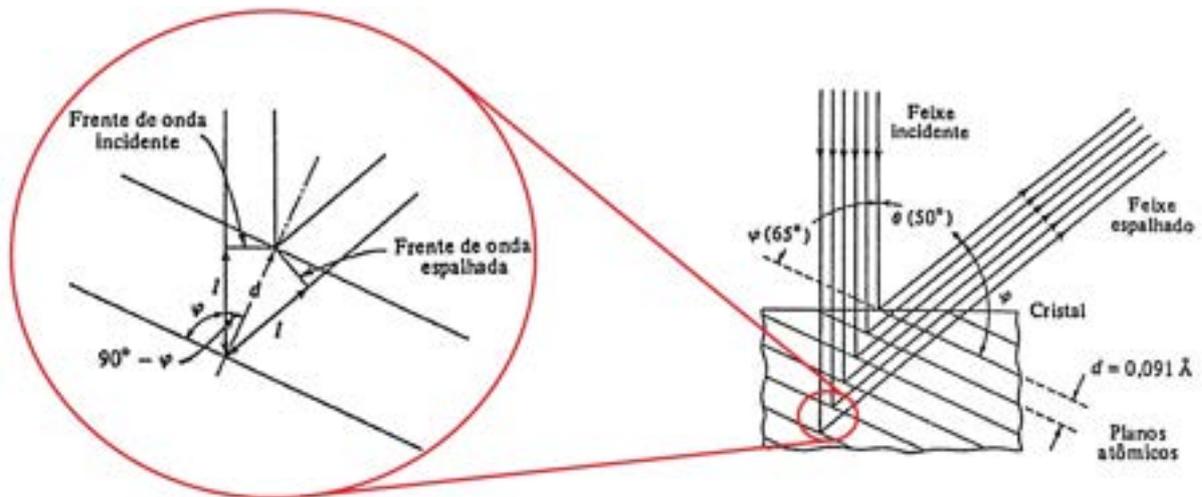
O padrão de interferência observada na figura 7 tem origem pela difração das ondas associadas aos elétrons na rede cristalina de grafite. O fenômeno é análogo a “reflexão de Bragg” que ocorre no espalhamento de raios X por planos atômicos de um cristal. Na figura 8 é ilustrado um feixe difratado que surge do espalhamento das ondas incidentes pelo conjunto de planos atômicos. Uma interferência totalmente construtiva nesse sistema ocorrerá quando um número inteiro de comprimento de onda $n\lambda$ surgir da diferença de fase entre as frentes de onda incidente e espalhada no percurso $2l$ entre planos. Analisando a geometria na figura 8 observa-se que:

$$\sin(\varphi) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \frac{l}{d} = \frac{n\lambda}{2d}. \quad (2.31)$$

Obtemos assim, a relação de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin(\varphi). \quad (2.32)$$

Figura 8 – Ilustração da difração em planos atômicos, satisfazendo à relação de Bragg.



Fonte: Adaptado de Eisberg e Resnick (1979, p. 90).

2.7 O princípio da complementaridade

O princípio da complementaridade foi introduzido por Niels Bohr em 1927, constituindo a base de sua interpretação da mecânica quântica, que em 1935 adquiriu sua forma final, que, segundo Pessoa Jr (2006a, p. 18) pode ser expressa como segue:

Um sistema quântico ou exibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.

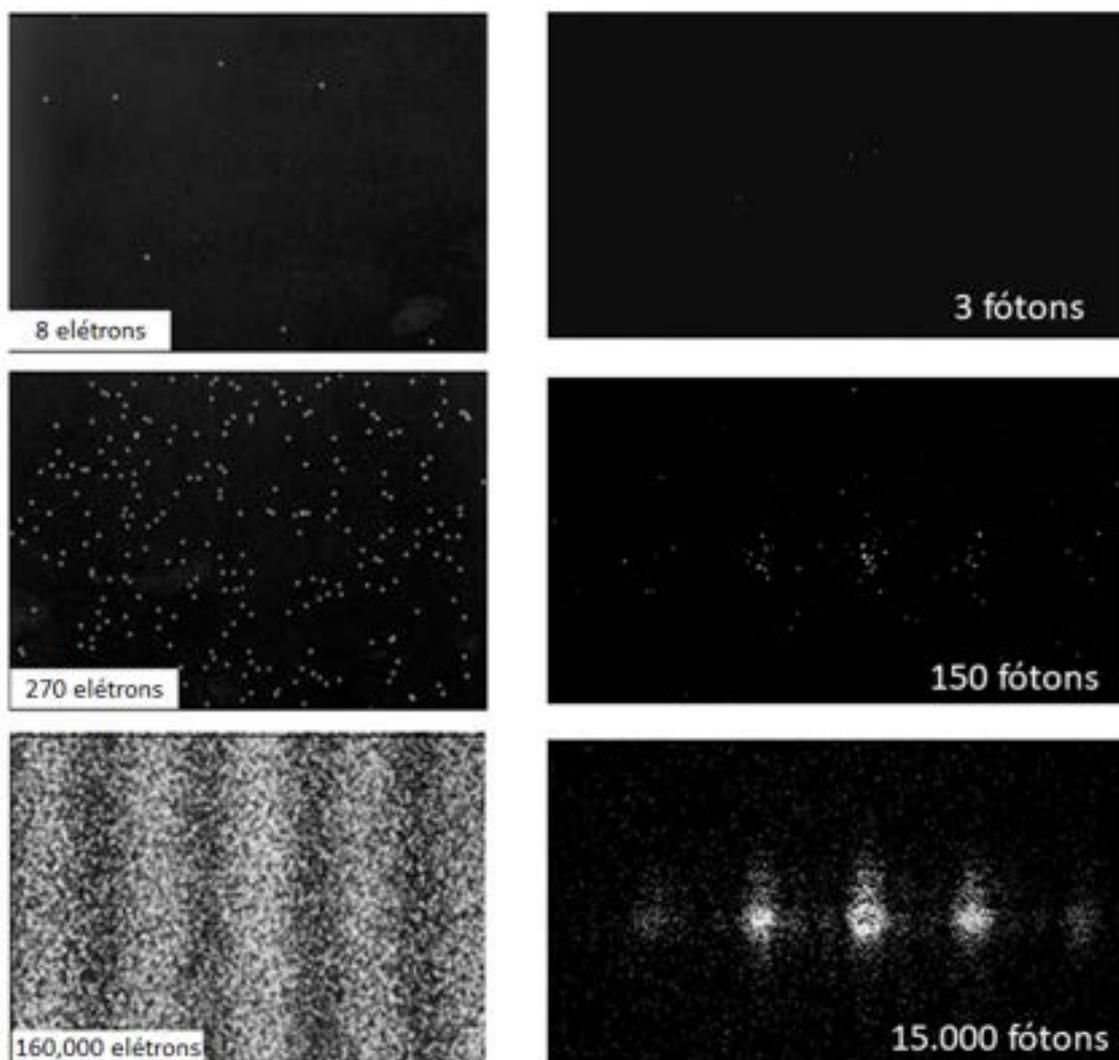
O princípio da complementaridade como proposto por Bohr é uma declaração qualitativa sobre características clássicas e mutuamente excludentes de um objeto quântico, tais como fótons, elétrons, etc.

2.8 Interferência de um feixe de baixíssima intensidade

Um feixe luminoso de baixíssima intensidade é obtido diminuindo-se consideravelmente a intensidade do feixe, de modo que seja alcançado um regime de emissão de fótons únicos ou elétrons únicos. A figura 9 apresenta resultados experimentais realizados com fótons e elétrons nesse regime de emissão. As imagens resultantes da incidência de muitos elétrons e fótons revelam um padrão de interferência típico do comportamento ondulatório, mas não são ondas clássicas visto que um único elétron ou um único fóton não gera uma figura de interferência completa, mas produz somente uma marca sobre o anteparo, como se fosse uma partícula

clássica. Entretanto esta marca estará em uma região da figura de interferência resultante da incidência de vários elétrons ou de vários fótons. Assim elétrons e fótons apresentam características de partículas e de ondas clássicas, entretanto não são nenhuma coisa nem outra.

Figura 9 – Imagens de padrões de interferência em telas de observação, devido à incidência de um feixe de baixíssima intensidade de: **esquerda** - elétrons; **direita** - fótons. Evidência-se o número de fótons e elétrons únicos com o tempo de detecção.



Fonte: **Esquerda:** (TONOMURA et al., 1989); adaptado de: https://www.hitachi.com/rd/research/materials/quantum/doubleslit/pop2_w.html. **Direita:** obtidas por Robert Austin e Lyman Page, na Princeton University, disponíveis em: Pesic (2002).

Com o exposto até aqui, pôde-se observar que não é possível com argumentos puramente clássicos descrever em sua totalidade certos fenômenos experimentais como ondulatórios ou corpusculares. Foi necessário a construção de um novo formalismo - a Física Quântica.

Capítulo 3

A Física e a Óptica Quântica

No início do século XX, compreender a matéria em escala microscópica demandou romper paradigmas bem estabelecidos da Física Clássica, dando origem ao que conhecemos hoje como Física Quântica. Os conceitos de realidade física precisaram ser rediscutidos considerando o estranho objeto dual sobre o qual a Física Quântica estava sendo erguida, para o qual um novo formalismo estruturante precisou ser desenvolvido. Desde então, a Física Quântica vem sendo constantemente testada e aprimorada pela comunidade científica. Encontra-se na literatura os fundamentos e o formalismo da Física Quântica em Eisberg e Resnick (1979), Griffiths (2011), Oliveira (2020), Perez (2016), dentre outros.

3.1 Uma breve descrição do formalismo

Em termos gerais o formalismo da Física Quântica baseia-se em incorporar as duas noções clássicas conflitantes de onda e partícula, ao qual exploramos no capítulo anterior. Essa “união” é feita atribuindo-se uma função de onda a objetos parecidos com partículas, como elétrons, por exemplo. A tarefa resume-se a calcular a função de onda e a partir dela encontrar os valores das quantidades físicas mensuráveis importantes, como, por exemplo, momento, energia e posição.

O estado de um objeto dentro de um sistema quântico - “objeto quântico” - é determinado por sua função de onda Ψ que é uma função tanto da posição \vec{r} quanto do tempo t . A função de onda $\Psi(\vec{r}, t)$ é uma função intrinsecamente complexa, não possui uma realidade física, simplesmente é um instrumento matemático existente dentro da teoria quântica. Sua definição é dada de modo que a probabilidade de se encontrar um objeto quântico dentro de um incremento de

volume dV seja:

$$\mathcal{P}(\vec{r}, t)dV = |\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV. \quad (3.1)$$

$$P = \int |\Psi(\vec{r}, t)|^2 d^3r = 1. \quad (3.2)$$

Em analogia à mecânica clássica, onde a dinâmica dos corpos é descrita pelas leis de Newton, na mecânica quântica a dinâmica da função de onda associada ao objeto quântico é dado pela equação de Schrodinger:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + \hat{V}(\vec{r})\Psi(\vec{r}, t), \quad (3.3)$$

em que, i é a unidade imaginária, \hbar é a constante de Planck dividida por 2π , m a massa do objeto em análise e $\hat{V}(\vec{r})$ representa uma energia potencial.

Utilizando-se do método da separação de variáveis, podemos reescrever a função de onda como uma parte dependente apenas da posição e outra dependente apenas do tempo, da seguinte forma:

$$\Psi(\vec{r}, t) = \psi(\vec{r})\Phi(t). \quad (3.4)$$

Aplicando esta à equação de Schrodinger, obtemos:

$$\frac{i\hbar}{\Phi(t)} \frac{d}{dt} \Phi(t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\psi(\vec{r})} \nabla^2 \psi(\vec{r}) + \hat{V}(\vec{r}).$$

A função de onda dependente do tempo $\Phi(t)$, é facilmente obtida resolvendo a seguinte equação diferencial de primeira ordem:

$$\frac{i\hbar}{\Phi(t)} \frac{d}{dt} \Phi(t) = E, \quad (3.5)$$

onde E é a energia total do sistema. Obtendo-se o seguinte resultado:

$$\Phi(t) = e^{\frac{-i}{\hbar}Et} = e^{-i\omega t}. \quad (3.6)$$

Já a função de onda dependente da posição $\psi(\vec{r})$, será obtida pelo segundo termo da igualdade, pela equação:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}) + \hat{V}(\vec{r})\psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r}), \quad (3.7)$$

que é denominada equação de Schrodinger independente do tempo.

Notação de Dirac:

Existe para qualquer sistema físico isolado, um espaço vetorial complexo associado, que é denominado espaço de estados ou espaço de Hilbert. Um vetor nesse espaço é chamado de “ket” e denotados por:

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |n\rangle. \quad (3.8)$$

O vetor complexo conjugado ou transposto de um “ket” é denominado “bra” e representado como:

$$\langle\psi| = \sum_m c_m^\dagger \langle m|. \quad (3.9)$$

O produto escalar entre um “ket” e um “bra” é chamado “braket” e denotado por:

$$\langle\psi|\psi\rangle = \sum_{n,m} c_m^\dagger c_n \langle m|n\rangle = \sum_{n,m} c_m^\dagger c_n \delta_{m,n} = \sum_n |c_n|^2 = 1. \quad (3.10)$$

A última igualdade implica condição de normalização e ortogonalidade, de modo que:

$$\int \psi_m^\dagger \psi_n d^3r = \delta_{m,n}. \quad (3.11)$$

Um operador \hat{O} possui um conjunto próprio de autofunções, que podem ser encontradas calculando-se a equação de autovalor correspondente:

$$\hat{O}|n\rangle = c_n |n\rangle. \quad (3.12)$$

A média dos valores observáveis é expressa por:

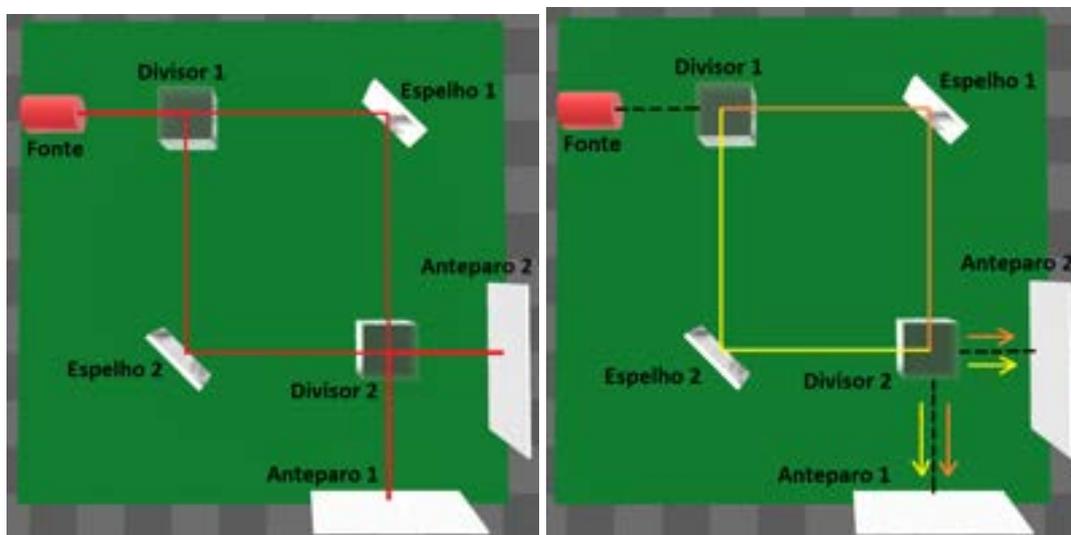
$$\langle m|\hat{O}|n\rangle \equiv \int \psi_m^\dagger \hat{O} \psi_n d^3r = \langle \hat{O} \rangle. \quad (3.13)$$

Seguiremos agora para a próxima seção a fim de aplicar a teoria e entender o comportamento de um objeto quântico utilizando um arranjo experimental.

3.2 Interferômetro de Mach-Zehnder - IMZ

O IMZ é um aparato experimental que permite explorar diversos arranjos experimentais para estudar fenômenos ópticos. Ele é constituído por uma fonte emissora de radiação, um par de anteparos de observação, dois espelhos planos e dois divisores de feixe ou semi-espelhos, dispostos sobre uma mesa óptica. “Tem sido largamente utilizado em interferometria com átomos, pesquisas ligadas à criptografia quântica, óptica quântica e emaranhamento quântico” (NETTO, 2015, p. 37).

Figura 10 – Ilustração de um Interferômetro de Mach-Zehnder.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os divisores de feixe, considerados simétricos, refletem 50% da luz e transmitem os outros 50% da luz neles incidente, tendo a finalidade de dividir (no divisor 1) e recombinar (no divisor 2) a radiação incidente. Os espelhos refletem 100% da luz incidente de modo a direcionar os feixes do divisor 1 para o 2. Os anteparos de observação são detectores da radiação incidente (figura 10).

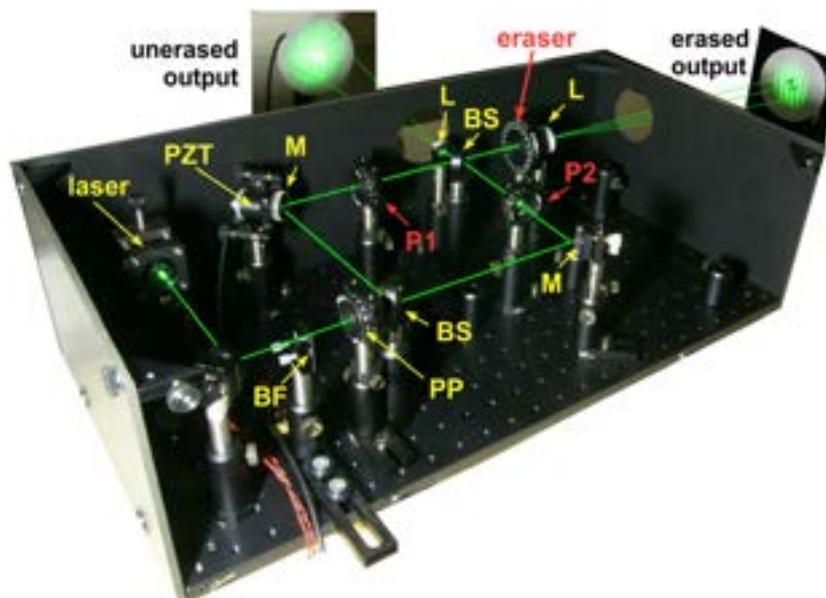
Numa descrição ondulatória, um feixe contínuo luminoso que incide no IMZ, é dividido no semi-espelho 1 em dois feixes com a metade da intensidade cada e, seguem um para cada caminho (luz refratada – caminho 1; luz refletida – caminho 2). Após ser recombinado no semi-espelho 2, o feixe de luz segue para os anteparos de observação. Nos espelhos, uma reflexão da luz induz uma mudança de fase de π , que corresponde a uma diferença de caminho de $\frac{\lambda}{2}$, em termos do comprimento de onda λ . Nos divisores de feixe a reflexão provoca uma mudança de fase de $\frac{\pi}{2}$, conseqüentemente, uma diferença de caminho de $\frac{\lambda}{4}$. Desse modo, em termos da diferença de caminho $\Delta r = \lambda_2 - \lambda_1$, na região central dos anteparos 2 e 1 ocorre, respectiva-

mente, interferência totalmente construtiva $\left(\Delta r = \frac{3\lambda}{4} - \frac{3\lambda}{4} = 0\right)$ e interferência totalmente destrutiva $\left(\Delta r = \lambda - \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}\right)$. (NETTO, 2015, p. 38–39).

3.3 A Óptica Quântica do IMZ

Como dito, o Interferômetro de Mach-Zehnder é um aparato experimental. A figura 11 apresenta uma imagem real do IMZ que exemplifica as trajetórias possíveis para o feixe de luz saindo da fonte até atingir os anteparos de observação, passando pelos componentes dispostos sobre a mesa óptica.

Figura 11 – Interferômetro Mach-Zehnder para a demonstração da interferência de luz (clássico) e de fótons únicos (quântico). As linhas verdes são desenhadas para ilustrar os caminhos da luz. Evidência-se os elementos: laser, filtro de bloqueio - BF (“blocking filter”), transdutor piezoelétrico - PZT (“piezo-electric transducer”), pré-polarizador - pp (“prepolarizer”), divisores de feixe - BS (“beam splitters”), espelhos - M (“mirrors”), lentes - L (“lenses”), polarizadores P_1 e P_2 , apagador (“eraser”), saída não apagada (“unerased output”) e saída apagada (“erased output”).



Fonte: Reproduzida de Dimitrova e Weis (2010).

Analizando apenas o Divisor 1 do IMZ:

Uma peça central e fundamental no interferômetro é o divisor de feixe ou semi-espelho. Vamos considerar aqui ondas eletromagnéticas polarizadas planas, todas com a mesma frequência e mesma polarização perpendicular ao plano incidente. Consideramos ainda os divisores de feixe simétricos e ideais, sem perdas, o que implicará na conservação de energia do sistema. A figura 12 apresenta um divisor de feixe evidenciando os estados de entrada $|\Psi_{1,2}\rangle$ e saída $|\Psi_{3,4}\rangle$,

de modo que $|\Psi_{1,2}\rangle = |1\rangle_1|0\rangle_2$, onde $|1\rangle_1$ representa o estado de um fóton no modo 1 (portão de entrada (1)) e $|0\rangle_2$ representa vácuo no modo 2 (portão de entrada (2)). Para a descrição da Óptica Quântica que seguirá, tomamos como base na literatura os estudos apresentados por Grynberg, Aspect e Fabre (2010) e o curso Aspect e Brune (2017).

Com o intuito de entender o comportamento do fóton ao interagir com o divisor, observemos inicialmente que o campo elétrico é descrito por:

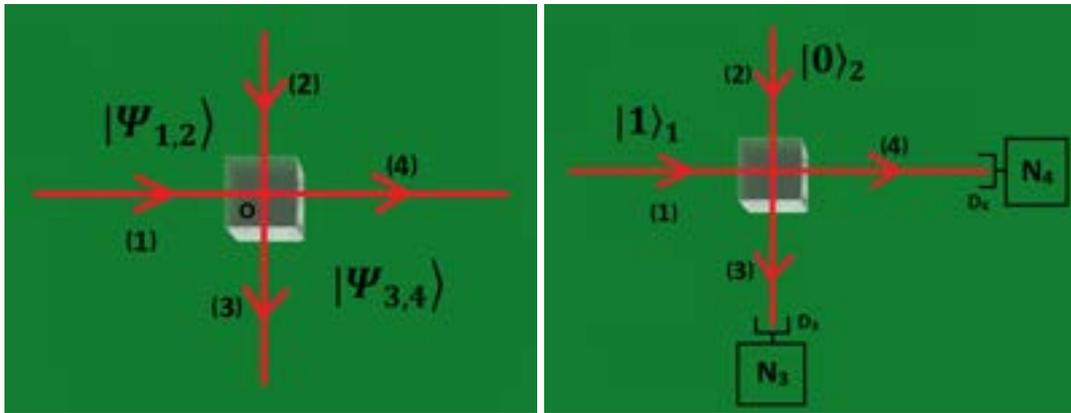
$$\hat{E}(\vec{r}) = i\vec{\varepsilon}_\ell \xi_\ell^{(1)} (\hat{a}_\ell e^{i(\vec{k}_\ell \cdot \vec{r})} - \hat{a}_\ell^\dagger e^{-i(\vec{k}_\ell \cdot \vec{r})}), \quad (3.14)$$

$$\hat{E}^{(+)}(\vec{r}) = i \sum \vec{\varepsilon}_\ell \xi_\ell^{(1)} \hat{a}_\ell e^{i(\vec{k}_\ell \cdot \vec{r})}, \quad (3.15)$$

$$\hat{E}^{(-)}(\vec{r}) = -i \sum \vec{\varepsilon}_\ell \xi_\ell^{(1)} \hat{a}_\ell^\dagger e^{-i(\vec{k}_\ell \cdot \vec{r})}, \quad (3.16)$$

onde: \vec{r} é o vetor posição; \vec{k}_ℓ é o vetor de onda com módulo $|\vec{k}_\ell| = \frac{\omega_\ell}{c}$; \hat{a}_ℓ e \hat{a}_ℓ^\dagger são, respectivamente, os operadores de aniquilação e criação; $\xi_\ell^{(1)} = \sqrt{\frac{\hbar\omega_\ell}{2\varepsilon_0V_\ell}}$ é uma constante e $\vec{\varepsilon}_\ell$ um vetor unitário.

Figura 12 – Divisor de feixe de um Interferômetro de Mach-Zehnder.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Podemos representar a transformação entre os estados no espaço de entrada (in) e saída (out) da seguinte forma:

$$|\Psi_{out}\rangle = U|\Psi_{in}\rangle, \quad (3.17)$$

em que U é uma transformação unitária.

A média de um observável fica expressa por:

$$\langle \hat{O}_{out} \rangle = \langle \Psi_{out} | \hat{O}_{out} | \Psi_{out} \rangle = (\langle \Psi_{in} | U^\dagger) \hat{O}_{out} (U | \Psi_{in} \rangle)$$

$$\langle \hat{O}_{out} \rangle = \langle \Psi_{in} | \left(U^\dagger \hat{O}_{out} U \right) | \Psi_{in} \rangle$$

$$\hat{O}_{in} = U^\dagger \hat{O}_{out} U.$$

$$\langle \hat{O}_{out} \rangle = \langle \Psi_{in} | \hat{O}_{in} | \Psi_{in} \rangle$$

Portanto:

$$\langle \Psi_{in} | \hat{O}_{in} | \Psi_{in} \rangle = \langle \Psi_{out} | \hat{O}_{out} | \Psi_{out} \rangle, \quad (3.18)$$

$$\langle \Psi_{1,2} | \hat{O}_{1,2} | \Psi_{1,2} \rangle = \langle \Psi_{3,4} | \hat{O}_{3,4} | \Psi_{3,4} \rangle, \quad (3.19)$$

sendo que $\hat{O}_{out} = \hat{E}_{out}^{(-)} \hat{E}_{out}^{(+)}$ é um observável.

Expressando $\hat{E}_{out}^{(-)} \hat{E}_{out}^{(+)}$ em função dos operadores \hat{E}_1, \hat{E}_2 e calculando a média no estado de entrada, obtemos:

$$\hat{E}_3^{(+)} = r \hat{E}_1^{(+)} + t \hat{E}_2^{(+)}, \quad (3.20)$$

$$\hat{E}_4^{(+)} = t \hat{E}_1^{(+)} - r \hat{E}_2^{(+)}, \quad (3.21)$$

onde r é a amplitude de reflexão e t a amplitude de transmissão no divisor, ambos termos complexos, de modo que: $r^2 + t^2 = 1$. Note, foi expresso o resultado apenas com relação ao operador de aniquilação, pois, como o processo é de detecção, e o ato de detectar destrói o fóton.

Vamos agora calcular a taxa de detecção única do fóton, que é expressa por:

$$W^{(1)}(\vec{r}, t) = s \langle \Psi(t) | \hat{E}^{(-)}(\vec{r}) \hat{E}^{(+)}(\vec{r}) | \Psi(t) \rangle = s \|\hat{E}^{(+)}(\vec{r}) | \Psi(t) \rangle\|^2. \quad (3.22)$$

Para o detector D_4 , considerando tempo igual a zero e $\vec{r} = 0$, aplicando a equação 3.21 e depois 3.15, obtemos:

$$W^{(1)}(\vec{r}_4, t) = s \|\hat{E}_4^{(+)} | \Psi_{1,2} \rangle\|^2 = s \|(t \hat{E}_1^{(+)} - r \hat{E}_2^{(+)}) | \Psi_{1,2} \rangle\|^2$$

$$W^{(1)}(\vec{r}_4, t) = s [\xi_\ell^{(1)}]^2 \|(t \hat{a}_1 - r \hat{a}_2) |1\rangle_1 |0\rangle_2\|^2$$

Note, como:

$$\hat{a}_\ell |1\rangle_\ell = |0\rangle, \quad (3.23)$$

$$\hat{a}_\ell |0\rangle_\ell = 0, \quad (3.24)$$

$$\| |0\rangle \|^2 = 1, \quad (3.25)$$

então:

$$\hat{a}_1 |1\rangle_1 |0\rangle_2 = |0\rangle_1 |0\rangle_2$$

e

$$\hat{a}_2 |1\rangle_1 |0\rangle_2 = |1\rangle_1 \otimes \hat{a}_2 |0\rangle_2 = 0$$

Portanto:

$$W^{(1)}(\vec{r}_4, t) = s[\xi_\ell^{(1)}]^2 t^2 = s[\xi_\ell^{(1)}]^2 T, \quad (3.26)$$

onde T é a intensidade do coeficiente de transmissão.

A probabilidade de encontrar o fóton em D_4 será:

$$dp(\vec{r}, t) = W^{(1)}(\vec{r}, t) dS dt. \quad (3.27)$$

$$P_4 = \int_{T_\ell} dt \iint_S dS W^{(1)}(\vec{r}, t) = S_\ell T_\ell s[\xi_\ell^{(1)}]^2 T = \frac{V_\ell}{c} s \left(\frac{\hbar\omega_\ell}{2\varepsilon_\ell V_\ell} \right) T$$

$$P_4 = \left(\frac{s\hbar\omega_\ell}{2\varepsilon_\ell c} \right) T$$

$$P_4 = \eta T, \quad (3.28)$$

em que η é a eficiência quântica. Multiplicando este resultado pelo número de pacotes de fótons enviados durante o experimento (N_{WP}), obtemos a contagem no detector, ou seja:

$$N_4 = \eta T N_{WP}. \quad (3.29)$$

Analogamente pode-se fazer o mesmo procedimento para o detector D_3 , de modo que a taxa de detecção única será:

$$W^{(1)}(\vec{r}_3, t) = s[\xi_\ell^{(1)}]^2 r^2 = s[\xi_\ell^{(1)}]^2 R, \quad (3.30)$$

onde R é a intensidade do coeficiente de reflexão; A probabilidade de encontrar o fóton é dado por:

$$P_3 = \eta R, \quad (3.31)$$

e o número de contagens do detector é:

$$N_3 = \eta R N_{WP}. \quad (3.32)$$

Calculando-se agora a taxa de detecção dupla do fóton, usa-se a seguinte expressão:

$$W^{(2)}(\vec{r}, t; \vec{r}', t') = s^2 \|\hat{E}^{(+)}(\vec{r}') \hat{E}^{(+)}(\vec{r}) |\Psi(t)\rangle\|^2. \quad (3.33)$$

Logo:

$$\begin{aligned} W^{(2)}(\vec{r}_3, \vec{r}_4, t) &= s^2 \|\hat{E}_3^{(+)} \hat{E}_4^{(+)} |\Psi_{1,2}\rangle\|^2 \\ W^{(2)}(\vec{r}_3, \vec{r}_4, t) &= s^2 \left\| \left(r \hat{E}_1^{(+)} + t \hat{E}_2^{(+)} \right) \left(t \hat{E}_1^{(+)} - r \hat{E}_2^{(+)} \right) |1\rangle_1 |0\rangle_2 \right\|^2 \\ W^{(2)}(\vec{r}_3, \vec{r}_4, t) &= s^2 \left\| r t \hat{E}_1^{(+)} \hat{E}_1^{(+)} |1\rangle_1 |0\rangle_2 \right\|^2 \\ W^{(2)}(\vec{r}_3, \vec{r}_4, t) &= s^2 \left\| r t \hat{E}_1^{(+)} |0\rangle |0\rangle_2 \right\|^2 = 0. \end{aligned} \quad (3.34)$$

A taxa de detecção dupla do fóton é nula, o que é um resultado muito interessante e importante, pois note:

$$d^2 p(\vec{r}, t; \vec{r}', t) = W^{(2)}(\vec{r}, t; \vec{r}', t) dS dt dS' dt. \quad (3.35)$$

$$W^{(2)}(\vec{r}_3, \vec{r}_4, t) = 0 \Rightarrow P = 0.$$

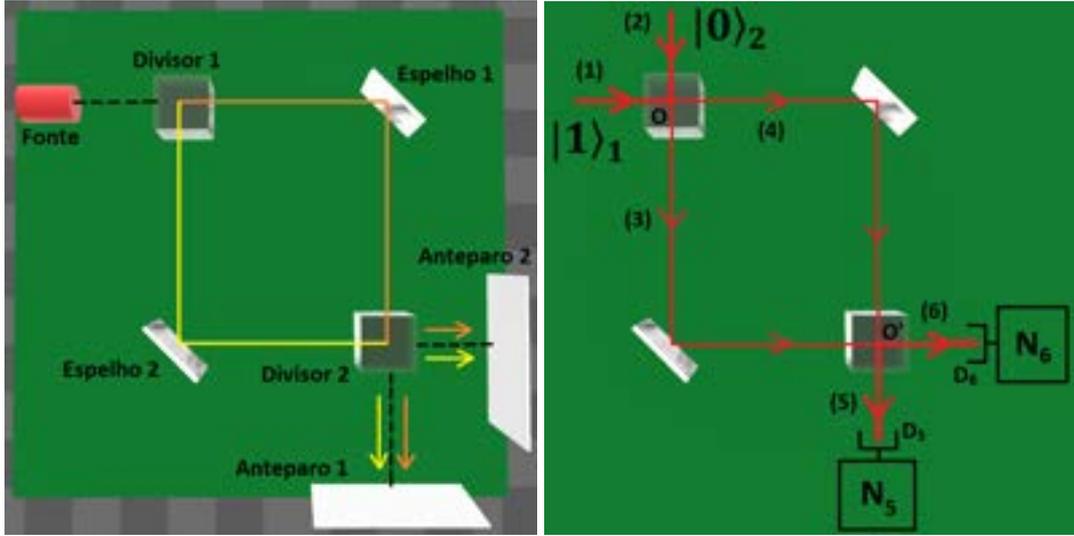
Um fóton não pode ser detectado duas vezes. A probabilidade de encontrar uma dupla detecção do fóton é nula. Isso revela que ao passar pelo divisor de feixe o fóton só pode seguir por um único caminho, ou seja, o fóton é indivisível. Esse resultado revela uma característica corpuscular ao fóton.

Analizando o conjunto completo do IMZ:

Na figura 13 podemos observar que as trajetórias possíveis no IMZ são devido aos divisores 1 e 2 que dividem e recombina as trajetórias até os detectores.

Um ponto importante a esclarecer é a simetria do sistema referente aos divisores de feixe.

Figura 13 – Interferômetro de Mach-Zehnder.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além de considerados ideais, pois, não dissipam energia do sistema e não mudam a polarização da luz incidente, o formato cúbico destes dispositivos são considerados simétricos por possuírem o mesmo coeficiente de reflexão e de refração independentemente do caminho 1 ou 2 de entrada, e cada caminho passando por (3) ou por (4) (figura 13) cruzam o mesmo número de vezes o material dielétrico. Esse detalhe experimental é preferível e crucial para definirmos os operadores de saída $\hat{E}_5^{(+)}$ e $\hat{E}_6^{(+)}$ no divisor 2, análogo as equações 3.20 e 3.21. Como segue:

$$\hat{E}_5^{(+)} = -r\hat{E}_3^{(+)}(O') + t\hat{E}_4^{(+)}(O'), \quad (3.36)$$

$$\hat{E}_6^{(+)} = t\hat{E}_3^{(+)}(O') + r\hat{E}_4^{(+)}(O'). \quad (3.37)$$

Quando atingido o divisor 2 no ponto O' devemos considerar a dependência do caminho percorrido (lembre da equação 3.15), que será denotado por L_3 e L_4 para quando houver, respectivamente, reflexão e transmissão no divisor 1. Assim, as equações 3.20 e 3.21 ficam:

$$\hat{E}_3^{(+)}(O') = e^{ikL_3} \left(r\hat{E}_1^{(+)} + t\hat{E}_2^{(+)} \right), \quad (3.38)$$

$$\hat{E}_4^{(+)}(O') = e^{ikL_4} \left(t\hat{E}_1^{(+)} - r\hat{E}_2^{(+)} \right). \quad (3.39)$$

Logo, substituindo 3.38 e 3.39 em 3.36, obtemos:

$$\hat{E}_5^{(+)} = -re^{ikL_3} \left(r\hat{E}_1^{(+)} + t\hat{E}_2^{(+)} \right) + te^{ikL_4} \left(t\hat{E}_1^{(+)} - r\hat{E}_2^{(+)} \right)$$

$$\hat{E}_5^{(+)} = (t^2 e^{ikL_3} - r^2 e^{ikL_4}) \hat{E}_1^{(+)} - rt (e^{ikL_3} + e^{ikL_4}) \hat{E}_2^{(+)}.$$

Aplicando $|\Psi_{1,2}\rangle = |1\rangle_1 |0\rangle_2$ e lembrando da equação 3.15, então:

$$\hat{E}_5^{(+)} |1\rangle_1 |0\rangle_2 = i\xi_\ell^{(1)} (t^2 e^{ikL_3} - r^2 e^{ikL_4}) \hat{a}_1 |1\rangle_1 |0\rangle_2 - irt\xi_\ell^{(1)} (e^{ikL_3} + e^{ikL_4}) \hat{a}_2 |1\rangle_1 |0\rangle_2,$$

lembrando das equações 3.23 e 3.24, já realizado o cálculo acima ($\hat{a}_1 |1\rangle_1 = |0\rangle_1$ e $\hat{a}_2 |0\rangle_2 = 0$).

Logo:

$$\begin{aligned} \hat{E}_5^{(+)} |1\rangle_1 |0\rangle_2 &= i\xi_\ell^{(1)} (t^2 e^{ikL_3} - r^2 e^{ikL_4}) |0\rangle_1 |0\rangle_2 \\ \|\hat{E}_5^{(+)} |1\rangle_1\|^2 &= [\xi_\ell^{(1)}]^2 |T e^{ikL_3} - R e^{ikL_4}|^2 \\ \|\hat{E}_5^{(+)} |1\rangle_1\|^2 &= [\xi_\ell^{(1)}]^2 (R^2 + T^2 - RT (e^{ik(L_3-L_4)} + e^{-ik(L_3-L_4)})). \end{aligned}$$

Lembrando que, $\| |0\rangle\|^2 = 1$ e $|e^{i\beta}|^2 = e^{i\beta} e^{-i\beta} = 1$. Aplicando na última igualdade acima a formula de Euler $e^{\pm i\beta} = \cos(\beta) \pm i \sin(\beta)$ e fazendo as devidas simplificações, obtêm-se:

$$\|\hat{E}_5^{(+)} |1\rangle_1\|^2 = [\xi_\ell^{(1)}]^2 (R^2 + T^2) (1 - V \cos(k\delta L)), \quad (3.40)$$

onde $\delta L = L_4 - L_3$ é a diferença de caminho e $V = \frac{2RT}{(R^2+T^2)}$ é denominado contraste ou visibilidade.

O número de contagem no detector será:

$$N_5 = \frac{1}{2} N_{Tot} (1 - V \cos(k\delta L)). \quad (3.41)$$

Analogamente, substituindo 3.38 e 3.39 em 3.37, obtemos:

$$\|\hat{E}_6^{(+)} |1\rangle_1\|^2 = [\xi_\ell^{(1)}]^2 (R^2 + T^2) (1 + V \cos(k\delta L)), \quad (3.42)$$

$$N_6 = \frac{1}{2} N_{Tot} (1 + V \cos(k\delta L)). \quad (3.43)$$

Estes resultados implicam uma característica de onda para o fóton. A interferência é revelada pelo fato dos sinais nos fotodetectores N_5 e N_6 variarem periodicamente com a diferença de caminho δL , enquanto o número total de contagem ($N_5 + N_6$) é constante. Deste fato, as figuras de interferência observadas em um anteparo de observação devem ser complementares.

3.4 Visibilidade, distinguibilidade e fenômenos intermediários entre onda e partícula

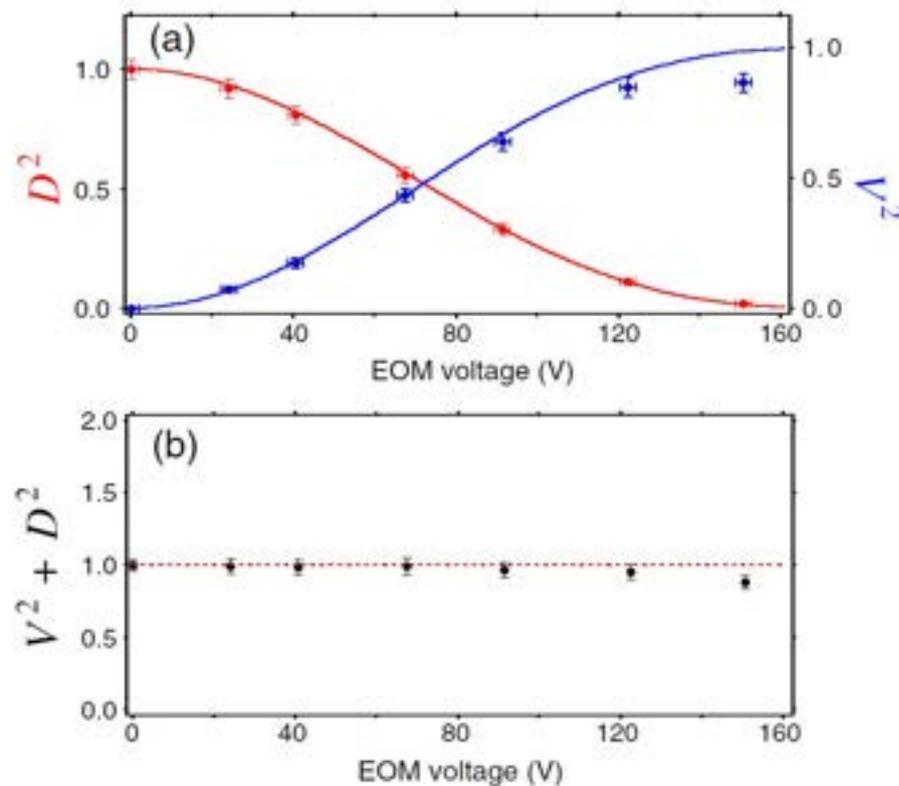
Objetos quânticos como fótons e elétrons exibem características complementares, aspectos ondulatório e corpuscular, em determinados experimentos como IMZ e dupla fenda dependendo de certos ajustes. Duas grandezas importantes que caracterizam os padrões formados em anteparos de observação são a visibilidade (\mathcal{V}) e a distinguibilidade (\mathcal{D}). Dado um objeto quântico incidente no IMZ, a visibilidade é uma quantidade que define o contraste ou nitidez do padrão de interferência nos anteparos, pode ser encarada como algo que quantifica o caráter ondulatório. Já a distinguibilidade é relacionada à informação sobre qual caminho foi percorrido no interferômetro, pode ser encarada como algo que quantifica o caráter corpuscular. Ambas grandezas quantificam propriedades complementares de um objeto quântico, de forma que quanto mais precisas forem as informações sobre o caminho associado a ele no interferômetro, menor será a visibilidade do padrão de interferência, e vice-versa (NETTO, 2015). Uma desigualdade matemática demonstrada teoricamente em janeiro de 1979 por William K. Wootters e Wojciech H. Zurek (WOOTTERS; ZUREK, 1979) e posteriormente por Jaeger, Shimony e Vaidman (1995) e Englert (1996), sintetiza uma relação quantitativa de complementaridade destes entes, como expresso pela inequação:

$$\mathcal{D}^2 + \mathcal{V}^2 \leq 1. \quad (3.44)$$

Como a probabilidade relacionada tanto a visibilidade quanto à distinguibilidade pode variar de 0 a 1, podem ocorrer eventos além dos casos extremos - onda ou partícula. A equação 3.44 mostra que não há impedimento de em um mesmo experimento se manifestarem as características ondulatórias e corpusculares. E é exatamente neste ponto que reside a essência de fenômenos de interferência quântica intermediários. Um exemplo pode ser observado nas figuras 11 e 31. Estes resultados revelam que Bohr, ao formular o princípio da complementaridade, analisava apenas situações extremas; onde não há conhecimento sobre o caminho e observa-se interferência com máxima visibilidade ($\mathcal{D} = 0$ e $\mathcal{V} = 1$) e quando há total informação sobre o caminho mas não se observa interferência ($\mathcal{D} = 1$ e $\mathcal{V} = 0$) (NETTO, 2015, p. 51–56), (PESSOA Jr, 2006a, p. 112–116).

A figura 14 retrata que para cada fenômeno intermediário há outro complementar, ou seja, os caracteres de onda e de partícula se apresentam simultaneamente, mas de forma parcial. A complementaridade proposta por Bohr representa uma situação extrema, onde um caráter ou

Figura 14 – (a) Informação ondulatória \mathcal{V}^2 e informação de qual caminho \mathcal{D}^2 em função da tensão no modulador eletro-óptico (EOM) correspondente a um dado valor da refletividade. As linhas sólidas são as previsões teóricas. (b) $\mathcal{D}^2 + \mathcal{V}^2$ como uma função da tensão EOM.



Fonte: Reproduzida de Jacques et al. (2008).

outro se apresenta plenamente, e não simultaneamente. Um trabalho mais recente é apresentado por Yoon e Cho (2021).

3.5 Interpretações da Física Quântica

A interpretação de uma dada teoria é o panorama da realidade traçado com base na teoria. O princípio da complementaridade é o conceito central da interpretação de Copenhague da Física Quântica, hegemônica dentre outras. A seguir discutem-se quatro destas interpretações da Física Quântica, dentre as dezenas existentes Pessoa Jr (2006a), Pessoa Jr (2006b), Pinto Neto (2010).

O começo do século XX foi marcado pelo início do desenvolvimento da Física Quântica. No centro das discussões teóricas para consolidar um formalismo consistente encontravam-se duas grandes frentes, a primeira dominada por uma mecânica matricial de Werner Heisenberg e a segunda de Erwin Schrödinger que propunha uma equação de onda capaz de descrever a

dinâmica de uma partícula dentro de um sistema quântico. Assim, a base matemática para a teoria quântica começava a ganhar forma. Embora distintas, as formulações de Schrödinger e Heisenberg mostraram-se equivalentes.

Os resultados quantitativos decorrentes deste formalismo deram muita credibilidade à Física Quântica. Com o passar do tempo seu alcance tornou-se cada vez maior sendo capaz de, por exemplo, descrever partículas subatômicas, estrutura de átomos e moléculas, materiais condutores, semicondutores, isolantes, supercondutores e magnéticos, fenômenos estelares, dentre muitos outros.

Com tantos resultados e aplicações surpreendentes torna-se difícil questionar aspectos matemáticos da teoria, seu formalismo mostra-se consistente. Por outro lado, não há consenso estabelecido com respeito à interpretação da teoria. Ainda persistem algumas estranhezas no ar, e muitas questões filosóficas ou metafísicas, como: o que é a luz? O que é o elétron? Porque a natureza quântica não se manifesta no cotidiano e o mundo macroscópico torna-se clássico? A matéria é feita de onda ou partícula?

Abordaremos nesta seção apenas quatro das muitas interpretações sobre a Física Quântica. A primeira delas é a ondulatória, seguida pela corpuscular, dualista realista e por fim a interpretação da complementaridade.

Interpretação Ondulatória:

Apoiada por Erwin Schrödinger e John von Neumann. Declara que num experimento quântico um objeto propaga-se como uma onda antes de ser detectado e após sua detecção torna-se localizado, semelhante uma partícula. Cunha-se então o termo colapso da função de onda, que permite tratar um objeto quântico como uma onda bem distribuída no espaço antes da detecção, sendo que esta sofrerá um colapso ao ser detectada tornando-se mais ou menos localizada como uma partícula. Porém, não há a existência de ambos ao mesmo tempo.

Interpretação Corpuscular:

Apoiada por Alfred Landé e Leslie Ballentine. Consiste em argumentar que objetos quânticos como fótons e elétrons são corpúsculos. Descartam-se hipóteses de ondas associadas aos objetos. A explicação para a observação de padrões de interferência em experimentos deve ser dada a partir das interações entre os objetos e os instrumentos de medida.

Interpretação Dualista Realista:

Apoiada por Louis de Broglie e David Bohm. Propõe que objetos quânticos dividem-se em duas partes, uma onda-piloto, ou onda associada, e uma partícula. A onda associada governa

o movimento da partícula que possui uma trajetória bem definida, mas desconhecida. A observação dos padrões de interferência em um experimento é explicada pela superposição das amplitudes das ondas associadas aos objetos.

Interpretação da Complementaridade:

Apoiada e desenvolvida por Niels Bohr. Consiste em argumentar que objetos quânticos são ondas. Descarta-se a ideia de partícula uma vez que não é possível determinar o percurso do objeto anterior à sua detecção. A manifestação do aspecto corpuscular num experimento se dá por causa da forma intrinsecamente descontínua do ato de uma medição, como por exemplo, a ionização de um átomo.

O olhar das interpretações sobre o estado $|\psi\rangle$:

Tendo em mente que um estado $|\psi\rangle$ na teoria quântica representa a probabilidade de se encontrar um observável (por exemplo, energia, posição ou momento) em determinada medição, qual será o significado de um estado $|\psi\rangle$ de acordo com cada interpretação?

A interpretação ondulatória atribui à $|\psi\rangle$ uma realidade “não atualizada” que estabelece certas probabilidades à função de onda do sistema quântico. A interpretação corpuscular (versão - coletivos estatísticos) argumenta que $|\psi\rangle$ é uma descrição essencialmente estatística representando a média sobre todas as posições possíveis do objeto. O estado representa um coletivo associado a procedimentos experimentais, o que representa uma visão incompleta do objeto individual. A interpretação dualista realista argumenta que na descrição dos estados devem ser consideradas “variáveis ocultas” que determinam a posição e velocidade do objeto, que se não considerados tornam a teoria incompleta. O estado $|\psi\rangle$ nesse caso é um campo real ou uma onda-piloto que governa a dinâmica do objeto, mas que não carrega energia pois esta seria concentrada no objeto guiado. A interpretação da complementaridade argumenta que o estado $|\psi\rangle$ simplesmente é um artifício matemático da teoria quântica e não possui uma realidade física. Pessoa Jr (2006a).

Capítulo 4

O papel da linguagem e sua lógica no Ensino de Física

Segundo o princípio da complementaridade, enunciado por Bohr, os resultados exibidos por um experimento quântico específico podem ser compreendidos considerando o objeto quântico como um corpúsculo ou como uma onda clássica, mas nunca ambos. Essas representações são aspectos complementares da experiência, mutuamente excludentes, mas que, apenas juntas, conduzem a uma descrição plena do objeto quântico. Esta característica dual está no cerne da Física Quântica e é referida como “dualidade onda-partícula”. O uso desta última denominação evoca uma contradição lógica, capaz de dificultar a construção conceitual do objeto quântico pois, envolve a ideia de unir em um único objeto dois objetos clássicos distintos e disjuntos, onda e partícula. Tal abordagem implica afirmar que algo é bem localizado no espaço, e ao mesmo tempo espalhado, e que segue uma trajetória bem definida no espaço e não segue (PESSOA Jr, 2000).

Objetos quânticos possuem propriedades específicas, que fogem ao escopo da física clássica e, segundo Richard Feynman (1918 - 1988), a “dualidade onda-partícula” é um fenômeno absolutamente impossível de se explicar classicamente, e contém em si o coração da física quântica (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 1963). A “dualidade onda-partícula” está entre as características mais contra-intuitivas da teoria quântica. Os fenômenos intermediários, entre onda e partícula, mostram indiscutivelmente que o quantum de luz, ou fóton, é tanto uma onda quanto uma partícula. Essa dupla identidade simultânea é muito difícil de entender dentro de uma estrutura conceitual da lógica clássica, acarretada pelo uso da linguagem da Física Clássica e respectivos conceitos, onde de fato leva a uma contradição lógica.

A escolha da linguagem e seu uso preciso é fator central na construção dos conceitos de Física pelos alunos. “Para atribuir significados a novos conhecimentos, o aprendiz parte de conceitos já estabelecidos em sua estrutura cognitiva, os chamados subsunçores. Desta forma, os subsunçores potencialmente utilizáveis na introdução da Mecânica Quântica seriam clássicos e formulados em linguagem clássica” (PAULO; MOREIRA, 2011, p. 422). O aluno associa significado a um conhecimento em processo de aquisição quando dispõem em sua estrutura cognitiva de subsunçores potencialmente utilizáveis, fato que não ocorre na introdução aos conceitos da Física Quântica; os subsunçores estão no âmbito da Física Clássica.

Este capítulo trata especialmente da questão da linguagem e da produção de significados conceituais na Física Quântica e sua correlação com os processos de ensino-aprendizagem. (LÉVY-LEBLOND, 1988b; NICOLESCU, 2012; VYGOTSKY, 2007; BAKHTIN, 2006). Trata também das teorias de aprendizagem que nortearam a construção da sequência didática bem como da análise dos resultados, apresentados nos capítulos seguintes. (VYGOTSKY, 2007; MOREIRA, 1999; AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980; DEWEY, 1979; DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994; PIAGET, 2010).

4.1 A linguagem e os Signos

A semiótica objetiva compreender a lógica do funcionamento dos signos como um processo de mediação entre o sujeito e o mundo. O homem depende dos sinais e sistemas de signos e sua consciência é indissociável do significado dos signos. A semiótica é intrincada às ciências, é uma ciência entre as ciências e, concomitantemente, um instrumento das ciências (MORRIS, 1976; PEIRCE, 2010).

A linguagem abarca todo um sistema de signos socialmente convencionados, sejam estes de natureza verbal ou não verbal, e a língua, constituída por um dado sistema de signos gramaticalmente convencionais, usados por uma dada comunidade. Por si só, uma palavra é um signo, composta por vários signos. Na linguagem estão intrinsecamente unidos o significante e o significado; o primeiro é a grafia da palavra, o elemento concreto, o segundo, o conceito, o elemento abstrato. Os avanços científicos muitas vezes consistem em uma expansão da linguagem conceitual usada para descrever o objeto de estudo, para aumentar a expressividade e a capacidade descritiva, mas também para aumentar a simplicidade de raciocínio.

Em uma leitura, numa conversa informal, na definição de conceitos ou na criação de uma

teoria, são utilizados signos como a fala, a escrita, imagens e ilustrações que favoreçam a compreensão de informações, em um processo semiótico. O desenvolvimento de uma linguagem apropriada e sua utilização precisa é fator crucial nos processos didáticos que permitam e favoreçam o ensino e a aprendizagem, ou seja, as trocas de significados. “A internalização (reconstrução interna) de signos é fundamental para o desenvolvimento humano. Os signos mediam a relação da pessoa com as outras e consigo mesma” (MOREIRA, 1999, p. 113).

Para internalizar signos, o ser humano tem que captar os significados já compartilhados socialmente, ou seja, tem que passar a compartilhar significados já aceitos no contexto social em que se encontra, ou já construído social, histórica e culturalmente. Percebe-se aí o papel fundamental da interação social, pois é por meio dela que a pessoa pode captar significados e certificar-se de que os significados que capta são aqueles compartilhados socialmente para os signos em questão. Em última análise, então, a interação social implica, sobretudo, um intercâmbio de significados. (MOREIRA, 1999, p. 113).

O excerto de Moreira, evidencia a interface da construção entre conceitos, por exemplo, conceitos da Física Clássica e da Física Quântica, uma vez que a segunda utiliza-se de muitos conceitos da primeira. Novos saberes geralmente são estruturados sobre conhecimentos já estabelecidos. A medida que vão sendo aprimorados os novos saberes, também seus conceitos vão tomando novos significados e estruturas próprias. Ou seja, o desenvolvimento de uma nova teoria, não deixa de utilizar palavras antigas para descrever seus conceitos, pois, caso contrário, seria necessário criar-se todo um novo vocabulário, o que não facilitaria os processos de aprendizagem. Todavia, as terminologias e conceitos empregados sofrem expansão, se modificam e podem adquirir novos significados a medida que a teoria evolui.

4.2 Teoria da mediação de Vygotsky

Para Vygotsky, o desenvolvimento humano se dá por meio da interação do indivíduo com o meio em que está inserido. Os processos psicológicos mais complexos como a consciência e o discernimento, aspectos que nos diferenciam dos outros animais, só se formam e se desenvolvem por meio do aprendizado decorrente da interação social entre indivíduos. Os processos sociais e psicológicos humanos se firmam por meio de instrumentos e signos. Instrumento é aquilo utilizado com a finalidade de fazer algo, por exemplo, artefatos, utensílios e ferramentas de trabalho, fazem a mediação entre os indivíduos e o mundo físico. Signo é algo que significa

alguma outra coisa, interno aos processos mentais do indivíduo, como a fala, a escrita e os números, mediam as interações sociais. (VYGOTSKY, 2001; VYGOTSKY, 2007; MOREIRA, 1999).

As funções mentais de um indivíduo, as mais elevadas que sejam, emergem de processos sociais. O desenvolvimento cognitivo dá-se pela interiorização dos instrumentos e sistemas de signos. Enquanto os instrumentos auxiliam no controle e domínio da natureza, os signos permitem a troca ou transmissão do conhecimento adquirido social, histórico e culturalmente, favorecendo um intercâmbio de significados. Por exemplo, “uma criança nasce com as condições biológicas de falar, mas só desenvolverá a fala se aprender com os mais velhos da comunidade.” (REGO, 2009).

Ainda segundo Vygotsky é a linguagem o instrumento essencial para o fluir do pensamento que elabora o aprendizado. “A linguagem é o mais importante sistema de signos para o desenvolvimento cognitivo da criança, porque a libera dos vínculos contextuais imediatos.” (MOREIRA, 1999, p. 114). Ou seja, a linguagem possibilita o processo de abstração, dando origem a uma inteligência abstrata que flexibiliza o pensamento conceitual.

[...] o momento de maior significado no curso do desenvolvimento intelectual, que dá origem às formas puramente humanas de inteligência prática e abstrata, acontece quando a fala e a atividade prática, então duas linhas completamente independentes de desenvolvimento, convergem. (VYGOTSKY, 2007, p. 11–12).

Assim, a interação social mediada pela utilização de instrumentos e signos social e culturalmente construídos, sendo o principal deles a linguagem, não é apenas um meio facilitador aos processos mentais, também faz parte do desenvolvimento cognitivo do indivíduo. A linguagem é fonte transformadora do funcionamento da mente.

Símbolos e signos se constituem em ferramentas necessárias para a transmissão e retenção de informações e conhecimentos. O uso em sala de aula da fala ou outra forma de expressão para imprimir um conceito pode gerar obstáculos na aprendizagem quando mal empregado. Para Bachelard, “em processos de ensino-aprendizagem, obstáculos epistemológicos como um fato mal interpretado, uma experiência, um contrapensamento, uma crença, podem funcionar como obstáculos pedagógicos” (MOREIRA; MASSONI, 2016, p. 25), ou seja, ocorrendo uma disjunção, entre o conceito antigo e o novo, uma irrefletida transferência de terminologia pode levar a dificuldades epistemológicas e pedagógicas. Para uma aprendizagem efetiva, faz-se necessário a plena utilização e organização da linguagem. “[...], o aprendizado adequadamente organizado

resulta em desenvolvimento mental e põe em movimento vários processos de desenvolvimento que, de outra forma, seriam impossíveis de acontecer” (VYGOTSKY, 2007, p. 103). Formular e organizar processos didáticos que evitem criar obstáculos e contradições, exige uma construção sistematizada e precisa da linguagem empregada. Dessa forma, deve atentar-se quando for introduzir determinado conceito. “O processo de conceituação é que pode contribuir com mais eficiência para o ensino das ciências. A construção dos conceitos científicos depende de um perfeito uso das palavras e a troca de significados deve ser plena” (CARVALHO; CARVALHO, 2018).

Na aprendizagem de conceitos, por exemplo, a criança inicialmente associa o nome do conceito, como “gato” ou “cadeira”, a um animal ou objeto específico que encontrou na sua vida diária e que, numa interação social, alguém lhe disse “isto é um gato” ou “isto é uma cadeira”. Mas com a experiência, isto é, por meio de sucessivos encontros com diferentes gatos e cadeiras, a criança aprende a abstrair, de um caso concreto, o nome do conceito e a generalizá-lo a muitas outras situações e instâncias. Quando isso acontece, os significados linguísticos, “gato” e “cadeira”, no caso, passam a representar a classe de animais que socialmente chamamos gatos e a classe de objetos a que socialmente damos o nome de cadeira, sem referência a nenhum exemplo em particular. Nesse caso, diz-se que os conceitos foram formados. (MOREIRA, 1999, p. 114).

Uma ligação da fala acima de Moreira é possível quanto à construção da linguagem científica. Quanto maior o número de conceitos formados, maiores serão as relações que um aluno conseguirá estabelecer para explicar fenômenos observados, ampliando cada vez mais sua cadeia conceitual, desenvolvendo uma aprendizagem significativa.

A diferença de desenvolvimento cognitivo entre aquilo que os aprendentes resolvem independentemente e aquilo que conseguem resolver com a ajuda de um indivíduo mais experiente é o que Vygotsky denominou Zona de Desenvolvimento Proximal. “A Zona de Desenvolvimento Proximal define aquelas funções que ainda não amadureceram, mas que estão em processo de maturação, funções que amadurecerão, mas que estão, presentemente, em estado embrionário” (VYGOTSKY; LURIA; LEONTIEV, 1988, p. 97). Assim sendo, segundo Vygotsky, “[...] o processo de desenvolvimento não coincide com a da aprendizagem, o processo de desenvolvimento segue o da aprendizagem, que cria a área de desenvolvimento potencial” (VYGOTSKY; LURIA; LEONTIEV, 1988, p. 116).

4.3 Teoria da aprendizagem Significativa

(MOREIRA, 1999).

A aprendizagem significativa de Ausubel (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980) pode ser qualificada como o processo por meio do qual uma nova informação interage, de forma não-litera e não-arbitrária, com um conceito pré-existente na estrutura cognitiva do indivíduo e que servirá para “ancorar” o novo conceito a ser aprendido. A nova informação ancora-se em conceitos ou proposições relevantes, já presentes naquela estrutura cognitiva, denominados conceitos subsunçores.

Esses ancoradouros para a nova informação são responsáveis pela interação entre o novo conhecimento e o que já existia, que em consequência acaba sendo modificado. À medida que o processo ocorre, o conhecimento prévio do assunto ou do conceito que serve de base para a assimilação de novos significados também se modifica, resultando em um subsunçor mais elaborado, em um processo que Ausubel chama de diferenciação progressiva.

A vinculação, entre o novo conhecimento e o antigo se torna cada vez mais estável, em razão da formação de novos subsunçores, que interagindo entre si, reconfiguram a estrutura cognitiva acarretando na aprendizagem significativa, compondo significados interligados em uma estrutura de rede. Os novos conceitos irão interagir de forma não arbitrária, com conceitos relevantes presentes na estrutura cognitiva.

Para que a aprendizagem significativa ocorra, o estudante deve ter vontade de aprender; a aprendizagem será mecânica se o indivíduo quiser memorizar o conteúdo arbitrária e literalmente. Para ocorrer a aprendizagem significativa o estudante deve ser exposto a materiais educativos potencialmente significativos, isto é, providos de significado lógico, ter subsunçores especificamente relevantes, bem como ter disposição para a aprendizagem, ou seja, disposição para se relacionar ao novo conhecimento, atribuindo significado psicológico ao significado lógico dos materiais educativos.

Uma aprendizagem na qual não existe uma atribuição de significados ao novo conhecimento, que permita relaciona-lo com os conhecimentos preexistentes, é mecânica, não significativa. Esse tipo de aprendizagem é temporária, pois, o conhecimento foi armazenado de maneira arbitrária na mente do indivíduo. Esse conhecimento não irá interagir com a estrutura cognitiva existente na mente do indivíduo, o novo conhecimento não servirá de base para a atribuição de novos significados aos conhecimentos anteriores.

Na aprendizagem significativa, também ocorre o estabelecimento de relações entre concei-

tos, ou seja, elementos que já existem na estrutura cognitiva com um certo grau de clareza, adquirem novos significados levando a uma nova organização da estrutura cognitiva, essa recombinação de elementos é referida como reconciliação integrativa.

Para se promover a ancoragem, o diálogo deve se dar em uma linguagem adequada ao estudante, usando sinônimos, exemplificando, explicando de maneiras diferentes; usando uma argumentação lógica, não dogmática, reconhecendo que o estudante tem uma estrutura cognitiva inteligente e racional.

Na Teoria da Aprendizagem Significativa existem dois processos cognitivos que são fundamentais, a saber: a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa.

A diferenciação progressiva pode ser estimulada apresentando primeiro as ideias mais gerais e inclusivas para, em sequência, progressivamente diferenciá-las em formas de detalhes e especificidade. Ao final de cada domínio conceitual, promove-se a reconciliação integrativa enfatizando as relações entre os conceitos e proposições ensinadas, tentando integrar os tópicos em que a matéria de ensino está organizada, expondo suas diferenças, semelhanças, relacionamentos e analisando seus antagonismos frente os conhecimentos atuais e progressos.

4.4 A linguagem a lógica e os níveis de realidade

No ensino de Física Moderna na educação básica é inevitável a utilização de conceitos da Física Clássica, como os de onda e de partícula, e por vezes a transferência da terminologia pode levar a dificuldades pedagógicas, como ocorre com a conceituação do objeto quântico quando se utiliza a terminologia “dualidade onda partícula”. Como se tratam de objetos disjuntos da Física Clássica e a utilização da lógica clássica ou Aristotélica, se estabelece uma inconsistência lógica. (JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998). A lógica Aristotélica é baseada em três axiomas: (1) o axioma da identidade: $A \text{ é } A$; (2) o axioma da não-contradição: $A \text{ não é não-}A$; (3) o axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T (T de “terceiro excluído”) que é ao mesmo tempo A e não- A . Assim, dentro da lógica Aristotélica o termo “onda-partícula” é logicamente inconsistente, não é possível ser onda e partícula concomitantemente. (SOUZA et al., 2010). Para lidar com esta inconsistência e fundamentado nos trabalhos de Birkhoff e Neumann (1936) e de von Weizsäcker (GÖRNITZ; ISCHEBECK, 2003), Heisenberg (2018) sugeriu que, mantendo a linguagem da Física Clássica, a teoria quântica pode ser interpretada como uma extensão ou modificação da lógica clássica.

Entretanto, com o desenvolvimento da teoria quântica, resultados experimentais evidenciaram pares contraditórios mutuamente excludentes, segundo a lógica clássica, como, continuidade e descontinuidade ou onda e corpúsculo. Consolidando termos como probabilidade, superposição e complementaridade, onde mais de um estado pode ser verdadeiro, ou seja, sugerindo a existência de um determinado nível de realidade onde podem coexistir o contraditório e o não-contraditório. Mostrando-se necessário a utilização de uma nova lógica, diferente da clássica, segundo a qual esses aspectos contraditórios deixassem de ser absurdos, em uma lógica do terceiro incluído.

Em 1951, Stéphane Lupasco (1900 - 1988) propõe a teoria do terceiro incluído que é abordada posteriormente por Basarab Nicolescu (NICOLESCU, 2012). Esta propõe uma lógica com a seguinte estrutura ternária: a posição de uma afirmação, a negação desta e uma terceira posição que em um outro nível de realidade haja a coexistência entre a afirmação e seu oposto. Ou seja: *i*) A é A, *ii*) A não é não-A, *iii*) existe um terceiro termo T (terceiro incluído): A e não-A. Um tratamento matematicamente rigoroso pode ser encontrado também no livro de Scheibe (1973), além dos trabalhos de Birkhoff e Neumann (1936) e de von Weizsäcker (GÖRNITZ; ISCHEBECK, 2003).

O terceiro incluído é compreendido quando se introduz a noção de níveis de realidade, onde são descritos os variados níveis em que o universo se organiza e que ocasionalmente possa ser observado. Buscando compreender os níveis de realidade, imaginamos que A e não-A existam num nível de realidade diferente do terceiro incluído.

Para obtermos uma imagem clara do sentido do terceiro incluído, representamos os três termos da nova lógica – A, não-A e T – e seus dinamismos associados por meio de um triângulo no qual um dos vértices se situa em um nível de realidade e os outros dois vértices em um outro nível de realidade. Se ficarmos em um único nível de realidade, toda manifestação aparecerá como uma luta entre dois elementos contraditórios (exemplo: onda A e corpúsculo não-A). O terceiro dinamismo, o do estado T, é exercido em um outro nível de realidade, onde o que aparece como desunido (onda e corpúsculo) está, de fato, unido (quantum) e o que aparece como contraditório é percebido como não contraditório. (NICOLESCU, 2009, p. 5).

A lógica do terceiro incluído não revoga a do terceiro excluído, simplesmente limita seu campo de atuação. O terceiro incluído supera o dualismo e abre espaço para a complexidade. Passamos a compreender e abordar o mundo de forma mais complexa com diferentes níveis de realidade. O terceiro incluído torna-se uma lógica complexa com maior possibilidade de

abordar situações que possuam propriedades de determinação e indeterminação. Contudo, é importante atentar-se que:

O terceiro incluído não significa de modo algum que se possa afirmar uma coisa e seu contrário, o que, por anulação recíproca, destruiria toda possibilidade de predição e, portanto, toda possibilidade de abordagem científica do mundo.

Trata-se antes de reconhecer que, em um mundo de interconexões irreduzíveis (como o mundo quântico), realizar uma experiência ou interpretar os resultados experimentais reverte inevitavelmente em um recorte do real que afeta o próprio real. A entidade real pode, desse modo, mostrar aspectos contraditórios que são incompreensíveis, absurdos mesmo, do ponto de vista de uma lógica fundada sobre o postulado “ou isso ou aquilo”. Esses aspectos contraditórios deixam de ser absurdos em uma lógica fundada sobre o postulado “e isso e aquilo”, ou antes, “nem isso nem aquilo”. (NICOLESCU, 2009, p. 2).

Do relato de Souza et al. (2010) fica evidente a dificuldade pedagógica acarretada pela tentativa de disseminação das ideias da lógica do Terceiro Incluído e dos níveis de realidade para estudantes de Licenciatura em Física.

Em épocas anteriores ao desenvolvimento da teoria quântica, quando em um experimento era observada uma figura de interferência, o fenômeno era classificado como ondulatório, enquanto quando era observado um espalhamento aleatório do objeto, associavam-no à classe de fenômenos corpusculares. Quando observou-se que um único objeto poderia ora apresentar características ondulatórias, ora características corpusculares, dependendo de parâmetros experimentais, esta classificação demandou revisão.

[...] Para os físicos clássicos ou pós-clássicos, havia apenas dois tipos de entidades físicas, a saber, partículas e ondas. Uma vez que os estranhos seres quânticos apresentavam um comportamento que lembrava às vezes partículas e às vezes ondas, não era incomum discuti-los na terminologia clássica, sob o manto filosófico da “dualidade onda-partícula” ad hoc.

Os conquistadores, descobrindo nos Andes um animal lanoso e labial que se parecia tanto com uma ovelha quanto com um camelo, não recorreram por muito tempo à dualidade ovelha-camelo e logo usaram uma palavra nativa. Lhama, para descrevê-lo. Nem os garimpeiros da Austrália se limitaram à dualidade do coelho-pato para descrever o Ornitorrinco com bico de pato e corpo peludo. Apesar das semelhanças parciais, logo ficou claro que esses eram animais à sua maneira. (LÉVY-LEBLOND, 1988a, p. 19–20, tradução nossa).

A perspectiva de Lévy-Leblonde transcrita acima reforça a ideia da utilização de palavras e conceitos previamente conhecidos para designar aqueles ainda desconhecidos, mas a partir do momento que se adquire entendimento apropriado (conhecimento assimilado), há adaptação da linguagem. Com o termo “dualidade onda-partícula”, este processo também ocorre uma vez que se entenda que ele leva a uma visão imprópria de que um objeto quântico:

[...] às vezes é uma onda, às vezes uma partícula, ou à visão fraca e insuficiente de que às vezes se parece com uma onda, às vezes como uma partícula. Embora isso seja verdade em certas circunstâncias especiais, na maioria das vezes não se parece com uma onda, nem com uma partícula - já que não é nem uma coisa nem outra. Em grande parte, chegou a hora de dotar o grande número de entidades quânticas que conhecemos hoje de um nome específico comum. [...], fazendo uso da desinência padrão aceita da maioria dos nomes particulares, como fótons, prótons, píons, fônons, nêutrons, etc. Vamos chamá-los de quantons (como já sugerido por M. Bunge). Nesta formulação, em vez da vaga e enganosa “dualidade onda-partícula”, podemos afirmar uma declaração objetiva da ligação entre a física quântica e a física clássica: “sob certas circunstâncias específicas, um quanton pode se comportar aproximadamente como uma partícula clássica ou como uma onda clássica”. (LÉVY-LEBLOND, 1988b, p. 316, tradução nossa).

Ou seja, interpreta-se, um objeto quântico, nem como onda nem partícula clássica, mas sim como um outro objeto, que pode ser nomeado como se queira, que carrega consigo aspectos de onda clássica e de partícula clássica. As ondas e as partículas são manifestações de aspectos deste objeto. Outros autores propuseram nomes em contrapartida à “dualidade onda-partícula”, como, micropartículas e wavicle. Este último proposto em 1928 por Arthur Stanley Eddington (1882 - 1944) (EDDINGTON, 2019). Porém, nenhum destes termos (quanton, micropartículas ou wavicle) ganhou popularidade e ainda utiliza-se o termo “dualidade onda-partícula”, inclusive em textos didáticos (YOUNG; FREEDMAN, 2016).

No presente trabalho propomos uma nova abordagem didática para introdução da teoria quântica no ensino médio, qual seja: dar ciência aos aprendentes dos resultados experimentais que conduziram à inconsistência lógica associada ao termo “dualidade onda-partícula” e, ao mesmo tempo, expor a ideia de nomear o objeto quântico conforme proposto por Lévy-Leblonde. Assim propomos uma abordagem inversa à proposta por Heisenberg; modifica-se a linguagem, nomeando-se o objeto quântico de “quanton”, que permite manter a lógica Aristotélica, e evita-se a análise lógica da teoria quântica e a introdução dos conceitos da lógica do terceiro incluído e dos níveis de realidade.

Portanto, a mudança na linguagem proporciona a eliminação do obstáculo pedagógico e uma plena troca de significados à interpretação lógica, sem demandar análise de uma entidade composta por conceitos mutuamente excludentes segundo uma lógica não clássica. A designação da entidade quântica por “quanton”, permite também criar as bases para compreensão da teoria quântica a partir da noção dos níveis de realidade, associados aos conceitos da Física Clássica e à Física Quântica, abrindo espaço para uma introdução arrazoada da lógica do terceiro incluído.

Quando apresentados resultados experimentais que correlacionam ora fenômenos ondulatórios ora fenômenos corpusculares, aos fótons e aos elétrons, unindo a isto um formalismo matemático, os conceitos clássicos distintos usados parecem não desvinculados. Porém, apresentando-se ainda fenômenos intermediários, uma explicação apenas pelos fenômenos extremos torna-se não satisfatória. O termo “dualidade onda-partícula” não satisfaz plenamente a troca de significados entre entidades que possuem características a sua própria maneira (que não seguem a lógica clássica), e uma nova lógica que necessita de uma interpretação que foge do senso comum.

4.5 Teoria cognitiva de Dewey e o Ensino por investigação

O ensino por investigação (“Inquiry Based Learning”) envolve os estudantes na investigação de problemas reais, que apresentados em aula podem oportunizar discussões capazes de conduzirem à elaboração de modelos físicos e de suas representações conceituais, propiciando a compreensão dos conceitos e da atividade científica. A aprendizagem, orquestrada pelo professor, fomenta a investigação por meio da observação, coleta e análise de dados, elaboração de hipóteses e suas testagens, síntese dos resultados e formulação de conclusões. Este modo ativo de ensino/aprendizagem estimula o trabalho colaborativo e uma postura crítica e reflexiva entre os alunos, conduzindo à construção da autonomia intelectual. (CARVALHO et al., 2013; ZÔMPERO; LABURÚ, 2011).

A teoria cognitiva de John Dewey (DEWEY, 1979) concebe que a aprendizagem se dá por meio da solução de problemas que tenham significado para os aprendentes. O interesse é a única motivação verdadeira, que pode forçar esse processo. Segundo Dewey, quando a criança é treinada a discutir e a emitir juízo de valor com respeito aos conteúdos estudados ela consegue adquirir capacidade de julgamento, que a habilita a escolher por si própria e, então, tentar pôr

em execução suas próprias decisões, que se constitui no teste final do seu julgamento.

No capítulo 7 do seu livro “Como Pensamos”, Dewey (1979) elenca aspectos do pensamento reflexivo (científico) úteis para a abordagem de problemas, quais sejam: definição do problema, sugestão de uma solução, desenvolvimento e aplicação do teste experimental e formulação da conclusão conforme seguem:

1°. Ter clareza do problema. Para que um problema comece a ser resolvido, é preciso que seja transformado numa questão individual, numa necessidade sentida pelo indivíduo. O que é problema para uma pessoa pode não ser para outra. No ambiente educacional, um problema só será real para o aluno quando o desconhecimento da sua resolução se constituir em fator de perturbação.

2°. Os contornos do problema. Este passo consiste na coleta de dados e informações sobre tudo o que já se conhece a respeito do problema. É uma etapa importante, que permite selecionar a melhor forma de atacar o problema, e que pode ser desenvolvida com auxílio de fichas, resumos, etc., obtidos de leituras e conversas sobre o assunto.

3°. Elaboração de hipóteses. Uma hipótese é a suposição da provável solução de um problema. As hipóteses costumam surgir após um longo período de reflexão sobre o problema e suas implicações, a partir dos dados coletados na etapa anterior.

4°. Testagem das hipóteses. Depois de formulada, a hipótese deve ser confrontada com o que já se conhece como verdadeiro sobre o problema. A verdadeira prova da hipótese só se fará na prática, na ação, na experimentação.

5°. Generalização. Em situações posteriores semelhantes, uma solução já encontrada poderá contribuir para a formulação de hipótese mais realista. A capacidade de generalizar consiste em saber transferir soluções de uma situação para outra e permitir previsão de novos fatos ou fenômenos.

4.6 Momentos pedagógicos de Delizoicov e Angotti

Os **três momentos pedagógicos** de Delizoicov e Angotti compõem uma proposta pedagógica que se apoia nas ideias de Paulo Freire e envolve três etapas, quais sejam: a **Problematização**, na qual uma situação problema, relacionada ao conteúdo e ao cotidiano dos alunos, é apresentada como elemento desencadeador de questionamentos e das discussões. Nesse momento pedagógico, os alunos são desafiados a expor o que pensam sobre as situações, a fim

de que o professor possa ir conhecendo o que eles pensam. Na etapa de **Organização do Conhecimento**, o professor conduz a sistematização das informações coletadas e coletivamente elaboradas, promovendo a compreensão do problema inicial à luz dos conceitos científicos. A última etapa, de **Aplicação dos Conhecimentos**, visa exercitar o conhecimento que vem sendo construído pelos alunos, podendo ser composta por situações similares às do problema inicial, bem como outras situações que envolvam os mesmos conhecimentos. (DELIZOICOV; AN-GOTTI, 1994).

Os três momentos pedagógicos compõem uma metodologia para execução de aulas na abordagem investigativa.

4.7 Teoria construtivista de Piaget

Piaget (2010) investigou a origem, a evolução e os mecanismos de construção do conhecimento humano e do desenvolvimento da inteligência lógica, avançando no entendimento de como o ser humano significa os conhecimentos.

Na perspectiva de Piaget, a aprendizagem ocorre a partir da interação entre o indivíduo e os objetos do conhecimento, presentes no meio com o qual interage, as ideias abstratas (de tempo, espaço, causa, ...) ou não. O termo conhecimento é associado às habilidades e competências humanas para criar significados a partir de fatos atrelados a aspectos físicos, biológicos, psicológicos e sociais, é gerado através da interação do indivíduo com o meio, reconfigurando as estruturas cognitivas previamente existentes. A construção do conhecimento se dá por meio de processos mentais, associados ao desenvolvimento biológico do indivíduo e do contato deste com o ambiente que o cerca. Esses processos mentais foram denominados por Piaget de assimilação, equilíbrio e acomodação (PIAGET, 1998). Diante do contato com estímulos e situações capazes de provocar desajustes, o sistema cognitivo reage em busca do restabelecimento do equilíbrio.

A assimilação consiste na incorporação de novos conhecimentos (representações ou modelos do meio exterior) às estruturas cognitivas preexistentes por meio de processos de interpretação que conduzem à internalização dos conhecimentos, abarcando-os. Um novo estado de equilíbrio é alcançado, mas sem descontinuidade com o estado precedente, isto é, os novos conhecimentos simplesmente acomodando-se à nova situação, sendo adaptados aos esquemas preexistentes.

Para retornar a um estado de equilíbrio, é necessário a reconstrução das estruturas cognitivas ou a construção de novas, resultando em o desenvolvimento cognitivo. Esse processo é chamado de acomodação e é o momento em que o indivíduo ao reconfigurar sua estrutura cognitiva, torna-se mais capaz em compreender aquilo que o perturba, que lhe perturbou o equilíbrio e, de acordo com Piaget, é quando a aprendizagem está efetivamente ocorrendo. O desenvolvimento cognitivo é a adaptação do indivíduo ao meio externo, como resultado de sequenciais assimilações e acomodações em um processo contínuo, conduzindo a uma estrutura cognitiva nova, que pode englobar a precedente ou mesmo substituí-la. Esses sucessivos processos de equilibração asseguram estruturas cognitivas mais estáveis e abrangentes. Não é sempre que a equilibração é possível podendo ocorrer um conflito cognitivo, estado importante para a construção de um novo conhecimento e pode ter uma dimensão pessoal e social.

Quando as novas informações não se encaixam, é criada uma contradição entre as percepções e representações, um conflito cognitivo pode ser experimentado e um estado de desequilíbrio se estabelece.

Diante de um conflito cognitivo, o indivíduo tenta primeiramente estabelecer uma assimilação do fenômeno observado aos seus esquemas de pensamentos prévios. Caso haja dificuldades para tal assimilação, como por exemplo a presença de incoerências, surge então uma situação de desequilíbrio, uma lacuna nas estruturas lógico-conceituais do indivíduo. Para se restabelecer um novo equilíbrio (mais completo com relação ao anterior) o indivíduo faz um novo esforço de assimilação ou produz uma série de construções compensatórias (assimilações-acomodações) das estruturas anteriores de pensamento. A insatisfação gera um estado de conflito, caracterizado por Piaget como situação de desequilíbrio.

No ser humano, o conflito cognitivo pode ser um grande impulsor para revisão de ideias e concepções a respeito de algo, no entanto, pode igualmente gerar frustração e desestímulo. O conflito cognitivo influencia as ideias e a própria dinâmica da evolução cognitiva do indivíduo e tem uma base afetiva, emocional.

O ensino de ciência, baseado na epistemologia genética de Piaget, buscou desenvolver atividades de ensino que levassem em consideração a lógica do sujeito ligada ao estágio de maturação cognitiva, pois, assim, se evitava propor uma aprendizagem muito distante do desenvolvimento do sujeito. Por outro lado, seu conceito de equilibração, mais especificamente o conflito cognitivo foi utilizado para garantir a motivação intrínseca ou, pelo menos, um maior engajamento motivacional por parte do sujeito. Portanto, as tarefas escolares tornavam-se ao mesmo tempo interessantes e desafia-

doras, pois, de um lado estas se aproximavam da lógica do sujeito, e de outro, eram desafiadoras na perspectiva de suscitarem o desequilíbrio. (DA SILVA, 2012, p. 211–212).

O conflito cognitivo pode ser um aliado para o processo de ensino-aprendizagem e utilizado como princípio pedagógico. Em aulas em modo investigativo pode ser usado para compor uma situação problema, sendo compartilhado entre os alunos, provocando o confronto de ideias. Nesse caso, seria conveniente abordar conflitos acerca de temas que não possam ser facilmente solucionados, ou seja, problemas abertos que não tem uma solução óbvia ou única.

Capítulo 5

Metodologia

Como mencionado anteriormente, segundo o princípio da complementaridade, enunciado por Bohr, objetos quânticos, como elétrons e fótons, exibem aspectos de ondas e de partículas, sem exibi-los simultaneamente; assim, de forma estrita, não são nem ondas nem partículas. Esta característica dual está no cerne da Física Quântica e, muitas vezes, é abordada nos textos de física básica como “dualidade onda-partícula”. Visto que estes objetos não são ondas nem partículas, a apresentação da Física Quântica usando-se tal abordagem suscita uma contradição lógica estabelecendo um conflito cognitivo, capaz de dificultar a construção conceitual do objeto quântico pois, envolve a ideia de unir em um único objeto dois entes clássicos distintos e disjuntos, onda e partícula.

No presente capítulo relatamos o desenvolvimento de uma sequência didática, composta por duas aulas de 50 minutos cada, que objetiva delinear o problema proposto bem como permitir o aprofundamento de conceitos, estabelecendo e contornando contradições lógicas na mente dos estudantes com relação ao conceito dual onda-partícula. A sequência didática foi elaborada na linguagem multimídia, em torno da evolução histórica do conceito de luz e de experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais, desenvolvida em modo investigativo segundo os três momentos pedagógicos (problematização inicial, organização do conhecimento, aplicação do conhecimento. (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994)). Considerou-se o conceito de zona de desenvolvimento proximal (VYGOTSKY; LURIA; LEONTIEV, 1988), os novos conhecimentos ofertados eram precedidos de curta revisão de conhecimentos prévios necessários e os novos conhecimentos constituem-se em obstáculos possíveis de serem superados pelo aluno, sem propor uma aprendizagem muito além do desenvolvimento dos alunos. A sequência de fatos e eventos experimentais apresentadas compõem

um conjunto consistente e convincente que objetivam cativar os alunos fomentando que mobilizem suas mentes para construir as novas estruturas de pensamento que conduzam à aprendizagem.

Usou-se o conceito de diferenciação progressiva apresentando primeiro as ideias clássicas e, em sequência, progressivamente diferenciá-las em formas de detalhes e especificidade. Ao final promoveu-se a reconciliação integrativa enfatizando as relações entre os conceitos e proposições ensinadas, integrando os tópicos em que a matéria foi apresentada, expondo suas diferenças, semelhanças, relacionamentos e analisando seus antagonismos entre os conceitos e linguagens clássica e quântica. (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980; MOREIRA, 1999).

O conceito de equilibração (PIAGET, 1998) também foi considerado, mais especificamente o conflito cognitivo, foi utilizado para garantir a motivação intrínseca ou, pelo menos, um maior engajamento motivacional por parte dos alunos, na busca de uma interpretação capaz de cancelar a inconsistência lógica decorrente da utilização da linguagem da Física clássica.

Por último é apresentamos uma explicação sobre a utilização de um Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder – IVMZ. (VIRTUAL... , 2017).

5.1 Desenvolvimento das aulas

Primeira aula:

No primeiro momento da aula buscou-se estabelecer a problematização inicial por meio do delineamento do conceito da “dualidade onda-partícula” a partir de sua evolução histórica e de argumentos fenomenológicos.

Inicialmente, abordamos as discussões para a luz entre os séculos XVII e XVIII, sustentadas por Isaac Newton (1642 - 1727), e por Christiaan Huygens (1629 - 1695), sendo ambas exitosas na descrição dos fenômenos de reflexão e da refração luminosa. Revisou-se os fenômenos de interferência e difração da luz, assinalando que o último fez prevalecer a teoria ondulatória sobre a corpuscular. Posteriormente, com a apresentação das Equações de Maxwell que organiza as relações e leis que descrevem os fenômenos elétricos e magnéticos, associando argumentos de simetria, foi possível apresentar o comportamento das ondas eletromagnéticas. Seguiu-se à esta descrição da evolução histórica do modelo conceitual da luz, a apresentação, em uma abordagem fenomenológica, dos efeitos fotoelétrico e Compton, cuja compreensão evoca um

modelo corpuscular para o fóton. Estes resultados dão conta da natureza dual dos fótons fazendo emergir uma contradição lógica.

Figura 15 – Primeira parte da seleção de Slides que compõem parte da apresentação da primeira aula. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Newton e Huygens

• No século XVII o estudo da óptica foi dividido pelas teorias de Isaac Newton (1642-1727, inglês) e de Christiaan Huygens (1629-1695, holandês) que defendiam teorias distintas com respeito às propriedades da luz. Ambos conseguiram descrever os fenômenos de reflexão e da refração para a luz.

• Seguidores de Newton defendiam um caráter **CORPUSCULAR** para a luz:
 “Como a luz é um corpo, aparece de sua reflexão, refração, composição, divisão, e seu movimento no tempo; mas especialmente por ser propagada em linhas retas, e por ser parada por um obstáculo do qual não passa, se não é transparente; o que mostra que ela não pode ser uma ação sobre o meio, que seria propagada além de um obstáculo, como no caso do som”. [1]

• Seguidores de Huygens defendiam um caráter **CORPUSCULAR** para a luz:
 “Baseando-se em sua concepção de luz como pulsos não periódicos propagados pelo éter, Huygens foi habil em construir explicações bastante sofisticadas sobre a refração e a reflexão. Por meio do “princípio de Huygens” (um pulso luminoso gera pulsos secundários à medida que ele se propaga), ele conseguiu derivar o comportamento dos raios de luz nestes dois fenômenos, aplicando-o de maneira coerente do ponto de vista geométrico”. [1]

[1] Heug, S.A., Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 113-141, abr 2016.

Newton e Huygens

• Se a luz fosse feita de corpúsculos, como essas partículas se cruzariam no ar sem uma atrapalhar o movimento da outra? Isso não poderia estar de acordo com os fenômenos naturais. Podemos emergir um objeto mesmo com a luz proveniente de inúmeros outros se cruzando pelo ar à nossa frente.

• As ondas na água que passam margeando um obstáculo grande se curvam em direção às águas paradas do outro lado do obstáculo, mas as estrélas fixas deixam de ser vistas quando um planeta fica entre elas e a Terra. Como a luz poderia ser uma onda no éter se ela não contorna os obstáculos como o vento e como as ondas na água?

Young e Fresnel

• No início do século XIX, os experimentos de interferência da luz em fendas duplas, realizados por Young, ofereceram sustentação à teoria ondulatória da luz.

• Outros experimentos de difração da luz, realizados por Fresnel, também corroboraram uma visão ondulatória da luz.

• Assim, as observações experimentais dos fenômenos de interferência e difração da luz consolidam dentro da comunidade científica da época o modelo ondulatório para a luz.

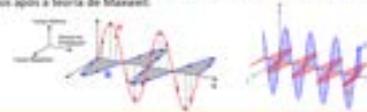


James Maxwell e as ondas luminosas

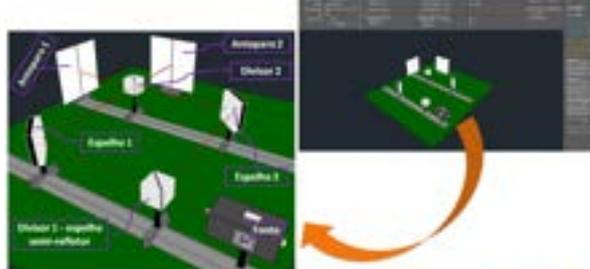
• Maxwell organizou as relações e leis que descrevem os fenômenos elétricos e magnéticos e, associando argumentos de simetria, formulou um conjunto de equações que levaram o seu nome e que revolucionaram a física, dando surgimento à era do eletromagnetismo.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho_{ext}}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j}_{ext} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

• Maxwell foi ainda capaz de demonstrar teoricamente que **A LUZ É UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA** que viaja no vácuo com uma velocidade de aproximadamente $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s. A verificação experimental foi realizada por Hertz em 1888, 25 anos após a teoria de Maxwell.

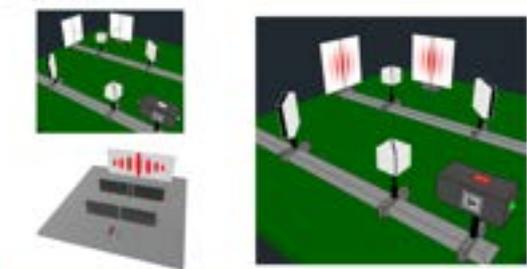


Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder



Interferência da luz no Interferômetro de Mach-Zehnder

• Análogo a Dupla Fenda



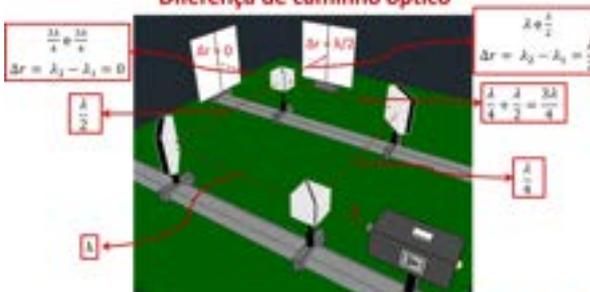
Diferença de caminho óptico

$\Delta r = \lambda_2 - \lambda_1 = 0$

$\Delta r = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda}{2}$

$\Delta r = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda}{4}$

$\Delta r = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{3\lambda}{4}$



Padrão de Interferência

• Os padrões nos anteparos 1 e 2 são complementares entre si. Observe a linha central e compare os dois anteparos.

• Quando ocorre interferência construtiva em uma posição num anteparo, na posição equivalente no outro anteparo ocorre interferência destrutiva, e vice-versa.

• Note que basta uma análise ou abordagem puramente ondulatória para explicar este fenômeno.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O uso de uma simulação computacional intitulada “Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder” (IVMZ) (a ser discutido mais adiante) permitiu desenvolver uma discussão em torno das duas facetas do fóton, de onda e partícula. O software permite simular a interferência de feixes de

fótons de alta intensidade, muitos fótons se propagando simultaneamente, e de baixa intensidade, emitidos quase individualmente e que assim se propagam. As figuras 15 e 16 apresentam um recorte até esta fase do desenvolvimento.

Figura 16 – Segunda parte da seleção de Slides que compões parte da apresentação da primeira aula. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Efeito fotoelétrico

Em 1905, Einstein ao tentar explicar o efeito fotoelétrico propôs que a energia radiante era quantizada, transferida em pacotes concentrados, que mais tarde vieram a ser chamados fótons.

O fóton entrega energia como fosse uma partícula?!

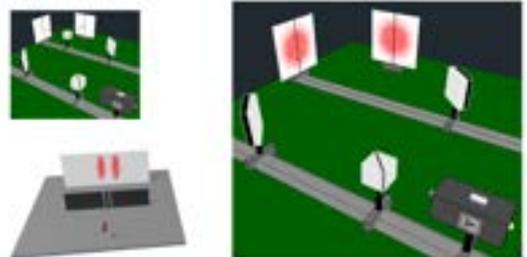


$K_{max} = E - W_0$
 $E = hf = eV_s + W_0$

UFV - DFE - MNP/EE

Deteção de Fótons

• Emissão de Fótons únicos



UFV - DFE - MNP/EE

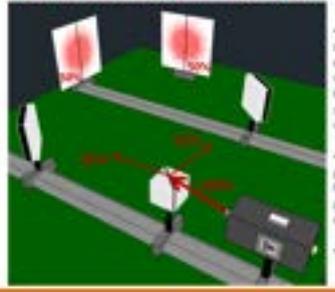
Distribuições Pontuais dos Fótons

• Um fóton está inicialmente localizado em um pequeno volume, e permanece localizado à medida que se afasta da fonte com velocidade c .

• Um fóton carrega uma quantidade de energia:

$E = hf$

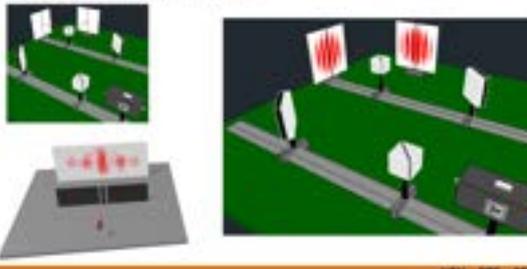
• Fótons são indivisíveis.



UFV - DFE - MNP/EE

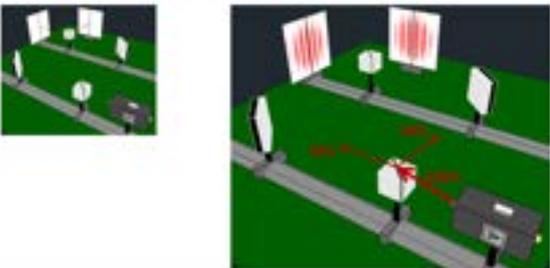
Interferência e difração de Fótons

• Análogo a Onda Fenda. Emissão de Fótons únicos.



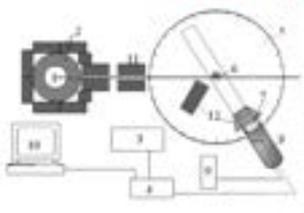
UFV - DFE - MNP/EE

Padrão de complementaridade



UFV - DFE - MNP/EE

Efeito Compton (1923)




1. Fonte ^{60}Co
2. Escudo de chumbo
3. Detetador
4. Alvo de alumínio
5. Ponte de tensão
6. Amplificador
7. Contador de taxa
8. Multiplicador
9. Escudo de chumbo
10. Aparelho de leitura
11. Colimador
12. Barragem de chumbo

UFV - DFE - MNP/EE

Concepção corpuscular da luz - Efeito Compton

Em 1923, Compton observa experimentalmente o espalhamento de raios x por um alvo de grafite. Para explicar esse fenômeno foi preciso ir além do formalismo ondulatório para a radiação eletromagnética. O fenômeno ficou conhecido como **efeito Compton**.

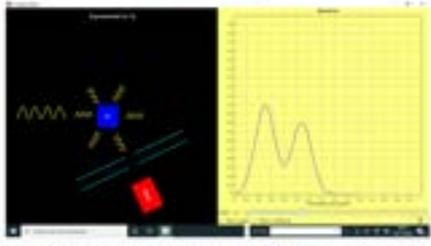


$E = hf$
 $P = h/\lambda$

• No artigo "Uma teoria Quântica para o Espalhamento de raios X por elementos leves" Compton escreveu:
"A presente teoria depende essencialmente da suposição de que cada elétron que participa do processo espalha um quantum completo (fóton). Isso envolve também a hipótese de que os quanta de radiação vêm de direções definidas e são espalhados em direções definidas. O apoio experimental da teoria indica de forma bastante convincente que um quantum de radiação carrega tanto momento quanto energia".

UFV - DFE - MNP/EE

Efeito Compton



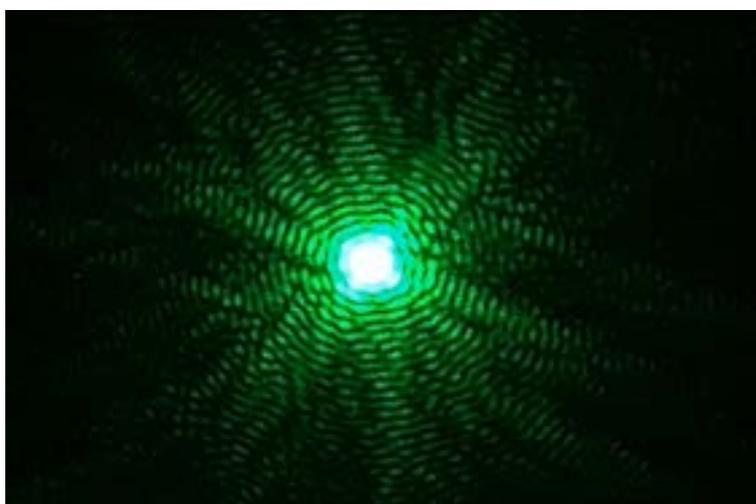
UFV - DFE - MNP/EE

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para abordar os fenômenos de interferência e difração, elaboramos um vídeo que consiste em um experimento de interferência por da luz por fenda circular, onde utilizamos um laser, um su-

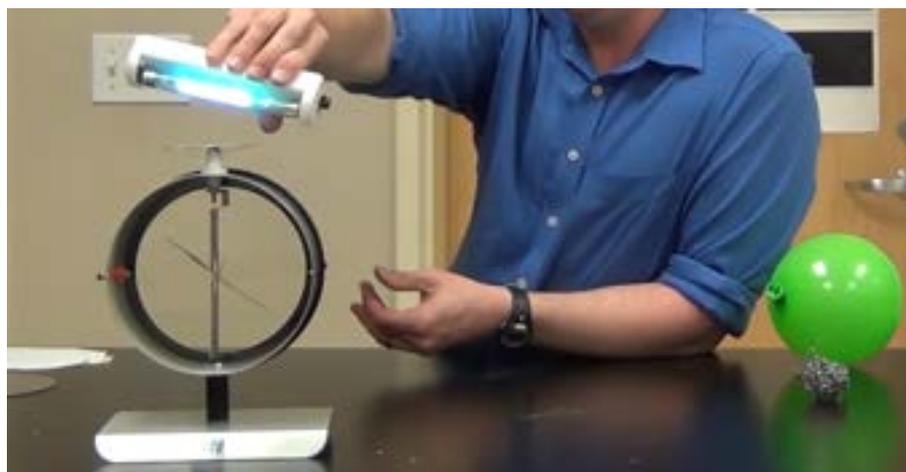
porte de isopor, uma chapa metálica com um pequeno furo e uma parede branca como anteparo de observação. O experimento consiste em fixar o laser e a chapa metálica usando a placa de isopor como suporte, colocar este aparato disposta uma certa distância da tela de observação e fazer incidir a luz do laser sobre o furo na chapa metálica de modo a ser projetado na parede. O aluno é capaz de observar um padrão de interferência com franjas circulares como mostra a figura 17, uma vez que, o comprimento de onda do laser utilizado é compatível às dimensões do furo na chapa metálica.

Figura 17 – Resultado experimental mostrando um padrão de interferência devido a difração da luz numa fenda circular.



Fonte: Elaborada pelo autor. Um vídeo do experimento pode ser consultado em: <https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>.

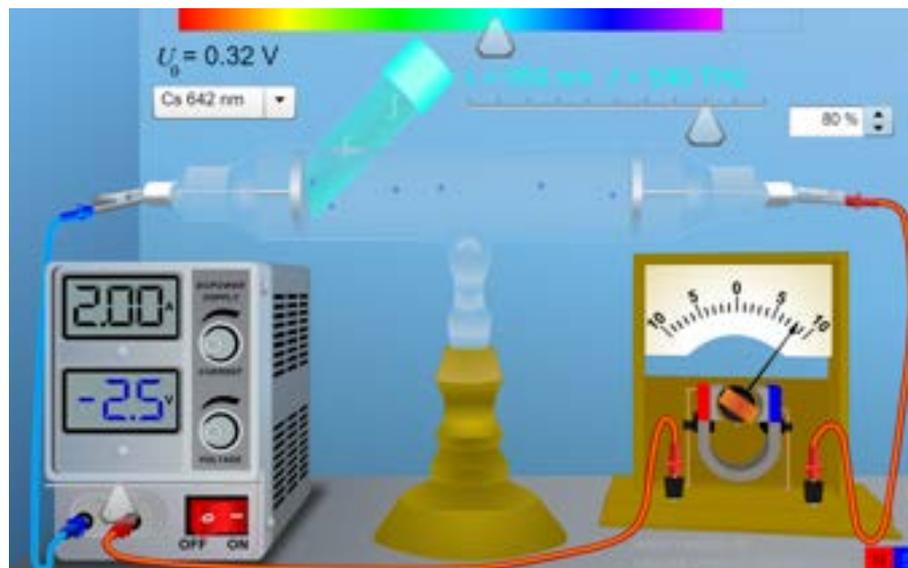
Para abordar o efeito fotoelétrico sugerimos a utilização do vídeo (figura 18), onde é utilizado um eletroscópio, uma chapa de zinco, uma lâmpada ultravioleta e materiais para eletrização. Inicialmente acopla-se a placa metálica de zinco ao eletroscópio e na sequência eletriza-se o sistema, de modo que, por repulsão coulombiana a agulha do eletroscópio é defletida. Então, aproxima-se a luz ultravioleta da superfície da placa de zinco e observa-se que a agulha do eletroscópio volta a sua posição de equilíbrio. O aluno poderá concluir desta observação que a radiação incidente foi capaz de provocar a ejeção de elétrons da placa. No segundo momento do experimento, eletriza-se novamente o sistema com uma outra fonte de cargas de modo a agulha defletir e logo em seguida aproxima-se a luz, porém, agora nada acontece com a agulha que permanece sofrendo ação da repulsão coulombiana. Desta vez, o aluno poderá concluir que o sistema estava eletrizado positivamente, de modo que, mesmo se os elétrons fossem ejetados do sistema por efeito fotoelétrico, simplesmente, estaria aumentando-se a quantidade de carga positiva no sistema.

Figura 18 – Imagem de um vídeo sobre o efeito fotoelétrico.

Fonte: Captura de tela. <<https://www.youtube.com/watch?v=z-3XaXCvjZw>>.

Para complementar a discussão e o entendimento sobre o efeito fotoelétrico segue-se com a simulação computacional (figura 19). Esta permite variar comprimento de onda, amplitude da luz incidente e diferença de potencial entre os terminais do circuito. É possível escolher diferentes tipos de metais e medir a corrente proveniente da ejeção de elétrons quando determinada radiação incidir sobre ele. Com essa simulação é possível analisar que o efeito fotoelétrico não depende da intensidade da luz incidente mas sim do comprimento de onda, para tal, basta escolher uma determinada configuração. Por exemplo, no caso do metal césio, para comprimentos de onda maiores que 642 nm, não importa a intensidade do feixe. Não ocorre ejeção de elétrons do material para esse comprimento de onda. Entretanto, para valores menores que 642 nm o efeito ocorre e, nesses casos, maior intensidade da luz promove maior ejeção de elétrons, pois, temos mais fótons energéticos o suficiente atingindo o material por unidade de tempo. A simulação também permite analisar que a energia cinética máxima da ejeção dos elétrons depende exclusivamente do comprimento de onda da radiação, e para isto, devemos variar a diferença de potencial no circuito. Por exemplo, césio, 490 nm e 100% de intensidade marca uma corrente nula quando aplicamos 0,7 V nas extremidades do circuito, ou seja, uma ddp de 0,7 V foi capaz de desacelerar os elétrons mais energéticos ejetados do metal. Agora, nessa última configuração, se alteramos para 471 nm ou menos, surgirá uma corrente, pois, os elétrons ficarão mais energéticos. De todos esses resultados vem o argumento que a energia radiante é quantizada e transferida em pacotes concentrados de forma abrupta. Ou seja, a luz é composta de Fótons que são pacotes de energia indivisíveis, não transferem energia aos poucos de forma contínua, mas sim aos pacotes abruptamente.

Figura 19 – Imagem de uma simulação computacional sobre o Efeito Fotoelétrico.



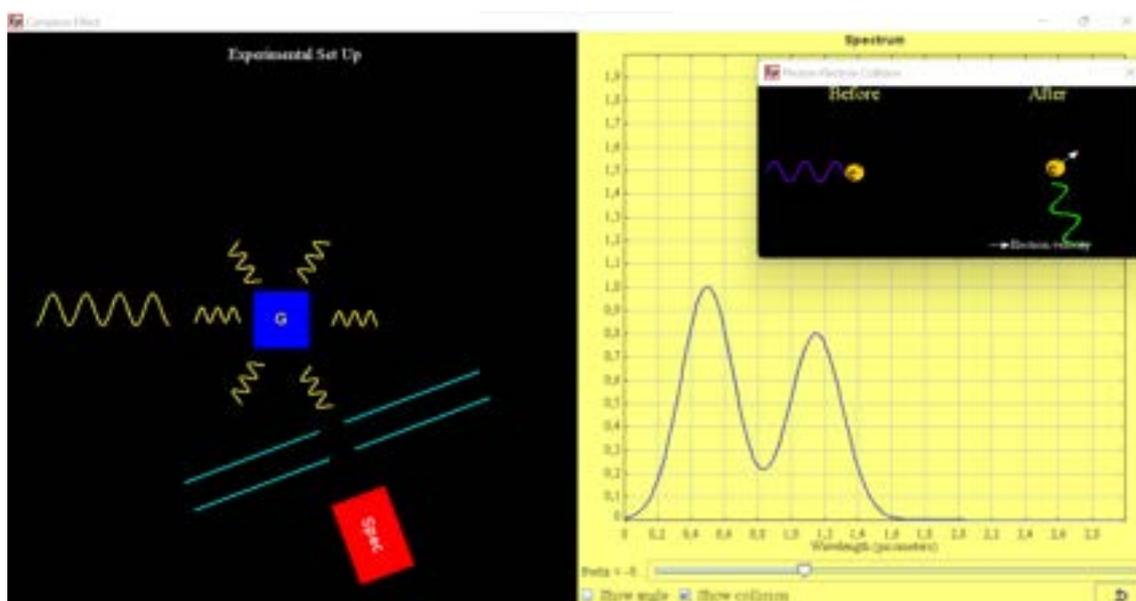
Fonte: Captura de tela.

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_fotoefekt&l=pt.

Sobre o efeito Compton, a simulação computacional (figura 20), consiste na detecção do espalhamento de raios-x por um alvo. Pode-se observar que variando o ângulo de detecção da radiação espalhada pelo alvo, o comprimento de onda espalhado não coincide com o comprimento de onda incidente, o que viola a conservação de energia quando considerado a radiação incidente como ondulatória. Porém, entendendo que fótons possuem além de energia, também momento, pode-se imaginar a colisão entre os fótons incidentes e elétrons do alvo como uma colisão entre bolas de bilhar. Dessa forma, a conservação do momento permite compreender o surgimento de um comprimento de onda espalhado que difere do incidente, uma vez que, o fóton perde energia para o elétron na colisão.

Nesta primeira aula buscamos despertar curiosidade e caráter investigativo nos estudantes. A partir de observações experimentais e argumentos lógicos, é construindo uma trilha de conhecimento capaz de facilitar a compreensão da observação de características distintas da luz, além de certos indícios para uma proposta de solução ao problema, como a construção de novos argumentos em cada etapa de investigação, ora comportamento ondulatório, ora corpuscular. Dessa forma o estudante tem a oportunidade de aprender e experimentar o fazer científico, a partir de, observações experimentais e elaboração de argumentos científicos para propor modelos.

Ao final desta aula o estudante terá perpassado por parte da história da ciência, desde o final do século XVII até meados do século XX, lembrando que as relações do homem com as interpretações de fenômenos naturais vêm de longo tempo da história. No processo de anali-

Figura 20 – Imagem de simulação computacional sobre o Efeito Compton.

Fonte: Captura de tela. <[https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531#:~:text=The%20Compton%20Effect%20model%20simulates,\(photon%2Delectron\)%20scattering.&text=The%20Compton%20Effect%20model%20was,Simulations%20\(EJS\)%20modeling%20tool](https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531#:~:text=The%20Compton%20Effect%20model%20simulates,(photon%2Delectron)%20scattering.&text=The%20Compton%20Effect%20model%20was,Simulations%20(EJS)%20modeling%20tool)>.

sar e descrever fenômenos naturais, os alunos perpassam pelo fazer científico, entendendo que, ao elaborar-se e se desenvolverem ideias e raciocínios cada vez mais complexos ao longo do tempo dá-se origem à ciência, unida ao desenvolvimento tecnológico de cada geração, hora dependente desta, hora potencializando-a. Assim, podendo concluir que a ciência não é imutável, pelo contrário, ela se adapta às novas evidências e argumentos aceitos pela comunidade científica vigente. Muitas das vezes uma teoria é modificada ou substituída à medida que novas evidências e experimentos possibilitam a construção de modelos mais abrangentes e fieis à realidade observada.

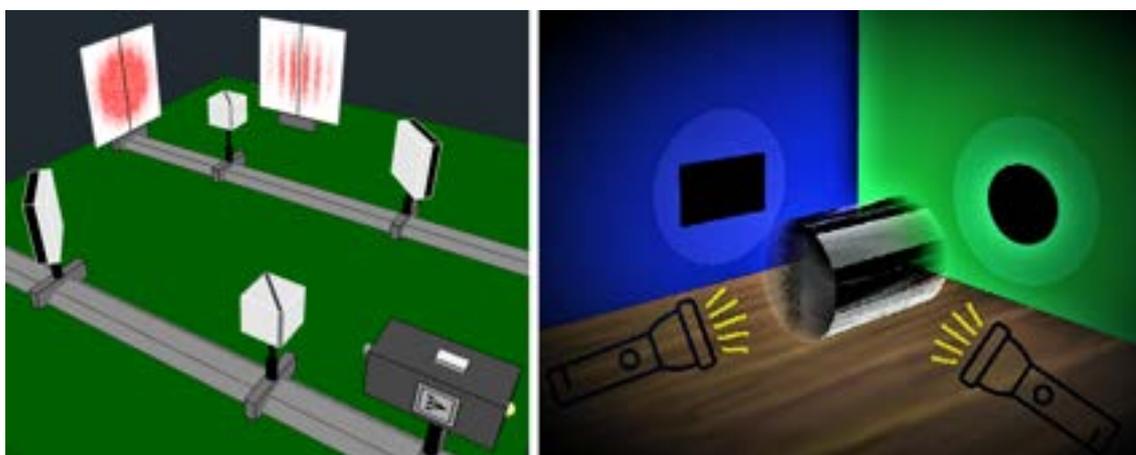
Segunda aula:

Num primeiro momento da segunda aula recapitulamos elementos centrais da aula anterior. A apresentação de resultados experimentais do IVMZ em conjunto com uma analogia (figura 21) possibilitou fomentar questionamentos acerca da dualidade tal como entendida a partir da mecânica clássica. Um objeto clássico não pode ser uma onda e uma partícula. Introduzimos na sequência a ideia da necessidade da construção de um novo formalismo para explicar as observações experimentais em sua totalidade. Assim, um contraste entre a mecânica clássica e o surgimento da teoria quântica para modelar as observações da natureza é apresentado, con-

solidando a sedimentação dos conceitos e ideias-chaves em análise. Se algo se mostra para nós no mundo macroscópico como onda ou partícula é o que tomamos como natural por ser intuitivo, pois, é o que conhecemos por já ter sido compreendido e modelado pela ciência no nível macroscópico. Ao explorar-se novas escalas percebemos que as coisas podem fugir a este natural. Pode-se então se questionar que o que observamos antes era apenas um caso particular de algo mais geral? ou não? Tais questionamentos levam a despertar ainda mais a curiosidade dos alunos, e corrobora para facilitar a desconstrução de possíveis contradições lógicas como assumir entidades duais.

Na figura 21 observa-se que um cilindro ao ser iluminado apresenta em anteparos de observações distintas sombras com formas geométricas distintas dependendo dos ângulos de iluminação e visualização. Para um observador que analisa a situação olhando apenas a projeção da sombra do cilindro de frente, pode concluir que o objeto em análise é uma esfera. Para outro observador que olhe apenas a projeção da sombra lateral do cilindro, pode concluir que o objeto em análise é um paralelepípedo. Porém, um observador atento, que observe os vários ângulos possíveis, pode concluir que o objeto em análise é um cilindro de base circular. Ou seja, se um dado observador não fizer uma análise completa e atenta olhando todas as características que descrevem o sistema observado, este pode supor conclusões erradas, pois seu conjunto de análises está incompleto, não descreve a totalidade da realidade observada. Analogamente a esta situação, podemos observar que ondas e partículas são apenas manifestações macroscópicas de aspectos dos objetos quânticos.

Figura 21 – Fenômenos intermediários.



Fonte: Esquerda: captura de tela - <<http://www.lief.if.ufrgs.br/~cjhc/vmzi.html>>; direita: ilustração elaborada pelo autor.

Num segundo momento da aula, extrapolamos a discussão para além dos fenômenos lu-

minosos. Seguiu-se à discussão a exposição dos resultados de experimentos reais da difração de elétrons e interferência de feixes de elétrons e de fótons de baixíssima intensidade. Estes resultados explicitam a natureza dual dos objetos quânticos revelando que elétrons e fótons não são nem ondas nem partículas. Caso fossem partículas, a incidência destes em um anteparo não produziria a figura de interferência observada após um longo tempo de exposição. De outro lado, se fossem ondas, um único fóton ou elétron deveria produzir uma figura de difração no anteparo, mesmo que tênue.

A partir deste ponto a argumentação foi conduzida no sentido de estimular a comparação em torno dos objetos clássicos (onda, partícula), e de objetos quânticos (fótons, elétrons, ...), evidenciando que estes últimos apresentam características dos primeiros, mas não são nenhum nem outro. Foi então desenvolvida a ideia de que o objeto quântico é algo diferente da onda e da partícula, é um outro objeto. Esta perspectiva promove o desfazimento da contradição lógica, e estes objetos quânticos podem ser nomeados como se queira. Alguns autores os nomearam como wavicle, quantons, micropartículas, entre outros, entretanto, nenhum destes nomes se tornou consagrado na literatura científica.

Figura 22 – Imagem de um vídeo sobre a difração de elétrons. Esquerda: Montagem do aparato experimental; Direita: resultado experimental.



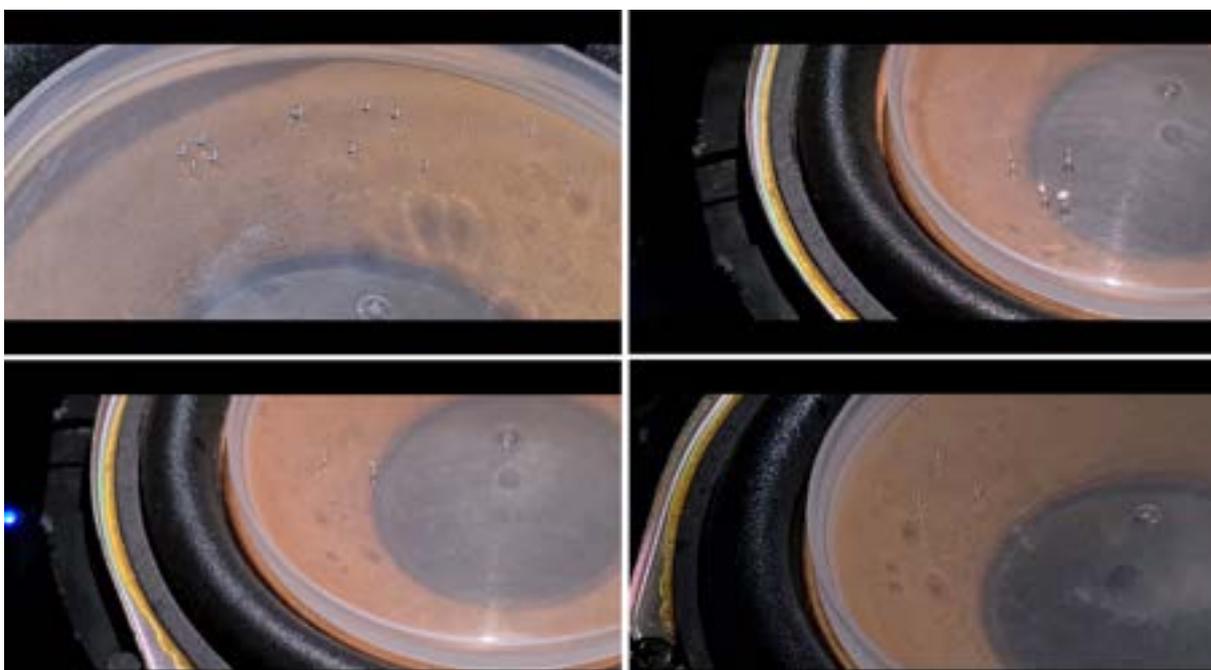
Fonte: Elaborada pelo autor. Um vídeo do experimento pode ser consultado em:
<<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>>.

Para abordar o fenômeno da difração de elétrons, elaboramos um vídeo (figura 22) onde é apresentado um experimento real deste fenômeno. Este consiste basicamente em gerar um feixe de elétrons que será acelerado para colidir com uma grade de grafite. Nesse processo, os elétrons serão espalhados e numa tela de observação sensível que é iluminada quando detecta elétrons, forma-se uma figura de interferência com padrões circulares. Assim, como explicar que elétrons espalhados formam um padrão de interferência? Louis de Broglie sugere que elétrons possuem associado a eles uma onda de matéria que governa seu movimento. Assim,

a figura de interferência tem origem pela difração das ondas associadas aos elétrons na rede cristalina de grafite.

No terceiro momento desta segunda aula foi apresentada algumas interpretações para o problema proposto na sequência didática. Uma discussão das interpretações ondulatória, corpuscular, dualista realista e da complementaridade foram guiadas segundo argumentos lógicos dentro de cada seguimento das estruturas de pensamento destas linhas filosóficas. Tomou-se o cuidado de mostrar que tais argumentos compõem um conjunto de interpretações possíveis, mas que não há um consenso na comunidade científica ainda sobre uma única interpretação padrão. Desse modo, a discussão permanece em constante debate.

Figura 23 – Detalhe do resultado experimental da analogia mecânica para a interpretação dualista-realista da Física Quântica.



Fonte: Elaborada pelo autor. Um vídeo do experimento pode ser consultado em:
<<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>>.

A aula foi finalizada com a apresentação de um vídeo de experimento, de fácil construção, que oferece uma analogia mecânica ao fenômeno da “dualidade onda-partícula” (figura 23). Ele consiste na construção de um sistema mecânico constituído de uma base vibratória sob a qual é colocada um fluido viscoso que, ao ser perturbado gerando uma gotícula de fluido na superfície, fornece uma analogia à interpretação dualista realista, onde se argumenta que objetos quânticos dividem-se em duas partes, uma onda-piloto (ou onda associada) e uma partícula. A onda associada governa o movimento da partícula que possui uma trajetória bem definida, mas desconhecida. A analogia se dá pela ligação visual da gotícula de fluido que oscila sobre o

restante desse fluido, tendo associada a ela uma onda devido à vibração do sistema como mostra a figura 23. A figura 24 apresenta um recorte da sequência da segunda aula.

Figura 24 – Seleção de Slides que compõem parte da apresentação da segunda aula. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Dualidade onda-partícula?

LUV - DFE - MNPDI

Dualidade onda-partícula?

Analogia

LUV - DFE - MNPDI

Como explicar isso?

Mecânica Clássica X Mecânica Quântica

Padrão de interferência

Distribuições pontuais de fótons

Índice de refração: $n = c/v$

Velocidade de propagação: $v = c/n$

Alterando-se e altera-se λ , assim:

$v = c/f = \lambda f$

$\Rightarrow \lambda = c/f$

LUV - DFE - MNPDI

Complementaridade ou Dualidade Onda-Partícula?

Distribuições pontuais de fótons

Padrão de interferência

O fóton carrega as características de onda e de partícula!

$\lambda = c/f$

$\lambda = c/f$

LUV - DFE - MNPDI

Interferência de feixes de baixíssima intensidade

• Elétrons

1000 elétrons

100 elétrons

10 elétrons

TOSCANI, R. et al. American Journal of Physics, v. 51, n. 2, p. 127-130 (1983).

• Fótons

1000 fótons

100 fótons

10 fótons

PEDE, P. American Scientist, v. 90, n. 3, p. 260-267 (2002).

LUV - DFE - MNPDI

Como pode algo ser considerado ONDA e PARTÍCULA?

- Onda é um ente que está sempre em movimento, propaga-se preenchendo todo o espaço. Troca energia suavemente.
- Partícula é um ente material concentrado, pontual no espaço. Troca energia de forma abrupta.

• Os elétrons e os fótons apresentam comportamento ondulatório, mas não são ondas clássicas visto que um único elétron ou um único fóton não gera uma figura de interferência completa, mas produz somente uma marca sobre a tela fotográfica, como fosse uma partícula clássica. Entretanto esta marca está em uma região da figura de interferência resultante da incidência de vários elétrons ou de vários fótons. Assim elétrons e fótons apresentam características de partículas e de ondas clássicas, entretanto **NÃO SÃO** nenhuma coisa nenhuma.

• O conceito de **Wavicle** foi introduzido em 1928 por Arthur Stanley Eddington, em seu trabalho "The Nature of the Physical World. London: MacMillan, 1928".

```

    graph LR
      Foton[Fóton] -- "Interação com a matéria" --> Particula[Partícula]
      Foton -- "Propagação" --> Onda[Onda]
      Particula --> Particle[Particle]
      Onda --> Wave[Wave]
      Particle --- Wavicle[Wavicle]
      Wave --- Wavicle
    
```

LUV - DFE - MNPDI

Algumas Interpretações da dualidade onda-partícula

- **Interpretação Ondulatória** – Apoiada por Erwin Schrödinger e John von Neumann. Consiste em argumentar que num experimento quântico um objeto propaga-se como uma onda antes de ser detectada e após sua detecção torna-se localizada, semelhante uma partícula. Cuidado-se então a termo colapso da função de onda, que permite tratar um objeto quântico como uma onda bem distribuída no espaço antes da detecção, sendo que esta sofre um colapso ao ser detectada tornando-se mais ou menos localizada como uma partícula. Porém, não há a existência de ambos ao mesmo tempo.
- **Interpretação Corpuscular** – Apoiada por Alfred Landé e Leslie Ballentine. Consiste em argumentar que objetos quânticos como elétrons e fótons são corpusculares. Descartam-se hipóteses de ondas associadas aos objetos. A explicação para a observação de padrões de interferência em experimentos deve ser dada a partir das interações entre os objetos e os instrumentos de medida.
- **Interpretação Dualista Realista** – Apoiada por Louis de Broglie e David Bohm. Consiste em argumentar que objetos quânticos dividem-se em dois partes, uma onda-piloto ou associada e uma partícula. A onda associada governa o movimento da partícula que possui uma trajetória bem definida, mas desconhecida. A observação dos padrões de interferência em um experimento é explicada pela superposição das amplitudes das ondas associadas aos objetos.
- **Interpretação da Complementaridade** – Apoiada e desenvolvida por Niels Bohr. Consiste em argumentar que objetos quânticos são ondas. Descarta-se a ideia de partícula uma vez que não é possível determinar o percurso do objeto anterior à sua detecção. A manifestação do aspecto corpuscular num experimento se dá por causa de forma intrinsecamente descontínua do ato de uma medição, como por exemplo, a ionização de um átomo.

LUV - DFE - MNPDI

Analogia - interpretação Dualista Realista

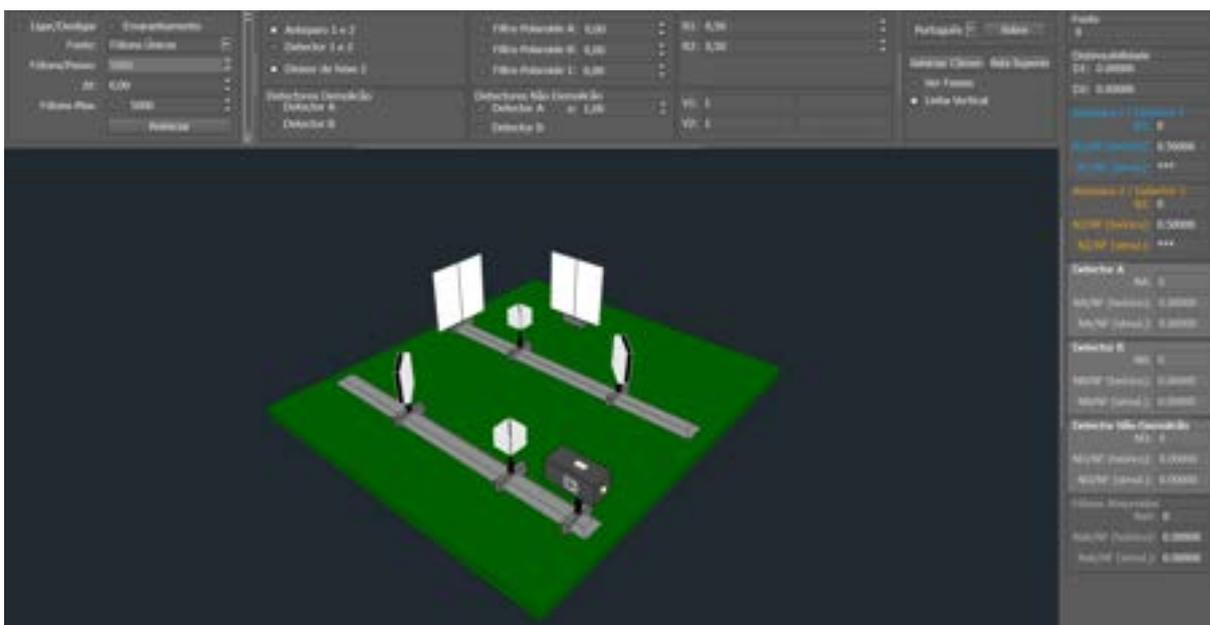
LUV - DFE - MNPDI

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder - IVMZ

O Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ) apresentado na figura 25 é uma simulação computacional disponibilizada pela UFRGS (VIRTUAL..., 2017). O uso desta simulação no ensino de física mostra-se relevante por sua praticidade e forte apelo didático. Muitos trabalhos são encontrados na literatura sobre o IVMZ (OSTERMANN; PRADO, 2005; RICCI; OSTERMANN; PRADO, 2007; OSTERMANN et al., 2009; PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009; OSTERMANN et al., 2012; NETTO, 2015; CAVALCANTI et al., 2017; NETTO; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2018; CAVALCANTI et al., 2020). Dessa forma não vamos aqui aprofundar nas potencialidade ou explicações técnicas do IVMZ. Vamos comentar brevemente alguns arranjos que a ferramenta nos possibilita desenvolver discussões ao longo das duas aulas da sequência, uma vez que, nos permite desenvolver argumentações, exibindo as duas facetas do fóton.

Figura 25 – Imagem da tela inicial do IVMZ.

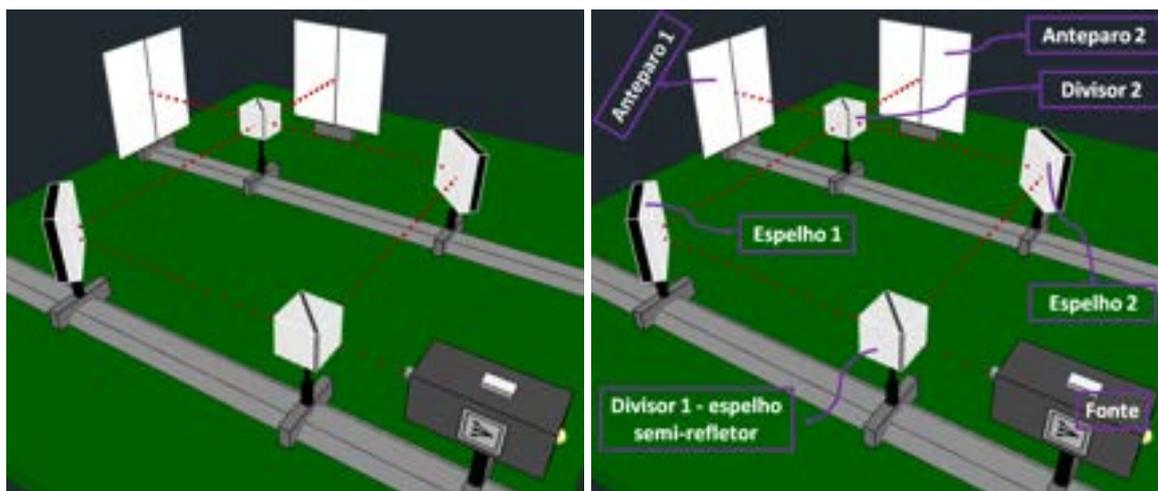


Fonte: Captura de tela. Simulação computacional disponível em:
<<http://www.lief.if.ufrgs.br/~cjhc/vmzi.html>>.

A simulação é constituída por um par de anteparos, espelhos e semi-espelhos além de uma fonte emissora de radiação que estão dispostos sobre uma mesa óptica, como apresentado na figura 26. Os divisores de feixe ou semi-espelhos refletem 50% da luz e transmitem os outros 50% da luz neles incidente, e pode-se alterar essa porcentagem ajustando seu coeficiente de reflexão. Os espelhos refletem 100% da luz incidente e tem a função de direcionar o caminho

do feixe entre os divisores, já os anteparos funcionam como os detectores de radiação incidente. Na simulação é possível alterar a intensidade da fonte emissora, desde a condição de produzir um feixe luminoso contínuo, ou seja, um laser (regime clássico), até o nível de emissão de fótons únicos, ou seja, um feixe luminoso de baixíssima intensidade (regime quântico).

Figura 26 – Imagem do IVMZ evidenciando: esquerda - uma possível trajetória da luz; direita - os componentes da simulação computacional.

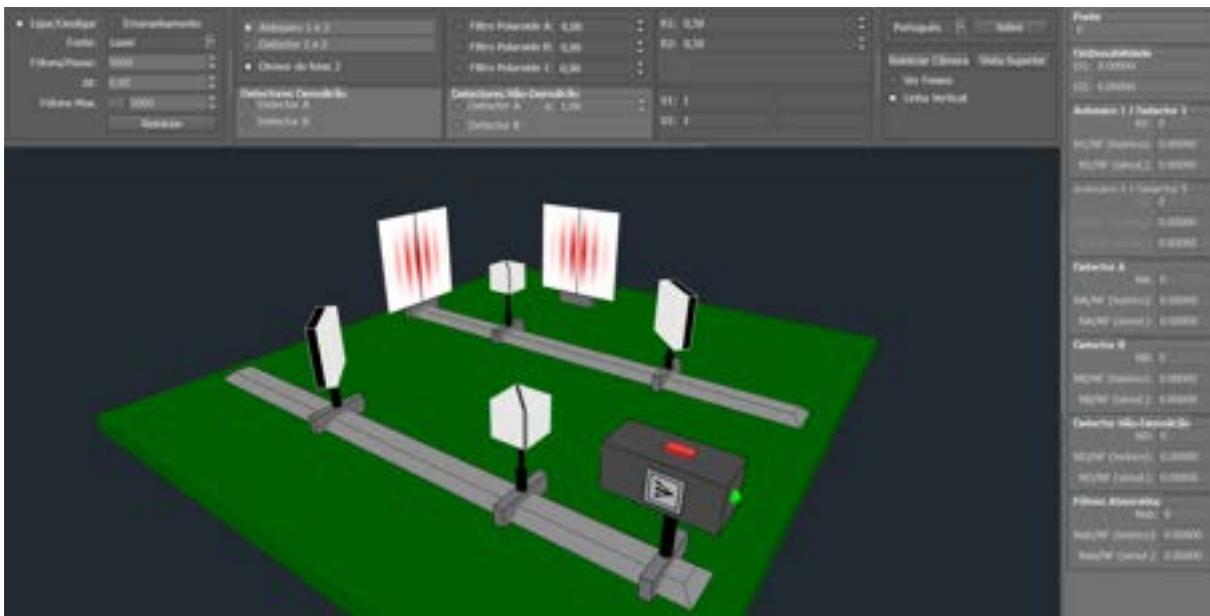


Fonte: Captura de tela adaptada do IVMZ.

Como já visto na seção 3.4, duas grandezas importantes que caracterizam os padrões formados em anteparos de observação são a visibilidade (\mathcal{V}) e a distinguibilidade (\mathcal{D}). A visibilidade é uma quantidade que define o contraste ou nitidez do padrão de interferência nos anteparos, pode ser encarada como algo que quantifica o caráter ondulatório. Já a distinguibilidade é relacionada à informação sobre qual caminho foi percorrido no interferômetro, pode ser encarada como algo que quantifica o caráter corpuscular. Ambas grandezas quantificam propriedades complementares de um objeto quântico, de forma que quanto mais precisas forem as informações sobre o caminho associado a ele no interferômetro (distinguibilidade), menor será a visibilidade do padrão de interferência nos anteparos de observação, e vice-versa. No IVMZ, pode-se modificar essas grandezas alterando os coeficientes de reflexão (R_1 e R_2) dos divisores de feixe. Quando $R_1 = R_2 = 0,5$, a configuração dos divisores de feixe é dita balanceada, correspondendo a uma máxima visibilidade ($\mathcal{V} = 1$) nos anteparos de observação e nenhuma informação sobre o caminho, ou seja, distinguibilidade nula ($\mathcal{D} = 0$).

No regime clássico de emissão luminosa, observa-se a formação de figuras complementares de interferência nos anteparos 1 e 2 (figura 27). Este resultado é análogo a um experimento de dupla fenda. O padrão de interferência formado é explicado por uma descrição ondulatória. A

Figura 27 – Simulação do IVMZ evidenciando característica ondulatória para um feixe luminoso. Parâmetros da simulação: fonte - laser, coeficientes de reflexão $R_1 = 0,5$ e $R_2 = 0,5$, visibilidade máxima ($\mathcal{V}_1 = 1$ e $\mathcal{V}_2 = 1$), distinguibilidade nula ($\mathcal{D}_1 = 0$ e $\mathcal{D}_2 = 0$).

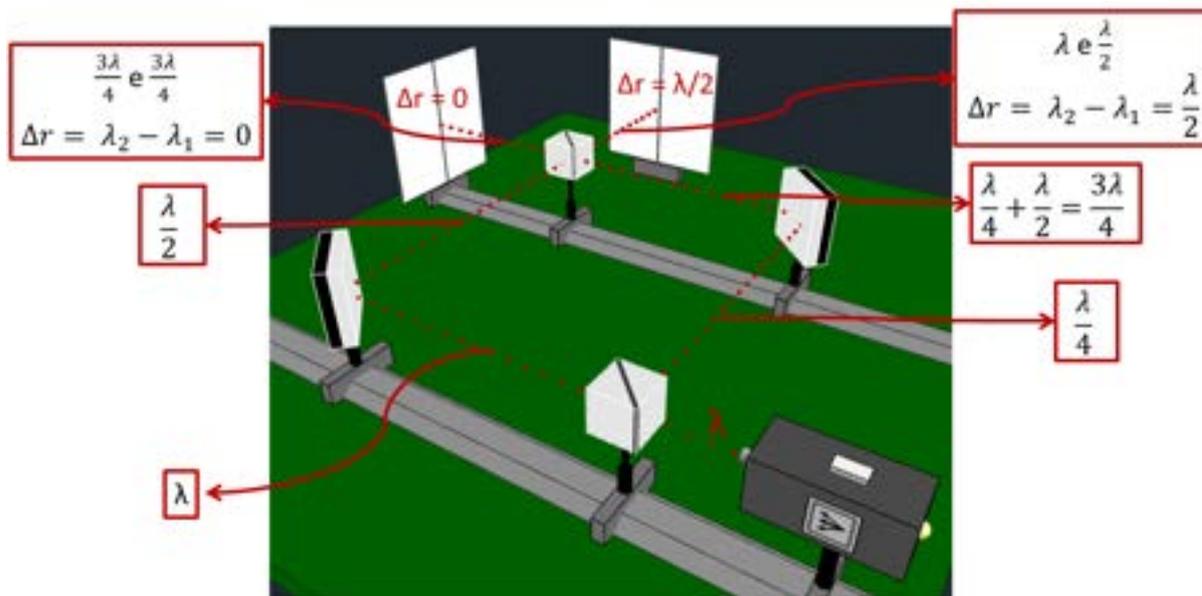


Fonte: Captura de tela do IVMZ.

luz é dividida no semi-espelho 1 em dois feixes com metade da intensidade cada, que seguem por caminhos distintos, e são recombinados pelo semi-espelho 2, após este dividir cada feixe incidente em outros dois com metade da intensidade cada. Então, os feixes recombinados seguem para os anteparos de observação. Quando a luz refletiu nos espelhos, foi induzida uma mudança de fase de π na onda, que corresponde a uma diferença de caminho de $\frac{\lambda}{2}$, em termos do comprimento de onda λ . Quando a luz foi dividida num semi-espelho uma mudança de fase de $\frac{\pi}{2}$ foi provocada na componente refletida, correspondendo assim a uma diferença de caminho de $\frac{\lambda}{4}$. A figura 28 faz uma análise da superposição de ondas que ocorre no ponto central de cada um dos anteparos de observação. Devido a diferença de caminho (ou diferença de fase) entre as componentes recombinadas, observa-se que ocorre interferência totalmente construtiva (as ondas chegam em fase) no anteparo 1 e interferência totalmente destrutiva (as ondas chegam completamente fora de fase) no anteparo 2.

No regime quântico, emitindo-se uma sequência de fótons únicos, podemos observar nos anteparos a formação de padrões como apresentados na figura 29. Uma vez que indivisíveis, ao incidirem no semi-espelho, 50% dos fótons seguem numa direção e 50% em outra. Quando os dois semi-espelhos balanceados são acoplados na montagem surge um padrão de interferência nos anteparos de observação que se complementam, e possuem visibilidade máxima, ou seja,

Figura 28 – Imagem do IVMZ evidenciando interferência totalmente destrutiva e interferência totalmente construtiva, devido a diferença de fase entre as componentes do feixe que percorrem caminhos distintos. Análise apenas do ponto central. Para uma análise dos demais pontos na tela de observação deve-se levar em conta a distribuição real do feixe luminoso e as demais diferenças de caminho entre as possíveis trajetórias. Maiores detalhes são apresentados por Ricci, Ostermann e Prado (2007).

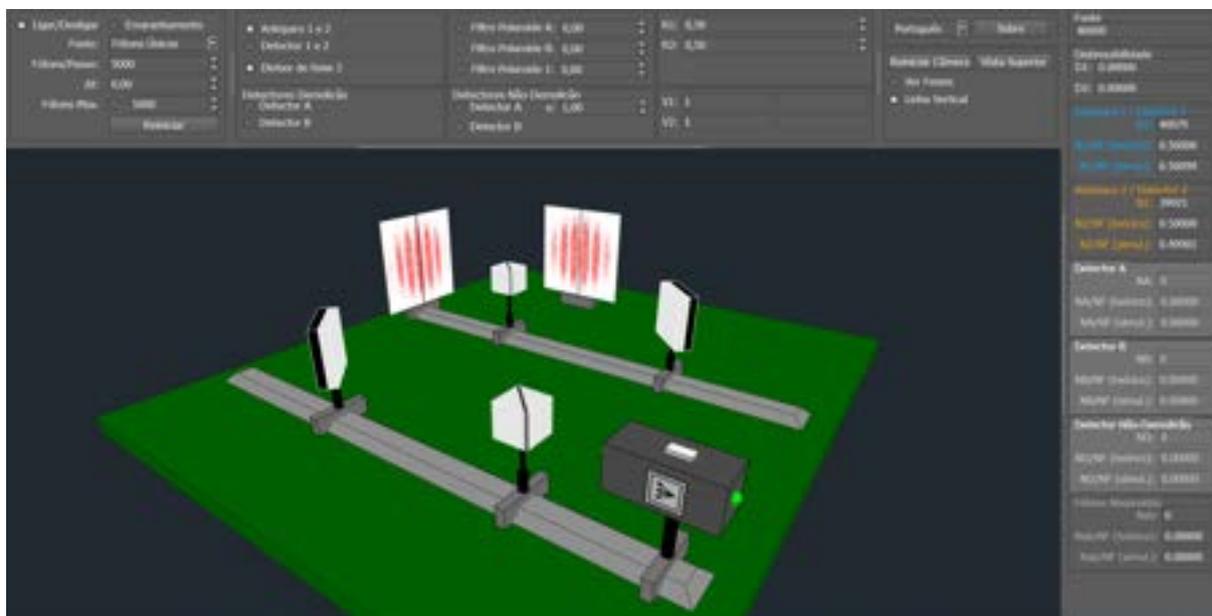


Fonte: Captura de tela adaptada do IVMZ.

quando ocorre detecção em uma posição num anteparo, na posição equivalente no outro anteparo não ocorre detecção, e vice-versa. As regiões com maior probabilidade de detecção em cada anteparo formam um ponto de máximo e as de menor detecção pontos de mínimo, o que são equivalentes a zonas de interferência construtiva e destrutiva, respectivamente, em figuras de interferência típicas de fenômenos ondulatórios. Cada fóton pode ser detectado apenas uma vez, já que o ato de medir o destrói. Assim, como ambos os caminhos tem a mesma probabilidade de ocorrência (50% reflexão e 50% transmissão), totalizam 100% ao final, somados os fótons de ambos anteparos de observação. Em contraste com a figura 27 (observação de padrões contínuos), podemos destacar agora o surgimento de uma “granulosidade” nas figuras de interferência devido à dispersão dos fótons detectados nos anteparos.

As diferentes interpretações da Física Quântica oferecem explicações para os resultados exibidos na figura 29. A interpretação ondulatória tende a imaginar uma divisão simétrica do fóton em duas partes sendo cada uma delas seguindo um caminho possível, porém, nunca foi detectado meio-fóton. A interpretação corpuscular tende a argumentar que a lógica quântica não é semelhante à clássica. A interpretação dualista realista tende a explicar que o fóton segue um dos caminhos possíveis enquanto sua onda associada é dividida com metade da intensidade nos respectivos divisores por cada caminho. A detecção do fóton se dará na trajetória onde as

Figura 29 – Simulação do IVMZ apresentando característica ondulatória para um feixe luminoso de baixíssima intensidade. Parâmetros da simulação: fonte - fótons únicos, coeficientes de reflexão $R_1 = 0,5$ e $R_2 = 0,5$, visibilidade máxima ($\mathcal{V}_1 = 1$ e $\mathcal{V}_2 = 1$), distinguibilidade nula ($\mathcal{D}_1 = 0$ e $\mathcal{D}_2 = 0$).



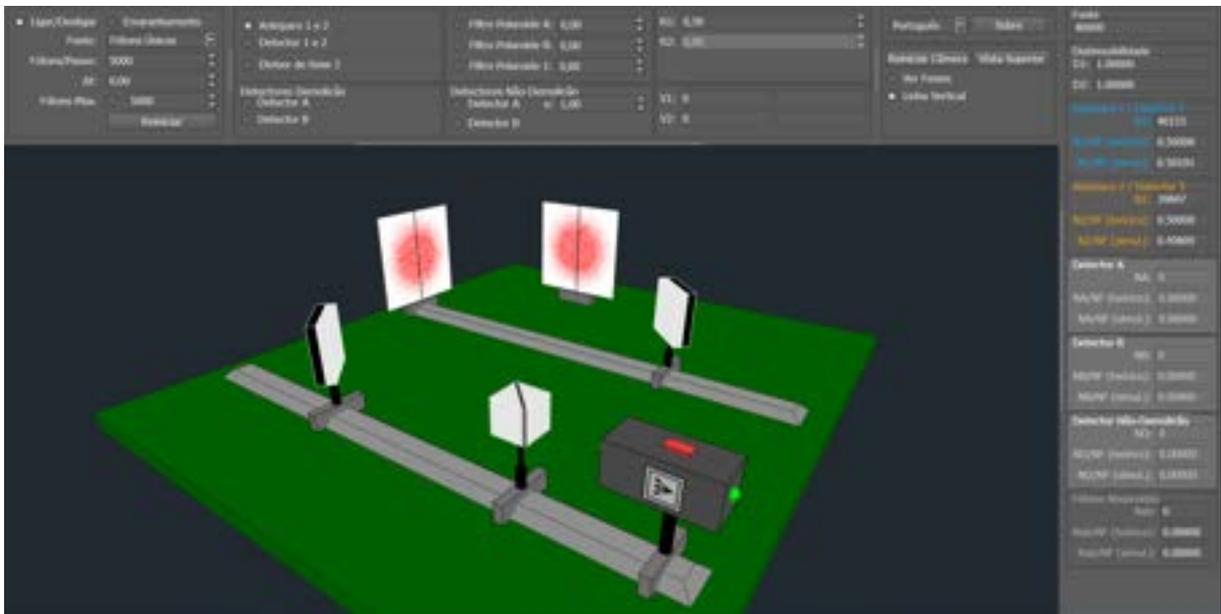
Fonte: Captura de tela do IVMZ.

ondas recombinadas no segundo divisor seja não nula. A interpretação da complementaridade argumenta que fenômenos ondulatórios e corpusculares são complementares, mas não ocorrem ao mesmo tempo, como as evidências experimentais apontam um fenômeno ondulatório não há sentido em se questionar onde está o fóton.

Agora, se for removido o divisor 2 do IVMZ como apresentado da figura 30, observa-se nos anteparos padrões aleatórios devido à dispersão dos fótons. Tais padrões observados são característicos de fenômenos corpusculares. Neste caso, retirar o segundo divisor de feixe da bancada (como foi feito) ou então escolher o coeficiente de reflexão deste como nulo, fornecem no mesmo resultado. Nessa configuração, a visibilidade é nula e não se observa nenhum padrão de interferência nos anteparos. Por outro lado, a distinguibilidade é máxima, ou seja, é possível com certeza associar um caminho para cada fóton, aqueles detectados no anteparo 1 certamente foram refletidos pelo divisor 1 (o fóton seguiu pelo caminho 2), enquanto que aqueles observados no anteparo 2 foram transmitidos pelo divisor 1 (O fóton seguiu pelo caminho 1).

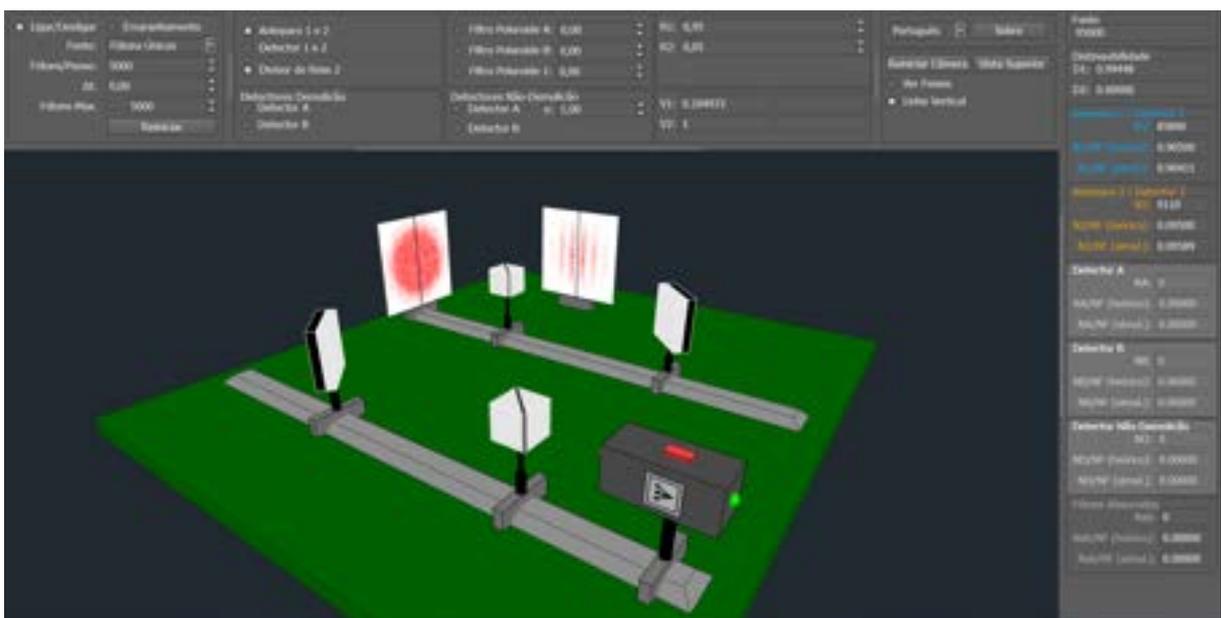
As diferentes interpretações da Física Quântica também oferecem explicações para os resultados exibidos na figura 30. A interpretação ondulatória tende a argumentar um colapso da função de onda em um dos anteparos de medição. Para a interpretação corpuscular a explicação é simples, o fóton segue um dos caminhos possíveis, análogo a uma partícula clássica. A

Figura 30 – Simulação do IVMZ apresentando característica corpuscular para um feixe luminoso de baixíssima intensidade. Parâmetros da simulação: fonte - fótons únicos, coeficientes de reflexão $R_1 = 0,5$ e $R_2 = 0$, visibilidade nula ($\mathcal{V}_1 = 0$ e $\mathcal{V}_2 = 0$), distinguibilidade máxima ($\mathcal{D}_1 = 1$ e $\mathcal{D}_2 = 1$).



Fonte: Captura de tela do IVMZ.

Figura 31 – Simulação do IVMZ apresentando um fenômeno intermediário. Parâmetros da simulação: fonte - fótons únicos, coeficientes de reflexão $R_1 = 0,95$ e $R_2 = 0,05$, visibilidade $\mathcal{V}_1 \approx 0,105$ e $\mathcal{V}_2 = 1$, distinguibilidade $\mathcal{D}_1 \approx 0,994$ e $\mathcal{D}_2 = 0$.



Fonte: Captura de tela do IVMZ.

interpretação dualista realista argumenta que o fóton segue um dos caminhos possíveis até atingir um anteparo, enquanto sua onda associada é dividida no semi-espelho, porém, a parte não detectada é dita uma onda vazia que não transporta energia. A interpretação da complementaridade argumenta que uma vez que a medida apresenta um comportamento de partícula então o fenômeno é corpuscular, ao passar pelo divisor o fóton segue um dos caminhos possíveis com 50% de probabilidade cada.

Retornando com o divisor 2 para a mesa óptica do IVMZ, e desbalanceando os divisores 1 e 2 (alterando-se os coeficientes de reflexão destes), pode-se provocar fenômenos intermediários, de tal modo que, é válida a relação $\mathcal{D}^2 + \mathcal{V}^2 \leq 1$. Assim, nos anteparos, é possível observar padrões como apresenta a figura 31. Nesse caso, há observação de padrões distintos em telas distintas. O princípio da complementaridade de Bohr não é violado, apesar do resultado induzir uma falsa violação deste. Pois, por mais que o experimento esteja montado sobre uma mesma bacada os resultados experimentais são distintos. Não ocorrem simultaneamente numa mesma tela de observação, como discute Cavalcanti et al. (2020). Tais padrões são característicos de fenômenos corpusculares (anteparo 1) e ondulatórios (anteparo 2).

Capítulo 6

Resultados e Discussão

Neste capítulo relatamos e discutimos os resultados da aplicação da sequência didática, analisado sob a égide do conceito de pesquisa exploratória, qualitativa e empírica, tendo como pesquisador o professor, que atua como observador participante, e que usa sua percepção e interação com os alunos para inferir informações, tentando estabelecer uma interação agregante entre o conhecimento teórico e o conhecimento fruto desta experiência.

A aplicação da sequência didática foi realizada no ano de 2021 em turmas de instituições públicas de ensino na cidade de Viçosa - MG, tanto em nível de ensino médio (quatro turmas) quanto superior de graduação (duas turmas) e de pós-graduação (uma turma). A sequência didática consistiu em duas aulas de 50 minutos cada. Devido a pandemia de COVID-19, e às restrições sanitárias impostas (como o fechamento das escolas para evitar aglomerações de pessoas e a disseminação do vírus SARS-CoV-2), as aulas foram realizadas remotamente em formato de vídeo chamada através da plataforma Google Meet.

No ensino médio foi aplicada à turmas do terceiro ano. Inicialmente foi aplicada a primeira aula, realizada no dia 21 de janeiro em quatro turmas num total de 33 alunos. No dia 22 de janeiro foi aplicada a segunda aula para um total de 22 alunos das mesmas turmas. No ensino superior foram aplicadas as duas aulas geminadas. No dia 26 de março a aplicação foi numa turma de 09 alunos em uma disciplina de Física Quântica para pós-graduação. No dia 12 de maio a aplicação foi em uma turma com 12 alunos de uma disciplina experimental de graduação e no dia 14 de maio, a sequência didática foi aplicada para outra turma da disciplina experimental de graduação, com 11 alunos.

6.1 Abordagem didática

Utilizamos a abordagem pedagógica investigativa, desenvolvida na linguagem multimídia, estruturada em torno de experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais. O ensino por investigação foi empregado, de modo que, os alunos pudessem observar e analisar de forma investigativa e problematizadora os fenômenos e conceitos apresentados. O ensino investigativo não tem como objetivo que os alunos tenham uma postura de cientista, mas sim o de criar em sala de aula um ambiente investigativo para instigar no estudante uma cultura científica, tal como assinala Carvalho et al. (2013).

[...] é importante deixar claro que não há expectativa de que os alunos vão pensar ou se comportar como cientistas, pois eles não têm idade, nem conhecimentos específicos nem desenvoltura no uso das ferramentas científicas para tal realização. O que se propõe é muito mais simples - queremos criar um ambiente investigativo em sala de aula de Ciências de tal forma que possamos ensinar (conduzir/mediar) os alunos no processo (simplificado) do trabalho científico para que possam gradativamente ir ampliando sua cultura científica, adquirindo, aula a aula, a linguagem científica [...]. O mesmo acontece com os estudos **das teorias da aprendizagem**. Não vamos replicá-los, pois esse não é o objetivo da escola, o que devemos fazer é utilizar os conhecimentos construídos por esses autores para, nas salas de aulas, criar um ambiente propício para os alunos **construírem** seus próprios conhecimentos. Nesse contexto teórico é que propomos as sequências de ensino investigativas [...], visando proporcionar aos alunos: condições de trazer seus conhecimentos prévios para iniciar os novos, terem ideias próprias e poder discuti-las com seus colegas e com o professor passando do conhecimento espontâneo ao científico e adquirindo condições de estenderem conhecimentos já estruturados por gerações anteriores. (CARVALHO et al., 2013, p. 9, grifos nossos).

Para a execução das aulas na abordagem investigativa utilizamos a metodologia dos momentos pedagógicos de Delizoicov e Angotti (1994) (problematização inicial, organização do conhecimento, aplicação do conhecimento). A **problematização** se estendeu por vários slides, compondo uma problematização longa, objetivando definir os contornos do problema. A discussão conceitual sobre a “dualidade onda-partícula”, delineou o problema proposto a partir de uma evolução histórica e de argumentos fenomenológicos, sobre os quais centrou-se a problematização da sequência didática. Dessa forma, o professor fomentou que os aprendentes se tornassem conscientes da “inconsistência lógica” associada ao uso da linguagem da Física Clássica, compondo assim um conflito cognitivo capaz de prover a necessária motivação. Se-

gundo Dewey (1979), a percepção da totalidade da situação deixa claro quais são os dados mais significativos do problema e permite elaborar respostas, ou seja, o aprendizado aparece quando as informações se conectam e fazem sentido.

Expor o problema proposto, evidenciou a inconsistência do termo “dualidade onda-partícula”, um único objeto não pode ser dois objetos clássicos distintos e dispares, onda e partícula. Segunda a Física Clássica, onda é um ente que uma vez emitido, propaga-se preenchendo todo o espaço, sem localização definida, troca energia suavemente, e exhibe as propriedades de difração e interferência, enquanto que partícula é um ente material concentrado, localizado no espaço, troca energia de forma abrupta, e não exhibe as propriedades de difração e interferência. Numa perspectiva histórica e fenomenológica observamos que objetos quânticos como fótons e elétrons não tem sua descrição completamente satisfeita pelos argumentos clássicos. A ideia principal, foi então, conduzir os aprendentes a discernir que uma entidade quântica tem as características e propriedades a sua própria maneira. Não é uma onda. Não é uma partícula. Mas sim um outro objeto que pode ser nomeado como se queira. Em especial no ensino de Física a precisão na linguagem é fundamental para que haja uma plena troca de significados conceituais. Nesse aspecto, a linguagem torna-se ponto central para a construção dos conceitos. Para Vygotsky a linguagem não é apenas um meio facilitador aos processos mentais, também faz parte do desenvolvimento cognitivo do indivíduo.

Assim como um molde dá forma a uma substância, as palavras podem moldar uma atividade dentro de determinada estrutura. Entretanto, essa estrutura pode, por sua vez, ser mudada e reformada quando as crianças aprendem a usar a linguagem de modo que lhes permite ir além das experiências prévias ao planejar uma ação futura. (VYGOTSKY, 2001, p. 17).

O processo da construção de conceitos estabelecendo uma plena troca de significados entre os signos utilizados (sejam signos verbais ou signos não verbais), atrelado ou “ancorado” aos conhecimentos prévios do aluno, formando-se uma rede conceitual na estrutura cognitiva do estudante. Resulta então o aprendizado significativo, tal como definido por Ausubel, Novak e Hanesian (1980) (onde, para atribuir significados a novos conhecimentos, o aprendiz parte de conceitos já estabelecidos em sua estrutura cognitiva). Construir os conceitos da Física Quântica exige uma plena troca de significados no processo da construção dos conceitos, tornando complexa a utilização de conhecimentos prévios, quando estes estão no âmbito da lógica da Física Clássica. A utilização de conceitos baseados numa lógica clássica em torno de uma

linguagem clássica como o termo “dualidade onda-partícula” pode gerar obstáculos pedagógicos, como abordagem de Bachelard (1996), onde, obstáculos epistemológicos verbais podem funcionar como obstáculos pedagógicos.

Segundo Paulo e Moreira (2011, p. 422) “[...], Heisenberg (1995) sugeriu a manutenção da linguagem e a modificação da lógica. A linguagem clássica é o limite, embora a sua utilização leve a modificações em sua própria lógica”. No Ensino Médio, onde os alunos estão em uma fase de construção dos conceitos iniciais da física moderna, a utilização do termo “dualidade onda-partícula” pode se tornar um obstáculo pedagógico. O uso preciso da linguagem na construção do conceito levará a uma plena troca de significados entre os signos utilizados e a lógica empregada, evitando inconsistências, contradições e obstáculos epistemológicos.

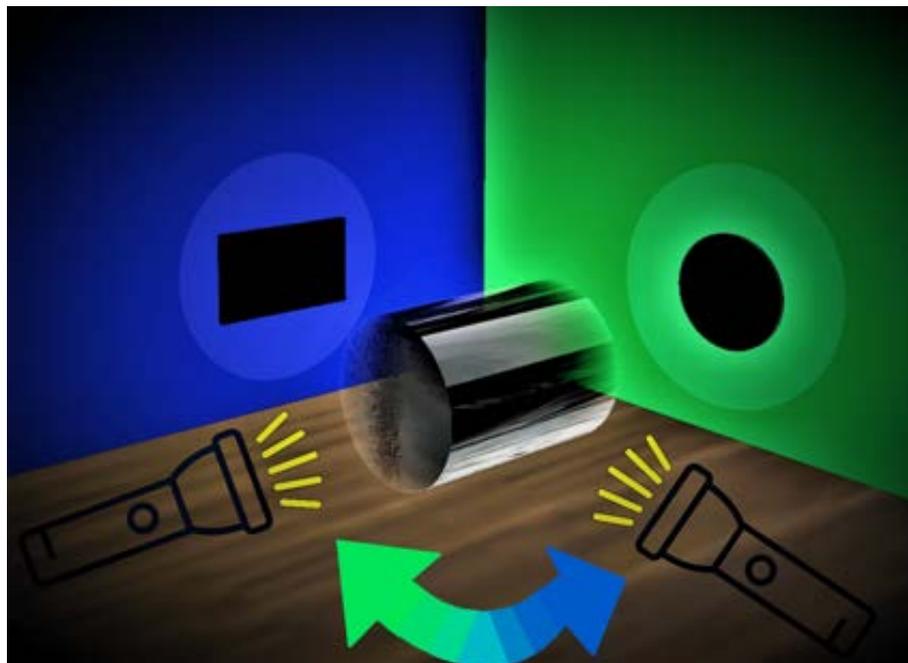
A **organização do conhecimento** é estabelecida a medida que é construindo o entendimento do objeto quântico, como apresentando nos resultados experimentais da figura de interferência de feixes de baixíssima intensidade de fótons e elétrons e ainda os fenômenos quânticos intermediários. Desconstruindo a ideia associada ao termo “dualidade onda-partícula”, de que uma entidade quântica hora é onda, hora é partícula. Nomeando então os objetos quânticos com uma linguagem que não provoque obstáculos pedagógicos, inconsistências ou contradições lógicas na estrutura cognitiva dos alunos, como: *quantum*, *micropartículas*, *wavicles*, dentre outros.

Ainda segundo Dewey (1979), a meta aprendizagem é fomentada promovendo que o aprendente tome ciência dos processos de ensino e aprendizagem aos quais está sendo submetido. Perceba que no âmbito da Física Clássica estão estabelecidos uma rede de conceitos que oferecem subsunções que lhe auxiliam estabelecer novos conceitos no âmbito da Física Quântica, os quais ofereceram razão para a construção desta nova teoria

A analogia imagética para a “dualidade onda-partícula” envolvendo o cilindro iluminado, também faz parte da etapa de organização do conhecimento. Estabelece uma relação entre a observação feita e a descrição de um fenômeno, de modo que, cada medida isolada não descreve a totalidade do objeto em análise. Por exemplo, se colocamos uma lanterna que pode movimentar-se como apresenta a figura 32 (onde a dupla seta colorida indica uma possível região para a sombra), quando ela estiver posicionada na diagonal da imagem poderá se observar uma sombra que não é nem um retângulo, nem um círculo. Será uma sombra um tanto particular, alusiva aos fenômenos intermediários.

A **aplicação do conhecimento** se estabelece quando apresentamos algumas interpretações da Física Quântica e uma analogia mecânica à interpretação dualista realista da Física Quântica.

Figura 32 – Cilindro iluminado por uma lanterna que pode movimentar-se, projetando uma sombra numa tela de observação. A dupla seta colorida indica uma possível região para a sombra



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com um vídeo experimental composto por um auto falante, excitado por um sinal elétrico de 50 Hz, sobre o qual depositamos um recipiente com um líquido viscoso. Produzimos gotículas que persistem vibrando sobre a superfície, gerando no seu entorno pequenas ondulações, permitindo a observação simultânea de ondas e partículas. Tendo a finalidade de incitar uma discussão com os alunos para se observar a percepção deles quanto se o experimento revelava um objeto quântico ou não. Uma vez que o vídeo apresenta um análogo mecânico, com estruturas macroscópicas, espera-se que os alunos concluam que o sistema não apresenta nenhum objeto quântico.

A organização desta rota didática teve por objetivo assim, expor intencionalmente o problema proposto com relação a “dualidade onda-partícula” a partir de sua evolução histórica, compreender a inconsistência lógica desse termo, propor uma solução visando a precisão da linguagem no processo da construção do conceito, e apresentar elementos didáticos que sejam facilitadores no processo de ensino-aprendizagem por meio da interação social com a turma. Tendo em mente que a interação com a turma vai muito além da apresentação da sequência didática, como também discute Carvalho et al. (2013).

A interação social não se define apenas pela comunicação entre o professor e o aluno, mas também pelo ambiente em que a comunicação ocorre, de modo que o aprendiz interage também com os problemas, os assuntos, a informação e os valores culturais dos

próprios conteúdos com os quais estamos trabalhando em sala de aula. (CARVALHO et al., 2013, p. 4).

6.2 Percepções à aplicação da sequência didática

A aplicação da sequência didática foi parte integrante do desenvolvimento do trabalho desta dissertação, sendo o principal instrumento da coleta de informações e validação do processo de ensino-aprendizagem numa investigação exploratória. Face à interação com os alunos ao longo da aplicação das aulas foi possível observar que, de modo geral, ocorreu assimilação do conteúdo abordado em boa parte das turmas, sugerindo êxito na aplicação da sequência didática e no não estabelecimento da inconsistência lógica associada à “dualidade onda-partícula”.

Verificou-se significativo engajamento das turmas em analisar e interpretar as observações experimentais dos fenômenos, demonstrando que os vídeos e simulações apresentados tiveram um papel motivador e facilitador no processo. Foi possível detectar também algumas fragilidades nos conhecimentos de alguns alunos no que tange aos conteúdos prévios, como os conceitos de interferência e difração, que foram reforçados numa breve recapitulação na primeira aula.

A aplicação da sequência didática fez perceber que o vídeo da analogia mecânica para a “dualidade onda-partícula”, poderia ser apresentada não somente ao final, mas também ao início da sequência didática, desempenhando um papel problematizador. Poderá se estimular o modo investigativo fomentando que os alunos observem e reflitam com respeito aos dois objetos clássicos em um único experimento, associados, mas ainda assim objetos distintos, cada qual com suas características; um muito localizado e outro espalhado no espaço. A exibição ocorrerá novamente ao final da segunda aula, momento que oportunizará nova discussão com respeito a imagem que os alunos fazem do objeto quântico. Este último momento de discussão permitiu avaliar a compreensão e discernimento dos estudantes com respeito à denominação “dualidade onda-partícula”.

A abordagem histórica, envolvendo a busca de um modelo para a luz no final do século XVII permitiu oferecer “sentido” ao fazer científico, revelando as incertezas na evolução dos modelos físicos para a luz. A nosso ver, a dicotomia histórica entre os dois modelos abriu espaço para revelar aos alunos os experimentos que conduziram à construção de um novo modelo, evidenciando quais problemas motivaram as proposições de novos conceitos e evidenciando a necessidade de construir uma teoria quântica.

As manifestações dos alunos das turmas de graduação revelaram que estes já haviam sido

expostos a curso teóricos de introdução à Física Quântica, mas, entretanto, não compreendiam a razão daquilo que tinham estudado. Não compreendiam os efeitos fotoelétrico e Compton, como tinham sido realizados e como seus resultados expunham os caracteres de onda e de partícula para a luz, e, muito menos o objeto quântico que suscitou a elaboração da teoria quântica.

Com relação ao cerne do problema proposto, buscamos observar se, ao longo das duas etapas da sequência didática, se os alunos compreenderam que um objeto quântico não pode ser ao mesmo tempo, onda e partícula segundo uma perspectiva clássica, pois, estes apresentam características distintas e dispares. Buscando ainda compreender se a contradição lógica envolvendo a dualidade fora superada, questionamos os alunos quanto a ideia de que um objeto quântico nem é uma onda nem uma partícula, mas sim um outro objeto, que pode ser nomeado como se queira, que carrega consigo aspectos de onda e de partícula. Foi possível detectar que entre os níveis de Ensino médio e de Graduação a contradição foi quase ou totalmente superada. Já no nível da Pós-Graduação, um número superior à metade dos estudantes da turma declarou nunca ter vivenciado qualquer contradição lógica com respeito à “dualidade onda-partícula”. Uma provável razão para isto pode estar relacionando com o momento histórico e social com que os alunos da pós-graduação foram expostos a este conceito, conforme sustenta Bakhtin (2006). Este teórico da linguagem entende que o sentido de uma palavra é construído a partir de um contexto sócio-histórico, que permitirá entender o seu significado. Para este autor, uma mesma enunciação, em situações históricas distintas, poderá conduzir a entendimentos distintos.

[...] Os novos aspectos da existência, que foram integrados no círculo do interesse social, que se tornaram objetos da fala e da emoção humana, não coexistem pacificamente com os elementos que se integraram à existência antes deles; pelo contrário, entram em luta com eles, submetem-nos a uma reavaliação, fazem-nos mudar de lugar no interior da unidade do horizonte apreciativo. Essa evolução dialética reflete-se na evolução semântica. Uma nova significação se descobre na antiga e através da antiga, mas a fim de entrar em contradição com ela e de reconstruí-la. (BAKHTIN, 2006, p. 139).

No ensino médio os alunos haviam sido apresentados ao tema dias antes de nossa intervenção, enquanto nos demais níveis de ensino os alunos já haviam passado pelo tema em algum momento de sua formação e traziam consigo concepções e visões já processadas sobre o tema, podendo carregar contradições e/ou uma não assimilação dos conceitos.

Na aplicação das etapas da sequência didática, foi possível ainda identificar se os alunos conseguiam distinguir entre as características dos objetos clássicos dos quânticos. Pudemos ob-

servar que a maioria dos alunos conseguiu fazer distinção, diferenciando os objetos clássicos e quânticos. Quando questionados se um fóton é ou não uma partícula clássica, concluíram que, uma vez que o fóton é um objeto quântico, apresenta características de onda ou de partícula clássica mas não é nem um nem outro. Para tanto, foi necessária mediação do professor lembrando as principais características e propriedades dos objetos clássicos e contrapondo aos fenômenos envolvendo fótons abordados na aula (difração, efeito fotoelétrico, efeito Compton, e aqueles apresentados no IVMZ). Contudo, quando confrontados sobre se elétrons são ondas ou partículas, percebemos que os alunos ainda titubeiam; as falas sugerem que a ideia do elétron como partícula está fortemente estabelecida e é empregada constantemente em outras disciplinas. É difícil compreender e assimilar que objetos quânticos carregam consigo propriedades que não podem ser descritas em sua totalidade por argumentos puramente clássicos. Este fato corrobora a perspectiva ausubeliana (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980; MOREIRA, 1999) de que a mudança conceitual, no sentido de substituir significados, não existe. A aprendizagem significativa não é apagável; significados internalizados significativamente permanecem na estrutura cognitiva do aprendiz. Considerando aprendizagem significativa, uma mudança conceitual bem sucedida resulta, no máximo, da adição de novos significados às concepções já existentes, sem apagar ou substituir os significados que já tinham. Estabelece-se um subsunçor mais elaborado, rico e diferenciado, e neste sentido que devemos trabalhar.

Buscamos observar também durante a aplicação da sequência didática, a efetividade da aula e a percepção do aluno sobre seu próprio aprendizado, e nesses aspectos foi possível perceber que a sequência didática teve impacto positivo nos alunos e os auxiliou na compreensão e interpretação de fenômenos e conceitos apresentados. Percebemos que ocorreu o aprendizado com elementos suficientes para assimilação das principais ideias e conceitos que constituem os pilares da Física Quântica, de modo que, a linguagem multimídia, experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais como organizados e estruturados na sequência didática foram facilitadores no processo.

Capítulo 7

Considerações finais

Este trabalho resultou na construção de uma sequência didática distribuída em duas aulas para o Ensino Médio acerca dos fenômenos quânticos. A primeira aula buscou-se estabelecer a problematização inicial por meio do delineamento do conceito da dualidade onda-partícula a partir de sua evolução histórica e de argumentos fenomenológicos. Na segunda aula, desenvolveu-se uma discussão exibindo as duas facetas do fóton e do elétron, conduzindo uma argumentação no sentido de estimular a discussão em torno dos objetos clássicos (onda, partícula), e de objetos quânticos (fótons, elétrons). Foi dada ênfase na questão da linguagem e em algumas interpretações da Física Quântica.

A partir da aplicação da sequência didática nos diferentes níveis de ensino (ensino médio, graduação e pós-graduação), resultados coletados por meio da observação dos professores, sugerem a assimilação dos conceitos apresentados. Com relação ao esmaecimento da contradição lógica associada a natureza dual do objeto quântico o avanço foi perceptível, de modo que, houve fortalecimento da compreensão das propriedades de um objeto quântico (difração, colisão, fenômenos intermediários) em contrapartida à propriedades clássicas disjuntas - onda ou partícula. Contudo, foi possível observar que ainda é difícil para alguns alunos compreender e assimilar que os objetos quânticos carregam consigo propriedades que não podem ser descritas em sua totalidade por argumentos puramente clássicos.

As observações feitas nos conduziram a elaborar atividades propostas que incluímos no produto educacional para auxiliar na sedimentação e consolidação dos conceitos estudados. Isso foi feito a partir da detecção de pontos centrais sensíveis ao entendimento dos alunos, e levantamento de dúvidas e questionamentos na aplicação da sequência.

Concluimos que a abordagem didática utilizada com o auxílio da linguagem multimídia, es-

truturada em torno de experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais, teve impacto positivo nos alunos e os auxiliou fortemente na compreensão e interpretação de fenômenos e conceitos estudados. A sequência didática tal como organizada e estruturada mostrou-se muito eficiente, motivadora e facilitadora do processo de ensino-aprendizagem.

Como perspectivas futuras do presente trabalho, visamos o aprimoramento da sequência didática, a produção própria de um vídeo experimental sobre o efeito fotoelétrico, o aprimoramento do produto educacional desenvolvido, o desenvolvimento de uma pesquisa educacional e a publicação de artigo.

Referências Bibliográficas

- ASPECT, A.; BRUNE, M. **Quantum Optics 1 : Single Photons**. École Polytechnique, 2017. Coursera platform. Disponível em: <<https://coursera.org/share/1d87df1ecdd30571f3d7777275ff91e1>>. Acesso em: 11 de Junho de 2021.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- BACHELARD, G. **A formação de espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. Tradução: Estela dos Santos Abreu.
- BAKHTIN, M. **Marxismo e Filosofia da Linguagem**. 12ª. ed. São Paulo: HUCITEC, 2006. 201 p.
- BIRKHOFF, G.; NEUMANN, J. V. The logic of quantum mechanics. **The Annals of Mathematics**, JSTOR, v. 37, n. 4, p. 823, oct 1936.
- CARVALHO, A. M. P. d. et al. **Ensino de Ciências por Investigação: Condições de implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2013.
- CARVALHO, R. S.; CARVALHO, M. S. A linguagem na perspectiva de john locke: Interseções com a neurociência e uma possível contribuição para o ensino de ciências. **The journal of engineering and exact sciences**, v. 4, n. 2, p. 0202–0206, jul 2018.
- CAVALCANTI, C. J. H. et al. Software-aided discussion about classical picture of mach–zehnder interferometer. **European Journal of Physics**, v. 38, n. 6, p. 065703, oct 2017.
- CAVALCANTI, C. J. H. et al. Teaching wave-particle complementarity using the virtual mach-zehnder interferometer. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.
- DA SILVA, S. A. Conflito cognitivo: Herói ou vilão? **Schème: Revista Eletrônica de Psicologia e Epistemologia Genéticas**, v. 4, n. 1, p. 209–238, 2012.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A. **Metodologias do Ensino de Ciências**. 2ª. ed. São Paulo: Cortez Editora, 1994.
- DEWEY, J. **Como Pensamos – Como se realaciona o pensamento reflexivo com o processo educativo: uma reexposição**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1979.
- DIMITROVA, T. L.; WEIS, A. Single photon quantum erasing: a demonstration experiment. **European Journal of Physics**, IOP Publishing, v. 31, n. 3, p. 625–637, apr 2010.
- EDDINGTON, A. **The nature of the physical world: THE GIFFORD LECTURES 1927**. [S.l.]: BoD–Books on Demand, 2019. v. 23.
-

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica - Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. [S.l.]: Campus, 1979.

ENGLERT, B.-G. Fringe visibility and which-way information: An inequality. **Physical Review Letters**, American Physical Society (APS), v. 77, n. 11, p. 2154–2157, sep 1996.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **The Feynman Lectures on Physics**. California Institute of Technology, 1963. Disponível em: <<https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>>.

FORATO, T. C. d. M. **A natureza da ciência como saber escolar: um estudo de caso a partir da história da luz**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.

GÖRNITZ, T.; ISCHEBECK, O. An introduction to carl friedrich von weizsäcker's program for a reconstruction of quantum theory. In: **Time, Quantum and Information**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 263–279.

GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics**. 3ª. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1999. ISBN 9788576058861.

GRIFFITHS, D. J. **Mecânica quântica**. 2ª. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

GRYNBERG, G.; ASPECT, A.; FABRE, C. **Introduction to Quantum Optics: From the Semi-classical Approach to Quantized Light**. 1ª. ed. New York: Cambridge University Press, 2010.

HALLIDAY; RESNICK; KRANE. **Física 3**. 5ª. ed. [S.l.]: LTC, 2003.

HEISENBERG, W. **Física y Filosofía**. [S.l.]: Edição e-Book: Titivillus, 2018.

JACQUES, V. et al. Delayed-choice test of quantum complementarity with interfering single photons. **Physical Review Letters**, American Physical Society (APS), v. 100, n. 22, p. 220402, jun 2008.

JAEGER, G.; SHIMONY, A.; VAIDMAN, L. Two interferometric complementarities. **Physical Review A**, American Physical Society (APS), v. 51, n. 1, p. 54–67, jan 1995.

JOHNSTON, I. D.; CRAWFORD, K.; FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. **International Journal of Science Education**, Informa UK Limited, v. 20, n. 4, p. 427–446, apr 1998.

LEVICH, B. G. **Curso de Física teórica: Mecânica Cuântica**. Barcelona: Editorial Reverté, S. A., 1974. v. 3.

LÉVY-LEBLOND, J.-M. Neither waves, nor particles, but quantons. **Nature**, v. 334, n. 6177, p. 19–20, jul 1988.

LÉVY-LEBLOND, J.-M. Quantum physics and language. **Physica B**, Elsevier BV, v. 151, n. 1-2, p. 314–318, jul 1988.

LIMA, M. C. de. Sobre o surgimento das equações de maxwell. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, 2019.

- MINTZES, J. J.; WANDERSEE, J. H.; NOVAK, J. D. **Assessing Science Understanding: A Human Constructivist View**. London: Elsevier Academic Press, 2004.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: Pedagógica e Universitária, 1999.
- MOREIRA, M. A.; MASSONI, N. T. **Noções básicas de Epistemologias e Teorias de Aprendizagem**. São Paulo: Livraria da Física, 2016.
- MORRIS, C. W. **Fundamentos da Teoria dos Signos**. São Paulo: Edusp, 1976. 92 p.
- MOURA, B. A. Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 33, n. 1, p. 111–141, 2016.
- NETTO, J. D. S.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. de H. Fenômenos intermediários de interferência e emaranhamento quânticos: o interferômetro virtual de Mach-Zehnder integrado a atividades didáticas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 35, n. 1, p. 185–234, apr 2018.
- NETTO, J. da S. **Complementaridade onda-partícula e emaranhamento quântico na formação de professores de Física segundo a perspectiva sociocultural**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- NICOLESCU, B. Contradição, lógica do terceiro incluído e níveis de realidade. **École Nationale Supérieure des Mines**, mar 2009. Trabalho apresentado em: Ateliers sur la contradiction. <<http://www.emse.fr/aslc2009>>. Saint-Etienne, França. Disponível em: <<http://cettrans.com.br/assets/textos/contradicao-logica-do-terceiro-incluido-e-niveis-de-realidade.pdf>>. Acesso em: 20 de Novembro de 2021.
- NICOLESCU, B. **O que é a realidade?: reflexões em torno da obra de Stéphane Lupasco**. 1ª. ed. São Paulo: TRIOM, 2012. 236 p. Tradução de Marly Segreto.
- OHANIAN, H. C. **Modern Physics**. 2ª. ed. EUA: Prentice Hall, 1995.
- OLIVEIRA, I. S. **Física quântica: fundamentos, formalismo e aplicações**. 1ª. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2020.
- OSTERMANN, F. et al. Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista electrónica de enseñanza de las ciencias**, v. 8, n. 3, p. 1094–1116, 2009.
- OSTERMANN, F. et al. Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 29, n. 0, oct 2012.
- OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 193–203, 2005.
- PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio. **Ciência & Educação**, v. 17, n. 2, p. 421–434, 2011.
- PEIRCE, C. S. **Semiótica**. 4ª. ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 2010. 337 p.
-

- PEREIRA, A.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. On the use of a virtual mach–zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. **Physics Education**, v. 44, n. 3, p. 281–291, apr 2009.
- PEREZ, S. **Mecânica quântica: um curso para professores da educação básica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016. ISBN 9788578614119.
- PESIC, P. Quantum identity: Physicists have long struggled with the weirdness of quantum mechanics - a consequence of like particles being completely indistinguishable from one another. **American Scientist**, v. 90, n. 3, p. 262–267, 2002. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/27857662>>. Acesso em: 07 de Março de 2022.
- PESSOA Jr, O. Complementing the principle of complementarity. **Physics Essays**, v. 13, n. 1, p. 50–67, 2000.
- PESSOA Jr, O. **Conceitos de Física quântica**. 3th. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006. v. I.
- PESSOA Jr, O. **Conceitos de Física quântica**. 1th. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006. v. II.
- PIAGET, J. **La Equilibracion de las Estructuras Cognitivas – Problema Central del Desarrollo**. 5ª. ed. México: Siglo Veintiuno Editores, 1998.
- PIAGET, J. **Seis Estudos de Psicologia**. 24ª. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2010.
- PINTO NETO, N. **Teorias e interpretações da mecânica quântica**. 1ª. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2010. I. 09 Coleção CBPF - Tópicos de Física.
- REGO, T. C. **Vygotsky - Uma Perspectiva Historico-cultural da educação**. 25ª. ed. Rio de Janeiro: Editora Vozes, 2009.
- RICCI, T. F.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. O tratamento clássico do interferômetro de mach-zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 79–88, 2007.
- SCHEIBE, E. **The logical analysis of quantum mechanics**. New York: Pergamon Press, 1973.
- SOUZA, P. F. L. et al. Pensamento transdisciplinar: uma abordagem para compreensão do princípio da dualidade da luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, FapUNIFESP (SciELO), v. 32, n. 2, jun 2010.
- TONOMURA, A. et al. Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. **American Journal of Physics**, American Association of Physics Teachers (AAPT), v. 57, n. 2, p. 117–120, feb 1989.
- VIRTUAL Mach-Zehnder Interferometer. 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Instituto de Física. Disponível em: <<http://www.lief.if.ufrgs.br/~cjhc/vmzi.html>>. Acesso em: 15 de Agosto de 2021.
- VYGOTSKY, L. S. **A construção do pensamento e da linguagem**. 1ª. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2001. Tradução: Paulo Bezerra.
-

VYGOTSKY, L. S. **A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores**. 7^a. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2007. Organizadores: Michael Cole et al. Tradução: José Cipolla Neto, Luis Silveira Menna Barreto, Solange Castro Afeche.

VYGOTSKY, L. S.; LURIA, A. R.; LEONTIEV, A. N. **Linguagem, desenvolvimento, e aprendizagem**. São Paulo: Ícone, 1988.

WOOTTERS, W. K.; ZUREK, W. H. Complementarity in the double-slit experiment: Quantum nonseparability and a quantitative statement of bohr's principle. **Physical Review D**, American Physical Society (APS), v. 19, n. 2, p. 473–484, jan 1979.

YOON, T. H.; CHO, M. Quantitative complementarity of wave-particle duality. **Science Advances**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 7, n. 34, aug 2021.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Sears & Zemansky. Física IV: ótica e Física moderna**. 12^a. ed. São Paulo: Pearson. Addison Wesley, 2009. Tradução Cláudia Santana Martins.

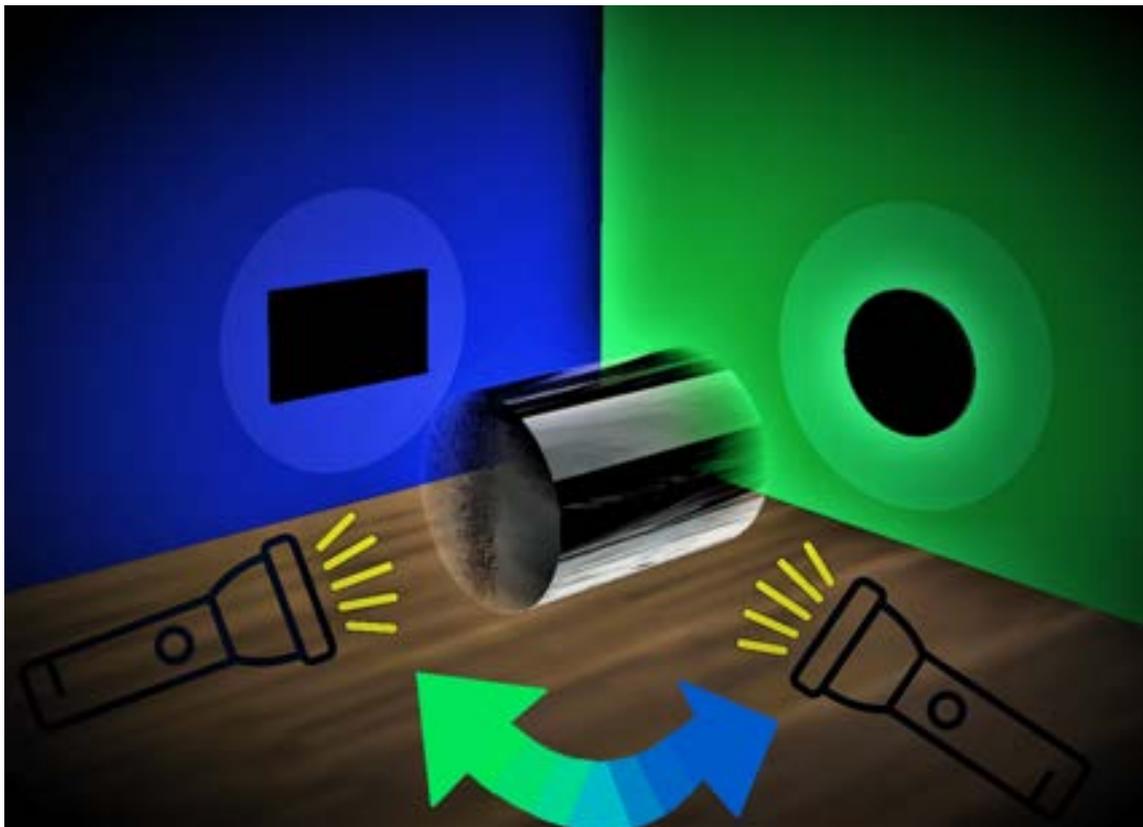
YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics**. 14^a. ed. USA: Pearson Education, 2016.

ZÔMPERO, A.; LABURÚ, C. Atividades investigativas no ensino de ciências: Aspectos históricos e diferentes abordagens. **Revista Ensaio**, v. 13, n. 03, p. 67–80, 2011.

Apêndice

**A LINGUAGEM E O ENSINO CONCEITUAL DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA
NO ENSINO MÉDIO**

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL



RAFAEL FILGUEIRA PIMENTEL

**A LINGUAGEM E O ENSINO CONCEITUAL DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA
NO ENSINO MÉDIO**

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL

Produto educacional apresentado à Universidade Federal de Viçosa e a Sociedade Brasileira de Física como parte das exigências do Programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

Orientador: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

Apêndice A

Produto Educacional

Prezado(a) Professor(a).

Esse é um produto educacional desenvolvido como parte das exigências do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Apresentaremos uma sequência didática que contém uma introdução aos conceitos do ensino da Física Quântica para o terceiro ano do Ensino Médio. A abordagem didática utilizada neste produto educacional busca delinear o conceito dual onda-partícula a partir de sua evolução histórica e de argumentos fenomenológicos, exibir as duas facetas do fóton e do elétron, conduzindo uma argumentação no sentido de estimular a discussão em torno dos objetos clássicos (onda, partícula), e de objetos quânticos (fótons, elétrons) e possibilitar a desativação da contradição lógica associada a natureza dual do objeto quântico, uma vez que, o ensino da Física Quântica usando-se uma abordagem dual (tal como o conceito “dualidade onda-partícula”) suscita uma inconsistência lógica capaz de dificultar a construção conceitual do objeto quântico pois, envolve a ideia de unir em uma única entidade dois objetos clássicos distintos e dispares, onda e partícula.

Esta sequência didática tem seu suporte pedagógico alicerçado na teoria da mediação de Vygotsky, que considera a linguagem um instrumento capaz de exercer influência no construção do pensamento por meio da interiorização do diálogo que o indivíduo estabelece com o meio. (VYGOTSKY, 2001; VYGOTSKY, 2007). Na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, em que o indivíduo organiza o conhecimento de forma ordenada e hierarquizada, formando uma rede conceitual em sua mente, onde para atribuir significados a novos conhecimentos, ele parte de conceitos já estabelecidos em sua estrutura cognitiva. (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980). E está estruturada nos momentos pedagógicos desenvolvidos por Delizoicov e Angotti (problematização inicial, organização do conhecimento, aplicação do conhecimento).

(DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994).

O produto educacional está composto de uma sequência didática dividida em duas aulas de 50 minutos cada, desenvolvidas na linguagem multimídia, em torno de experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais. Todo o material está disponibilizado em uma página na internet no seguinte endereço eletrônico:

<<https://rafaelpimentell.wixsite.com/website>>

A.1 Primeira aula

Tempo previsto:

Uma aula de 50 minutos.

Objetivos:

Ao final desta aula, o aluno deverá ser capaz de:

- Analisar e interpretar experimentos Físicos;
- Conhecer os argumentos de Newton e Huygens para os comportamentos da luz;
- Relembrar o experimento de dupla fenda de Young;
- Conhecer o formalismo básico que descrevem as ondas eletromagnéticas;
- Compreender o funcionamento do Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder - IVMZ;
- Compreender o efeito fotoelétrico;
- Compreender o efeito Compton;
- Perceber o desenvolvimento histórico da ciência com respeito a construção do conceito da “dualidade onda-partícula”;
- Compreender o problema gerador ao conceito dual onda-partícula.

Desenvolvimento:

A sequência didática está dividida em três momentos: problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. A primeira aula será quase que inteiramente

dedicada ao primeiro momento, mas possuirá também elementos que possibilitem organizar o conhecimento. Desse modo, uma transição suave para a segunda aula será natural, construindo-se os segundo e o terceiro momentos.

A problematização inicial terá como foco a construção do problema gerador ao conceito da “dualidade onda-partícula”, fazendo-se recortes de seguimentos históricos do seu desenvolvimento. A construção desse problema gerador se dará ao longo de toda a primeira aula à medida que argumentos e experimentos forem sendo apresentados e discutidos. Esse primeiro momento tem por objetivo chamar a atenção do aluno ao tema, despertar curiosidades e gerar pequenos debates entre os pares da turma sobre as argumentações levantadas.

Inicia-se a discussão histórica com os estudos da óptica entre o final do século XVII e início do século XVIII pautado pelas teorias de Isaac Newton (1642-1727) e de Christiaan Huygens (1629-1695) que, na perspectiva da mecânica clássica, defenderam teorias distintas com respeito as propriedades da luz. Ambas exitosas em escrever os fenômenos de reflexão e da refração para a luz. Nesse ponto, o professor pode gerar uma discussão inicial para identificar quais alunos são mais adeptos aos argumentos de Newton e quais mais inclinados aos argumentos de Huygens, e assim, guiar um debate entre as ideias para que os alunos defendam seus pontos de vista. Enfatizando que as teorias corpuscular e ondulatória atribuídas, respectivamente, a Newton e a Huygens, ficou a cargo de seus seguidores ao longo das décadas posteriores às publicações das ideias destes pensadores, e não um embate das teorias entre eles efetivamente.

Na sequência, numa abordagem para se consolidar o problema gerador, apresentam-se outros acontecimentos da história da ciência, como, resultados experimentais da interferência luminosa num aparato de dupla fenda, inicialmente realizado por Thomas Young (1773-1829), e o experimento de interferência da luz por fendas circulares, inicialmente realizado por Augustin Jean Fresnel (1788-1827). A partir daí, o aluno será levado a argumentos que beneficiaram uma interpretação ondulatória para a luz. Com uma breve discussão sobre o formalismo para as ondas eletromagnéticas organizados por James Clerk Maxwell (1831 - 1879) o aluno terá ainda mais evidências que corroboram um tratamento ondulatório para a luz.

Elaboramos um vídeo com o experimento de interferência da luz por fenda circular, onde utilizamos um laser, um suporte de isopor, uma chapa metálica com um pequeno furo circular e uma parede branca como anteparo de observação. O experimento consiste em fixar o laser e a chapa metálica usando a placa de isopor como suporte, colocar este aparato disposto uma certa distância da tela de observação e fazer incidir a luz do laser sobre o furo circular na chapa

Figura 33 – Seleção de alguns Slides que compõem a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

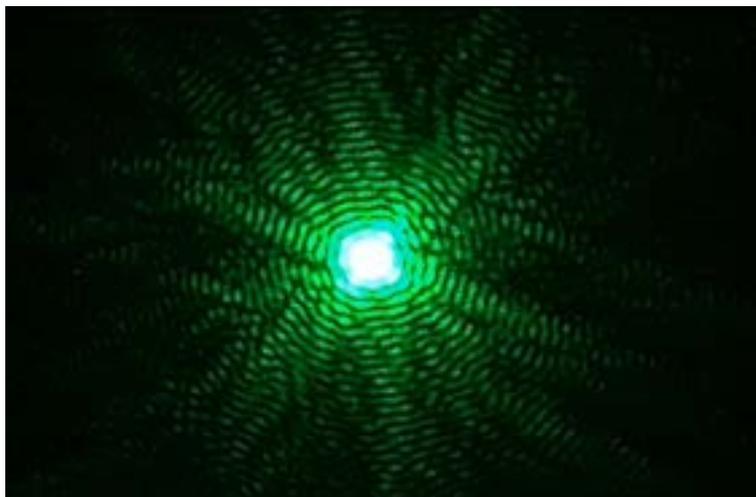


Fonte: Elaborada pelo autor.

metálica, de modo a ser projetada luz na parede. Observa-se um padrão de interferência com franjas circulares claras e escuras como mostra a figura 34, uma vez que, o comprimento de onda do laser utilizado é compatível às dimensões do furo na chapa metálica. Um fator relevante para a figura observada é o fato do furo não ser perfeitamente circular e possuir ranhuras devido ao seu processo de fabricação. Cada ranhura contribui com novos padrões de interferência que interferem entre si provocando uma figura resultante de interferência um tanto quanto particular, peculiar e interessante. A figura 33 apresenta um compilado das ideias tratadas até este ponto.

Uma ferramenta muito útil nas aulas será o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ), uma simulação computacional. O IVMZ permite montar diversos arranjos para estudar fenômenos ópticos, e será um valioso suporte para explorar vários resultados experimentais e testar argumentos teóricos. A simulação é constituída por um par de anteparos, espelhos e divisores de feixe (ou semi-espelhos) além de uma fonte emissora que estão dispostos sobre uma mesa óptica. É possível alterar a visibilidade dos padrões de interferência nos anteparos de observação fazendo ajustes nos parâmetros dos divisores de feixe (modificando-se os coeficientes de reflexão - parâmetros R_1 e R_2 na simulação), e é possível alterar a intensidade luminosa da fonte desde a condição de produzir um feixes contínuo de fótons (laser - regime clássico) até o nível de baixíssima intensidade (emissão de fótons únicos - regime quântico). A figura 35 mostra uma visão geral do IVMZ, além de um arranjo com a máxima intensidade do feixe incidente

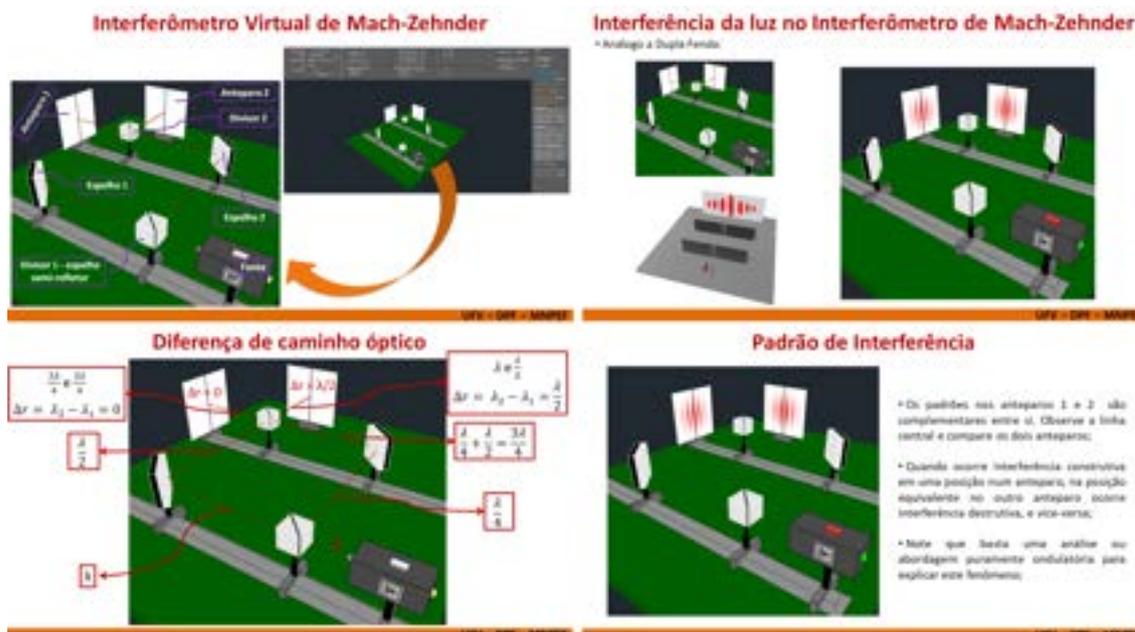
Figura 34 – Resultado experimental mostrando um padrão de interferência devido a difração da luz numa fenda circular.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento pode ser consultado em: <https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>.

(um laser) sendo possível reproduzir uma figura de interferência análoga a obtida em um experimento de dupla fenda como o realizado por Young, possibilitando a discussão de fenômenos ondulatórios.

Figura 35 – Seleção de alguns Slides que compõem a apresentação da sequência didática apresentando o IVMZ. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.



Fonte: Elaborada pelo autor. A simulação computacional do IVMZ está disponível em: <http://www.lief.if.ufrgs.br/~cjhc/vmzi.html>.

Em contraste aos argumentos colocados até então, novas ideias são evidenciadas com a observação experimental por Hertz em 1890 do efeito fotoelétrico, que levou este nome após ser

modelado por Einstein em 1905. Esse efeito é a emissão de elétrons de uma superfície metálica devido à incidência de luz sobre ela. Um vídeo e uma simulação computacional (figura 36) nos auxiliam nessa etapa. O vídeo apresenta um experimento de efeito fotoelétrico onde é utilizado um eletroscópio, uma chapa de zinco, uma lâmpada ultravioleta e materiais para eletrização. Inicialmente acopla-se a placa metálica de zinco ao eletroscópio e na sequência eletriza-se esse sistema, de modo que, por repulsão coulombiana a agulha do eletroscópio é defletida. Então, aproxima-se a luz ultravioleta da superfície da placa de zinco e observa-se que a agulha do eletroscópio volta a sua posição de equilíbrio. Podemos concluir que a radiação incidente foi capaz de provocar a ejeção de elétrons no zinco. Num outro momento do experimento, eletriza-se novamente o sistema com uma fonte de carga diferente, de modo que, a agulha possa defletir. Logo em seguida aproxima-se a luz, porém, agora nada acontece com a agulha que permanece sofrendo ação da repulsão coulombiana. Podemos nesse caso concluir que dessa vez o sistema estava eletrizado positivamente de modo que mesmo que elétrons fossem ejetados do sistema por efeito fotoelétrico, simplesmente, estaria aumentando-se a quantidade de carga positiva no sistema, e por isso a agulha não volta a sua posição de equilíbrio inicial.

Figura 36 – Efeito fotoelétrico.



Fonte: Esquerda: vídeo - <<https://www.youtube.com/watch?v=z-3XaXCvjZw>>. Direita: simulação computacional - <https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_fotoefekt&l=pt>.

A simulação computacional apresenta um conjunto bem completo de arranjos para conduzirmos experimentos sobre o efeito fotoelétrico. Ela permite variar comprimento de onda e amplitude da luz incidente e diferença de potencial entre os terminais do circuito. Permite escolher ainda vários tipos de metais e também a medir uma corrente proveniente da ejeção de elétrons do metal. Com essa simulação é possível analisar que o efeito fotoelétrico não depende da intensidade da luz incidente mas sim do comprimento de onda λ utilizado. Para tal, basta escolher uma configuração, por exemplo, metal césio: para comprimentos de onda maiores que 642 nm, não importa a intensidade do feixe, não ocorre ejeção de elétrons do material, ou seja,

fótons com essa energia ($E = \frac{h.c}{\lambda}$) não são capazes de vencer a função trabalho ($\phi = E - K_{max}$) do metal. Mas para valores menores que 642 nm o efeito fotoelétrico ocorre, e nesse caso, uma maior intensidade da luz promove mais ejeções de elétrons, pois, tem-se mais fótons atingindo o material por unidade de tempo, cada um com energia que é suficiente para provocar a ejeção de um elétron.

A simulação também permite analisar que a energia cinética máxima (K_{max}) dos elétrons ejetados da superfície do metal depende exclusivamente do comprimento de onda da radiação incidente. Para isto, devemos variar a diferença de potencial (ddp) no circuito. Por exemplo, metal céσιο, $\lambda = 490$ nm e 100% de intensidade: registra uma corrente nula no amperímetro quando aplicamos 0,7 V nas extremidades do circuito, ou seja, uma ddp de 0,7 V foi capaz de desacelerar os elétrons mais energéticos ejetados do metal. Agora nessa ultima configuração se alteramos o comprimento de onda para 471 nm ou menor surge uma corrente no amperímetro, ou seja, os elétrons ficaram mais energéticos. De todos os experimentos feitos nessa simulação, os resultados levam ao argumento de que a energia radiante é quantizada, transferida em pacotes concentrados e de forma abrupta. Ou seja, a luz é composta de Fótons que são pacotes de energia indivisíveis, não transferem energia aos poucos de forma contínua mas sim aos pacotes, abruptamente.

Figura 37 – Seleção de alguns Slides que compões a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Mais uma vez o IVMZ pode ser utilizado para nos auxiliar. A figura 37 apresenta algumas

configurações onde podemos obter uma distribuição aleatória de fótons na tela de observação. Ao utilizarmos um feixe de baixa intensidade, é possível discutir a teoria dos quanta de energia abordados no efeito fotoelétrico. O feixe ao incidir no semi-espelho, 50% dos fótons seguem numa direção e 50% em outra, uma vez que, são indivisíveis. Quando acoplamos os dois semi-espelhos na montagem surge um padrão de interferência nos anteparos de observação que se complementam, ou seja, quando ocorre detecção em uma posição num anteparo, na posição equivalente no outro anteparo não ocorre detecção, e vice-versa. As regiões com maior probabilidade de detecção em cada anteparo formam um ponto de máximo e os de menor detecção pontos de mínimo, que são equivalentes a zonas de interferência, respectivamente, construtiva e destrutiva em figuras de interferência típicas de fenômenos ondulatórios. Com o IVMZ o professor pode instigar os alunos a interpretar os fenômenos observados com relação aos argumentos tratados, como, por exemplo, explicar a formação de um padrão de interferência ou a distribuição aleatória de fótons num anteparo de observação e correlacionar cada um desses com sua respectiva modelagem teórica.

Figura 38 – Seleção de alguns slides que compõem a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.



Fonte: Elaborada pelo autor. A simulação computacional sobre o efeito Compton pode ser acessada em: [https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531#:~:text=The%20Compton%20Effect%20model%20simulates,\(photon%2Delectron\)%20scattering.&text=The%20Compton%20Effect%20model%20was,Simulations%20\(EJS\)%20modeling%20tool](https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531#:~:text=The%20Compton%20Effect%20model%20simulates,(photon%2Delectron)%20scattering.&text=The%20Compton%20Effect%20model%20was,Simulations%20(EJS)%20modeling%20tool).

Pela última montagem no IVMZ temos que os fótons seguem um ou outro caminho até a tela de observação totalizando ao final 100% somados os Fótons de ambos anteparos, sendo que

cada um só pode ser detectado uma única vez. Os fótons pela forma como entregam energia quando interagem com a matéria e não sendo observado meio fóton nos remetem à uma ideia corpuscular. Fica assim, um “gancho” para finalizar a primeira aula, apresentando-se o efeito Compton que fornece sustentação à uma interpretação corpuscular para a luz. Na figura 38 é apresentado um compilado dessas ideias. O experimento de efeito Compton consiste no espalhamento de raios-x por um alvo como, por exemplo, grafite. Uma simulação computacional pode nos ajudar na compreensão e visualização do fenômeno. Nessa simulação pode-se observar que variando o ângulo de detecção da radiação espalhada pelo alvo, o comprimento de onda espalhado não coincide com o comprimento de onda incidente, o que viola a conservação de energia quando considerado a radiação incidente como ondulatória. Porém, entendendo que fótons possuem além de energia, também momento, pode-se imaginar a colisão entre os fótons incidentes e elétrons do alvo como uma colisão entre bolas de bilhar. Dessa forma, a conservação do momento permite compreender o surgimento de um comprimento de onda espalhado que difere do incidente, uma vez que, o fóton perde energia para o elétron na colisão.

Neste ponto o problema gerador ao conceito “dualidade onda-partícula” está completo. A partir de então o professor pode gerar uma discussão com os alunos sobre, por exemplo, o que então é a luz - uma onda? uma partícula? O “gancho” para a próxima aula ficará estabelecido: como abordar, modelar e classificar fenômenos luminosos? O que é a luz?

A.2 Segunda aula

Tempo previsto:

Uma aula de 50 minutos.

Objetivos:

Ao final desta aula, o aluno deverá ser capaz de compreender:

- A necessidade da construção de um formalismo capaz de resolver o problema em questão - descrever em sua totalidade o comportamento da luz;
- O conceito de um objeto quântico - o “comportamento dual” não é exclusivo à luz;
- O fenômeno da difração de elétrons;

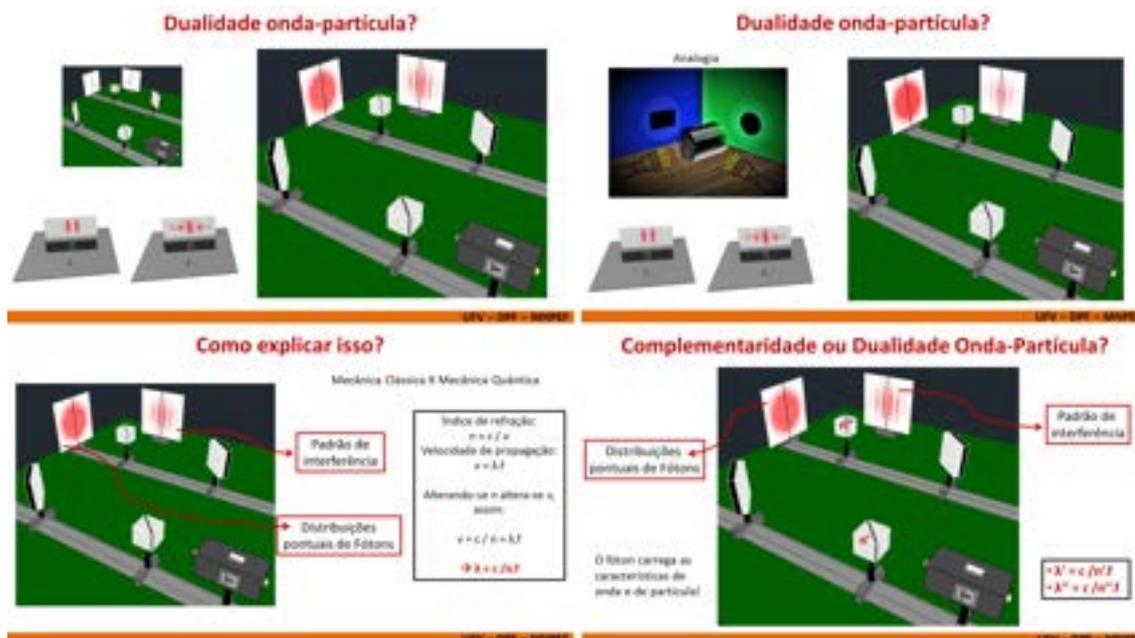
- As características e propriedades de feixes de fótons e feixes de elétrons de baixíssima intensidade;
- Uma abordagem linguística distinta à “dualidade onda-partícula” - *wavicle*, *quantom*, *micropartículas*, dentre outros;
- Algumas interpretações da Física Quântica para a “dualidade onda-partícula”;
- Uma analogia mecânica para a interpretação dualista realista.

Desenvolvimento:

Na segunda aula da sequência didática, é dada continuidade para a organização do conhecimento. Num primeiro momento dessa segunda aula recapitula-se elementos centrais da aula anterior. A apresentação de resultados experimentais do IVMZ em conjunto com uma analogia (figura 39) possibilita fomentar questionamentos acerca da dualidade tal como entendida a partir da mecânica clássica, e questionar os alunos sobre como explicar este resultado tendo em mente inicialmente os argumentos clássicos ondulatórios e corpusculares trabalhados até então. Um objeto clássico não pode ser uma onda e uma partícula. Aborda-se na sequência a ideia da necessidade da construção de um novo formalismo para explicar as observações experimentais em sua totalidade. Assim, um contraste entre a mecânica clássica e o surgimento da teoria quântica para modelar as observações da natureza é apresentado, consolidando a sedimentação dos conceitos e ideias chaves em análise. Se inicialmente algo se mostra para nós no mundo macroscópico como onda ou partícula é o que se toma como natural por ser intuitivo, pois, é o que se conhece por já ter sido compreendido e modelado pela ciência no nível macroscópico. Ao explorar-se novas escalas percebe-se que as coisas podem fugir a este natural. Pode-se então se questionar que o observado antes poderia ser apenas um caso particular de algo mais geral? ou não? Tais questionamentos levam a despertar ainda mais a curiosidade dos alunos, e corrobora para facilitar a desconstrução de possíveis contradições ou inconsistências lógicas como assumir entidades duais.

O professor pode ainda, iniciar uma discussão sobre o resultado apresentado na figura 39 citando o princípio da complementaridade de Bohr, e então explicar sobre fenômenos intermediários onde os caracteres de onda e de partícula se apresentam simultaneamente, mas de forma parcial, salientando como os padrões observados induzem a uma falsa violação ao princípio da complementaridade. Pois note, por mais que o experimento esteja montado sobre uma mesma

Figura 39 – Seleção de alguns Slides que compõem a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

bancada os resultados experimentais são distintos, em telas de observações distintas, respeitando o princípio da complementaridade - eles não ocorrem simultaneamente numa mesma tela de observação. E ainda a complementaridade proposta por Bohr representa uma situação extrema, onde um caráter ou outro se apresenta plenamente, e não simultaneamente. Assim, a discussão segue para que os estudantes compreendam que fótons carregam consigo aspectos de onda e de partícula, podendo ser nomeados objetos quânticos que possuem propriedades e características a sua maneira que diferem dos objetos clássicos.

Aborda-se em seguida a difração de elétrons e, para tal, elaboramos um vídeo (figura 40), onde é apresentado um experimento deste fenômeno. Este consiste basicamente em gerar um feixe de elétrons que será acelerado para colidir com uma grade de grafite. Nesse processo, os elétrons serão espalhados e numa tela de observação sensível, que é iluminada quando detecta elétrons, forma-se uma figura de interferência com padrões circulares. Como explicar que elétrons espalhados formam um padrão de interferência? Louis de Broglie sugere que elétrons possuem associado a eles uma onda que governa seu movimento. Assim, a figura de interferência tem origem pela difração das ondas que estão associadas aos elétrons na rede cristalina de grafite.

Após a observação e discussão sobre o experimento da difração de elétrons o aluno perceberá que as características e propriedades ondulatórias e corpusculares até então tratadas apenas

Figura 40 – Imagem de um vídeo sobre a difração de elétrons. Esquerda: Montagem do aparato experimental; Direita: resultado experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento pode ser consultado em:
<<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>>.

para a luz não são exclusivas a esta. O professor pode ampliar aqui um debate sobre escalas de grandeza e lançar o questionamento aos alunos se estas propriedades e características podem ou não ser naturais a todos os corpos ou apenas à escala microcômica.

A partir de então, entendemos que existe uma nova classe de observações que não se enquadram dentro de uma teoria puramente clássica que descrevem uma onda ou uma partícula. Na figura 41 é apresentado fenômenos para fótons e elétrons em feixe de baixíssima intensidade. Os elétrons e os fótons apresentam comportamento ondulatório, mas não são ondas clássicas visto que um único elétron ou um único fóton não gera uma figura de interferência completa, mas produz somente uma marca sobre a tela fotográfica, como fosse uma partícula clássica. Entretanto esta marca estará em uma região da figura de interferência resultante da incidência de vários elétrons ou de vários fótons. Assim elétrons e fótons apresentam características de partículas e de ondas clássicas, entretanto não são nenhuma coisa nem outra. Denominar essa nova classe de entidade pelo termo “dualidade onda-partícula” não é o melhor caminho didático para abordar o tema, uma vez que este termo pode provocar uma inconsistência lógica na mente do aluno que pode resultar num obstáculo pedagógico. Alguns autores propõem denominações alternativas como *quantom*, *micropartículas*, *objetos quânticos*, *wavicles*, dentre outros.

Para finalizar, abordando o terceiro momento pedagógico, a aplicação do conhecimento. Apresenta-se uma discussão sobre as interpretações da Física Quântica acerca de toda problematização até então. Trazemos quatro interpretações apenas: ondulatória, corpuscular, dualista realista e interpretação da complementaridade, como mostrado na figura 41. O professor deve salientar que ainda não há um consenso entre os físicos sobre uma interpretação única padrão. Essa discussão fica assim mais restrita ao campo da filosofia da ciência. Entretanto, deve-se cha-

Figura 41 – Seleção de alguns Slides que compõem a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento da analogia pode ser consultado em: <https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>.

mar a atenção que a interpretação de uma dada teoria é o panorama da realidade traçado com base na teoria. E que o princípio da complementaridade é o conceito central da interpretação de Copenhague da Física Quântica, hegemônica dentre outras.

Com relação à interpretação dualista realista elaboramos um vídeo (figuras 42 e 43) com um experimento que fornece uma analogia mecânica à esta interpretação. De modo que, chama a atenção e desperta a curiosidade do aluno, além de, lhe ajudar a compreender e visualizar as ideias por traz da interpretação. A analogia se dá pela ligação visual de uma gotícula de fluido que oscila sobre o restante desse fluido, tendo associada a ela uma onda devido à vibração do sistema. A construção desse experimento será descrito na seção A.4. Esta parte da aplicação do conhecimento tem a finalidade de incitar uma discussão com os alunos para se observar a percepção deles quanto se o experimento revelava um objeto quântico ou não. Uma vez que o vídeo apresenta um análogo mecânico, com estruturas macroscópicas, espera-se que os alunos concluam que o sistema não apresenta nenhum objeto quântico. Para enriquecer a aula sugerimos ainda a apresentação de outros vídeos, como segue:

Watch the bouncing droplet:

[https://www.youtube.com/watch?v=pbGz1njqhxU](https://www.youtube.com/watch?v=pbGz1njqhxU;);

Pilot-Wave Hydrodynamics: Supplemental Video 1:

<<https://www.youtube.com/watch?v=50zJvQ43iTM>>;

Through the Wormhole - Wave/Particle - Silicon Droplets:

<<https://www.youtube.com/watch?v=fnUBaBdl0Aw>>;

Tunnel effect of walking droplet trapped in a square box:

<<https://www.youtube.com/watch?v=72DA4fgamPE>>.

A.3 Atividades propostas

1. Dentre as características da luz listadas abaixo, qual NÃO foi revelada pelo efeito fotoelétrico?
 - (a) A luz transfere energia abruptamente, como fosse uma partícula.
 - (b) A energia luminosa é transferida em porções discretas, pacotes.
 - (c) A energia entregue pela luz depende de sua frequência de oscilação.
 - (d) A velocidade da luz é independente do movimento do observador.
 2. Qual das afirmativas abaixo NÃO é verdadeira?
 - (a) O efeito fotoelétrico evidenciou o caráter ondulatório da luz.
 - (b) O efeito Compton evidenciou o caráter corpuscular da luz.
 - (c) O efeito de difração evidenciou o caráter ondulatório da luz.
 3. Fundamentado nos resultados dos experimentos de difração e interferência da luz é CORRETO afirmar que a luz se propaga:
 - (a) em linha reta.
 - (b) no vácuo com velocidade constante.
 - (c) como uma onda.
 - (d) como uma partícula.
 4. O experimentos de difração e interferência da luz juntamente com os experimentos de efeito Compton e fotoelétrico ofereceram evidencias que a luz é um ente:
 - (a) igual a uma partícula.
-

- (b) igual a uma onda.
- (c) que ao mesmo tempo, é uma partícula e uma onda.
- (d) que possui uma natureza dual, com aspectos de partícula e onda.
5. Uma partícula é um ente altamente localizado no espaço e que troca energia abruptamente. De outro lado, uma onda é dispersa pelo espaço e troca energia suavemente. Sendo conhecedor destas características das ondas e das partículas é possível afirmar que entes como os fótons, elétrons, entre outros, SÃO:
- (a) entes que, ao mesmo tempo, são onda e partícula.
- (b) outros entes, que apresentam características de onda e de partículas.
- (c) partículas.
- (d) ondas.
6. O termo “natureza dual da luz” quer dizer que a luz:
- (a) é uma onda e uma partícula, ao mesmo tempo.
- (b) hora é uma onda, hora é uma partícula.
- (c) pode apresentar características de onda ou de partícula.
7. O fóton é uma partícula?
- (a) verdadeiro
- (b) falso
8. Os experimentos de difração de elétrons consolidaram a ideia de que estes entes:
- (a) são partículas.
- (b) são ondas.
- (c) revelaram que os elétrons apresentam características de partículas.
- (d) revelaram que os elétrons apresentam características de ondas.
9. É confortável para você entender a “natureza dual” dos fótons, dos elétrons, entre outros entes quânticos, como resultante da superposição de onda e partículas? É esta a concepção transmitida nas duas últimas aulas de física moderna?
-

(a) Sim. Sim.

(b) Não. Não.

(c) Sim. Não.

(d) Não. Sim.

10. O elétron é uma partícula?

(a) verdadeiro

(b) falso

Gabarito das atividades propostas

1. (d)	6. (c)
2. (a)	7. (b)
3. (c)	8. (d)
4. (d)	9. Resposta pessoal
5. (b)	10. (b)

A.4 Analogia mecânica à interpretação Dualista Realista

Para a construção do aparato experimental semelhante ao apresentado na figura 42 será necessário obter os seguintes materiais:

- Um alto falante;
 - Uma base de montagem;
 - Um circuito modulador com alimentação USB;
 - Um carregador de celular com estrada USB;
 - Um fone de ouvido com fios;
 - Fios para conexões;
 - Ferro de solda e estanho;
 - Uma placa cilíndrica como recipiente para líquido;
-

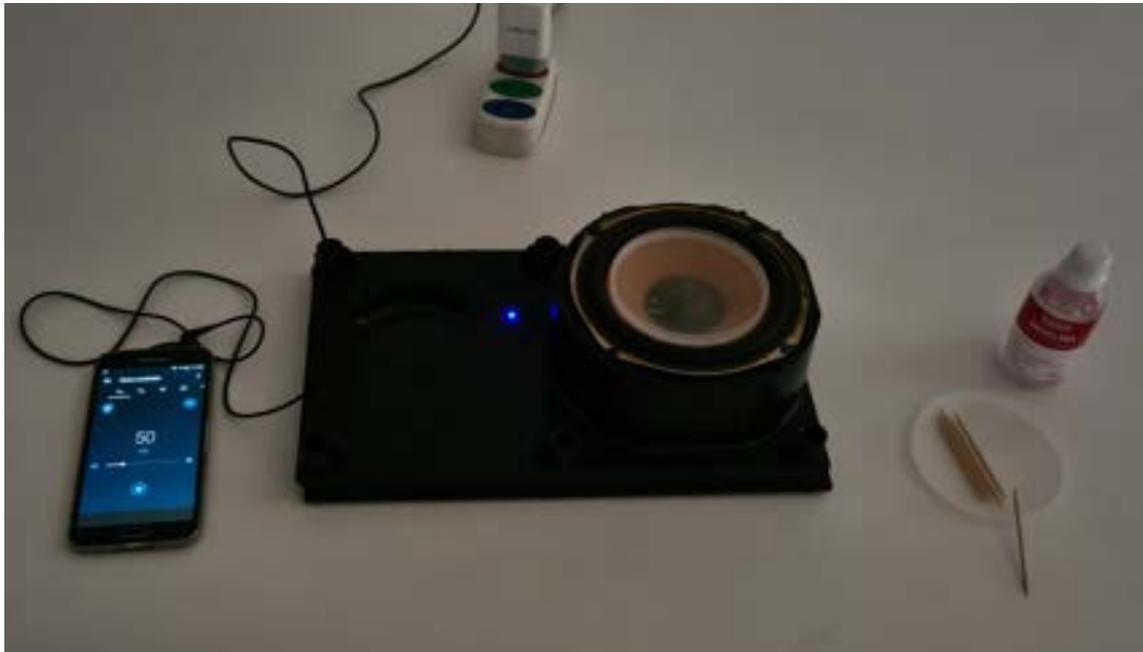
- Um gerador de frequência ajustável;
- Líquido com viscosidade cinemática entre (10 - 100) cSt (por exemplo, óleo de silicone ou vaselina);

A montagem do experimento é simples, deve-se conectar o alto falante ao gerador de frequência ligando-os ao circuito modulador com o auxílio do fone de ouvido. Para tal use um ferro de solda e estanho para fazer as devidas ligações dos componentes. Vejamos passo-a-passo:

- Primeiro: o circuito modulador pode ser obtido de uma caixinha de som antiga de Desktop com entrada de alimentação USB. Abra a caixinha de som e remova o circuito interno preservando a entrada de alimentação elétrica e tomando cuidado para identificar quais as entradas e saídas de áudio;
- Segundo: escolha um fone de ouvido com entrada compatível ao seu gerador de frequência (em nosso caso foi escolhido o formato P2). Remova as cabeças dos fones e ligue os fios de uma delas na entrada de áudio do circuito modulados;
- Terceiro: monte o alto falante e o circuito modulador à base de montagem;
- Quarto: conecte a saída de áudio do circuito modulador ao auto falante;
- Quinto: conecte a entrada do fone de ouvido ao gerador de frequência. Esse gerador pode ser um Smartphone com um aplicativo dedicado. Utilizamos em nossos experimentos o seguinte aplicativo: <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.boedec.hoel.frequencygenerator>>;
- Sexto: conecte o circuito modulados à rede elétrica através do carregador de celular para ligar o alto falante e então teste se está tudo funcionando ligando o gerador de frequência entre (20 - 150) Hz.

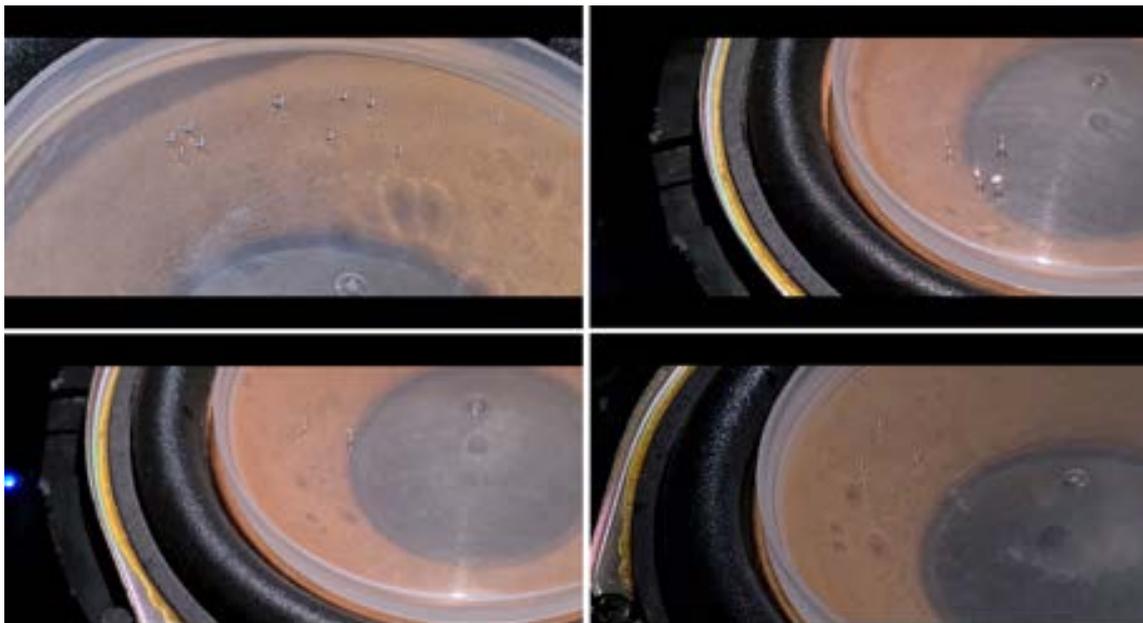
Para a execução do experimento coloque uma quantidade do líquido no recipiente cilíndrico que seja suficiente para preencher todo fundo. Em seguida posicione este recipiente sobre o alto falante de modo que o líquido fique distribuído o mais uniformemente possível no recipiente. Agora ligue o alto falante e o gerador de frequência (sendo para a vaselina uma frequência de 50 Hz). Então com o auxílio de um objeto pontiagudo perturbe o sistema suavemente a fim de produzir pequenas bolinhas do líquido que ficarão saltitando sobre a superfície deste líquido.

Figura 42 – Montagem experimental da analogia mecânica para a interpretação dualista-realista da Física Quântica.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento pode ser consultado em:
<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>.

Figura 43 – Detalhes do resultado experimental da analogia mecânica para a interpretação dualista-realista da Física Quântica.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento pode ser consultado em:
<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>.