

# A FÓRMULA DE PLANCK E O IMPACTO DA TEORIA QUÂNTICA

**Benedito Tadeu Ferreira de MORAES**

Instituto Federal do Pará-IFPA, Belém/PA, Brasil: email tadeu.moraes@ifpa.edu.br

## RESUMO

O presente trabalho apresenta a fórmula de Planck e o decorrente impacto na comunidade científica de uma das mais perturbadoras teorias do séc. XX – a teoria quântica. O texto é fundamentalmente subsidiado pela excelente obra de Abraham Pais, *“Subtle is the Lord...” The Science and the Life of Albert Einstein*, da editora Oxford University Press, NY (1982), entre outros textos importantes, onde os autores exploram a essência e os bastidores da invenção do “quantum de energia” e a solução do problema do corpo negro, por Planck, em 1900. Também é explorado o período pós-1900, onde são discutidos o impacto e as consequências da teoria que provocaram profundas modificações em um dos conceitos mais familiares da física – a energia.

**Palavras-chave:** radiação, quantum, energia, impacto

## 1 INTRODUÇÃO

A medida da intensidade de radiação emitida por uma cavidade foi tratada inicialmente por Kirchhoff, depois por Stefan, Boltzmann, Wien, Rubens, por Rayleigh e por Jeans, entre outros. Mas, foi somente em dezembro de 1900, que Planck encontrou a fórmula que ajustava perfeitamente as leis da termodinâmica com as leis do eletromagnetismo para a explicação da distribuição espectral da radiação do corpo negro, cuja física clássica foi incapaz de fornecer.

Certamente Planck não tinha idéia das transformações que ocorreriam em toda uma sociedade após sua descoberta e que teve seus principais desdobramentos na área tecnológica com a produção de TVs, CDs, DVDs, LCD, PLASMA, CHIPS, etc., além de suas variadas interpretações nos campos da sociologia, psicologia, filosofia e de sua aplicação nos campos das artes, economia e ciências. Essa revolução atinge a todos nós, mas se voltarmos o tempo veremos que o fervor da descoberta do “quantum” de radiação teve suas origens logo após ter nascido, e que viria se tornar um outro problema para o seu próprio inventor.

Primeiro, porque Planck insistiu durante muitos anos em ajustar sua fórmula com a teoria clássica da radiação. Segundo, porque havia, para ele, uma quebra conceitual da qual todo seu suporte científico estava edificado: a continuidade da energia. Por último, porque era preciso convencer que a quantização da energia dava suporte aos processos microfísicos dos quais não temos acesso diretamente.

Esse trabalho, portanto, é uma pesquisa sobre as origens, as idéias dos homens da ciência e as consequências que a teoria quântica trouxe nos anos iniciais de 1900. As exposições são cronológicas e se referem às discussões acerca do momento científico pelo qual passava toda a Física, antes, durante e depois do ano de 1900, sobretudo o impacto que a teoria quântica provocou ao longo de sua existência que não se reflete somente nos avanços tecnológicos que usufruímos, mas também na quebra de paradigma das próprias idéias que um homem possui acerca de seu conhecimento.

## 2 UMA NUVEM ESCURA NO CÉU AZUL DA FÍSICA: O PROBLEMA DO CORPO NEGRO

*“... Agora não há nada novo por ser descoberto em física... Tudo o que resta são medidas cada vez mais precisas”.*

Essa frase marcou na história a passagem do que seria o contentamento da maioria dos homens da ciência sobre aquilo que havia sido construído em termos de conhecimento sobre a física. Trata-se de um pensamento absolutista que Lord Kelvin, em 1900, expôs em uma conferência da Royal Society intitulada “Nuvens do século XIX sobre a Teoria Dinâmica do Calor e da Luz”.

As nuvens que Kelvin se referiu eram: o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley e o chamado problema da radiação do corpo negro.

A primeira nuvem está relacionada ao éter, que era tido como um meio material que servia de suporte à propagação das ondas eletromagnéticas, cuja existência foi posta à prova, em 1887, pelos físicos norte-americanos Albert Michelson e Edward Morley, através do experimento com interferômetro. O resultado negativo da existência de tal éter está entre as mais importantes experiências realizadas em física.

A outra nuvem era o problema do corpo negro, que diz respeito à análise espectral da intensidade de radiação emitida por um corpo aquecido. O nome corpo negro é denotado para um corpo que tem a propriedade de absorver toda a radiação que incide sobre ele, reemitindo-a.

As substâncias que são levadas a uma alta temperatura ou sujeitas a uma descarga elétrica emitem luz. Esta luz pode ser separada em seus componentes espectrais por meio de uma grade de difração, cujos comprimentos de onda, dos vários componentes, podem ser medidos com grande precisão. A emissão desta radiação eletromagnética deve estar associada com o movimento acelerado de partículas carregadas nos átomos da substância emissora, levando a conclusão de que elas devem ser as mesmas dos movimentos periódicos das partículas.

A física da época não conseguia explicar, como, a uma dada temperatura, o espectro da radiação emitida dependia do valor da frequência com a qual ela era emitida. Contudo, entre 1860 a 1870, pesquisadores descobriram duas propriedades importantes da radiação térmica: (1) À medida que a temperatura de um corpo cresce, a intensidade da radiação térmica emitida cresce rapidamente; (2) Quanto maior for a temperatura, menor será seu comprimento de onda da parte mais intensa do espectro da radiação.

Várias tentativas foram consideradas com o objetivo de explicar estas propriedades observadas em termos quantitativos. Porém, a dificuldade da explicação residia no fato de que a natureza da radiação térmica de um dado corpo, a uma dada temperatura, era independente das características do corpo.

Além disso, os experimentalistas teriam que construir corpos manejáveis com propriedades de um corpo negro perfeito, conceber detectores de radiação com sensibilidade adequada e descobrir maneiras de estender as medidas a amplos domínios de frequência. Parecia haver alguma lei fundamental da física escondida atrás de uma grande quantidade de dados experimentais sobre os espectros da energia emanada por um corpo aquecido. Importante então era descobrir a tal lei fundamental da radiação para explicar as características da função densidade de energia espectral  $u_\nu(T)$  do corpo negro.

Vários cientistas tentaram obter uma expressão analítica para  $u_\nu(T)$ . As contribuições mais importantes antes de 1900 foram de Kirchhoff, Stefan, Boltzmann, Wien, Rubens, Kurlbaum, Rayleigh, Lummer e Ernst Pringsheim e Max Planck.

### 3 MAX PLANCK

Durante a década de 1890, antes de chegar a sua lei de radiação, Planck cometeu vários erros de raciocínio. Isso ocorreu em função da atitude decididamente negativa de não aceitar de pronto as idéias de Boltzmann sobre a mecânica estatística e acreditar que a lei de Wien estivesse correta.

Planck esperava poder deduzir a segunda lei da termodinâmica como uma lei exata, ou seja, não estatística, valendo-se somente do eletromagnetismo. Sua interpretação inicial para os osciladores consistia na idéia de que a perda de energia de cada oscilador era compensada pela absorção de energia da radiação e, portanto à diminuição da entropia, e isso provocava o equilíbrio térmico da radiação com os osciladores da cavidade. Assim, a taxa de emissão deveria ser igual à taxa de absorção de energia. Planck foi então atrás de demonstrar o que Wien havia obtido sem dedução.

Com a interpretação dos osciladores e do equilíbrio térmico da radiação, Planck a obteve A fórmula de Wien

$$u_\nu(T) \cong \frac{8\pi\nu^3}{c^3} e^{-\alpha\nu/T} , \quad (1)$$

onde  $\alpha$  é um parâmetro a determinar. Essa foi a principal contribuição de Planck à teoria do corpo negro até 1900.

#### 4 LORD RAYLEIGH

Por um curto período de tempo a lei de Wien-Planck parecia ser a resposta final. No entanto, em 1900, essa conclusão revelou-se prematura. Primeiro porque houve um avanço significativo das técnicas experimentais no infravermelho longínquo. Segundo porque os físicos do assunto não estavam absolutamente convencidos dos resultados.

Ao contrário de Planck, Rayleigh fixou-se na própria radiação, após mostrar que o campo eletromagnético em uma cavidade era equivalente a um conjunto discreto e infinito de osciladores harmônicos independentes, vibrando continua e forçadamente, em torno de suas posições de equilíbrio, com energia cinética total obedecendo ao princípio da equipartição.

Com isso, estabeleceu que o campo eletromagnético no interior da cavidade (corpo negro) resulta da superposição de modos de vibração análogos aos que produzem as ondas acústicas estacionárias em um meio contínuo, como uma corda vibrante com extremos fixos.

Em junho de 1900, num curto artigo, Rayleigh apresenta pela primeira vez a utilização do teorema da equipartição da energia aplicado à radiação, onde considera que a densidade das ondas estacionárias na cavidade (corpo negro) obedece à relação:  $N_\nu = 8\pi/c^3\nu^2$  e que a cada onda, pela equipartição, estaria associada à energia

$$\langle \epsilon \rangle = (R/N_A)T = kT \quad (2)$$

onde  $R$  é a constante dos gases e  $N_A$  é o número de Avogadro. Nesse caso, a função  $u_\nu(T)$  das ondas na cavidade, de acordo com Rayleigh, seria simplesmente o produto da densidade das ondas pela energia de cada uma, resultando:

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{N_A c^3} RT . \quad (3)$$

A Eq. (3) mostra que a densidade de energia é proporcional ao quadrado da frequência e da temperatura absoluta, significa que para altos valores da frequência a densidade assume igualmente valores altos. Este resultado deixa claro que a curva de Rayleigh, para altas frequências, leva a um fato catastrófico: quando  $\nu \rightarrow \infty$ , implica que  $u_\nu(T) \rightarrow \infty$ .

Para suprimir esse comportamento, Rayleigh introduziu ‘ad hoc’ um fator exponencial de corte na tentativa de obter a lei de Wien, propondo a seguinte lei de radiação:

$$u_\nu(T) = C_1 \nu^3 T e^{-(C_2 \nu/T)} . \quad (4)$$

Medidas precisas de  $u_\lambda(T)$  realizadas por H. Rubens e F. Kurlbaum mostraram que a lei de Rayleigh se ajustava melhor ao comportamento do espectro para altas frequências do que a lei de Wien-Planck, porém os resultados de suas medidas, como um todo, não eram satisfeitos pela fórmula de Rayleigh.

Em fevereiro de 1900, Otto Lummer e Ernst Pringsheim atacaram o problema numa região de comprimento de onda ainda não explorado:  $\lambda = 12 - 18 \mu\text{m}$  (e  $T = 300 - 1650 \text{ K}$ ), concluindo: “A lei de Wien falha naquela região”. Três meses depois, Heinrich Rubens e Ferdinand Kurlbaum foram ainda mais longe no infravermelho, consideraram os valores:  $\lambda = 30 - 60 \mu\text{m}$  ( e  $T = 200 - 1500 \text{ K}$ ) e chegaram à mesma conclusão.

Ressalta-se que a dependência linear da densidade de radiação com a temperatura, que Rubens e Kurlbaum verificaram em seus estudos, e que foi publicado somente em outubro de 1900, Rayleigh já havia obtido no meio daquele ano, com o fator numérico corrigido pelo inglês James Jeans, em 1905.

## 5 RUBENS E A FÓRMULA DE PLANCK

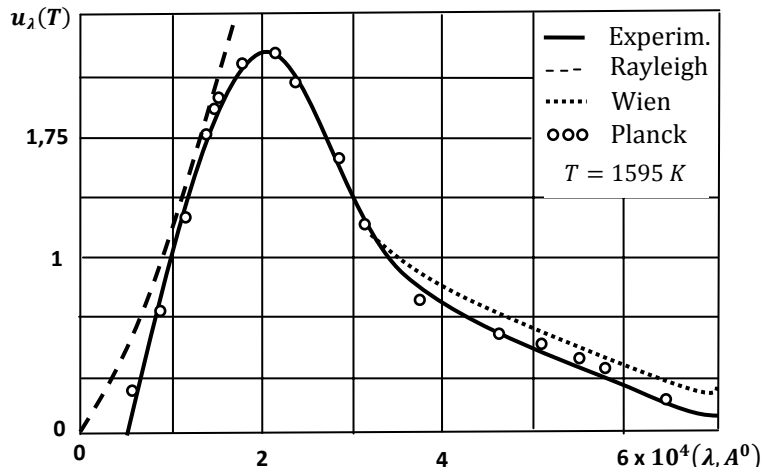
No dia 7 de outubro de 1900, Rubens e sua esposa visitaram Planck. Durante a conversa, Rubens relatou que havia descoberto que a função  $u_\nu(T)$  era proporcional à temperatura  $T$  para pequenos valores de frequência  $\nu$ , que era o grande problema experimental. Logo em seguida da visita ir embora, Planck atacou o problema e publicou sua lei de radiação em 19 de outubro de 1900, mas é bem provável que a tenha descoberto no dia 7 de outubro, porque no final da tarde do dia 7, Planck enviou um bilhete a Rubens informando-o que havia descoberto a fórmula da radiação térmica para todo o espectro, do infravermelho até o ultravioleta.

Em 19 de outubro de 1900 Planck apresenta sua fórmula à Sociedade Alemã de Física, como um comentário ao trabalho de H. Rubens e F. Kurlbaum, da seguinte forma:

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{b}{e^{b/aT} - 1} \quad (5)$$

onde  $a$  e  $b(\nu)$  seriam dois parâmetros a determinar.

Questiona-se se Planck conhecia ou não o importante trabalho de Rayleigh, publicado meio ano antes de sua lei. O fato é que, em 1900, Planck não se referiu à Rayleigh, embora sua fórmula (de Planck) fosse uma interpolação da lei de Wien com a lei de radiação de Rayleigh. Mas, o que é importante é ela descrevia os dados experimentais com uma exatidão impressionante, como mostra a Figura.



**Figura:** A previsão de Planck para a densidade de energia comparada aos resultados experimentais, de Wien e de Rayleigh para uma temperatura  $T = 1595 \text{ K}$  e  $u_\lambda(T)(10^3 \text{ J.m}^3)$ .

A tarefa seguinte de Planck foi substancialmente mais complicada. Tratava-se de descobrir por que razão sua fórmula funcionava tão bem? O que estava errado na dedução clássica da densidade de energia da radiação?

Na realidade, para obter sua fórmula, Planck adotou argumentos termodinâmicos e a lei de Wien, encontrando para energia média dos osciladores

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{b}{e^{b/aT} - 1} \quad , \quad (6)$$

cujo produto com o fator  $8\pi\nu^2/c^3$  fornece a Eq. (5). As constantes  $a$  e  $b$  foram ajustadas experimentalmente por Planck, que percebeu que sua fórmula descrevia muito bem tanto os dados antigos quanto os novos.

Nesse primeiro trabalho, muito curto e escrito às pressas, Planck não apresentou nenhuma justificativa teórica para dar um conteúdo físico para a expressão que havia encontrado. O único aspecto positivo dessa primeira comunicação à Sociedade Alemã de Física era que havia chegado a uma equação que satisfazia as medidas experimentais.

## 6 O ‘QUANTUM’

Durante 8 semanas, no período de outubro a dezembro de 1900, Planck procurou interpretar sua equação, e isso fez com que inventasse a teoria quântica, possivelmente a partir de três etapas: eletromagnética, termodinâmica e estatística.

É na fase estatística que Planck, ao aplicar a fórmula de Boltzmann da entropia e considerando um número grande de  $N$  osciladores lineares, todos com frequência  $\nu$ , postula a quantização, supondo que a energia total  $E_N$  é constituída por elementos finitos de energia  $\epsilon$ , isto é:  $E_N = n\epsilon$ , onde  $n$  é um número elevado, sendo a entropia  $S$ , então, é uma função exclusiva de  $E/\nu$  e, portanto, que

$$\epsilon = h\nu \quad . \quad (7)$$

Esta explicação foi apresentada pela primeira vez em 14 de dezembro de 1900, com a seguinte função para a densidade de energia do corpo negro:

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad . \quad (8)$$

Não obstante, a partição da energia em elementos finitos sugeria trocar a continuidade da energia dos osciladores em equilíbrio com a radiação, por ‘*quantas*’ (pacotes de energia) bem definidos. Em linguagem matemática, significava trocar uma integral por um somatório com as energias possíveis na forma:  $E = n\epsilon$

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\epsilon \exp(-n\epsilon/kT)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp(-n\epsilon/kT)} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad . \quad (9)$$

Assim, quando a temperatura é elevada, a Eq. (9) se reduz a  $\langle \epsilon \rangle = KT$ , o resultado clássico.

É oportuno registrar que Planck não escreveu  $E = nh\nu$ . Na verdade sequer fez essa hipótese. Sua dedução está relacionada aos modos pelos quais a energia total  $E$  poderia estar distribuída em um certo número  $n$  de energias, pois se  $n$  fosse infinito (um contínuo), haveria infinitos modos de fazer a sua distribuição.

O que ele supôs foi que essa energia deveria ser dividida em um número finito de partes, e então introduziu a idéia de uma energia mínima  $\epsilon = h\nu$ . O que pode ser considerado como um simples artifício de cálculo, até porque para analisar a situação de equilíbrio dos osciladores com a radiação ele se baseara na teoria eletromagnética clássica, onde tanta a emissão quanto à absorção de energia são contínuas, portanto não estão quantizadas.

Se a radiação pode ser absorvida e emitida de forma contínua, o oscilador pode ter qualquer energia, então sua energia não está quantizada. Mas, se a energia da radiação eletromagnética não está quantizada e a energia dos osciladores também não está quantizada, o que está quantizado?

## 7 O IMPACTO DA TEORIA QUÂNTICA

O ‘*quantum*’ de Planck punha em causa o eletromagnetismo, a termodinâmica e a própria mecânica newtoniana, em suma toda a física de que tanto se orgulhavam os físicos do século XIX. Era o princípio da revolução quântica que destituía da energia a algo que parecia intocável – a sua continuidade.

Em 1931, Planck escreveu uma carta Robert Wood referindo-se a introdução de  $h$  e dos elementos de energia – “foi um ato de desespero [...]. Eu tinha que obter um resultado positivo, de qualquer modo e a qualquer preço”.

No período entre 1902-1903, H. A. Lorentz criticou o trabalho de Planck quanto aos *elementos de energia desiguais* ( $E = \epsilon, 2\epsilon, 3\epsilon, \dots, n\epsilon$ ). Então, por não possuir base sólida e contrariar a física clássica Lorentz sugeriu que seria interessante investigar mais profundamente a lei de Rayleigh, pois o princípio da equipartição da energia juntamente com a mecânica de Hamilton, levam à lei de Rayleigh.

Em 1905, Paul Ehrenfest interpretou Planck como se ele estivesse afirmado que a energia radiante é dividida em elementos iguais a  $h\nu$ . Mas, Planck não havia aplicado sua fórmula ( $\epsilon = h\nu$ ) à radiação, e sim aos osciladores.

## 8 RAYLEIGH – JEANS

Parece que as palavras do renomado Lorentz haviam ressoado aos ouvidos daqueles envolvidos com o problema da radiação de cavidade.

Entre 17 de março e 9 de junho de 1905, Einstein baseado na geração e propagação da radiação, apresenta a dedução da fórmula de Rayleigh. Seu trabalho, enviado em 17 de março, aparece em 9 de junho.

Entre 6 e 18 de maio de 1905, em uma carta à *Nature*, publicada em 18 de maio, Rayleigh volta à sua lei  $\nu^2 T$ , mas agora determina a constante  $C_1$ , da Eq. (4). Nesse trabalho, a constante  $C_1 = 64\pi k$  ( $k$  é a constante de Boltzmann) que difere por um fator 8.

Em 5 de junho de 1905, J. H. Jeans, anexa a um artigo pronto um pós-escrito no qual corrige o erro de Rayleigh, onde escreve

$$u_\lambda(T) = 8\pi\lambda^{-4}kT \quad . \quad (10)$$

A publicação desse trabalho aparece um mês depois. Em julho de 1905, Rayleigh agradece a contribuição de Jeans.

Entre 1905 e 1906, Ehrenfest concluiu que a teoria clássica obedecia necessariamente a essa fórmula, mas o espectro para altas frequências conduzia a uma divergência dos resultados experimentais.

Em 1911, Ehrenfest cunhou a frase “*a catástrofe do ultravioleta*”, refletindo o espanto causado pelo insucesso da abordagem clássica.

Essa equação ficou mundialmente conhecida como a lei de Rayleigh-Jeans. Não obstante, ela é posterior à lei de Planck e não anterior, como boa parte dos textos acadêmicos e mesmo livros de divulgação científicos têm assim considerado.

## 9 DEPOIS DO “QUANTUM”

Poincaré fez a seguinte observação que destaca uma vertente importante da criatividade científica:

*“Esta hipótese (de Planck) da bem conta dos fatos conhecidos desde que se admita que a relação entre a energia do oscilador e sua radiação seja a mesma que nas teorias antigas (a eletrodinâmica de Maxwell). E aí está bem posta a dificuldade, por que conservá-la após ter destruído tudo? Mas, é preciso conservar alguma coisa, senão não será possível construir”.*

Obviamente, Poincaré se referia aos ‘*quanta*’ e a manutenção da teoria eletromagnética. Ainda estava por se compreender a conciliação as duas coisas, haja vista que a teoria de Maxwell não estava errada e hipótese dos “quanta” havia levado Planck a determinar as leis assintóticas da radiação.

## 10 EINSTEIN E PLANCK

O efeito fotoelétrico era conhecido havia algum tempo, desde H. Hertz (1887), passando por W. Hallwachs (1888), por J. J. Thomson (1889) – o descobridor do elétron, e por P. Lenard (1902), que fez a descoberta fundamental de que a energia dos elétrons “*não mostrava a menor dependência em relação à intensidade da luz*”.

Einstein explicou o fenômeno da seguinte forma: o impacto de um ‘*quantum*’ (pacote de energia) da radiação é suficiente para extrair um elétron se a energia do ‘*quantum*’, igual a  $h\nu$ , for superior à energia de ligação  $\Phi$ , do elétron no metal. O elétron é então ejetado com uma energia cinética

$$E_{cin} = h\nu - \Phi \quad (11)$$

onde  $\nu$  é a frequência da radiação incidente (monocromática). Esta expressão estava de acordo com as previsões de Lenard. Porém, em absoluta oposição à teoria eletromagnética, que previa a ejeção depender da intensidade.

A reconsideração feita por Einstein sobre o raciocínio de Planck e a relação deste com seu trabalho deveu-se a sua constatação de que “a teoria de Planck utiliza implicitamente a [...] hipótese do *quantum de luz*”.

Surgia a questão de saber se seria possível estabelecer uma conexão entre a quantização de Planck e a explicação do efeito fotoelétrico a partir do ‘*quantum*’.

A resposta de Einstein era que sim. Mas sua teoria teve grande dificuldade de ser aceita nos meios científicos, mesmo após medidas rigorosas realizadas por Millikan, em 1916.

A razão dessa dificuldade é simples, Einstein para a explicação do efeito fotoelétrico havia definido a quantização da radiação do campo eletromagnético.

Nesse trabalho (de Einstein) fica claro que se Planck tivesse interpretado o seu ‘*quantum*’ como algo inerente à própria radiação, independente da interação com a matéria (com seus osciladores em equilíbrio com a radiação), já em 1900, teria determinado que o ‘*quantum*’ de energia é determinado pela frequência da radiação emitida e absorvida. Mas, não o fez!

Ao invés, Einstein parece ter visto nas propriedades do efeito fotoelétrico um sinal muito claro da composição corpuscular da radiação. No entanto, nem Planck, nem Millikan e talvez toda a comunidade científica, com exceção de Einstein, em 1905, estivessem preparados para por em questão um dos maiores sucessos da física do século XIX, a teoria ondulatória do campo eletromagnético.

O sucesso do ‘*quantum*’ de Planck, de sua interpretação por Einstein e adicionalmente porque N. Bohr, em 1913, quantiza o átomo usando as hipóteses de Planck e Einstein, explicando a natureza das raías espectrais do átomo de hidrogênio, na primeira década do século XX muitos teóricos eminentes estavam dispostos a aceitar que a teoria quântica chegara pra ficar.

## 11 CONCLUSÃO

O presente trabalho destaca a figura de Planck e a invenção da teoria quântica, nos anos próximos que antecederam sua famosa fórmula (1900) e o impacto da teoria, nos dez anos posteriores a sua descoberta.

A idéia é proporcionar aos professores e estudantes de física ou áreas afins a discussão de como a teoria quântica foi realmente construída, para isso colaboram dois aspectos que consideramos determinantes para as análises críticas e quantitativas do conteúdo histórico explorado: 1) o material bibliográfico pesquisado; 2) a didática da exposição.

Nessa linha de abordagem fica clara a expectativa de tornar precisa a leitura sobre quando em quem realmente participou de uma das grandes teorias científicas que mudaram o mundo – a teoria quântica.

Ressalta-se a partir disso a importância da pesquisa científica no sentido de esclarecer alguns pontos que foram levantados neste trabalho. Um diz respeito à lei de Rayleigh-Jens e o outro, a quantização de Planck-Einstein.

Como foi mostrada, a lei de Rayleigh-Jens é posterior à fórmula de Planck, e não anterior a ela, como muitos textos e livros científicos assim expõe. Na realidade, Bassalo (1998) já havia levantado essa questão em uma de suas excelentes Crônicas.

O fato é o seguinte: a lei de Wien é de 1896, a lei Rayleigh é de junho de 1900 e Planck interpolou as duas em outubro de 1900, para obter sua fórmula da radiação térmica. E somente em 1905 é que Jeans ajusta mais precisamente a lei de Rayleigh, tornado-se, nesse sentido, conhecida como a lei de Rayleigh-Jeans. Esta lei ensejou Ehrenfest cunhar o termo *catástrofe do ultravioleta* para a divergência quando se tomavam grandes valores de frequências.

Outra questão levantada é a quantização de Planck-Einstein. A razão para adotarmos o binômio Planck-Einstein reside no fato da interpretação.

De fato foi Planck quem quantizou a energia, independente de suas razões e convicções. Também é verdade que Planck adotou corretamente a quantização para a distribuição de energia que dava valores discretos de energia para os fenômenos de emissão e absorção. Além de que, a partir de sua quantização obteve as constantes universais  $h$  - constante de Planck,  $N_A$  - número de Avogadro),  $k$  - constante de Boltzmann,  $e$  - a carga do elétron.

Mas foi Einstein quem mostrou, através de sua interpretação para a quantização, que era possível obter a fórmula de Planck, os calores específicos dos sólidos e a explicação para o efeito fotoelétrico. Para isso adotou a hipótese de que independente da interação com a matéria é a radiação que está quantizada.

Esta foi exatamente a intenção do trabalho – mostrar como de fato as coisas aconteceram. Adicionalmente, pensamos que é possível estendê-lo, usando a mesma metodologia aqui apresentada, para atingir outros campos (ou áreas) da física e com isso favorecer uma leitura mais aprofundada de determinados temas da ciência.

## REFERÊNCIAS

CARUSO, F. e OGURI, V., **Fundamentos da Física: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos** (in Portuguese), Elsevier, RJ, 2006.

BASSALO, J. M. F., **Crônicas da Física**, Tomo 5, Ed. Universitária/UFPA, 1998.

EISBERG, R. M., **Fundamentals of Modern Physics**, J. Wiley & Sons, NY, 1961.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. and KRANE, K. S., **Physics Two**, J. Wiley & Sons, N Y, 2002.

PAIS, A., **“Subtle is the Lord...” The Science and the Life of Albert Einstein**, Oxford University Press, NY, 1982.

FLEMING, H., **Max Planck e a idéia do quantum de energia**, notas de aula, Inst. de Física (USP), 2000.

NUSSENZVEIG, M., **Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade e Física Quântica**, V. 4, Edgard Blücher, SP, 1998.

ROSA, P. S., **Dissertação de Mestrado: Louis de Broglie e as ondas de matéria**, UNICAMP-SP, 2004.