

Max Planck (1858-1947), um revolucionário conservador

Ana Simões

NÃO HÁ, TALVEZ, FIGURA QUE MELHOR EXEMPLIFIQUE AS VICISSITUDES DA TRANSIÇÃO DA FÍSICA CLÁSSICA PARA A FÍSICA QUÂNTICA, AS HESITAÇÕES, AVANÇOS E RECUOS QUE A ACOMPANHARAM, DO QUE O FÍSICO ALEMÃO MAX PLANCK, A QUEM FOI ATRIBUÍDO O PRÉMIO NOBEL DA FÍSICA EM 1918 PELO SEU “TRABALHO NO ESTABELECIMENTO E DESENVOLVIMENTO DA TEORIA DOS QUANTA.”¹

E que continue, nas exposições incluídas em manuais escolares e livros de divulgação, a integrar relatos de tipo mítico, que mais recordam contos de fadas do que verdadeiras narrativas históricas.

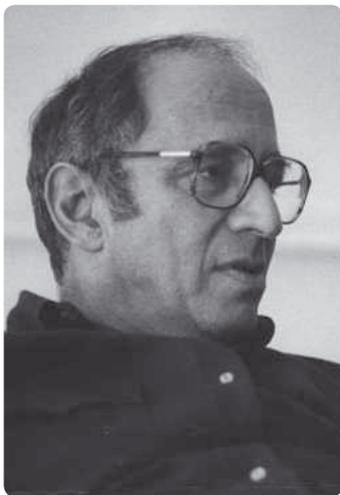
PERCURSOS DE PLANCK: DA TERMODINÂMICA ÀS INCURSÕES QUÂNTICAS

Max Karl Ernst Ludwig Planck nasceu a 23 de Abril de 1858. Frequentou o ensino secundário no Maximilian-Gymnasium em Munique.² A referência feita pelo professor de matemática ao princípio universal da conservação da energia exerceu imediatamente um enorme fascínio sobre o jovem Planck, cujo percurso científico será pautado desde então pela procura do universal e do absoluto.³ Frequentou a Universidade de Munique por três anos e a Universidade de Berlim por um ano, tendo tido aulas com Hermann Helmholtz e com Gustav R. Kirchhoff. Do primeiro recordará a integridade, modéstia de carácter e as aulas mal preparadas, do segundo relembrará aulas áridas e entediantes mas meticulosamente preparadas. Data de então a sua imersão no tratado de termodinâmica de Rudolf Clausius, cujo estilo e conteúdo sempre o fascinaram. Doutorado em 1879 com uma tese sobre a Segunda Lei da Termodinâmica, tornar-se-á *Privatdozent* em Munique e, a partir de 1885, professor associado em Kiel. Na sequência da morte de Kirchhoff muda-se para Berlim em 1889, ainda como professor associado e, em 1892, torna-se professor catedrático aos 32 anos.

Especialista em termodinâmica e, em particular nas aplicações da Segunda Lei à física e à química, acompanha e

participa nos trabalhos de construção da sub-disciplina que ficou conhecida por química-física e que então dava os seus primeiros passos. Na polémica que opõe Ludwig Boltzmann, o autor da interpretação microscópica da entropia, ao químico-físico Wilhelm Ostwald, o principal arauto da escola da energética que conferia estatuto de exclusividade à energia, toma o partido do físico-filósofo austríaco, embora não nutra qualquer simpatia nem pela teoria cinética dos gases nem pela teoria atómica em que esta assenta. Para Planck, a Segunda Lei continuava a ter uma validade absoluta, e não meramente estatística, como reclamava Boltzmann.⁴ Será na qualidade de sucessor de Kirchhoff e editor das suas lições póstumas que se vê forçado a dominar os métodos da teoria cinética dos gases, o que se revelará fundamental nas suas incursões quânticas.

É já em Berlim que contacta com o trabalho de Otto Lummer, Ernst Pringsheim, Heinrich Rubens e Ferdinand Karlbau, os experimentalistas do Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Instituto Físico-Tecnológico), que estudam as propriedades térmicas de equilíbrio da radiação do corpo negro com o objectivo de encontrar uma classificação para a eficiência de lâmpadas eléctricas útil no desenvolvimento das indústrias alemãs de iluminação e aquecimento.⁵ A questão não era, portanto, uma questão meramente académica mas um problema técnico eminentemente prático. Admira o rigor das experiências aí realizadas que acompanha atentamente e a credibilidade que atribui a estes resultados experimentais virá a ser um factor decisivo na proposta de lei a que obedece a radiação do corpo negro,⁶ que apresentará em 1900 e que, de acordo com a tese comumente aceite, marca o início da física quântica.⁷ Com efeito, esta tem a sua origem no estudo das propriedades térmicas da radiação e, em particular, no esclarecimento das propriedades do corpo negro.



A TESE DE THOMAS KUHN: A QUANTIFICAÇÃO PARA PLANCK ERA APENAS UM TRUQUE DE MATEMÁTICA A ENQUADRAR NA FÍSICA CLÁSSICA

Desde os finais da década de 1970 e, nomeadamente, desde os trabalhos do historiador e filósofo das ciências Thomas S. Kuhn,⁸ os historiadores da ciência têm vindo a reavaliar o significado atribuído por Planck à quantificação introduzida em 1900. Para Kuhn a nova física associada às

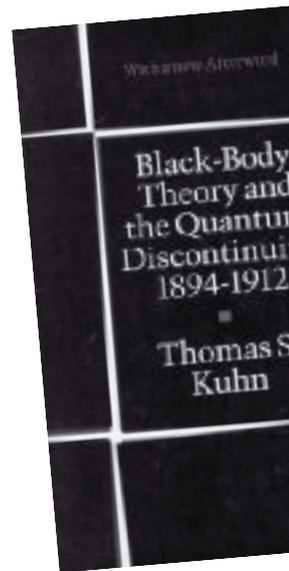
contribuições de Planck viria a entrar em conflito com a física clássica, com a visão do mundo que sempre tinha sido, e que continuava a ser, a de Planck, e com o seu programa de investigação, pautado pela incessante procura do absoluto (universal) na física. Foi a constatação deste aparente paradoxo que levou Kuhn a propor uma revisão da história das origens da física quântica. Analisando os trabalhos de Planck no contexto da física da

sua época (1894-1912) e das preocupações do próprio Planck, tentando esclarecer quais os problemas, métodos e hipóteses que constituíam o seu programa de investigação assim como de todos aqueles que se preocuparam com o esclarecimento da radiação do corpo negro e de fenómenos radiativos igualmente paradoxais, constatando a ambivalência tardia de Planck face à física quântica (1900-1906), Kuhn acabaria por concluir que, em 1900, Planck introduzira apenas um constrangimento matemático, sem implicações físicas, tentando nos anos seguintes interpretar esta imposição matemática no contexto da física clássica.

PLANCK E A TEORIA DE CORPO NEGRO

No centro do projecto de investigação de Planck encontrava-se a tentativa de explicação dos processos irreversíveis numa base exclusivamente termodinâmica. Neste contexto, explorará as relações entre termodinâmica e electrodinâmica, procurando justificar a irreversibilidade dos fenómenos radiativos com base nas equações de Maxwell e tornando-se, assim, alvo fácil das críticas de Boltzmann que o alertava para a impossibilidade de derivar um comportamento irreversível a partir de leis reversíveis, a não ser através da introdução de uma hipótese adicional. Planck ver-se-á, assim, forçado a procurar um outro caminho que o conduza ao esclarecimento do comportamento do corpo negro (Caixa 1).

No período de dois anos, entre 1897 e 1899, Planck submeteu à Academia das Ciências da Prússia uma série de cinco artigos em que expunha uma teoria geral da radiação do corpo negro. Para representar a interacção da radiação com as paredes da cavidade do corpo negro recorreu a osciladores harmónicos, escolha resultante da aplicação de um critério de simplicidade que, devido ao teorema de Kirchhoff, não retirava qualquer generalidade ao modelo escolhido. Partindo da igualdade entre as taxas de emissão e de absorção dos osciladores em equilíbrio, Planck demonstrava que $u(\nu, T) = 8\pi \frac{\nu^2}{c^3} U(T)$ representando $u(\nu, T)$ a densidade da energia e $U(T)$ a energia média do oscilador de frequência ν , sendo T a temperatura absoluta e c a velocidade da luz. Notava seguidamente que a expressão anterior e a lei de Wien correspondiam a admitir que a entropia S dos osciladores era dada por $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{const}{U}$. Embora a teoria cinética dos gases e, em particular, o teorema da equipartição da energia, permitissem afirmar



imediatamente que $U(T) \propto kT$, esta relação nunca é usada por Planck, que opta sempre, de acordo com a sua visão do mundo, pelo recurso a raciocínios termodinâmicos (Caixa 2).

Esta fase do projecto planckiano culminou com um artigo de revisão publicado na revista "Annalen der Physik" no princípio de 1900, em que apresentava uma sùmula das suas contribuições anteriores. Entretanto, o trabalho experimental de Lummer e Pringsheim sobre a radiação do corpo negro realizado no Instituto Físico-Tecnológico sugerira a possibilidade de desvios face à lei de Wien na gama das baixas

frequências. A 19 de Outubro de 1900, Rubens e Kurlbaum apresentam à Sociedade Alemã de Física um trabalho que não só confirma estas suspeitas como mostra inequivocamente que nas baixas frequências $u(\nu, T) \propto T$.

À apresentação de Rubens e Kurlbaum seguiu-se a leitura realizada pelo próprio Planck, já a par destes resultados, de um artigo intitulado "Nota àcerca de um refinamento da lei de distribuição de Wien," em que é derivada uma nova lei de distribuição compatível com a lei de Wien nas frequências elevadas e com os resultados experimentais de Rubens e Kurlbaum nas baixas frequências. Como Planck já mostrara que a lei de Wien correspondia a admitir que a entropia S dos osciladores

era dada por $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{const}{U}$, Planck sugeria

agora que na gama das baixas frequências se introduzisse uma nova hipótese

$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{const}{U^2}$ e, seguidamente, para se obter uma

fórmula válida em toda a gama de frequências, se fizesse, tal como em muitos dos raciocínios usados na química-física, uma interpolação entre as duas expressões anteriores, isto é, se admitisse que

$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{a}{U(U+b)}$ em que a e b são constantes.

A igualdade termodinâmica $\frac{1}{T} = \frac{\partial S}{\partial U}$ conduziu

imediatamente à nova lei de distribuição $u(\nu, T) = \frac{AV^3}{e^{B\nu/T} - 1}$

(A e B são constantes, $A=8\pi h / c^3$ e $B=h/k$, h constante de Planck e k constante de Boltzmann).

Nos dois meses seguintes e até 14 de Dezembro de 1900, dia em que apresenta o artigo "Sobre a teoria da lei de distribuição da energia no espectro normal," Planck procurou justificar teoricamente a nova lei de distribuição recorrendo a um modelo para a interacção entre radiação e matéria derivado de princípios fundamentais. A influência de Boltzmann é clara na derivação probabilística que apresenta. Recorre então à fórmula de Boltzmann $S = k \log W$ que relaciona a entropia S com a probabilidade termodinâmica W e que escreve pela primeira vez desta maneira. Para determinar W , conta o número de maneiras de distribuir uma energia determinada por um conjunto de osciladores. Inspirando-se na técnica de Boltzmann,

O CORPO NEGRO EM CONTEXTO

O corpo negro é uma idealização que descreve um corpo que absorve completamente a radiação electromagnética que nele incide. Como no interior de uma cavidade a radiação que nela penetra não tem por onde sair e é continuamente absorvida e re-emitada pelas paredes, esta constitui uma boa materialização de um corpo negro.

Em 1860, Gustav Robert Kirchhoff definiu um corpo negro ideal e estabeleceu o "carácter universal" da lei de distribuição da densidade de energia u da radiação em equilíbrio numa cavidade a temperatura constante, isto é, mostrou que esta é independente da natureza dos corpos materiais em equilíbrio com a radiação (Teorema de Kirchhoff) e, por isso mesmo, denota algo de "absoluto". Em 1879 o físico austríaco Josef Stefan verificou experimentalmente que a densidade total de energia do corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura $(\int_0^\infty u(\nu, T) d\nu = \sigma T^4)$. E, cinco anos mais tarde, o seu

compatriota Ludwig Boltzmann demonstrou teoricamente que este resultado decorria da aplicação da segunda lei da termodinâmica à radiação tratada como um gás cuja pressão é a pressão da radiação dada pela teoria electromagnética de Maxwell. Ao chamar a atenção dos físicos para esta nova área de estudos, a lei de Stefan-Boltzmann (1884), como veio a ser conhecida, foi uma de entre várias leis que foram propostas para dar conta do comportamento do corpo negro. Apesar de não oferecer qualquer solução para o esclarecimento da lei de distribuição espectral da radiação, contribuiu para colocar esta questão na agenda dos físicos. Com efeito, em 1893, Wilhelm Wien mostrou que a segunda lei da termodinâmica impunha uma limitação à forma da função u : $u(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$, da qual decorria a confirmação do resultado conhecido $\lambda_{max} T = const$ (lei do deslocamento de Wien). Três anos depois, em 1896, Wien encontrou uma solução particular para a função f , ao mostrar que $u(\nu, T) = \alpha \nu^3 \exp(-\beta \nu/T)$ com α e β constantes.

Se esta função dava conta do comportamento experimental então conhecido da radiação do corpo negro na gama das frequências elevadas, os argumentos teóricos em que se baseava estavam longe de ser aceites consensualmente. Por outro lado, ao explorar-se o comportamento do corpo negro noutras gamas de frequências, confirmou-se a validade limitada da lei. Estava aberto o caminho à participação de Max Planck.

introduz a hipótese de que E , a energia total dos osciladores, se encontra dividida em "elementos de energia" finitos ϵ . E afirma: "A energia E é composta por um número bem definido de partes iguais e recorreremos à constante da natureza $h=6,55 \times 10^{-27}$ erg s. Esta constante multiplicada pela frequência comum ν dos osciladores permite obter o elemento de energia ϵ em erg e dividindo-se E por ϵ obtemos o número P de elementos de energia que devem ser distribuídos pelos N osciladores. Se este quociente assim calculado não for inteiro, toma-se P por um inteiro da vizinhança."⁹

Estes dois artigos são habitualmente associados à introdução do conceito de espectro discreto de energia, de quantificação e de descontinuidade embora não haja neles qualquer referência explícita a esses conceitos. Se foram estes os primeiros passos de uma revolução na física, na altura passaram despercebidos a todos e também, seguramente, a Planck. Mas Planck rejubilava com a possibilidade oferecida pela sua lei para calcular rigorosamente várias constantes universais da natureza: a constante de Boltzmann, o número de Avogadro e a carga eléctrica elementar. Que maior compensação podia oferecer a sua teimosa procura do universal! Nos finais do ano seguinte, Planck mostra que a nova função S é uma

PLANCK E A CATÁSTROFE DOS ULTRAVIOLETAS

Ao descrever o percurso que conduziu Planck às contribuições de 1900, não fiz qualquer referência à lei de distribuição de Rayleigh-Jeans nem à chamada catástrofe dos ultravioletas. Porque é, então, comum ler em manuais escolares e livros de divulgação científica que foi para resolver a catástrofe dos ultravioletas que Planck introduziu os quanta na física? Será que Planck conhecia a lei de distribuição que o físico inglês Lord Rayleigh tinha derivado como consequência necessária da física clássica? E, caso a conhecesse, que importância lhe atribuía?

Numa pequena nota de duas páginas “Remarks upon the law of complete radiation” publicada no “Philosophical Magazine” (Junho de 1900) Rayleigh expôs um modelo mecânico para o éter e usou o teorema da equipartição da energia, derivado no contexto da teoria cinética dos gases, e os seus conhecimentos sobre fenómenos ondulatórios, para demonstrar que $u(\nu, T) \propto \nu^2 T$ (mais tarde conhecida por lei de Rayleigh-Jeans) Acrescentou cautelosamente no fim do artigo que um factor exponencial de correcção deveria ser introduzido para completar a lei de distribuição derivada. Em 1902, na colectânea “Scientific Papers”, Rayleigh é muito mais claro. Declara, então, que a fórmula anterior só é válida na gama das baixas frequências pois, na gama das altas frequências, isto é, na

gama dos ultravioletas, $\int_0^{+\infty} kT\nu^2 d\nu$ é divergente. Até meados de 1900, os (poucos) físicos que se interessavam pela radiação do corpo negro depararam-se com uma situação complicada: a lei de Wien dava conta dos resultados experimentais mas a sua justificação teórica não era satisfatória e a lei de Rayleigh-Jeans oferecia uma justificação teórica clássica moderadamente aceitável, dependente do teorema da equipartição cuja generalidade se discutia, mas não era compatível com a lei de Wien. E as coisas complicaram-se ainda mais quando se verificou que nem a lei de Wien sobrevivia aos novos dados experimentais.

Não é possível esclarecer definitivamente se Planck conhecia o artigo de Rayleigh, mas é provável que assim acontecesse. Na verdade, neste período surgem várias propostas de leis de distribuição, derivadas de formas mais ou menos *ad hoc*, e sabe-se que Planck acompanhava de perto estes desenvolvimentos. Contudo, não posso deixar de notar que o raciocínio de Rayleigh, dependente da teoria cinética dos gases, era ortogonal ao programa de investigação, assente na termodinâmica, que ocupava Planck há mais de uma década, pelo que é razoável concluir que, mesmo que Planck conhecesse a fórmula de Rayleigh-Jeans, esta não lhe teria despertado interesse particular. Finalmente, um dos mitos mais pertinazes da história da física, segundo o qual Planck introduziu os quanta na física para evitar a chamada “catástrofe dos ultravioleta,” foi retrospectivamente construído por Paul Ehrenfest, ao criar em 1911 uma versão revisionista da história da física quântica, em que a apresentava em contraste abrupto com a física clássica.

função monótona crescente e tende para um máximo, sendo portanto identificada com a entropia termodinâmica. E, em 1906, na primeira edição das “Lições sobre a teoria da radiação térmica” reproduz o raciocínio dos artigos anteriores. De acordo com Kuhn, neste livro não há nenhum retrocesso mas simplesmente a continuação e, simultaneamente, o culminar de um extenso programa de investigação.

créditos: AIP



FINALMENTE PLANCK CEDE: HÁ MAIS QUE MALABARISMO MATEMÁTICO

Só em 1908, numa carta que endereça a Lorentz, goradas todas as tentativas explicativas de encontrar uma justificação clássica para a sua fórmula, e após a introdução dos quanta de luz por Albert Einstein, em 1905, e a dedução independente da fórmula da radiação do corpo negro por Paul Ehrenfest, é que Planck finalmente admitiria que o “malabarismo matemático” de 1900 implicava também uma restrição dos valores da energia, isto é, uma descontinuidade física. Escreve enfim que a energia dos osciladores é um múltiplo inteiro do elemento de energia. Nos anos seguintes exporá o seu novo ponto de vista culminando na publicação da segunda edição das “Lições sobre a teoria da radiação térmica” (1911). Para Kuhn esta mudança conceptual é acompanhada por uma mudança ao nível do vocabulário técnico, dando o “elemento de energia,” que representava a divisão matemática do contínuo de energia, lugar ao “quantum de energia,” que simboliza um átomo indivisível de energia. Kuhn aduz três tipos de evidência a favor da sua interpretação: por um lado o trabalho de Planck emerge

como consequência de um trajecto mais lógico e contínuo, sendo eliminadas várias inconsistências nas publicações à cerca da teoria do corpo negro e, por outro, as afirmações de Planck do período 1908-1909 apontam para uma mudança de atitude radical.

FONTES, HISTORIADORES DAS CIÊNCIAS E O PROCESSO DA DESCOBERTA CIENTÍFICA

O estilo críptico do artigo de 1900 de Planck justifica parcialmente a existência de diferentes interpretações das origens da física quântica. Contudo, não deixa de ser curioso constatar que tanto no discurso proferido na aceitação do prémio Nobel, em 1920, como na “Autobiografia Científica” (1948), Planck faz afirmações que corroboram a tese kuhniana, ao considerar os seus esforços falhados em confinar o quantum de acção ao espartilho da física clássica como “roçando uma tragédia” e atribuindo a “paternidade” dos quanta sobretudo a Einstein.¹⁰ A questão é, contudo, difícil de esclarecer historicamente pois a biblioteca de Planck, com todo o seu conteúdo impresso e manuscrito, desapareceu durante um ataque aéreo que atingiu a sua moradia no final da segunda guerra mundial.

Pesados os limites impostos pelas fontes disponíveis às interpretações dos historiadores, a história de Planck ilustra exemplarmente que a descoberta científica é um processo complexo, multi-facetado, prolongado espacial e temporalmente, resultante de contribuições de vários cientistas, mas que pode, e deve, ser explicado historicamente. Neste sentido, muito mais interessante do que indagar quem descobriu os quanta, afigura-se entender o que levou

Planck a formular as hipóteses de 1900, a indagar o contexto da física em que se movimentou e em perceber o tipo de física que o interessava, quais os problemas experimentais ou teóricos que o preocupavam e que tentou resolver e, finalmente, quais os princípios temáticos que o guiaram nessa resolução. Será só no final da primeira década do século XX, quando a teoria do corpo negro deixa de ser a preocupação central de uma pequena comunidade de físicos que incluía Lorentz, Ehrenfest, Jeans, Einstein, Larmor e, claro está, Planck, para dar lugar ao esclarecimento do problema dos calores específicos e, depois, à teoria atómica que, verdadeiramente, se pode falar finalmente em física quântica.

Ana Simões é Historiadora das Ciências e Professora da Universidade de Lisboa. Coordena também o Centro de História das Ciências, que agrega investigadores da Universidade de Lisboa e da Universidade Nova de Lisboa.



Referências:

1 “Presentation Speech,” 1 Junho 1920, http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/press.htm (consultado a 30 Junho 2008)

2 Dieter Hoffman, “Max Planck,” in Noretta Koertge, org., *New Dictionary of Scientific Biography* (Nova Iorque: Charles Scribner’s Sons, 2008, vol. 6), pp.111-15; Helge Kragh, *Quantum Generations. A history of physics in the twentieth century* (Princeton: Princeton University Press, 1999). Para mais detalhes consultar a biografia de Planck da autoria de John L. Heilbron, *The dilemmas of an upright man. Max Planck and the fortunes of German Science* (Harvard: Harvard University Press, 2000), 2ª edição com um novo posfácio, primeira edição de 1986.

3 Max Planck, “A scientific autobiography,” in *Scientific autobiography and other pa-*

pers (Nova Iorque: Philosophical Library, 1949), pp. 13-51, tradução da edição original de 1948, p.14.

4 No contexto desta controvérsia, e não no da discussão das origens da física quântica, enuncia o famoso “princípio sociológico [de Planck]” segundo o qual uma novidade científica impõe-se não porque convença os seus oponentes mas porque estes morrem. Ver op.cit.(3), pp.33-4.

5 Deste ponto de vista a radiação do corpo negro descreve a pior fonte possível de iluminação servindo de padrão para a classificação das lâmpadas.

6 Dieter Hoffmann, “On the experimental context of Planck’s foundation of quantum theory,” *Centaurus* 43 (2001), 240-55.

7 Martin J. Klein, “Max Planck and the beginnings of the quantum theory,” *Archive for*

History of Exact Sciences 1 (1962), 459-79.

8 Thomas S. Kuhn, *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912* (Oxford: Oxford University Press, 1978); Thomas S. Kuhn, “Revisiting Planck,” *Historical Studies in the Physical Sciences* 14 (Part 2) (1984), 231-52.

9 Max Planck, “On the theory of the energy distribution law of the normal spectrum,” in D. ter Haar, org., *The old quantum theory* (Londres: Pergamon Press, 1967), pp.82-90, p.84.

10 Max Planck, “The genesis and present state of development of the quantum theory,” *Lição Nobel*, 2 Junho 1920, http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/planck-lecture.htm (consultado a 30 Junho 2008); Planck, “A scientific autobiography,” op.cit. (3), pp.44-5.