

“O homem erra enquanto se esforça”: Justificando o quantum de ação⁺⁺

*Marinês Domingues Cordeiro*¹

Departamento de Física – Universidade Federal de Santa Catarina

*Rodrigo Guimarães Soares*¹

Mestrando – Programa de Pós-Graduação em Educação Científica
e Tecnológica

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis – SC

Resumo

“Um ato de desespero” é a citação mais associada a Planck em relação ao seu postulado. Não sem razão: ela é representativa do que diz respeito ao caráter simultaneamente chocante e esclarecedor do quantum da ação. Ao enfatizar tal sentimento, esta citação parece pintar o esforço científico em cores vivas, subjetivas e, portanto, irracionais. A Palestra Nobel de Planck, por mais rica que seja em expressões de surpresa, pode, de forma interessante e irônica, levar-nos a uma imagem muito diferente da ciência; através de seu processo de racionalização, ele enuncia as evidências, métodos e valores que tiveram que ser manipulados para que o quantum de ação mostrasse seu significado e potencial. A perspectiva de Laudan da ciência como uma atividade racional e de resolução de problemas concede um contexto interessante a esta racionalização; articulando o modelo às palavras de Planck, pode-se ver que, embora as hipóteses científicas possam por vezes ser quase inacreditáveis e a subdeterminação possa tornar a ciência desesperante, é precisamente no erro e na divagação que a racionalidade pode residir. A Conferência Nobel de Planck pode ser uma fonte interessante para o ensino por casos históricos, porque associa aspectos cognitivos àqueles interpretados como humanos, num episódio histórico já bem recebido no ensino de física.

⁺ “Man errs as long as he strives”: Justifying the quantum of action

^{*} Recebido: 8 de fevereiro de 2024.

Aceito: 29 de agosto de 2024.

¹ E-mails: marinesdc@outlook.com; rodrigosoares.rgs@gmail.com

Palavras-chave: *Racionalidade; Planck; Subdeterminação; Ensino de Caso-História.*

Abstract

“An act of despair” is the quotation most associated with Planck regarding his postulate. Not without a reason: it is representative of what concerns the simultaneously shocking and clarifying character of the quantum of action. On emphasizing such a feeling, this quotation seems to paint the scientific endeavor in vivid subjective, and thus irrational, colors. Planck’s Nobel Lecture, however rich in expressions of awe, can interestingly and ironically lead us to a very different image of science; through his process of rationalization, he enunciates the evidences, methods, and values that had to be rigged for the quantum of action to show its meaning and potential. Laudan’s perspective of science as a problem-solving, rational activity concedes an interesting background of this rationalization; articulating the model to Planck’s words, one can see that, even though scientific hypotheses can sometimes be almost unbelievable and underdetermination can render science despairing, it is precisely in erring and wandering that rationality can reside. Planck’s Nobel Lecture can be an interesting source for story-case teaching, because it associates cognitive aspects to those rendered as human, in a historical episode already welcomed in physics teaching.

Keywords: *Rationality; Underdetermination; Case-Based Teaching; Nobel Prize.*

I. Introdução

Para compreender o que e como vemos, podemos abordar o fenômeno da visão classicamente. Ao compreender a luz como uma onda eletromagnética, é possível dizer que nossa visão de objetos não luminescentes, como nós mesmos, é um produto da reflexão. O Sol emite ondas eletromagnéticas que chamamos de luz; quando interagem com o corpo que vemos, algumas dessas ondas são absorvidas, refratando nos corpos irradiados. Parte das ondas que o Sol emite, isto é, alguns comprimentos de onda específicos, são refletidas e então encontram nossos olhos, que enviam sinais aos nossos cérebros, para que formulem representações. Por mais apropriada para a explicação de interações que executamos com fenômenos cotidianos, essa explicação não exaure o assunto. Por exemplo, por que o Sol é considerado um emissor e nossos corpos, refletores? Por que as temperaturas dos corpos parecem aumentar quando eles

são irradiados? Por que alguns corpos mostram diferenças em cor com o aumento de suas temperaturas?

Tais questões associam efeitos térmicos a efeitos ópticos (ou seja, eletromagnéticos). Há uma razão para isso: efeitos térmicos podem também ser interpretados através do eletromagnetismo clássico. O calor é uma forma de onda eletromagnética. Portanto, quando sujeitos a aumentos de temperatura, quando recebem energia, os corpos não apenas refletem a luz que os irradia, mas também passam a emitir radiação, cuja fonte são suas próprias energias internas. Mas não são necessariamente as temperaturas em aumento que tornam um corpo um emissor; de fato, corpos emitem ondas até mesmo em condições normais de temperatura. A diferença é que, em tal ponto, essa energia é invisível, por estar predominantemente em frequências infravermelhas, que não são capturadas a olho nu. Assim, com temperaturas em aumento, há um deslocamento da radiância espectral, o que quer dizer que um corpo passa a emitir energia em frequências cada vez maiores, passando pela seção visível do espectro eletromagnético. Isso explica, por exemplo, a incandescência visível no ferro e outros materiais que aguentam aumentos de energia.

Como pode ser visto, energia tem um papel fundamental na termodinâmica e no eletromagnetismo; por outro lado, matéria e movimento são os conceitos paradigmáticos na mecânica. Mas considerações energéticas certamente também têm seu papel na mecânica. Da termodinâmica, sabe-se que a energia não pode ser simples e espontaneamente criada; ela tem que ter alguma fonte. A matéria torna-se uma parte importante desta equação, porque são as variações nela, seja em seu movimento ou em suas constituintes, que fornecem a energia na forma de calor, luz visível ou outros comprimentos de onda. Dessa forma, é essencial compreender que intrincadas relações entre energia e matéria ocorrem em todos os corpos. A visão clássica de simples reflexões e refrações não oferece um panorama completo dos corpos emissores; naturalmente, o poder metodológico da ciência evoluiu muito desde a óptica e a mecânica newtonianas e novos experimentos e modelos emergiram desde que o eletromagnetismo se consolidou como um campo da física.

Apesar de não ser um consenso no começo do século 20, atualmente compreendemos que todos os corpos são compostos de partículas que, a depender de condições de pressão e temperatura, formam átomos e moléculas. Voltando à questão latente acerca das interações entre energia e matéria, é fundamental considerar que os corpos são constituídos por um enorme número de partículas e que qualquer estudo que associe energia e matéria deve considerar efeitos macroscópicos como produtos de estados microscópicos. É precisamente aí que o interessante campo da mecânica estatística – campo desenvolvido no final do século 19 – entra. É a partir de considerações estatísticas que outro conceito central da termodinâmica – entropia – passa a preencher a lacuna entre as descontinuidades demandadas pela matéria e a aparente continuidade da energia. Compreendida na termodinâmica clássica como uma medida da energia indisponível para trabalho mecânico, a entropia costumava ser percebida como uma estimativa da irreversibilidade. Apesar disso, a partir das descontinuidades provocadas pela

matéria, a mecânica estatística promove uma mudança de perspectiva na definição de entropia: essa desordem, uma medida para macroestados energéticos, é simples e estatisticamente válida, e não um absoluto.

Ambas as visões para a entropia disputaram a interpretação de fenômenos termodinâmicos até o fim do século 19. Naquele mesmo período, surgiu um problema para os físicos: a radiação do corpo negro. A definição newtoniana de um corpo negro era a de um corpo de cor negra, aquele que não reflete a luz que sobre ele incide e, portanto, um absorvedor perfeito e um não emissor. O eletromagnetismo alterou essa definição: um corpo negro seria um corpo que absorveria todas as ondas eletromagnéticas recebidas; assim, qualquer onda emitida por ele teria a energia interna do corpo como sua fonte. No eletromagnetismo clássico, um corpo negro é então melhor compreendido como um emissor perfeito.

Leis empíricas baseadas no eletromagnetismo clássico e na termodinâmica foram então arranjadas, a fim de compreender a radiação espectral do corpo negro. Físicos elaboraram expressões para altas e baixas energias. Contudo, para qualquer dada temperatura, aquelas expressões não mostravam concordância entre si. Um estudo analítico melhor era necessário e aí entra a contribuição de Max Planck. Apesar de conseguir resolver o problema com uma interpolação muito astuta, baseada na sua experiência com as concepções clássicas de entropia e energia, Planck não se contentou com a aparente falta de significado físico de sua expressão. Continuando seu empreendimento, o físico descobriu o quantum de ação, embora não o tenha associado com a quantização de energia inicialmente.

Não é surpresa que Planck seja considerado aquele que resolveu o problema de radiação do corpo negro. De seu quantum de ação, contudo, pode-se dizer que Planck semeou uma anomalia que, por sua vez, promoveu a colheita da mecânica quântica. Reinterpretado por Einstein, o quantum de ação logo viria a providenciar um novo significado para o conceito de energia e desafiar a teoria eletromagnética. Essa dificuldade fica muito clara quase duas décadas mais tarde, na Conferência Nobel de Planck.

Ao analisar a Conferência Nobel de Planck, esse artigo busca mostrar seu trabalho tortuoso para a compreensão do significado de sua interpolação e, em última instância, o nascimento e significado do quantum de ação. Contudo, é importante deixar claro que, apesar de admitir que foram árduos os trabalhos desenvolvidos por ele e seus colegas contemporâneos, a ênfase aqui não é em uma ideia irracional de ciência, mas o oposto. De fato, a trajetória de Planck foi cheia de estranhezas e surpresas, mas mostram ajustes permanentes entre teorias, metodologias e os mais importantes e inalcançáveis valores da ciência. Entre outras coisas, seu sucesso demandou buscar subsídios na mecânica estatística, uma chocante mudança para um físico tão conservador, uma vez inclinado ao energitismo, doutrina crítica do atomismo.

A Conferência de Planck é analisada aqui através da perspectiva da ciência como uma atividade racional de resolução de problemas, defendida por Laudan (1977; 1984). Sua visão se encaixa especialmente para essa tarefa, pois é uma teoria da justificação científica e aqui analisamos uma fonte que, justamente por ser uma conferência ministrada na oportunidade de

um grande prêmio, direcionada ao público leigo e muitos anos após a pesquisa ter ocorrido, é basicamente uma declaração de justificação, uma racionalização. Mesmo se considerarmos que esta é uma fonte que deve ser abordada cuidadosamente, ela apresenta grande valor educacional, por ser um raro exemplo de narrativa que envolve expressões de emoção tanto quanto de raciocínios. Por essas características, compreendemos que a Conferência Nobel de Planck é uma fonte valiosa para o modelo de ensino baseado no Prêmio Nobel, de Eshach (2009), para o ensino desse que é um episódio da história da física já presente em disciplinas de graduação no Brasil.

Para atingir esses objetivos, este artigo apresenta primeiro uma posição sobre o uso de narrativas e autobiografias científicas na história da ciência e na educação científica. Sabendo que estas fontes podem revelar-se desafiantes, procuramos defender como esses desafios podem ser superados com ferramentas metodológicas e triangulação, especialmente quando a fonte em utilização é tão esclarecedora acerca da mente de um cientista como é a palestra de Planck. A seguir, apresentamos alguns fatos sobre o Prêmio Nobel. Esses fatos são particularmente relevantes se um professor pretende utilizar o Prêmio Nobel de Planck como plano de fundo para o ensino, incorporando a palestra de Planck em associação com outros estudos históricos, como sugerimos mais adiante no artigo. Em seguida, apresentamos o núcleo das ideias de Laudan sobre a ciência como atividade de resolução de problemas (Laudan, 1977) e seu modelo reticulado de justificação (Laudan, 1984), cujos conceitos são utilizados para analisar a palestra de Planck. Finalmente, consideramos como um caso baseado na palestra de Planck e outras fontes pode ser desenvolvido, utilizando o modelo de Eshach (2009).

II. Sobre o uso de narrativas e autobiografias científicas na história da ciência e na educação científica

Biografias científicas podem ser uma fonte útil para historiadores da ciência. Naturalmente, não podem ser tomadas sem cautela; se, por um lado, conseguem transmitir a parte humana de um empreendimento científico pessoal, dando vida a aspectos que normalmente ficam escondidos na frieza de outras fontes historiográficas, como artigos e conferências, por outro lado normalmente se concentram em um único cientista e estão sujeitas a vários vieses, especialmente por parte do autor. Como qualquer outra fonte histórica, devem ser trianguladas factual e metodologicamente. No entanto, as biografias têm sido parte integrante de qualquer trabalho historiográfico para o qual estão disponíveis (Söderqvist, 2020; Kragh, 1987).

A tradição parece indicar o contrário no caso das autobiografias e memórias científicas. Como aponta Söderqvist (2020), “a falta de reflexões sistemáticas sobre autobiografias e memórias científicas parece sugerir que a escrita da vida pessoal não foi aceita pelos historiadores da ciência no mesmo grau que a biografia”. Ao narrar suas vidas científicas, os cientistas podem tender a centrar em suas realizações, romantizar o progresso científico e reinterpretar erros e dificuldades, especialmente nos casos em que essas autobiografias são

obras produzidas mais ao final da vida do cientista. Mitificações e ideologias implícitas nessas fontes também devem ser motivo de preocupação para um historiador (Kragh, 1987).

Essas subjetividades podem ser a causa da negligência das autobiografias, mas não são justificativa suficiente. Biografias, artigos, conferências e cartas também são propensos a preconceitos e subjetividade – assim como os relatos históricos feitos por historiadores. De acordo com Söderqvist (2020), é apenas uma questão de grau. Essas fontes não devem ser negligenciadas em virtude de aspectos mais ou menos inevitáveis, especialmente quando podem fornecer outros, como a visão que os cientistas têm de si mesmos e de suas experiências, ainda que revisada (Söderqvist, 2020). O mesmo se aplica aos educadores em ciências interessados em levar essas fontes primárias para as suas salas de aula.

As autobiografias científicas são narrativas e, como tais, não podem ser transpostas diretamente para o ambiente educacional sem mediação. Ao elaborar um modelo de ensino e aprendizagem baseado em histórias científicas, que chamou de Abordagem Contextual Baseada em Histórias, Klassen (2006) identificou cinco contextos fundamentais de uma história para fins educacionais: prático, teórico, social, histórico e afetivo. Ao investigar o contexto histórico, ele sugere, com base em Kragh (1987)², que as histórias internas – ou “histórias da ciência escritas principalmente por cientistas, alguns dos quais participaram dos eventos sobre os quais escreveram muitos anos depois” (Klassen, 2006, p. 49) – não são passíveis de transposição direta para a sala de aula, pelos mesmos fundamentos descritos acima: subjetividades, mitificação, ideologias.

Com base em Klassen (*ibid*) e em suas próprias práticas, mas visando a utilizar fontes primárias na educação, Moura (2019) organiza ainda esses contextos em científico, metacientífico, pedagógico, em um desenho batizado leitura contextualizada de fontes primárias. Ele aplicou seu modelo para abordar os estudos de Benjamin Franklin em um curso de graduação, utilizando cartas de Franklin e trechos de suas obras e do livro de Priestley sobre a história da eletricidade. Embora esta última fonte pudesse ser qualificada como história interna, ela provou ser de interesse educacional quando cuidadosamente mediada. Seu modelo parece oferecer um caminho através do qual as histórias internas podem ser utilizadas.

As Conferências Nobel podem ser interpretadas como formas de autobiografias e narrativas científicas. Embora suas estruturas possam variar, os laureados tendem a apresentar suas perspectivas – embora revistas – sobre a investigação de que participaram e pela qual foram homenageados. Naturalmente, espera-se que transmitam uma visão racionalizada das

² É interessante notar que Kragh (1987) não descarta fontes primárias como autobiografias e narrativas, embora efetivamente chame a atenção para o fato de que essas fontes devem ser cuidadosamente analisadas pelo historiador, pois podem fornecer explicações que não são verdadeiras após triangulação com outras fontes históricas e, de fato, transmitirem mitos e ideologias. Além disso, as histórias dos cientistas também devem ser examinadas à luz dos seus públicos-alvo e o historiador deve ter em conta que as memórias tendem a desaparecer com o tempo. Contudo, pela estrutura do livro, não se pode afirmar que Kragh (1987) demonstre qualquer preconceito contra tais fontes, pois discute, por exemplo, a possível objetividade na história da ciência, a lógica das explicações históricas e, especialmente, quando ele convida o leitor a refletir sobre o fato de que a história da ciência é história – uma forma de estudo de uma atividade muito humana. As histórias dos cientistas fornecem informações sobre a parte humana da ciência, mesmo que apresentem desafios.

práticas científicas de seus tempos, especialmente quando ministradas muitos anos depois das conquistas, em casos como a atribuição de um Prêmio Nobel. Parece, afinal, que este é o caminho adequado a seguir em uma palestra proferida em um momento tão raro da vida de um cientista. Devido a esses atributos, é natural que não possam ser consideradas a forma mais objetiva de relato histórico; no entanto, ainda se constituem como fontes históricas e, seguindo os passos cuidadosos anteriormente delineados, no que diz respeito aos contextos e triangulações, são importantes para historiadores e educadores (Eshach, 2009; Whitaker, 1979).

A palestra de Planck guarda algumas diferenças em relação às de outros contemporâneos. Pierre Curie (1905) e Marie Curie (1911), por exemplo, concentraram-se na descrição das metodologias que desenvolveram para compreender os fenômenos radioativos, as hipóteses que forneceram e, em algumas raras ocasiões, relatam sentimentos de espanto que tiveram com a sua própria investigação. Bohr (1922), por outro lado, centra sua narrativa no alcance de seu modelo atômico em outras áreas da ciência. Um forte sentido de justificação transparece nas suas palestras, como seria de esperar – tal como acontece com as de Planck. No entanto, esta última é uma palestra também repleta de Planck como pessoa – suas emoções e regulações emocionais, suas impressões, seus ajustes em valores e metodologias. É, portanto, um documento que, até certo ponto, proporciona tanto descoberta como justificação. Klassen (2006) argumenta que os estudantes muitas vezes consideram a ciência como um produto acabado feito por grandes mentes, o que não é motivacional, e que a história interna e autobiográfica pode ser a culpada. Embora este seja um ponto válido para uma variedade de narrativas e autobiografias científicas, esse não é o caso da palestra de Planck.

Mais uma vez, cabe ressaltar que são exigidas associações com outros estudos históricos sobre o tema. Desde que Kuhn (1984) forneceu uma história hipotética do quantum de ação, outros especialistas têm tentado compreender o crescente envolvimento de Planck com a mecânica estatística antes e a partir de 1901 (Gearhart, 2002), e a coerência e incompletude das hipóteses e interpretações de Planck (Darrigol, 2001), para compreender como ele interpretava seu quantum de ação desde o início. Por esta razão, um professor interessado em utilizar a palestra de Planck para fins educacionais – como é defendido neste artigo – deve estar ciente de que a sua palestra não é tão clara sobre como ele se sentiu em 1901 como talvez o tenha feito em 1920.

III. O Prêmio e as conferências

Enorme em prêmio monetário e em respeitabilidade, o Prêmio Nobel é uma marca do nosso tempo e tornar-se um laureado inscreve o nome de um cientista na história. A estima vem daqueles que entendem e não entendem o significado de uma determinada descoberta. Quando os premiados são anunciados todo mês de outubro, a mídia dedica vários relatórios e análises às conquistas. A importância é até autoproclamada: ninguém menos que o próprio Rei da Suécia é o anfitrião da recepção dos grandes nomes de um determinado ano, em Estocolmo (Feldman, 2000).

O Prêmio Nobel é uma instituição bastante recente; instituído em 1901, a partir do testamento do químico sueco Alfred Nobel, o prêmio foi estabelecido por esse mesmo testamento para ser dirigido “àqueles que, durante o ano anterior, tenham conferido o maior benefício à humanidade”. O desejo de Nobel era que os campos da física, química, fisiologia ou medicina, literatura e “para promover o companheirismo entre as nações, a abolição ou redução dos exércitos permanentes e o estabelecimento e promoção de congressos de paz” – a paz, como é agora conhecido – compartilhariam igualmente os juros anuais da maior parte de sua herança. O Prêmio de Ciências Econômicas em Memória de Alfred Nobel foi introduzido em 1968 e atribuído pela primeira vez em 1969, por iniciativa do Sveriges Riksbank, o Banco Central da Suécia, responsável pelo seu financiamento³.

Sendo uma instituição contemporânea tão vultuosa, o Prêmio não é imune a controvérsias. Muito pelo contrário, controvérsias o cercam desde a sua origem. Nobel era mais conhecido como o inventor da dinamite e de outros explosivos; portanto, as riquezas partilhadas anualmente entre esses grandes benfeiteiros do conhecimento da humanidade foram parcialmente construídas a partir das suas patentes e indústrias mundiais⁴. A dinamite pode ser usada para o bem e tem feito a sua parte na engenharia e na mineração necessárias ao desenvolvimento do nosso mundo moderno; cabe enfatizar, no entanto, que os explosivos desempenharam um papel fundamental nas muitas guerras travadas nos séculos 19 e 20. Suas indústrias forneceram explosivos para ambos os lados que lutavam na Guerra Franco-Prussiana, apenas para mencionar um exemplo interessante do seu alcance. Mesmo no seu lado benéfico, os explosivos foram responsáveis por um grande número de mortes e mutilações, devido ao seu mau uso e à sua insegurança geral. Os analistas vêm contemplando e manifestando as conexões entre o homem e suas criaturas – dinamite e Prêmio – há muito tempo, e culpa nunca esteve fora de cogitação como uma das razões de seu testamento (Feldman, 2000).

Controvérsias também surgiram após sua morte. Seu testamento, “uma obra-prima de ambiguidades jurídicas, imprecisões e omissões” (Feldman, 2000, p. 40), pegou seus executores desprevenidos e desafiou-os a tal ponto que foram necessários quase cinco anos para que os Prêmios fossem iniciados. O testamento mencionava uma fundação que não existia; familiares disputavam parte do patrimônio; França e Suécia lutaram pelo direito aos bens de Nobel; parte da mídia sueca opôs-se aos Prêmios em virtude da pobreza do país. Mas nada disso foi tão difícil quanto designar os membros dos comitês necessários para uma tarefa tão árdua: acompanhar a produção mundial de conhecimento, fazer a curadoria de nomeações e, claro, tomar a complicada decisão de conceder os grandes valores com o mínimo de alterações. Em nenhum lugar do testamento de basicamente um único parágrafo havia qualquer tipo de remuneração específica para aqueles que teriam que se dedicar à tarefa. As instituições

³ Da página do Prêmio Nobel. As referências das citações devem-se ao testamento de Alfred Nobel. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021. Sat. 28 Aug 2021. <<https://www.nobelprize.org/alfred-nobel/alfred-nobels-will/>>

⁴ Nobel também tinha ações da empresa petrolífera de seus irmãos, o que contribuiu muito para sua riqueza.

apontadas também confundiram analistas de todo o mundo, uma vez que Nobel só viveu na Suécia durante a sua primeira infância. Na física e na química, os prêmios seriam decididos pela Academia Sueca de Ciências; em medicina ou fisiologia, pelo Instituto Médico Karolinska; em literatura, pela Academia de Estocolmo, e na paz, por um Comitê de cinco nomeados pelo Parlamento Norueguês (*ibidem*).

Mesmo após o seu início, as controvérsias nunca cessaram. Naturalmente, são mais frequentes na paz, que é um prêmio explicitamente político. A literatura tem sido não só muito eurocêntrica, mas também tem evitado questões políticas explícitas e prementes; não obstante, a pretensa neutralidade é uma posição política em si. E considerações políticas permeiam, sem dúvida, até mesmo os prêmios científicos, pois não há garantias de neutralidade e imparcialidade da ciência. Laureados como Fritz Haber e Otto Hahn têm sido fortemente associados a armas de guerra. Além da política, a polêmica também surge por causa de nomes negligenciados como Dimitri Mendeleev, Lise Meitner, Chien-Shiung Wu e Rosalind Franklin. Deve-se mencionar, também, que durante a década de 1930, os prêmios anuais em química e física foram retidos e os fundos foram direcionados para a pesquisa sueca (Sime, 2013). Um grande nome como Enrico Fermi foi premiado por uma descoberta que logo seria entendida como equívoca. Alguns laureados em economia defenderam a suspensão total do próprio Prêmio de Ciências Econômicas. E estes são apenas os mais conhecidos dos muitos exemplos de controvérsias que cercam o Prêmio Nobel.

Há um problema estrutural em indicar anualmente os maiores benefícios científicos, artísticos e políticos do ano anterior, como desejava o Nobel, uma vez que em nenhum dos campos do Prêmio existem descobertas e obras-primas imediatas e surpreendentes. A ciência, a política e as artes são empreendimentos de vida inteira e a importância social dos grandes feitos da humanidade pode levar anos, talvez décadas, para se estabelecer. Prêmios Nobel não são concedidos postumamente; por isso, muitos potenciais candidatos morreram antes de serem reconhecidos. Mas não se pode ignorar que muitas vezes os comitês evitam premiar alguns grandes nomes conhecidos. Planck era considerado desde 1907, sendo finalmente agraciado com o Prêmio de Física de 1918 (em 1919), abrindo as janelas para Einstein e Bohr, e mais tarde a muitos outros que trabalharam no novo paradigma da mecânica quântica.

O parágrafo nove do Estatuto do Prêmio Nobel menciona que “caberá ao premiado, sempre que possível, proferir uma palestra sobre um assunto relevante para o trabalho para o qual o prêmio foi atribuído”⁵; continua dizendo que a referida palestra deve ser ministrada antes ou no máximo seis meses após a cerimônia. No entanto, nem sempre foi assim. Pierre Curie lecionou em 1905, em virtude do Prêmio de Física de 1903, e Planck ministrou sua conferência em 1920, apenas para citar dois exemplos. No entanto, a partir das últimas décadas,

⁵ Informação coletada na página do Prêmio Nobel. A referência da citação deve-se aos Estatutos da Fundação Nobel. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021. Sun. 29 Aug 2021. <<https://www.nobelprize.org/about/statutes-of-the-nobel-foundation/>>

provavelmente devido à relativa paz que os países ocidentais têm vivido, a maioria dos laureados tem comparecido à solenidade.

Dirigidas ao público leigo, as Conferências Nobel são geralmente históricas e ministradas em linguagem didática. Isso significa que os cientistas fazem o possível para comunicar a importância da descoberta, obra ou obra-prima pela qual foram laureados. Na física, pode-se ver um padrão de apelo à história. Isso pode ser para justificar o trabalho premiado; também pode ser em razão de parecer mais interessante ou didático; finalmente, pode ser para que possam elogiar os colegas que participaram ativamente, ou talvez todas as alternativas. Geralmente acessíveis, uma vez que foram traduzidas para o inglês quando necessário e podem ser lidas gratuitamente na página do Prêmio na Internet, esses documentos são fontes primárias de valor educacional, fato já apontado na década de 1970 (Whitaker, 1979).

A palestra de Planck segue essa lógica, como ele menciona já no seu início

Se comprehendo corretamente que o dever que hoje me é imposto é o de dar uma palestra pública sobre os meus escritos, então creio que esta tarefa, cuja importância estou bem consciente através da gratidão sentida para com o nobre fundador da nossa Fundação, não pode ser mais adequadamente cumprida do que com a tentativa de contar-lhes a história da origem da teoria quântica em linhas gerais e, para adicionar a isso, uma imagem em uma pequena moldura, do desenvolvimento desta teoria até agora, e seu significado atual para a física.

IV. Justificação – A perspectiva de Laudan sobre o progresso da ciência

Ao avaliar os méritos das teorias, é mais importante perguntar se elas constituem soluções adequadas para problemas significativos do que perguntar se são “verdadeiras”, “corroborações”, “bem confirmadas” ou de outra forma justificáveis dentro da estrutura da epistemologia contemporânea (Laudan, 1977, p. 14).

Como se pode perceber, ao mudar a perspectiva para a resolução de problemas como indicador de progresso, Laudan pretende afastar-se de certos valores que são filosoficamente desafiadores quando se trata de analisar a história da ciência, pois uma teoria ser “verdadeira” ou “corroboração” depende do que é definido como fato em determinado momento histórico. Por outro lado, no que parece (apenas superficialmente, como defende) ser uma alegação indiscutível – de que a ciência progride sobretudo na resolução de problemas – Laudan (1977) desenha uma taxonomia para problemas científicos e, mais tarde, um modelo de justificação capaz de racionalizar como o consenso científico é finalmente alcançado (Laudan, 1984).

Classificar problemas científicos parece ser uma tarefa bastante fácil. Conceitualmente, Laudan afirma que os problemas muitas vezes surgem da inconsistência interna de uma teoria ou da incoerência entre vários conhecimentos canônicos. No entanto, são principalmente problemas de natureza empírica que têm sido examinados pela filosofia, ainda que marginalmente. Começando com problemas empíricos, Laudan propõe uma taxonomia

mais completa, quebrando subclassificações para ambos os tipos de problemas e, para os conceituais, abordando alguns problemas considerados metacentíficos por filósofos anteriores.

Admitindo que os problemas empíricos são mais fáceis de exemplificar do que de definir, Laudan (1977, p. 15) tenta um delineamento de todo modo:

Mais geralmente, qualquer coisa sobre o mundo natural que nos pareça estranha, ou que de outra forma necessite de explicação, constitui um problema empírico [...] Os problemas empíricos são, portanto, problemas de primeira ordem: são questões substantivas sobre os objetos que constituem o domínio de qualquer ciência.

Os problemas empíricos vêm em três tipos: não resolvidos, resolvidos e anomalias. Problemas não resolvidos podem certamente ser um indicador da incompletude de uma teoria com a qual os cientistas estão supostamente familiarizados. No entanto, Laudan (*ibid*) entende que tais problemas são ambíguos: a natureza não fala inequivocamente aos investigadores; consequentemente, as margens de erro e deficiências em equipamentos que são típicas da investigação empírica, por exemplo, muitas vezes desviam a capacidade de um cientista de reconhecer um problema não resolvido. Além disso, alguns problemas empíricos demoram a ser compreendidos como tal em virtude da dificuldade inerente de atribuir a área de investigação a que pertencem. Laudan (*ibid*, p. 18) insiste que “problemas não resolvidos geralmente contam como problemas genuínos apenas quando não estão mais sem solução”. É retrospectivamente, ao resolver um problema, que um problema não resolvido é reconhecido como era antes, endossando a avaliação do progresso de uma teoria.

Como é possível, então, perceber um problema como resolvido (e, portanto, a existência anterior de um problema não resolvido)? Para responder tal questão, Laudan (*ibid*) apura três fundamentos: o caráter aproximativo da solução do problema, a irrelevância da verdade e da falsidade para a resolução de um problema e a frequente não permanência das soluções. Laudan (*ibid.*, p. 22) defende que um problema é considerado resolvido

quando [os cientistas] acreditam que entendem por que a situação proposta pelo problema é do jeito que é. Agora, claramente, são as teorias que se destinam a fornecer tal compreensão e qualquer referência a um problema resolvido pressupõe a existência de uma teoria que supostamente resolve o problema em questão. Portanto, quando perguntamos se um problema foi resolvido, estamos na verdade perguntando se ele mantém uma certa relação com uma ou outra teoria.

Diferentemente dos problemas não resolvidos, as anomalias podem ser abertamente reconhecidas pelos cientistas e tiveram sua importância historicamente reconhecida pelos filósofos. Tal como alguns dos críticos contemporâneos da perspectiva clássica, Laudan faz questão de afirmar que as anomalias não exigem o abandono da teoria sobre a qual suscitam dúvidas. Para completar o argumento, ele acrescenta um ponto de controvérsia, enfatizando que as anomalias não são necessariamente incompatíveis com as teorias para as quais são anomalias. Os críticos da visão clássica muitas vezes “sustentam que uma anomalia só é gerada quando há

uma inconsistência lógica entre as nossas previsões ‘teóricas’ e as nossas observações ‘experimentais’ [...] uma noção demasiado restritiva de um problema anômalo” (*ibid.*, p. 28). Entendendo a ciência como um esforço interpretativo, se uma anomalia não significa que uma teoria deva ser abandonada, pode existir “uma classe de anomalias não refutáveis” (*ibid.*, p. 29). Sua defesa é que uma anomalia só pode ser vista como tal se existirem teorias concorrentes, para uma das quais existe um problema resolvido que constitui um problema anômalo para a outra. “Devemos aqui nos satisfazer com a observação de que os casos de refutação não resolvidos são frequentemente de pouco significado cognitivo” (*ibid.*, p. 30).

Uma vez que Laudan está preocupado com uma explicação racional da ciência, ele defende que não é o número de anomalias que provoca a escolha de teorias – como defendeu Kuhn – mas sim a sua importância cognitiva. A sua importância cognitiva só pode ser avaliada no contexto de teorias concorrentes, o que significa que os cientistas tendem a manter a sua fidelidade a uma teoria, mesmo que esta apresente muitas deficiências, no caso de ser a única disponível. Mesmo no caso de teorias concorrentes, os cientistas ainda têm de lidar com o grau de discrepância entre as previsões teóricas e os resultados experimentais e o tempo que leva para um problema ser considerado um “constrangimento epistêmico” (*ibid.*, p. 40). Em resumo, as anomalias levam tempo, novas perspectivas teóricas e refinamento metodológico para serem entendidas como tal, pois constituiria irracionalidade simplesmente desacreditar uma teoria que de outra forma seria capaz de explicar com sucesso alguns fenômenos conhecidos.

Com problemas conceituais, mais uma vez a racionalidade está em questão. Historicamente, os estudiosos presumiam que os problemas conceituais eram metacentíficos. “Em vez de procurarem aprender algo sobre a natureza complexa da racionalidade científica a partir de tais casos, os filósofos (com pesar) e os sociólogos (com deleite) têm geralmente tomado-os como símbolos da irracionalidade da ciência tal como é realmente praticada” (*ibid.*, p. 47). Apesar dos filósofos e sociólogos, a história da ciência é rica em controvérsias que se originaram de problemas conceituais que desempenham um papel imperativo na escolha de teorias para os cientistas, o que deveria conceder-lhes uma análise mais aprofundada, ao invés de sua completa negligência como metafísica. Para isso, Laudan (*ibid.*, p. 48) define:

problemas conceituais são características das teorias e não têm existência independente das teorias que os apresentam, nem mesmo aquela autonomia limitada que os problemas empíricos às vezes possuem. Se os problemas empíricos são questões de primeira ordem sobre as entidades substantivas em algum domínio, os problemas conceituais são questões de ordem superior sobre a fundamentação das estruturas conceituais (por exemplo, teorias) que foram concebidas para responder às questões de primeira ordem.

Problemas conceituais podem surgir de teorias científicas, metodologias e valores extracentíficos. Teoricamente, incompatibilidades e inconsistências podem trazer à luz dificuldades em ambas as teorias em avaliação, como foi visto na taxonomia de problemas conceituais. Metodologicamente, as teorias geradas a partir de diferentes perspectivas sobre a

melhor forma de investigar a natureza são geralmente conceitualmente problemáticas – sendo as visões mecanicistas da natureza de Newton e Descartes um bom exemplo. Em termos de valores, ou dificuldades de visão de mundo, muitos problemas conceituais provêm de crenças que são geralmente consideradas metacentíficas, incluindo a ética e a teologia.

É justo dizer, então, que há muitos casos dos quais provém o frequente dissenso na ciência. Laudan (1977) delineou sua taxonomia e suas origens de forma bastante interessante. No entanto, Laudan (1984) argumenta que, entre todas as áreas de especialização acadêmica, as ciências duras são razoável e comparativamente consensuais. Para explicar como tal consenso pode ocorrer em uma atividade com tantas variáveis abertas à crítica e à dissidência, Laudan (1984) continua desenhando seu modelo de justificação.

Para explicar esta aparente contradição, Laudan (1984) propõe uma reforma no modelo hierárquico de justificação, ou na teoria da racionalidade instrumental, que era uma proposição do positivismo lógico. Este modelo tem sido bastante criticado por filósofos pós-positivistas principalmente por duas razões: (i) é uma estrutura excessivamente rígida, tornando qualquer dissenso um problema cognitivo do cientista individual que está em desacordo com a comunidade científica, e (ii) não dá conta da tese da subdeterminação, que afirma que não há garantias lógicas de que um determinado conjunto de regras metodológicas possa determinar uma disputa factual e, da mesma forma, um conjunto de objetivos da ciência não é capaz de resolver definitivamente uma disputa metodológica. Assim, a subdeterminação perpassa teorias, fatos, metodologias e objetivos. A existência factual de controvérsias na ciência, nascidas da crítica típica da atividade, traduziria a ciência numa atividade irracional.

Laudan (1984) pretende refutar este relativismo, defendendo que a subdeterminação por si só não é um argumento suficiente para colocar em risco a racionalidade da ciência. As três dimensões da ciência – factual, metodológica e axiológica – existem por uma razão e, embora não haja garantias lógicas de que a invocação de um ou outro nível de atividade científica seja plenamente capaz de resolver disputas em outros, pode determinar qual das reivindicações (factual ou metodológica) promove melhor os objetivos da ciência. Para fazer isso, porém, é necessário assumir que o objetivo dos cientistas não é buscar a melhor teoria ou a mais verdadeira, mas propor a teoria mais bem suportada por evidências e métodos, assegurada pelo escrutínio crítico de uma comunidade de pesquisa – mesmo que seja impossível suprimir o seu caráter subdeterminado.

Mas o que é o sistema hierárquico de justificação, exatamente? O positivismo lógico entendia que as disputas no âmbito factual seriam resolvidas no campo metodológico; as controvérsias no nível metodológico, por sua vez, encontrariam sua solução no domínio axiológico. Admitindo que os seus críticos estavam razoavelmente certos ao demonstrar a sua rigidez e cegueira à subdeterminação, Laudan aponta que negligenciaram completamente o modelo, sem perceberem o seu potencial. O problema reside na sua estrutura hierárquica e não nas suas dimensões.

Analizar o domínio factual, por exemplo, exige compreender não só a dinâmica entre hipóteses e procedimentos, típica dos níveis factual e metodológico, mas também a sua relação com o domínio axiológico, que é aliás uma das características relegadas pelos positivistas. Como ele define, “as crenças factuais moldam as atitudes metodológicas tanto quanto os nossos objetivos” (*ibid.* p. 39). A concepção hierárquica, com o seu caráter abertamente unidimensional, ignora o papel fundamental desempenhado pelos fatos no desenvolvimento e na escolha dos procedimentos científicos.

É no nível axiológico, porém, que Laudan (1984) encontra espaço para criticar as afirmações positivistas e pós-positivistas e construir o seu próprio modelo de justificação. Ele começa apresentando a falácia da covariância, que “assume que a presença ou ausência de consenso em relação a afirmações factuais pode ser usada para inferir a existência de acordo ou desacordo em relação a objetivos cognitivos” (*ibid.*, p. 43). Ele acredita que esse é o caso dos paradigmas e das revoluções de Kuhn, uma vez que se supõe que os adeptos de diferentes paradigmas compartilhem a mesma ontologia e a mesma axiologia. Laudan (1984, p. 44) invoca trabalhos posteriores de Kuhn (1977) para mostrar esta contradição

Precisamente porque (como o próprio Kuhn sublinha em outros contextos) os valores cognitivos subdeterminam as regras metodológicas, e porque essas regras, por sua vez, por vezes subdeterminam a preferência teórica, é inteiramente concebível que dois cientistas possam subscrever precisamente aos mesmos objetivos cognitivos, embora defendam visões fundamentalmente diferentes sobre a composição do universo.

O mesmo vale para qualquer dissenso. A subdeterminação demonstra que o consenso factual – algo muito típico da ciência – não significa consenso axiológico. Os cientistas podem trabalhar no mesmo cânone e ter diferenças de valores, objetivos e visões de mundo. Consenso em um nível não implica necessariamente consenso nos outros.

Como o objetivo de Laudan é mostrar a racionalidade da ciência, ele propõe usar o melhor dos argumentos positivistas e pós-positivistas e desenvolve um sistema de justificação. A hierarquia não é mais uma característica, mas as dimensões da ciência permanecem. Por outro lado, é contabilizada a subdeterminação, com ajustes e justificativas para todas as dimensões. Ele o chama de modelo reticulado de justificação. Os métodos justificam as teorias, tanto quanto as teorias restringem os métodos; os métodos exibem a realização dos objetivos, tanto quanto os objetivos justificam os métodos; teorias e objetivos devem ser harmonizados. Com este modelo é possível analisar quais valores são cognitivos, utópicos ou falsamente reivindicados, pois estão, de alguma forma, limitados a métodos e factos e abertos a amplas críticas. Oferece, portanto, uma ferramenta para algum tipo de vigilância da racionalidade na análise das afirmações e práticas científicas.

É importante notar que as perspectivas de Laudan se centram na justificação da ciência e, por essa razão, não são consensuais entre filósofos e historiadores (Kragh, 1987). A justificação é a forma de os cientistas fornecerem uma explicação racional para as suas

pesquisas e descobertas, e tendem a disfarçar elementos mais subjetivos que interessam especialmente aos historiadores, cujo objetivo é apresentar explicações para fatos do passado. No entanto, a justificação é parte integrante do esforço científico e tem uma relevância própria, uma vez que preenche a lacuna entre o cientista e a comunidade científica. Por abordarmos uma fonte primária que é uma narrativa pessoal e, portanto, objeto de justificação, a visão de Laudan é especialmente adequada para a tarefa de análise da Conferência de Planck.

V. Justificando o quantum de ação – A Conferência Nobel de Planck

A partir do final do século 19, “a continuidade de todas as conexões causais”⁶, uma concepção produzida pelo poder esmagador do cálculo infinitesimal, era uma ideia propositiva da engenharia da natureza para todas as áreas da física clássica, mesmo tão controversas como elas eram acerca de certos objetos. Além de sua conformidade com a teoria eletromagnética, a termodinâmica e a mecânica, a continuidade também era compatível com a experiência cotidiana. Qualquer sugestão contrária certamente não surgiria conceitualmente, mas sim a partir de um problema empírico. A palestra de Planck, uma racionalização do cenário desta ruptura, é simbólica não só das dificuldades que a descontinuidade impõe à ciência, mas também das nossas próprias expectativas sobre como a própria natureza se comporta.

Os espectros de emissão e absorção despertaram grande interesse nas décadas de 1850 e 1860. Evidências empíricas apontaram para uma relação direta entre os espectros de absorção e emissão de um corpo. Estudando-os, o físico alemão Gustav Kirchhoff (predecessor de Planck em Berlim (Kragh, 2000)) notou um padrão interessante: o espectro de absorção de uma determinada substância era o inverso do seu espectro de emissão, a própria linha indicando o mesmo comprimento de onda em ambos os espectros. Este estudo permitiu-lhe identificar, por exemplo, substâncias existentes no Sol e abriu a possibilidade de compreender a composição das estrelas. Por outro lado, o mesmo estudo previu a existência de elementos descobertos posteriormente (Thomas, 1991).

Estudando a radiação térmica, Kirchhoff identificou que existe uma razão constante entre o poder de emissão de um corpo e o poder de absorção de uma determinada radiação a uma temperatura definida. A consequência de tal relação é que os maiores absorvedores deveriam ser os maiores emissores. Este espécime foi chamado de corpo negro por Kirchhoff; para investigações posteriores, Kirchhoff modelou uma cavidade, com um buraco proporcionalmente pequeno, como forma de compreender a radiação do corpo negro. Seus estudos indicaram posteriormente que a relação entre a emitância espectral e seu coeficiente de absorção seria função apenas do comprimento de onda e da temperatura – a radiância espectral (Thomas, 1991).

⁶ Como sua Palestra está disponível na página inicial da Fundação Prêmio Nobel, não poderemos identificar as páginas das citações. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/planck/lecture/>>. Contudo, a referência é devida a Planck (1967). Todas as citações diretas sem citação nesta seção são oriundas deste documento.

Nas décadas seguintes, físicos experimentais e teóricos lutaram para formular uma expressão analítica para a radiância espectral do corpo negro. Estranhas expressões surgiram e, à medida que os métodos experimentais foram sendo melhorados, culminaram com um dos problemas mais famosos da Física – encontrar uma expressão que acomodasse tanto as altas como as baixas energias da curva obtida empiricamente para uma determinada temperatura. Este problema empírico, rotulado por Paul Ehrenfest em 1911 como catástrofe ultravioleta, deu origem a um problema conceitual, o das interações entre a radiação e a matéria. Com esta nota, Planck apresenta sua palestra:

Quando revejo o passado, já há vinte anos, quando o conceito e a magnitude do quantum de ação começaram, pela primeira vez, a desvelar-se da massa de fatos experimentais e, novamente, o longo e sempre tortuoso caminho que levou, finalmente, à sua divulgação, todo o desenvolvimento parece-me fornecer uma nova ilustração do ditado há muito comprovado de Goethe de que o homem erra por quanto se esforça.

Depois de delinear o estado da arte do espectro do corpo negro, Planck apresenta a sua visão inicial sobre o assunto antes do surgimento da “catástrofe ultravioleta”, mas ainda assim um problema em si, o de uma expressão analítica para a radiância do corpo negro. Na esperança de abordá-lo através da eletrodinâmica clássica, ele interpretou a cavidade como uma configuração de osciladores hertzianos. É lícito dizer, portanto, que, diante de um problema empírico, Planck passou a trabalhar em um modelo teórico, o da cavidade sendo constituída por ressonadores. Pareceu frutífero: este modelo foi testado empiricamente e estabeleceu a ligação entre a energia do ressonador e a energia da radiação; além disso, esta ligação era independente da natureza do ressonador. Ele afirma ter recebido com satisfação esse resultado, pois seu modelo pareceu reproduzir a cavidade térmica e permitiu que ele se aproximasse de corpos negros a partir da energia dos ressonadores, diminuindo os graus de liberdade do sistema para um.

Não demorou muito para que as expectativas de Planck se mostrassem limitadas pelo modelo do ressonador hertziano, pois não havia como distinguir as radiações emitidas e as absorvidas, pretendidas por Planck com este modelo específico. “O ressonador reagia apenas aos raios que também emitia e não era nem um pouco sensível às regiões espectrais adjacentes”. As suas expectativas em torno da análise da entropia também foram desafiadas por argumentos mecânicos e gradualmente mostraram que “deveria faltar um elemento ou termo de ligação importante, essencial para a compreensão completa do cerne do problema”. Os esforços iniciais de Planck demonstram as intrincadas negociações entre pressupostos teóricos e metodológicos e a sua abertura aos seus ajustes permanentes. Além disso, esses ajustes começaram a manifestar que o objeto exigia um novo elemento, embora só mais tarde se revelasse de um tipo impressionante.

À medida que o eletromagnetismo parecia se revelar sem promessas – especialmente em virtude da desconfiança de Planck na teoria do elétron de Lorentz, que ele reconheceu, em

1920, que teria simplificado suas tentativas de abordagem do corpo negro – o físico decide recorrer à termodinâmica, uma área com qual ele se sentia mais confortável, em outro ajuste teórico, como pode ser visto. Afinal, a entropia é uma ótima ferramenta conceitual para abordar o equilíbrio térmico. A Segunda Lei era sua especialidade, tema de sua tese de doutorado (Kragh, 2000); portanto, sua abordagem do problema surgiu da segunda derivada da entropia em relação à energia, uma vez que tinha “significado físico direto para a irreversibilidade da troca de energia entre o ressonador e a radiação”.

Enquanto isso, novos resultados empíricos vieram à tona, fazendo emergir a infame catástrofe ultravioleta; as expressões para altas e baixas frequências não concordavam e várias tentativas ad-hoc foram realizadas para encontrar tal concordância, resultando em novas expressões muito estranhas e complexas, que Planck é inflexível em classificar como pouco ortodoxas para os fenômenos da natureza. Seu conhecimento do significado da segunda derivada da entropia foi útil. Ajustando fatos teóricos e empíricos, tomando as expressões obtidas para ambas as partes do espectro, e calculando suas respectivas segundas derivadas da entropia em relação à energia (cuja recíproca ele chamou de R , uma função de temperatura e frequência), ele chega a dois resultados distintos, mas associáveis: no caso de grandes comprimentos de onda, R é proporcional à energia; para os pequenos, R é proporcional ao quadrado da energia.

Não havia alternativa melhor senão fazer, para o caso geral, a quantidade R igual à soma de dois termos, um da primeira potência e um da segunda potência da energia, de modo que para pequenas energias o primeiro seja predominante, enquanto para as energias maiores a segunda é dominante.

Sua expressão se enquadrava razoavelmente no espectro, mesmo que em 1920 ele mencione acreditar que era exigida uma confirmação mais exata. Mas em 1900, as preocupações de Planck iam muito além do poder da expressão na resolução do problema. As suas expectativas axiológicas foram claramente desafiadas por ela: certamente, a sua expressão funcionou com precisão, o que é um valor procurado em todas as leis científicas; seu “verdadeiro caráter físico”, porém, fez com que ele a classificasse como uma “fórmula de interpolação felizmente escolhida”, que não se adequava às suas perspectivas sobre a natureza. Vale mencionar as preocupações de Planck do ponto de vista de Laudan (1977, p. 16): “a resolução de um problema não pode ser reduzida a ‘explicar um fato’”. A busca de Planck faz com que ele mergulhe nas “semanas do trabalho mais árduo de [sua] vida”, nas quais ele, que anteriormente abordava a entropia de forma fenomenológica, ou seja, termodinamicamente, teria que de alguma forma recorrer à mecânica estatística.

Para abordar a entropia em si, e não a sua variação, ele fixou a necessária “constante aditiva para que a energia e a entropia desapareçam juntas”. Isso não era novidade, pois ele garante que, antes dele, outros cientistas como Wilhelm Ostwald haviam tomado a energia – que não é absoluta – aproximadamente como tal para estudar fenômenos termoquímicos. A constante aditiva, naquela ocasião, sequer foi definida, como seria mais tarde pela teoria da

relatividade. Percebe-se, portanto, um ajuste metodológico, pois Planck usa a criatividade e se apoia em conhecimentos prévios metodologicamente aceitos para desenhar uma nova abordagem ao problema da entropia.

É importante notar que, ainda antes disso, em 1899, Planck já havia desenhado uma expressão para a densidade espectral como proporcional à energia em função da temperatura e da frequência. Associando sua interpolação a essa expressão, eram necessárias duas constantes. Uma delas mostrou-se proporcional à constante de Boltzmann. Para definir a segunda, sua consideração do desaparecimento conjunto da energia e da entropia levou-o a um método combinatório relativamente simples, o qual, diz Planck com muita satisfação, Boltzmann atestou. Considerando o sistema como constituído por um grande número de osciladores, ele investigou a probabilidade do sistema para uma determinada configuração de energia, correlacionando-a com a expressão da entropia, permitindo-lhe interpretá-la como uma distribuição de probabilidades. Mas a constante emergente, produto da energia e do tempo, “provou-se evasiva e resistente a todos os esforços para se enquadrar [...] na estrutura da teoria clássica”. Como recurso computacional, tratou a energia total como uma composição de energias elementares finitas, enquadrando energia de forma probabilística. A constante foi assim chamada de quantum de ação.

Ou o quantum de ação era uma quantidade fictícia, e então toda a dedução da lei da radiação era em grande parte ilusória e representava nada mais do que um jogo vazio e não significativo de fórmulas, ou a derivação da lei da radiação era baseada em um sólido conceito físico.

A continuidade de todas as conexões causais estava sendo desafiada e Planck justifica a sua realidade com subsequentes desenvolvimentos teóricos e metodológicos feitos pelos seus pares. Apesar de sua solidez, precisão e simplicidade, sua lei de radiação e o quantum de ação ainda lhe traziam muito desconforto. Em 1920, cauteloso como é na sua justificação, a fertilidade é o valor pelo qual demonstra mais apreço, mencionando a investigação sobre o calor específico dos corpos sólidos e do hidrogênio, a rotação das moléculas de gás, a determinação das relações químicas, a desenvolvimento de métodos adequados para raios X e espectroscopia. Particularmente, enfatiza as novas hipóteses dos quanta de luz de Einstein e do átomo de um elétron de Bohr. Na verdade, em uma narrativa cheia de surpresa, novidade e ajustes em teorias, métodos e valores, Planck honra o seu objetivo principal de mostrar que o homem erra porquanto se esforça.

No que diz respeito à narrativa de Planck, pode-se ver claramente que o quantum de ação não foi uma escolha teórica feita em virtude dos métodos e valores canônicos. Pelo contrário, a comunidade científica enfrentou um problema empírico: a precisão das expressões para a radiação do corpo negro era limitada. Era necessário que Planck tivesse emprestado o modelo dos osciladores e, apesar do seu sucesso metodológico, vendo os seus limites teóricos, teve que trabalhar em uma mudança de perspectiva, procurando em primeiro lugar a abordagem fenomenológica da entropia. Sua interpolação foi bastante precisa, mas não suficientemente

valiosa, pelo menos não para ele. Desafiado por suas expectativas quanto à simplicidade da natureza (o que quer que isso possa significar, como ele diz), ele manteve o trabalho de encontrar significado para a sua lei de radiação. Mais uma vez, muda sua perspectiva teórica, abordando o problema estatisticamente e, vendo que os valores da física clássica não eram capazes de dar conta do recado, Planck resolve o problema, já de estatuto teórico, ao compreender as interações entre matéria e energia a partir de um ponto de vista elementar.

Quando Laudan (1977; 1984) construiu sua análise, buscou abordar principalmente o trabalho comunitário e crítico realizado por muitos cientistas; aqui analisamos a resolução parcial de um problema conceitual identificado por um determinado físico, nascido de um problema empírico. No entanto, é justo dizer que este último foi detectado pela comunidade científica – ou seja, a fórmula analítica para a radiância espectral. Wien desenvolveu uma expressão que explicava as frequências mais altas e as temperaturas baixas; Rayleigh e Jeans desenvolveram, a partir do eletromagnetismo clássico, uma expressão para frequências mais baixas e altas temperaturas. A resolução deste problema criou uma anomalia, que residia precisamente no fato de o eletromagnetismo não conseguir explicar a expressão de Wien.

Não se deve esquecer que, por mais claro que possa ser hoje em dia para os iniciados na física, a quantização da energia não era a conclusão direta que se poderia tirar do quantum da ação. Na verdade, parece que Planck não considerou a descontinuidade da energia nos anos que se seguiram à sua proposta do quantum de ação, e o desafio que ele apresentava à física clássica. Mesmo depois de recorrer à mecânica estatística, ele apenas a considerou uma ferramenta, só fazendo as pazes com sua interpretação da entropia em 1912 (Kragh, 2000). Vale ressaltar que foi justamente isso que tornou a resolução do efeito fotoelétrico de Einstein algo revolucionário, pois entender a luz como quanta foi um de seus pressupostos ao abordar o problema, e abordar a radiação típica da equação de Wien como se abordaria um gás ideal foi sua justificativa.

Planck foi um dos muitos cientistas que teve dificuldades com os quanta de luz de Einstein. Talvez seja curioso notar que Bohr também foi um dos físicos que resistiu à quantização da energia, embora o seu modelo atômico se baseie em camadas de energia quantizadas para evitar o colapso do átomo de Rutherford. No caso do Prêmio Nobel, seria impossível reconhecer Einstein e Bohr, se não fosse pelo quantum de ação de Planck.

Dificilmente alguém teria escolhido Max Planck (1858-1947) para dar o passo mais revolucionário na física atômica moderna [...] Ele minimizou sua própria visão bombástica, e foi Einstein quem primeiro pressionou ou talvez até mesmo reconheceu suas implicações revolucionárias. Planck, embora tenha sido o Galileu da física quântica, preocupou-se durante toda a sua vida com a terrível ruptura que causou com a física clássica e a causalidade. No entanto, aos 42 anos, ele fez a ruptura, mergulhou corajosamente em território desconhecido, como outros físicos eminentes não ousaram ou foram perspicazes o suficiente para fazer. Tanto o seu conservadorismo quanto o seu radicalismo refletem o que todos diziam sobre Planck: ele era um modelo de integridade (Feldman, 2000, p. 139).

O relato de Feldman parece muito preciso e certamente a audácia conservadora de Planck transparece na sua Palestra do Nobel, quando ele guia o público em uma jornada de inovação justificada, exatamente quando um novo cânone teórico e axiológico germinava. Integridade também é um termo importante que define sua conferência, pois ele é minucioso na construção de sua narrativa, justificando teórica e metodologicamente cada passo de sua busca. Demonstrando total cautela em relação ao tema, ele racionaliza uma história integral do quantum da ação, mesmo que nas décadas anteriores, ele tenha qualificado seu grande triunfo como um ato de desespero.

V. Perspectivas educacionais

Aulas ou disciplinas que almejam ensinar mecânica quântica são inevitavelmente introduzidas pela abordagem do problema do corpo negro. Afinal, este foi um divisor de águas na física, embora não tenha sido imediatamente reconhecido como tal por Planck. Professores e livros invariavelmente apontam que a evidência empírica coletada no século 19 desafiava o eletromagnetismo clássico, especialmente a parte do espectro regida pela lei de distribuição de Wien, aludindo à famosa catástrofe ultravioleta. Não é de admirar que alguém decida fazer isso; como tem sido defendido, o mundo quântico está tão distante da nossa experiência cotidiana, tão distante de qualquer teoria clássica da física, que este tipo de introdução parece inevitável e até desejável.

Pesquisadores em educação científica, filósofos e cientistas têm defendido que a história da ciência deveria ser amplamente ensinada (Matthews, 2012). Ela mostra potencial para humanizar e socializar a ciência, para apresentar aos alunos o raciocínio e as metodologias científicas, para mostrar a carga de valores das teorias, para discutir a natureza da ciência. Por outro lado, a investigação também mostra as dificuldades envolvidas em tal empreendimento; questões que envolvem como, o que e quando ensinar estão sempre em consideração (Martins, 2007). É justo enfatizar, porém: e se uma parte da história da física já fosse tradicionalmente bem-vinda na sala de aula, como é o caso do problema do corpo negro? Neste caso, o que e quando ensinar parecem ser problemas resolvidos, permanecendo ainda a questão de como ensinar.

Alguns dos livros didáticos mais utilizados nos currículos brasileiros introduzem a estrutura da matéria recorrendo até certo ponto à história. Eisberg e Resnick (1985) introduzem o seu primeiro capítulo aludindo ao artigo seminal de Planck e fecham o mesmo capítulo com uma pequena seção histórica. Algumas introduções históricas também podem ser vistas em Bohm (1989). O autor brasileiro Nussenzveig (1998) intercala conteúdo e história, assim como o fazem Haliday, Resnick e Walker (2018) e Tipler (1978). Abordar a história do corpo negro nunca foi o objetivo principal destes livros didáticos; consequentemente, apresentam lacunas históricas e associações problemáticas, que podem levar os leitores a conclusões incorretas, como Planck ter sido o proponente da quantização da energia. Vale ressaltar que os livros didáticos são o produto final de um processo bastante complexo e seus autores não devem ser

culpados por questões históricas. O que queremos dizer aqui é que eles abrem a possibilidade para o educador por eles orientado de abordar essa história à sua maneira, já que os próprios livros didáticos optam por utilizar a história para apresentar o assunto. No entanto, é claro que não são suficientes como fontes históricas.

Professores muitas vezes lutam para encontrar boas fontes históricas para suas aulas. Neste artigo, argumentamos que a Conferência Nobel de Planck é uma fonte muito frutífera que pode ser usada para fins educacionais. Como argumenta Whitaker (1979, p. 242), as Palestras do Nobel são “obviamente autênticas e muitas vezes de um nível razoável para um aluno”; como indica Eshach (2009, p. 1379), “muitas das palestras, na verdade, são elas mesmas joias de exposição científica”. É claro que é fundamental ter cuidado com a maioria delas, pois os cientistas, estando no centro das atenções para o prêmio mais elevado das suas vidas, podem ser demasiado egocêntricos, demasiado generosos com os seus colegas, ou mesmo demasiado técnicos. Além disso, deve-se levar em conta que a maioria dos cientistas recebe o Prêmio Nobel muitos anos depois de suas descobertas e sabe-se que o tempo tem a capacidade de alterar perspectivas (Kragh, 1987). No entanto, é nossa posição que a palestra de Planck é, de fato, uma das joias a que Esach alude, pois o seu conteúdo dificilmente se desvia da sua autobiografia ou das cartas a que os historiadores tiveram acesso. Mais importante: mostra uma infinidade de aspectos sobre os tortuosos caminhos envolvidos no raciocínio científico e, em última instância, na racionalidade.

O ensino baseado em casos é uma ferramenta metodológica de ensino que difere da abordagem tradicional de ensino de ciências. Normalmente, os professores recorrem ao ensino de teorias científicas como regras a serem aplicadas em exercícios extensos; ao usar casos abertos, no entanto, o ensino e a aprendizagem de ciências passam de algorítmicos a investigativos. Os casos-história, que são casos históricos, podem ser repletos de características não apreendidas pelas regras, trazendo para as salas de aula aspectos da ciência muitas vezes negligenciados pelo ensino tradicional: emoções, criatividade, imaginação. Essas são características amplamente defendidas pelos pesquisadores em educação científica e, em um ensino de caso-história, não exigem que os conteúdos típicos – teorias e conceitos – sejam relegados, mas sim enriquecidos (Eshach, 2009).

Usar o Nobel de Planck como caso-história, durante um período de no máximo duas aulas, pode ser uma ferramenta útil em cursos de graduação. Contudo, exige considerações cuidadosas e, nesse caso, triangulações. Deve-se entender que a narrativa de Planck é sua própria perspectiva e foi ministrada quase vinte anos depois de seus trabalhos sobre o problema do corpo negro e, por isso, é mais sobre ele naquele momento do que sobre ele em 1901. Portanto, um educador deve considerar a ampliação das fontes, a fim de diferenciar o homem do conceito de quantum de ação. Neste caso, sugerimos recorrer às pesquisas de Darrigol (2001), Gearhart (2002) e Kragh (1999), especialmente para compreender o papel desempenhado pelo conhecimento e pelas críticas de Planck à mecânica estatística antes e nos

anos imediatamente posteriores à sua proposição. Esses são pontos inexplorados na palestra de Planck.

Ressalte-se ainda que a mediação feita pelo docente deverá levar em conta considerações metodológicas especiais. A palestra de Planck, embora seja uma fonte valiosa para um caso baseado no Prêmio Nobel, não pode ser usada sem contextualização. Criar uma história, mesmo que oral, em torno de sua palestra, exige uma compreensão dos contextos essenciais para o ensino de ciências. Embora levantemos objeções ao modelo proposto por Klassen (2006) no caso de evitar histórias escritas por cientistas, os cinco contextos que ele explora são certamente uma ferramenta valiosa para a construção da narrativa adequada para a sala de aula. No Brasil, Moura (2019) adaptou o modelo de Klassen para o uso de fontes primárias e seu modelo proposto também traz boas contribuições. Karam (2021) enumera cinco critérios para seleção de fontes primárias para fins educacionais. Devem (i) ter trechos curtos e perspicazes, (ii) ter notações que possam ser traduzidas para versões modernas quando necessário, (iii) ser guiados por objetivos educacionais claros; (iv) ser apoiados por boas fontes secundárias, e (v) ser capazes de ser comparado ao contexto contemporâneo presente nos livros didáticos. Se o professor sentir necessidade de escrever uma história baseada na palestra de Planck e outras fontes, os desenvolvimentos de Schiffer e Guerra (2019), Klassen (2009) e Metz et al (2007) mostram contribuições significativas para a lógica e a metodologia de construção de tais narrativas, com exemplos muito bons.

Para Eshach (2009), um bom caso-história baseado no Prêmio Nobel deve ser capaz de (a) se adequar ao currículo, (b) envolver um enredo cronológico, (c) usar material autêntico, (d) conter o contexto científico da descoberta, (e) associar os aspectos sociais e políticos da nomeação, (f) discutir se a descoberta foi revolucionária e (g) suscitar discussões sobre a natureza da ciência. Um caso-história baseado no Nobel de Planck, utilizando sua Palestra Nobel, certamente atenderá a quase todos os requisitos, sendo necessário aprofundamento em alguns deles, assim como todas as fontes históricas utilizadas para fins educacionais.

Como foi dito, o problema do corpo negro já é um dos mais abordados historicamente e é tradicionalmente uma forma de apresentar qualquer aula de física no que diz respeito à estrutura da matéria, atendendo ao requisito (a). A palestra de Planck é um material autêntico e acessível aos alunos de graduação, permitindo sua leitura na íntegra; além disso, Planck optou por narrar não apenas sua busca, mas também as indagações posteriores de seus colegas, de forma histórica e, portanto, cronológica, atendendo aos requisitos (b) e (c).

É necessário algum aprofundamento no contexto científico para cumprir o requisito (d); embora a palestra de Planck indique várias questões e os livros didáticos apresentem o desafio que o corpo negro representava para o eletromagnetismo, é realmente importante enfatizar as intrincadas relações entre mecânica, termodinâmica, eletromagnetismo e mecânica estatística para o alcance do postulado de Planck. Kirchhoff propôs o problema em 1860, mais de uma década antes da síntese do eletromagnetismo por Maxwell, ao estudar espectros de emissão e absorção (Thomas, 1991). Não havia explicação física para esses espectros, apenas

indícios de que eles exigiam uma compreensão mais profunda da estrutura da matéria, o que só viria a ocorrer em 1913, com o modelo atômico de Bohr (Kragh, 1999). A radiação térmica e os espectros foram um estudo importante durante a revolução industrial, pois foram uma ferramenta para a compreensão das altas temperaturas das máquinas térmicas. A segunda lei da termodinâmica, parte integrante da resolução de Planck, também exige abordagem, uma vez que seu significado foi contestado pela termodinâmica e pela mecânica estatística, esta última estando em certa desvantagem naquele ponto, embora se tornasse o principal recurso para o cálculo do quantum de ação de Planck. As ondas eletromagnéticas foram detectadas e produzidas empiricamente por Hertz em 1888, mesmo que previstas por Maxwell na década anterior (Harmann, 1982). O elétron tornou-se uma partícula com a pesquisa de Thomson em 1897, determinando sua razão carga/massa – o que explica a desconfiança de Planck na teoria do elétron de Lorentz em 1899 (Kragh, 1999).

Quanto ao requisito (e), Eshach (2009) sugere aprofundar o contexto social e político de uma nomeação – a exploração das discussões entre os membros do comitê, as indicações anuais e os possíveis motivos para a láurea em determinado ano. O próprio processo de indicações é uma forma de discussão social e política, mesmo que interna. No caso da nomeação de Planck, estes dados não são facilmente encontrados, mas algumas informações podem ser recolhidas na página inicial do Prêmio Nobel⁷. Ele havia sido indicado por vários colegas todos os anos desde 1907, recebendo um recorde de onze indicações em 1914. Percebe-se, no entanto, uma forte preferência demonstrada pelo Comitê do Nobel em laurear pesquisas empíricas nas primeiras duas décadas do Prêmio, o que pode ser atribuído à expertise dos membros, bem como à física puramente teórica ser uma novidade naquela época. Isso não quer dizer que Planck tenha sido um físico unicamente teórico, o que seria falso. Afinal, ele estava trabalhando na resolução teórica de um problema empírico. No entanto, nomeá-lo certamente abriria as portas para outros físicos mais teóricos, como Einstein e Bohr, e para todo um novo domínio de novos fenômenos ainda chocantes – como aconteceu, de fato (Feldman, 2000). O papel desempenhado pela Primeira Guerra Mundial também não deve ser esquecido, pois é a razão pela qual Planck recebeu o Prêmio de 1918 em 1919 (ano em que ainda recebeu seis indicações, Einstein e Wien entre os indicadores).

É senso comum que o trabalho de Planck desencadeou uma revolução, cumprindo o requisito (f). O quantum de ação seria em breve considerado uma medida da quantização da energia, com o trabalho de Einstein sobre a lei de distribuição de Wien e a sua utilização como explicação para o efeito fotoelétrico. Como foi dito, a quantização da energia não foi conclusão de Planck. É interessante que o seu Prêmio Nobel tenha sido em “reconhecimento dos serviços que prestou ao avanço da Física pela descoberta dos quanta de energia”, mostrando que o Comitê cometeu o mesmo erro que alguns livros didáticos ainda cometem hoje em dia. Este é um ponto muito interessante que pode ser levantado para o ensino a partir de um caso-história:

⁷ <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/planck/nominations/>>.

a capacidade de mostrar como as perspectivas mudam com o tempo, como os anos e a circulação do conhecimento podem fazer o estranho trabalho de reorganizar narrativas do que foi feito no passado.

Eshach (2009) sugere usar os critérios de Rigden (2005) para explicar os motivos pelos quais uma descoberta seria chamada de revolucionária: (i) ela deve conter uma grande ideia que (ii) contradiga o cânone científico e que (iii) seja tipicamente rejeitada pela comunidade até que seja forçada a reconhecer o contrário, e (iv) sobreviva ao escrutínio, tornando-se parte do cânone físico. Por estes padrões, poderíamos chamar o quantum de ação de um conceito revolucionário da Física? Para tal discussão, seria necessário mostrar que alguns conceitos científicos têm vida própria, uma vida que é majoritariamente definida pelos trabalhos de outros cientistas e menos pelo seu proponente. A interpretação de Einstein do quantum da ação é, de fato, uma ideia maior do que a interpretação do próprio Planck. Mas o quantum de ação é a semente para a quantização da luz tanto quanto para a quantização do momento angular, sendo, portanto, a semente da mecânica quântica. Nem sempre nascem grandes ideias – na verdade, na maioria das vezes, elas são construídas.

Por último, Eshach (2009) expressa que um bom caso-história deve ser capaz de abordar aspectos da natureza da ciência. Muito se tem discutido sobre o termo (Lederman, 1992; Lederman, 2007; Matthews, 2012), e aqui gostaríamos de enfatizar não exatamente a natureza da ciência, mas uma discussão sobre a racionalidade científica que é bastante vigorosa ao longo da palestra de Planck. Um leitor inadvertido poderia ser levado à conclusão de que as frequentes expressões de choque, espanto e outras emoções seriam um argumento em contrário – de que a ciência não é racional (ou, pelo menos, que Planck não era). No entanto, gostaríamos de argumentar, seguindo Laudan (1977; 1984), que a racionalidade da ciência reside precisamente na sua capacidade de se ajustar às dificuldades colocadas pela natureza.

A subdeterminação demanda uma nova abordagem à racionalidade científica, que leve em conta que a ciência não obedece a um conjunto anterior de regras axiológicas e metodológicas. Nesse caso, os ajustes e os julgamentos de valor são parte integrante da prática científica, que pode ser entendida como uma atividade de resolução de problemas. É verdade que a perspectiva de Laudan é comunitária, ou seja, refere-se a uma prática realizada no seio da comunidade científica; também é verdade que estamos propondo a análise da Palestra de Planck, especialmente as partes de sua própria e solitária investigação. Isso não deveria ser uma contradição, no entanto. Os ajustes de Planck são de fato especiais, pois ele é um exemplo de autocrítica profunda. Ele começa indicando sua primeira abordagem do problema do corpo negro, por meio do eletromagnetismo, e reconhecendo que não foi tão frutífero quanto ele gostaria. “No entanto, o resultado não significou mais do que um passo preparatório para o ataque inicial ao problema específico que agora se elevava com toda a sua assustadora altura ainda mais íngreme diante de mim”. Assim que toma conhecimento de novos resultados empíricos, que geraram uma inconsistência entre duas leis de distribuição diferentes, mas adequadas, decide “abordar o problema do lado oposto, o da termodinâmica, em cujo campo

me senti, aliás, mais confiante”. Mesmo depois da sua interpolação bem-sucedida, que deu uma expressão analítica à radiância espectral, Planck não ficou satisfeito com o seu significado. “Eu mantinha a opinião inabalável de que quanto *mais simples* a apresentação de uma lei particular da Natureza, *mais geral* ela é”. Ele então recorre à mecânica estatística, mesmo que apenas como uma ferramenta, para dar sentido à sua expressão, “até que depois de algumas semanas do trabalho mais árduo da minha vida, *a luz entrou na escuridão, e uma nova perspectiva inimaginável se abriu diante de mim*”.

Escolhemos algumas citações repletas de emoções para mostrar como elas não significam necessariamente uma prática irracional, senão as relações entre o homem, as teorias, os métodos e os fatos. Esta é a sua história, e embora cheia de surpresas, é também muito justificada, muito racional, pois está sempre cheia de indicações dos valores mais apreciados da ciência: consistência (com a mecânica estatística), precisão (com resultados empíricos), escopo (com outras pesquisas) e, acima de tudo, fecundidade (sendo o quantum de ação fundamental nos quanta de luz de Einstein e no modelo atômico de Bohr). Ao final, ele reconhece as inconsistências que o quantum de ação trouxe ao eletromagnetismo, algo que daria origem a uma nova área da física, mostrando por que os valores devem ser tomados não como regras, mas como máximas, como apontaria Kuhn (1977).

Embora defendamos a utilização da palestra de Planck, devemos reiterar que este é um documento que exige cautela, não porque seja impreciso, mas principalmente porque é uma reconstrução racional feita vinte anos depois do trabalho de Planck. A essa altura, Planck era uma personalidade científica diferente: já tinha aceitado a entropia estatística e a quantização da energia. Ao longo da sua vida, Planck foi sobretudo um conservador, inclinado até ao energitismo, e isso o impediu (e a comunidade científica) de ver as interpretações latentes que o quantum da ação mantinha. No entanto, Planck de 1920 é um personagem tão interessante quanto ele era em 1900. Além disso, sua justificação de 1920 mostra um desenvolvimento que foi tanto dele como das ciências físicas. A palestra é, portanto, um grande subsídio ao ensino de física, desde que leve em conta que o narrador da história era, na verdade, um homem diferente do conservador que já foi, que entendeu ter plantado as sementes de uma anomalia e desencadeado inadvertidamente uma revolução.

V. Considerações finais

Em muitas ocasiões ao longo de sua palestra, Planck menciona os desenvolvimentos que aproximaram a comunidade científica da verdade. O que ele quis dizer com isso pode ser melhor compreendido em sua autobiografia, na qual menciona a dicotomia da construção de uma visão de mundo científica mais verdadeira que, apesar do seu grande sucesso, poderá nunca alcançar o domínio da metafísica. Para ele, essa era a irracionalidade que as ciências exatas inevitavelmente enfrentam; mas apesar disso, a ciência tornou-se extremamente confiável.

Por outro lado, o próprio fato de a ciência estabelecer os seus próprios limites com base no próprio conhecimento científico parece adequado para reforçar a confiança de todos na confiabilidade desse conhecimento, conhecimento obtido com base em pressupostos incontestáveis e com a ajuda de rigorosos métodos experimentais e teóricos (Planck, 1949, p. 324).

Sua posição parece combinar com a aqui defendida. A racionalidade que entendemos como um tema importante para a aula de física não é aquela que deriva de métodos de descoberta do mundo metafísico, porque isso seria uma tarefa impossível para o contexto que sugerimos. Mas não se deve descartar a racionalidade da ciência em virtude de questões ontológicas, quando ela pode ser abordada de forma epistemológica. Como indica Laudan (1984, p. 64)

Mas além de exigir que nossos objetivos cognitivos reflitam nossas melhores crenças sobre o que é e o que não é possível, que os nossos métodos devam estar em uma relação apropriada com os nossos objetivos, e que os nossos valores implícitos e explícitos devam ser sincronizados, há pouco mais que a teoria da racionalidade pode exigir.

A prática de Planck, tal como expressa na sua Palestra Nobel, mostra estas inter-relações, ao resolver um problema e criar inesperadamente uma anomalia nova e frutífera que daria origem a uma nova área da física. A teoria quântica impôs grandes mudanças na forma como a física e os físicos veem o universo. Em primeiro lugar, podemos considerar os processos descontínuos de transferência de energia. Esses saltos quânticos não podem ser explicados pelas nossas leis clássicas. Em segundo lugar, as leis quânticas parecem controlar a probabilidade, tornando algumas ocorrências não previsíveis com certeza. Embora isso seja curioso e esteja em oposição às leis determinísticas, não é exatamente uma novidade. Na verdade, como já foi dito, a entropia tem características probabilísticas. Momento e o momento angular, assim como a conservação da energia, são alguns exemplos de entidades que não perdem o significado mesmo em processos descontínuos (Bohm, 1989).

Tanto professores como estudantes podem perguntar-se como a racionalidade pode ser atribuída ao quantum de ação de Planck, se ele – e a comunidade científica – não se deu conta ao que ele poderia significar antes dos quanta de luz de Einstein. Os significados dos conceitos físicos nem sempre são evidentes e geralmente exigem tempo para serem considerados revolucionários. O conceito de campo, por exemplo, proposto por Faraday no início do século 19, é hoje entendido como um desafio ao mecanicismo, pois atribui à matéria a capacidade de mudar o seu entorno, enquanto a matéria inerte é o aspecto central do mecanicismo. Contudo, a proposta do conceito não impediu Maxwell de desenvolver a teoria eletromagnética de forma mecanicista e o éter fez parte do cânone científico até o início do século 20 (Harmann, 1982). Poderíamos também sugerir que a resistência de Planck aos quanta de luz era também irracional; a resistência, no entanto, não pode ser vista como um sinal de pura irracionalidade, pois é muitas vezes o resultado de uma grande confiança no cânone anterior bem-sucedido e na

sua consistência com tantos outros fenômenos. Em 1920, finalizando sua palestra, Planck refletiu sobre as inconsistências entre a ideia de quanta de luz e o eletromagnetismo, mostrando que ainda refletia sobre consequências de seu quantum de ação. Mas em 1949⁸, parece que ele as aceitou.

Para citar um exemplo concreto, tal fato é a velocidade da luz no espaço vazio, e outro é o papel desempenhado pelo quantum elementar de ação na ocorrência regular de todos os processos atômicos. Estes dois fatos, e muitos mais, não puderam ser incorporados na imagem clássica do mundo e, consequentemente, a imagem clássica do mundo teve que ceder seu lugar a uma nova ideia de mundo [...] Na verdade, as leis da mecânica clássica continuam a valer satisfatoriamente para todos os processos nos quais a velocidade da luz pode ser considerada infinitamente grande e o quantum de ação infinitamente pequeno. Desta forma, somos capazes de ligar de uma maneira geral a mecânica com a eletrodinâmica, substituir a energia pela massa e, além disso, reduzir os blocos de construção do universo dos noventa e dois tipos diferentes de átomos da imagem clássica do mundo para dois – elétrons e prótons (Planck, 1949, p. 323).

Finalmente, devemos mencionar o papel desempenhado pela mecânica estatística nesta questão. Embora hoje seja uma disciplina de grande importância em qualquer curso de graduação em Física, reiteramos que não era um consenso na época. Como já foi dito, Planck resistiu a recorrer a ela enquanto pôde; e mesmo assim, usou-a mais como uma ferramenta do que como um adotante de sua interpretação da entropia, no que chamou de “um ato de desespero” (Kragh, 2000). Mais uma vez, em retrospectiva, seria possível questionar se isto também não é um sinal de irracionalidade; afinal, como alguém poderia usar uma teoria sem estar de acordo com seu significado último? As razões são muitas, mas gostaríamos de destacar duas, em particular. Primeiro, porque a criatividade é um recurso fundamental para os cientistas; a criatividade e o desespero são humanos, mas só podem ser celebrados como científicos se demonstrarem poder cognitivo. Nas palavras de Planck

Na verdade, quando o pioneiro na ciência envia as sondagens dos seus pensamentos, ele deve ter uma imaginação intuitiva vívida, pois novas ideias não são geradas por dedução, mas por uma imaginação artisticamente criativa. No entanto, o valor de uma nova ideia é invariavelmente determinado não pelo grau da sua intuição – que, aliás, é em grande medida uma questão de experiência e hábito – mas pelo alcance e precisão das leis individuais para cujas descobertas eventualmente conduz (Planck, 1949, p. 325).

A segunda razão leva-nos de volta a Laudan, que reconhece que os cientistas podem concordar metodologicamente, mesmo que axiologicamente não o façam. Exigir que os cientistas concordem em tudo, menos nos fatos, é, na verdade, exigir que a ciência seja feita de

⁸ Max Planck faleceu em 1947, mas sua autobiografia foi publicada em 1949.

acordo com um conjunto de regras, que os cientistas sejam dogmatizados para compreender o mundo da mesma maneira. Significa que a ciência acabaria por perder o seu poder criativo, que seria mais uma religião. Pode ser estranho presumir que um antigo energitista usaria uma lei de uma teoria atomística para resolver um problema, mas as metodologias são subdeterminadas pelos valores tanto quanto as teorias são subdeterminadas pelas evidências. Em qualquer caso, como foi mencionado, Planck acabou por concordar com a entropia estatística, provavelmente devido ao papel que também desempenhou no trabalho de Einstein (mas certamente muitos anos depois de 1905). Sua transição é também o relato histórico de como a ciência aceitou o atomismo e a entropia estatística. Como diz Kragh (2000), a história do quantum de ação é menos uma história das deficiências do eletromagnetismo e mais uma história da compreensão da entropia.

Referências bibliográficas

- BOHM, D. **Quantum Theory**. Englewood Cliffs: Dover, 1989.
- BOHR, N. The Structure of the Atom (1922). In: **Nobel Lectures, Physics 1922-1941**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1965.
- DARRIGOL, O. The Historians' Disagreements over the Meaning of Planck's Quantum. **Centaurus**, v. 43, n. 3-4, 2001.
- CURIE, M. Radium and the new concepts in chemistry. In: **Nobel Lectures, Chemistry 1901-1921**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1966.
- CURIE, P. Radioactive substances, especially radium. In: **Nobel Lectures, Physics 1901-1921**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1967.
- EISBERG, R. M.; RESNICK, R. **Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles**. John Wiley and Sons, 1985.
- ESHACH, H. The Nobel Prize in the Physics Class: Science, History, and Glamour. **Science and Education**, v. 18, 2009.
- FELDMAN, B. **The Nobel Prize**: a history of genius, controversy, and prestige. Arcade Publishing, 2000.
- GEARHART, C. Planck, the Quantum, and the Historians. **Physics in perspective**, v. 4, 2002.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of Physics** (extended). John Wiley & Sons, 2018.

HARMANN, P. M. **Energy, force, and matter**: the Conceptual Development os Nineteenth-Century Physics. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1982.

KARAM, R. Considerações metodológicas sobre o uso de fontes primárias no ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 4, ed. especial, 2021.

KLASSEN, S. A Theoretical Framework for Contextual Science Teaching. **Interchange**, v. 37, 2006.

KLASSEN, S. The Construction and Analysis of a Science Story: a Proposed Methodology. **Science&Education**, v. 18, 2009.

KRAGH, H. An introduction to the historiography of science. **Cambridge University Press**, 1987.

KRAGH, H. **Quantum generations**: a history of physics in the twentieth century. Princeton: Princeton University Press, 1999.

KRAGH, H. Max Planck: the reluctant revolutionary. **Physics World**, dec. 2000.

KUHN, T. S. Objectivity, Value Judgement and Theory Choice. In: The **Essential Tension**: selected studies in scientific tradition and change. The University of Chicago Press, 1977.

KUHN, T. S. Revisiting Planck. **Historical Studies in the Physical Sciences**, v. 14, 1984.

LAUDAN, L. **Progress and its problems**. University of California Press, 1977.

LAUDAN, L. **Science and values**: the aims of science and their role in scientific debate. University of California Press, 1984.

LEDERMAN, N. G. Students' and teachers' conceptions of the nature of science: A review of the research. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 29, n. 4, 1992.

LEDERMAN, N. G. Nature of Science: Past, Present, and Future. In: ABELL, S. K.; APPLETON, K.; HANUSCIN, D. (Eds). **Handbook of Research on Science Education**. Routledge, 2007.

MARTINS, A. F. P. História e Filosofia da Ciência no ensino: Há muitas pedras nesse caminho... **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 1, p. 112, 2007.

MATTHEWS, M. R. Changing Focus: From Nature of Science to Features of Science. In: KHINE, M. S. (Ed). **Advances in Nature of Science Research**. Springer, 2012.

METZ, D. *et al.* Building a Foundation for the Use of Historical Narratives. **Science&Education**, v. 16, 2007.

MOURA, B. A. Leitura contextualizada de fontes primárias: subsídios para incluir a história da ciência em situações de ensino. In: SILVA, A. P. B.; MOURA, B. A. (Eds.). **Objetivos humanísticos, conteúdos científicos**: contribuições da história e da filosofia da ciência para o ensino de ciências. Campina Grande: UEPB, 2019.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. São Paulo: Ed. Blucher, 1998. v. 4

PLANCK, M. The meaning and limits of exact science. **Science**, v. 110, sep. 1949.

PLANCK, M. The Genesis and Present State of Development of the Quantum Theory (1920). In: **Nobel Lectures, Physics 1901-1921**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1967.

RIGDEN, J. S. Einstein's revolutionary paper. **Physics World**, 2005.

SCHIFFER, H.; GUERRA, A. Problematizando práticas científicas em aulas de física: o uso de uma história interrompida para se discutir ciência de forma epistomológica-conceitual. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 19, 2019.

SIME, R. L. Marietta Blau: Pioneer of Photographic Nuclear Emulsions and Particle Physics. **Physics in Perspective**, v. 15, 2013.

SÖDERQVIST, T. The meaning, nature, and scope of scientific (auto)biography. In: FORSTNER, C., WALKER, M. (Eds). **Biographies in the History of Physics**. Springer, Cham.

TIPLER, P. A. **Modern Physics**. Worth Publishers, 1978.

THOMAS, N. C. The early history of spectroscopy. **Journal of Chemical Education**, v. 68, n. 8, 1991.

WHITAKER; M. A. B. History and quasi-history in physics education – part 2. **Physics Education**, v. 14, 1979.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#).