

Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos

**A Radiação do Corpo Negro e
sua Influência sobre os Estados
dos Átomos**

Nome: Mirian Denise Stringasci

Disciplina: Mecânica Quântica Aplicada

Professor: Philippe W. Courteille

A radiação do corpo negro e sua influência sobre os estados dos átomos

Introdução

O espectro de radiação térmica da matéria condensada é um desses problemas que mostram, de forma simples, a natureza quântica do mundo sub-atômico, manifestada numa escala macroscópica. A apresentação de um modelo para a descrição deste tipo de radiação por Planck, em 1900, é considerado o nascimento da Mecânica Quântica, embora ela realmente só tenha se desenvolvido cerca de 30 anos depois. De fato, como veremos a seguir, a introdução de níveis de energia discretos foi essencial para o sucesso do modelo proposto por Planck.

Corpo Negro

Se a temperatura de um corpo for maior que a temperatura do ambiente onde está inserida, sua taxa de emissão de radiação é maior que sua taxa de absorção. Se sua temperatura for menor que a do ambiente, sua taxa de absorção de radiação é maior que sua taxa de emissão. Se o corpo está em equilíbrio térmico com o seu meio, a taxa de emissão de radiação é igual à taxa de absorção.

Corpo negro é definido como um meio ou substância que absorve toda energia incidente sobre ele, nenhuma parte da radiação incidente é refletida ou transmitida. É uma classe de corpos que emite um espectro de caráter universal, ou seja, independente do material e da forma do corpo, dependente apenas da temperatura.

Um corpo negro pode ser aproximado a um pequeno orifício que conecta um objeto com uma cavidade ao seu exterior como mostrado na figura 1. Assim, quase a radiação incidente sobre o orifício, é absorvida por ele. A radiação incidente sobre o orifício é refletida seguidamente pelas paredes internas da cavidade, e dificilmente conseguirá sair pelo orifício.

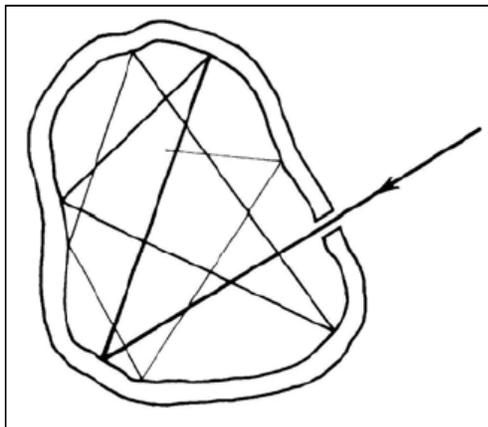


Figura 1. Um objeto com uma cavidade conectado ao seu exterior por um pequeno orifício, este orifício pode ser aproximado a um corpo negro.

O orifício tem propriedade de um corpo negro; portanto, a radiação que está saindo por ele tem propriedades de radiação de corpo negro, mas, já que ela é

meramente uma amostra da radiação que existe dentro da cavidade, podemos dizer que a radiação dentro da cavidade tem propriedades de radiação de corpo negro.

Lei de Rayleigh-Jeans: descrição clássica

Dois pesquisadores, Rayleigh e Jeans, desenvolveram uma teoria na tentativa de explicar os fenômenos experimentais relativos ao corpo negro. Como exemplo mais simples de um corpo radiante, tem-se o oscilador harmônico linear de frequência própria ν . Para este oscilador, pode-se determinar a energia radiada por segundo; sendo esta radiação equivalente à radiação emitida por um dipolo oscilante a qual é dada pela equação (1)

$$\mu_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \epsilon \quad (1)$$

onde ϵ é a energia média dos osciladores. Pela lei de equipartição de energia, é possível chegar a este valor de energia, dado na equação (2)

$$\epsilon = \frac{1}{\beta} = k_B T \quad (2)$$

onde k_B é a constante de Boltzmann e T é a temperatura. Substituindo o valor de ϵ na equação de μ_ν , obtém-se (3)

$$\mu_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T \quad (3).$$

Entretanto, por essa lei, o aumento da frequência implica em aumento da energia radiante até que $\lim_{\nu \rightarrow \infty} \mu_\nu \rightarrow \infty$. Esta incoerência ficou conhecida como **catástrofe do ultravioleta**.

A comparação desta teoria clássica com os resultados experimentais pode ser visto na figura 2.

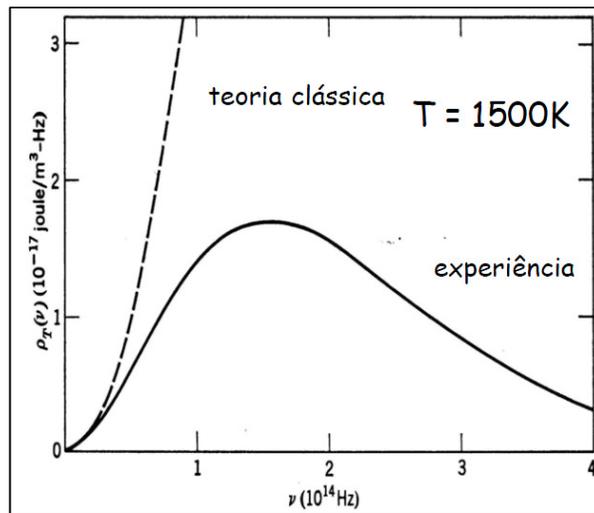


Figura 2. Comparação entre a teoria clássica de Rayleigh-Jeans e experiência. Podemos ver que há concordância apenas quando a frequência é muito baixa ou a temperatura muito alta.

Lei de Planck

Para resolver este problema e completar a teoria, Planck postulou que a energia emitida por cada oscilador harmônico se desse em pacotes (quantum). Com isso ele quis dizer que a energia de cada pacote era igual a número inteiro de um dado valor mínimo

de energia, isto é, $\epsilon = n\epsilon_0$, sendo n um número inteiro, $n=1,2,3,\dots$. Matematicamente isto significa substituir a soma contínua na equação de Rayleigh-Jeans por uma soma discreta. Tendo a energia média dada por (4)

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0}{e^{\epsilon_0/k_B T} - 1} \quad (4).$$

Substituindo este valor de ϵ na equação da lei de Rayleigh-Jeans, e $\epsilon_0 = h\nu$, obtém-se a equação de Planck para a radiação emitida pelo corpo negro (5)

$$\mu_\nu = \frac{8h\pi\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad (5).$$

Pode-se traçar o gráfico de μ_ν para diversos valores de temperatura, como mostrado na figura 3.

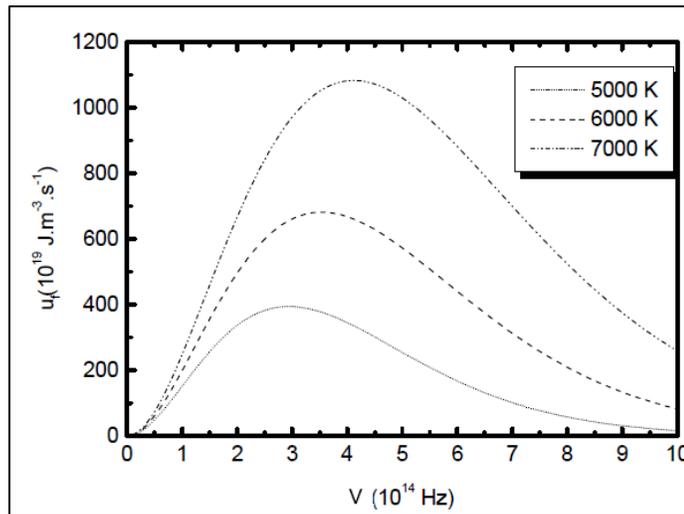


Figura 3. Gráfico da densidade espectral de acordo com a lei de Planck para diferentes valores de temperatura. A área sob as curvas dá a densidade total de energia, uma grandeza que aumenta com a temperatura. O máximo de cada curva indica qual a frequência predominante.

Essa função é limitada matematicamente em ambos os extremos:

- para $h\nu/k_B T \gg 1$: $\mu_\nu = \frac{8h\pi\nu^3}{c^3} e^{-h\nu/k_B T}$, que é o limite de Wien para altas energias.

- para $h\nu/k_B T \ll 1$: $\mu_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} K_B T$ que é o limite de Rayleigh-Jeans, útil na região espectral das microondas ($\lambda > 1\text{mm}$), e que está de acordo com o modelo clássico.

Lei de Wien

Em função do comprimento de onda λ , a função de Planck pode ser reescrita como (6)

$$\mu_\lambda = \frac{8h\pi}{\lambda^3} \frac{1}{e^{hc/\lambda K_B T} - 1} \quad (6).$$

Uma das propriedades da função de Planck é que o comprimento de onda referente ao seu ponto de máximo é inversamente proporcional à temperatura para a qual ela é calculada. Essa é a lei do deslocamento de Wien. Em outras palavras, o valor do comprimento de onda, para qual a radiação emitida por um corpo negro é máxima, é

inversamente proporcional à sua temperatura. Diferenciando a função de Planck com relação ao comprimento de onda e igualando a zero, obtém-se (7)

$$\lambda_m = \frac{2897}{T} [\mu m] \quad (7).$$

Portanto, quanto maior a temperatura de um corpo, menor será o comprimento de onda para o qual o corpo emite radiação máxima. Dessa forma, qualquer corpo luminoso que se resfria progressivamente deixa de emitir luz visível (por exemplo, um arame incandescente).

Lei de Stefan- Boltzmann

A radiância total emitida por um corpo negro pode ser obtida integrando-se a função de Planck em todo o domínio de frequência, como em (8)

$$u = \int_0^{\infty} u_\nu d\nu = \sigma T^4 \quad (8)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($= (5,6696 \pm 0,0025) \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).

Esta é a Lei de Stefan-Boltzmann.

Efeito da Radiação do corpo Negro sob Transições Atômicas

Assumindo dois estados de energia distintos, N_1 e o estado mais elevado N_2 , estes são relacionados com suas taxas de transições P_{12} e P_{21} , respectivamente por (9).

$$P_{12}N_1 = P_{21}N_2 \rightarrow (\bar{n} + 1)N_1 = \bar{n}N_2 \quad (9)$$

sendo \bar{n} o número médio de fótons em particular. Além disso, para se ter um equilíbrio térmico, obtém-se (10).

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right). \quad (10)$$

Então, $\bar{n} = \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$. E, substituindo na energia do oscilador harmônico, obtém-se (11)

$$E(\nu) = h\nu\left(\frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} + 1/2\right). \quad (11)$$

Átomos de Rydberg é uma denominação genérica para indicar qualquer átomo que possua um elétron num estado quântico elevado, ou seja, são sistemas excitados em que o elétron é promovido a um nível com número quântico principal n muito grande. Em um átomo de Rydberg, a correção de seu tempo de vida com influências do corpo negro pode ser calculada com a base no cálculo de Gallagher (12)

$$\frac{1}{\tau_T} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_{nl}^{bb}}. \quad (12)$$

$$\text{Onde } \frac{1}{\tau_{nl}^{bb}} = \frac{4\alpha^3 kT}{3n^2}. \quad (13)$$

Sendo τ_T o tempo de vida a uma determinada temperatura T não nula, τ é o tempo de vida sem influência do corpo negro, τ_{nl}^{bb} é referente ao efeito de radiação do corpo negro no átomo e α é tabelado.

Observação importante: Todas as leis físicas obtidas neste trabalho se basearam na existência de equilíbrio termodinâmico. A atmosfera obviamente não se encontra em tal equilíbrio, pois o campo de radiação não é constante e nem a sua temperatura é constante em todos os pontos!

Referências

- Física Quântica - Robert Eisberg e Robert Resnick, Editora Campus, Rio de Janeiro, 1979.
- Thermal Physics - Charles Kittel e Herbert Kroemer, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1980.
- <http://vsites.unb.br/iq/kleber/CursosVirtuais/QQ/aula-4/aula-4.htm>, acessado em 14/06/11.
- <http://www.fisica.ufs.br/egsantana/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>, acessado em 14/06/11.
- <http://omnis.if.ufrj.br/~marta/cederj/quantum/mq-unid2-textocompl-1.pdf>, acessado em 14/06/11.
- http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/fisicaII/apostila_cap_02.pdf, acessado em 14/06/11.
- <http://www.ifsc.usp.br/~teses/t25092006Nascimento.pdf>, acessado em 20/06/11.
- Tese de mestrado de Kilvia M. Farias Magalhães, Instituto de Física de São Paulo, Universidade de São Paulo (1999).
- Jacques Vanier, The quantum physics of atomic frequency standards, volume 1.