

# ELABORAÇÃO DA PRODUÇÃO DIDÁTICA-PEDAGÓGICA

“Fundamentos de Física Quântica”

**“Salto Quântico e a constante de Planck”**

PROFESSOR: SALOMÃO JANUARIO PEREIRA  
ORIENTADOR: REGINALDO A. ZARA (UNIOESTE)  
DISCIPLINA: FÍSICA  
COLÉGIO ESTADUAL WILSON JOFFRE

## **A Siderurgia do século XIX e o Nascimento da Física Quântica**

Em muitos casos evolução científica e tecnológica decorre das necessidades ou dos problemas específicos enfrentados pela Sociedade. Não são raros os casos nos quais avanços tecnológicos importantes, alcançados pela solução de problemas práticos, alavancaram o desenvolvimento de novos modelos ou mesmo avanços teóricos importantes. A física quântica deve muito à Revolução Industrial que demandava a indústria siderúrgica que por sua vez usava conhecimentos termodinâmicos para a produção de ferro e aço de qualidade.

Na segunda metade do século XIX explicações teóricas para o problema da emissão de radiação térmica de objetos aquecidos estavam sendo propostas por diversos pesquisadores. Destacaram-se os trabalhos de Stewart e Kirchhoff que estabeleciam que a razão entre o poder de emissão e o poder de absorção de um corpo é uma função do comprimento de onda da radiação ( $\lambda$ ) emitida ou absorvida (ou, de maneira equivalente, da frequência  $f$ ) e de sua temperatura absoluta  $T$ , representada por uma função  $I(\lambda, T)$ . O problema consistia em encontrar a forma matemática exata da função  $I(\lambda, T)$ .

Este tipo de problema despertava interesse devido a problemas reais enfrentados pela indústria siderúrgica da época. Em meados do século XIX havia muito interesse pelo o estudo da radiação emitida por corpos aquecidos visto que o mundo vivia a primeira revolução em termos tecnológicos, ou seja, a revolução industrial que estava em pleno vapor. Toda maquinaria estava sendo construída em aço, havia necessidade da produção de aço de boa qualidade. Para produzir aço assim, o controle de temperatura nos altos-fornos devia ser preciso e o problema enfrentado pelas siderúrgicas era medir as altas temperaturas envolvidas da fundição dos minérios.

A emissão de energia de um corpo está relacionada à sua temperatura, denominada “Radiação Térmica”. Era conhecido experimentalmente que essa radiação pode ser medida por uma ampla faixa do espectro eletromagnético, composta por comprimentos de onda distribuídos de forma contínua. A partir de observações empíricas sabia-se que à medida que a temperatura de um corpo aumenta, aumenta também a intensidade da radiação térmica emitida, o qual cresce rapidamente e que, quanto maior for à temperatura, menor será o comprimento de onda da parte mais intensa do espectro de radiação. Com isso, a solução proposta através das pesquisas foi feita no sentido de determinar as temperaturas usando as cores das radiações térmicas, ou seja, as luzes emitidas pelos altos-fornos às diversas

temperaturas. Depois de analisarem essas luzes por prismas e medindo a intensidade de cada parte espectral, foram obtidas as curvas empíricas de radiação, como mostra a figura 1.

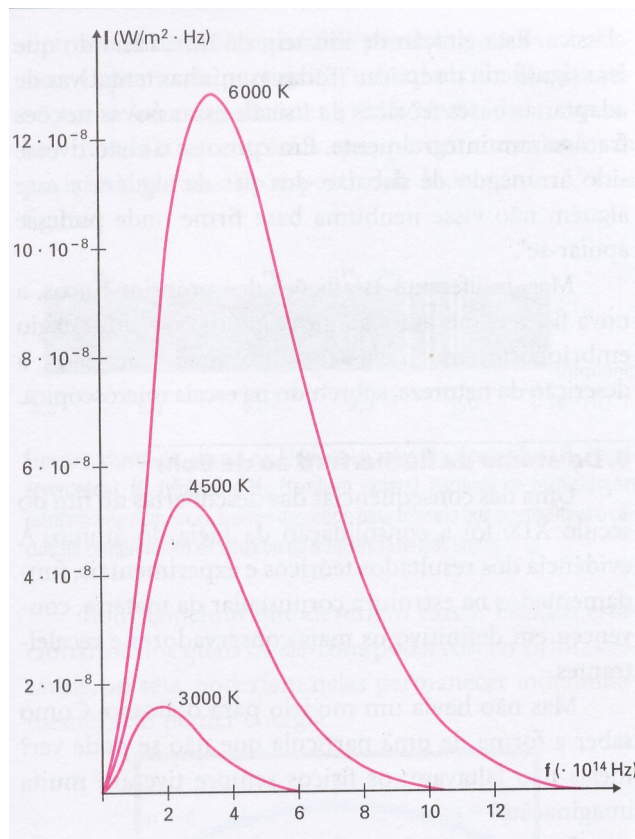


Figura 1. Curvas obtidas com dados obtidos nos fornos.

No entanto restavam dúvidas se as propriedades de emissão e absorção dependiam, em termos quantitativos, de outros fatores como o material do que é feito o corpo, a forma e a rugosidade do corpo. O problema teórico era encontrar a função  $I(\lambda, T)$  que descreve os dados experimentais e que pudesse ser usada para fazer previsões sobre sua dependência de outros fatores.

Para investigar teoricamente os detalhes da função  $I(\lambda, T)$ , Kirchhoff introduziu o conceito de corpo negro ou o radiador ideal, definindo-o como um corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele.

Para o estudo da emissão térmica de um corpo negro ideal pode-se usar uma aproximação experimental, como o modelo mostrado na figura 2, no qual se mostra uma pequena cavidade com um pequeno orifício por onde a radiação externa entra e depois fica presa sofrendo apenas reflexões e absorções internas.

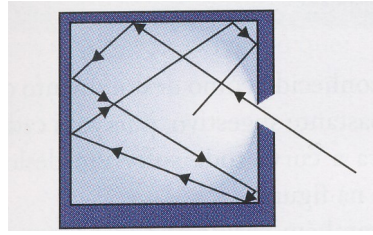


Figura 2. Representação da aproximação experimental de um corpo negro ideal: uma cavidade com orifício.

Considerando o orifício muito pequeno é muito difícil que a radiação escape da cavidade uma vez que não atravessa as paredes. Este modelo de corpo negro se comporta como uma “armadilha” que aprisiona a radiação, sendo um excelente “truque” prático para absorver 100% da radiação. Na prática uma fonte qualquer de calor pode ser colocada dentro da cavidade do corpo negro e isso é de garantia que a radiação a ser absorvida se encontra dentro da cavidade, o que melhora ainda mais a aproximação de um corpo negro ideal. Embora o termo “negro” tenha sido sugerido inicialmente, essa cavidade não precisa ser negra necessariamente, pois um corpo negro pode ter qualquer cor, desde que se encaixe na definição de absorvedor e emissor ideal.

A figura 3 mostra o gráfico feito com dados da radiação e a temperatura de duas cavidades (uma que está a 1000 K e outra a 1250 K).

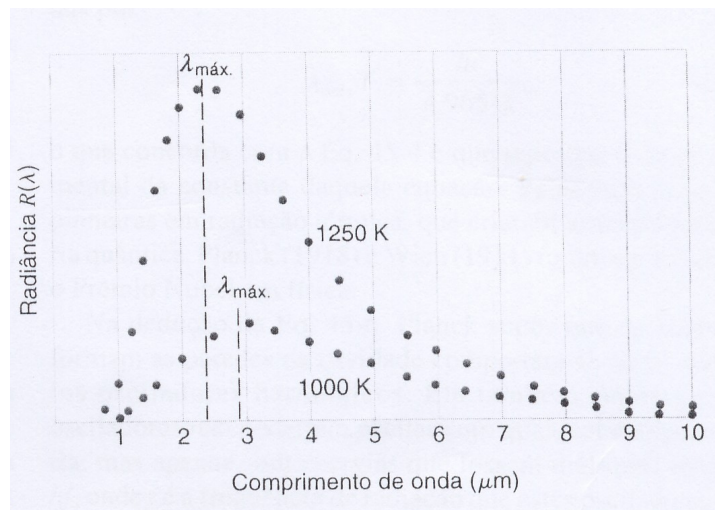


Figura 3. Radiação emitida por um corpo aquecido como função do comprimento de onda para duas temperaturas distintas. O pico de emissão máxima,  $\lambda_{\text{máx}}$ , desloca-se para comprimentos de onda menores à medida que a temperatura aumenta.

A partir da introdução do conceito de corpo negro analogias entre a radiação de cavidade (radiação em caixa) e estados térmicos relacionados com um gás ideal (matéria em

uma caixa) levaram a grandes avanços na descrição da emissão de radiação. O cálculo clássico da radiação considerava que a radiação eletromagnética resulta do movimento acelerado dos elétrons (que oscilam harmonicamente em torno do núcleo dos átomos), prevista pela teoria eletromagnética de Maxwell e que as ondas eletromagnéticas no interior da caixa são ondas estacionárias. A energia média ( $\bar{E}$ ) destas ondas, no equilíbrio térmico, é encontrada com base na teoria cinética dos gases, usando o teorema de equipartição de energia ( $\bar{E} = k_B \cdot T$ , onde  $k_B$  é a constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura absoluta). Com isso aspectos que antes eram apenas qualitativos foram traduzidos em expressões matemáticas quantitativas, culminando com o cálculo da intensidade radiante  $I(T)$  que é a potência total irradiada em todos os comprimentos de onda por unidade de área superficial da radiação de cavidade:

$$I(T) = \sigma T^4$$

Onde  $T$  é a temperatura em Kelvin e  $\sigma$  é uma constante de proporcionalidade. A equação acima, encontrada de forma independente e com a utilização de diferentes métodos teóricos, por Josef Stefan e Ludwig Boltzmann ficou conhecida com lei de Stefan-Boltzmann, com a constante de proporcionalidade  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W / (m^2 K^4)$ .

Outra observação qualitativa que se tornou quantitativa através do trabalho de Wien é que o produto entre comprimento de onda da radiação de maior intensidade ( $\lambda_{\max}$ ) e a temperatura da cavidade ( $T$ ) é uma constante, cujo valor é bem definido, ou seja,  $\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \mu m \cdot K$ .

Esta observação de Wilhelm Wien, que a partir de princípios da termodinâmica, também chamada lei de deslocamento de Wien. Esta lei evidencia que quanto maior for a temperatura menor será o comprimento de onda na qual a radiação é mais intensa. No dia-a-dia isso é verificado quando se aquece uma barra de ferro: inicialmente ela não emite luz visível, mas invisível (infravermelho), depois de certo tempo começa a brilhar em um vermelho-escuro e, à medida que a temperatura aumenta a sua cor se desloca para comprimentos de ondas menores e ela brilha com a cor amarelo-alaranjada. A lei de Wien também pode ser aplicada na determinação da temperatura superficial das estrelas. Estrelas vermelhas (de maior comprimento de onda) possuem temperaturas mais baixas que as estrelas azuis (de menor comprimento de onda).

Embora as previsões teóricas concordassem bem com os dados experimentais em um regime de baixa frequência, para as regiões do espectro eletromagnético de grandes frequências (ultravioleta), a teoria diverge do resultado experimental. Como a teoria representava bem a parte do espectro de baixa frequência, mas falhava ao descrever regiões de alta frequência, a discordância entre a teoria e o experimento ficou conhecida como “catástrofe do ultravioleta”.

Ao comparar os resultados Planck verificou que, para baixas frequências a energia das ondas coincide com a previsão clássica, mas, para altas frequências esta energia deveria diminuir, ou seja, de alguma maneira esta energia deveria depender da frequência das ondas.

Inicialmente, considere as palavras de Planck:

*“As medidas espectrais recentes realizadas por O. Lummer e E. Pringsheim [1] e aquelas, ainda mais notáveis, de H. Rubens e F. Kurlbaum [2], confirmam ambas um resultado estabelecido anteriormente por H. Beckmann [3]. Elas mostram que a lei da distribuição de energia no espectro normal, inicialmente estabelecida por W. Wien a partir de considerações de cinética molecular - e deduzida, em seguida, por mim mesmo, a partir da teoria da radiação eletromagnética -, não tem validade universal.*

*Em cada um desses casos, a teoria necessita de uma correção. Tentarei, no que se segue fazer isto, baseando-me na teoria da radiação eletromagnética que eu mesmo desenvolvi. Será necessário indicar, então, na seqüência de raciocínios que conduzem à lei da distribuição de energia de Wien, o argumento a ser modificado; este argumento deverá ser então abandonado e substituído de forma apropriada”.*

Estas palavras mostram que Planck dispunha de dados experimentais precisos sobre a emissão de radiação de corpos aquecidos e também acompanhava o desenvolvimento de modelos teóricos que buscavam explicar as observações experimentais, com o estabelecimento de um modelo matemático que se ajustasse à curva empírica da radiação térmica. Planck argumenta que a função elaborada por Wien não representava o gráfico da curva empírica e que ele terá que tomar outro caminho para chegar à função que se assemelha corretamente.

Na época os modelos teóricos consideravam que a radiação térmica emitida por um corpo decorria da vibração de osciladores moleculares e que a intensidade da radiação dependia do número destes osciladores. Estes osciladores moleculares seriam análogos a osciladores mecânicos sendo suas energias determinadas pelas grandezas físicas relevantes do sistema. Considere o sistema oscilante como descrito a seguir.

Um oscilador harmônico é qualquer sistema que apresenta um movimento harmônico de oscilação. É dito oscilador pelo fato de alguma entidade física oscilar entre valores bem definidos, e harmônico por ser o seu movimento caracterizado e descrito por uma função harmônica do tempo, sendo possível mensurar tempo, período e frequência do sistema em estudo. Um exemplo simples de um oscilador harmônico é corpo de massa  $m$  preso a uma mola de constante elástica  $k$ , sobre uma superfície horizontal sem atrito como mostrado na figura 4 abaixo. Considerando a origem na posição de equilíbrio (ponto O) o corpo se movimenta-se ao longo do eixo  $x$  se uma força  $\vec{F}$  é aplicada.

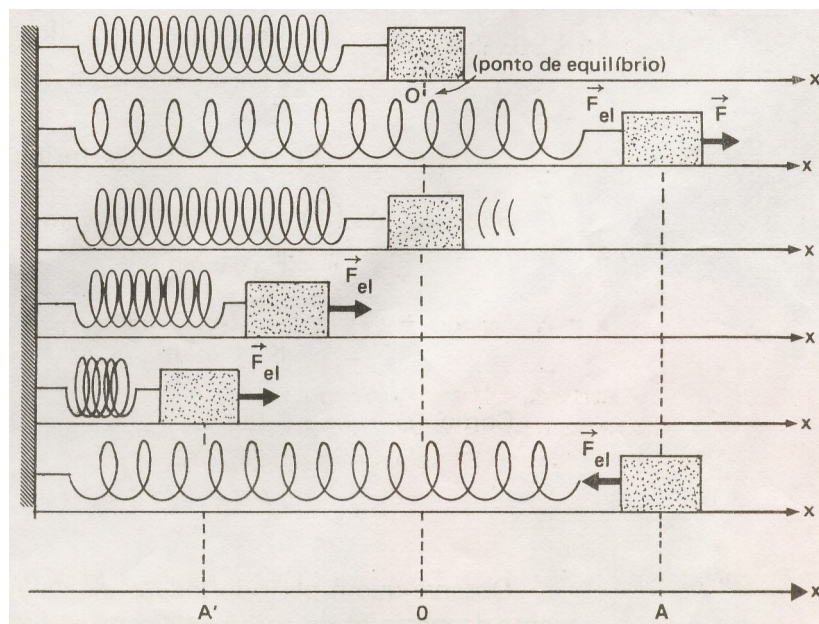


Figura 4. Movimento Harmônico simples em em sistema massa-mola.

Quando o corpo é liberado, partindo da posição de mola estendida a força elástica hookeana ( $\vec{F}_{el} = -k \cdot \vec{x}$ ) age como força restauradora e produz uma aceleração para a esquerda. A medida que o corpo retorna para sua posição de equilíbrio, a força elástica é cada vez menor e, portanto, a aceleração diminui. Quando corpo chega à posição de equilíbrio, a força e a aceleração são nulas. Entretanto, o corpo adquiriu a sua velocidade máxima nesse ponto e continua em movimento, comprimindo a mola. Neste caso a força restauradora que atua sobre corpo aponta para a direita, desacelerando-o até parar, a partir desse ponto o corpo é acelerado outra vez para direita, por causa da força elástica. Em consequencia da força restauradora exercida pela mola, o corpo realiza um movimento de oscilação em torno do ponto de equilíbrio O.

Os valores da posição  $x$  e da velocidade  $v$  e da aceleração do corpo sobre o eixo  $x$  podem ser determinadas, para qualquer instante de tempo  $t$ , pelas equações:

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)$$

$$v(t) = \omega \cdot A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi)$$

$$a(t) = \omega^2 \cdot A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi) = \omega^2 \cdot x(t)$$

onde  $\phi$  é um ângulo de fase e  $\omega^2 = \frac{k}{m}$  é a frequência angular das oscilações.

Como tanto a posição quanto velocidade do corpo varia, as energias potencial e cinética devem variar, porém mantendo a energia mecânica total constante, e assim

$$E_p + E_c = E$$

$$\frac{1}{2}k \cdot x^2 + \frac{1}{2}m \cdot v^2 = E$$

Substituindo as equações para posição e velocidade e lembrando que  $\omega^2 = \frac{k}{m}$  e

$(\cos(\omega \cdot t + \phi))^2 + (\text{sen}(\omega \cdot t + \phi))^2 = 1$ , obtém-se que a energia total do oscilador é dada por

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot A^2 \cdot \omega^2,$$

Ou seja, para  $m$  e  $A$  fixos, a energia total depende da frequência da oscilação.

Da mesma forma, como a energia total é dada por

$$\frac{1}{2}k \cdot x^2 + \frac{1}{2}m \cdot v^2 = E,$$

Usando  $\omega^2 = \frac{k}{m}$  pode-se escrever

$$(m \cdot \omega)^2 \cdot x^2 + p^2 = 2 \cdot m \cdot E$$

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{p^2}{(2 \cdot m \cdot E)} = 1$$

Onde  $p = m \cdot v$  é a quantidade de movimento.



A equação acima fornece a equação da trajetória no chamado “espaço de fases”, mostrando o oscilador em uma perspectiva diferente. Ao representar em um gráfico a quantidade de movimento no eixo vertical, e a posição do móvel  $x$  no eixo horizontal obtêm-se trajetórias elípticas determinadas pelo valor da energia total  $E$ . Como a energia do oscilador é contínua existem infinitas trajetórias.

Para desenvolver a teoria das radiações térmicas admitia-se que os átomos nas paredes da cavidade (equivalente ao corpo negro ideal), oscilam em movimento harmônico simples, em torno de uma posição de equilíbrio. Segundo a teoria eletromagnética as cargas elétricas destes átomos, deveriam emitir radiação eletromagnética devido à aceleração, como se fosse antenas transmissoras. Como a aceleração é contínua, a energia emitida também deveria ser contínua.

No entanto, segundo Planck, o argumento apresentado acima (emissão contínua de energia) “ (...)deverá ser então abandonado e substituído de forma apropriada”. Planck deu um grande salto intuitivo, abandonando o conceito de emissão contínua de energia e propondo sua substituição. Na proposta de Planck:

- A energia do oscilador é linearmente proporcional à sua frequência e pode assumir somente certos valores discretos  $E_n$  dados por

$$E_n = n \cdot h \cdot f$$

onde  $n$  assume apenas valores inteiros ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $h$  é uma constante de proporcionalidade (mais tarde ficou conhecida como constante de Planck) e  $f$  é a frequência do oscilador. Hoje  $n$  é chamado de número quântico e diz-se que a energia é quantizada.

- Os osciladores emitem ou absorvem energia realizando transições de um estado quântico para outro, ou seja absorve ou emite uma quantidade mínima de energia  $E = h \cdot f$ .

A figura 5 abaixo ilustra a diferença entre a distribuição clássica de energia e a proposta de Planck, mais tarde chamada de distribuição quântica de energia. Enquanto na distribuição clássica um sistema pode emitir ou receber qualquer valor de energia, na distribuição quântica a energia muda em saltos ou níveis e valores intermediários entre dois níveis adjacentes “vizinhos” não podem ocorrer.

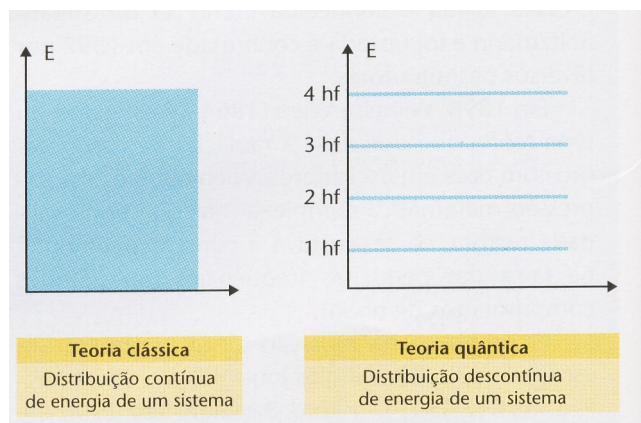


Figura 5. Comparação entre as distribuições contínua e discreta de energia.

Aplicando as idéias de *osciladores quânticos* Planck conseguiu obter uma função que concorda extraordinariamente bem com os dados experimentais para as curvas emissão de radiação e que contém, como casos particulares, todos os resultados obtidos anteriormente por outros pesquisadores como as leis de Wien e Stefan. Na figura 6 pode-se observar o gráfico da função de Planck com os dados empíricos obtidos anteriormente. Percebe-se que a curva teórica ajusta-se com perfeição aos dados medidos.

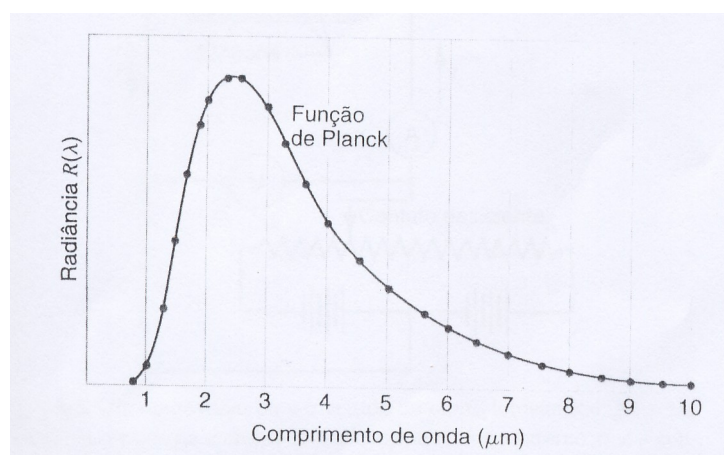


Figura 6. Comparação entre os dados da radiação emitida por um corpo negro com a função proposta por Planck.

A idéia dos osciladores quânticos introduzida por Planck foi, inicialmente, um artifício para facilitar a efetuação cálculos matemáticos mais elaborados. Porém, apesar de resolver o problema da radiação emitido por um corpo negro, estando de acordo com os dados experimentais disponíveis, as hipóteses de Planck contrariava as Leis de Newton a e Teoria Eletromagnética de Maxwell, as quais não faziam nenhum tipo de restrição à energia da radiação. A hipótese de que os átomos que formam as paredes da cavidade comportam-se

como minúsculos *osciladores harmônicos* e também que esses osciladores não poderiam oscilar com qualquer energia, mas apenas com energias quantificadas foi uma atitude brilhante e desesperadora” como admitiu mais tarde o próprio Marx Planck. Disse ele “(...) *em poucas palavras, eu posso caracterizar todo o procedimento como um ato de desespero, desde que, por natureza, eu sou sossegado e contrário a aventuras duvidosas. (...) eu conhecia a fórmula que descrevia a distribuição de energia no espectro normal [isto é, de um corpo negro]; portanto, uma interpretação teórica tinha de ser fornecida a todo custo, qualquer que fosse o preço, por mais alto que ele fosse*”. O preço pago por Planck foi a quantização da energia, um conceito revolucionário, primeiramente reconhecido por Einstein ao utilizar a noção de quantização em uma teoria sobre a estrutura da luz, como a introdução do conceito do fóton como “pacotes de luz” e a explicação teórica do efeito foto-elétrico.

## **Determinação experimental da constante de Planck através de um experimento simples**

### **Introdução**

Nesta seção apresenta-se um experimento simples para a determinação experimental da constante de Planck, cuja proposta é apresentada por “R.C. Tavolaro, Cristiane; Almeida Cavalcante, Marisa. **Física moderna experimental**. - Barueri. SP. Editora Manole. (2003) 1º Edição”. Para isto será usado um arranjo experimental cujo esquema elétrico é mostrado na Figura 8.

### **Fundamentação Teórica**

Inicialmente efetua-se uma revisão acerca dos fundamentos teóricos que permitem determinar a constante de Planck utilizando um experimento simples montado com LEDS (diodo emissor de luz). Um LED é na verdade um diodo que, o qual pode ser atravessado por uma corrente elétrica em apenas um sentido. A figura 7 ilustra seu funcionamento: ao receber uma dada quantidade de energia potencial elétrica ( $e \cdot V$ ) o elétron salta da banda de valência para a banda de condução e ao retornar ao seu estado inicial, emite radiação cuja energia ( $h \cdot f$ ) deve ser no mínimo igual à energia recebida, ou seja, o LED só acende quando a energia fornecida aos elétrons de sua banda de valência for pelo menos igual à diferença de

energia entre sua banda de condução e de valência. Por princípios de conservação a energia recebida será igual à energia emitida pelo LED em forma de radiação eletromagnética. Sendo  $e \cdot V$  (energia fornecida pelo circuito) é igual a  $h \cdot f$  (energia do fóton emitido), então:

$$e \cdot V = h \cdot f$$

Isolando  $h$  na equação acima obtém-se

$$h = \frac{e \cdot V}{f}$$

Onde  $h$  é a constante de Planck,  $e$  é a carga elétrica elementar,  $V$  é a tensão elétrica nos terminais do LED e  $f$  é a frequência de radiação emitida pelo LED.

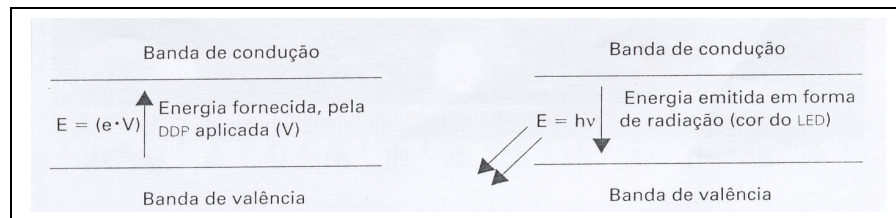


Figura 7. Diagrama de transição ilustrando a emissão de energia, princípio de funcionamento de um led.

Desta forma, determinando a tensão mínima necessária para acender o LED e conhecendo-se a frequência ou comprimento de onda da radiação emitida pode-se determinar o valor da constante de Planck. Assim, coletando dados experimentais e analisando-os em conjunto com o modelo matemático de Planck determina-se experimentalmente o valor da constante, mesmo que de maneira indireta.

#### **Materiais necessários:**

- 3 chaves liga-desliga
- 2 leds vermelhos
- 2 leds verdes
- Potenciômetro 500Ω
- 1 voltímetro
- 2 pequenas pilhas de 1,5V associadas em série
- Fios de ligação
- 1 suporte para duas pilhas AA

Com estes materiais foi montado um aparato representado no diagrama abaixo, conforme [Tavolaro, 2003]. O conjunto foi montado em uma caixa para tornar as conexões com instrumentos de medida mais simples e os controles de ajuste mais práticos. A parte frontal desta caixa pode ser vista na Figura 9.

Duas pilhas de 1,5 V associadas em série, fornecem tensão de 3,0V. Um potenciômetro de 500 ohms em paralelo permite variar a tensão que deve ser aplicada nos Leds vermelho (A) e verde (B) (associado em paralelo). A leitura dessa tensão é realizada a partir de um voltímetro. No esquema nota-se também dois leds, vermelho (C) e verde (D), acrescentados ao esquema para possibilitar uma leitura isolada de cada led. Assim, caso se tenha interesse, pode ser feito um estudo mais detalhado da curva característica de cada led (tensão versus corrente). Para isso liga-se um led de cada vez e introduz - se um amperímetro em série no circuito (no espaço entre o Led e o fio ligado ao terminal do potenciômetro).

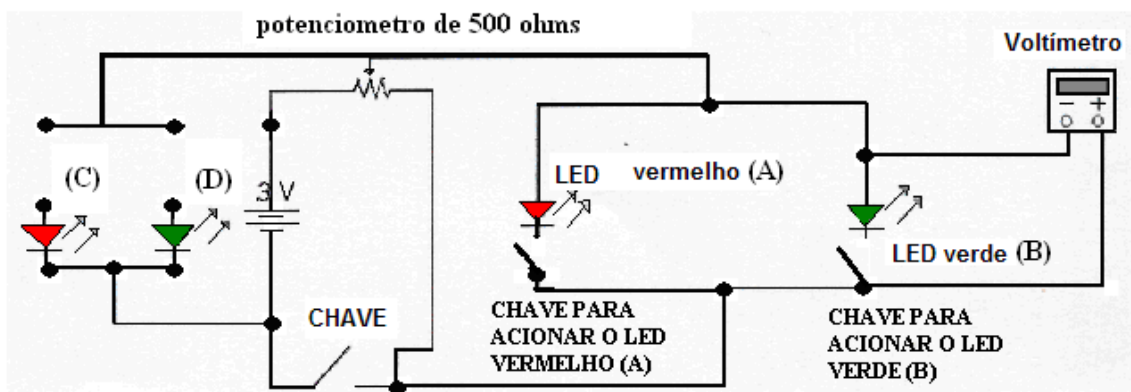


Figura 8. Diagrama elétrico para o experimento de determinação experimental da constante de Planck.

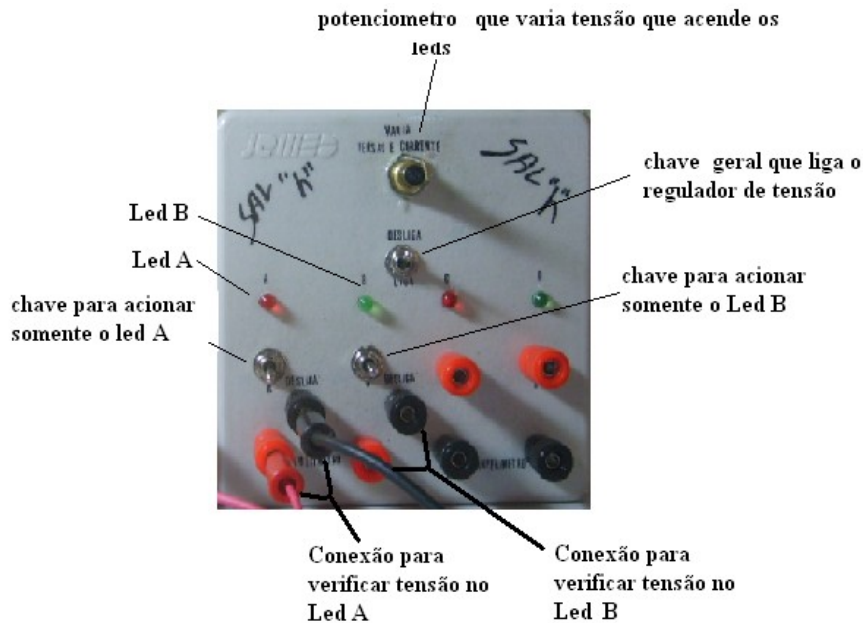


Figura 9. Parte frontal da caixa que contém o aparato experimental. Podem ser vistos o regulador de tensão, os leds, os interruptores e as entradas para conexões dos instrumentos de medida.

Na sua forma mais simples, o experimento consiste em:

- Com a chave A fechada (acendimento do led vermelho) aumentar gradativamente a tensão, através do ajuste do potenciômetro e verificar, com a ajuda do multímetro, a tensão mínima para o qual o led acende.
- Usar este valor de tensão, juntamente com o comprimento de onda da luz emitida, para estimar o valor da constante de Planck.

<p>Voltímetro e o aparato que regula a tensão para acendimento do leds A e B</p>	<p>Tensão limiar para acender o led vermelho (A)</p>

O mesmo procedimento é repetido para o led de cor verde. Os resultados medidos são mostrados abaixo.

Led (cor e modelo)	Tensão necessária para acender o led (volts)
Vermelho transparente - 660nm - modelo: BL-B6341	1,755
Verde transparente - 570nm - modelo: BL-B2341	1,800

Conhecendo estes valores pode-se estimar o valor de  $h$  através da equação

$$h = \frac{e \cdot V}{f}$$

Onde  $h$  é a constante de Planck,  $e$  é a carga elétrica elementar,  $V$  é a tensão elétrica nos terminais do LED e  $f$  é a frequência de radiação emitida pelo LED. A carga elementar é conhecida,  $e = 1,6 \times 10^{-19} C$  e a frequência de emissão dos leds é fornecida pelo distribuidor. Neste experimento, são conhecidos os comprimentos de onda da radiação emitida pelo led vermelho ( $\lambda = 660nm$ ) e pelo led verde ( $\lambda = 570nm$ ). Com isso, a frequência pode ser calculada através da relação  $c = \lambda \cdot f$ , onde  $c = 3,0 \times 10^8 m/s$  é a velocidade da luz emitida. Os resultados obtidos são mostrados abaixo:

Led (cor e modelo)	Tensão necessária para acender o led (volts)	Valor estimado de $he (J \cdot s)$
Vermelho transparente - 660nm - modelo: BL-B6341	1,755	$6,18 \cdot 10^{-34}$
Verde transparente - 570nm - modelo: BL-B2341	1,800	$5,47 \cdot 10^{-34}$

Usando o valor  $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$  aceito atualmente para a constante de Planck, pode-se estimar o desvio percentual em relação ao valor estimado  $he$ :

$$e\% = \frac{h - he}{h} \times 100$$

E obtem-se desvios de 6,64% para a estimativa usando o led de emissão de cor vermelha e

17,3% para o de cor verde.

Considerando que o experimento é bastante simplificado e a decisão sobre o acendimento baseia-se em informação apenas visual os desvios percentuais são pequenos. No entanto, o experimento pode ser enriquecido através de uma estimativa mais precisa da tensão limiar de acendimento. Para isto pode-se associar um amperímetro ao experimento, construir a curva característica do led e estimar a tensão de limiar através de um processo de extrapolação. No entanto os resultados apresentado acima sugerem que, para fins didáticos, a decisão visual pode ser utilizada com boa aproximação.

Em resumo, o experimento simplificado descrito aqui:

- É um bom experimento para a 3<sup>o</sup> série do ensino médio, os princípios teóricos e práticos sobre física quântica podem ser introduzidos. Os alunos podem aprender a confeccionar placas de circuitos eletro-eletrônicos e realizar experimentos básicos de física moderna.
- Os resultados podem ter uma precisão maior em comparação ao valor da constante de Planck, desde que se possa saber qual é o valor real do comprimento de onda de cada um dos leds. Para isto, experimentos para determinação experimental do comprimento de onda da luz emitida podem ser introduzidos.
- Pode-se se executar este experimento com outros leds, com diferentes cores (azul, alaranjado, etc.).
- O experimento pode ser enriquecido com a determinação precisa dos limiares de tensão, através da construção das curvas características dos leds. Neste ponto os estudantes podem ser introduzidos a alguns métodos de extrapolação matemática.



## Referências Bibliográficas

Serway, Raymond; W. Jewett, John. Tradução Koch Torres, André; Freire de Melo, Leonardo. **Princípios de Física**. In: \_\_\_\_ *Física quântica*. Cap28. Pág 1094-1135. (2004) 3ª Edição. São Paulo. Editora Thomson.

Amaldi, Ugo. **Imagens da Física**. In \_\_\_\_ *Relatividade e os Quanta*. Cap1. Pág 398-411. (1995). São Paulo. Editora Scipione.

A FÍSICA NA ESCOLA. **Uma aula no Efeito fotoelétrico**. São Carlos, SP, nº 01. Vol. 3. Maio 2002. Pág 24-29.

A FÍSICA NA ESCOLA. **Os fundamentos da Luz Laser**. São Carlos, SP, nº 02. Vol. 2. Maio 2001. Pág 04-09.

Custódio Pinto, Alexandre; Leite, Cristina; Alves da Silva, José. **O nascimento da Física Quântica**. Projeto Escola e Cidadania. São Paulo. Editora do Brasil. (2000).

R.C. Tavoraro, Cristiane; Almeida Cavalcante, Marisa. **Física Moderna Experimental**. - Barueri. SP. Editora Manole. (2003) 1ª Edição.

Carlos Marques Silva, Luiz. . Física Moderna. Site “Sala de Física”. 2008.  
<http://br.geocities.com/saladefisica6/fisicamoderna/relatividade.htm>. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2008.

Gribbin, John. Tradução A.S Haddad, Tomás. **Fique por dentro da Física Moderna**. São Paulo. SP. Editora Cosac e Naify. Edições 2001.

Braz Júnior, Dulcídio. Andrade Martins, Roberto de. **Física Moderna, Tópicos para o ensino médio**. Editora companhia da Escola. Campinas -São Paulo. 1ª edição. 2002.

Martin Eisberg, Robert. Fundamentos da Física. **Radiação Térmica e a Origem da Teoria Quântica**. Capítulo 2. Pág 37-61. Editora Guanabara. 1979. Rio de Janeiro RJ.

A. Tipler, Paul. Física moderna. “A Quantização da Eletricidade, da luz e da Energia”. **Radiação de corpo negro**. Capítulo 3. Pág 85-89. Editora Guanabara dois S.A. 1981. Rio de Janeiro RJ.