

# A HISTÓRIA DO FÓTON EM LIVROS DE FÍSICA

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

**RESUMO:** Os enunciados sobre o conceito de fóton em três livros introdutórios de Mecânica Quântica amplamente usados no Ensino Superior no Brasil são analisados sob a perspectiva da Filosofia da Linguagem de Bakhtin. São investigados os temas abordados, a estrutura composicional e a escolha lexical dos enunciados. Nossos resultados mostram que todos autores optam por uma abordagem histórica para introduzir o conceito de fóton. Ao fazer isso, entretanto, privilegiam os experimentos em detrimento das teorias e veiculam somente as visões hegemônicas, tecendo a história do fóton como uma evolução linear, objetiva e empirista, o que pode ser fortemente associado a uma epistemologia positivista. Além disso, os livros silenciam enunciados contemporâneos sobre o fóton, que trazem luz sobre a sua natureza como objeto quântico.

**PALAVRAS CHAVE:** Fóton, Mecânica Quântica, Bakhtin, História e Epistemologia

**OBJETIVOS:** Fazer uma análise bakhtiniana dos enunciados sobre o conceito de fóton em três livros didáticos amplamente utilizados no Ensino Superior no Brasil (Halliday e Resnick, 2010; Eisberg, 1985; Tipler, 2008), em cursos de Física. Pretende-se, com isso, identificar qual a abordagem utilizada pelos livros para introduzir o conceito de fóton, quais as teorias, modelos, ideias e experimentos são privilegiados na história contada e avaliar se a estrutura dos enunciados, os temas escolhidos, e a escolha lexical indicam a veiculação de alguma visão epistemológica específica.

## REFERENCIAL TEÓRICO

A análise foi feita utilizando, como referencial teórico-metodológico, a Filosofia da Linguagem do Círculo de Bakhtin (2016), a qual avalia a linguagem em sua realização concreta, ou seja, no seu uso social. Para Bakhtin (2016), todo enunciado é considerado um elo na cadeia de comunicação verbal, o que significa duas coisas: a primeira é, como já comentamos, que todo enunciado é direcionado para um locutor esperado e, portanto, ele será construído para cumprir seu objetivo dentro de uma situação social concreta (característica chamada de direcionalidade), a segunda é que nenhum enunciado é totalmente novo, ele sempre responde a enunciados anteriores e procura antecipar respostas a enunciados futuros (característica chamada de responsividade).

Voloshinov (2006) define que todo o enunciado comporta uma dimensão verbal e uma dimensão extraverbal, que não é expressa, mas é subentendida. É justamente a parte extraverbal do enunciado (conjunto formado pela situação da enunciação e pelo auditório do enunciado) que dá significado à parte verbal. A situação do enunciado pode ainda ser entendida como constituída por três elementos: o espaço e o tempo do evento, o objeto ou o tema do enunciado, e a posição dos interlocutores diante do fato e, ainda, pode ser entendida em três níveis: o primeiro é o contexto direto, o diálogo imediato,

presencial, o segundo é contexto social e do tempo histórico, e o terceiro é contexto social e cultural mais amplo e do “grande tempo” (Veneu; Ferraz; Rezende, 2015).

Entendendo isso, pode-se realizar a análise do enunciado, que implica avaliar suas características fundamentais: tema (assunto do enunciado), estrutura composicional (ordenamento dos elementos do enunciado), escolha lexical (escolha das palavras e expressões) e sua relação com o contexto extra verbal.

## METODOLOGIA

Foi utilizado um dispositivo analítico (Veneu; Ferraz; Rezende, 2015) com quatro etapas. A primeira etapa consiste em identificar as delimitações dos enunciados a serem analisados. A segunda etapa consiste em fazer uma primeira leitura dos enunciados já observando as possibilidades de articulação dos conceitos da Filosofia da Linguagem. A terceira etapa consiste em fazer uma análise do contexto extraverbal, avaliando, por exemplo, com que enunciados anteriores o autor dialoga e qual o seu auditório. A última etapa consiste em fazer a análise bakhtiniana propriamente, articulando o que foi encontrado na análise do contexto extraverbal com as características identificadas no enunciado e respondendo as questões de pesquisa.

## RESULTADOS

A primeira etapa dos resultados consiste na identificação dos enunciados. Como a condição de delimitação do enunciado implica a alternância de fala entre os sujeitos, entendeu-se que o fim de cada capítulo marca o fim de um enunciado.

A segunda etapa consiste em fazer uma leitura preliminar dos livros. Nessa etapa já foi feito um mapeamento dos temas presentes nos enunciados dos livros, o que é apresentado na tabela 1.

Tabela 1.  
Títulos dos Enunciados avaliados

Eisberg (1985)	Tipler(2008)	Halliday e Resnick (2010)
Radiação Térmica e Postulado de Planck	A Quantização da Carga, Luz e Energia	Fótons e Ondas de Matéria
Fótons – Propriedades Corpusculares da Radiação	As propriedades Ondulatórias das Partículas	
Postulado de Debroglie – Propriedades Ondulatórias das Partículas		

Com essa primeira leitura, notamos que os autores optam por fazer uma introdução histórica ao conceito de fóton, começando com o problema da radiação de corpo negro, tentando mostrar as limitações dos modelos clássicos. Atualmente essa não é a única abordagem possível para a apresentação do conceito de fóton – pode-se, por exemplo, partir de uma abordagem postulacional, apresentando a Mecânica Quântica sem fazer menção aos modelos clássicos (Fischler; Lichtfeldt, 1999)

A terceira etapa do dispositivo analítico consiste em fazer uma análise do contexto extraverbal. Essa etapa pode ser tão complexa quanto o pesquisador desejar e o nível de complexidade depende basicamente das questões de pesquisa. No caso desse trabalho, se deseja estudar a apresentação do conceito de fóton nos livros e, foi dada prioridade ao conceito bakhtiniano de responsividade, buscando-se avaliar com quais enunciados veiculados na Mecânica Quântica os autores dialogam e quais aspectos desses enunciados são silenciados.

Alguns pesquisadores de História da Ciência atribuem o início da Teoria Quântica aos trabalhos de Planck e Einstein (Greenstein; Zajonc, 2006). O artigo sobre a interpretação do Efeito Fotoelétrico foi o primeiro a apresentar uma visão corpuscular da radiação eletromagnética no século XX. Outros trabalhos, como o estudo de Compton, corroboraram a natureza corpuscular da luz. Nenhum dos estudos da primeira metade do século XX, entretanto, era capaz de fundar-se em um experimento capaz de refutar a visão ondulatória definitivamente. Como consequência disso, alguns trabalhos apareceram explicando, por via semiclássica, os mesmos fenômenos ditos “corpúsculares” sem fazer menção ao conceito de fóton (Greenstein; Zajonc, 2006, p. 25).

Na década de 1950, a disputa entre as duas visões foi revitalizada com os resultados de um experimento de anticoincidência com fótons, que contrariaram as expectativas da teoria corpuscular. Na década de 70, o experimento foi repetido novamente com radiação de laser, novamente contrariando as expectativas da visão do fóton como partícula.

Os problemas apontados no experimento e anticorrelação de fótons só podem ser entendidos com a formulação da nova Teoria Quântica, que, entre outras coisas, define todo observável a partir de um operador autoadjunto, o qual pode ser associado a um conjunto de autoestados, cujos autovalores são reais. Se medimos a energia de um sistema que está em um autoestado de energia, obtém-se um autovalor associado. Se o sistema, entretanto, estiver submetido a um campo externo e for preparado em um auto-estado do operador momento, ele não tem uma energia específica antes da medição (uma vez que energia e momento são observáveis incompatíveis, isto é, não comutam). O mesmo acontece no experimento de anticorrelação, cujo observável em questão é o número de fótons. Para que o experimento pudesse ter o valor de anticorrelação esperado, precisa-se garantir que o sistema esteja em um autoestado do operador número de fótons. Isso não foi realizado até 1986, quando finalmente se conseguiu um experimento de anticorrelação que coincidiu com as expectativas do modelo corpuscular. Sem fazer uso do formalismo quântico moderno, a história “completa” do fóton não pode ser entendida.

A maioria das pessoas pensa que a radiação é feita de fótons da mesma forma que uma parede é feita de tijolos. Isso não é correto. A radiação emitida por uma lâmpada, por exemplo, não é emitida, necessariamente, em um autoestado do operador número de fótons, o que significa que ela não tem um número definido de fótons. Na verdade, nesse caso, uma teoria ondulatória da radiação juntamente com uma perspectiva quântica é mais adequada para dar conta de todos os fenômenos quânticos envolvidos.

Finalmente, a realização do experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder mostrou que, mesmo quando se obtém um único fóton (que era entendido como um corpúsculo) esse também pode se comportar como onda, formando, inclusive padrões de interferência. O fóton, portanto, não é uma onda, nem uma partícula, é um objeto quântico com características próprias – pode evidenciar um ou outro comportamento, dependendo da situação experimental que se configura.

Feita essa retrospectiva histórica dos artigos seminais que tecem a linha constitutiva do conceito de fóton, pode-se partir para a última etapa do dispositivo analítico: a análise bakhtiniana.

A primeira característica dos enunciados, seus temas, já foi apresentada na tabela 1. Notamos que todos os autores introduzem o conceito de fóton por meio de uma abordagem histórica. A partir da análise do contexto extraverbal, pode-se reconhecer que a história que é contada nos livros está incompleta, pois os livros falam apenas da Velha Mecânica Quântica. Nenhum deles apresenta uma descrição fenomenológica pela via de operadores matemáticos e também não discutem os experimentos de anticorrelação que contrariam as teorias corpusculares originais. Os dois livros mais recentes (Tipler, 2008, e Halliday; Resnick, 2010) omitem o experimento com Interferômetro de Mach-Zehnder, que traz um novo olhar sobre a natureza quântica do fóton. Um dos livros admite a limitação de sua abordagem: “O Conceito de quantum de luz, ou fóton, é muito mais sutil e misterioso do que Einstein imaginava.

(...). Nesse livro, vamos discutir apenas alguns aspectos básicos do conceito de fóton, mais ou menos de acordo com a ideia original de Einstein” (Halliday; Resnick, 2010, p.187).

A segunda característica analisada é a estrutura composicional dos enunciados. Todos os livros apresentam os enunciados apenas a partir de visões hegemônicas da Mecânica Quântica. Não são discutidas as teorias ondulatórias semiclássicas capazes de analisar fenômenos como o Efeito Fotoelétrico ou o Efeito Compton. Halliday e Resnick (2010) admitem, em uma observação periférica, a existência de uma proposta ondulatória semiclássica para explicar o efeito fotoelétrico, mas nenhum dos livros analisados comenta os experimentos de anticorrelação que contrariam a interpretação corpuscular.

Esse silenciamento sistemático de vozes que veiculam teorias rivais e privilegiação de vozes que veiculam teorias hegemônicas resultam em um discurso que veicula uma história de ciência linear, sem disputas e rupturas. Além disso, todos os livros começam os enunciados discutindo experimentos e, posteriormente, abordam a teoria. Essa estrutura composicional permite inferir que os autores se alinham a uma voz que veicula a ideia de que o conhecimento parte do experimento, se alinhando ao positivismo lógico.

O início do capítulo 2 de Eisberg (1985), por exemplo, tem o seguinte ordenamento: Introdução, o Efeito Fotoelétrico, a Interpretação Quântica de Einstein para o Efeito Fotoelétrico. O autor menciona que Einstein se contrapôs à teoria clássica do eletromagnetismo e usou o efeito fotoelétrico como exemplo de sua teoria, partindo do artigo de Planck. Essa apresentação ignora que Einstein (1905) faz uma longa derivação da entropia da radiação eletromagnética baseado em conceitos de termodinâmica e mecânica estatística (teorias recentes em sua época) para compará-la com a entropia de um gás ideal. É a partir dessa comparação e usando o modelo de Wien (e não de Planck) que Einstein propõe a hipótese do quantum de radiação.

A estrutura composicional do livro inverte o ordenamento original do artigo de Einstein (apresentando o experimento primeiro), errando ao dizer que Einstein parte do modelo Planck e omite a contribuição da termodinâmica e mecânica estatística para a proposição do fóton. Essas distorções enunciativas veiculam a ideia de uma ciência linear (pois induz que se pense que a teoria de Planck era mais “forte” e recente do que a de Wien) e que segue o método empirista-indutivista. Ou seja, a estrutura composicional é fundamentada em uma voz que se alinha ao positivismo. Tipler (2008) e Halliday e Resnick (2010) seguem uma sequência similar e cometem os mesmos deslizes históricos e omissões teóricas de Eisberg (1985).

Além disso, a escolha lexical dos enunciados de dois livros veicula uma visão explicitamente alinhada ao positivismo, privilegiando palavras como *confirmação* e *comprovação*: “Em 1923, Arthur Compton, da Washington University, em Saint Louis, executou um experimento que *confirmou* a previsão de que os fótons possuem energia e momento.” (Halliday; Resnick, 2010, p.191); ou “A natureza corpuscular da radiação recebeu uma *confirmação* dramática como em 1923 dos experimentos de Compton.” (Eisberg, 1985, p. 34).

Essa visão, segundo epistemólogos contemporâneos, é falsa – visto que o foi discutido na análise do contexto extraverbal.

## CONCLUSÃO

Nossa análise mostrou que os livros didáticos de Física Moderna optam por uma abordagem histórica do fóton. A história contada, entretanto, limita-se à Velha Teoria Quântica, não abordando questões importantes da segunda metade do século XX que se contrapõem à noção primordialmente corpuscular do fóton implicitamente adotada pelos livros (ao abordar o Efeito Fotoelétrico, é dado amplo destaque às características *corpusculares* da radiação eletromagnética). A estrutura composicional dos textos privilegia o experimento em detrimento das teorias e marginaliza as teorias rivais, veiculando

uma visão de ciência linear e empirista, que se alinha a uma visão epistemológica positivista. Além disso dois dos três livros apresentam uma escolha lexical que veicula explicitamente o viés positivista.

## REFERÊNCIAS

- BAKHTIN, M. (2006). *Marxismo e Filosofia da Linguagem*. São Paulo: HUCITEC.
- (2016). *Os gêneros do discurso*. São Paulo: Editora 34.
- EINSTEIN, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17(132). Sitio web (en inglés): <http://www.esfm2005.ipn.mx/ESFM/Images/paper1.pdf>
- EISBERG, R. (1985). *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*. New York: John Wiley & Sons.
- FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. (1999) Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, London, v. 14(2), 181-190.
- GREENSTEIN, G.; ZAJONE A. G. (2006). *The Quantum Challenge – Modern Research on the Foundation of Quantum Mechanics*. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers.
- HALLIDAY D., RESNICK, R. (2010) *Fundamentos de Física Volume 4*. Rio de Janeiro,: LTC.
- TIPLER, P., LLEWELLYN. (2008) *Modern Physics*. New York: W. H. Freeman and Company.
- VENEU, A. A.; FERRAZ, G.; REZENDE, F. (2015) Análise de discursos no ensino de ciências: considerações teóricas, implicações epistemológicas e metodológicas. *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*, 17(1), 126-149.
- VOLOSHINOV, V. N. (1981). A estrutura do enunciado [La structure de l'enoncé]. *Le principe dialogique, suivi de Ecrits du Cercle de Bakhtine*, 287-315.

