AULA 21 – INTRODUÇÃO À RADIAÇÃO TÉRMICA

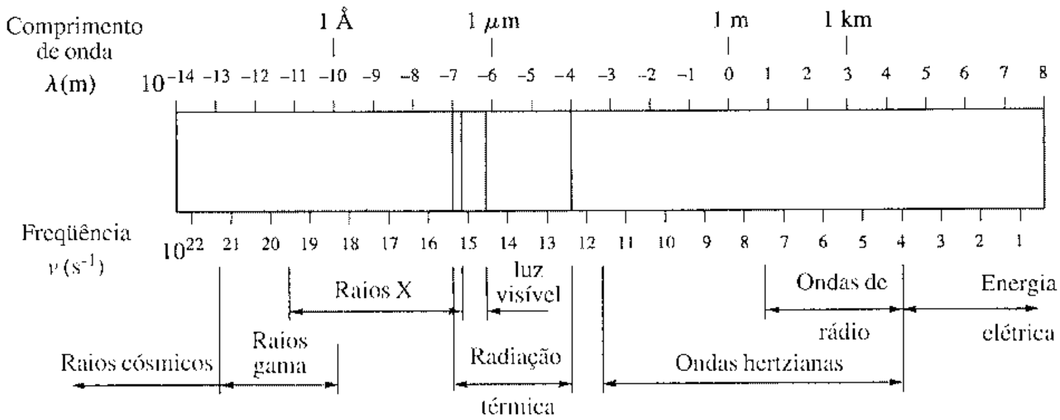
A radiação térmica é a terceira e última forma de transferência de calor existente. Das três formas, é a mais interessante e intrigante, pois é por causa da radiação térmica que o planeta Terra é aquecido pelo Sol e, como consequência, vida se mantém em nosso planeta. Mais intrigante ainda, é que todos os corpos emitem radiação térmica, pois a emissão de radiação térmica depende da temperatura absoluta do corpo, mais precisamente de sua temperatura absoluta elevada à quarta potência. Assim, tudo que está ao nosso redor nesse exato momento está emitindo radiação térmica. Finalmente, diferentemente dos outros dois modos de transferência de calor, a radiação térmica *não* precisa de um meio material para ocorrer. Assim é como o calor chega do Sol ao planeta Terra através do espaço.

Não se conhece completamente o mecanismo físico do transporte de energia pela radiação térmica (e por radiação, de uma forma mais ampla). Em determinadas experiências de laboratório, a energia radiante é considerada como transportada por *ondas eletromagnéticas* e, em outros experimentos, como sendo transportada por *fótons*. É a chamada dualidade onda-partícula. No entanto, sabe-se que ela viaja a velocidade constante da luz independente do modelo físico considerado. A energia associada a cada fóton é $h\nu$, onde h é a constante de Planck, que vale $h = 6{,}625.10^{-34}$ Js. E a freqüência, ν, está relacionado com o comprimento de onda, λ, por:

$$c = \lambda\,\nu,$$

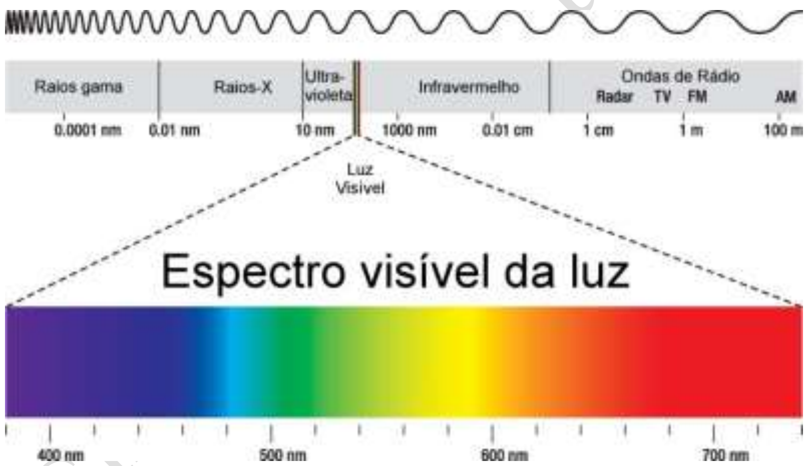
onde, c é a velocidade da luz que vale $c = 3\times10^8$ m/s no vácuo. Uma unidade corrente do comprimento de onda é o *Angstron* que vale $1\,\mathring{A} = 10^{-10}\,m$. Um submúltiplo de λ é o micrômetro, ou μm que vale 1 $\mu m = 10^{-6}$ m.

Classificam-se os fenômenos de radiação pelo seu comprimento de onda (ou freqüência). Claro que a radiação e seu comprimento de onda característico, ou comprimentos de onda, dependem de como a radiação foi produzida. Como nos informa Kreith, por exemplo, elétrons de alta freqüência quando bombardeiam uma superfície metálica produzem raios X, enquanto que certos cristais podem ser excitados para produzirem ondas de rádio em grandes comprimentos de onda. Entretanto, a radiação térmica é aquela que é produzida por um corpo em virtude *tão somente* da sua temperatura absoluta. O esquema a seguir ilustra os diversos tipos de radiação.



(a)

(b)



(a) espectro de radiação eletromagnética e as diversas denominações de acordo com sua faixa; (b) detalhe da radiação térmica na faixa de comprimento de ondas mais relevante, com detalhe para a região visível. (Kreith e Bohn, 2003 e infoescola).

Radiação gama – é uma forma de radiação de alta freqüência (baixos comprimentos de onda) que é emitida por materiais radioativos e pelo Sol. Encontra aplicações na medicina (tratamento de radioterapia) e na conservação de alimentos.

Raios X – sua origem se dá no movimento dos elétrons e seus arranjos eletrônicos. Essa forma de radiação é empregada para obtenção de radiografia e análise de estrutura cristalina dos materiais. Gases da alta atmosfera absorvem os raios produzidos pelo Sol.

Radiação ultravioleta – faixa de radiação compreendida entre 0,01 e 0,4 μm e que é produzida pelas reações nucleares do sol. A camada de ozônio da atmosfera terrestre absorve esse tipo de radiação nociva aos seres vivos (possível causa de câncer de pele).

Radiação visível (luz): é a faixa da radiação que somos capazes de "enxergar" e está compreendida entre os comprimentos de onda 0,4 e 0,70 μm.

A luz "branca" do sol é a combinação de várias "cores" (ilustração do Wikipedia).

Radiação infravermelha - faixa de radiação compreendida entre 0,7 e 1000 μm. Também pode ser chamada de radiação térmica. Entretanto, como será visto, a radiação térmica é contínua para todos os comprimentos e não se situa em uma faixa específica apenas.

Microondas – faixa de radiação de se estende para além dos 1000 μm.

Ondas de rádio – faixa de freqüência usada para radio e telecomunicações de comprimento de onda superiores a 1 m.

<u>Corpo Negro</u>

A radiação térmica é a forma de radiação emitida por um corpo em virtude tão somente da sua temperatura absoluta. A pergunta natural seguinte é: dois corpos à mesma temperatura (digamos 300 K) emitem a mesma *quantidade* de radiação térmica? A resposta é: não! Então, a outra pergunta natural que segue é: Existe, então, algum corpo que naquela temperatura (suponhamos ainda os 300 K) emita a maior quantidade possível de radiação térmica? A resposta é: sim! Esse corpo idealizado é chamado de *corpo negro*. O adjetivo negro não tem nada a ver com a cor que percebemos do corpo (ou a ausência de cor). O brilhante sol, por exemplo, é um corpo com características próximas de um corpo negro. Assim, um *corpo negro*, ou *irradiador ideal*, é um corpo que emite e também absorve, a uma dada temperatura, a *máxima* quantidade possível de radiação térmica em *qualquer* comprimento de onda. Assim, o corpo negro se torna uma idealização para efeito de cálculos, pois que, dada uma temperatura, sabe-se que ele vai emitir (e também absorver) a maior quantidade de radiação térmica. De forma que os corpos reais podem ser comparados com o corpo negro para saber o quanto eles emitem (e absorvem) radiação térmica. É possível calcular o quanto um corpo negro emite de radiação térmica em uma dada temperatura e comprimento de onda por unidade de área de superfície do corpo. Essa quantidade é definida como *poder emissivo espectral* ou *monocromático*, $E_{n\lambda}$, onde o índice "n" se refere ao corpo negro e, "λ", ao fato de ser espectral (para um comprimento de onda do espectro). As unidades de $E_{n\lambda}$ são W/m$^2\mu$m. Planck mostrou que o poder emissivo espectral do corpo negro se distribui seguindo a seguinte expressão:

$$\boxed{E_{n\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)},}$$

onde: $C_1 = 3{,}7415\times10^{8}\ W(\mu m)^4/m^2 = 3{,}7415\times10^{-16}\ W.m^2$

$C_2 = 1{,}4388\times10^{4}\ \mu m.K = 1{,}4388\times10^{-2}\ m.K$

A expressão da lei de Planck permite extrair algumas informações bastante relevantes sobre a radiação térmica, destacando-se:

(1) – A radiação térmica emitida por um corpo negro (poder emissivo espectral, $E_{n\lambda}$) é contínua no comprimento de onda. Isto é, trata-se de uma grandeza que se distribui desde λ = 0 até o maior comprimento de onda possível (∞);

(2) – A um dado comprimento de onda, λ, $E_{n\lambda}$ aumenta com a temperatura;

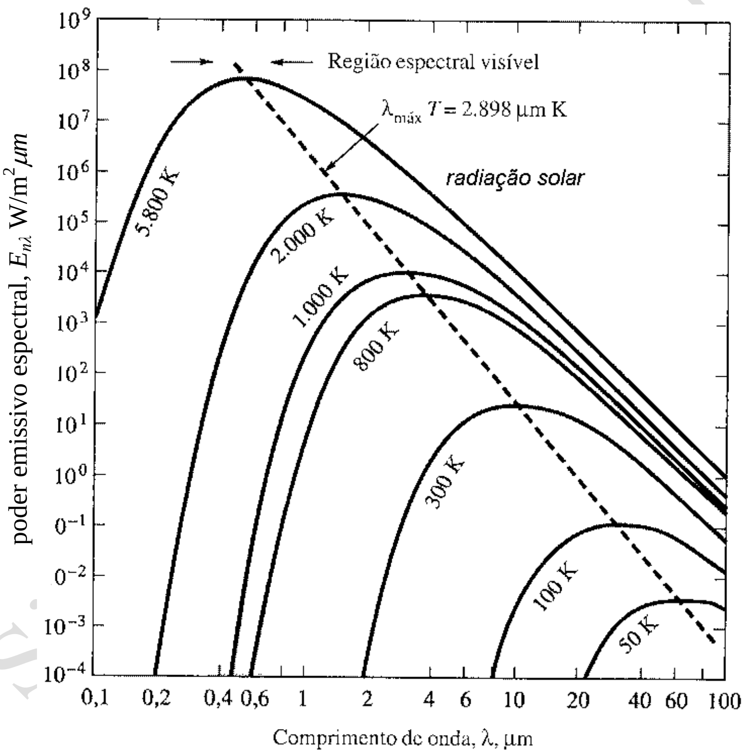
(3) – A região espectral na qual a radiação se concentra depende da temperatura, sendo que comparativamente a radiação se concentra em menores comprimentos de onda;

(4) – Uma fração significativa da radiação emitida pelo sol, o qual pode ser aproximado por um corpo negro a 5800 K, se encontra na região visível (0,35 a 0,7 μm).

As observações acima podem ser melhor compreendidas observando a expressão de Planck no gráfico di-log a seguir que tem o poder emissivo espectral no eixo das coordenadas e o comprimento de onda no eixo das abscissas. Os pontos de máximo poder emissivo espectral estão unidos por uma linha pontilhada, chamada de *lei de deslocamento de Wien*, dada por:

$$\boxed{\left(\frac{\partial E_{n\lambda}}{\partial \lambda}\right)_T = \frac{\partial}{\partial \lambda}\left(\frac{C_1}{\lambda^5(e^{C_2/\lambda T}-1)}\right)_T = 0 \Rightarrow}$$

$$\boxed{\lambda_{max}T = 2{,}898\times10^{-3}\,m.K}\ \textit{lei de deslocamento de Wien}$$



Uma vez que se conhece a distribuição espectral da radiação de corpo negro (poder emissivo espectral), é possível calcular o *poder emissivo total de corpo negro*, E_n, isto é, a radiação térmica total emitida em todos os comprimentos de onda para uma dada temperatura. Para isso, basta integrar o poder emissivo espectral. Assim:

$$E_n = \int_0^\infty E_{n\lambda}\,d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5(e^{C_2/\lambda T}-1)}\,d\lambda \Rightarrow$$

$$\boxed{E_n = \sigma T^4}$$

Esta é a chamada *lei de Stefan-Boltzmann* da radiação e σ = 5,669×10^{-8} W/m^{2}K^4 é a constante de Stefan-Boltzamann (S-B).

Supondo que o Sol seja um corpo negro a 5800 K, qual é o seu poder emissivo total? De acordo com a lei de S-B, o seu poder emissivo é:

$E_{sol} = \sigma \times 5800^4 = 5{,}669 \times 10^{-8} \times 5800^4 = 6{,}4 \times 10^7 W/m^2 = 64 MW/m^2$.

Então, o Sol lança ao espaço a inimaginável quantia de 64 *MW* por metro quadrado da sua superfície! Isto significa que em cerca de 39 m^2 de superfície solar há uma emissão energética equivalente à taxa de calor necessária (com rendimento de 40%) para acionar uma usina termelétrica de 1 GW.

Outra pergunta relevante é a seguinte: quanto de radiação térmica solar atinge o planeta Terra? Nesse caso, a emissão total do sol para o espaço é $Q_{sol} = E_{sol} \times A_{sol}$. Esta quantia é irradiada para todo o espaço e deverá atingir a superfície aproximadamente esférica que contém a órbita média da Terra, $A_{terra.}$ Nota: não se trata da área da superfície da Terra, mas da superfície esférica (aproximada) que engloba a órbita do movimento da Terra. Assim,

$$Q_{sol} = const. = E_{sol} \times A_{sol} = q_{terra} \times A_{terra} \Rightarrow q_{terra} = E_{sol} \times \left(\frac{R_{sol}}{R_{terra}} \right)^2, onde$$

R_{sol} é o raio do sol (7×10^5 km); R_{sol} é o raio da esfera aproximada que contém a órbita da Terra (150×10^6 km) e q_{terra} é o fluxo de calor na forma de radiação térmica solar que chega por unidade de área na esfera que contém a órbita da terra. Assim,

$$q_{terra} = E_{sol} \times \left(\frac{R_{sol}}{R_{terra}} \right)^2 = 64.000.000 \times \left(\frac{0{,}7}{150} \right)^2 \approx 1400\, W/m^2.$$

Então, chega-se à cerca de 1400 W/m^2 de fluxo de calor solar irradiante na região do espaço onde se encontra a Terra. Claro que a parte que chega na superfície da Terra é menor que essa quantia, pois depende da latitude da região e da época do ano, além desse valor também ser atenuado devido às absorções de radiação da atmosfera.

A fração de radiação térmica emitida por um corpo negro no intervalo de comprimento de onda [0-λ_1], isto é, $F_{[0-\lambda_1]}$, vale

$$\boxed{F_{[0-\lambda_1]} = \frac{E_{0-\lambda_{1,n}}}{E_n} = \frac{\displaystyle\int_0^{\lambda} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d(\lambda)}{\sigma \cdot T^4}}$$

Os valores de $F_{[0-\lambda_1]}$, são mostrados na tabela seguinte. Se for preciso calcular a fração de radiação emitida no intervalo λ_1 - λ_2, ou seja, dentro de uma janela espectral, então:

$$F_{[\lambda_1-\lambda_2]} = F_{[0-\lambda_2]} - F_{[0-\lambda_1]}$$

λT $\mu K \times 10^3$.	$\frac{En(0\rightarrow\lambda T)}{\sigma T^4}$	λT $(\text{m K} \times 10^3)$	$\frac{En(0\rightarrow\lambda T)}{\sigma T^4}$
0,2	0,341796 x 10^{-26}	6,2	0,754187
0,4	0,186468 x 10^{-11}	6,4	0,769234
0,6	0,929299 x 10^{-7}	6,6	0,783248
0,8	0,164351 x 10^{-4}	6,8	0,796180
1,0	0,320780 x 10^{-3}	7,0	0,808160
1,2	0,213431 x 10^{-2}	7,2	0,819270
1,4	0,779084 x 10^{-2}	7,4	0,829580
1,6	0,197204 x 10^{-1}	7,6	0,839157
1,8	0,393449 x 10^{-1}	7,8	0,848060
2,0	0,667347 x 10^{-1}	8,0	0,856344
2,2	0,100897	8,5	0,874666
2,4	0,140268	9,0	0,890090
2,6	0,183135	9,5	0,903147
2,8	0,227908	10,0	0,914263
3,0	0,273252	10,5	0,923775
3,2	0,318124	11,0	0,931956
3,4	0,361760	11,5	0,939027
3,6	0,403633	12	0,945167
3,8	0,443411	13	0,955210
4,0	0,480907	14	0,962970
4,2	0,516046	15	0,969056
4,4	0,548830	16	0,973890
4,6	0,579316	18	0,980939
4,8	0,607597	20	0,985683
5,0	0,633786	25	0,992299
5,2	0,658011	30	0,995427
5,4	0,680402	40	0,998057
5,6	0,701090	50	0,999045
5,8	0,720203	75	0,999807
6,0	0,737864	100	1,000000

Exemplo:

A radiação solar tem aproximadamente a mesma distribuição espectral que um corpo negro irradiante ideal a uma temperatura de 5800 K. Determine a quantidade de radiação solar que está na região visível (use 0,4 a 0,7 μm)

Usando a tabela acima, vem

$$0 \le \lambda \le 0{,}4 \rightarrow \ \lambda_1 T = 0{,}4 \times 5800 = 2320 \ \Rightarrow \ F_{[0-0,4]} = 0{,}1245$$
$$0 \le \lambda \le 0{,}7 \rightarrow \ \lambda_2 T = 0{,}7 \times 5800 = 4060 \ \Rightarrow \ F_{[0-0,7]} = 0{,}4919$$

A fração de radiação no faixa visível é $F_{[0,4-0,7]} = 0{,}4919 - 0{,}1245 = 0{,}3674$

$$E_n = 0{,}3674 \times 64{,}16 \times 10^{-6} = 23{,}57 \times 10^{6}\ W/m^2$$

36,74 % da radiação térmica solar é emitida na faixa do visível! O gráfico di-log nos induz a pensar que é a quantia de radiação solar no visível é pequena. Um gráfico em escalas normais nos daria o aspecto quantitativo mais preciso.

Outro exemplo *(extraído de Kreith e Bohn, 2003):*

Vidro de sílica transmite 92% da radiação solar incidente na faixa de comprimentos de onda compreendida entre 0,35 e 2,7 μm (portanto, engloba todo o espectro visível) e é opaco para comprimentos de onda fora dessa faixa. Calcule a porcentagem de radiação solar que o vidro vai transmitir.

Pra a faixa de comprimentos de onda indicada, tem-se

$$0 \le \lambda \le 0{,}35 \rightarrow \ \lambda_1 T = 0{,}35 \times 5800 = 2320 \mu m K \ \overset{(tabela)}{\Rightarrow} \ F_{[0-0,35]} = 0{,}067$$
$$0 \le \lambda \le 2{,}70 \rightarrow \ \lambda_2 T = 2{,}7 \times 5800 = 15660 \mu m K \ \overset{(tabela)}{\Rightarrow} \ F_{[0-2,7]} = 0{,}97$$

Assim, $F_{[0,35-2,7]} = 0{,}97 - 0{,}067 = 0{,}903$. Isto significa que 90,3% da radiação solar incidente atinge o vidro e 0,903×0,92=0,83, ou 83% dessa radiação incidente será transmitida pelo vidro.