

A História da Ciência e a Simulação Computacional no ensino e na aprendizagem da Física

The History of Science and Computational Simulation in Physics teaching and learning

Pedro Rosa^{1*}, Aguinaldo de Souza^{1,2}

¹Faculdade de Tecnologia Prof. Wilson R. R. de Camargo, Rod. Mario Batista Mori, 971, Jardim Aeroporto, Cep: 18280-000, Tatuí, SP, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências – Campus Bauru, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01 - Vargem Limpa, Cep: 17033-360 – Bauru, SP, Brasil.

*E-mail: pedro.rosa@fatec.sp.gov.br

Recibido el 15 de junio de 2021 | Aceptado el 1 de septiembre de 2021

Resumo

Neste trabalho mostraremos como é possível vincular a História da Ciência e a Simulação Computacional para criar um ambiente de autonomia para o estudante em sua aprendizagem, pensando o estudante como responsável pelo seu caminhar formativo. Tendo que se adaptar cada vez mais às novas ferramentas tecnológicas, válida também na formação continuada do professor de ciências e de tecnologia, este estudante deve ser capaz de adquirir, durante o seu processo de formação, habilidades e competências de um ser autônomo e autocrítico. Tomaremos como exemplo um debate científico entre Jean de Boissoudy e Edmound Bauer sobre a teoria quântica e o calor específico dos sólidos, que possui significado histórico, embora possa ser considerado periférico para o senso comum, para quem possua pouca intimidade com a Historiografia da Ciência.

Palavras chave: Ensino de física; História da ciência; Simulação computacional; Debate; Autonomia.

Abstract

In this work, we will show how it is possible to link the History of Science and Computational Simulation to create an environment of autonomy for the student in his learning, thinking the student as responsible for his formative walk. Having to adapt more and more to new technological tools, also valid in the continuing education of science and technology teachers, this student must be able to acquire, during his training process, skills and competences of an autonomous and self-critical being. We will take as an example a scientific debate between Jean de Boissoudy and Edmound Bauer on quantum theory and the specific heat of solids, which has historical significance, although it can be considered peripheral to common sense, for those who have little intimacy with the Historiography of Science.

Keywords: Physics teaching; History of science; Computational simulation; Debate; Autonomy.

I. INTRODUÇÃO

Entre 30 de outubro e 03 de novembro de 1911 foi realizada em Bruxelas, na Bélgica a primeira conferência Solvay (Solvay, 1912), (Mehra, 1975), importante encontro de físicos e matemáticos do ponto de vista da Física e da História da Física. Seria o primeiro encontro organizado por Ernest Solvay para debater questões fundamentais sobre a natureza

www.revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF

REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA, Vol. 33, no. 2 (2021)

da física teórica, identificar problemas e apontar soluções para a interpretação dos fenômenos microfísicos. Nela estavam presentes importantes físicos, químicos e matemáticos do período, como Max Planck, Albert Einstein, Henri Poincaré, Paul Langevin, Maurice de Broglie¹, Marie Curie, Jean Perrin, etc., além do próprio Ernst Solvay, químico industrial e possuidor de grande fortuna que decidiu organizar este encontro com o intuito de entender a estrutura quântica da matéria. Um artigo sobre a participação de Henri Poincaré no congresso é detalhada por Russel McCormack (1967).

Quando falamos em importantes físicos, químicos e matemáticos, nos transportamos através da História da natureza da Ciência e de seus aspectos internos e, da importância que estes tiveram na construção social do conhecimento científico. Alguns deles, naquele período eram pesquisadores teóricos e experimentais, mas, os problemas nos quais tiveram que pensar, decidir, resolver, tornaram-nos importantes iniciadores dos processos que alteraram a física básica no decorrer da História da Física, provocando mudanças profundas na forma de compreender as leis da microfísica. A interpretação mecânica de Newton do movimento dos corpos materiais teve que ceder espaço para uma nova mecânica que estava surgindo e que ficou mais tarde conhecida como Mecânica Quântica, a partir de 1925. Esta característica da metodologia da ciência é promissora do ponto de vista do ensino e da aprendizagem, pois, assim como em um congresso científico, a sala de aula é um local onde a diversidade de pensamento e as diferentes opiniões sobre um determinado assunto ou conceito deve servir como um fator estrutural da compreensão epistemológica. Poderíamos indagar: em que difere, um cientista já experiente de um estudante da educação básica ou no início da educação superior?

II. O DEBATE CIENTÍFICO E A ESTRUTURA EPISTEMOLÓGICA DA APRENDIZAGEM CIENTÍFICA

Responder à questão epistemológica da natureza de um fenômeno físico, químico ou biológico e dar uma explicação conceitual deste a um estudante de educação básica ou do ensino superior é uma tarefa que exige da parte do professor conhecimentos profundos da estrutura de como a ciência é construída pelo cientista e das suas implicações na sociedade, fruto da evolução histórica do pensamento e do processo de criação. Há muitos fatores subliminares relevantes envolvidos nas relações entre o ensino e a aprendizagem científica, que nem sempre são visualizados de imediato pelo estudante, obrigando-o a adquirir a habilidade da pesquisa bibliográfica, ou seja, obrigando-o a tornar-se um pesquisador, mesmo que incipiente. Por outro lado, professores de educação básica e professores do ensino superior nem sempre são especialistas em pesquisa em História da Ciência ou em pesquisa sobre o uso da modelagem matemática a partir da Simulação Computacional, ou de ambas.

De acordo com Martins (2004), citando o currículo nacional de Ciências da Grã-Bretanha, é muito comum entre professores e estudantes de todos os níveis adotar uma visão empirista da Ciência, segundo a qual os cientistas fazem suas observações sem necessariamente influenciar o objeto de sua pesquisa ou serem influenciados durante o processo de pesquisa, isentos de qualquer influência externa, como se as crenças religiosas, ideologias políticas, conduta ética ou qualquer pensamento teórico próprio e de outros cientistas não o afetasse no momento de chegar às próprias conclusões ou realizar suas medidas.

De acordo com Martins (2004), citando Pumfrey (1991), alguns aspectos são fundamentais para se estabelecer a relação objetiva entre a natureza da Ciência e a sua História, de forma que os estudantes possam adquirir habilidades que permitam interpretar de forma racional um fato científico, sem serem enquadrados nas prerrogativas errôneas da concepção científica. Alguns pontos devem ser transmitidos aos estudantes para que estes possam ser capazes de interpretar de maneira autônoma uma concepção ou teoria científica:

- 1) A observação inicial não é possível sem ideias pré-existentes.
- 2) A natureza não apresenta evidências suficientes para que seja interpretada sem ambiguidades.
- 3) As teorias científicas não são induções, mas hipóteses imaginadas pelos cientistas e necessariamente vão além das observações.
- 4) As teorias científicas não podem ser provadas.
- 5) O conhecimento científico não é estático e convergente, mas mutável e aberto.
- 6) O treino é um componente essencial para se compreender a Ciência.
- 7) O raciocínio científico é influenciado por fatores sociais, morais, espirituais e culturais.
- 8) Os cientistas não elaboram deduções incontestáveis, mas fazem julgamentos complexos.
- 9) Desacordo é sempre possível. (Martins, 2004, p. 502)

O item 5 é uma característica específica do próprio processo civilizatório, onde, à medida que as sociedades evoluem e novas relações econômicas e sociais são estabelecidas, novas técnicas e descobertas científicas podem trazer novos modelos teóricos, novos resultados experimentais e conseqüentemente uma visão mais ampla da ciência e talvez seja capaz de colocar em dúvida os métodos empregados até então nas descobertas científicas.

¹ Irmão de Louis de Broglie, prêmio Nobel de Física em 1929 pela descoberta das propriedades ondulatórias da matéria, Maurice foi o secretário do Conselho, sendo responsável juntamente com Paul Langevin pela publicação dos artigos e rapports do encontro.

O debate em torno da hipótese de Planck da radiação do corpo negro não pode ser visto como algo meramente trivial a ser ensinado a partir de uma equação que é apresentada no ensino básico tendo somente três letras, sendo uma delas constante e as outras duas variáveis. Muitas vezes, a equação é utilizada como um recurso de quantificação numérica sem qualquer processo de contextualização histórica sobre a síntese matemática que permitiu a Max Planck (1900) e (1901) introduzir uma nova constante na física a partir do conceito de Entropia introduzido por Clausius e formulado matematicamente por Boltzmann, iniciando a separação completa da mecânica clássica com a nova mecânica que estava surgindo. Esta expressão “simples” não pode ser utilizada no ensino e na aprendizagem da física sem que haja uma contextualização histórica, pois, ela está intimamente vinculada à equação do calor sensível, cuja constante do calor específico é uma lei empírica obtida por Dulong e Petit em 1819 (Fox, 1968).

$$Q = mc\Delta T \quad (1)$$

$$\varepsilon = h\nu \quad (2)$$

Estas duas equações, em nada triviais, possuem uma identidade histórica que raramente é explorada pelo professor de física durante o processo de ensino e de aprendizagem. A equação (1) diz respeito ao calor sensível que um corpo de massa m pode receber ou ceder em um processo de trocas de calor com outros corpos em um sistema térmico, já a equação (2) relaciona a frequência de um oscilador harmônico com a energia trocada pelo oscilador e o meio externo. Ambas têm em comum o fato de terem sua origem a partir do conceito de calor, ou seja, a partir da Termodinâmica. Os livros didáticos de física da educação básica no Brasil tem o hábito de iniciar o ensino da Física Moderna após o eletromagnetismo e este aspecto pode induzir a cometermos o erro de achar que historicamente a Física Moderna, se considerarmos que esta inicia-se nas concepções de Planck, teve suas origens no eletromagnetismo de Maxwell, que sabemos ser parcialmente verdade, pois de acordo com Khun (1978), Planck ao mudar seu programa de pesquisa do Eletromagnetismo para a Termodinâmica conseguiu, num “ato de desespero” conceber uma lei de distribuição do espectro de frequência da radiação do corpo negro.

$$u(\nu, T) = \frac{b\nu^3}{e^{a\nu}-1} \quad (3)$$

Existe por trás da equação (2) um grande desenvolvimento teórico, experimental, mudança de concepção, tentativa de encontrar uma rota alternativa para explicar a radiação do corpo negro, debates entre jovens pesquisadores e cientistas com grande reputação no meio acadêmico que é desnecessário insistir na sua importância. Esta equação expressa o comportamento quantizado de um oscilador harmônico adotado por Planck a partir da mudança em seu programa de pesquisa (Khun, 1978), abandonando as concepções eletromagnéticas de Maxwell e se apropriando da termodinâmica, da estatística e da probabilística de Ludwig Boltzmann.

Em um artigo de 1957 – Propensões, Probabilidades e Teoria Quântica, do livro – *Textos Escolhidos*, Karl Popper (2010), se propõe a elucidar de forma sucinta algumas teses e como defendê-las, tendo como base a premissa conceitual da *Propensão*². O aparecimento de termos mais complexos necessita de revisão da linguagem da ciência e de novas metodologias aplicadas ao ensino e à aprendizagem. Não podemos esperar compreender os fenômenos microfísicos, que experimentalmente contradizem a Mecânica Clássica ou Newtoniana, utilizando os mesmos termos e conceitos que Newton utilizou ou criou. As teses de Popper são:

1) Solucionar o problema de como interpretar a teoria das probabilidades é fundamental para interpretar a teoria quântica, uma teoria probabilística. 2) A ideia de interpretação estatística é correta, mas carece de clareza. 3) Como consequência dessa falta de clareza, a interpretação costumeira das probabilidades na física oscila entre dois extremos: uma interpretação objetivista, puramente estatística, e uma interpretação subjetivista, que destaca o nosso conhecimento incompleto ou a informação disponível. 4) Na interpretação ortodoxa de Copenhagen sobre a teoria quântica encontramos a mesma hesitação entre uma interpretação objetivista e outra subjetivista: a famosa intromissão do observador na física. 5) Em contraste com tudo isso, proponho uma interpretação estatística revista ou reformada, a interpretação como propensão. 6) A interpretação baseada na propensão é puramente objetivista. Elimina a oscilação entre as interpretações objetivista e subjetivista e, com ela, a intromissão do sujeito na ciência. 7) A ideia de propensões é “metafísica” no mesmo sentido em que as forças ou os campos de força são metafísicos. 8) Ela também é “metafísica” em outro sentido: fornece um programa coerente para as pesquisas físicas. (Popper, 2010, p. 197)

² Popper (1983) discute em detalhes o conceito de Propensão em relação ao uso epistêmico do conceito de probabilidade e da estatística na Mecânica Quântica. Este aspecto é essencial do ponto de vista da aprendizagem das ciências naturais e sua filosofia.

Estes 8 tópicos definidos pelo filósofo da Ciência Karl Popper, argumentos da filosofia da Física, além dos 9 itens elencados pelo historiador da Ciência Roberto Martins formam um conjunto de razões epistemológicas que contribuem com a estrutura psicossocial das relações entre o ensino e a aprendizagem no ensino de física e das outras componentes das ciências da natureza, em outras palavras, é impossível a apreensão dos conceitos produzidos pela ciência, pelos estudantes, sem que o processo pedagógico esteja conectado com as relações formais e metodológicas do ensino de ciências na relação com o professor.

Dito de outra forma, é necessário que o professor, na prática da transposição didática no ensino da sua disciplina específica, esteja em constante aprendizagem pela prática da pesquisa. É natural que ao longo deste processo, o professor utilize variadas formas de conduzir os estudantes ao aprendizado correto de um determinado conceito, mas, ele deve se convencer ou ser convencido de que a metodologia da ciência e o método aplicado durante as relações de ensino e de aprendizagem estejam aproximadamente corretos. A razão como premissa do ato de fazer ciência é em sua essência um ato anárquico (Feyerabend, 1975) dissociado do próprio pensamento. Assim temos o processo filosófico na construção da metodologia científica, essencial para a atribuição da hipótese na observação de um determinado fenômeno.

III. A TEORIA QUÂNTICA E O CALOR ESPECÍFICO DOS CORPOS MATERIAIS

Historicamente, observamos que existe uma conexão importante entre a descoberta da lei de Dulong e Petit e a realização do Conselho de Solvay de 1911. Neste período compreendido entre o ano de 1819, ano da publicação do trabalho: *Sur quelques points importants de la théorie de la chaleur* (Sobre alguns pontos importantes da teoria do calor) (Petit e Dulong, 1819), pelos cientistas franceses, muitos fatos históricos foram construídos para a ciência, pelos cientistas. Neste período um episódio importante sobre a interpretação ondulatória do calor, relatado por Stephen Brush (1970) foi fundamental para que a interpretação das leis termodinâmicas (Rosa, 2019), sofressem modificações com os trabalhos de Ludwig Boltzmann (Boltzmann, 2012) e conseqüentemente formassem as bases para a formulação teórica da radiação do corpo negro³ por Planck em 1900. As contribuições teóricas e experimentais de Macedônio Meloni e Leopoldo Nobili na década de 1830 (Barr, 1960), em defesa de uma interpretação teórica da propagação ondulatória do calor (Brush, 1970) foram fundamentais para que a partir do debate entre concepções corpusculares e ondulatórias, percebêssemos a criatividade experimental e o argumento lógico racional na construção teórica.

Nesta mesma linha de raciocínio de que o debate, a polêmica e a controvérsia científica tendem a se ajustar ou a se oporem radicalmente à medida que a história da ciência avança, onde novos resultados são obtidos experimentalmente, novas técnicas e metodologias de medição, a partir de um modelo teórico fornecem melhores explicações e previsões. O caso do calor específico pode ser considerado como um exemplo de resultado experimental que sofreu ajuste teórico passando por Boltzmann, o primeiro físico-matemático a demonstrar a lei dos calores específicos aplicando a Teoria Cinética dos Gases (Laranjeiras, 2002). Se traçarmos uma linha do tempo simplificada poderíamos mostrar que a partir da descoberta da lei de Dulong-Petit em 1819, teríamos na Tese de Doutorado de Boltzmann (Boltzmann, 2012), a primeira explicação teórica para a lei, em seguida a aplicação da hipótese de Planck por Einstein em 1907 para explicar o comportamento térmico dos corpos sólidos (Einstein, 1906), passando pela justificativa teórica à lei de Planck da radiação do corpo negro por Poincaré em 1912 (Poincaré, 1912) e finalizando esta etapa no trabalho de Peter Debye, também em 1912 (Debye, 1912).

São 93 anos de evolução dos conceitos da física, de avanço na História da Física e de suas interpretações, cercadas de polêmicas, de controvérsias e de pesquisadores do futuro que voltaram para o passado para colocar os seus olhares e redigir a bibliografia secundária a partir das fontes primárias, dando suas contribuições à interpretação histórica. Neste sentido, o professor de física ou de ciências da educação básica ou superior precisa se apropriar destes elementos e saber decidir em que momento ou que texto histórico seria fundamental durante a transposição didática de um determinado conceito das ciências naturais.

Tendo este aspecto como foco principal da exposição deste artigo, vamos discutir o debate que ocorreu entre Jean de Boissoudy e Edmund Bauer em 1913 acerca da explicação do comportamento térmico do calor específico dos corpos sólidos a partir dos recém estabelecidos princípios da Teoria Quântica e como a Simulação Computacional pode ampliar a compreensão conceitual do estudante com elementos da computação gráfica moderna que possibilitam manipular códigos e estruturas matemáticas, como gráficos, funções, figuras geométricas e outras formas computaci-

³ Corpo negro: pode ser definido como um meio ou uma substância que absorve toda energia incidente sobre ele, nenhuma parte da radiação incidente é refletida ou transmitida. É uma classe de corpos que emite um espectro de caráter universal, ou seja, independente do material e da forma do corpo, seu comportamento físico depende somente da temperatura. O estudo da teoria da radiação do corpo negro teve seu início a partir de 1859 com os trabalhos de Gustav Robert Kirchhoff. (Rosa, 2004)

onais sem que se possa cometer erros anacrônicos e prejudicar a sequência histórica em que os fatos se desenvolveram e nem utilizar conceitos atuais para interpretar fatos do passado, característica do chamado whiggismo de Herbert Butterfield (1965).

IV. JEAN DE BOISSOUDY E EDMOND BAUER – UM DEBATE DE IDEIAS E CONCEPÇÕES TEÓRICAS

Jean de Boissoudy⁴ escreveu três artigos em 1913 (Boissoudy, 1913a), (Boissoudy, 1913b), (Boissoudy, 1913c) sobre a nova teoria que estava surgindo: 1) Sur la loi du rayonnement noir et la théorie des quanta (Sobre a lei da radiação negra e a teoria dos quanta), 2) Sur une nouvelle forme de la loi du rayonnement noir et de l'hypothèse des quanta (Sobre uma nova forma da lei da radiação negra e a hipótese quântica e Sur la loi du rayonnement noir. Réponse à M. E. Bauer' (Sobre a lei da radiação negra. Resposta ao senhor E. Bauer), submetidos à revista Comptes Rendus respectivamente em 01 de janeiro de 1913 e 03 de março de 1913, porém, publicados somente em 05 de maio de 1913 e 10 de março de 1913, respectivamente e, ao Journal de Physique.

Ambos tratam da teoria dos quanta de Planck e da sua relação com os calores específicos dos corpos materiais. Ele também analisa as implicações que nasceram das demonstrações de Poincaré (1912) sobre a necessidade e a suficiência (Prentis, 1995) da hipótese de Planck. Edmond Bauer⁵, contemporâneo de Boissoudy, à época com 33 anos, submeteu em 01 de janeiro de 1913 para publicação no periódico Journal de Physique et le Radium, um artigo de 9 páginas com o título: Sur la loi du rayonnement noir et la théorie des quanta. Remarques sur un travail de M. J. de Boissoudy (Sobre a lei da radiação negra e a teoria dos quanta. Observações sobre uma obra de M. J. de Boissoudy) (Bauer, 1913b), no qual critica o primeiro artigo de Boissoudy. Uma análise comparativa entre a posição de Boissoudy em relação ao artigo de Poincaré com a respectiva crítica de Bauer é interessante do ponto de vista da aplicação da História da Ciência na aprendizagem da Física e como jovens pesquisadores, tentam demarcar território com argumentos que possam iniciar o próprio processo de aquisição de autonomia científica, preparando o terreno para interferências subjetivas em relação aos objetivos da ciência, evoluir.

Boissoudy inicia sua nota de quatro páginas mencionando a hipótese dos quanta de Planck demonstrada e discutida inicialmente por Poincaré em uma nota de 04 de dezembro de 1911 (Poincaré, 1911). Poincaré afirmava nesta nota que a lei da radiação do corpo negro, de acordo com Planck, leva a uma lei da radiação onde a energia é finita, sendo necessária a introdução de uma função W , de tal maneira que $Wd\eta$ representa a probabilidade para que a energia de um ressonador esteja distribuída entre η e $\eta + d\eta$, com uma descontinuidade em $\eta = 0$. Boissoudy faz a seguinte pergunta como uma hipótese: “Qual seria a lei da radiação negra se, desconsiderando a hipótese de Planck, supuséssemos que essa descontinuidade é reduzida ao mínimo, ou seja, existe apenas para a transição da energia zero para uma energia finita?”

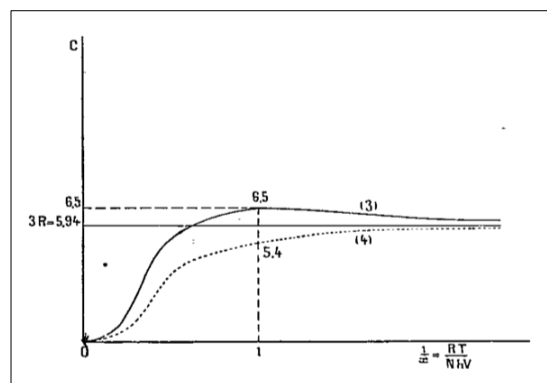


FIGURA 1. Gráfico representando o comportamento do calor específico. Fonte: Boissoudy, 1913a, p. 765.

⁴ Jean de Boissoudy, publicou um livro em que critica as noções de ether: *Lês actions a distance*, e outros dois livros em que discute noções filosóficas da Física Teórica e que poderiam contribuir com o entendimento da filosofia da Física - *Deux réalités, espace et matière dans l'unité du Continu*, Alcan, 1936 e *Le Phénomène-révolution*, Presses Universitaires de France, 1940.

⁵ Edmond Bauer (1880-1963), foi assistente de Jean Perrin e professor de físico-química em Paris. Escreveu vários livros, em especial uma publicação sobre o ether e a relatividade: *Critique de notions d'ether, d'espace et de temps. Cinématique de la relativité*, publicado em 1932. Publicou também outro livro sobre teoria de grupo e mecânica quântica: *Group Theory – The Application to Quantum Mechanics*. Participou das 4ª, 6ª e 7ª Conferência de Solvay.

De acordo com o gráfico acima e, de acordo com a hipótese proposta por Boissoudy, a energia de um ressonador, ao invés de ser um múltiplo inteiro do elemento de energia $h\nu$, seria muito maior ou nula. Supondo que o ressonador passe bruscamente de um valor finito, que pode ser igual a $h\nu$ e, que para um valor acima de $h\nu$, o ressonador se comporte de maneira normal, ele poderá absorver ou perder energia de uma forma contínua. Então, a ideia de Boissoudy diverge completamente da tese defendida por Poincaré de 1912 em sua defesa da necessidade e da suficiência da hipótese de Planck e da descontinuidade quântica da natureza (Prentis, 1995). O resultado de Einstein de 1907 ao utilizar a hipótese de Planck é expressivo, porque o resultado teórico obtido por Planck estava de acordo com os experimentos de Rubens e Kurlbaum, Lummer e Pringsheim (Planck, 1901).

A equação do calor específico obtida por Boissoudy difere da equação de Einstein de 1907⁶ (Einstein, 1906), de acordo com as fórmulas abaixo. Enquanto, Einstein apresenta duas tabelas com os cálculos dos valores observados experimentalmente por átomo e por substância, obtidos com a sua fórmula, Boissoudy não apresenta estes mesmos cálculos para que se possa comparar com os resultados obtidos por Einstein. Esta comparação é importante para verificar a validade da precisão da fórmula teórica.

$$c = 3R \frac{x^2 + x + 1}{e^x} \quad (\text{Equação de Boissoudy}) \quad (4)$$

$$c = 3R \frac{x^2 e^2}{(e^x - 1)^2} \quad (\text{Equação de Einstein}) \quad (5)$$

$$c = 5,94 \sum \frac{e^{\frac{\beta\nu}{T}} \left(\frac{\beta\nu}{T}\right)^2}{\left(e^{\frac{\beta\nu}{T}} - 1\right)^2} \quad (\text{Equação do artigo original em alemão}) \quad (6)$$

Neste ponto pode-se trabalhar com os estudantes o aspecto histórico da formulação científica entre Einstein e Boissoudy e inserir os conceitos da matemática, da química, da biologia e os aspectos computacionais, organizando um trabalho multidisciplinar. Para um professor do Ensino Médio que não tenha experiência com a pesquisa às fontes históricas primárias, no Brasil existe uma tradução do artigo de Einstein direto do alemão (Einstein, 2005), que pode ser trabalhado como referência fundamental, embora, conceitos matemáticos de derivada e integral possam apresentar dificuldades para um estudante de ensino médio de escola pública, porém, escolas particulares no mesmo nível de aprendizagem podem oferecer o curso de cálculo diferencial e integral extracurricularmente. Em países onde a ciência tem forte influência sobre o desenvolvimento econômico e social, a grade curricular pode apresentar tópicos avançados em ciência e tecnologia, que necessitam da habilidade em teoria matemática avançada.

O gráfico abaixo foi apresentado por Einstein em seu artigo de 1907 e mostra a contribuição estrutural da molécula da substância para o seu próprio calor específico. Einstein mostrou que os valores obtidos experimentalmente até o momento não diferiam em quase nada dos valores obtidos da Teoria Cinético Molecular, ou seja, o calor específico do átomo na substância está de acordo com a teoria construída por Boltzmann.

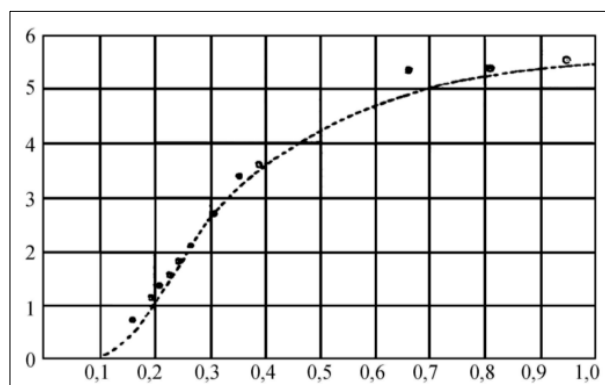


FIGURA 2. Gráfico representando o comportamento do calor específico. Fonte: Einstein, 1907, p. 65⁷.

⁶ Este artigo histórico foi enviado para publicação por Einstein e foi recebido pela revista Annalen der Physik em 9 de novembro de 1906 sendo publicado em 1 de janeiro de 1907. Cronologicamente, Einstein pode ter trabalhado neste artigo em 1906, no mesmo ano em que Poincaré publicou importantes trabalhos sobre a dinâmica do elétron e sobre teoria cinética dos gases, que podem ter influenciado na publicação de Einstein de 1907.

⁷ Optamos pela utilização da fonte histórica secundária, ou seja, a tradução para o português-Brasil.

Em um processo de ensino e aprendizagem dos conceitos da Física em que se quer trabalhar com os estudantes os aspectos históricos e computacionais, seria necessário que um professor de ciências da natureza pudesse ser treinado em pesquisa com História da Ciência e tivesse um aprimoramento em modelagem matemática computacional. Este aspecto seria relevante como elemento facilitador pelo professor no momento de escolher qual seria o melhor objeto de aprendizagem a ser utilizado.

Utilizaremos como exemplo de aplicação a simulação computacional do sólido de Einstein desenvolvido pelo programa Mathematica, cuja versão online pode ser encontrada no site: <https://www.wolfram.com/>, através do app: <https://www.wolframcloud.com/?source=nav>. A simulação computacional, utilizada como objeto de aprendizagem pode permitir ao estudante trabalhar várias possibilidades observacionais, despertando nele algo comum ao pensamento einsteiniano, a intuição. Abaixo, as simulações desenvolvidas por Enrique Zeleny (março de 2011) (sólido de Einstein) e Kallol Das (St. Aloysius College, Jabalpur, India) (março de 2011) podem ser utilizadas para iniciar o debate sobre a estrutura molecular da matéria nos processos térmicos ou concluir uma explicação.

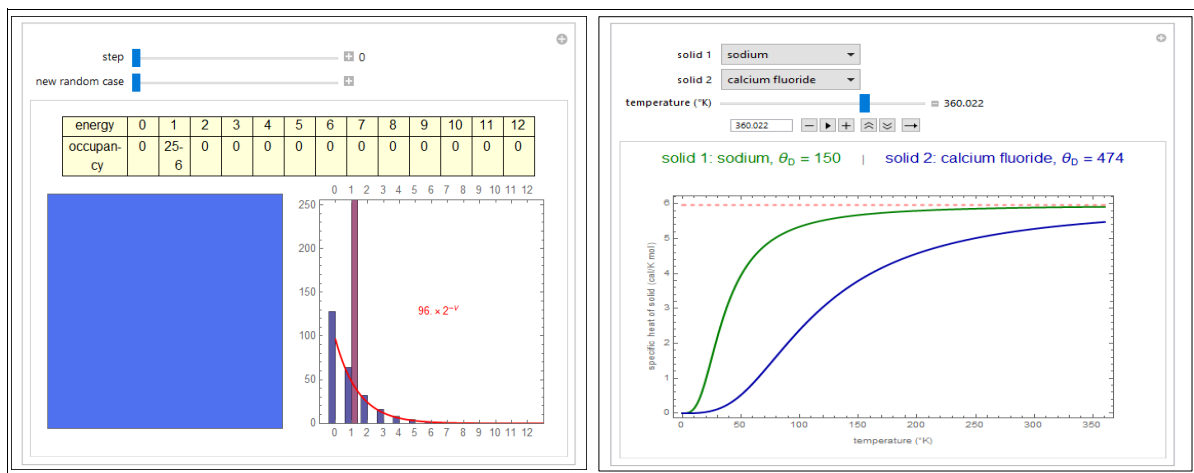


FIGURA 3. Simulações computacionais que podem ser utilizadas como objeto de aprendizagem pelo professor de Física durante a explicação sobre a capacidade térmica das substâncias materiais. À esquerda a simulação do sólido de Einstein (<https://demonstrations.wolfram.com/EinsteinSolid/>) e à direita a simulação da aproximação de Peter Debye publicada em 1912 (<https://demonstrations.wolfram.com/HeatCapacityOfSolidsInTheDebyeApproximation/>).

A crítica aos artigos de Poincaré de 1911 (nota curta) e 1912 (artigo completo) apresentada por Boissoudy, estava no fato de que não havia necessidade de admitir descontinuidade para a radiação na interação com a matéria e nem mesmo isoladamente, pois, seus resultados estavam de acordo com os cálculos publicados por Einstein em seu artigo de 1907. Porém, o físico Edmond Bauer adotou posição de defesa de Poincaré no seguinte aspecto: uma análise criteriosa da hipótese de Planck feita por Poincaré, inevitavelmente obrigaria Boissoudy a levar em consideração o teorema de Liouville, um dos argumentos fundamentais de Poincaré para garantir a descontinuidade da radiação. Bauer, provavelmente considerava que a argumentação de Boissoudy de que ao interpretar a teoria da radiação do corpo negro de Planck, sem descontinuidades, afirmando que a lei de Einstein é apenas um caso particular da lei de Dulong-Petit, aplicável somente para uma faixa específica de temperatura, o que seria um equívoco. Bauer foi assistente de Jean Perrin, que publicou importantes trabalhos mostrando a realidade molecular a partir do movimento Browniano.

O artigo de Bauer (1913b) é relativamente curto, mas, denso do ponto de vista matemático e os detalhes estão em (Rosa, 2019). Um artigo mais extenso, fruto das suas pesquisas sobre a radiação do corpo negro detalha aspectos importantes sobre a estrutura da matéria e a interação com a radiação (Bauer, 1913a). Neste artigo curto, porém, destacamos a defesa que ele fez à publicação de Poincaré de 1912, apontando também para a necessidade da discretização da energia radiante e da interpretação estatística das leis da termodinâmica introduzidas por Boltzmann a partir da noção de entropia.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo procuramos enfatizar a importância no processo de formação e atuação dos professores de ciências da natureza, inserindo os fundamentos que contribuem com a abordagem CTS a partir dos princípios da filosofia da ciência, da história da ciência, da modelagem matemática a partir da simulação computacional, embora, durante as

relações entre o ensino e a aprendizagem da física a experimentação em laboratório e a sociologia da ciência contribuem com o confronto de ideias. Talvez, o embate travado por Boissoudy e por Bauer não tenha o carisma das discussões filosóficas entre Bohr e Einstein acerca do paradoxo EPR, diretamente vinculado à interpretação epistemológica da Teoria Quântica, mas, contribui para o entendimento da conexão entre a lei de Dulong-Petit, do calor específico dos corpos materiais e a introdução da hipótese de Planck na Física.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP).

REFERÊNCIAS

Barr, E. S. (1960). Historical Survey of the Early Development of the Infrared Spectral Region, *American Journal of Physics*, 28(1), 42-54. doi: 10.1119/1.1934975.

Bauer, E. (1913a). Recherches sur le Rayonnement, *Annales de Chimie et de Physique*, 29(8), 5-69.

Bauer, E. (1913b). Sur la loi du rayonnement noir et la théorie des quanta. Remarques sur un travail de M. J. de Boissoudy, *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 3(1), 641-649. doi: 10.1051/jphystap:019130030064101.

Boissoudy, J. (1913a). Sur la loi du rayonnement noir et la théorie des quanta. *Comptes Rendus*. 156, 765-768.

Boissoudy, J. (1913b). Sur une nouvelle forme de la loi du rayonnement noir et de l'hypothèse des quanta. *Comptes Rendus*. 156, 385-396.

Boissoudy, J. (1913c). Sur la loi du rayonnement noir. Réponse à M. E. Bauer. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 3(1), 649-651.

Brush, S. G. (1970). The wave theory of heat: A forgotten stage in the transition from the caloric theory to thermodynamics, *The British Journal for the History of Science*, 5(2), 145-167.

Butterfield, H. (1965) *The Whig Interpretation by Herbert*. New York: The Norton Library.

Das, K. (2011). <https://demonstrations.wolfram.com/HeatCapacityOfSolidsInTheDebyeApproximation/>.

Debye, P. (1912). Zur Theorie der spezifischen Wärmen, *Annalen der Physik*, 344(14), 789-839.

Dulong, P. L., Petit, A. T. (1819). Sur quelques points importuns de la théorie de la chaleur, *Annales de Chimie et de Physique*, X, 395-413.

Einstein, A. (1906). Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme, *Annalen der Physik*, 327(1), 180-190.

Feyerabend, P. (1975). *Contra o Método*. Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves.

Einstein, A. (2005). A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27(1), 63-67. doi: 10.1590/s1806-11172005000100006.

Fox, R. (1968). The background to the discovery of Dulong and Petit's law, *The British Journal for the History of Science*, 4(1), 1-22.

Jagdish, M. (1975). *The Solvay on Conferences on Physics - Aspects of the development on Physics since 1911*. Boston: D. Reidel Publishing Company.

- Popper, K. (2010). *Textos Escolhidos*. Rio de Janeiro: Editora Contraponto, Editora PUC-Rio.
- Khun, T. S. (1978). *Black Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*. Chicago&London: Oxford University Press.
- Boltzmann, L. (2012). *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Fritz Hasenöhr (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Laranjeiras, C. C. (2002). *O programa de pesquisa de Ludwig Boltzmann para a mecânica estatística: uma reconstrução racional*. USP - Universidade de São Paulo.
- Martins, R. A. (2004). Hipóteses e interpretação experimental: a conjectura de Poincaré e a descoberta da hiperfosforescência por Becquerel e Thompson, *Ciência & Educação (Bauru)*, 10(3), 501-516. doi: 10.1590/s1516-73132004000300013.
- Planck, M. (1900). Entropie und Temperatur strahlender Wärme, *Annalen der physik*, 36(4), 625-792.
- Planck, M. (1901). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum, *Annalen der Physik*, 309(3), 553-563. doi: 10.1002/andp.19013090310.
- Poincaré, H. (1911). Sur la théorie des quanta, *Comptes Rendus*, 153, 1103-1108.
- Poincaré, H. (1912). Sur la théorie des quanta, *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 2(1), 5-34.
- Prentis, J. J. (1995). Poincaré's proof of the quantum discontinuity of nature, *American Journal of Physics*, 64(4), 339-350.
- Pumfrey, S. (1991). History of science in the National Science Curriculum: A critical review of resources and their aims', *The British Journal for the History of Science*, 24(1), 61-78. doi: 10.1017/S0007087400028454.
- Rosa, P. S. (2019). *Fundamentação Termodinâmica da Teoria Quântica: Subsídios Históricos, de Boltzmann a Poincaré, e Computacionais para o Ensino de Ciências*.
- Rosa, P. S. (2004). Louis de Broglie e as ondas de matéria, *Thesis*. Available at: <http://www.ghtc.usp.br/server/Teses/Pedro-Sergio-Rosa.pdf>.
- McCormach, R. (1967). Theory the Quantum, *Chicago Journals - History of Science Society*, 58(1), 37-55.
- Solvay, I. (1912). *La Théorie Du Rayonnement et les Quanta: Rapports et Discussions de la Réunion Tenue à Bruxelles*. Edited by M. de Broglie. P. Langevin. Paris: Gauthiers-Villars.
- Zeleny, E. (2011). <https://demonstrations.wolfram.com/EinsteinSolid/>