

A Natureza da Ciência a partir do artigo de Einstein de 1905 acerca da quantização do campo de radiação

The Nature of Science from Einstein's 1905 article on the quantization of the radiation field

Resumo

Mesmo diante das dificuldades da utilização da História e da Filosofia da Ciência (HFC) e de elementos de Natureza da Ciência (NdC) para o ensino de ciências, há, atualmente, uma consciência da necessidade de inserir nos currículos de ciências noções sobre como se dá a construção do conhecimento científico. Conhecer a história do desenvolvimento e do processo de aceitação de teorias científicas pode ajudar os professores a incluir discussões sobre a Natureza da Ciência no ensino de ciências. Inserido nesse contexto, esse trabalho apresenta uma análise da aceitação e propagação das ideias contidas no trabalho de Einstein de 1905 acerca da quantização do campo de radiação. Apontaremos para alguns aspectos da Natureza da Ciência que podem ser evidenciados pelo estudo desse trabalho.

Palavras chave: natureza da ciência, história da física, Einstein, quantização.

Abstract Even in the face of the difficulties of using History and the Philosophy of Science (HFC) and elements of the Nature of Science (NOS) for science teaching, there is now an awareness of the need to include in the science curricula notions about how gives the construction of scientific knowledge. Knowing the history of development and the process of acceptance of scientific theories can help teachers to include discussions about the nature of science in science teaching. In this context, this work presents an analysis of the acceptance and propagation of the ideas contained in Einstein's work of 1905 on the quantization of the radiation field. We will point to some aspects of the nature of science that can be evidenced by the study of this work.

Palavras chave: nature of science, history of physics, Einstein, quantization

Introdução

Se levarmos em consideração as diversas pesquisas voltadas para o ensino de ciências que vêm sendo realizadas ao longo dos anos, percebemos que há uma crescente ênfase na História e Filosofia da Ciência (HFC). Nesse sentido, muitas dessas pesquisas enfatizam caráter pedagógico dessa abordagem (KRAGH, 1989; MARTINS 1990; MATTHEWS, 1994; 1995; PEDUZZI, 2001; MARTINS, 2005; MARTINS, 2007; FORATO et al, 2011; FORATO et al,

2012). Dentre as vantagens da utilização de elementos da HFC, destacam-se a clareza proporcionada em relação ao processo de construção da ciência, e uma possível superação de elementos puramente empiristas e indutivistas, em sua forma mais ingênua.

Arelada a essa abordagem, observamos as crescentes pesquisas sobre Natureza da Ciência (NdC), que têm nos alertado sobre a importância dos conteúdos metacientíficos, ao discutir e defender um saber além dos conteúdos da ciência (ADÚRIZ-BRAVO, 2006). Além disso, têm-se evidenciado que estudantes e professores apresentam concepções simplistas e equivocadas sobre a prática científica, tais como: forte crença no método científico; uma visão de ciência que se desenvolve linearmente pelo acúmulo de informações, uma imagem de ciência despreziosa e neutra, apresentando interpretações simplistas sobre a natureza da ciência e exibindo uma falta de compreensão das diferenças entre fato e evidência, observação e experimentação, entre outras lacunas (GIL-PÉREZ et al., 2001; LEDERMAN, 1992, 2007).

Os pesquisadores que estudam elementos de NdC estão interessados em questões que estão além da própria ciência e acaba elencando elementos que para eles são mais pertinentes. Como apontado por Martins (2015) não há um consenso sobre a definição de NdC, o que acreditamos levar cada pesquisador a uma definição. Nesse sentido, consideramos que ela pode ser vista como um conjunto de conhecimentos sobre a ciência que trata dos seus métodos, objetivos, limitações, influências etc. De acordo com os PCNEM (2000), a compreensão e utilização da ciência faz parte das metas atuais da educação. Assim, devemos reconhecer o sentido histórico da ciência, analisando seu papel na vida humana em diferentes épocas e seu processo de desenvolvimento (acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas). Pensando dessa forma, podemos admitir que a utilização de alguns episódios históricos da ciência pode contribuir para a discussão de aspectos da NdC em sala de aula, uma vez que possibilita uma visão mais profunda e detalhada do processo de construção do conhecimento científico, esclarecendo questões postas de modo inadequado e distorcido ou que são discutidas numa abordagem a-histórica.

A seleção do episódio histórico deve ser pensada com cautela, de modo que seja possível extrair características que permitam o entendimento de questões referentes ao momento histórico estudado, mas que estão além do próprio conhecimento científico, ou seja, ao estudar esse episódio, devemos nos colocar diante das problemáticas na estruturação de uma teoria, bem como pensar de modo a romper com as ideias fragmentadas presentes em alguns materiais. Nesse sentido, nosso trabalho apresenta um estudo histórico de um dos artigos de Einstein, evidenciando que a construção do conhecimento científico não é simples e linear como geralmente se acredita, possibilitando a compreensão de diversas características relevantes da natureza da ciência.

O artigo

O ano de 1905 ficou conhecido como o “ano miraculoso” de Einstein em decorrência da publicação de cinco importantes trabalhos que trouxeram várias contribuições para Física. Essas cinco obras foram publicadas na influente revista alemã *Annalen der Physik*, e tratam sobre a teoria da relatividade especial, a explicação do movimento browniano, a equivalência entre massa e energia, a quantização do campo de radiação (frequentemente referido como o artigo do efeito fotoelétrico) e a sua tese de doutorado, que abordava um novo método de determinação de dimensões moleculares.

Mesmo diante da relevância de todos esses trabalhos, alguns deles ganharam maior notoriedade e popularidade entre pesquisadores e interessados pela temática; é o caso de seu artigo sobre quantização de energia. O artigo foi submetido para publicação em 17 de março de 1905, e publicado em 9 de junho do mesmo ano. Intitulado *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz), ficou bastante conhecido por ter recebido o prêmio Nobel em 1921. De uma maneira geral, esse artigo conseguiu trazer uma explicação plausível para três fenômenos experimentais já conhecidos em sua época, mas que ainda não tinham explicação satisfatória: radiação de corpo negro, fluorescência, e a produção de raios catódicos por luz ultravioleta (atualmente conhecidos como a fotoionização, a fluorescência e o efeito fotoelétrico).

Como é destacado no título de seu artigo, esse trabalho é uma análise heurística, sem referências ou “comprovações” experimentais, partindo basicamente de suas concepções teóricas. Einstein apresenta uma comparação entre a luz e um gás ideal, admitindo que de mesmo modo que um gás ideal é composto por moléculas, a luz também seria composta por corpúsculos. Matematicamente, essa comparação também é admissível, pois a entropia para radiação de Wien e para lei dos gases ideais poderia ser expressa de forma semelhante. Einstein propõe o que considerou a mais revolucionária de suas hipóteses: a de que a luz comporta-se como se fosse constituída de unidades elementares de energia (corpúsculos) proporcional à sua frequência.

Nas primeiras páginas de seu artigo, Einstein (1905) descreve algumas divergências existentes entre a teoria corpuscular e a teoria ondulatória e deixa evidente seu posicionamento favorável à teoria corpuscular. Segundo ele, na teoria da matéria (corpuscular), há a possibilidade de se especificar completamente um sistema por meio de um número finito de quantidades mecânicas, o que não ocorre com a teoria eletromagnética (ondulatória). Ele admite que a teoria ondulatória seja eficiente para descrever fenômenos puramente ópticos (reflexão, interferência, entre outros dessa natureza). No entanto, se temos situações em que precisamos considerar a interação entre luz e matéria, não faz sentido considerar essa energia (luz) como sendo ondulatória, pois com essa suposição, não se pode explicar fenômenos em que haja a emissão e absorção de luz.

Einstein sugere que, para explicação de alguns fenômenos, como é o caso da radiação de corpo negro, fluorescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta é conveniente adotar que a energia luminosa esteja distribuída de forma descontínua no espaço. A partir dessas considerações, ele passa a adotar a ideia de átomos de energia localizados – *os quanta de energia*. Contudo, essa ideia era incompatível com a Física clássica, tanto no que se refere aos seus conceitos quanto ao formalismo matemático, portanto, não faria sentido utilizar as equações de Maxwell para estruturar sua teoria.

Desse modo, Einstein recorre à lei de W. Wien para fundamentar seu artigo. O estudo de Wien consistia na verificação da distribuição do comprimento de onda da radiação de uma cavidade térmica, que supunha que quando o volume de um gás sofresse variações, o comprimento de onda deveria mudar por efeito Doppler. Nesse sentido, Wien ainda considerou que quando o volume de determinada substância variasse de modo adiabático, ou seja, sem que houvesse trocas de calor com o ambiente externo, a sua temperatura e a frequência deveriam variar de forma proporcional entre si (WHEATON, 1983).

Com base em Wien, Einstein mostrou que a expressão para dependência volumétrica da entropia da radiação, dentro dos limites de uma determinada frequência, tem forma similar à

entropia de um gás ideal, concluindo que a radiação monocromática de baixa densidade se comporta termodinamicamente como sendo constituída de quantum de energia de magnitude $\frac{R\beta v}{N}$. Conseguindo assim trazer uma explicação para esses fenômenos já conhecidos, mas que não apresentavam uma explicação consistente.

O que podemos aprender com esse artigo?

Ao longo da leitura desse material, surgem alguns questionamentos: Como esse artigo em particular pode contribuir para melhor compreensão do desenvolvimento do conhecimento científico? Nosso breve estudo histórico indica que, muitas vezes, as teorias originais dos cientistas não são propagadas em sua forma original, mas sofrem significativas modificações e são incorporadas nos modelos defendidos no período. Isso é evidenciado no trabalho de Einstein em alguns momentos distintos.

1) A explicação para o efeito fotoelétrico

Comumente, esse artigo de Einstein é definido como uma tentativa de explicar o efeito fotoelétrico. Contudo, seu artigo é bem mais abrangente, já que ele analisa três interações da luz com a matéria, tratadas sob a forma de quanta de energia: a regra de Stokes para fluorescência; a ionização dos gases pela luz ultravioleta (fotoionização) e a produção de raios catódicos por ultravioleta (efeito fotoelétrico), como afirma Stachel (2005).

2) A originalidade de sua teoria

Einstein (1905) defende a originalidade de sua teoria ao introduzir essa concepção de quanta de luz, contudo, a descoberta da quantização da radiação através do caminho óptico, feita de forma independente da quantização dos osciladores do corpo negro, não aparece de forma exclusiva no artigo de Einstein. A história factual admite que essa não seja uma inovação proposta por ele, pois, Joseph John Thomson já tinha desenvolvido, em 1904, uma teoria eletromagnética que buscava explicar o aspecto granular da luz (PESSOA JR, 2005).

No entanto, não se pode também admitir que o trabalho de Einstein apareça apenas como uma extensão do trabalho de Planck. Ao longo de seu artigo, é possível perceber que há uma divergência significativa entre a estruturação de suas teorias, bem como sua validade. Ou seja, a ideia de Einstein foi explorar uma analogia que descobriu entre as expressões da entropia para a radiação emitida por um corpo negro (não dos osciladores como pensou Planck), no limite de validade da lei de Wien, e da entropia de um gás dada pela teoria cinética (JAMMER, 1966).

3) A natureza dual da luz

Outra questão se refere ao fato de se atribuir a Einstein a primeira elaboração de uma teoria dualística para luz. Einstein descreve sua teoria de modo puramente corpuscular. Obviamente, devemos salientar que Einstein não descarta a teoria ondulatória, reconhecendo que seu uso é válido e eficiente para estudar fenômenos ópticos. No entanto, para a estruturação desse artigo, ele trata a luz como sendo constituída unicamente por partículas e, em momento nenhum, assume a luz como tendo característica dual, como mencionado por Martins (2014).

4) A aceitação do trabalho de Einstein

Contrariando a ideia da genialidade de Einstein, é necessário mencionar que esse trabalho teve baixa repercussão e pouca aceitação pela comunidade científica por um longo período, como afirma Wheaton (1983). Ainda de acordo com esse autor, fenômenos dessa natureza foram parcialmente elucidados em anos anteriores pela hipótese do gatilho de Lenard, com a propositura de que a luz de curto comprimento de onda, ao incidir sobre um metal, faz com que haja a ejeção de elétrons. Essa hipótese era estruturada com base na teoria ondulatória e foi considerada, por muitos anos, como sendo a explicação mais aceitável para o fenômeno, dispensando uma explicação divergente.

Inicialmente, a grande maioria dos artigos publicados a partir de 1905 sinalizava em oposição à teoria de Einstein, refutando-a em função da concepção dada por Planck à interação radiação/matéria. Como exemplo, podemos citar os discursos de Planck e outros cientistas sobre Einstein, quando este foi indicado à Academia Prussiana de Ciências, em 1913. Segundo Jammer (1966, p. 43), ao descrever o perfil do indicado, os cientistas apontaram-lhe diversas contribuições à ciência, apesar de em alguns casos, a exemplo da hipótese de quanta de luz, ter “perdido o alvo”.

5) Sobre a Natureza da Ciência (NdC)

Esse artigo nos coloca diante de algumas questões interessantes e que podem ser discutidas em sala de aula em termos de elementos da NdC. Desse modo, destacamos:

- A importância dada ao empírico para construção do conhecimento científico. Nesse artigo, lidamos com uma teoria heurística, em que não há presença de atividades empíricas. Será que isso pode comprometer a validade e/ou eficiência do conhecimento científico?
- O artigo apresenta uma forte base matemática para estruturar sua teoria. Seria a matemática a linguagem para se produzir ciência? É possível trazer uma teoria científica sem matemática?
- O artigo de Einstein traz uma nova explicação para alguns trabalhos já existentes. A ciência está em constante mutabilidade. Seria a ciência um “empreendimento” provisório?
- O artigo de Einstein faz uma descrição heurística, fato que, de acordo com Wheaton (1983), trouxe algumas dificuldades para aceitação dessa teoria. Existiria então um método de se produzir conhecimento científico? Deveria ser o conhecimento objetivo e/ou empírico uma imagem real da ciência?

A análise pontual desse artigo no presente trabalho indica que, em alguns casos, as teorias dos cientistas não são propagadas nos mesmos moldes em que foram escritas, mas sofrem significativas modificações e são incorporadas nos modelos defendidos no período vigente de sua análise. As divergências entre a teoria ondulatória e corpuscular presentes fortemente ao longo dos séculos acabaram sendo ressignificadas e as críticas sofridas pela concepção corpuscular aparecem de forma bastante discreta, culminando numa ideia inadequada de que a ciência de Einstein esteve imune a questionamentos e manteve sempre superioridade em relação a outras teorias para a luz.

Considerações finais

As divergências entre o que seria consensual nas discussões de NdC evidenciam a complexidade do assunto e alertam para a impossibilidade de se estabelecer esse consenso, mas, apontam para uma grande variedade de possibilidades para discussão sobre ciência. Nesse sentido, a HFC é um dos caminhos possíveis para se introduzir discussões sobre a NdC em sala de aula. O estudo do artigo pode oferecer uma ampla discussão sobre o processo de construção e divulgação da explicação de fenômenos da fotoeletricidade, suas influências na comunidade científica à época e a sua rejeição inicial, o que mostra que a natureza da ciência não é trivial e de fácil entendimento, mas oferece uma riqueza de detalhes fascinante.

Referências

ADÚRIZ-BRAVO, A. ¿Que naturaliza de la ciencia hemos de saber los profesores de ciencias? Una cuestión actual de la investigación didáctica. 2006. Disponível em <<http://www.unesco.cl/medios/biblioteca/documentos/>> Acesso em: 05 de outubro de 2017.

BRASIL, Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) - Parte III - Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias (MEC/SEB, Brasília, 2000).

EINSTEIN, A. On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light. *Annalen der Physik*, vol. 17, p. 132-148, 1905. Disponível em <<http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans> > Translated Anna Beck. Acesso em 20 de dezembro de 2017.

FORATO, T. C. M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. *Cad. Bras. Ens. Fís*, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.

FORATO, T. C. M.; MARTINS, R. A.; PIETROCOLA, M. Enfrentando obstáculos na transposição didática da história da ciência para a sala de aula in: PEDUZZI, L.O.Q;

JAMMER, M. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. McGraw-Hill, New York, 1966.

MARTINS, A.F.P.; HIDALGO, J.M. (org.) *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino*. Natal: Editora da UFRN, 2012.

GIL-PÉREZ, D. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, 7, 2, 125-153, 2001.

KRAGH, H. *An introduction to the historiography of science*. Cambridge: New York, 1989.

LEDERMAN, N.G. (1992). Student's and Teachers' Conceptions of the Nature of Science: A Review of the Research. *Journal of Research in Science Teaching*, 29 (4), 331–359.

LEDERMAN, N.G. (2007). Nature of Science: past, present, na future. In S. Abel & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on Science Education* (pp. 831–880). Mahwah – New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

MARTINS, R. A. Sobre o papel da história da ciência no ensino. *Boletim da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, v. 9, p. 3-5, 1990.

MARTINS, L A-C. P. História da ciência: objetos, métodos e problemas. *Ciência & Educação*, v. 11, n. 2, p. 305-317, 2005.

MARTINS, A. F. P.. História e Filosofia da ciência no ensino: H´muitas pedras nesse caminho. Caderno Brasileiro do Ensino de Física v. 24, n. 1, p. 112-131, 2007.

_____. História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2014.

MARTINS, A.F.P. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 32, 3, 703-737, 2015.

MATTHEWS, M. R. Science Teaching - The Role of History and Philosophy of Science. New York: Routledge, 1994.

MATTHEWS, M.R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 12, n. 3, p.164-214, 1995.

PEDUZZI, L. O. Q. Sobre a utilização didática de história da ciência. in: PIETROCOLA, M. (org.) Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001.

PESSOA JR. O. “O Início da Física Quântica e seus Caminhos Possíveis”, In. Pietrocola, M. & Freire Jr., O. (orgs.), *Ciência, Filosofia e História: uma homenagem aos 40 anos de colaboração de Michel Paty com Brasil*, Discurso/Humanistas, São Paulo, 2005.

WHEATON, B. R. The tiger and the shark: Empirical roots of wave-particle dualism. Cambridge, England: Cambridge University Pres, 1983.