

A linguagem, a epistemologia e o ensino conceitual da dualidade onda-partícula

Language, epistemology and the conceptual teaching of wave-particle duality

Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho^{*1,3}, Rafael Filgueira Pimentel¹,
Regina Simplício Carvalho^{2,3}, Carlos Laburu⁴

¹Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Física, Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Viçosa, MG, Brasil.

²Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Química, Viçosa, MG, Brasil.

³Universidade Federal de Viçosa, Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Viçosa, MG, Brasil.

⁴Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Londrina, PR, Brasil.

Recebido em 22 de dezembro de 2022. Revisado em 03 de março de 2023. Aceito em 06 de março de 2023.

No início do século XX, a compreensão da matéria em escala microscópica demandou romper com paradigmas 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 e um novo formalismo estruturante precisou ser desenvolvido. O presente trabalho relata o desenvolvimento de uma sequência didática que visa ensinar os fundamentos da Física Quântica no Ensino Médio e Superior. A abordagem utilizada oferece meios para contornar a turva noção de “dualidade onda-partícula”, evitando as armadilhas criadas pelas analogias com os objetos clássicos que obscurecem a compreensão do conceito de objeto quântico. A abordagem é desenvolvida na linguagem multimídia e organizada em torno de experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais. O ensino por investigação foi empregado, estimulando os alunos a observar e analisar de forma investigativa os fenômenos e fatos apresentados. Para aplicação futura, um teste piloto foi elaborado utilizando da observação participativa dos professores e de questionário respondido pelos alunos, com vistas a auferir uma primeira avaliação da sequência didática.

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

At the 20th century dawn, the understanding of matter on a microscopic scale broke the Classical Physics barriers, giving birth to what we know today as Quantum Physics. The concepts of physical reality needed to be rediscussed, considering the strange dual object on which Quantum Physics was being built and a new structuring formalism needed to be developed. The present work reports the development of a didactic sequence that aims to teach the fundamentals of Quantum Physics in High School and Higher Education. The approach intends to offers means to avoid the nebulous notion of “wave-particle duality”, avoiding the pitfalls created by analogies with classical objects that obscure the understanding of the concept of a quantum object. The approach is developed in multimedia language organized around experiments shown in short videos, images, animations and computational simulations. Teaching by investigation was given, encouraging students to observe and analyze the phenomena and facts presented in an investigative way. For future application, a pilot test was elaborated using the participatory observation of teachers and questionnaire answered by the students, with a view to obtaining a first evaluation of the didactic sequence.

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

1. Introdução

Na história das ciências, a Física Quântica talvez seja a teoria que mais impactou o pensamento humano. O seu desenvolvimento forçou a ruptura de paradigmas da Física Clássica e ofereceu fundamentos para a interpretação da matéria em escala atômica, propiciando o desenvolvimento de muitas das modernas tecnológicas. Um

novo formalismo estruturante precisou ser desenvolvido considerando o estranho objeto dual sobre o qual a Física Quântica foi erguida.

Este aspecto dual suscitou a proposição conhecida como Princípio da Complementaridade, enunciada por Bohr em 1927, e que constituiu a base de uma das interpretações da Física Quântica. Segundo este princípio, os resultados exibidos por um experimento quântico específico podem ser compreendidos considerando o objeto quântico como uma partícula ou como uma

* Endereço de correspondência: atadeu@ufv.br

onda, mas nunca como ambos. Essas representações são aspectos complementares da experiência, mutuamente excludentes, mas que, apenas juntos conduzem a uma descrição exaustiva do objeto quântico [1]. Esta característica dual está no âmago da Física Quântica e é referida como “dualidade onda-partícula”. O uso desta expressão pode evocar na mente do estudante uma contradição lógica, capaz de dificultar a construção conceitual do objeto quântico, pois evoca a ideia de unir em uma única representação dois objetos clássicos distintos e disjuntos. A Física Clássica desenvolveu duas visões para o objeto físico elementar: a de uma partícula (ou corpúsculo); de dimensões ínfimas, rigorosamente localizada, e a de uma onda (ou campo), perturbação que se estende pelo espaço. Essas ideias e representações formam a base de toda a teoria clássica adicional, envolvendo partículas ou ondas e suas interações [2].

A abordagem dual, associada ao objeto quântico, sugere que algo é bem localizado no espaço e, ao mesmo tempo espalhado, e que segue uma trajetória bem definida no espaço e não segue [3]. É óbvio que as visões clássicas, de uma partícula e de uma onda, são mutuamente excludentes, no sentido de que um mesmo objeto não pode ser imaginado como uma partícula e uma onda ao mesmo tempo [2]. “O comportamento dos objetos quânticos (elétrons, prótons, nêutrons, fótons, entre outros) é o mesmo para todos; todos são “ondas-partículas” ou como queira chamá-los” [4], mas não são nem ondas nem partículas na acepção clássica.

Em razão dos objetos quânticos possuírem propriedades específicas, que fogem ao escopo da física clássica, há autores de livros didáticos, como Levich [5] e Ohanian [6], que consideraram nomeá-los por “micropartículas” ou “wavicles”. Esta última denominação foi cunhada por Arthur Stanley Eddington, em seu livro publicado em 1927, “The Nature of the Physical World” [7] e resulta do cruzamento dos vocábulos da língua inglesa, “wave”, e “particle”, correspondentes a onda e partícula na língua portuguesa. Em 1967 Mário Bunge [8, 9] introduziu a denominação “quanton”, adotada e difundida por Lévy-Leblond [10], entretanto, nenhuma dessas denominações alcançou muita popularidade. Interpretasse, então, um objeto quântico nem como onda nem como partícula clássica, mas um outro objeto, que pode exibir aspectos de ondas clássicas e de partículas clássicas. As ondas e as partículas são então manifestações de aspectos deste objeto quântico [11].

Estas denominações não objetivaram criar explicitamente uma nova rota epistêmica para a construção dos conhecimentos da Física Quântica, entretanto, assim pode ser pensada. Uma denominação específica para o objeto quântico elimina a contradição lógica associada à expressão “dualidade onda-partícula”, na medida em que não mais remete aos objetos clássicos. Essa abordagem evita as armadilhas da analogia com os objetos clássicos, que obscurecem a compreensão do objeto quântico,

e enfatiza para o estudante a admirável inovação em que se constitui a teoria quântica [11, 12].

Neste trabalho propomos um design didático que combina a linguagem multimídia com o ensino por investigação, consubstanciado por meio de experimentos exibidos em filmes de curta duração e simulações computacionais. O design seguiu princípios da pedagogia construtivista em uma sequência de unidades de aprendizado que cobriu tópicos introdutórios de Física Quântica.

2. O Ensino da Física Quântica

A Física Quântica é essencial para uma compreensão científica do mundo atual, entretanto, apesar de ter sido desenvolvida no século passado, os fundamentos da Física Quântica ainda permanecem obscuros para a maioria das pessoas, exceto para aqueles instruídos em nível superior na área de ciências exatas. Os alunos de ensino médio devem ter a chance de aprender os fundamentos da Física Quântica e não ficarem limitados à física do século 19.

No Brasil, o documento oficial Parâmetros Curriculares Nacionais Ensino Médio [13], de 1999, faz inequívoca menção à introdução da Física Quântica no Ensino Médio. Já a Base Nacional Comum Curricular para o Ensino Médio [14], homologada pelo governo brasileiro em dezembro de 2018, faz uma única menção explícita à Física Quântica; enquanto componente de um dos itinerários integrados. Pesquisa [15] recente, realizada no Brasil, revela que os professores de ensino médio, apesar de perceberem a importância da Física Quântica dentro da sociedade moderna se esquivam em oferecê-la; acredita-se que em razão das suas próprias lacunas de formação neste quesito.

A literatura [16–18] reporta trabalhos sobre a inserção da Física Quântica, em nível médio, nos currículos nacionais da Austrália, Canadá e de diferentes países europeus. Os dados apontam tratar-se de uma ação ocorrida nas últimas duas décadas, na maioria deles. Chama a atenção que, na França, identifica-se nos documentos oficiais norteadores do ensino secundário, publicado em 2011 [18, 19], duas posições epistemológicas relativas ao conceito do objeto quântico: a primeira (que se aproxima da chamada escola de Copenhague) é denominada de epistemologia conservadora, e a segunda, a epistemologia inovadora, que emprega o termo não convencional “quanton”, (associada à abordagem de Bunge e Lévy-Leblond).

A Escola de Copenhague é a denominação atribuída à corrente de pensamento concebida por Bohr, Heisenberg e outros, que constituiu a mais influente das interpretações da teoria quântica, a “Interpretação de Copenhague”, e se fundamenta no conceito de complementaridade. É interessante observar que, como formulado por Bohr, o princípio da complementaridade não conduz à contradição lógica [1].

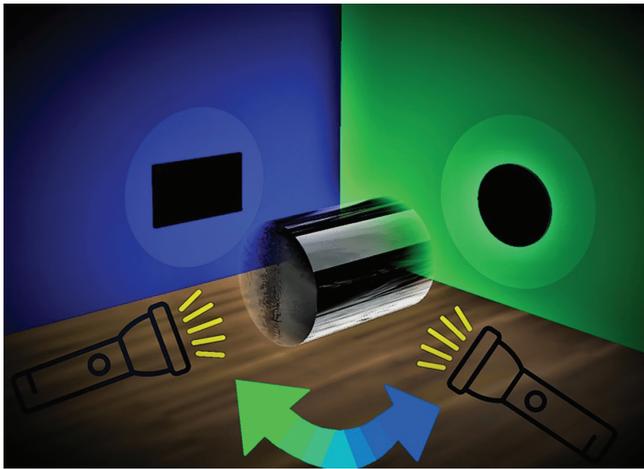


Figura 1: Cilindro iluminado por uma lanterna que pode movimentar-se em torno dele, projetando uma sombra que pode variar entre um retângulo e um círculo. A dupla seta dá representação aos fenômenos intermediários. Adaptação da analogia proposta por Levi-Leblond, elaborada pelos autores (2021).

O princípio de complementaridade de Bohr vem sendo escrutinado, tanto teoricamente [20] quanto em experimentos quânticos de espectroscopia [21], em arranjos de escolha retardada [22] e de realidade controlada [23]. Os resultados dos experimentos de escolha retardada sugerem que os sistemas quânticos podem se comportar não somente como onda ou como partícula, mas de maneira intermediária, revelando uma mudança monótona e contínua entre o comportamento de onda (nitidez do padrão de interferência) e o comportamento de partícula (borrão de marcas pontuais dispersas). Estes resultados sugerem que Bohr, ao formular o princípio da complementaridade, considerava apenas situações extremas. A Figura 1 mostra uma representação destes resultados e ideias usando uma adaptação da analogia proposta por Levi-Leblond para o objeto quântico.

Um cilindro projeta sombras completamente diferentes quando uma das faces plana é iluminada (um círculo) comparada quando a iluminação é lateral (um retângulo). Incorporamos uma seta dupla a esta imagem para suscitar a representação dos fenômenos intermediários.

Em contraste, os resultados dos experimentos de realidade controlada validaram a formulação original de Bohr para o princípio da complementaridade, renovando a discussão sobre os aspectos realistas das propriedades das ondas e das partículas ligadas aos sistemas quânticos.

Os surpreendentes resultados e aplicações da Física Quântica tornam difícil questionar o formalismo da teoria, entretanto, do ponto de vista da filosofia e da epistemologia não há consenso estabelecido com respeito à interpretação da teoria. Inclusive no que tange ao significado da complementaridade, como exemplificamos os resultados dos experimentos quânticos de espectroscopia [24]. O princípio da complementariedade, ou a

dualidade onda-partícula, é ainda um problema controverso da pesquisa atual sobre os fundamentos da física e divide a comunidade de físicos e filósofos da ciência em inúmeras “escolas de pensamento” distintas [25].

A falta de consenso coloca um sério dilema em termos de ensino e aprendizagem da teoria quântica. Embora pesquisas [15, 26–28] sugiram que os aspectos epistemológicos ajudem os estudantes a compreender novos conceitos de Física Quântica, bem como entender como a ciência é construída, muitos países não os incluem explicitamente no currículo [29].

Considerando a importância seminal do conceito de objeto quântico na Física Quântica, este conceito também pode ser uma porta de entrada para introdução da teoria quântica nos currículos escolares. Os conceitos da Física Quântica estudados no ensino básico devem ser, na sua essência, relevantes e pertinentes, sem a necessidade de abordagens adicionais que exijam conhecimentos em nível do ensino superior [18]. Segundo Jammer [1], conceitos-chave da teoria quântica, como função de onda e sua interpretação probabilística, foram desenvolvidos para superar a dificuldade conceitual causada pela noção de dualidade e usualmente são apresentados em linguagem de ensino superior.

Mas, como os professores devem ensinar sobre o objeto quântico quando não há consenso sobre o significado do próprio conceito? Além disso, que postura os professores devem adotar em relação à interpretação da teoria quântica?

Uma possível resposta a estas relevantes questões didáticas consiste em uma abordagem esquivada ao problema de interpretação. Este trabalho apresenta uma proposta de abordagem que evita as interpretações e usa a contradição lógica para o ensino da Física Quântica.

3. A Estratégia Didática

Identificamos dois livros texto europeus [30, 31] destinados a cursos de Física que usam extensamente a abordagem pedagógica inovadora, ou seja, sustentam premissas epistemológicas semelhantes às abordagens de Bunge e Lévy-Leblond, em contraposição com outros [5, 6, 32] que meramente fazem citação das mesmas.

No ensino introdutório da Física Quântica é inevitável a utilização de conceitos da Física Clássica, como o de onda e de partícula, e, por vezes, a transferência da terminologia pode levar a dificuldades de ensino e aprendizagem, como sugere a literatura [3], pois são objetos dispares e a utilização da lógica Aristotélica pode conduzir a uma inconsistência lógica [33]. Portanto, a questão em foco envolve aspectos da lógica e da linguagem.

A lógica Aristotélica é fundamentada 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 . Ou seja, sendo verdadeira uma proposição, ou sua negação, a

conjunção da proposição e de sua negação não pode ser verdadeira; o significado de uma expressão composta é determinado pelos significados de suas partes. Assim, na perspectiva da lógica Aristotélica, o termo “onda-partícula” é logicamente contraditório; não é possível ser onda e partícula concomitantemente [34].

Para lidar com esta inconsistência, Heisenberg [35] sugeriu que, mantida a linguagem da Física Clássica, a lógica da teoria quântica pode ser interpretada como uma extensão ou modificação da lógica Aristotélica. Sua proposição encontrou apoio nos trabalhos de Birkhoff e von Neumann [36] e de von Weizsäcker [37] que desenvolveram uma lógica considerando que a teoria quântica é uma teoria probabilista e intrinsecamente não-determinista [38]. Nesta perspectiva não há inconsistência lógica quando se usa a terminologia “dualidade onda partícula”. Entretanto, a assimilação de tal perspectiva envolve saber que a teoria Quântica é probabilística; compreensão que decorre do conhecimento das características do objeto quântico, que então deve ser apresentado primeiro aos estudantes. Não é um dilema de causalidade; constrói-se primeiro a ideia de objeto quântico e, na perspectiva de revisitação de Jerome Bruner [39], à medida que a aprendizagem avança o conceito pode ser revisitado e lapidado.

No que concerne à linguagem, tanto Vygotsky quanto Piaget compreenderam sua importância para o desenvolvimento cognitivo dos indivíduos, mas elaboraram perspectivas diferentes sobre como a linguagem se relaciona com o pensamento e a cognição.

Para Piaget, a linguagem aparece quase simultaneamente com outras funções simbólicas e potencializa o pensamento em rapidez e extensão. A linguagem permite ao pensamento alargar as fronteiras, ou seja, extrapola o campo perceptivo. Sendo elaborada previamente e socialmente, oferece a priori um conjunto de instrumentos cognitivos à serviço do pensamento e é estruturada pela lógica. Entre a linguagem e o pensamento existe um “ciclo genético” em que um se apoia no outro, em “formação solidária” (PIAGET, 2010, p. 85). Entretanto, o desenvolvimento da linguagem e das outras funções semióticas depende da estruturação da inteligência [40, 41].

Ainda, segundo Piaget, só ocorre aprendizagem quando o esquema de assimilação sofre acomodação, ou seja, uma reestruturação cognitiva do indivíduo, que resulta em novos esquemas de assimilação [42, 43].

Segundo Vygotsky é o sistema simbólico da linguagem o instrumento essencial para o fluir do pensamento que elabora o aprendizado; é a linguagem que possibilita o processo de abstração, dando origem a inteligência abstrata que flexibiliza o pensamento conceitual. A construção dos conceitos científicos depende de um perfeito uso das palavras para que a troca de significados seja plena [44–46]. “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” [47].

Ocorrendo uma disjunção, entre o conceito antigo e o novo, uma irrefletida transferência de terminologia pode levar a obstáculos epistemológicos e didáticos. 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” [48].

Nas ciências, uma expansão conceitual e uma simplificação de raciocínio podem resultar do alargamento da expressividade e da capacidade descritiva da linguagem usada para descrever o objeto de estudo. O desenvolvimento da ciência é um processo descontínuo, no qual os indivíduos constantemente rompem com conhecimentos anteriores. A construção de um novo conhecimento passa pela desconstrução dos anteriores, suplantando aquilo que Gaston Bachelard [49] denominou de obstáculos epistemológicos. Os obstáculos epistemológicos são um conjunto de dificuldades psicológicas que entram ou impedem o acesso correto ao conhecimento científico. A sua superação requer a passagem para um conhecimento mais profundo, que generalize o contexto conhecido e exija que o indivíduo tome explicitamente consciência dele. Hábitos verbais podem restringir o pensamento científico, por isso é preciso ter cuidado com o emprego das palavras e expressões usadas ao pensar sobre a ciência. Obstáculos verbais podem ser criados quando os conceitos científicos são desvinculados do contexto histórico de sua gênese, restringindo-os a definições puras, desconsiderando que a ciência promove permanentes revoluções nos significados dos termos científicos. Uma nova teoria científica muitas vezes utiliza os mesmos termos já empregados por teorias distintas, porém com outros significados.

O desenvolvimento de uma linguagem apropriada e sua utilização precisa é fator crucial nos processos didáticos pois permite e favorece o ensino e a aprendizagem, ou seja, as trocas de significados.

No presente trabalho propomos uma abordagem didática para introdução da teoria quântica no ensino médio, qual seja: dar ciência aos estudantes dos resultados experimentais que conduziram à inconsistência lógica associada a expressão “dualidade onda-partícula” e, ao mesmo tempo, expor a ideia de nomear o objeto quântico. Assim propomos uma abordagem inversa à proposta por Heisenberg; modificando a linguagem, nomeando-se o objeto quântico, postergando a análise da lógica da teoria quântica até que se introduza o conceito probabilístico da Física Quântica que permita uma compreensão introdutória dos conceitos da lógica Quântica [50].

Uma sequência didática para introdução da física quântica no ensino médio e superior foi elaborada em linguagem multimídia e em uma abordagem de ensino por investigação [51], desenvolvida em torno de simulações computacionais e de experimentos significativos,

estes últimos exibidos em vídeos de curta duração. As simulações computacionais permitem uma melhor visualização de diversos fenômenos quânticos e oferecem um outro modo de experimentação [29]. Esta sequência incorpora fundamentos teóricos relevantes do campo do ensino de ciências para promover uma aprendizagem significativa e conceitual da física quântica. A sequência segue a metodologia dos três momentos pedagógicos de Delizoicov e Angoti [52], problematização, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. A problematização estabelece a ligação do conteúdo com situações reais apresentadas aos alunos e fomenta questionamentos e discussões. Nesse momento pedagógico, os estudantes são desafiados a expor o que pensam sobre as situações e a formular hipóteses explicativas. Na etapa de organização do conhecimento, o professor conduz à 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 os conhecimentos construídos, podendo ser composta por situações similares às do problema inicial ou por outras situações que envolvam os mesmos conhecimentos [50, 52].

3.1. Fundamentos teóricos e abordagens pedagógicas

Piaget [53] investigou a origem, a evolução e os mecanismos de construção do conhecimento e do desenvolvimento da inteligência lógica humana, avançando no entendimento de como o ser humano dá significado aos conhecimentos.

Diante de novas informações, o indivíduo tenta primeiramente estabelecer uma assimilação destas informações aos seus esquemas de pensamentos prévios. Caso a assimilação não ocorra, se estabelece uma falha nas estruturas lógico-conceituais pré-existente no indivíduo. São então acionados mecanismos de equilíbrio. Buscando restabelecer o equilíbrio, necessariamente mais abrangente que o anterior, o indivíduo faz um novo esforço de assimilação das novas informações ou produz uma série de construções compensatórias às estruturas anteriores de pensamento. Em sucessivos desequilíbrios e reconstruções, o conhecimento exógeno é complementado por construções endógenas. Assim, quando novas informações não se encaixam em uma tentativa de assimilação, uma contradição entre as percepções e representações é criada; um estado de desequilíbrio se estabelece e um conflito cognitivo pode ser experimentado [54].

O conflito cognitivo envolve a percepção, pelo indivíduo, de discrepância entre a sua estrutura cognitiva e o ambiente (informação externa), ou entre as diferentes componentes da própria estrutura cognitiva (por exemplo, as concepções, crenças, entre outras) [55]. O desconforto lógico provocado pelo conflito é uma poderosa motivação na busca em reduzi-lo ou resolvê-lo.

Assim, vivenciar o conflito cognitivo pode ser elemento motivador para o aprendiz.

O conceito de conflito cognitivo exerceu grande influência sobre os pesquisadores em educação científica [56–58] e está no centro de nosso design didático. Pretendemos enriquecer as concepções que os estudantes têm, sem pretender apagar ou substituir os significados existentes, mas construir um novo conceito, o de objeto quântico, diferente dos objetos clássicos, mas que apresenta facetas destes últimos, promovendo um novo estado de equilíbrio, compondo uma evolução conceitual [59].

O conflito cognitivo pode ser um grande motivador para revisão de ideias e concepções a respeito de algo, no entanto, pode igualmente gerar frustração e desestímulo. O conflito cognitivo tem uma base afetiva, emocional [51, 54], sendo distinguidos em sua dinâmica de evolução quatro construtos, quais sejam: reconhecimento de situação conflituosa, interesse, ansiedade e reavaliação cognitiva. A manifestação destes construtos pelos estudantes ao longo das aulas pode evidenciar o desencadear do conflito e seu estágio de evolução, inclusive sua superação.

Em aulas em modo investigativo, o conflito cognitivo pode ser usado para compor uma situação problema, sendo compartilhado entre os estudantes, provocando o confronto de ideias por meio da exposição a aspectos incongruentes, inexplicáveis diante de seus conhecimentos prévios. É conveniente abordar conflitos acerca de temas que não possam ser facilmente solucionados, ou seja, problemas abertos que não têm uma solução óbvia ou única, porém em uma abordagem próxima ao estágio de desenvolvimento cognitivo do indivíduo.

É importante considerar que cada indivíduo é um ser único, que passou por um conjunto singular de experiências, e que, diante de interações sociais, sua percepção dos fatos é pessoal e provavelmente diferente de todos os outros. Mesmo recebendo instruções iguais, a resposta de cada indivíduo poderá ser diferente.

Segundo Dewey [60], o ensino deve envolver os estudantes na investigação de problemas reais; abordagem atualmente designada de ensino por investigação (“Inquiry Based Learning”). No ambiente educacional, um problema só será real para o estudante quando o desconhecimento da sua resolução se constituir em fator de perturbação, de desconforto. No presente estudo os problemas reais são oferecidos na forma de vídeos de curta duração, que exibem experimentos cujos resultados se contrapõem à perspectiva clássica, ensejando a construção do conflito cognitivo associado à “dualidade onda-partícula”.

Dewey e Piaget entendem que para um problema começar a ser resolvido precisa ser transformado numa questão individual, em uma necessidade sentida pelo indivíduo. Assim, à medida que o ensinamento avança, torna-se importante esclarecer aos estudantes a lógica e a linguagem que estão sendo imersos.

Está última providência visa também ampliar a utilização de conceitos existentes na estrutura cognitiva dos estudantes. Quanto maior o número de conceitos formados e/ou acessados, maiores serão as relações que um estudante conseguirá estabelecer para explicar os fenômenos observados, ampliando cada vez mais sua cadeia conceitual, desenvolvendo uma aprendizagem significativa.

4. Metodologia

Esta intervenção didática [50], como anteriormente mencionado, objetiva construir o conceito de objeto quântico a partir do conflito cognitivo desencadeado pela inconsistência lógica decorrente do uso da linguagem com termos da Física Clássica, quais sejam: dualidade onda-partícula. A sequência didática foi pensada para ser aplicada em duas aulas de cinquenta minutos cada, geminadas ou não.

Os primeiros cinquenta minutos do encontro com os estudantes são dedicados a estabelecer o desequilíbrio cognitivo motivador da aprendizagem, compondo a problematização. O professor procura envolver os estudantes na conscientização da inconsistência lógica associada à dualidade onda-partícula, sendo essa fundamentada em fatos históricos e resultados experimentais. Discussões acerca da filosofia e natureza da ciência [29] devem ser fomentadas.

A abordagem se inicia discutindo alguns aspectos da história das duas principais obras sobre Óptica produzidas no final do século XVII e início do seguinte, quais sejam: o “Tratado sobre a Luz” (1690), de autoria de Christiaan Huygens (1629 a 1695), e o “Óptica” (1704), de Isaac Newton (1642 a 1727). Huygens adotava uma concepção de luz como pulsos propagados pelo éter, e foi capaz de construir apuradas explicações sobre os fenômenos da refração e da reflexão. A obra de Newton revelava uma intrigante propensão para abarcar simultaneamente as teorias vibratória e corpuscular, entretanto, ao longo do tempo, ele tornou-se progressivamente adepto da última. Sem objetivarem um modelo para a luz, ambos explicaram alguns fenômenos da óptica, fundamentados nas teóricas e metodológicas próprias da época, que eram distantes das atuais [61]. À época, a teoria corpuscular da luz alcançou grande aceitação em razão do prestígio acadêmico de Newton.

Este panorama histórico oferece ao estudante contato com a realidade do fazer científico e da construção dos conceitos científicos, perpassando por dois modelos para a luz, vibratório e corpuscular.

A prevalência do modelo ondulatório da luz se deu com as teorias de interferência de raios de luz, de Thomas Young (1773–1829), e da difração da luz, de Augustin Fresnel (1788–1827); ambas matematicamente fundamentadas e, à época, apoiadas em uma já consistente teoria ondulatória. A teoria eletromagnética, de James Clerk Maxwell (1831–1879), que abarca a luz

como uma onda eletromagnética, corroborou o modelo ondulatório.

Estas explanações e suas conseqüentes discussões são acompanhadas pela exibição de imagens dos fenômenos de interferência e difração e de animações gráficas representando uma onda eletromagnética, conforme apresentado na Figura 2. Nesta figura estão exibidos os oito primeiros slides da aula.

Segue-se a exibição de um vídeo mostrando a interferência de luz LASER por um orifício circular feito em um anteparo opaco, oferecendo uma experimentação acessível e de fácil reprodução, conforme mostrado na Figura 3. Este experimento, além de exibir a difração da luz, objetiva também preparar os estudantes para um experimento de difração de elétrons que será apresentado na segunda aula.

Após esta introdução, segue-se a apresentação do interferômetro de Mach-Zehnder real e virtual, conforme visto nos três últimos quadros da Figura 2, ainda no contexto do fenômeno de interferência da luz, mas objetivando, principalmente, seu uso posterior em modo virtual e quântico. A simulação computacional utilizada é de livre acesso e é denominada Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder, tendo sido desenvolvida na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil (<http://www.lief.if.ufrgs.br/~cjhc/vmzi.html>, acessado em 01/11/2022).

A história das ciências oferece indícios aos estudantes do conceito de dualidade onda partícula, bem como pode suscitar a discussão dos conceitos clássicos, de onda e de partícula.

Dois experimentos no âmbito da mecânica quântica, efeitos fotoelétrico e Compton, oferecem a possibilidade de elaboração do conceito de dualidade, podendo fazer nascer na mente dos estudantes o conflito cognitivo.

Para tanto é exibido um filme de curta duração mostrando um experimento do efeito fotoelétrico, no qual uma bexiga eletrizada por atrito é utilizada para eletrizar com cargas negativas um eletroscópio de folhas que possui uma lâmina de zinco apoiada sobre sua cabeça. Quando a lâmina de zinco é iluminada por luz ultravioleta, o eletroscópio se descarrega, revelando uma faceta efeito fotoelétrico. A não observação do descarregamento quando o mesmo procedimento é aplicado ao eletroscópio eletrizado com cargas positivas sugere trata-se de um efeito associado à interação de elétrons com a luz ultravioleta. Mostra-se que a luz visível ou infravermelho não provoca o efeito.

Uma simulação computacional é executada promovendo a experimentação virtual que propicia a participação ativa dos estudantes na medida em que os parâmetros experimentais podem ser alterados como eles sugerirem. Os resultados são discutidos à medida que a simulação é executada, e correlacionados com os resultados dos experimentos reais. A teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico é apresentada juntamente com o conceito de fóton, como parte da organização do conhecimento. As Figuras 4 e 5 exibem ambas situações.

Dualidade Onda-Partícula

Aula 01

Newton e Huygens

• No século XVII o estudo da óptica foi pautado pelas teorias de Isaac Newton (1642-1727-Inglaterra) e de Christian Huygens (1629-1695- Holanda) que defenderam teorias distintas com respeito as propriedades da luz. Ambas conseguiram descrever os fenômenos de reflexão e da refração para a luz.

• Seguidores de Newton defendiam 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”.[2]

• Seguidores de Huygens defendiam um caráter **ONDULATORIO** para a luz:
 “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” (um pulso luminoso gera pulsos secundários à medida que ele se propaga), ele conseguiu derivar o comportamento dos raios de luz nestes dois fenômenos, explicando-os de maneira coerente do ponto de vista geométrico”.[2]

[2] Moura, B.A., Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 111-141, 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 enxergar 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 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?

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 a era do eletromagnetismo.

• 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, 15 anos após a teoria de Maxwell.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

Interferômetro de Mach-Zehnder

Interferência da luz no Interferômetro de Mach-Zehnder

• Análogo a Dupla Fenda:

Diferença de caminho óptico

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

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

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

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

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

Figura 2: Sequência de slides que compõem o início da aula. Devem ser visualizados da esquerda para a direita e de cima para baixo. Fonte: elaborado pelos autores (2021).

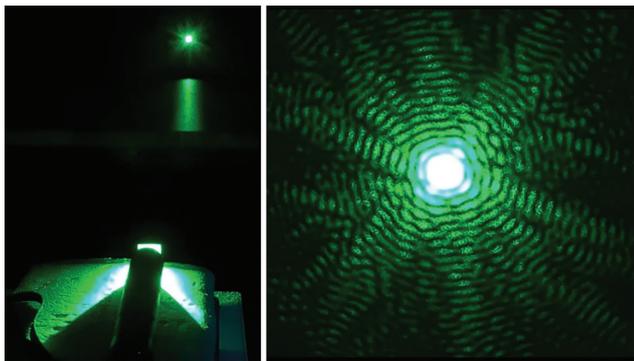


Figura 3: Imagens do arranjo experimental e da figura de interferência resultante da difração da luz LASER por um orifício circular. Fonte: elaborado pelos autores (2021).

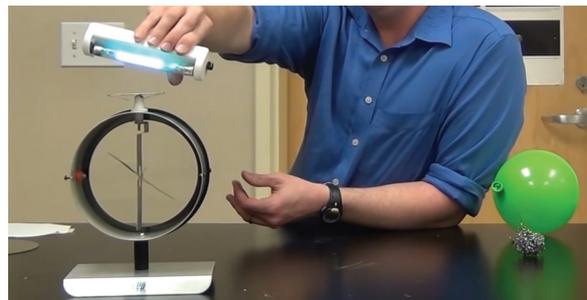


Figura 4: Imagem do experimento de efeito fotoelétrico exibido em vídeo de curta duração. É possível ver o eletroscópio eletrizado com a folha de zinco situada no topo sendo exposta a luz ultravioleta. (<https://www.youtube.com/watch?v=z-3XaXCvjZw>).

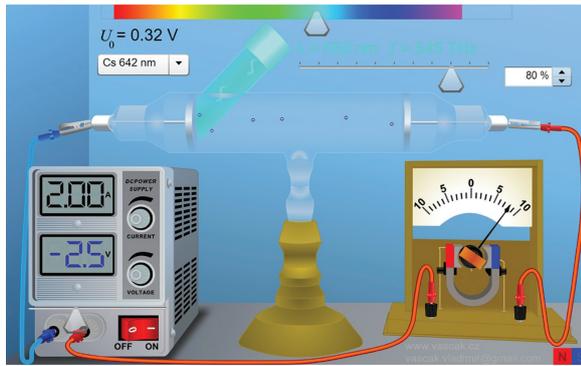


Figura 5: Imagem da simulação computacional interativa do efeito fotoelétrico exibida operada de modo a revelar as diferentes facetas do efeito, reproduzida de: https://www.vacak.cz/data/android/physicatschool/template.php?s=opt_fotoefekt&l=pt.

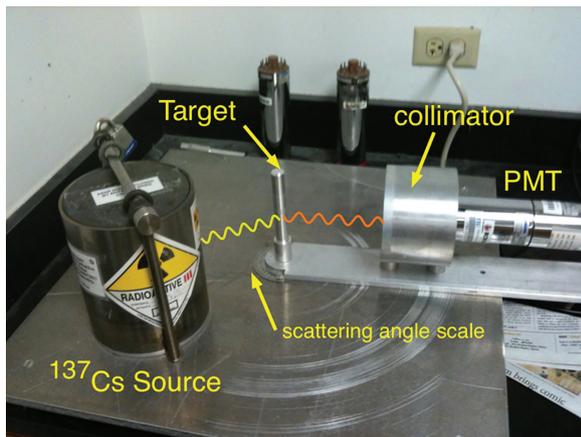


Figura 6: Imagem de arranjo experimental capaz de exibir o efeito Compton. Fonte: https://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern_lab_manual3/Compton_Scattering.html, acessado em 01/11/2022.

O efeito Compton é apresentado por meio da exibição um desenho esquemático e da imagem de um arranjo experimental real, contendo a fonte de radiação, o alvo cristalino e o goniômetro sobre o qual está montado o detector, Figura 6.

Uma simulação computacional permite observar o efeito Compton virtualmente, Figura 7. Os resultados são explicados aos estudantes como devidos ao espalhamento elástico dos fótons incidentes pelos elétrons do material alvo, caracterizando um comportamento corpuscular do fóton.

A primeira aula, que envolve a problematização, o reconhecimento de situação conflituosa, é encerrada fomentando-se a discussão sobre a natureza da luz, considerando que os experimentos revelaram aspectos clássicos de onda e de partícula, suscitando um conflito com respeito a natureza do fóton. A discussão em torno do conceito de dualidade onda partícula é estimulada e o princípio da complementaridade é apresentado e

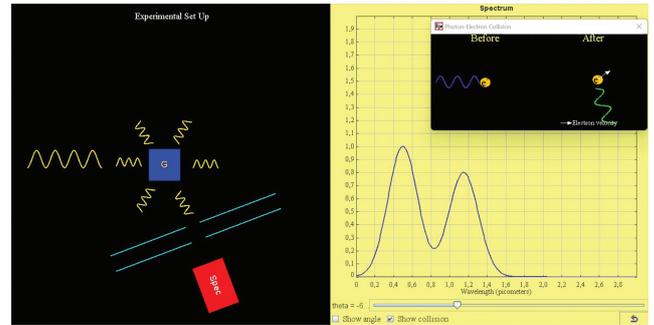


Figura 7: Simulação computacional para o efeito Compton. Fonte: <https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531> Acessado em 01/11/2022.

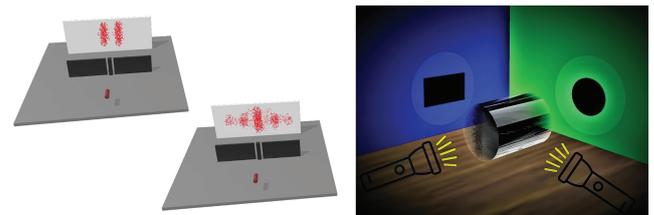


Figura 8: Imagens que evocam a natureza dual do fóton. Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

discutido. O desequilíbrio cognitivo pode conduzir a uma situação de desconforto intelectual, de conflito cognitivo, que instiga a busca por entendimento que reconduza ao equilíbrio. O conhecimento científico emerge como uma solução plausível e inteligível para o problema apresentado [48].

O segundo encontro de cinquenta minutos com os estudantes objetiva elaborar uma solução consistente para a situação de conflito cognitivo e começa com a exibição de imagens que evocam a natureza dual do fóton, Figura 8. O professor fomenta uma dinâmica discursiva e colaborativa em torno da situação conflituosa com que foi finalizada os primeiros cinquenta minutos, iniciando a etapa de organização do conhecimento.

Segue-se a exibição de vídeo de curta duração da evolução de simulações computacionais com o Interferômetro de Mach-Zehnder na situação de feixes de fótons de baixíssima intensidade.

Observa-se a formação granular das imagens, que resultam em um borrão, quando o segundo semi espelho não está presente, e na figura de interferência, com o segundo semi espelho presente, Figura 9.

O ajuste dos parâmetros da simulação computacional do Interferômetro virtual permite a formação de ambas imagens simultaneamente, borrão e interferência como visto na Figura 10. Os estudantes são estimulados a interpretar este resultado considerando a complementaridade como enunciada por Bohr ou na perspectiva dos fenômenos intermediários (introduzida pelo professor).

A exibição de um vídeo de curta duração, mostrando a difração de elétrons, evidencia o caráter ondulatório

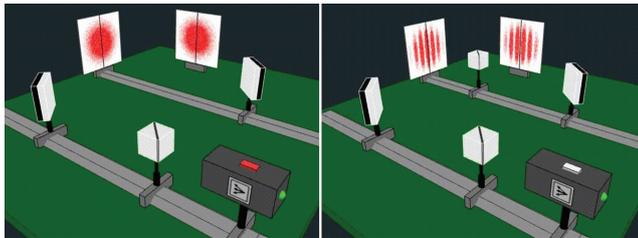


Figura 9: Imagens de vídeos de curta duração exibindo experimentos com o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder operando na com LASER emitindo de feixes luz de baixíssima intensidade. A imagem do borrão é associada ao comportamento de partícula enquanto a figura de interferência é associada à ondas. Fonte: Realizado pelos autores (2021).

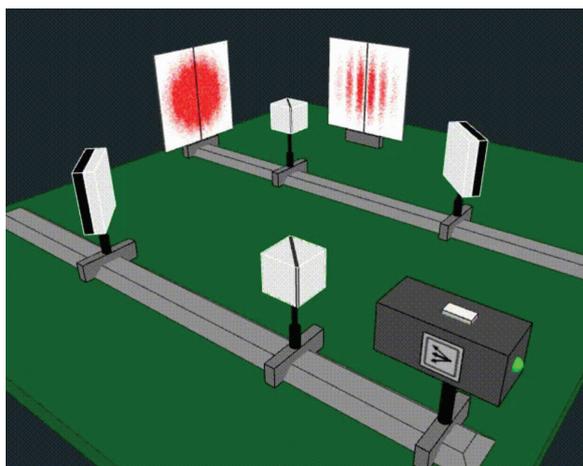


Figura 10: Imagens de vídeo de curta duração exibindo experimento com o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder operando com LASER emitindo feixes de luz de baixíssima intensidade. As imagens formadas e projetadas nas telas são conseguidas desbalanceado os divisores de feixes (alterando-se os coeficientes de reflexão destes) e revelam simultaneamente, em telas diferentes, comportamento corpuscular e ondulatório. Apesar do experimento estar montado sobre uma mesma bancada os resultados experimentais são distintos, podendo ser interpretado como dois experimentos ou como resultado de fenômeno intermediário. Fonte: Realizado pelos autores (2021).

destes. Em uma ampola de vidro, cujo interior foi previamente evacuado, um feixe de elétrons atravessa uma lâmina de grafite. Os elétrons, ao incidirem em uma parede da ampola pintada com tinta fosforescente, criam imagens luminosas similares às imagens de interferência da luz anteriormente exibidas, Figura 11. Este resultado aguça e alarga o conceito em construção, de objeto quântico, na medida que elétrons, objetos tidos como partículas, revelam comportamento ondulatório.

Em seguida são apresentadas imagens dos resultados de experimentos de interferência de feixes de fótons e elétrons de baixíssima intensidade, Figura 12.

As imagens resultantes da incidência de muitos elétrons e fótons revelam um padrão de interferência típico do comportamento ondulatório. Estes objetos quânticos



Figura 11: Experimento de difração de elétrons. Fonte: realizado pelos autores (2021).

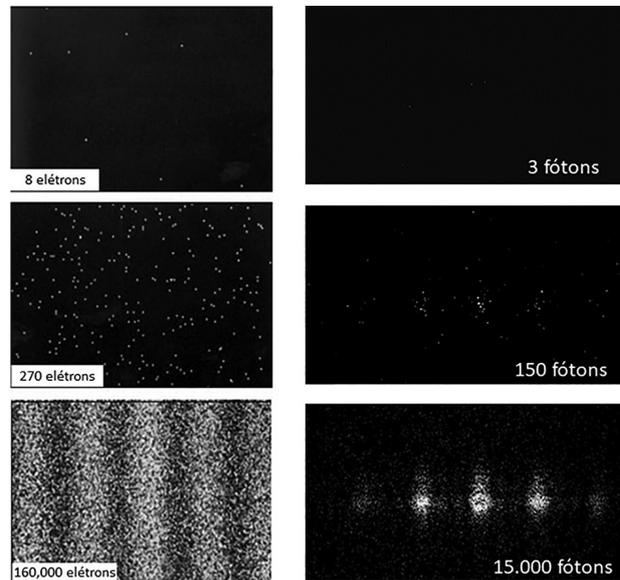


Figura 12: Imagens de padrões de interferência devido à incidência de um feixe de baixíssima intensidade de: esquerda – elétrons; direita – fótons. Evidencia-se o número de fótons e elétrons únicos com o tempo de detecção. Fonte: Esquerda: (TONOMURA et al., 1989); adaptado de: https://www.hitachi.com/rd/research/materials/quantum/doubleslit/pop2_w.html. Direita: obtidas por Robert Austin e Lyman Page, na Princeton University, disponíveis em: Pesic (2002).

não podem ser classificados como ondas clássicas, visto que um único elétron ou um único fóton não gera uma figura de interferência completa, mesmo que tênue, 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.

Discussão é estimulada pelo professor encaminhando no sentido de organizar o conhecimento com respeito ao objeto quântico.

A etapa de aplicação do conhecimento ocorre com a exibição de um vídeo de um “análogo mecânico da dualidade onda-partícula” conforme mostra a Figura 13. O vídeo mostra gotículas de glicerina, geradas manualmente, saltando sobre a superfície de glicerina líquida,

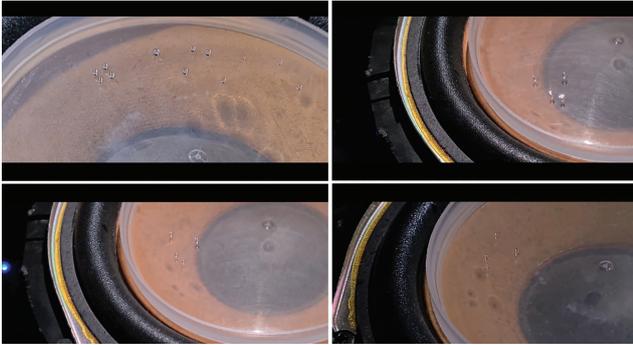


Figura 13: Imagens de experimento “análogo clássico da dualidade onda-partícula”. Gotículas de glicerina, manualmente criadas com a ponta de um palito, saltam sem coalescer sobre a superfície de um recipiente contendo glicerina. O recipiente se apoia sobre um alto-falante vibrando na frequência de 60 Hz. Fonte: Realizado pelo segundo autor (2021).

contida em recipiente plástico apoiado sobre o cone de um alto-falante que vibra a uma frequência de 60 Hz. Quando as gotículas tocam a superfície da glicerina, geram pequenas ondas. Os estudantes são instados a discutir e a oferecer uma interpretação para o fenômeno observado.

4.1. O teste piloto

Esta sequência didática foi aplicada em turmas de graduação e de pós-graduação em ensino de Física, no Brasil, no contexto da pandemia causada pelo COVID-19, portanto em situação de ensino remoto com a utilização de plataforma de videoconferência. Os resultados, fundamentado na observação do professor das referidas turmas, foram percebidos como animadores, entretanto, a verificação da correção desta perspectiva preliminar demanda uma adequada testagem.

Para a testagem futura elaboramos uma metodologia de pesquisa que considera avaliar os quatro construtos associados à dinâmica de evolução do conflito cognitivo, anteriormente apontados: reconhecimento de situação conflituosa, interesse, ansiedade e reavaliação cognitiva [55, 58].

O teste piloto foi projetado, envolvendo os conteúdos das duas aulas de 50 minutos durante as quais a sequência poderá ser aplicada como descrito na seção anterior, e avaliada, tanto por meio de respostas a um questionário eletrônico quanto por observações de dois ou mais professores. Estes últimos atuarão como observadores participantes e usarão suas percepções e interação com os alunos para inferir informações com respeito aos construtos interesse e ansiedade.

O questionário eletrônico, composto por questões objetivas abordando os conteúdos apresentados na sequência didática, deverá ser respondido anonimamente. Este questionário objetiva examinar se os respondentes entenderam as perguntas como pretendido e se estas permitem identificar os construtos de reconhecimento

de situação conflituosa e de reavaliação cognitiva. As perguntas, intencionalmente redundantes, foram elaboradas no sentido de revelar o estabelecimento do conflito cognitivo, decorrente da inconsistência lógica associada à dualidade onda-partícula, e sua superação por meio da construção conceitual do objeto quântico. Seguem exemplos de ambos casos.

A questão 2 (Quadro 1), voltada para a detecção do reconhecimento de situação conflituosa, e mais três questões de mesmo intento, redundantes, compõem o questionário abordando o conteúdo da primeira aula.

Quadro 1: Questão 2 do questionário.

- 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.

Marcar o item não verdadeiro, (a), poderá ser uma evidência de reconhecimento de situação conflituosa, visto que os itens aceitos como verdadeiros expressão a inconsistência lógica.

De maneira similar, a questão 6 (Quadro 2) e mais quatro perguntas presentes no questionário objetivam detectar a reavaliação cognitiva, abordando o conteúdo das duas aulas. Discernir com clareza que o item verdadeiro é o (c), será interpretado como evidência de construção conceitual do objeto quântico.

Quadro 2: Questão 6 do questionário.

- 6 – A expressão “natureza dual da luz” quer dizer que a luz:
- (a) é uma onda e uma partícula clássica, ao mesmo tempo.
 - (b) ora é uma onda, ora é uma partícula clássica.
 - (c) pode apresentar características de onda ou de partícula clássica.

5. Conclusões

Desenvolvemos uma sequência didática projetada com o fim de construir na mente do estudante o conceito de objeto quântico, por meio do estabelecimento e resolução do conflito cognitivo decorrente da inconsistência lógica associada ao uso da expressão “dualidade onda-partícula”.

A sequência didática elaborada em linguagem multimídia foi desenvolvida em torno de experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais. O ensino por investigação foi empregado, estimulando os alunos a observar e analisar de forma investigativa os fenômenos e fatos apresentados. Utiliza-se de aspectos conceituais,

históricos, epistemológicos e resultados experimentais para ensinar Física Quântica, mobilizando saberes para construir nos estudantes a noção de objeto quântico.

A sequência didática foi aplicada, durante a pandemia causada pelo COVID-19, tendo alcançando resultados percebidos como animadores; entretanto, a obtenção de resultados mais robustos demanda uma testagem consistente.

Um teste piloto para aplicação futura foi projetado, considerando os quatro construtos associados à dinâmica de evolução do conflito cognitivo, quais sejam: reconhecimento de situação conflituosa, interesse, ansiedade e reavaliação cognitiva. O teste envolve o uso de dois instrumentos de avaliação: um questionário eletrônico, que permite avaliar os construtos de reconhecimento de situação conflituosa e de reavaliação cognitiva, e a percepção de pesquisadores participantes, que avaliam os construtos interesse e ansiedade.

Em última análise, esperamos promover acertos e melhorias na sequência didática tendo como base os resultados do teste piloto, bem como na própria metodologia de pesquisa. Esperamos ainda obter um número de respondentes que permita caracterizar a validade e a fidedignidade do instrumento.

É nosso intento avançar na investigação da abordagem de outros tópicos de Física Quântica com vistas a oferecer aos professores de física recursos didáticos eficazes para o ensino introdutório da Física Quântica.

Agradecimentos

O autor R.F. Pimentel agradece o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001. O autor C.E. Laburú agradece o apoio do CNPq, Brasil (processo 301582/2019-0).

Referências

- [1] M. Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics* (Tomash Publishers, Los Angeles, 1989).
- [2] E. Scheibe, *The logical analysis of quantum mechanics* (Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford, 1973).
- [3] O. Pessoa Jr., *Physics Essays* **13**, 50 (2000).
- [4] R.P. Feynman, R. Leighton e M. Sands, *Lições de Física de Feynman* (Bookman, Porto Alegre, 2008), v. 3.
- [5] B.G. Levich, I.A. Vdovin e V.A. Miamlin, *Física Teórica – LEVICH: Física Cuántica* (Editorial Reverté, Barcelona, 1976).
- [6] H.C. Ohanian, *Modern Physics* (Prentice Hall, New Jersey, 1929), 2 ed.
- [7] A. Eddington, *The nature of the physical world* (The Gifford Lectures, Edinburgh, 1927).
- [8] M.A. Bunge, *The British Journal for Philosophy of Science* **18**, 265 (1967).
- [9] M.A. Bunge, *Foundations of physics* (Springer-Verlag Publishing, Nova York, 1967).
- [10] J.M. Lévy-Leblond, *Physica B* **151**, 314 (1988).
- [11] J.M. Lévy-Leblond, *Nature* **334**, 19 (1988).
- [12] G. Pospiech, *Physics Education* **34**, 311 (1999).
- [13] BRASIL, *Parâmetros Curriculares Nacionais: Parte III* (Ministério da Educação, Brasília, 1999).
- [14] BRASIL, *Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio* (Ministério da Educação, Brasília, 2018).
- [15] M.A. Monteiro, R. Nardi e J.B. Bastos Filho, *Ciência & Educação* **15**, 557 (2009).
- [16] H.K.E. Staderemann, E.V.D. Berg e M.J. Goedhart, *Physical Review Physics Education Research* **15**, 010130 (2019).
- [17] T. Lobato e I. M. Greca, *Ciência & Educação* **11**, 119 (2005).
- [18] P. Lautesse, A.V. Valls, F. Ferlin, J. Héraud e D.H. Chabot, *Sci. Educ.* **24**, 937 (2015).
- [19] MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA JEUNESSE. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale Spécial n° 8*, 13 de octobre de 2011. Paris, 2011. Disponível em: www.education.gouv.fr.
- [20] W.K. Wootters e W.H. Zurek, *Physical Review D* **19**, 473 (1979).
- [21] G. Jaeger, A. Shimony e L. Vaidman, *Physical Review A* **51**, 54 (1995).
- [22] T.H. Yoon e M. Cho, *Science Advances* **7**, eabi9268 (2021).
- [23] P.R. Dieguez, J.R. Guimarães, J.P.S. Peterson, R.M. Angelo e R.M. Serraet, *Communications Physics* **5**, 1 (2022).
- [24] Y.W. Cheong e J. Song, *Science & Education* **23**, 1011 (2014).
- [25] M. Cini, em: *Theoretical Concepts of Quantum Mechanics*, editado por M.R. Pahlavani (IntechOpen, London, 2012).
- [26] I.M. Greca e O. Freire Jr., *Science & Education* **12**, 541 (2003).
- [27] L.V. Rodriguez, J.T.V.D. Veen, A. Anjewierden, E.V.D. Berg e T. Jong, *Phys. Educ.* **55**, 065026 (2020).
- [28] G. Pospiech, *Sci. Educ.* **12**, 559 (2003).
- [29] A.F. Hoernig, N.T. Massoni e D. Hadjimichef, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210044 (2021).
- [30] J.M. Lévy-Leblond e F. Balibar, *Quantics: rudiments of quantum physics* (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1990).
- [31] C. Schiller, *The adventure of physics: The quantum of change* (Motion Mountain, California, 2021), v. 4, 31 ed.
- [32] V. Prévost e B. Richoux, *Physique & Chimie* (Editions Nathan, Paris, 2012).
- [33] I.D. Johnston, K. Crawford e P.R. Fletcher, *International Journal of Science Education* **20**, 427 (1998).
- [34] P.F.L. Souza, H.F.B.N. Bastos, E.B. Costa e R.A. Nogueira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 2402 (2010).
- [35] W. Heisenberg, *Physics and philosophy* (Happer & Brothers Publishers, New York, 1958).
- [36] G. Birkhoff e J.V. Neumann, *The Annals of Mathematics* **37**, 823 (1936).
- [37] C.F.V. Weizsäcker, T. Görnitz e H. Lyre, *The Structure of Physics* (Springer Publisher, Dordrecht, 2006).

- [38] M. Jammer, *The Philosophy Of Quantum Mechanics: The Interpretations Of Quantum Mechanics in Historical Perspective* (John Wiley & Sons, New York, 1974).
- [39] J.S. Bruner, *The Process of Education* (Harvard University Press, Cambridge, 1999), 39 ed.
- [40] J. Piaget, *Seis Estudos de Psicologia* (Forense Universitária Ltda, Rio de Janeiro, 2010), 24 ed.
- [41] J. Piaget e B. Inhelder, *A Psicologia da Criança* (DIFEL Divisão Editorial S.A., São Paulo, 1982), 7 ed.
- [42] J. Piaget, *A formação do símbolo na criança: imitação, jogo e sonho, imagem e representação* (LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2023), 4 ed.
- [43] J. Piaget, *A linguagem e o pensamento da criança* (Livraria Martins Fontes Editora, São Paulo, 1993), 4 ed.
- [44] L.S. Vygotsky, A.R. Luria e A.N. Leontiev, *Linguagem, desenvolvimento e aprendizagem* (Ícone Editora, São Paulo, 1988).
- [45] R.S. Carvalho e M.S. Carvalho, *The Journal of Engineering and Exact Sciences* **4**, 202 (2018).
- [46] I.J.C. Paulo e M.A. Moreira, *Ciência & Educação* **17**, 421 (2011).
- [47] M.A. Moreira, *Teorias de aprendizagem* (Editora Pedagógica e Universitária Ltda, São Paulo, 1999), 2 ed.
- [48] L.S. Vygotsky, *A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores* (Martins Fontes, São Paulo, 2007), 7 ed.
- [49] G. Bachelard, *A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento* (Contraponto Editora, Rio de Janeiro, 1996).
- [50] R.F. Pimentel, *Uma abordagem didática alternativa ao ensino conceitual da dualidade onda-partícula no ensino médio*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (2022).
- [51] A.F. Zômpero e C.E. Laburú. *Rev. Ensaio* **13**, 3 (2011).
- [52] D. Delizoicov e J.A. Angotti, *Metodologias do Ensino de Ciências* (Cortez Editora, São Paulo, 1994), 2 ed.
- [53] J. Piaget, *La Equilibracion de las Estructuras Cognitivas – Problema Central del Desarrollo* (Siglo Veintiuno Editores, Ciudad de México, 1998), 5 ed.
- [54] A.M.P. Carvalho, R.S. Castro, C.E. Laburu e E.F. Mortimer, *Cadernos de Pesquisa* **82**, 85 (1993).
- [55] G. Lee, J. Kwon, S. Park, J. Kim, H. Kwon e H. Park, *Journal of Research in Science Teaching* **40**, 585 (2003).
- [56] C.E. Laburú, *Investigações em Ensino de Ciências* **8**, 31 (2003).
- [57] C.E. Laburú e S. M. Arruda, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 259 (1998).
- [58] S. Kang, L.C. Scharmann, T. Taehee Noh e H. Koh, *International Journal of Science Education* **27**, 1037 (2005).
- [59] M.A. Moreira e I.M. Greca, *Ciência e Educação* **9**, 301 (2003).
- [60] J. Dewey, *Como Pensamos – Como se relaciona o pensamento reflexivo com o processo educativo: uma reexposição* (Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1979).
- [61] B.A. Moura, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **33**, 111 (2016).