A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck

Nelson Studart
Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos,
13565-905, São Carlos, São Paulo

Recebido em 22 de Novembro de 2000. Aceito em 29 de Dezembro de 2000.

Há cem anos, a idéia do quantum provocou uma revolução na ciência e a busca de uma nova base conceitual para a toda a física, como enfatizou Einstein. Neste artigo, discuto os aspectos essenciais dos trabalhos de Planck de 1900 sobre a radiação do corpo negro e a hipótese da quantização da energia.

A hundred years ago, the quantum concept provoked a revolution in science and the search of a new conceptual basis for whole physics, as emphasized by Einstein. In this paper, I discuss the essential features of Planck's works in 1900 on the blackbody radiation and the hypothesis of energy quantization.

I Introdução

Tropeçavas nos astros desastrada
Quase não tínhamos livros em casa
E a cidade não tinha livraria
Mas os livros que em nossa vida entraram
São como a radiação do corpo negro
Apontando pra a expansão do Universo
Porque a frase, o conceito, o enredo, o verso
(E, sem dúvida, sobretudo o verso)
É o que pode lançar mundos no mundo.

Caetano Veloso em Livros (1a. estrofe)

Em 14 de dezembro de 1900, Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1957) apresentou, em uma reunião da Sociedade Alemã de Física, o trabalho intitulado *Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia no Espectro Normal* [1], em que introduziu o conceito de quantização da energia e deu origem a uma das revoluções da física no século XX. Os versos de Caetano Veloso, do seu disco *Livro*[1], torna o tema bastante atual para o grande público ao enfocar a radiação cósmica de fundo, o fóssil remanescente do Universo primordial e a principal evidência da existência do *big bang* e expansão do Universo.

As origens da teoria quântica, em particular o significado e a repercussão da hipótese de Planck, têm sido analisadas em vários artigos e livros com o devido rigor histórico. Dentre eles, gostaria de destacar os de Leon Rosenfeld[3], Martin Klein [4, 5, 6, 7], Hans Kangro[8, 9], Max Jammer[10], e Mehra e Rechenberg[11] que relevam sobremaneira o papel de Planck como inventor da teoria quântica.

Mais do que celebrar este importante acontecimento, pretendo neste artigo discutir as origens da teoria quântica de um modo didático – pelo menos na concepção do autor – com a esperança de que este texto possa ser usado em disciplinas de Física Moderna e Mecânica Quântica, com ênfase em seus aspectos históricos, bem como na disciplina de Evolução de Conceitos da Física, ou mesmo, de História da Física.[2]

A invenção do quantum de energia é um dos muitos exemplos na história da ciência que revela que "conceitos científicos são criados por ações da imaginação e inteligência humanas e não são como objetos que são 'descobertos' como entidades que já existem".[13] Como enfatiza Arons, alertar os estudantes para este fato é uma tarefa revestida de caráter pedagógico inestimável.

Uma outra característica relevante desta invenção é a demonstração cabal da eficiência da interação entre o pesquisador teórico e o experimental provido de uma infra-estrutura laboratorial adequada. A ligação estreita entre Planck e seus colegas Heinrich Rubens (1865-1922) e Ferdinand Kurlbaum (1857-1927), do *Physicalisch-Technische Reichsanstalt* – o mais importante laboratório físico-técnico alemão, centro de referência de pesos e medidas e precursor do atual Laboratório Nacional de Física e Tecnologia da Alemanha

[1] Agraciado este ano com o *Grammy*, a mais importante premiação musical dos Estados Unidos, na categoria *World Music.*
[2] Uma introdução bastante simples aos conceitos da física quântica numa abordagem quase-histórica pode ser encontrada na Ref. [12].

– foi fundamental para que a hipótese da quantização da energia fosse formulada. Como veremos, foi a constatação, por Rubens, de que seus dados experimentais se ajustavam muito bem à fórmula de Planck para a distribuição espectral da radiação térmica, obtida através da interpolação entre dois limites de freqüências, que levou Planck a procurar as razões básicas para a obtenção da famosa lei da radiação do corpo negro quando "após algumas semanas do mais extenuante trabalho da minha vida, a escuridão se desfez e uma inesperada vista começou a surgir".[3]

Os trabalhos seminais sobre a quantização da energia foram apresentados por Planck, perante a Academia Alemã de Física, nas sessões de 19 de outubro e 14 de dezembro de 1900. Na primeira comunicação, uma nova fórmula para a distribuição espectral da radiação normal (corpo negro) é proposta. Na segunda, Planck introduz a hipótese de quantização da energia seguindo um método não-ortodoxo inspirado nas idéias da mecânica estatística de Ludwig Boltzmann (1844-1906). No início de 1901, aparece no *Annalen der Physik* o trabalho completo, em que Planck apresenta uma dedução mais elaborada da sua distribuição espectral.[4]

II A Radiação do Corpo Negro

Um corpo aquecido emite radiação eletromagnética em um largo espectro contínuo de freqüências, principalmente na região do infravermelho (sensação de calor), mas com intensidade variável que atinge um máximo em um determinado comprimento de onda. É bem conhecido, por exemplo, que um metal a 600^oC, (por exemplo, em um forno elétrico) apresenta uma fraca coloração avermelhada enquanto que o mesmo material (por exemplo, em uma siderúrgica) apresenta uma cor azulada a temperaturas bem mais altas. O Sol, cuja temperatura na superfície é de cerca de 6.000^oC, é o exemplo mais familiar de emissão de radiação térmica, cujo espectro abrange toda a região vísivel incluindo a de comprimentos de onda maiores (infravermelho) e menores (ultravioleta).

De uma maneira geral, matéria e radiação interagem e atingem o equilíbrio termodinâmico através de trocas de energia. Sejam e a potência emissiva, *i.e.* a quantidade de energia radiante emitida por unidade de área e por unidade de tempo, e a a absortividade ou absortância, *i.e.* a fração de energia incidente sobre a superfície que é absorvida. W. Ritchie (1833)[5] verificou o princípio de proporcionalidade entre emissão e absorção total, em sua famosa experiência com dois corpos radiantes A e B, usando um termômetro diferencial. No equilíbrio térmico, o princípio estabelece que

$$\frac{e_A}{a_A} = \frac{e_B}{a_B}. \qquad (1)$$

Suponha que um dos corpos apresente a especificidade de que $a_N = 1$, ou seja o corpo N absorve toda a radiação que incide sobre ele. Daí, denominamos N de corpo negro. É evidente, da Eq. (1), que

$$e_N = \frac{e_A}{a_A} \qquad \text{tal que} \qquad e_N > e_A \qquad (2)$$

para qualquer corpo A. Assim, o corpo negro possui uma potência emissiva maior do que a de qualquer outro corpo. Evidentemente, um objeto com estas características é um corpo ideal que não pode ser encontrado na prática, mas pode ser construído, numa boa aproximação, através de uma caixa oca (um forno, por exemplo) com paredes internas metálicas e uma pequena abertura que permite a passagem de radiação, como ilustrado na Fig. 1. A caixa deve ser revestida de um excelente isolante térmico e espelhada externamente, refletindo toda radiação eventualmente incidente, exceto na abertura. A radiação, que entra na cavidade, tem uma probabilidade muito pequena de escapar, permanecendo assim em seu interior e sendo espalhada pelas paredes da cavidade até atingir o equilíbrio térmico. Desta forma, toda a radiação incidente é absorvida pelo corpo.

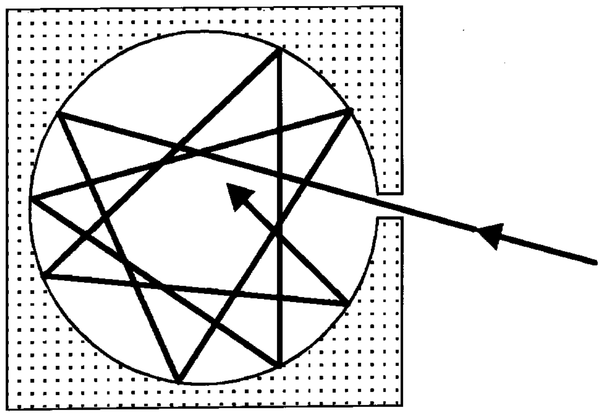

Figura 1. Representação esquemática de um corpo negro.

A radiação contida na cavidade pode ser decomposta em suas componentes espectrais através de uma função distribuição $\rho(\nu,T)$ tal que $\rho(\nu,T)d\nu$ é a *densidade de energia (energia por unidade de volume) da radiação com freqüência no intervalo compreendido entre* ν *e* $\nu+d\nu$ quando a cavidade está a uma temperatura absoluta T. O espectro emitido pela cavidade

[3]M. Planck, citado na Ref. [4], p. 468.
[4]A versão para o português deste trabalho encontra-se neste número da RBEF.
[5]Citado na Ref. [9], p. 7.

é especificado pelo fluxo de energia $R(\nu,T)$ que, obviamente, deve ser proporcional a $\rho(\nu,T)$, com a constante de proporcionalidade advinda de fatores geométricos.[6] Na verdade, temos

$$R(\nu,T)=\frac{c}{4}\rho(\nu,T), \tag{3}$$

em que c é a velocidade da luz no vácuo. É esta intensidade de energia que é medida experimentalmente.

II.1 Leis Universais do Espectro

Em 1859, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) apresentou perante a Academia de Berlim o trabalho *Sobre a relação entre a emissão e absorção de calor e luz*, em que provou que "para raios de mesmo comprimento de onda e a mesma temperatura, a razão entre a potência emissiva e a absortividade são as mesmas para todos os corpos".[7] O teorema foi demonstrado com "base em considerações teóricas bastante simples" e estabelece que, para quaisquer corpos em equilíbrio térmico trocando radiação com comprimento de onda λ, a Eq. (1) é satisfeita.[8] Somente em um segundo artigo, Kirchhoff introduziu a noção de "um corpo *perfeitamente negro*"[9], como fiz na seção I, e mostrou que a potência emissiva de um corpo negro depende só da temperatura e da freqüência da radiação, tal que

$$e_N=F(\nu,T), \tag{4}$$

onde $F(\nu,T)$ é uma função universal independente da forma, tamanho e composição química do corpo.

Com base na termodinâmica e na teoria eletromagnética da radiação, é possível deduzir duas leis relativas à dependência da radiação do corpo negro com a temperatura:

1. A partir de resultados experimentais de J. Tyndall (1864) de que a emissão total de um fio de platina a 1.200^{o}C é $11,7$ vezes maior que a correspondente emissão a 525^{o}C, Josef Stefan (1835-1893) concluiu, em 1879, que a energia total é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, pois $(1473/798)^4\simeq 11,7$. Este resultado fortuito[10] foi demonstrado rigorosamente por Boltzmann (1884) com base na existência de uma pressão de radiação $-$ que mostrou ser $p=U/3$ usando a teoria eletromagnética de James Clerck Maxwell (1831-1879) $-$, e considerando a radiação como uma máquina térmica, sujeita às leis da termodinâmica, para concluir que

$$U=\sigma T^4, \tag{5}$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann.[11]

2. A outra lei, chamada *lei de deslocamento,* data de 1893, e foi demonstrada por Wilhelm Wien (1864-1928). A lei estabelece que a distribuição espectral da densidade de energia é dada pela equação

$$\rho(\nu,T)=\nu^3 f(\frac{\nu}{T}), \tag{6}$$

em que $f(\nu/T)$ é uma função apenas da razão entre a freqüência e a temperatura. Esta relação pode ser deduzida através do efeito Doppler que surge quando radiação incide sobre um espelho hipotético móvel.[12] Observe que a lei de Stefan-Boltzmann está contida na lei de deslocamento de Wien, desde que

$$\begin{aligned} U &= \int \rho(\nu,T)d\nu=\int \nu^3 f(\frac{\nu}{T})d\nu \\ &= T^4\int x^3 f(x)dx=\sigma T^4. \end{aligned}$$

A lei de Wien pode ser escrita, de uma outra forma, em termos do comprimento de onda da radiação ao invés da freqüência. Ora, $\rho(\nu,T)d\nu=\rho(\lambda,T)d\lambda$, e como $\lambda\nu=c$, temos $|d\nu|/\nu=|d\lambda|/\lambda$. Portanto

$$\rho(\lambda,T)d\lambda=\frac{c^4}{\lambda^5}f(\frac{c}{\lambda T})d\lambda=\lambda^{-5}\varphi(\lambda T)d\lambda. \tag{7}$$

A origem do nome "lei de deslocamento" deve-se ao fato de que o comprimento de onda, no qual a intensidade de radiação é máxima, varia com a temperatura de acordo com a relação

$$\lambda_{\max}T=b \quad \text{ou} \quad \lambda_{\max}\propto\frac{1}{T}. \tag{8}$$

Esta relação é fácilmente deduzida da Eq. (7), simplesmente calculando o comprimento de onda para o qual $\rho(\lambda,T)$ é máximo. Obviamente, o valor de b depende da forma da função $f(c/\lambda T)$.

[6] Para o cálculo deste fator, ver Ref. [15], p. 387.

[7] Citado na Ref. [10], p. 2.

[8] Deve ser mencionado, por razões históricas, que Kirchhoff se interessou pelo estudo dos processos de emissão e absorção a partir de suas investigações das raias do espectro solar.

[9] É curioso assinalar que o termo *corpo negro* já havia sido usado, não com este significado, por Isaac Newton (1642-1727) no livro *Optics* (1704). Ver Ref. [10], p. 50.

[10] Na verdade, Tyndall mediu uma radiacão que estava longe de ser a de um corpo negro.

[11] Veja a dedução da lei T^4 na Ref. [14]. Considere um gás ideal de radiação com energia E, densidade de energia U e pressão $p=(1/3)U$. Usando a relação termodinâmica $(\partial E/\partial V)_T=T\,(\partial p/\partial T)_V-p$ e o fato que $(\partial E/\partial V)_T=U$, pois U é uma função apenas da temperatura, segue, após algumas manipulações, que $dU/U=4(dT/T)$. Integrando obtém-se o resultado desejado.

[12] Ver apêndice XXXIII da Ref. [16].

A lei de Wien foi verificada experimentalmente inúmeras vezes – a confirmação mais cuidadosa foi a de Friedrich Paschen (1865-1947) –, e constituiu um considerável avanço pois permitia determinar a distribuição espectral para qualquer temperatura, uma vez que se conhecesse a distribuição em uma dada temperatura. Otto Lummer (1860-1925) e Ernst Pringsheim (1859-1917), em Berlim, confirmaram a validade da Eq. (8), encontrando que $b = 0,294$ cm.grau.[13]

II.2 Fórmulas Empíricas da Distribuição Espectral

No entanto, nem os princípios e relações básicas da termodinâmica nem do eletromagnetismo, por si só, permitem achar a forma funcional de $f(\nu/T)$ ou $\varphi(\lambda T)$. Sua determinação era um dos maiores problemas da física teórica no final do século XIX.

Uma das conjecturas propostas, em 1896 pelo próprio Wien[17], foi baseada em argumentos dúbios de que a distribuição de energia deveria ser do tipo daquela proposta por Maxwell para a distribuição de velocidades de moléculas de um gás. Wien argumentou que o número de moléculas é proporcional a $\exp(-mv^2/k_BT)$ – expressão que deveria ser válida também para moléculas no sólido – e "uma visão atualmente aceita é que as cargas elétricas das moléculas podem excitar ondas eletromagnéticas...[e] como o comprimento de onda λ da radiação emitida por uma dada molécula é uma função de v, v é também uma função de λ". Assim, usando a sua lei, dada pela Eq. (7), propôs que a distribuição espectral seria ser dada por

$$\varphi(\lambda T) = C\exp(-c/\lambda T)$$

ou

$$f(\frac{\nu}{T}) = \alpha\exp(-\beta\frac{\nu}{T}), \qquad (9)$$

onde C, c, α e β são constantes. Merece ser destacado o papel desempenhado pelo *Physicalisch-Technische Reichsanstalt* e os experimentos aí realizados a partir de 1896 através das figuras proeminentes de Otto Lummer, membro do laboratório desde 1889, e seus colegas e colaboradores Ernst Pringsheim, Heinrich Rubens e Ferdinand Kurlbaum. As medidas da distribuição espectral eram difíceis de serem obtidas com a precisão necessária para decidir dentre várias fórmulas empíricas propostas Uma descrição detalhada dos resultados experimentais pode ser encontrada na Ref. [9]. A Fig. 2 mostra os resultados de Lummer e Pringsheim ao final de 1899. A fórmula de Wien ajustava-se satisfatoriamente aos resultados experimentais 'preliminares'.

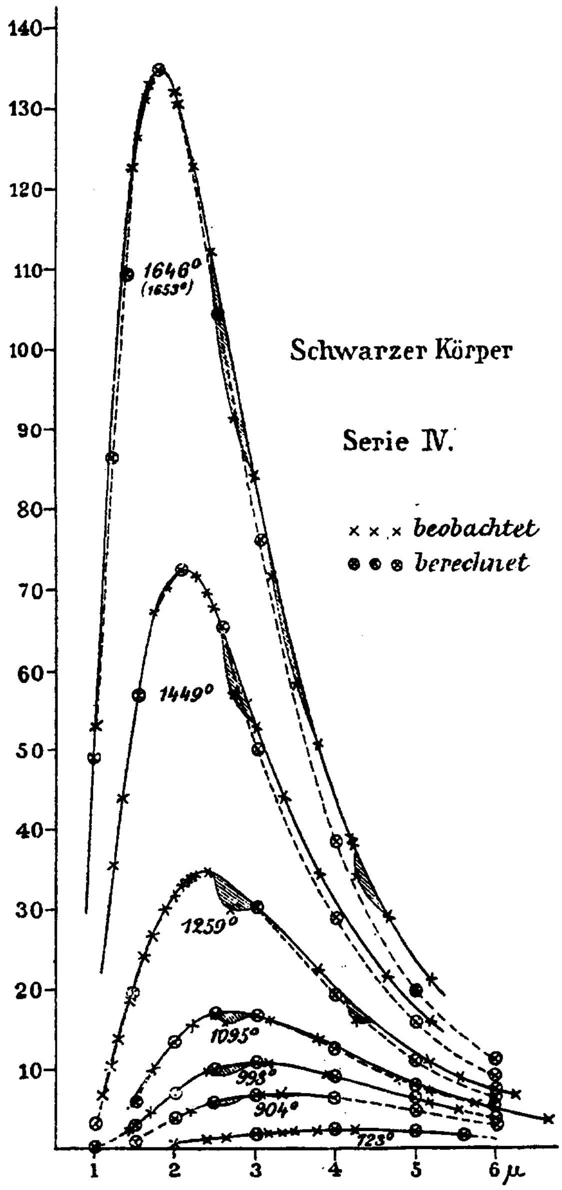

Figura 2. Intensidade espectral como função do comprimento de onda obtida por Lummer e Pringsheim em novembro de 1899. Extraído da Ref. [9], p. 176.

III A Teoria de Planck sobre a Radiação do Calor

A partir do desafio de se encontrar uma fórmula precisa e bem fundamentada da distribuição espectral, nasceu a teoria quântica introduzida por Planck.

Em 1897, Planck, com quase 40 anos – assim como Galileo (1546-1642), fez suas descobertas com uma

[13] Planck vai usar este valor para determinar a constante h e a constante de Boltzmann k_B.

idade já avançada se comparada com àquela de outros grandes cientistas na época de suas maiores contribuições –, começou a investigar o problema da radiação do corpo negro. De acordo com o teorema de Kirchhoff, a radiação possuía um caráter universal, de modo que Planck procurou uma abordagem que se baseasse na eletrodinâmica e na irreversibilidade do processo que conduzia a radiação ao equilíbrio térmico. A questão principal seria determinar como a radiação e a matéria interagem e atingem o equilíbrio. Como podemos explicar que um sistema conservativo formado de radiação eletromagnética e uma coleção de osciladores harmônicos – que Planck chamou ressonadores – chega ao equilíbrio sem invocar outras hipóteses além das leis da teoria eletromagnética e da termodinâmica? A escolha dos osciladores harmônicos, como um modelo simples para a matéria, pode ser justificada pelo teorema de Kirchhoff que assegura a independência da distribuição da radiação do corpo negro em relação à composição da matéria.

Em 1899, Planck provou um teorema bastante importante que estabelece uma relação entre a densidade de energia $\rho(\nu,T)$ e a energia média $\overline{u}(\nu,T)$ do conjunto de osciladores harmônicos que representava os átomos na superfície interna da cavidade no corpo negro em equilíbrio termodinâmico. O resultado pode ser escrito como[14]

$$\rho(\nu,T)=\frac{8\pi\nu^2}{c^3}\overline{u}(\nu,T). \tag{10}$$

Como a radiação e os osciladores estão em equilíbrio, a freqüência ν tem duplo significado: representa a freqüência da radiação incidente assim como uma possível freqüência dos modos de oscilação dos átomos na parede da cavidade.

A Eq. (10) pode ser obtida, em linhas gerais, pela determinação da energia irradiada por segundo por uma carga acelerada. Este é um cálculo essencial na teoria eletromagnética e pode ser encontrado em inúmeros livros-textos. O resultado é importante para a compreensão das propriedades da radiação eletromagnética, não apenas no corpo negro, mas também daquela emitida por átomos, estações de rádio, estrelas e até na origem da cor azul dos céus.[19] A famosa fórmula para a potência irradiada por um dipolo oscilante é dada por $P(t)=\frac{2}{3}\frac{q^2}{c^3}\mathbf{a}^2$, em que $\mathbf{a}$ é a aceleração da carga q. No caso de oscilador harmônico (dipolo oscilante), $a=-(2\pi\nu)^2x$, e tomando-se a média temporal, transforma-se em $P=\frac{2}{3}\frac{q^2}{c^3}(2\pi\nu)^4\left\langle x^2\right\rangle$ em que o valor médio é tomado em intervalos de tempo longos comparados com o período de oscilação, mas suficientemente pequenos para desprezarmos a radiação nestes intervalos. Como a energia total média dos osciladores $\overline{u}=m(2\pi\nu)^2\left\langle x^2\right\rangle$, então $P=\frac{2}{3}\frac{q^2}{mc^3}(2\pi\nu)^2\overline{u}$. Por outro lado, o trabalho fornecido por segundo ao oscilador por um campo de radiação com densidade de energia $\rho(\nu)$ é dado por $P=\frac{\pi q^2}{3m}\rho(\nu)$, que resulta da solução da equação do movimento do oscilador harmônico na presença de um campo elétrico com freqüência ν.[15] Igualando as duas expressões, temos o resultado do teorema de Planck, Eq. (10).

É evidente que Planck precisava calcular a energia média de um oscilador harmônico a uma temperatura T para determinar, através da Eq. (10), a distribuição espectral. Poderia usar o resultado já conhecido do teorema da equipartição da energia – que não levaria à resposta correta como discutiremos a seguir. No entanto, Planck preferiu usar uma abordagem "termodinâmica", talvez devido ao seu continuado interesse nesta linha de pesquisa desde o seu doutorado, cuja tese consistiu numa reanálise do trabalho de Rudolf Clausius (1822-1888) sobre a segunda lei da termodinâmica em termos da noção de entropia.

Usando a fórmula de Wien, dada pela Eqs. (6) e (9), e a Eq. (10), temos $\rho(\nu,T)=(\alpha c^3/8\pi)\nu\exp(-\beta\nu/T)$. Deste resultado, temos que $T^{-1}=-\frac{1}{\beta\nu}\ln(\frac{8\pi}{\alpha c^3}\frac{u}{\nu})$. Mas, como $T^{-1}=\partial S/\partial u$ (a volume constante), a equação pode ser integrada e a entropia do oscilador S pode ser escrita em termos de sua energia u [antes denotada por $\overline{u}(\nu,T)$] como

$$S=-\frac{u}{\beta\nu}\ln\frac{u}{Ae\nu}, \tag{11}$$

em que $A=\alpha c^3/8\pi$ e e é a base do logaritmo natural. Com a entropia assim definida, Planck determinou a entropia da radiação em equilíbro com o conjunto de osciladores e mostrou que esta satisfazia a segunda lei da termodinâmica. Mais ainda, Planck ficou impressionado com a simplicidade da Eq. (11) que implicava que $\partial^2S/\partial u^2\propto -u^{-1}$.

Planck mostrou ainda que qualquer outra fórmula proposta para $\rho(\nu,T)$ deveria ser tal que $\partial^2S/\partial u^2$ fosse uma função negativa da energia u de modo a satisfazer a segunda lei da termodinâmica.

IV A Fórmula Empírica de Planck

No início de 1900, as duas equipes do *Physicalisch-Technische Reichsanstalt* em Berlim, formadas por

[14] Derivações simplificadas encontram-se no Apêndice A da Ref. [10], p. 407 e Ref. [18], p. 870.

[15] A dedução pode ser vista no Apêndice XXXIV da Ref. [16].

Lummer e Pringsheim e Rubens e Kurlbaum, independentemente conseguiram medir a radiação numa região ainda inexplorada de grande comprimentos de onda. O primeiro time varreu a região de $\lambda = 12 - 18$ μm, e $T = 300 - 1.650$K, concluindo que a fórmula de Wien não era válida para estes valores de comprimentos de onda mais longos. Em outubro de 1900, o trabalho experimental muito cuidadoso de Rubens e Kurlbaum na região do infravermelho mais longínguo $\lambda = 30 - 60$ μm, e $T = 200 - 1.500^o$C mostrava, sem nenhuma dúvida, que, para comprimentos de onda longos dentro de uma grande faixa de temperatura, a fórmula de Wien era inadequada. Kurlbaum apresentou estes resultados na mesma sessão da Academia Alemã de Física, de 19 de outubro, em que Planck apresentou a sua fórmula.

A Fig. 3 mostra os pontos experimentais da intensidade de radiação do corpo negro como função da temperatura para $\lambda = 51,2$ μm comparados com as curvas relativas às fórmulas de Wien, Eq. (9), de Thiesen (que não discutirei neste artigo), de Lord Rayleigh, Eq. (19), e a de Planck, Eq. (15). Em 7 de outubro, Rubens visitou Planck e lhe informou que, para longos comprimentos de onda ou baixas freqüências, $\rho(\nu, T) \propto T$. Planck descobriu a sua fórmula da radiação neste dia, e informou a Rubens seu resultado, através de um cartão postal na noite de mesmo dia.[16]

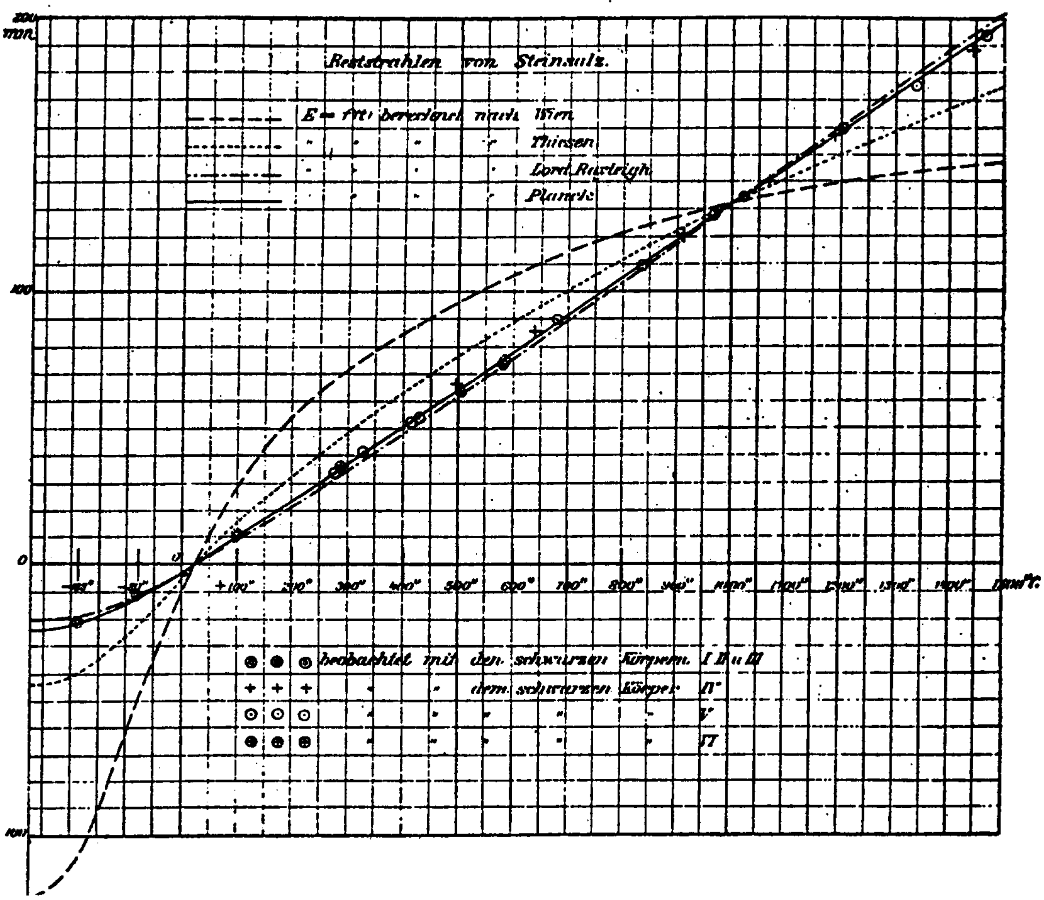

Figura 3. Curvas da energia da radiação versus temperatura, medida através dos raios residuais ("reststrahlen") usando pedras de sal ($\lambda = 51,2$ μm), e comparados ("berechnet nach" significa "calculado após") com as fórmulas de Wien, Lord Rayleigh, Thiesen e Planck. Ref. [9], p. 204.

Em sua comunicação em 19 de outubro,[17] Planck apresentou a sua fórmula para a distribuição espectral da radiação do corpo negro, obtida pela interpolação entre os resultados previstos para $\rho(\nu, T)$ nos limites extremos da freqüência. Para altas freqüências, $\partial^2 S/\partial u^2 \propto -u^{-1}$ e para baixas freqüências $\partial^2 S/\partial u^2 \propto -u^{-2}$, como pode ser facilmente visto, já que se $\rho(\nu, T) \propto T$, então também $u \propto T$. Usando $T^{-1} =$

[16] Ver Ref. [9], p. 205.

[17] A versão em português é o artigo seguinte deste número da RBEF.

$\partial S/\partial u$, chega-se à dependência desejada. Planck então propôs uma expressão "quase tão simples quanto a expressão de Wien, e que mereceria ser investigada uma vez que a expressão de Wien não é suficiente para cobrir todas as observações" dada por

$$\frac{\partial^2 S}{\partial u^2} = -\frac{1}{u(\alpha + u)}, \tag{12}$$

em que "uso a derivada segunda de S em relação a u porque esta quantidade tem um significado físico simples. Esta é, de longe, a mais simples de todas as expressões que leva S a ser uma função logarítmica de U". Integrando a Eq. (12), temos $\partial S/\partial u = (1/\alpha)\ln[(\alpha + u)/u)] + c$, onde c é uma constante arbitrária. Usando $\partial S/\partial u = T^{-1}$, $(1/\alpha)\ln[(\alpha+u)/u)]+c = T^{-1}$, e encontramos $c = 0$, porque no limite de altas temperaturas ambos os lados da equação devem se anular. Assim, a energia do oscilador é dada por

$$u = \frac{\alpha}{e^{\alpha/T} - 1}, \tag{13}$$

e usando a Eq. (10), a distribuição de energia vem a ser dada pela expressão

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3}\frac{\alpha\nu^2}{e^{\alpha/T} - 1}. \tag{14}$$

A lei de deslocamento de Wien, Eq. (6) torna claro que α deve ser uma função linear de ν. Uma expressão geral, em termos de duas constantes genéricas A e B, pode ser escrita como

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3}\frac{A\nu^3}{e^{B\nu/T} - 1}. \tag{15}$$

E Planck conlui: "Assim, permiti-me chamar a sua atenção para esta nova fórmula, que considero ser, exceto a expressão de Wien, a mais simples possível do ponto de vista da teoria eletromagnética da radiação."

V A Lei "Clássica" da Radiação Térmica

Farei aqui uma pequena digressão, por razões de completitude histórica, para assinalar a contribuição de Lord Rayleigh (John William Strutt, 1842-1919) à investigação da radiação do corpo negro que se tornou marcante como sendo o resultado clássico da distribuição espectral, baseado na mecânica estatística clássica de Maxwell-Boltzmann.

Em uma curta nota, publicada em junho de 1900, Rayleigh[20] aplicou a "doutrina de Maxwell-Boltzmann da partição da energia", *i.e.*, o teorema da equipartição da energia às oscilações eletromagnéticas da radiação na cavidade e encontrou uma fórmula radicalmente contrária à fórmula de Wien. Seu método consistia em calcular o número de ondas estacionárias, ou seja a distribuição de modos eletromagnéticos permitidos com freqüência no intervalo entre ν e $\nu + d\nu$, $\mathcal{N}(\nu)d\nu$, dentro da cavidade. É bem conhecido que[18]

$$\mathcal{N}(\nu)d\nu = \frac{8\pi V}{c^3}\nu^2 d\nu. \tag{16}$$

Para encontrar a densidade de energia, devemos saber a energia média de cada oscilador. O teorema da equipartição da energia estabelece que cada termo da energia proporcional ao quadrado da coordenada, momentum (ou amplitude da onda) contribui sempre com a mesma quantidade para a energia média, exatamente $(1/2)k_B T$. Lembre-se que no caso do oscilador $\varepsilon = p^2/2m + (1/2)m\omega^2 x^2$, e no caso da radiação eletromagnética $\varepsilon \propto (E_0^2 + B_0^2)$. Assim, teremos

$$\overline{u}(T) = k_B T. \tag{17}$$

A lei obtida por Rayleigh para a radiação do corpo negro possa ser expressa através do produto do número de ondas eletromagnéticas dentro da cavidade pela energia de cada uma delas. O resultado é

$$\rho(\nu, T)d\nu = \frac{\mathcal{N}(\nu)d\nu}{V} \times \overline{u}(T) = \frac{8\pi}{c^3}(k_B T)\nu^2 d\nu. \tag{18}$$

A lei de radiação de Rayleigh é conhecida como *lei de Rayleigh-Jeans*, após a contribuição de James Jeans (1877-1946), em maio de 1905, ao introduzir o fator 1/8 no cálculo de $\mathcal{N}(\nu)d\nu$, que fora esquecido por Rayleigh em um trabalho de 1905.[19] Como o seu resultado era consideravelmente diferente da aclamada fórmula de Wien, Rayleigh introduziu um fator exponencial, tal que a expressão completa modificada é

$$\rho(\nu, T)d\nu = c_1 T\nu^2 \exp(-c_2\frac{\nu}{T}). \tag{19}$$

Rayleigh conclui sua nota[20] com o seguinte comentário: "Se a Eq. (19) representa as observações, eu não estou em posição de afirmar. Espera-se que uma resposta a esta questão possa ser encontrada brevemente pelas mãos de destacados experimentais que têm se ocupado deste assunto."

[18] Veja por exemplo, Ref. [21], p. 45.
[19] Neste ano, Rayleigh e Jeans trocaram várias cartas na Nature. Ver cronologia de eventos na Ref. [18], p. 872.
[20] Na verdade, os fatores numéricos só foram calculados no artigo de 1905, sem o termo exponencial.

Digno de registro é o fato que Planck poderia ter usado o teorema da equipartição da energia, $\overline{u}(T) = k_BT$, na sua Eq. (10), e obtido o mesmo resultado. Isto foi feito por Albert Einstein (1879-1955) em seu trabalho de 1905, em que introduziu o conceito de quantum de luz.[22]

Planck não se referiu a este resultado de Rayleigh em seus trabalhos, mas obviamente o conhecia, porque fora publicado na prestigiosa *Philosophical Magazine* e Rubens, na visita domiciliar de 7 de outubro, lhe comunicara que, para baixas freqüências, o resultado observado correspondia à fórmula de Lord Rayleigh, dada pela Eq. (19).

Embora a lei de Rayleigh-Jeans, Eq. (18), satisfaça a lei de deslocamento de Wien, dada pela Eq. (6) com $f(\nu/T) = (\nu/T)^{-1}$, a fórmula falha no limite de grandes freqüências e conduz a uma divergência na densidade de energia total, como também apontado por Einstein,[22]

$$U = \int \rho(\nu, T)d\nu \propto \int_0^\infty \nu^2 d\nu = \infty. \qquad (20)$$

Este resultado ficou conhecido posteriormente como a "catástrofe do ultravioleta", graças a Paul Ehrenfest (1880-1933).[21]

VI A Introdução dos Quanta

Na reunião de 14 de dezembro de 1900, Planck comunicou aos membros da Sociedade Alemã de Física a dedução teórica de sua fórmula, proposta em 19 de outubro, e no que veio a chamar de um "ato de desespero" teve que introduzir a hipótese da descontinuidade da energia dos osciladores. A nota é curta e de difícil compreensão. [1] Três semanas depois, Planck enviou um trabalho completo para o *Annalen der Physik*, onde apresentava uma dedução mais aprimorada de sua expressão para a distribuição espectral.

Nos dois meses que separaram as duas reuniões, Planck mudou radicalmente a sua linha de pensamento, exposta nos trabalhos anteriores, ao adotar as idéias de Boltzmann acerca da relação entre entropia e probabilidade. Mais ainda, teve que inventar um dos conceitos mais básicos da teoria física. E o fez usando um método não-ortodoxo claramente diferente daquele empregado por Boltzmann.

Planck havia mostrado nos trabalhos anteriores que um ponto chave, para uma teoria do espectro de radiação térmica, era a determinação teórica da entropia em função da energia de um oscilador harmônico com freqüência ν, como na Eq. (11) no caso de uso da fórmula de Wien.[22] Se sua espressão para $\rho(\nu, T)$, Eq. (15), estivesse correta, então, seguindo os mesmos passos na obtenção da Eq. (11), poder-se-ia obter a entropia do oscilador. Como, em sua fórmula, $u = A'\nu[\exp(B\nu/T) - 1]^{-1}$, invertendo esta equação para $T^{-1} = \partial S/\partial U$, e então integrando, chega-se ao resultado

$$S = \frac{A'}{B}\left[(1 + \frac{u}{A'\nu})\ln(1 + \frac{u}{A'\nu}) - \frac{u}{A'\nu}\ln\frac{u}{A'\nu}\right], \quad (21)$$

em que A e B são as constantes que aparecem na Eq. (15) e $A' = Ac^3/8\pi^2$. Para deduzir formalmente a Eq. (21), Planck tinha que procurar outro método e o encontrou no trabalho de Boltzmann.

Segundo Boltzmann, a entropia de um sistema em um dado estado é proporcional à probabilidade daquele estado que, em notação moderna, pode ser escrita como[23]

$$S = k_B \ln W, \qquad (22)$$

em que W é o número de "complexos" - como chamou Planck -, *i.e.* o número de arranjos microscópicos compatíveis com o dado estado macroscópico, e k_B é a constante de Boltzmann. Como determinar W? Planck argumenta que:

> Então, à energia total
>
> $$u_N = Nu \qquad (23)$$
>
> de um tal sistema, formado por N ressonadores, corresponde uma certa entropia total
>
> $$S_N = NS \qquad (24)$$
>
> do mesmo sistema, em que S representa a entropia média de um ressonador particular. Esta entropia S_N depende da desordem com a qual a energia total u_N se reparte entre os diferentes ressonadores individuais.

[21] O termo apareceu pela primeira vez no seu quarto capítulo de seu artigo publicado no Ann. Phys. **36**, 91 (1911), reimpresso na Ref. [23].

[22] Esta tese é defendida por Klein. Conferir a Ref. [4], p. 469.

[23] Na verdade, apesar desta fórmula constar da lápide de seu túmulo, Boltzmann nunca a escreveu nesta forma. Quem o fez, foi Planck em seu artigo de 1901 no *Annalen der Physik*. Mais ainda, quem realmente introduziu a constante k_B foi Planck. "Em várias ocasiões, nos últimos anos de vida, Planck comentou que, embora a constante fosse compreensívelmente conhecida como a constante de Boltzmann, este nunca lhe atribuíra algum significado físico nem nunca procurou estimar o seu valor numérico" [[4], p. 471]. Planck ainda deu grande ênfase ao seu caráter universal, em sua comunicação de 14 de dezembro de 1900.

Próximo passo:

> Importa agora encontrar a probabilidade W, de modo que os N ressonadores possuam em conjunto a energia total u_N. Para isto, será necessário que u_N não seja uma quantidade contínua, infinitamente divisível, mas antes uma grandeza discreta, composta de um número inteiro de partes finitas iguais. Denominemos ε a tal parte elementar de energia; teremos, portanto:
>
> $$U_N = P\varepsilon, \tag{25}$$
>
> onde P representa um número inteiro, em geral grande. Deixaremos, no momento, indeterminado o valor de ε.

Planck diz que "a análise combinatória" mostra que o número de repartições possíveis é

$$W = \frac{(N+P-1)!}{(N-1)!P!}. \tag{26}$$

Uma dedução simplificada desta fórmula foi dada por Ehrenfest e Onnes (1914).[23] A Eq. (26) expressa o número de maneiras que N ressonadores R_1, R_2,... R_N, podem ser distribuídos pelos vários graus de energia determinados pela série de múltiplos 0, ε, 2ε... Considere um exemplo especial para introduzirmos um símbolo para a distribuição: $N = 4$ e $P = 7$. Uma das possíveis distribuições é: R_1 tem energia 4ε, R_2 tem energia 2ε, R_3 tem 0ε e R_4 tem 4ε. O símbolo para esta distribuição, lido da esquerda para a direita, indica a energia de R_1, R_2, R_3, R_4, na distribuição escolhida que tem $u = 7\varepsilon$, pode ser escrito como $\| \; \varepsilon \; \varepsilon \; \varepsilon \; \varepsilon \; \blacksquare \; \varepsilon \; \varepsilon \; \blacksquare \; \blacksquare \; \varepsilon \; \|$ Para valores gerais de N e P, o símbolo terá P vezes o sinal ε e $(N-1)$ vezes o sinal $\blacksquare$. A questão é saber quantos símbolos *diferentes* podem ser formados na maneira indicada do número dado de ε e $\blacksquare$. É evidente que os $(N-1+P)$ elementos ε e $\blacksquare$ podem ser arranjados de $(N+P-1)!$ maneiras diferentes entre os terminais $\|$ $\|$. Mas, é fácil de ver, que cada vez, $(N-1)!P!$ das combinações possíveis darão o mesmo símbolo para a distribuição (combinações que são formadas permutando os P elementos ε ou os $(N-1)$ elementos $\blacksquare$. Assim, o resultado final é a divisão dos dois termos.

O cálculo da entropia agora é direto. Usando a fórmula de Stirling, $W = (N+P)^{N+P}/N^N P^P$,[24] e a Eq. (22), a entropia do ressonador em função da sua energia é escrita como

$$S = k_B \left[(1+\frac{u}{\varepsilon}) \ln(1+\frac{u}{\varepsilon}) - \frac{u}{\varepsilon} \ln \frac{u}{\varepsilon} \right]. \tag{27}$$

Observe que esta expressão é exatamente igual à Eq. (21). Até aqui, o tamanho dos elementos ε é completamente arbitrário. Contudo, S deve depender de ν, além de u, e como k_B é uma constante universal, a dependência com a freqüência deve aparecer em ε.[25] Além de u, e como k_B é uma constante universal, a dependência com a freqüência deve aparecer em ε. Usando $\partial S/\partial U = 1/T$, Planck encontra a energia média dos osciladores como

$$u = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/k_B T} - 1}. \tag{28}$$

De modo a satisfazer a lei de Wien, o elemento de energia ε deve ser proporcional à freqüência do oscilador

$$\varepsilon = h\nu, \tag{29}$$

em que h é a segunda constante universal da teoria. Usando a Eq. (10), chega-se ao mesmo resultado obtido no trabalho anterior de Planck:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{e^{h\nu/k_B T} - 1}. \tag{30}$$

A parte final de seu trabalho é destinada a obter os valores numéricos das constantes h e k_B a partir dos resultados experimentais: a constante de Stefan σ é uma combinação de h e k_B, e a razão de $\lambda_{\max} T$ fornece uma segunda equação para h e k_B. Encontrou $h = 6,55 \times 10^{-27}$ erg.s e $k_B = 1,346 \times 10^{-16}$ erg/K.

Na comunicação de 14 de dezembro de 1900, Planck comenta que podiam ser deduzidas de sua teoria "outras relações...que parecem, para mim, ser de considerável importância para outros campos da física e também da química". Possivelmente, uma referência à determinação da constante de Boltzmann, porque da entropia de um gás ideal mostra-se que $k_B = R/N_0$, onde R é a cosntante dos gases e N_0 o número de Avogadro. Como R era bem conhecida, Planck conseguiu encontrar o melhor valor para N_0, que na época, só era estimado indiretamente a partir de modelos ultra simplificados da teoria cinética.

Planck determinou ainda, a partir de sua teoria, a carga do recém-descoberto elétron de acordo com a equação $e = F(k_B/R)$, onde F é a constante de Faraday, a carga de um átomo-grama de íons monovalentes.

[24] Rosenfeld [3] sugere a seguinte linha de raciocínio de Planck: Se a entropia dos N osciladores era do tipo $k_B \log W$, então para se obter a Eq. (21), W deveria ser uma expressão do tipo $(N+P)^{N+P}/N^N P^P$.

[25] Planck mostrou que, uma outra forma de escrever a lei Wien, é $S = f(u/\nu)$. [Ver Eq.(10) de seu artigo de 1901].

Ele achou o valor $e = 4,69 \times 10^{-10}$ esu. Planck ressaltou a importância da determinação destas constantes básicas que a sua teoria tornou possível.

VII Conclusões

Embora 1900 seja considerado atualmente o ano do nascimento da física quântica, a idéia revolucionária dos quanta de energia não despertou nenhuma atenção nos quatro anos seguintes. Foi apenas em 1905, com o trabalho de Einstein introduzindo a hipótese dos quanta de luz (fótons) que o conceito de Planck começou a ser reconhecido. Várias explicações foram aventadas. Klein[4] argumenta que a teoria da radiação não era o centro das atenções em física na época, tendo em vista as grandes descobertas na virada do século: raios-X (1895), radioatividade (1896), elétron (1897), dentre outras. Além disto, um conjunto de eminentes cientistas, liderados por Wilhelm Ostwald (1853-1932), atacava com furor os fundamentos da teoria cinética. E em sua teoria, como vimos, embora Planck não tenha usado o método de Boltzmann (a distribuição mais provável é aquela que maximiza a entropia do sistema), se baseia na relação fundamental entre a entropia e probabilidade.

Apesar da maioria dos historiadores reconhecer Planck como o fundador da teoria quântica, há pelo menos uma exceção ilustre. Thomas Kuhn (1923-1976), o grande filósofo e historiador da ciência, sustenta[24] que o conceito da descontinuidade quântica nasceu nos trabalhos de Einstein, seguido de Hendrik Lorentz (1853-1928) e Ehrenfest entre os anos de 1906-1908 e não no trabalho de Planck, embora obviamente este fosse uma importante contribuição. Para Kuhn, o raciocínio de Planck foi completamente clássico: "embora a estrutura do contínuo de energia seja determinado pelo elemento de energia h, o movimento dos osciladores de Planck permanece contínuo...e nenhum dos trabalhos publicados, manuscritos conhecidos, ou fragmentos autobiográficos sugere que a idéia de restringir as energias dos ressonadores a um conjunto discreto de valores lhe ocorreu até que outros o forçaram a reconhecer durante 1906 e nos anos seguintes". Realmente, nas suas *Lectures* sobre a radiação do calor[25], durante o semestre de verão de 1906-97 na Universidade de Berlim, em que apresenta em detalhes a sua teoria, não há menção à descontinuidade, nenhuma fórmula como $u = nh\nu$. A única discretização aparece ao computar a probabilidade de uma distribuição de energia, como fizera em seu trabalho de 1900.

Apenas em outubro de 1908, numa carta a Lorentz, Planck referiu-se à quantização de energia e a necessidade de uma descontinuidade:[26]

> [A excitação dos ressonadores] não corresponde à conhecida lei do pêndulo simples; pelo contrário, existe um certo limiar; o ressonador não responde a todas excitações muito pequenas; e se responde às maiores, o faz somente de modo que sua energia seja um múltiplo inteiro do elemento de energia $h\nu$, tal que o valor instantâneo da energia é sempre representado por tal múltiplo inteiro.
>
> Em suma, eu poderia dizer que faço duas hipóteses:
>
> - A energia do ressonador em um dado instante é $gh\nu$ (g um número inteiro ou 0);
>
> - A energia emitida e absorvida por um ressonador durante um intervalo de tempo contendo bilhões de oscilações (e portanto também a energia média de um oscilador) é a mesma que a equação do pêndulo.

Teria sido Planck mais um "sonâmbulo" da ciência na provocativa concepção[26] de Arthur Koestler (1905-1983)? Uma discussão desta controvérsia está fora do escopo deste artigo por falta de espaço e competência do autor e sugiro as Refs. [27], [28] e [29] ao leitor interessado.

Para concluir, gostaria de salientar uma das verificações experimentais mais marcantes e precisas da lei de Planck e retornar aos versos de Caetano. O Universo está repleto de uma radiação cósmica de fundo a uma temperatura de $2,73$K, que é a mais importante evidência da teoria do *big bang,* apoiada na expansão e resfriamento do Universo com o tempo. Esta radiação é o mais antigo fóssil referente a um período em que a matéria (prótons e elétrons) estava em equilíbrio térmico com a radiação eletromagnética com todas as freqüências. Quando o Universo se esfriou a $T = 3000$K – a matéria já era constituída de hidrogênio atômico –, a interação com a radiação de dava apenas nas freqüências das respectivas linhas espectrais do hidrogênio. Nesta época, a maior parte da radiação se separou da matéria, esfriando-se, a entropia constante, até a atual temperatura de $2,73$K.

A primeira evidência da radiação fóssil foi encontrada por Arno Penzias (1933-) e Robert Wilson (1936-) em 1964. Um lúcido e atraente relato da

[26] Citação da Ref. [29], p. 238.

história desta descoberta e sua explicação é dado na Ref.[31]. A distribuição espectral da radiação de fundo, as *microondas cósmicas*, foi obtida a partir dos anos 90 pela missão Cosmic Background Explorer (COBE).[36] A Fig. 4 mostra a intensidade espectral como função da freqüência, com intensidade máxima na região de microondas. Os desvios da lei de Planck são mínimos (algumas partes por milhão) e são devidos a flutuações primordiais que levaram ao aparecimento das galáxias.

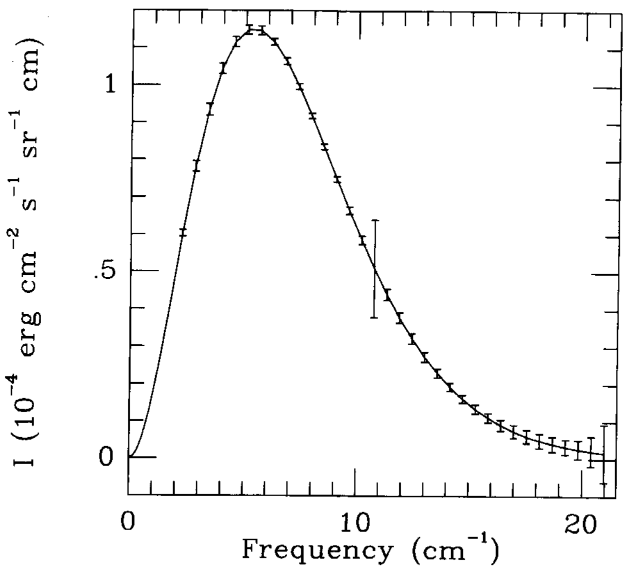

Figura 4. Distribuição espectral da radiação cósmica de fundo correspondente à radiação de um corpo negro a temperatura $T = 2,73$ K.

VIII Dados Biográficos

Planck nasceu em Kiel, Alemanha, no dia 23 de abril de 1858, filho de um professor de direito constitucional da universidade local, Julius Wilhelm, e de Emma (née Patzig) Planck. Seu pai vinha de uma família de acadêmicos (pai e avô eram professores de teologia da Universidade de Göttingen). Recebeu a educação inicial em Kiel e Munique e estudou física e matemática nas Universidades de Munique (1874-1877) e Berlim (1877-1888). Foi aluno de Hermann von Helmholtz (1821-1894) e Gustav Kirchhoff em Berlim. Obteve o doutorado *summa cum laude* da Universidade de Munique, em 1879, com uma tese sobre a concepção de entropia no trabalho de Rudolf Clausius da segunda lei da termodinâmica e no ano seguinte tornou-se *Privatdozent* em Munique. Em 1885, foi para a Universidade de Kiel, como *Extraordinariat* (professor associado) e quatro anos depois sucedeu Kirchhoff na Universidade de Berlim, tendo assumido a cátedra de física teórica em 1892 e permanecendo aí até a sua aposentadoria em 1926. Foi membro da Academia Prussiana de Física, desde 1894, e foi eleito membro da *Royal Society* de Londres em 1926. Foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física, em 1918, "por seu trabalho sobre o estabelecimento e desenvolvimento da teoria dos quanta elementares".

Sua carreira científica inicial foi devotada ao estudo da segunda lei da termodinâmica, especialmente o conceito de entropia com aplicações ao problema de equilíbro físico e químico, como transição de fases e dissociação eletrolítica. Foi profundamente influenciado por Clausius e sempre muito preocupado em definições claras dos conceitos fundamentais. Muito embora não simpatizasse muito, naquela época, com o trabalho de Boltzmann, ficou ao seu lado na famosa disputa contra Ostwald e os partidários do 'Energismo'. Por volta de 1894, desviou a sua atenção para um novo campo de estudos: a radiação do calor. Possíveis razões foram a sua crença na importância dos argumentos termodinâmicos no eletromagnetismo e o interesse geral nos fenômenos das ondas eletromagnéticos provocado pelas bem sucedidas experiências de Heinrich Hertz (1857-1894).

Planck publicou 235 trabalhos sobre ciência e filosofia, conforme consta da lista da Academia Prussiana de Ciências, incluindo muitos discursos relacionados com as suas funções como "Secretário Perpétuo" da Academia Prussiana (que não tinha o cargo de presidente), no período de 1918-1938, e conferências sobre assuntos gerais. Em física, os principais campos foram Termodinâmica (primeiro e continuado amor), Teoria Quântica (a partir de 1900), e Teoria da Relatividade Especial (principalmente no período 1906-1908).[27]

A Fig. 5 é o retrato de um Planck já maduro, que desfrutou de enorme prestígio na Alemanha e junto à comunidade científica, não apenas pela importância de seu trabalho, mas também por suas qualidades pessoais: caráter, integridade moral, patriotismo e liderança. Era muito benquisto por seus colegas e alunos. Quando rejeitou o convite da Universidade de Viena para suceder Boltzmann, optando por permanecer em Berlim, seus alunos festejaram alegremente com uma passeata de tochas. Segundo vários historiadores, seu conservadorismo em física o tornou relutante em aceitar o conteúdo revolucionário de sua própria teoria quântica. Durante anos, tentou ajustar o seu conceito de quantum

[27]Foi Planck quem corrigiu o êrro de Einstein em definir $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, e como conseqüência, obtendo, em sua teoria relativística, diferentes massa transversal e longitudinal do elétron. Usando $\mathbf{F} = dp/dt$, Planck mostrou que uma boa definição de momentum seria $\mathbf{p} = m_0\mathbf{v}/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ e portanto uma massa isotrópica dependente da velocidade.[32]

dentro da estrutura da física clássica. Foi presidente da Sociedade Kaiser Wilhelm para a Promoção da Ciência de 1930 a 1937, reassumindo em 1945-1946, um período particularmente muito difícil para a ciência alemã.

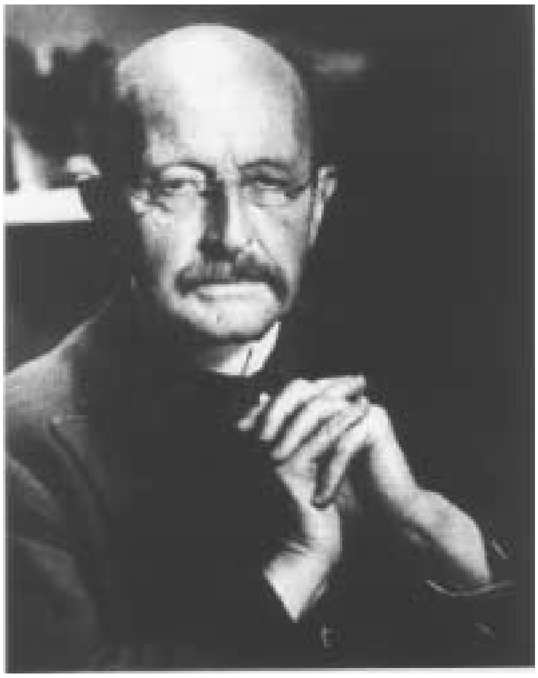

Figura 5. Max Planck

Durante o nazismo, Planck permaneceu na Alemanha, mas se opôs a algumas políticas governamentais, tendo tentado em vão, em 1933, dissuadir Hitler da expulsão de cientistas judeus das universidades alemãs. Criticou ainda a proposta de cientistas alemães, liderados por Philipp Lenard (1862-1957) e Johannes Stark (1874-1957) da criação de uma 'física ariana'. Um depoimento importante sobre as posições de Planck nesta época foi dado Werner Heisenberg (1901-1976).[33] Fez uma defesa apaixonada de Einstein nos tempos duros da repressão. Em um discurso na Academia, em 11 de maio de 1933, afirmou: "Eu acredito exprimir a opinião de meus colegas de Academia e da maioria dos físicos alemães ao dizer que o Sr. Einstein não é apenas um dos físicos fora de série, mas o Sr. Einstein é o físico, cujos trabalhos publicados em nosso século, atingiram a profundidade e importância que somente pode ser igualada às realizações de Johannes Kepler e Isaac Newton".[28]

Planck apreciava música tendo sido um bom pianista – chegou a pensar em seguir uma carreira profissional. Casou-se com Marie Merck, falecida em 1909, e em segundas núpcias com sua prima, Marga von Hösslin. Planck sofreu muito com as duas guerras. Na primeira, um de seus filhos, de um total de cinco, morreu e outro foi enforcado pela Gestapo, em 1945, acusado de participação em um complô para matar Hitler.[29]

Einstein apreciava muito o trabalho e a pessoa de Planck. Em seu obituário (1948), Einstein escreveu:[35]

> Um homem a quem foi dado abençoar o mundo com uma grande idéia criativa não precisa do louvor, da posteridade. Sua própria façanha já lhe conferiu uma dádiva maior....Foi a lei da radiação de Planck, que forneceu a primeira demonstração rigorosa - independente de outras suposições - das magnitudes absolutas dos átomos. Mais que isso, ele mostrou convincentemente que, além da estrutura atômica da matéria, há uma espécie de estrutura atômica da energia, regida pela constante universal h, que Planck introduziu. [A sua descoberta] abalou toda a estrutura da mecânica e da eletrodinâmica clássicas e impôs à ciência uma nova missão: a de encontrar uma nova base conceitual para toda a física.

Agradecimentos: Sou muito grato ao Prof. Arthur Miller, do *London College,* por disponibilizar, há tempos, referências bibliográficas relevantes e por conversas sobre o ensino da história da física. Agradeço ainda ao Prof. Guilherme F. Leal Ferreira por discussões sobre o artigo e ao Prof. Salomon Mizrahi pela leitura atenta do manuscrito.

References

[1] M. Planck, *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum*, Verh. Deutsch. Phys. Ges, Bd. **2**, S. 237 (1900). Tradução para o inglês nas Refs. [2] e [8].

[2] D. ter Haar, *The Old Quantum Theory*, Pergamon Press, Oxford (1967).

[3] L. Rosenfeld, *La Première Phase de l'Évolution de la Théorie des Quanta*, Osiris **2**, 149 (1936).

[4] M. J. Klein, *Max Planck and the Beginnings of the Quantum Theory*, Arch. Hist. Exact Sciences **1**, 459 (1962).

[5] M. J. Klein, *Planck, Entropy, and Quanta, 1901-1906*, The Natural Philosopher **1**, 83 (1963).

[6] M. J. Klein, *Thermodynamics and Quanta in Planck´s Work*, Physics Today, Nov. (1966), p. 23.

[28] Citação na Ref. [34].

[29] Alguns historiadores sugerem uma vingança pessoal de Hitler pela sua defesa de Einstein e contra a expulsão dos cientistas judeus.

[7] M. J. Klein, *The Beginnings of the Quantum Theory*, em *History of Twentieth Century Physics*, Academic Press, Nova York (1977).

[8] H. Kangro (organizador), *Planck´s Original Papers in Quantum Physics*, Taylor & Francis, Londres (1972).

[9] H. Kangro, *Early History of the Planck´s Radiation Law*, Taylor & Francis, Londres (1976).

[10] M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, 2a. edição, Vol.12 da coleção *The History of Modern Physics*, 1800 - 1950, American Institute of Physics, Nova York (1989).

[11] J. Mehra e H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantm Theory*, Vol. 1, Parte 1, Springer-Verlag, Berlim (1982).

[12] W. H. Cropper, *The Quantum Physicists*, Oxford, Nova York (1970).

[13] A. B Arons, *Teaching Introductory Physics*, John Wiley & Sons, Nova York (1997), p. 141.

[14] S. G. Brush, *Heat Conduction and the Stefan-Boltzmann Law*, Arch. Hist. Exact Sciences **11**, 38 (1973); reimpresso em *The Kind of Motion we Call Heat*, Vol. 2, North-Holland, Amsterdam, (1986), p. 469.

[15] F. Reif, *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*, Internation Student Edition, McGraw-Hill, Nova York (1965).

[16] Max Born, *Física Atômica*, Fundação Calouste Gulbenkian, 4a. edição, Lisboa (1965).

[17] W. Wien, *On the Division of Energy in the Emission-Spectrum of a Black Body*, Phil. Mag. S. **43**, 214 (1897). Tradução do Annalen der Physik, **1**, viii, p. 662 (1896).

[18] A. Pais, *Einstein and the Quantum Theory*, Rev. Mod. Phys. **51**, 863 (1949).

[19] Veja, por exemplo, F. S. Crawford, Jr., *Waves*, Berkeley Physics Course, Vol. 3, seção 7.5, McGraw Hill, Nova York, (1968). Veja também o apêndice VIII da Ref. [16].

[20] Lord Rayleigh, *Remarks upon the Law of Complete Radiation*, Phil. Mag. **49**, 539 (1900).

[21] R.M. Eisberg, *Fundamentos da Física Moderna*, Guanabara Dois, Rio (1979).

[22] A. Einstein, *Concerning an heuristic point of view toward the emission and the transformation of light*, Am. J. Phys. **33**, 367 (1965) - tradução do artigo publicado em Ann. Phys. **17**, 132 (1905). Uma outra versão para a língua inglesa está na Ref. [2], p. 91.

[23] P. Ehrenfest and H. Kamerlingh Onnes, *Simplified Deduction of the Formula of Combinations which Planck Uses as the Basis of His Radiation Law*, Proc. Amsterdam Academy 17, 870 (1914) e reimpresso em *Collected Scientific Papers of P. Ehrenfest*, editado por P. Martin, North-Holland, Amsterdam (1959) p. 353.

[24] T. S. Kuhn, *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Oxford U. P., Oxford (1978).

[25] M. Planck, *The Theory of Heat Radiation*, Dover, New York (1959).

[26] A. Koestler, *The Sleepwalkers*, Penguin, Londres (1989). Existe uma tradução antiga para o português: *Os Sonâmbulos*, Editora Ibrasa, São Paulo (1961).

[27] M. J. Klein, A. Shimony, e T. J. Pinch, *A Review Symposium*, Isis **70**, 429 (1979).

[28] P. Galison. *Kuhn and the Quantum Controversy*, British J. Phil. Sci. **32**, 71 (1981).

[29] T. S. Kuhn, *Revisiting Planck*, Hist. Stud. Phys. Sci. **14**, 231 (1984)..

[30] M. Planck, *The Theory of Heat Radiation*, Dover, Nova York (1959).

[31] S. Weinberg, *Os Três Primeiros Minutos*, Guanabara Dois, Rio (1989).

[32] A. I. Miller, *Albert's Einstein Theory of Relativity*, Addison-Wesley, Reading, (1981), p. 329.

[33] W. Heisenberg, Diálogos sobre Física Atômica, Editorial Verbo, Lisboa (1975), p. 212.

[34] E. Broda, *Max Planck in the Social Context*, palestra apresentada na Summer Workshop on the Physics of Non-Conventional Energy Sources, Trieste, 10 a 28 de julho (1983).

[35] A. Einstein, *Escritos da Maturidade*, Nova Fronteira, Rio (1994), p. 241.

[36] J. C. Mather *et al.* Astrophy. J. **354**, L37 (1990), contém os primeiros resultados preliminares.