

ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA MECÂNICA QUÂNTICA

Estácio Pimentel Ximenes Neto¹; Dagoberto da Silva Freitas²

1. Bolsista PROBIC/UEFS, Graduando em Bacharelado em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: estacio.pxn@gmail.com

2. Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: dfreitas@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: mecânica quântica; radiação do corpo negro; constante de Planck.

INTRODUÇÃO

Uma forma elementar de se discutir a mecânica quântica pode ser construída a partir do modelo atômico de Bohr.

Paralelamente ao estudo da natureza da matéria, no fim do século dezenove, a espectroscopia atômica havia avançado muito e se tinha determinado expressões empíricas para o que constitui as séries espectrais de alguns elementos químicos. Os detalhes da emissão luminosa envolvem transições eletrônicas de estados de maior energia para os de menor energia, no interior dos átomos. Esse processo de emissão pode ser compreendido em termos do modelo familiar planetário do átomo (modelo de Bohr).

Tomando como base os trabalhos de Planck (quantização da radiação do corpo negro, quanta de energia) e Einstein (quantização da luz, fóton) Bohr considerou que os elétrons ligados ao núcleo só poderiam se apresentar em determinados estados quantizados de energia. Com esse modelo, Bohr conseguiu deduzir teoricamente o espectro emitido pelo átomo de hidrogênio, o que deu grande crédito à sua teoria. Nos anos seguintes à teoria de Planck do corpo negro e ao modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, não apenas a natureza corpuscular da luz (fótons) foi confirmada experimentalmente, mas também o comportamento ondulatório de partículas materiais (ondas de matéria). Com as ondas de matéria de de Broglie, Schrödinger conseguiu formular uma equação que descrevesse a dinâmica das ondas de matéria, conhecida como equação de Schrödinger. Essa formulação da mecânica quântica revolucionou completamente o mundo microscópico. Nesta etapa, nosso objeto de estudo foi buscar compreender como se processa o fenômeno da radiação de corpo negro, buscando detalhar os caminhos percorridos na época por Planck, pois esses foram os primeiros passos do que hoje se denomina velha teoria quântica. Um corpo negro é um corpo ideal que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide. Por outro lado, quando se aquece, emite novamente radiação eletromagnética. Em equilíbrio térmico, a radiação emitida é igual a absorvida. Em trabalhos posteriores avançaremos para o modelo de Bohr indo até a formulação da equação de Schrödinger. A seguir detalhamos o processo experimental que usamos para determinar a constante de Planck, responsável pela quantização da energia.

METODOLOGIA

Considerando um corpo negro ideal, podemos expressar a energia emitida por unidade de tempo e de área, à temperatura T e comprimento de onda λ no intervalo $d\lambda$ pela equação de Planck

$$I_{CN}(\lambda)d\lambda = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{(e^{h\beta c/\lambda} - 1)} d\lambda, \quad (1)$$

Onde I_{CN} é a potência emitida pelo corpo negro, por unidade de área, por unidade de comprimento de onda, em um intervalo de onda $d\lambda$ em torno de λ , λ é o comprimento de onda (m), T é a temperatura (K), K_B é a constante de Boltzmann, $1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K, β vale $1/K_B T$, h é a constante de Planck, $6,62606876 \cdot 10^{-34}$ J.s e c é a velocidade da luz, $299.792.458$ m/s.

Integrando a Eq. 1 em relação a λ , para todos os possíveis comprimentos de onda, se obtém a lei de Stefan-Boltzmann, dada por:

$$P(T) = \int_0^{\infty} I_{CN}(\lambda) d\lambda = \sigma T^4, \quad (2)$$

Onde P é a potência total irradiada por unidade de área e σ é a constante de Stefan-Boltzmann (com valor de $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴).

Também decorre da lei de Planck, o fato de que o espectro de radiação térmica emitido por um corpo negro se desloca para regiões de frequências mais altas a medida que a temperatura é aumentada. Este resultado é conhecido como a lei do deslocamento de Wien, representado por

$$\lambda_{m\acute{a}x} T = 0,2014 hc / K_B. \quad (3)$$

Outra observação importante é que na aproximação de Wien, que se aplica para pequenos valores de comprimentos de onda podemos expressar a energia emitida por unidade de tempo e de área, à temperatura T e comprimento de onda λ no intervalo $d\lambda$ pela equação

$$I(\lambda) d\lambda = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{h\beta c/\lambda}} d\lambda, \quad (4)$$

Ela pode ser obtida a partir do limite assintótico $\frac{h\beta c}{\lambda} \gg 1$ na lei de Planck para baixos comprimentos ou altas frequências (lembrando que $v = \frac{c}{\lambda}$)

De modo contrário, tomando $\frac{h\beta c}{\lambda} \ll 1$ para altos comprimentos ou altas frequências, obtemos a aproximação ou lei de Rayleigh-Jeans (Gráfico-1)

$$I(\lambda) d\lambda = \frac{2\pi c}{\beta \lambda^5} d\lambda. \quad (5)$$

As leis de Rayleigh-Jeans e Wien foram obtidas antes da formulação de Planck, mas não se ajustavam à curva experimental entre os limites de baixa e alta frequência (ou alto e baixo comprimento de onda respectivamente). Isso se deve a utilizar-se o espectro contínuo da energia, advindo da mecânica clássica. A lei de Rayleigh, inclusive, mostra uma divergência para o infinito a altas frequências, o que foi chamado “catástrofe do ultravioleta” por discordar aberrantemente da evidência empírica. Planck, então, admitiu a hipótese da quantização da energia, segundo a qual, na interação com uma onda eletromagnética monocromática, a energia de um átomo (na época tendo considerado paredes com pequenas cavidades) na absorção ou emissão da radiação só poderia ser proporcional a múltiplos inteiros da frequência da onda, ou seja, supondo que os valores das energias de cada oscilador harmônico só pudessem ser múltiplos inteiros de um certo valor mínimo $\varepsilon_0 = h\nu$,

$$\varepsilon_n = n\varepsilon_0 = nh\nu \quad (n = 0,1,2, \dots),$$

Onde $h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$, resultando em (1). Assim, a fórmula de Planck para a densidade espectral de energia sintetiza todas as leis e fórmulas previamente estabelecidas para a radiação do corpo negro.

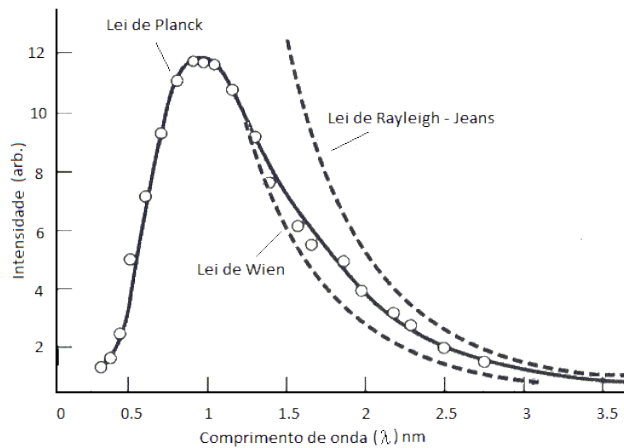


Gráfico-1. Comparação das leis de Planck com as previsões das fórmulas de Rayleigh e Wien. Retirado de CORRÊA, Mello [online]. *Física Quântica e Causalidade I*. Homepage: http://www.portalepistemologia.com.br/artigos/Ciencias/MQ/MQParte_1.asp

Experimento para determinar a constante de Planck.

Materiais:

1. Diodos emissores de luz (light emitting diode) (LED'S) (vermelho, amarelo, verde, azul, e infra-vermelho), 2. Regulador de tensão, 3. Espectrômetro (marca: Daedalon), 4. Fonte estabilizadora (marca: Hayonik), 5. Multímetro, 6. Suporte, 7. Force o line ou (DT830B-HAOYUE), 8. Fonte de tensão, 9. Amperímetro

Método:

Determinamos os comprimentos de onda λ para cada LED através de um espectrômetro e confrontamos com os valores padrão de referência. Em seguida medimos os valores de corrente e de tensão e geramos o gráfico de energia por frequência, que nos fornece o valor da constante de Planck.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observamos que temos um ponto muito fora da reta, que se refere ao LED azul (Gráfico-2). Esse ponto pode estar ajustando o nosso coeficiente e diminuindo o nosso erro. Isso quer dizer que com esse ponto o valor da constante de Planck calculada experimentalmente é mais razoável. A partir dos valores obtidos experimentalmente para a constante de Planck, observamos que o experimento é bem razoável apresentando um erro relativo baixo:

$$E\% = [(6,63 - 6,39) / 6,63] * 100$$

$$E\% = 3,61\%$$

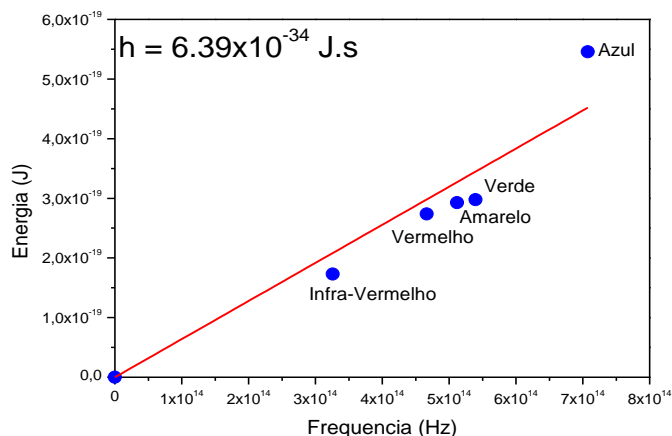


Gráfico-2: Medidas experimentais de energia versus frequência determinando a constante de Planck.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudamos a relação entre o espectro de emissão de um corpo com a sua temperatura, ou seja, a existência de uma dependência da radiação espectral com a temperatura do corpo. Todo corpo emite um certo tipo de radiação que está diretamente ligada com a sua temperatura, a quantidade de radiação térmica aumenta com a variação da temperatura sendo perceptível para o olho humano apenas a faixa do visível. Analisando a previsão da teoria clássica de Rayleigh-Jeans para a radiação de corpo negro, vemos que as discrepâncias são evidentes entre a curva teórica e a experimental. Planck deu uma grande contribuição para esses resultados quando tratou a energia como um discreto ao invés de um contínuo. Ele introduziu a ideia da quantização da energia.

Esses cálculos lhe permitiram calcular o valor para a constante h ($6,62607004 \times 10^{-34}$ m² kg/s) que foi batizada com seu nome. Para obtenção da constante de Planck, realizamos um experimento utilizando LEDs (fonte de luz monocromática) e obtivemos um resultado bastante razoável com um erro relativamente baixo comparado como valor tabelado ($E\% = 3,61\%$). Na continuação desse trabalho pretendemos estudar a dinâmica de sistemas quânticos. Para dar início a esses estudos utilizaremos a equação de Schrödinger para tratar o átomo de hidrogênio. Em seguida compararemos os resultados com estes resultados anteriores contrastando a ideia de órbita proposta por Bohr com a ideia de distribuição de probabilidade.

REFERÊNCIAS

- CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor. Física moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos. 2006. Ed.: Elsevier. Rio de Janeiro, p. 309-328.
- CAVALCANTE, Marisa Almeida; HAAG, Rafael. Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck. 2005. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 27 (3): 343-348.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. 1979 – 27^a reimpressão. Física Quântica (Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas). Ed.: Campos. São Paulo, p. 19-21.
- FREITAS, Dagoberto. Tese de Doutorado: Dinâmica de sistemas quânticos: Átomos em cavidades e íons aprisionados. 2000. UNICAMP/IFGW, Campinas.
- CORRÊA, Mello [online]. *Física Quântica e Causalidade I*. Homepage: http://www.portalepistemologia.com.br/artigos/Ciencias/MQ/MQParte_1.asp