Termo-Estatística – Licenciatura: 22ª *Aula* (05/06/2013)

Prof. Alvaro Vannucci

RADIAÇÃO TÉRMICA

(ver livro "Física Quântica" de Eisberg e Resnick)

►Experimentalmente observa-se que os corpos em geral – e principalmente os metais – ao serem aquecidos emitem um espectro de radiação eletromagnética, que depende da temperatura que possuem *(ver experiência com arame e maçarico)*.

►Este espectro geralmente se situa na região do infra-vermelho (***IV***) e somente a temperaturas muito elevadas a emissão dominante consegue atingir a região do visível (a temperatura do filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente, quando acesa, é da ordem de 3000ºC; com uma eficiência luminosa menor que 10%). Note que a temperatura de fusão do tungstênio $T_W^{fusão} = 3400^o C$ e a do cobre $T_{Cu}^{fusão} = 1084^o C$.

► A forma detalhada do espectro de radiação térmica, ou seja, da distribuição da Intensidade (módulo do vetor de *Poynting*) em função da frequência da radiação emitida (ou "*radiância espectral*" $R_T(\nu)$) por um corpo à temperatura ***T***, depende do material que o compõe.

► Porém, no caso ideal do chamado "***corpo negro***", o espectro de emissão por unidade de área da sua superfície, por unidade de tempo, depende somente da temperatura do corpo:

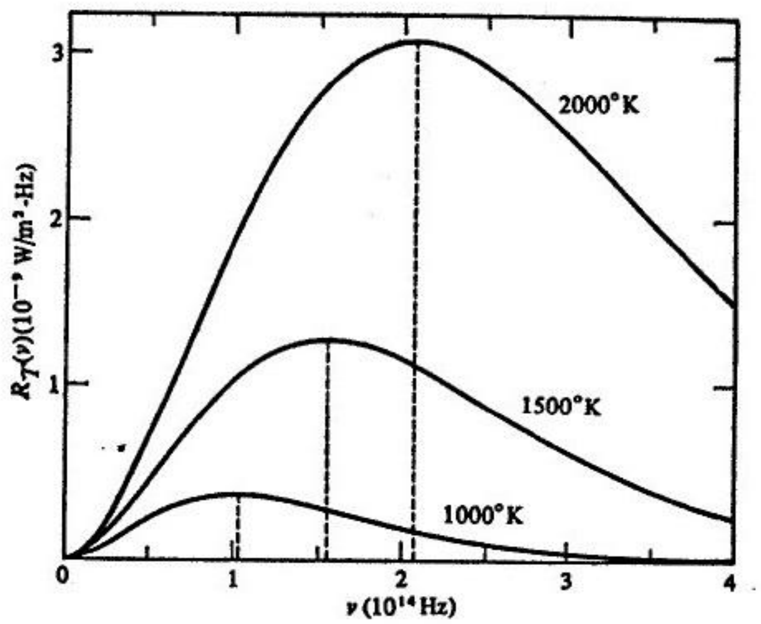


FIGURA 1-1. A radiância espectral de um corpo negro em função da freqüência da radiação, mostrada para temperaturas de 1000°K, 1500°K e 2000°K. Observe-se que a freqüência na qual a radiância máxima ocorre (linha pontilhada), aumenta linearmente com a temperatura, e a potência total emitida por metro quadradó (área sob a curva) aumenta muito rapidamente com a temperatura.

►Unidade da ***Radiância***: $[R_T(\nu)]: \dfrac{W}{m^2 Hz} = \dfrac{J}{m^2}$

(*área de emissão do corpo negro*)

► Sendo $R_T(\nu)$ a ***Radiância Espectral***, então $R_T(\nu)d\nu$, será a energia por unidade de tempo, *por unidade de área* (ou seja, a ***Intensidade***), emitida no intervalo de freqüência ν e $\nu + d\nu$ (para uma dada temperatura absoluta ***T***).

► De forma que a integral da radiância espectral sobre todas as frequências ν será a energia total emitida pelo corpo negro, por unidade de ***área do corpo negro***, por unidade de tempo:

$$\boxed{R_T = \int_0^\infty R_T(\nu)\,d\nu} \equiv \text{área sob cada curva do gráfico acima}$$

► Observe que R_T cresce rapidamente com a temperatura T; e em 1879 este resultado foi ajustado empiricamente, resultando na ***Lei de Stefan***:

$$\boxed{R_T = \sigma T^4}\text{; sendo } \sigma = 5{,}67x10^{-8} W/m^2K^4 \equiv \text{ constante de Stefan-Boltzmann}$$

(Lei de Stefan)

► Outra observação interessante é a forma como o ***pico do espectro*** ($\nu_{máx}$) <u>se desloca</u> para diferentes valores de temperatura do corpo, resultando na ***"lei do deslocamento de Wien"***:

$$\boxed{\nu_{máx} \propto T}\text{; e como (no vácuo) } \lambda = \frac{c}{\nu} \Rightarrow \boxed{\lambda_{máx} \propto \frac{1}{T}}$$

► Mais especificamente: $\boxed{\lambda_{máx} T = 0,289x10^{-2} m \cdot K}$

(Lei do Deslocamento de Wien)

► ***Idealização física do corpo negro***: cavidade com orifício de forma que a radiação que penetra é totalmente absorvida pelas paredes, após múltiplas reflexões.

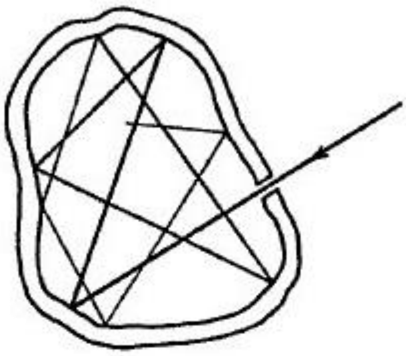


FIGURA 1-2. Uma cavidade em um corpo ligada ao exterior por um pequeno orifício. A radiação incidente sobre o orifício é completamente absorvida após sucessivas reflexões sobre a superfície interna da cavidade. O orifício absorve como um corpo negro. No processo inverso, no qual a radiação que deixa o orifício é constituída a partir de emissões da superfície interna, o orifício emite como se fosse um corpo negro.

► Quando em equilíbrio térmico com o ambiente, a uma dada temperatura T, um corpo negro emite energia na mesma taxa que ele a absorve, permitindo que a sua temperatura seja conhecida

► Características importantes de um corpo negro:

► 1ª) Comparado com um outro corpo qualquer à mesma temperatura, um corpo negro irradia igual ou mais energia.

► 2ª) A energia é irradiada difusa e isotropicamente (sem direção preferencial).

► Muitas vezes torna-se interessante estudar o fenômeno em termos da "*radiação de cavidade*", estabelecendo uma ligação entre a energia que será radiada (radiância $R_T(\nu)$) e a densidade volumétrica de energia ($\rho_T(\nu)$) do corpo negro, a uma temperatura T no intervalo de freqüências ν e $\nu + d\nu$:

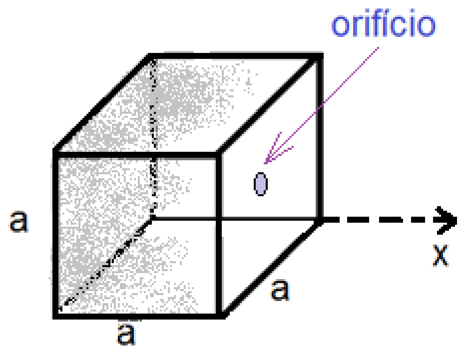
$$\boxed{\rho_T(\nu) \propto R_T(\nu)}$$

► Ou seja, tomando como exemplo uma cavidade com orifício do tipo da figura acima, a radiação no interior da cavidade, cujas paredes estão à temperatura T, tem o mesmo caráter que a radiação emitida pelo orifício.

TEORIA CLÁSSICA DA RADIAÇÃO DE CAVIDADE

► Os primeiros estudos teóricos realizados por Rayleigh e Jeans, no final do séc. XIX consideraram os elétrons das paredes da cavidade (cargas aceleradas) como produzindo radiação eletromagnética que corresponderiam a ondas estacionárias com nós nas paredes (metálicas).

► Supondo uma cavidade na forma de um cubo de lados ***a*** e considerando a onda propagando-se na direção ***x***, por exemplo, tem-se para a onda incidente e a refletida:



$$\begin{cases} E_i = E_0 sen(kx - \omega t) \\ E_r = E_0 sen(kx + \omega t) \end{cases} \Rightarrow \text{somando (superpondo) as ondas} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = E_i + E_r = E_0(\sin kx \cos \omega t + \cancel{\sin \omega t \cos kx} + \sin kx \cos \omega t - \cancel{\sin \omega t \cos kx})$$

$$\Rightarrow \boxed{E(x,t) = E_{máx}\, sen\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) sen(2\pi\nu t)} \equiv \text{campo elétrico da onda eletromagnética estacionária}$$

► Observando que nos pontos de nó $E(x,t)=0$, as posições em que eles se encontram (para qualquer instante ***t***) são obtidas fazendo:

$$sen\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)=0;\ \text{ou seja,}\ \frac{2\cancel{\pi}}{\lambda}x=0,\cancel{\pi},2\cancel{\pi},3\cancel{\pi},\ldots\ \Rightarrow\ \frac{2x}{\lambda}=0,1,2,3,\ldots$$

► Portanto: $\boxed{x_{nós}=\frac{n\lambda}{2}};\ n=0,1,2,3\ldots$

(*posições dos nós da onda estacionária*)

► Impondo que as paredes estão separadas por uma distância ***a*** (e, portanto, os pontos ***x = 0*** e ***x = a*** devem corresponder aos pontos extremos de nó), podemos determinar quais ondas (estacionárias) podem existir na cavidade.

► Serão aquelas com comprimento de onda satisfazendo a condição:

$$a=\frac{n\lambda}{2};\quad n=1,2,3,\ldots\quad (\text{n = 0 não tem significado!})$$

► Ou seja: $\boxed{\lambda_{possíveis}=\frac{2a}{n}}$

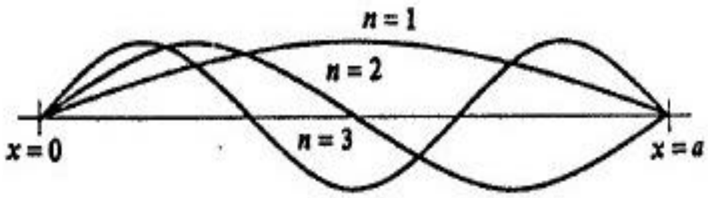


FIGURA 1-4. Amplitude das ondas estacionárias em uma cavidade unidimensional com paredes em $x = 0$ e $x = a$, para os três primeiros valores do índice n.

► Agora, em termos da frequência ν das ondas (na região de vácuo), novamente, como $\lambda=\frac{c}{\nu}\ \Rightarrow\ \frac{c}{\nu}=\frac{2a}{n}\ \Rightarrow\ \boxed{\nu_{possíveis}=\frac{c}{2a}n};\ n=1,2,3,\ldots$