

Interpretações do Fóton em Livros Didáticos do Ensino Superior

Interpretations of the Photon in Undergraduate Textbooks

**Nathan Willig Lima, Estevão Antunes Junior, Fernanda Ostermann,
Claudio José de Holanda Cavalcanti,**
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo

Apresentamos uma análise de três livros didáticos de introdução à Física Quântica utilizados no Ensino Superior, com o objetivo de avaliar como o conceito de fóton é construído. Partimos de quatro grupos de interpretações da Física Quântica, entendidas aqui como vozes bakhtinianas, ou seja, como perspectivas possíveis acerca da natureza do fóton. Nossos resultados mostram que todos os livros adotam diferentes interpretações, muitas vezes, contraditórias entre si. Dois livros veiculam, principalmente, uma voz que atribui ontologia corpuscular ao fóton e o apresentam como uma partícula clássica. Nesses casos, essa voz é silenciada em favor da visão dualista-realista somente para interpretar fenômenos relativos à dualidade onda-partícula. Um livro apresenta, majoritariamente, uma voz dualista. Nenhum livro menciona a existência de diferentes interpretações da Física Quântica ao longo das discussões, o que indica uma privilegiação do formalismo matemático em detrimento de uma compreensão bem articulada da teoria.

Palavras chave: Física Quântica, Livro Didático, Bakhtin

Abstract

We present an analysis of three introductory Quantum Physics textbooks commonly used in undergraduate courses. Our goal was to evaluate how the authors develop the concept of photon. We classified Quantum Physics interpretations in four groups, and we interpreted them as bakhtinian voices, i.e, as perspectives about nature of photon. Our results show that all textbooks adopt different interpretations, and even contradictory ones. Two books transmit mostly a voice which assigns a corpuscular ontology to the photon showing it as a classical particle. In these cases, this voice is silenced to reinforce a dualist-realist interpretation only in order to interpret phenomena related to wave-particle duality. One of the books transmits mostly the dualist interpretation. None of the books mentions the existence of different Quantum Physics interpretations in their discussions, which implies a privilege of mathematical formalism over a well articulated theoretical comprehension.

Key words: Quantum Physics, Textbook, Bakhtin

Introdução

O ensino de Física Quântica (FQ) desempenha um papel importante na formação de físicos pesquisadores e de professores de Física por diferentes motivos como ser um símbolo cultural da Física e estar mais próximo da Física usada nos laboratórios atualmente do que as disciplinas básicas. (JOHANSSON et al., 2016).

Um dos desafios para a compreensão da FQ, entretanto, reside no distanciamento entre o formalismo matemático e a sua interpretação, essência de sua articulação fenomenológica (JAMMER, 1974). Além disso, deve-se levar em consideração que a FQ permite variadas interpretações conceitualmente consistentes (BETZ, 2009). Em cada interpretação, os diferentes constructos da teoria podem ganhar novos sentidos (mudando inclusive de *status* ontológico e epistemológico). Isso implica que, ao reconhecer um conceito, como o de fóton, presente em um enunciado, seu sentido só fica determinado quando se está claro com qual interpretação se está lidando. Em outras palavras, pode-se dizer que o conceito de fóton pode adquirir caráter polissêmico frente à multiplicidade de interpretações da FQ.

Esse problema de linguagem traz consequências diretas para o ensino de FQ. O aluno tem contato com a FQ pelos enunciados dos professores, dos livros didáticos ou dos colegas. Assim, ele sempre é apresentado ao formalismo matemático associado a alguma interpretação, mesmo que implícita e, posteriormente, ele mesmo terá que veicular uma interpretação para falar sobre os resultados obtidos com o formalismo. Montenegro e Pessoa Jr (2002) fizeram um estudo sobre as concepções de alunos em FQ e mostram que os alunos usam diferentes interpretações (muitas vezes contraditórias entre si) para resolver problemas distintos. Não existe, entretanto, nenhum estudo de como essas interpretações aparecem, implícita ou explicitamente, em livros didáticos de introdução à FQ.

Nesse trabalho, foi realizada uma análise fundamentada na Filosofia da Linguagem do Círculo de Bakhtin dos enunciados de três livros didáticos utilizados no ensino superior (EISBERG; RESNICK, 1994; TIPLER; LLEWELLYN, 2008; HALLIDAY; RESNICK, 2010) com o objetivo de avaliar como que o sentido dado ao conceito de fóton é construído a partir da veiculação das principais interpretações da FQ. Com esse objetivo em mente, o trabalho tenta responder as seguintes perguntas: como o conceito de fóton é apresentado nos livros didáticos? Qual interpretação da FQ está associada a essa visão? Existe mudança de interpretação ao longo do mesmo enunciado? Isso desencadeia alguma contradição? Os livros explicitam a discussão sobre as interpretações? O que isso pode indicar sobre as bases epistemológicas do ensino de FQ?

Referencial Teórico-Methodológico: A Filosofia da Linguagem do Círculo de Bakhtin

Esse trabalho apresenta uma análise qualitativa fundamentada na Filosofia da Linguagem do Círculo de Bakhtin, que se caracteriza por analisar os processos de comunicação discursiva em sua ocorrência concreta, isto é, no evento social da interação verbal; e, não, engessados em uma forma determinada pelas regras gramaticais: “Ela (a linguagem) é um produto da vida social, a qual não é fixa nem petrificada: a linguagem encontra-se em um perpétuo devir e seu desenvolvimento segue a evolução da vida social” (VOLOSHINOV, 1981, p.1). Essa visão da linguagem faz a teoria bakhtiniana contrastar com as diferentes teorias linguísticas que lhe eram contemporâneas, nas quais a linguagem era vista ou como fruto da expressão individual

livre ou como materialização do sistema abstrato da língua (BAKHTIN, 2006).

Assim, um enunciado está sempre em diálogo com enunciados anteriores, característica denominada de responsividade (SOUZA; REZENDE; OSTERMANN, 2016) e que é responsável, em parte, pela expressão do próprio discurso bem como pelos recursos linguísticos utilizados. De forma mais explícita, quando fazemos uma citação direta, percebemos a inserção de enunciados alheios em nosso próprio enunciado; mas, de forma mais sutil, qualquer enunciado é permeado por uma série de palavras e tonalidade dialógicas de outros autores, e, por isso, o enunciado é representado como a confluência de ecos distantes que reverberam no discurso do autor. Bakhtin (2016) descreve esse fenômeno em termos de veiculação de vozes, isto é, todo enunciado veicula vozes de enunciados precedentes. Devemos ter em mente que voz é a personalidade falante ou consciência falante (WERTSCH, 1993).

Partindo dessa perspectiva, é possível se fazer uma análise bakhtiniana do discurso. Para isso, deve-se, primeiramente, fazer o reconhecimento da unidade de análise. Diferentemente de análises linguísticas tradicionais em que a unidade de análise corresponde a um elemento gramatical (palavra, sentença ou parágrafo). O elemento de análise para a Filosofia da Linguagem de Bakhtin é o enunciado, entendido como uma unidade da comunicação verbal (BAKHTIN, 2016). Assim, o enunciado pode consistir de uma simples interjeição até mesmo de um romance inteiro. O reconhecimento dos limites do enunciado se dá pela identificação de três elementos: a alternância de sujeitos (um sujeito termina seu enunciado para outro começar – o que é mais nítido em um diálogo oral), a conclusibilidade (que envolve a possibilidade de dar uma resposta ao enunciado, a exauribilidade semântica objetual do tema do enunciado e o uso de tonalidades típicas de encerramento) e a expressividade (tom valorativo do enunciado).

Uma vez realizado o reconhecimento dos limites do enunciado, deve-se ter um conhecimento sobre o contexto extraverbal no qual ele foi produzido, pois é esse que dá significado ao enunciado: a mesma interjeição em contextos diferentes pode adquirir diferentes significados. Esse contexto pode ser visto em três dimensões: uma dimensão mais imediata (*o tête à tête*), a dimensão do período histórico em que se encontra a produção do enunciado, e uma dimensão ainda mais ampla, o grande tempo, que se confunde com o próprio fluxo de comunicação verbal da sociedade. Dependendo do objetivo da análise a ser feita, diferentes dimensões do contexto extraverbal devem ser levadas em consideração.

Interpretações do Fóton

À luz da Filosofia da Linguagem do Círculo de Bakhtin, podemos entender um enunciado sobre FQ como uma construção social, um elo na comunicação verbal da comunidade científica e escolar. Nesse sentido, o enunciado nunca expressa uma ideia totalmente nova, mas dialoga com enunciados anteriores e antecipa enunciados futuros. Entendendo as diferentes interpretações da FQ como vozes (no caso perspectivas ontológicas e epistemológicas), podemos avaliar como essas são veiculadas ou silenciadas em diferentes enunciados. Pessoa Jr. (2003) divide as interpretações da FQ em quatro grandes grupos.

a) Corpuscular: nessa interpretação, assume-se uma perspectiva epistemológica realista e a ontologia associada ao fóton é corpuscular. Essa era a visão original de Einstein (1905). Mais recentemente, essa é a visão da interpretação de *ensembles* estatísticos, que entende a função de onda como uma propriedade do *ensemble* e não da partícula isolada. Essa interpretação possui severas dificuldades para explicar fenômenos ondulatórios em arranjos monofotônicos;

b) Ondulatória: nessa interpretação, assume-se uma perspectiva epistemológica realista e a ontologia associada ao fóton é ondulatória. Essa é a visão original de Schrödinger. Assim, fenômenos localizados são explicados utilizando a noção de pacotes de onda compactos;

c) Dualista-Realista: nessa interpretação, assume-se uma perspectiva epistemológica realista e a ontologia associada ao fóton é parte corpuscular (partícula) e parte descrita por uma onda associada – assim, a ontologia associada ao fóton é dualista. Essa é a interpretação sugerida por De Broglie, por exemplo;

d) Compenhague: nessa interpretação, assume-se uma perspectiva epistemológica positivista e o que deve ser analisado é o fenômenos como um todo: fóton e arranjo experimental. Quando o fenômeno é do tipo corpuscular (ou seja, permite a determinação da trajetória do fóton), o fóton se comporta como uma partícula e quando o fenômeno é do tipo ondulatório (ou seja, não temos como determinar a trajetória do fóton) o fóton se comporta como onda implicando o aparecimento de fenômenos como interferência.

Deve-se ter em mente que essa é uma divisão generalista, que engloba um conjunto de interpretações com diferenças conceituais entre si. Além disso, ela não contempla interpretações menos usuais na comunidade científica, como as vertentes subjetivistas (JAMMER, 1974).

Método

Foi utilizado um método de análise com quatro etapas conforme o dispositivo analítico proposto por Veneu, Ferraz e Rezende (2015). A primeira etapa consiste na identificação dos enunciados usando critérios de delimitação como alternância de sujeitos, conclusibilidade e expressividade. A segunda etapa consiste em fazer uma primeira leitura dos enunciados, buscando identificar elementos típicos da filosofia bakhtiniana. A terceira etapa consiste em avaliar o contexto extraverbal, delimitando as situações que são relevantes para as questões de pesquisa. A última etapa consiste em fazer a análise propriamente, articulando os elementos teóricos, os enunciados e contexto extraverbal para responder às questões de pesquisa.

Resultados

Os resultados estão apresentados na mesma sequência das etapas do dispositivo analítico descrito na seção de método. Nas três primeiras seções, faz-se uma apresentação geral dos livros e, na última, faz-se uma discussão detalhada das vozes veiculadas em cada enunciado.

Identificação dos Enunciados

Nessa primeira etapa, buscou-se identificar os limites dos enunciados que continham afirmações sobre a natureza do fóton. Utilizando os conceitos de exauribilidade semântica objetual e tonalidade de conclusão, identificou-se cada capítulo dos livros como sendo um único enunciado. Assim, os enunciados que foram selecionados do livro de Eisberg e Resnick (1994) são “Fóton – Propriedades Corpusculares da Radiação” (Capítulo 2) e “O Postulado de De Broglie – Propriedades Ondulatórias de Partículas” (capítulo 3). Os enunciados que foram selecionados do livro de Tipler e Llewellyn (2008) são “Quantização de Carga, Luz e Energia” (capítulo 3) e “As Propriedades Ondulatórias das Partículas” (capítulo 5). O enunciado do livro de Halliday e Resnick (2010) é “Fótons e Ondas de Matéria” (capítulo 38).

Primeira Leitura

Em uma primeira leitura, identificamos que os três livros apresentam uma estrutura composicional que tenta refletir a evolução histórica da FQ, partindo dos limites dos modelos clássicos – o que é conhecido como a abordagem tradicional da FQ (GIL, SENENT, SOLBES, 1988). Nenhum dos livros privilegia uma abordagem em que os conceitos quânticos são apresentados sem menção aos modelos clássicos (FISCHLER, LICHTFELDT, 1999). O conceito de fóton é, portanto, apresentado no contexto da proposição de Einstein (1905) sobre o Efeito Fotoelétrico e do Efeito Compton. A natureza do fóton é, então, discutida novamente no contexto do Postulado de De Broglie.

Contexto Extraverbal

Entendendo que o enunciado é construído a partir do diálogo com outros enunciados, pode-se considerar como contexto extraverbal mais amplo as diferentes interpretações da FQ discutidas anteriormente. Pode-se esperar que o locutor interanime seu discurso com essas vozes, privilegiando algumas em detrimento de outras, concordando, discordando ou problematizando com essas.

Análise dos Enunciados

Nessa seção, vamos apresentar os resultados para cada livro. Eisberg e Resnick (1994) iniciam o capítulo 2 da seguinte forma: “Em cada caso obteremos evidências experimentais de que a radiação se comporta como uma partícula em sua interação com a matéria, diferente do comportamento ondulatório que apresenta quando se propaga.” (EISBERG; RESNICK, 1994, p.51)

Os autores abrem o capítulo já fazendo menção à dualidade onda-partícula, e fazem isso contrastando as propriedades ondulatórias com as corpusculares, propondo uma dicotomia entre as perspectivas ontológicas atribuída ao objeto quântico na propagação e detecção (ondulatória e corpuscular, respectivamente). Essa afirmação, primeiramente, está equivocada, visto que é possível montar arranjos experimentais em que a trajetória associada ao fóton é bem definida¹ (se propagando segundo uma ontologia corpuscular) (PESSOA JR., 2003). Assim a dualidade onda-partícula é mais consistentemente definida quando se afirma que é possível montar arranjos experimentais em que as “trajetórias” do fóton ficam definidas (comportamento corpuscular) e que não resultam em formação de padrão de interferência (comportamento ondulatório), ou arranjos experimentais em que as “trajetórias” não são definidas e que resultam em fenômenos ondulatórios como a formação de padrões de interferência.

Além desse equívoco conceitual, a afirmação dos locutores traz uma complicação para o entendimento da sequência do enunciado. A próxima seção aborda a visão de Einstein (1905) que defende que os fótons não só são absorvidos como partículas, mas que eles são, de fato, partículas e se propagam como tal (visão oposta da que os autores apresentaram): “Einstein propôs que a energia radiante está quantizada em pacotes concentrados, que mais tarde vieram a ser chamados de fótons.” (EISBERG e RESNICK, 1994, p.54)

Feita a apresentação do Efeito Fotoelétrico, os autores passam a veicular a interpretação corpuscular do fóton: “Ao tratar a radiação de cavidade de corpo negro com o modelo Einstein,

¹ Ao falar de trajetórias de fótons em interferômetros de duas vias, como o de Mach-Zehnder, não estamos de fato atribuindo uma *trajetória clássica* ao fóton. Referimo-nos à definição de trajetória como definida por Kwiat (2009), que associa essa “trajetória” no interior de um Interferômetro de Mach-Zehnder à “existência de qualquer informação de caminho, que rotula qual caminho o fóton tomou” (Kwiat, 2009, p.429)

lidamos com um gás de fótons, pois a energia radiante está localizada no espaço em pacotes em vez de estar espalhada em ondas estacionárias.” (EISBERG e RESNICK, 1994, p.59)

Isso é reforçado ao tratar do Efeito Compton: “A natureza corpuscular da radiação foi dramaticamente confirmada em 1923 pelas experiências de Compton.” (EISBERG, RESNICK, 1994, p.59) Nessa citação, os autores privilegiam, mais uma vez, a interpretação que atribui ontologia corpuscular ao fóton. Além de essa interpretação contrariar a interpretação dual apresentada pelos autores no início do capítulo, ela é defendida com um escolha lexical que veicula uma voz alinhada a uma epistemologia empirista-indutivista: “dramaticamente confirmada”. É provável que, um aluno estudando FQ pela primeira vez, construa a noção clara de que o fóton é uma partícula. Apesar disso, os autores retomam a noção dual: “A ideia de que a radiação não é um fenômeno puramente ondulatório nem meramente um feixe de partículas deve ser, portanto, levada a sério.” (EISBERG e RESNICK, 1994, p.66)

No capítulo 3, ao falar de De Broglie, eles retomam a discussão da natureza dual do fóton e, para explicar isso, passam a veicular a interpretação dualista-realista: “Assim como um fóton tem associada 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 e RESNICK, 1994, p.87)

Deve-se notar, entretanto, que essa visão dualista-realista está equivocada, visto que, nessa perspectiva, a onda associada ao fóton é uma onda de probabilidade e não uma onda luminosa. E, ao veicular a interpretação de Copenhague, eles retomam a visão dual equivocada do início do capítulo:

É muito importante notar, no entanto, que em qualquer medida feita apenas se aplica um modelo – os dois modelos não são usados sob as mesmas circunstâncias. Quando o ente é detectado por algum tipo de interação, ele atua como uma partícula no sentido que é localizado; quando está se movendo age como uma onda, no sentido que se observam fenômenos de interferências, e obviamente, uma onda tem extensão e não é localizada. (EISBERG e RESNICK, 1994, p.95)

Após mudar de interpretação (de corpuscular para a interpretação de Copenhague) sem discutir explicitamente esse salto, os autores tentam reconciliar a visão corpuscular e ondulatória trazendo uma interpretação probabilística que tangencia a interpretação dos *ensembles estatísticos* (uma interpretação cuja ontologia é corpuscular) e afirmam, explicitamente, que o modelo do fóton é corpuscular.

A ligação entre os modelos corpuscular e o ondulatório é feita por meio de uma interpretação probabilística da dualidade onda-partícula. No caso da radiação, foi Einstein que unificou as teorias ondulatórias e corpuscular.(...) No modelo do fóton, corpuscular, a intensidade da radiação é escrita como $I = Nh\nu$ (...) (EISBERG e RESNICK, 1994, p.95)

Assim, pode-se afirmar que Eisberg e Resnick veiculam vozes relativas à dualidade onda-partícula que não se alinham à visão contemporânea da FQ. Além disso, os autores alternam a veiculação de interpretações da FQ sem nenhuma discussão profunda sobre o assunto, o que permite inferir que há inconsistência dos autores quanto à estratégia discursiva que adotam para construir enunciados explicativos sobre a natureza do fóton.

A seguir, a análise dos enunciados de Tipler e Llewellyn (2008) mostra que o livro segue um caminho parecido com o de Eisberg e Resnick (1994). Os autores começam apresentando a visão corpuscular de Einstein e usam o experimento de Compton para corroborar a interpretação corpuscular:

Einstein assumiu que a quantização da energia usada por Planck pra resolver o problema da radiação de corpo negro era, de fato, uma característica universal da luz. Ao invés de ser distribuída ao longo do espaço pela qual se propaga, a energia da luz consistia de quanta discretos, cada um com energia hf . [...] Evidência subsequente da correção do conceito de fóton foi fornecida por Arthur H. Compton. (TIPLER; LLEWELLYN, 2008, p. 133 e 137, tradução nossa)

Então, da mesma forma que no caso anterior, o aluno que inicia seus estudos em FQ é induzido a se posicionar em favor de uma ontologia corpuscular para o fóton. A seguir, ao falar de De Broglie, os autores veiculam uma voz que se alinha à interpretação dualista realista para falar sobre a matéria: “(...) a partícula é propaganda através da extensão da onda, então para a matéria é a probabilidade de encontrar a partícula que ondula” (TIPLER; LLEWELLYN, 2008, p.204, tradução nossa).

E finalizam apresentando a natureza dual da radiação e da matéria no mesmo sentido equivocados dado por Eisberg e Resnick (1994), tangenciando a visão de Compenhague:

Ambos matéria e radiação tem ambos aspectos corpusculares e ondulatórios. Quando emissão e absorção são estudadas, são os aspectos corpusculares que são dominantes. Quando a radiação se propaga no espaço, os aspectos ondulatórios são dominantes. (TIPLER; LLEWELLYN, 2008, p. 220, tradução nossa)

Pode-se, então, afirmar que Tipler e Llewellyn (2008) seguem as mesmas estratégias discursivas de Eisberg e Resnick (1994), evocando vozes dissonantes entre si, o que gera enunciados inconsistentes e traz complicações para o aluno iniciante.

Por fim, Halliday e Resnick (2010) também partem da discussão do Efeito Fotoelétrico, mas, diferentemente dos outros autores, expressam que a visão a ser veiculada é mais simples do que a necessária para entender a FQ, veiculando a uma voz que se alinha a perspectivas mais contemporâneas:

O conceito de *quantum* de luz, ou fóton, é muito mais sutil e misterioso do que Einstein imaginava. (...) A menor energia que uma onda luminosa de frequência f pode possuir é hf , a energia de um único fóton. (HALLIDAY; RESNICK, 2010, p.187).

Outro ponto interessante desse trecho é que os autores, apesar de falar da visão de Einstein, silenciam sua interpretação original (corpuscular) e falam de ondas com energia mínima (interpretação ondulatória). A seguir, os autores veiculam uma interpretação corpuscular, mas sugerem que essa interpretação tem caráter apenas epistemológico, isto é, pode-se interpretar o fenômeno como corpuscular, mas isso não significa que o fóton de fato é uma partícula. Pode-se perceber essa sutileza na escolha lexical do autor que aparece em itálico na próxima passagem (itálico presente na versão original):

Assim, quando um fóton interage com a matéria, há uma transferência de energia e momento *como se* a interação entre o fóton e uma partícula de matéria pudesse ser considerada uma colisão clássica. (HALLIDAY e RESNICK, 2010, p.191).

A seguir, os autores parecem aderir a uma visão ondulatória novamente ao discutir o problema de duas fendas: “Ela mostra que a luz pode ser vista não só como uma onda eletromagnética, mas também como uma onda de probabilidade.” (HALLIDAY e RESNICK, 2010, p.195).

Mais uma vez, na passagem supracitada, os autores se eximem de atribuir um caráter ontológico claro ao fóton na sua afirmação: escolhem a expressão “pode ser vista como uma onda” ao invés de dizer “é uma onda”. Parecem se alinhar a uma voz que veicula uma ontologia dualista, portanto. Isso é reforçado quando os autores fazem sua proposição da natureza dual da radiação eletromagnética, de forma similar aos casos anteriores:

Os resultados das três versões do experimento de dupla fenda podem ser explicados se supusermos (1) que a luz é gerada na forma de fótons, (2) que a luz é detectada na forma de fótons, (3) que a luz se propaga na forma de uma onda de probabilidade. (HALLIDAY e RESNICK, 2010, p.196).

Mais uma vez, é criada uma dicotomia entre uma ontologia ondulatória e corpuscular associada à dicotomia propagação e detecção, o que não condiz com as concepções contemporâneas de FQ. Halliday e Resnick (2010) segue uma abordagem diferente dos demais livros, não se comprometem claramente com nenhuma perspectiva ontológica e oscilam entre uma perspectiva dualista e a Interpretação e Copenhague.

Conclusões

Nesse trabalho fez-se uma análise dos enunciados sobre o fóton presentes em três livros didáticos utilizados no ensino superior (EISBERG e RESNICK, 1994; TIPLER e LLEWELLYN, 2008; HALIDAY e RESNICK, 2010) usando a Filosofia da Linguagem de Bakhtin como referencial teórico metodológico. Foram apresentadas quatro interpretações tradicionais da Física Quântica e essas foram entendidas como vozes no referencial teórico bakhtiniano.

Os dados mostram que os três livros apresentam a dualidade onda-partícula do fóton fazendo uma dicotomia entre ontologias ondulatória e corpuscular associadas a propagação e à detecção respectivamente, o que está equivocado diante das concepções teóricas contemporâneas (PESSOA JR., 2003).

Além disso, mostramos que Eisberg e Resnick (1994) e Tipler e Llewellyn (2008) veiculam perspectivas dissonantes ao longo de seus enunciados, veiculando vozes corpusculares e dualistas realistas para abordar diferentes questões. Apesar dessa oscilação, predominam as vozes corpusculares, o que sugere que o aluno, ao estudar por esse livro, pode ser induzido a adotar discursos que privilegiem a concepção de fóton como uma partícula, o que pode trazer dificuldades conceituais para compreensão de fenômenos contemporâneos de FQ.

Por fim, Halliday e Resnick (2010) apresentam uma visão majoritariamente dualista, embora tenham tido o cuidado de não se comprometer como *status* ontológico do fóton. Deve-se notar, entretanto, que a opção lexical dos autores, que indica esse cuidado, pode passar despercebida pelo aluno iniciante. Isso, também, pode trazer complicações conceituais para o estudante, pois não evidencia as principais rupturas conceituais da FQ.

Em síntese, pode-se dizer que os livros veiculam diferentes interpretações da FQ, quase sempre dissonantes. A interpretação de Copenhague, considerada hegemônica na comunidade científica, é apenas tangenciada nos livros didáticos. Nenhum livro discute explicitamente as diferentes interpretações da FQ e nem menciona que está se alinhando a alguma interpretação específica.

Esses resultados podem ser considerados um reflexo do paradigma positivista que permeia o ensino de Física (KINCHELOE; TOBIN, 2009) e que considera que o domínio do formalismo matemático é mais importante do que a compreensão conceitual da teoria (JOHANSSON et al., 2016). Uma vez que muitos cursos de licenciatura adotam os livros

avaliados, questiona-se qual é o preparo que o futuro professor de Física possui para abordar FQ no ensino médio? Os resultados reforçam a necessidade de maior investimento em pesquisa em Ensino de FQ e em desenvolvimento de currículos consonantes com as tendências contemporâneas da área de Ensino e de FQ; passando, inclusive, pela criação de novos textos didáticos que consigam fazer a conexão entre formalismo matemático, fenomenologia e interpretação da FQ.

Referências

- BAKHTIN, M. **Os gêneros do discurso**. São Paulo: Editora 34, 2016.
- BAKHTIN, M. **Marxismo e Filosofia da Linguagem**. São Paulo: HUCITEC, 2006. 12ed.
- BETZ, M., LIMA., I. MUSSATO, G. Dualidade onda-partícula: um objeto de aprendizagem baseado no interferômetro de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, 2014, p.3501-3508.
- EINSTEIN, A. Concerning an Heuristic Point of View toward the Emission and Transformation of Light. **Annalen der Physik**. v.17, n. 132, 1905. Disponível em http://www.esfm2005.ipn.mx/ESFM_Images/paper1.pdf.
- EISBERG, R., RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Partículas**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1994. 9ed.
- FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. Modern physics and students' conceptions **International Journal of Science Education**. v. 14, n. 2, 1999, p. 181-190.
- GIL, D. P., SENENT, F., SOLBES, J. Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. **Revista de Enseñanza de la Física**. v. 2, n. 1, 1988, p. 16-21.
- HALLIDAY D., RESNICK, R. **Fundamentos de Física Volume 4**. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 8ª ed.
- JAMMER, M. **The Philosophy of Quantum Mechanics: The interpretation of Quantum Mechanics in historical perspective**. New Jersey: John Wiley and Sons, 1974
- JOHANSSON, A. et al. Shut up and calculate. **Cultural Studies of Science Education**.2016. p.1-22.
- KINCHELOE, J. L., TOBIN K. The much exaggerated death of positivism. **Cultural Studies of Science Education**. 2009, p.513-527.
- KWIAT, P. G. **One- and two-photon interference**. In: GREENBERGER, D.; HENTSCHEL, K.; WEINERT, F. (Eds.). **Compendium of Quantum Physics**. Heidelberg: Springer, 2009. p. 428-434.
- MONTENEGRO, R. L., PESSOA JR., O. Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física. **Investigações em Ensino de Ciências**. v.7, n.2, 2002, p.107-126.

PESSOA JR., O. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

SOUZA, J.; REZENDE, F.; OSTERMANN, F. Apropriação discursiva de modelos de formação docente em trabalhos de conclusão de um mestrado profissional em ensino de física. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**. v. 18, n. 2, 2016, p. 171-200.

TIPLER, P., LLEWELLYN, R. A. **Modern Physics**. New York: W. H. Freeman and Company, 2008. 6ed.

VENEU, A. A.; FERRAZ, G.; REZENDE, F. Análise de discursos no ensino de ciências: considerações teóricas, implicações epistemológicas e metodológicas. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**. v. 17, n. 1, 2015, p. 126-149.

VOLOSHINOV, V. N. **A estrutura do enunciado**. Tradução de Ana Vaz, para fins didáticos. Texto de circulação acadêmica, 1981. [Texto original publicado na revista *Literaturnja Ucëba*, v. 3. p. 65-87, 1930.]

WERTSCH, J. V. **Voices of the mind: a socialcultural approach to mediated action**. Cambridge: Harvard University Press. 1991.