

# “...UM ATO DE DESESPERO...”

*“As Ciências [naturais] não tentam explicar,  
mal tentam até interpretar,  
elas principalmente criam modelos.”[1]  
John von Neumann (1903-1957)  
Físico húngaro, naturalizado americano,  
criador das bases axiomáticas da Mecânica Quântica*

CMG( Ref) Paulo Roberto Gotaç

## O CIENTISTA

O cientista, personagem central do “ato”, é Max Karl Ernst Ludwig Planck[2,3], mais conhecido, entre a comunidade dos físicos e estudiosos de História da Ciência, simplesmente por Max Planck.

Nasceu em Kiel, Alemanha, no dia 23 de abril de 1858, no seio de uma família com forte tradição acadêmica. Seu bisavô e avô exerceram cargos docentes na área de Teologia na famosa Universidade de Göttingen (a de Gauss) e seu pai, Julius Wilhelm Planck, à época de seu nascimento, ocupava o cargo de professor de Lei Constitucional na Universidade de Kiel. Sua mãe, Emma Patzig, era a segunda esposa de Julius e Planck era o sexto filho da extensa família (dois de seus irmãos se originavam do primeiro casamento do pai com Mathilde Voigt) e , quando nasceu, seu pai já passava dos 40.

Crescendo num ambiente cujos valores básicos emanavam de virtudes tais como a cultura, a honestidade, a justiça, a tradição e a generosidade, Planck iniciou seus estudos básicos em Kiel, transferindo-se com a família, em 1867, para Munich, em decorrência da indicação do pai como professor naquela cidade. Datam dessa época, face ao estimulante ambiente cultural e social reinante em Munich, as origens de seu gosto pela música e pelo alpinismo, atividade que praticou por toda sua vida. Lá frequentou o afamado Maximilian Gymnasium e seu desempenho como estudante nunca pôde ser considerado como brilhante, embora fosse um bom aluno, e seus melhores graus fossem invariavelmente obtidos em música e catecismo, merecendo, durante

quase todos os anos, um prêmio de bom comportamento oferecido pela instituição. Não demonstrou grandes talentos para a Matemática e as Ciências, embora não tivesse decepcionado nessas áreas também.

Foi um de seus mestres, mais para o final do curso no Gymnasium, o primeiro a despertar seu interesse pela Física e pela Matemática, ocasião em que ficou verdadeiramente fascinado pelo caráter universal da conservação de energia. Não foi por acaso, portanto, que Planck se tivesse tornado, anos mais tarde, um dos nomes mais importantes para o desenvolvimento conceitual da ciência da Termodinâmica.

Tendo ingressado na Universidade de Munich em 1874, ainda indeciso sobre que carreira acadêmica seguir, foi, conforme reconhece em seus registros autobiográficos, desestimulado pelos seus professores de Física a escolher esta área, sob a alegação de que era uma ciência fechada, sem perspectivas de desenvolvimento, com respostas prontas para todo novo fenômeno, argumento alinhado com a escola filosófica do Mecanicismo, dominante no final do século XIX.

Assim mesmo, felizmente para a Física, Planck a adotou como projeto de vida, guiado, talvez, pela paixão que lhe despertava a independência do mundo exterior em relação às lides humanas e pelo fato de que era possível a formulação de leis capazes de descrever o universo objetivo, linha de pensamento à qual foi fiel durante toda sua vida.

Era costumeiro, à época, entre os estudantes alemães, o trânsito entre as várias Universidades do país. Não foi diferente com Planck. Em 1877, transferiu-se para a Universidade de Berlin, onde teve

como mestres Weierstrass, Helmholtz e Kirchhoff (o mesmo das leis circuitais, a quem, embora admirasse, considerava seco e monótono como professor), dentre outros. Pelo que se pode depreender de informações do período, adotava uma linha independente e autodidata. Consta que a essa altura, já completamente imerso na Física, dedicou-se à leitura intensiva das obras originais de Rudolf Clausius, o grande formulador da Segunda Lei da Termodinâmica. O caráter absoluto desta lei, o fascinou pela sua capacidade de descrever um enorme gama de fenômenos naturais.

Em 1879 (o ano do nascimento de Einstein), Planck retornou a Munich e recebeu seu grau de doutorado, aos 21 anos, com a tese intitulada “Sobre a segunda Lei da Teoria Mecânica do Calor” . Logo após, em continuação à sua qualificação, mediante a apresentação de trabalhos onde consolidou o conceito de entropia, tornou-se professor independente em Munich (talvez a melhor tradução, para o Português, de “Privatdozent”, cargo não remunerado existente nas universidades alemãs, fundamental para ascensão nas carreiras acadêmicas).

Com a morte de Kirchhoff em 1887, a Universidade de Berlin passou a procurar um nome à altura para substituí-lo. Com uma produção científica já bastante extensa, a escolha acabou recaindo sobre Planck que, em 1888, foi nomeado professor de Física Teórica. O ambiente na Universidade era, à época, extremamente favorável à criação científica, pois contava em seus quadros com os melhores e mais ativos estudiosos da Europa. De lá, Planck só saiu para a aposentadoria, em 1927, tendo sua carreira atingido o ponto culminante quando, em 1900, anunciou a famosa fórmula que explicava o espectro de energia da radiação do corpo negro, de caráter revolucionário e origem do “ato”. Por conta desta descoberta, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1918.

Politicamente, acreditava na verdade do Estado, assinando, em 1914, um manifesto de apoio ao militarismo alemão. Quando, no entanto, os nazistas, na década de 30, assumiram o poder, Planck não aceitou a direção da principal instituição de pesquisa do país, que ainda leva seu nome, sob a legação de extrema politização dos cargos científicos. Embora tenha permanecido na Alemanha durante toda a 2ª. Guerra, passou, naqueles anos, por enormes dificuldades pessoais e profissionais, já que praticamente todos os grandes nomes do cenário científico do país foram obrigados a emigrar. O período

final do conflito foi particularmente dramático para Planck que teve suas propriedades destruídas pelo fogo aliado, sendo um de seus filhos executado pela Gestapo, como suspeito de ter participado de um atentado frustrado contra Hitler, em 1944. Planck faleceu em 4 de outubro de 1947 em Göttingen, aos 89 anos.

## O IMPASSE

No período compreendido entre fim do século XIX e início do século XX era acentuada, como ainda se verifica nos dias atuais, a distinção, nas ciências físicas, entre a atividade experimental e a atividade teórica, embora todos os cientistas daquela época, como os de hoje, enfatizassem a necessidade de um intenso diálogo entre os dois campos, considerando-os igualmente importantes para o desenvolvimento da Física.

Na verdade, não foi sempre assim. Um dos mais importantes e influentes filósofos da Ciência, Immanuel Kant (1724-1804), dentro de sua imensa obra, estipulava que a atividade científica era basicamente constituída de formas e conceitos, qualificados de *a priori*, não experimentais, através dos quais, e só através deles, a experiência concreta se manifestava. Sem querer detalhar o pensamento de Kant, o que seria impossível num relato do porte do presente, pode-se afirmar que uma das conseqüências de seu formidável trabalho foi a hierarquização, nas ciências naturais, das atividades experimental e teórica, colocando esta última num patamar superior. Como afirmara o grande Ludwig Boltzmann [4], “... aos experimentais restaria apenas carregar os tijolos, enquanto aos teóricos caberia a tarefa de com eles construir o edifício”.

Mas a produção experimental é mais ágil que a teórica, e, a partir da segunda metade do século XIX, os experimentais passaram a dispor de mais tempo. Assim, entre um carregamento de tijolos e outro, começaram a montar seus próprios edifícios, cujas formas e constituições desafiavam a capacidade de interpretação e explicação dos teóricos, mantendo-os constantemente ocupados.

Um dos resultados experimentais mais importantes da época dizia respeito ao espectro de energia (quantidade de energia, para cada frequência ou comprimento de onda) exibido por um corpo em equilíbrio termodinâmico a uma dada temperatura. Kirchhoff já havia demonstrado que, quando as paredes do corpo emitem (ou absorvem) toda a radiação que com ele interage (o chamado corpo negro

- tão bom emissor quanto absorvedor), o espectro independe da natureza do material emissor (ou absorvedor), dependendo somente da temperatura absoluta.

Por volta de 1898, técnicas experimentais já tornavam possível encontrar materiais cujos comportamentos se aproximavam bastante aos do corpo negro. Daí a determinar os espectros de energia por técnicas especiais, foi um passo. Tal levantamento estava fortemente ligado a nomes de cientistas pertencentes aos quadros da Universidade de Berlin da época em que Planck lá trabalhava. Os resultados podem ser resumidos pelo que está indicado na figura 1.

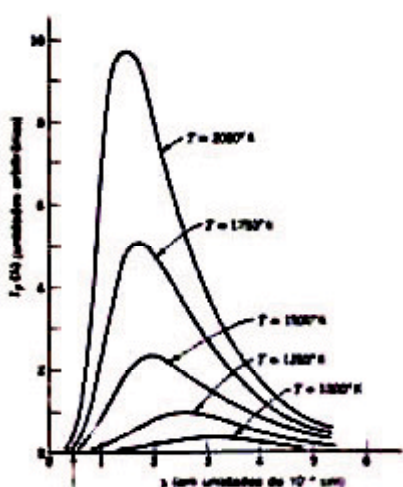


Figura 1 – Distribuição espectral do corpo negro a várias temperaturas absolutas  
Fonte: Eisberg (1979) [5]

Nesta figura, o eixo horizontal representa os valores dos comprimentos de onda  $\lambda$  dos vários componentes do espectro e o eixo vertical, a energia  $I_T(\lambda)$ , emitida pela superfície do corpo negro, por segundo, por  $1 \text{ cm}^2$ , para cada comprimento de onda  $\lambda$ , nas temperaturas  $T$  indicadas. As áreas sob cada gráfico traduzem a energia total, na temperatura correspondente, para todos os comprimentos de onda e é proporcional à quarta potência da temperatura  $T$ , em concordância com outro resultado experimental firmemente estabelecido desde 1879 (Lei de Stefan).

O desafio dos teóricos passou a ser a determinação da forma da função  $I_T(\lambda)$ , com base nos cânones da teoria física vigente, considerados imutáveis e definitivos no final de século XIX. É evidente que, se a forma de  $I_T(\lambda)$  obtida teoricamente concordasse com os fatos experimentais, estariam firmemente

consolidados os princípios da chamada física clássica, que à época, é claro, não era designada por clássica.

Os detalhes da derivação teórica não serão aqui reproduzidos. Alguns aspectos, no entanto, devem ser apontados para não prejudicar o nível de clareza do presente trabalho.

Seja, por suposição, um objeto dotado de uma cavidade que se comunica com o exterior por um orifício de dimensões pequenas comparadas com as da cavidade. A radiação incidente do exterior penetra na cavidade pelo orifício, é refletida continuamente pelas paredes da cavidade, e somente uma pequeníssima parte dela sai de novo por onde entrou, em virtude das dimensões relativas. Assim, o orifício praticamente absorve toda a radiação incidente e pode ser considerado, para efeitos práticos, como um corpo negro. Se, agora, a cavidade for aquecida uniformemente a uma temperatura absoluta  $T$  e suas paredes atingirem o equilíbrio termodinâmico com a radiação resultante, parte dela sairá pelo orifício. Como este já foi suposto possuir as propriedades de um corpo negro, será também um emissor perfeito e o espectro por ele emitido fornecerá, para a temperatura, a forma procurada de  $I_T(\lambda)$ . Ocorre, porém, que, para facilitar o desenvolvimento da modelagem teórica, é mais conveniente o cálculo da quantidade de energia por unidade de volume no interior da cavidade (a chamada densidade de energia), representada por  $\rho_T(\lambda)$ , proporcional ao valor de  $I_T(\lambda)$ , com uma constante de proporcionalidade independente de  $\lambda$  e  $T$ , fato cuja prova rigorosa não será aqui apresentada. Ou seja: obtido  $\rho_T(\lambda)$ , obtém-se  $I_T(\lambda)$ .

Por outro lado, o físico alemão Wilhelm Wien (prêmio Nobel de Física de 1911), trabalhando sobre considerações de Termodinâmica clássica, foi capaz de estabelecer uma fórmula, amplamente confirmada pela experiência, que fornecia, em primeira aproximação, a forma de  $\rho_T(\lambda)$ . Sua expressão é:

$$\rho_T(\lambda) = \frac{f(\lambda T)}{\lambda^5}$$

Nesta expressão, conhecida como Lei de Wien,  $f(\lambda T)$  é uma função do produto  $\lambda T$ , a ser determinada pela Física conceitual vigente à época.

Um desenvolvimento teórico, baseado na teoria eletromagnética clássica, capaz de descrever o processo de sucessivas reflexões no interior da cavidade e a determinação, através do emprego de conceitos probabilísticos de distribuição de energia,

devidos a Boltzmann, resultam na seguinte expressão, para  $\rho_T(\lambda)$ , conhecida como o espectro de Rayleigh-Jeans:

$$\rho_T(\lambda) \approx \frac{8\pi k T}{\lambda^5}$$

O valor obtido confirma a Lei de Wien, com  $f(\lambda, T) \approx \frac{8\pi k T}{\lambda^5}$ , sendo  $k$ , a chamada constante de Boltzmann que surge ao longo da derivação teórica. A figura 2 representa o espectro de Rayleigh-Jeans comparado aos valores experimentais para a temperatura absoluta  $T = 1646$  K.

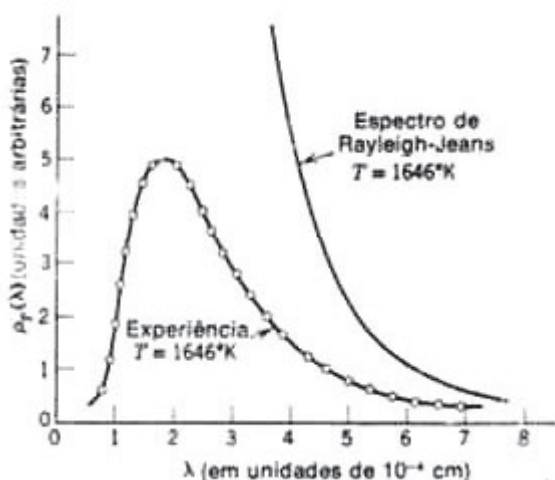


Figura 2 – Comparação dos dados experimentais com o espectro de Rayleigh-Jeans  
Fonte: Eisberg (1979)

A enorme discrepância entre os dois gráficos, principalmente na região dos pequenos comprimentos de onda (altas frequências), criou um impasse na Física do final do século XIX. Havia alguma inconsistência básica nos seus princípios; fato grave, pois provavelmente as fundações teriam que ser revistas. Não seria, por exemplo, a propagação da energia eletromagnética radiante, pelo menos para as altas frequências, melhor representada se fosse reexaminada a imagem do transporte ondulatório ocupando continuamente todo o espaço?

O fracasso do modelo clássico ficou conhecido como “a catástrofe do ultravioleta”, por ser notável nas frequências altas (ultravioleta).

### “...UM ATO DE DESESPERO”

A solução para o impasse veio de onde menos se esperava: através de uma hipótese ousada, quase um sacrilégio para os cânones da Física vigente,

formulada pela primeira vez ao longo de uma palestra proferida a 14 de dezembro de 1900 por Planck, um cientista pouco afeito a grandes mudanças e rupturas, como se pode depreender do rápido perfil biográfico já apresentado.

Seu teor é o seguinte:

“Qualquer entidade física cuja “coordenada” executa oscilações harmônicas simples (campos elétricos e magnéticos senoidais – radiação – p.ex.) possui somente energias cujos valores são múltiplos inteiros da quantidade  $h\nu$ , onde  $h$  é uma constante universal e  $\nu$  é a frequência da oscilação”

Ou seja: os valores “permitidos” da energia  $E$ , para cada frequência  $\nu$ , são expressos por:

$$E = nh\nu, \text{ com } n = 1, 2, 3, \dots$$

Assim, por exemplo, o valor de energia  $E = \frac{3}{2}h\nu$  é proibido.

Onde está a ousadia? Exatamente no fato da energia da oscilação possuir somente valores discretos (“quantum”), ao contrário do que estabelecia o eletromagnetismo clássico segundo o qual os valores de energia apresentam uma gama contínua de valores. Tal distinção é ilustrada na figura 3.



Fig. 3 – Diagrama dos níveis de energia de um oscilador simples (à esquerda) e de um oscilador simples que obedece a hipótese de Planck (à direita).  
Fonte: Eisberg (1979)

A introdução da hipótese quântica no desenvolvimento teórico (basicamente a substituição de uma integral por um somatório no cálculo da energia média), cujos detalhes não serão aqui apresentados, resultam na seguinte expressão para  $\rho_T(\lambda)$ :

$$\rho_T(\lambda) \approx \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT} - 1}$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação das oscilações eletromagnéticas no vácuo (uma

constante). Esta expressão também satisfaz a Lei de Wien, com.  $f(\lambda, T) \propto \frac{8\pi^5 hc^2}{15} \frac{1}{\lambda^5} e^{-hc/\lambda kT}$

A impressionante confirmação da radiação de Planck com dados experimentais, para  $T = 1646\text{ K}$  (na verdade, para qualquer temperatura), é esquematizada na figura 4. O ajuste dos pontos com a curva teórica permite determinar o valor da constante  $h$ , que passaria, a partir daí, a desempenhar um papel fundamental no desenvolvimento subsequente da teoria quântica.

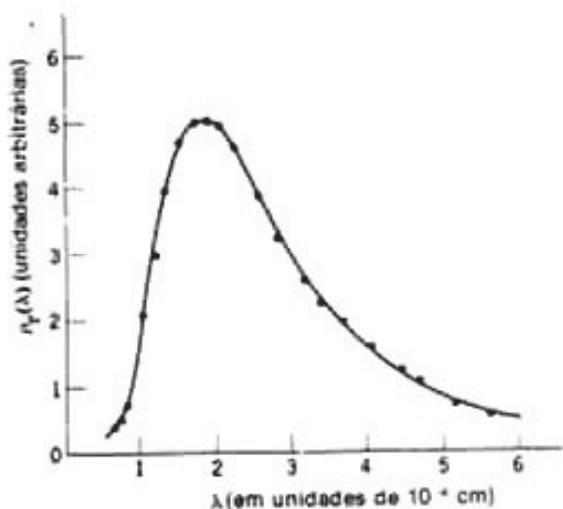


Figura 4 – Comparação do espectro de Planck com dados experimentais. A curva representa o resultado teórico e os pontos os resultados experimentais para  $T = 1646\text{ K}$   
Fonte: Eisberg (1979)

Ao formular sua hipótese, Planck abria uma pequena fresta para um mundo que nem ele imaginava tão revolucionário. Na verdade, seu objetivo não era revolucionar, embora tenha compreendido que a lei de radiação recém-descoberta continha informações novas sobre os princípios básicos da Física. Nos meses que se seguiram ao anúncio, Planck procurou com denodo deduzir sua fórmula a partir da Física vigente, recusando-se a considerá-la como a semente de uma concepção inteiramente nova e que iria, alguns anos mais tarde e nas mãos de outros cientistas, desencadear a maior revolução nos princípios básicos daquela ciência desde Galileu.

Tais tentativas obsessivas culminaram com sua

interpretação, baseada em princípios estatísticos devidos a Boltzmann, da segunda lei da Termodinâmica, que, segundo ele, conduziria a um resultado equivalente à sua hipótese. Em uma carta escrita aproximadamente um ano após o seu anúncio, Planck sintetiza a situação[2]:

“... todo o procedimento foi um ‘ato de desespero’ porque uma interpretação teórica teria que ser encontrada, não importando quão alto fosse o preço”

Tal atitude talvez tenha contribuído para a relutância da comunidade científica em aceitar com rapidez as concepções novas que a hipótese trazia consigo.

## CONCLUSÃO

Apesar de Planck ter formulado a lei da radiação, com características absolutamente inovadoras, seu papel no desenvolvimento subsequente da Física quântica foi irrelevante, pois sua grande busca, na verdade, era enquadrar o sacrilégio nos cânones.

Coube inicialmente a Einstein, em 1905, compreender o caráter fundamental dos quanta de energia e estabelecer resultados até então inexplicáveis dentro do conteúdo da Física, como o efeito foto-elétrico, trabalho que lhe valeu o Prêmio Nobel de Física em 1921. Einstein foi o primeiro a compreender que o caráter descontínuo da luz (radiação) constituía um fato fundamental cuja explicação não se encontrava dentro do esquema clássico.

Durante o período de 30 de outubro a 3 de novembro de 1911, reuniram-se em Bruxelas, sob os auspícios do riquíssimo industrial Belga Ernest Solvay, os maiores nomes (cerca de vinte) da Física da época, a fim de discutir os aspectos revolucionários que estavam influenciando os seus pilares fundamentais. Quase a totalidade já havia sido agraciada com o Prêmio Nobel e outros iriam recebê-lo nos anos seguintes. O mais jovem era Einstein, que contava com 32 anos. Numa de suas cartas relatando suas impressões sob o congresso, declara, sobre Planck [6]:

“Consegui convencer Planck a admitir um bom número de minhas idéias por ele repelidas há anos. Trata-se de um homem dotado de uma honestidade inata e que pensa nos outros antes de pensar em si próprio.”

As idéias às quais Einstein se referia tiveram inspiração na hipótese da radiação de Planck.

#### Referências Bibliográficas

1. BOLTZMANN, L. Acerca da Mecânica Estatística. Palestra proferida por Boltzmann no Congresso de Ciências de St Louis, EUA., em 1904. Trad. por Sílvio R. Dahmen, do Instituto de Física, UFRGS, na Revista Brasileira de Ensino de Física, V. 28, no. 3, jul-set. 2006.
2. DAMOUR, T. Si Einstein M'Etait Conté., Paris, Le Cherche Midi, 2005.
3. EISBERG, R.M. Fundamentos da Física Moderna, Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1979.
4. O'CONNOR, J.J.; ROBERTSON, E.F. Max Karl Ernst Ludwig Planck. 18/01/2007. Disponível em: <<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Planck.html>>
5. SELLERI, F. Le Grand Débat Sur La Théorie Quantique. Paris, Flammarion, 1986.
6. VON NEUMANN, J. Collected Works, vol VI, Pergamon, Oxford, 1979.



### Centro de Análises de Sistemas Navais



O Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV), criado em 1975, é uma organização militar da Marinha do Brasil (MB) subordinada ao Estado-Maior da Armada e integrante do Sistema de Ciência e Tecnologia da Marinha. Tem como propósito contribuir para o aprimoramento do processo decisório e do emprego de meios e sistemas da MB. Para tanto, faz extenso uso da Pesquisa Operacional, da Análise de Sistemas, da Engenharia de Sistemas, da Informática, da Estatística e das tecnologias que asseveram segurança à informação, tais como a Criptologia.

Dentre os diversos projetos desenvolvidos pelo CASNAV, destacam-se: a Avaliação Operacional de Meios Navais, Aeronavais e de Fuzileiros Navais; o Sistema Simulador de Guerra Naval - SSGN; o Sistema de Informações sobre o Tráfego Marítimo - SISTRAM; o Sistema de Planejamento Operacional Militar - SIPLOM; Sistemas de Gerenciamento Eletrônico de Documentos e Sistemas Criptográficos.

O CASNAV tem como seus principais clientes na MB: o EMA, o ComOpNav, a EGN, a CAdM, a DTM e o COMCONTRAM. Dos clientes extra-MB, destacam-se: o Ministério da Defesa, o Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República e o Instituto Nacional de Tecnologia da Informação.

---

#### Centro de Excelência e Gestão Empreendedora

---

A obtenção da certificação ISO 9001: versão 2000 nos seus processos finalísticos, e o reconhecimento na Faixa Bronze do Prêmio Nacional de Gestão Pública, têm demonstrado a qualidade dos seus serviços e produtos. A manutenção de um índice de satisfação dos clientes superior a 90% nos últimos dois anos, corrobora nosso esforço pela qualidade.

---

#### Contatos

---

Praça Barão de Ladário s/n - Ilha das Cobras - Ed. 8 do AMRJ - 3o andar - Centro - Rio de Janeiro - RJ CEP 20091-000  
Tel: (21) 2178-6386 (Divisão de Relacionamento com o Cliente)  
Fax: (21) 2178-6332  
e-mail: [info@casnav.mar.mil.br](mailto:info@casnav.mar.mil.br)  
internet: [www.casnav.mar.mil.br](http://www.casnav.mar.mil.br)