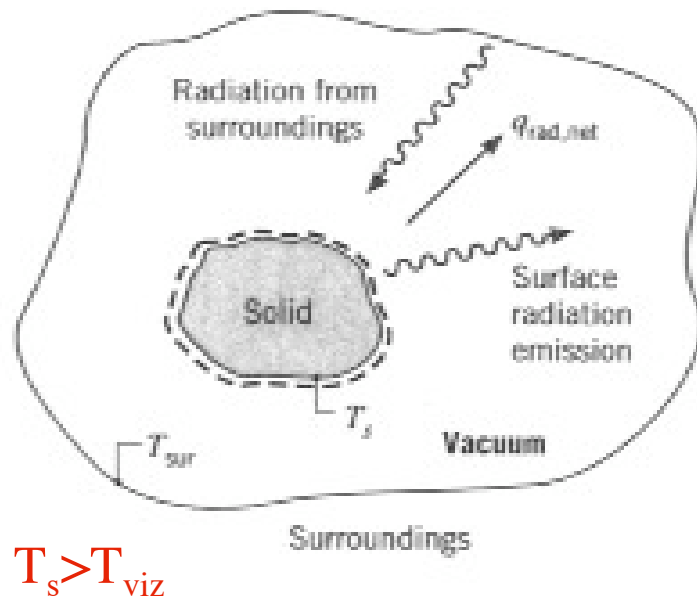


Capítulo 12: Radiação

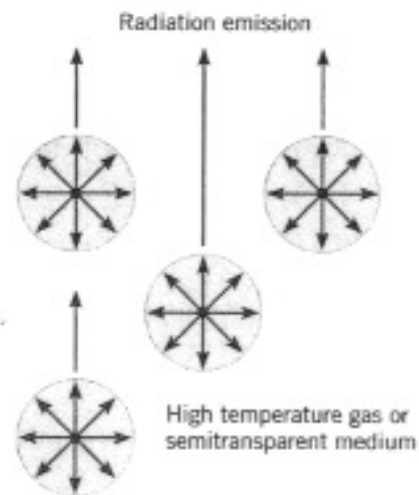
- Troca de calor por radiação não requer matéria para se propagar
- Radiação térmica é a energia emitida pela matéria devido a sua temperatura
- O mecanismo de emissão ocorre devido a oscilações dos elétrons, que estão diretamente relacionadas a energia interna (ou T) da matéria



- Emissão de energia térmica de radiação pela superfície
- A superfície também receberá e absorverá radiação da vizinhança
- Se $T_s > T_{viz}$ → fluxo líquido de calor por radiação sai da superfície e o sólido esfria até atingir o equilíbrio térmico

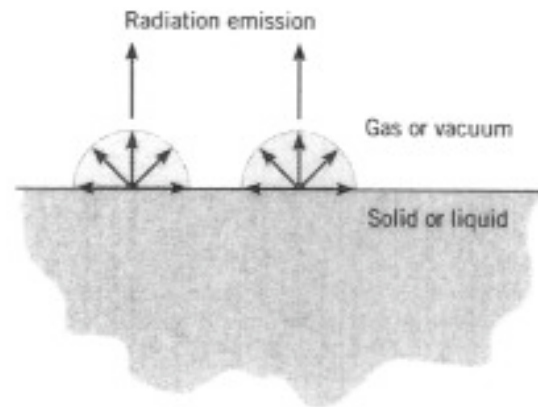
- Formas de emissão de radiação

gases e sólidos semitransparentes:
emissão é um fenômeno volumétrico



(a)

maioria dos sólidos e líquidos:
fenômeno é de superfície
radiação emitida pelas moléculas
é absorvida pelas moléculas adjacentes



(b)

- Vamos analisar apenas os fenômenos de superfície
- Radiação pode ser vista como a propagação de ondas eletromagnéticas

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

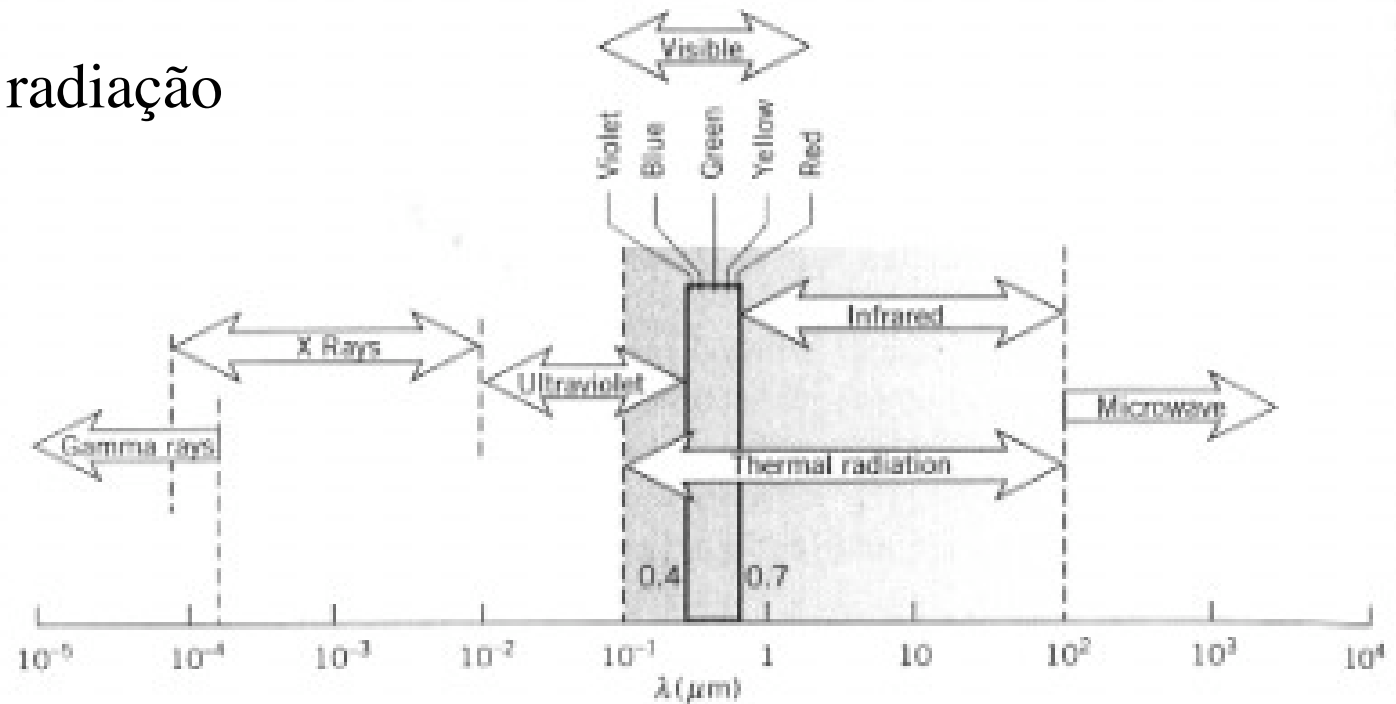
comprimento de onda

velocidade da luz no meio

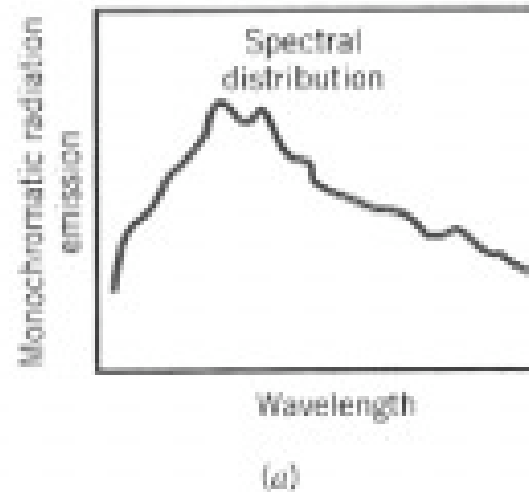
frequência

No vácuo, $c=2.998 \times 10^8$ m/s

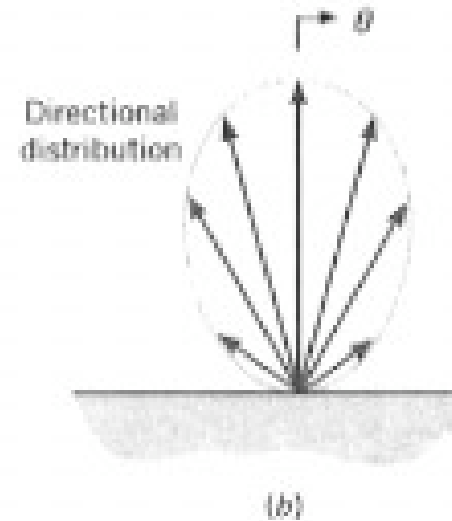
espectro de radiação



magnitude da radiação depende
do comprimento de onda

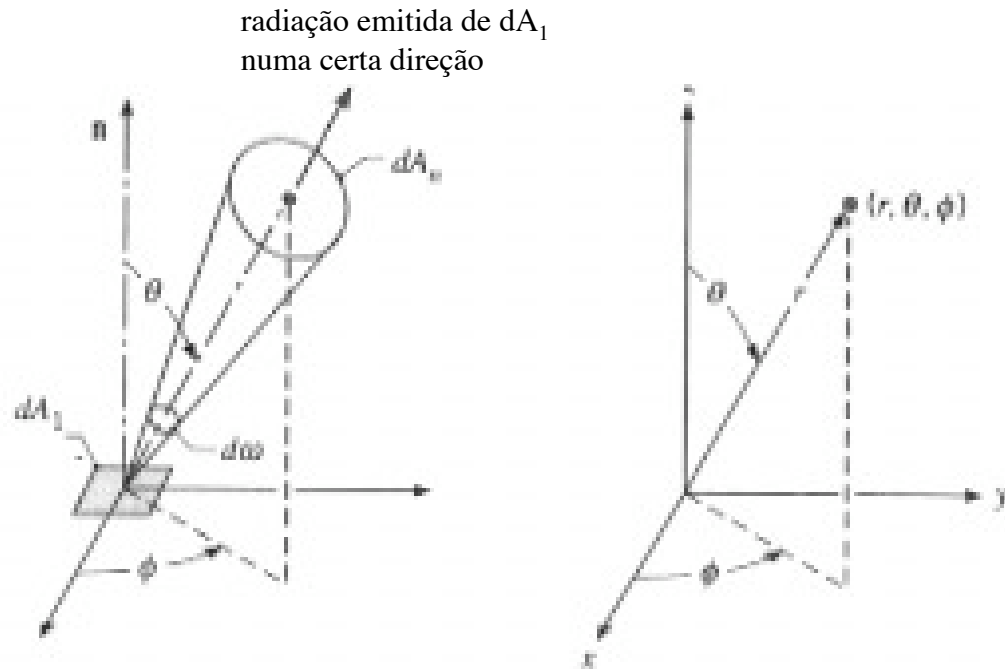


uma superfície pode emitir
radiação em direções preferenciais



- a determinação distribuição direcional é importante
- os efeitos direcionais são tratados utilizando-se o conceito de intensidade de radiação

- Intensidade de radiação

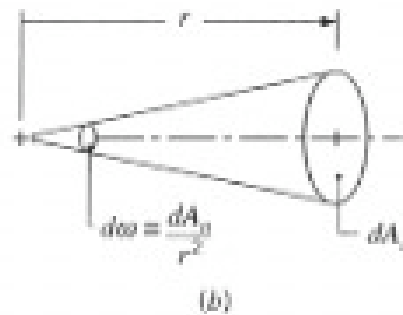
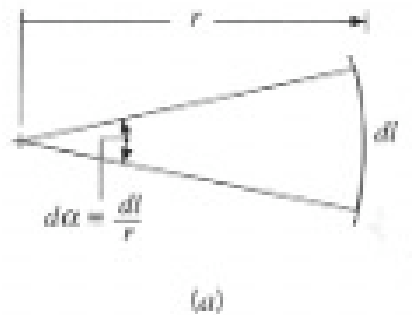


-Intensidade espectral: taxa que a energia radiante é emitida em λ na direção (θ, ϕ) , por unidade de área da superfície que emite normal a esta direção, por unid. do ângulo sólido em torno desta direção e por unidade do intervalo do comprimento de onda $d\lambda$

$$I_{\lambda, e} = \frac{dq}{dA_1 \cos \theta d\omega d\lambda}$$

$$\underbrace{dq}_{dq_\lambda} \equiv \frac{dq}{d\lambda} = I_{\lambda, e} dA_1 \cos \theta d\omega$$

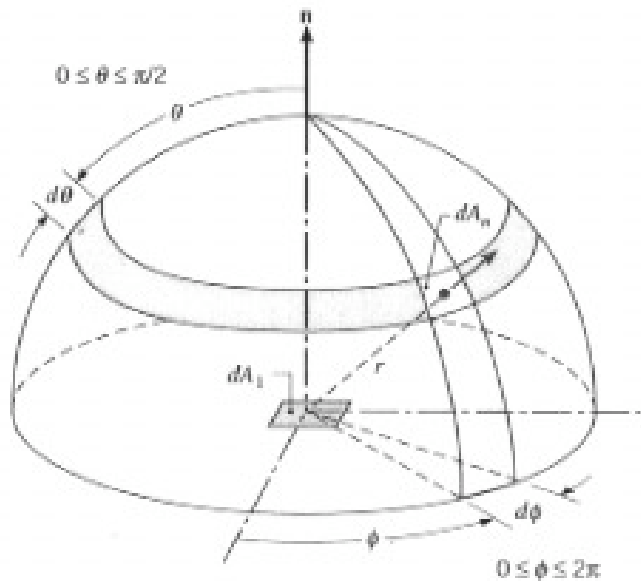
taxa com a qual a radiação do comp. onda λ deixa dA_1 e passa por dA_n



$$dq_\lambda = I_{\lambda, e} \cos \theta \sin \theta d\theta d\omega$$

-fluxo de calor associado com a emissão num hemisfério hipotético acima de dA_1 :

$$q_{\lambda}''(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi$$



-fluxo de calor total associado com a emissão em todas as direções e em todos os comprimentos de onda:

$$q'' = \int_0^{\infty} q_{\lambda}''(\lambda) d\lambda$$

- Potência emitida: quantifica a quantidade de radiação emitida por unidade de área
- E_λ : taxa com a qual a radiação do comp. onda λ é emitida em todas as direções de uma superfície por $d\lambda$ e por unid. área

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi$$

$$\underbrace{E}_{\text{Potência emitida total}} = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) d\lambda$$

- Emissor difuso: superfície cuja intensidade de radiação emitida é independente da direção (θ, ϕ)

$$\Rightarrow E_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,e}(\lambda)$$

$$E = \pi \underbrace{I_e}_{\text{intensidade total de radiação emitida}}$$

- Irradiação espectral G_λ : taxa de radiação de λ incidente sobre uma superfície, por unid. área da superfície e por $d\lambda$
- Os conceitos definidos para radiação emitida podem ser estendidos para radiação incidente sobre uma superfície, que pode ser proveniente da emissão e reflexão de outras superfícies

$$G_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi$$

$I_{\lambda,i}$: taxa que a energia de radiação λ é incidente da direção (θ, ϕ) , por unid. área da superfície interceptadora, por $d\omega$ e por $d\lambda$

$$\underset{\text{Irradiação total}}{G} = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda \quad - \text{ Se a radiação incidente é difusa:}$$

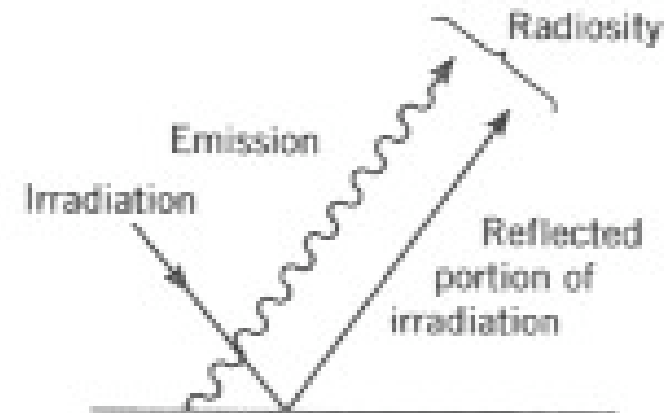
$$G_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,i}(\lambda)$$

$$G = \pi I_i$$

- Radiosidade espectral J_λ : taxa de radiação λ que deixa uma unid. área de superfície, por $d\lambda$
- Os conceitos definidos para radiação emitida podem ser estendidos para o cálculo da radiosidade, que está relacionada com a intensidade associada a emissão e reflexão

$$J_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

$$\underbrace{J}_{\text{Radiosidade total}} = \int_0^\infty J_\lambda(\lambda) d\lambda$$



- Se a superfície é um emissor difuso e um refletor difuso:

$$J_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,e+r}(\lambda)$$

$$J = \pi I_{e+r}$$

- Radiação de corpo negro:

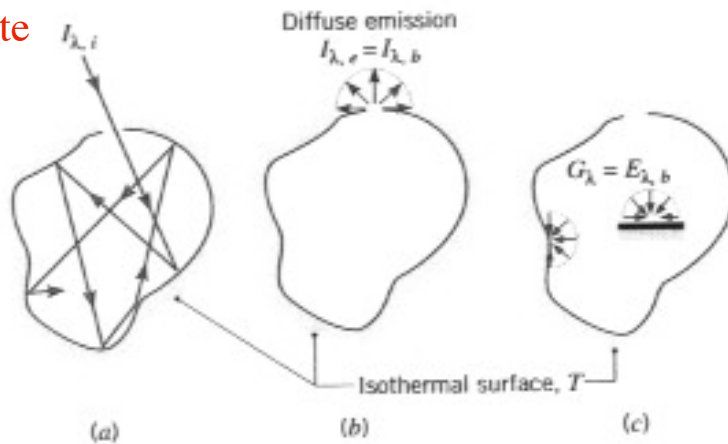
-Corpo negro é uma superfície ideal com as seguintes características:

- Absorve toda a radiação incidente, independente da direção e de λ
- Para uma determinada temperatura e λ , nenhuma superfície pode emitir mais radiação do que um corpo negro
- Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função de λ e da temperatura, ela é independente da direção. Logo, o corpo negro é um emissor difuso.

-Como o corpo negro é um absorvedor e emissor perfeito, ele serve como padrão de comparação para as propriedades radiativas de superfícies reais

- A melhor aproximação para um corpo negro é a de uma cavidade

radiação
incidente



absorção
completa

emissão difusa
pela abertura

irradiação difusa
na superfícies internas

- A radiação de corpo negro existe na cavidade independente da superfície da mesma ser altamente reflectiva ou absorvente

- A distribuição de Planck

- A distribuição espectral da emissão do corpo negro é dada por:

$$I_{\lambda, cn} = \frac{2hc_o^2}{\lambda^5 [\exp(hc_o / \lambda kT) - 1]}$$

$$h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$k = 1.3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$c_o = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

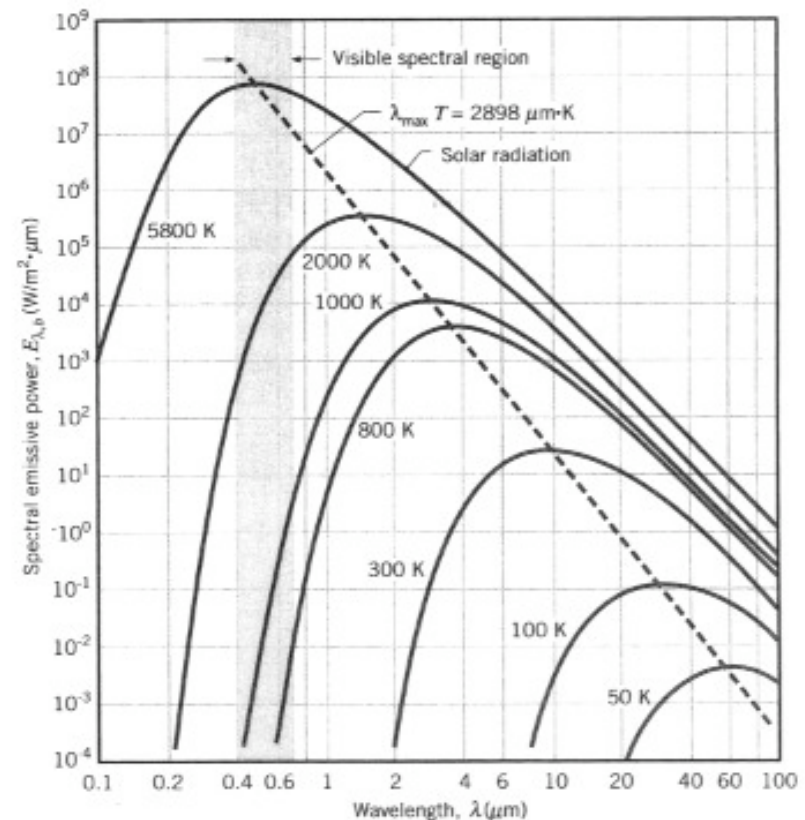
T - temperatura absoluta do CN

- Potência emissiva espectral: $E_{\lambda, cn} = \pi I_{\lambda, cn} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]}$

$$C_1 = 2\pi hc_o = 3.742 \times 10^8 \text{ W. } \mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = (hc_o/k) = 1.439 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m.K}$$

- radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda
- a um certo λ , a magnitude da radiação emitida cresce com a temperatura
- maior radiação aparece a ondas curtas com o aumento da temperatura
- uma fração significativa de radiação emitida pelo sol (pode ser aproximada pelo CN a 5800K), está na região visível do espectro. Em contraste, para $T < 800$ K, a emissão é predominantemente na região infravermelho, e não é visível ao olho humano



- Lei de Stefan-Boltzman

-fornece a radiação emitida em todas as direções e em todos os comprimentos de onda, a partir do valor da temperatura do CN

$$E_{cn} = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} d\lambda$$

$$\Rightarrow E_{cn} = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$I_{cn} = \frac{E_{cn}}{\pi}$$

-Fração da emissão total de um CN que está num intervalo de comprimentos de onda (banda):

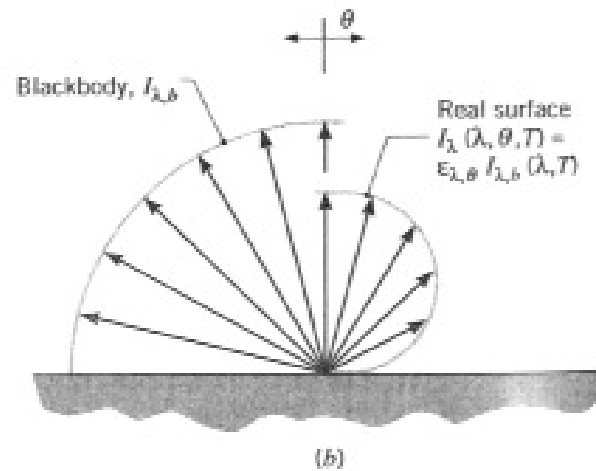
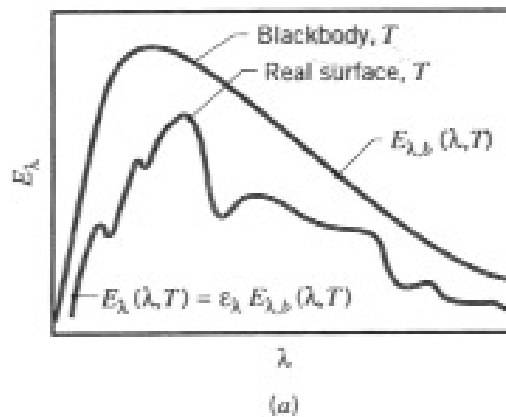
$$F_{0 \rightarrow \lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda, cn} d\lambda}{\sigma T^4} = f(\lambda T)$$

- Fração de radiação entre λ_1 e λ_2 :

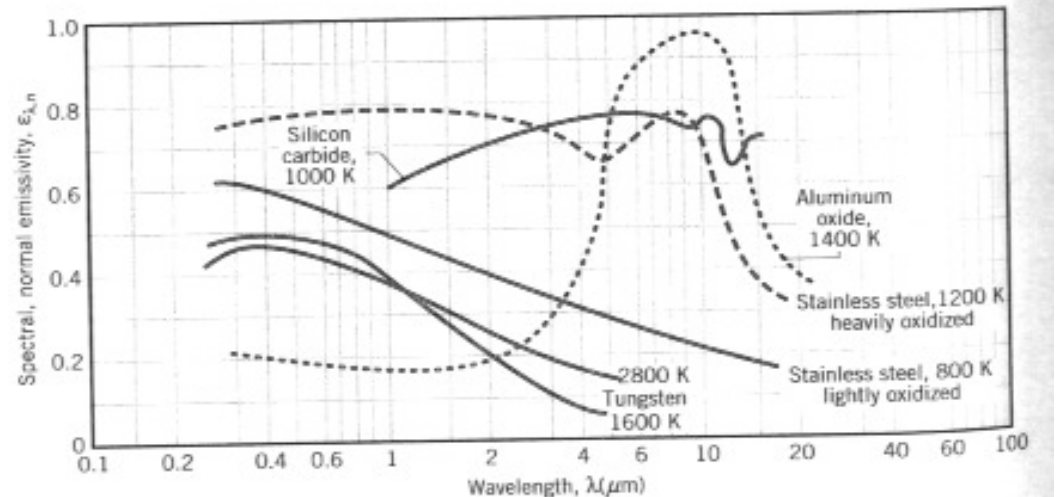
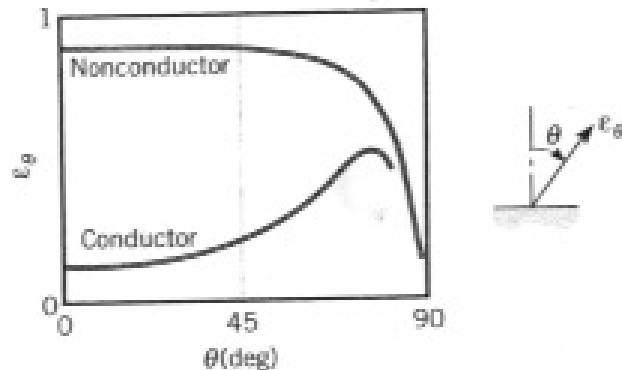
$$F_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2} = F_{0 \rightarrow \lambda_2} - F_{0 \rightarrow \lambda_1}$$

- Emissão de superfície

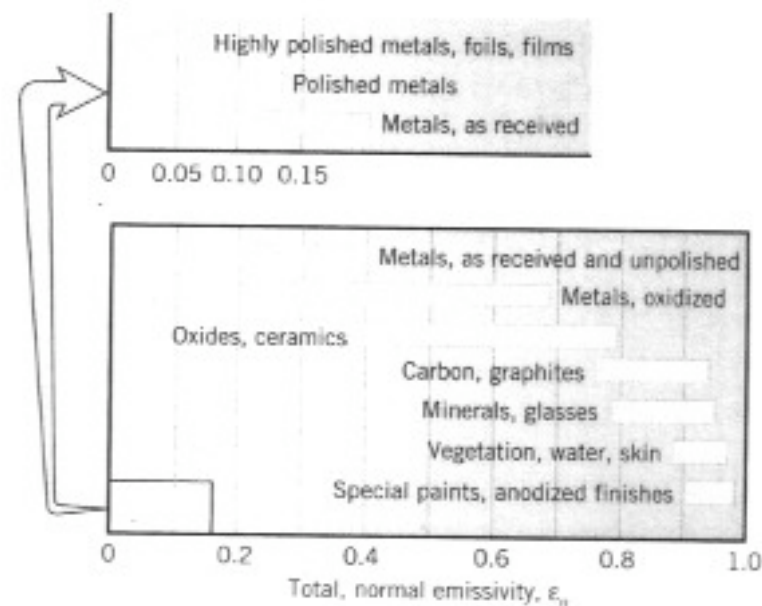
- Emissividade ε =razão entre a radiação emitida por uma superfície real e aquela emitida por um CN a mesma temperatura
- Emissividade direcional espectral: razão entre a radiação emitida por uma superfície real, numa direção e comprimento de onda, e aquela emitida por um CN a mesma temperatura ($\varepsilon_{\lambda,\theta} = I_{\lambda,e}/I_{\lambda,cn}$)



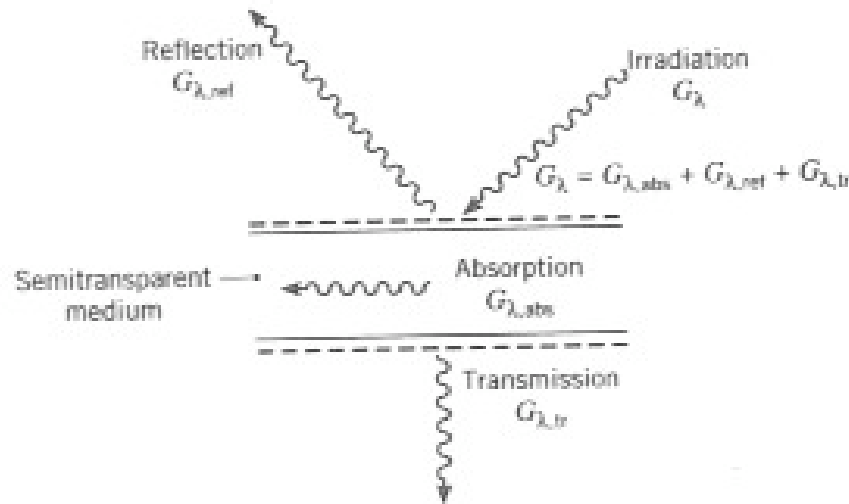
- Emissividade hemisférica espectral: razão entre a radiação emitida por uma superfície real num hemisfério, num comprimento de onda, e aquela emitida por um CN a mesma temperatura ($\epsilon_{\lambda,T} = E_{\lambda}/E_{\lambda,cn}$)
- Emissividade hemisférica total: $\epsilon(T) = E(T)/E_{cn}(T)$
- Em geral pode-se utilizar a aproximação de que ϵ é praticamente constante com $\theta \Rightarrow \epsilon \approx \epsilon(\theta=0) = \epsilon_n$



- Emissividade de superfícies metálicas é pequena
- Camadas oxidantes aumentam significativamente a emissividade de superfícies metálicas
- Emissividade de não condutores é relativamente alta
- Emissividade de condutores cresce com a temperatura
- Emissividade depende fortemente da natureza da superfície



- Absortividade, refletividade e transmissibilidade da superfície



-Irradiação espectral G_λ :

$$G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr}$$

-Se o meio é opaco: $G_{\lambda,tr}=0$
(fenômeno superfície)

-Absorção e reflexão da superfície são responsáveis pela nossa percepção de cor. A cor é devida a reflexão e absorção seletivas da porção visível da radiação que incide do sol ou de alguma fonte artificial de luz. Ex.: uma camisa é vermelha porque ela contém um pigmento que preferencialmente absorve os componentes azul, verde e amarelo da luz incidente. Daí, as contribuições relativas destes componentes na luz refletida é menor e o componente vermelho predomina.

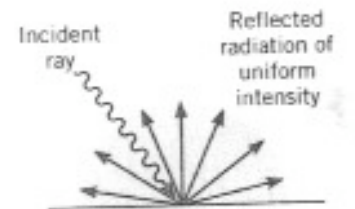
-Superfície preta: absorve todas as cores.

-Superfície branca: reflete todas as cores.

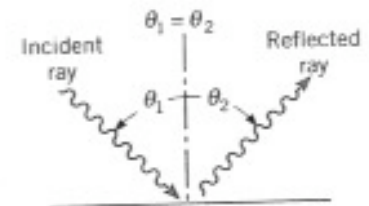
- Absortividade: determina a fração da irradiação absorvida pela superfície
 - espectral direcional: $\alpha_{\lambda,\theta} = I_{\lambda i, \text{abs}} / I_{\lambda, i}$
 - espectral hemisférica: $\alpha_{\lambda}(\lambda) = G_{\lambda, \text{abs}}(\lambda) / G_{\lambda}(\lambda)$
 - hemisférica total: $\alpha = G_{\text{abs}} / G$
- Absortividade é pouco dependente da temperatura da superfície

- Refletividade: determina a fração de radiação incidente que é refletida pela superfície
 - espectral direcional: $\rho_{\lambda,\theta} = I_{\lambda i, \text{ref}} / I_{\lambda, i}$
 - espectral hemisférica: $\rho_{\lambda}(\lambda) = G_{\lambda, \text{ref}}(\lambda) / G_{\lambda}(\lambda)$
 - hemisférica total: $\rho = G_{\text{ref}} / G$

-As superfícies podem ser idealizadas como difusas ou especulares de acordo como elas refletem radiação



reflexão
difusa



reflexão
especular

- Transmissibilidade:

- hemisférica: $\tau_{\lambda}(\lambda) = G_{\lambda, tr}(\lambda) / G_{\lambda}(\lambda)$
- total: $\tau = G_{tr} / G$

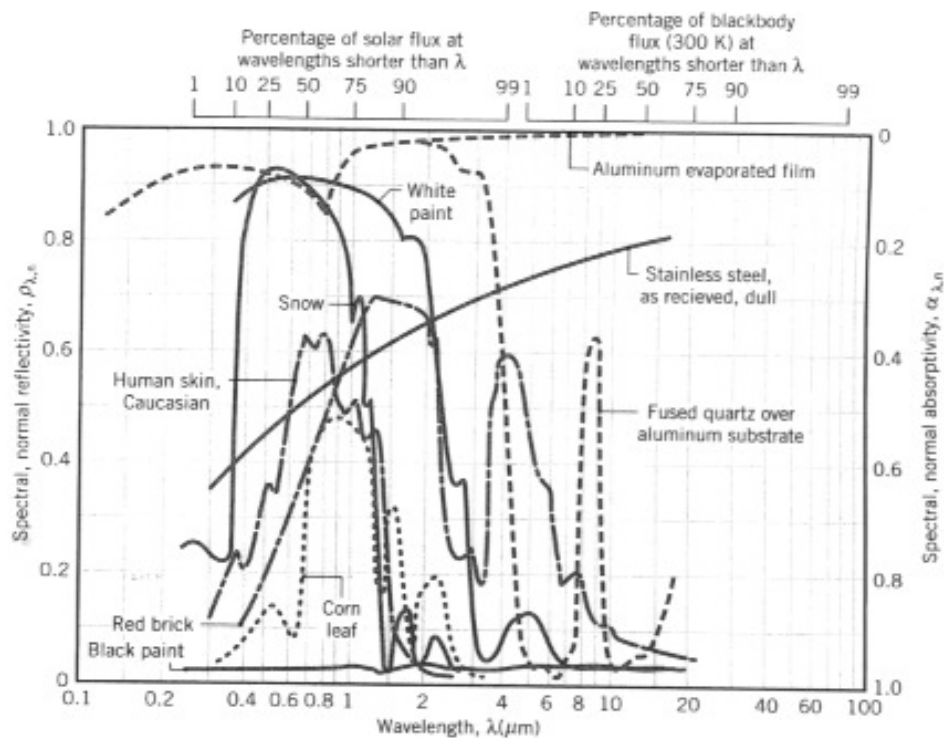
- Usando as definições acima e a equação de balanço de radiação ($G_{\lambda} = G_{\lambda, ref} + G_{\lambda, abs} + G_{\lambda, tr}$) para um meio semitransparente:

$$\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$

- Para propriedades médias ao longo de todo o espectro:

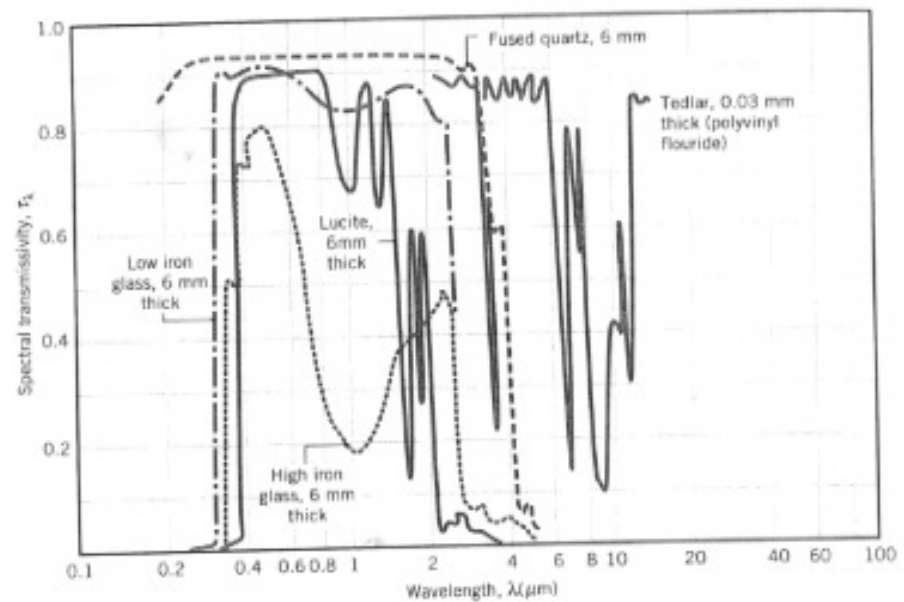
$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

- Para o meio opaco: $\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} = 1$ e $\rho + \alpha = 1$



$\alpha_{\lambda,n}$ e $\rho_{\lambda,n}$ para alguns materiais opacos

$\tau_{\lambda,n}$ para alguns materiais semitransparentes



-Lei de Kirchhoff: $\varepsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta}$

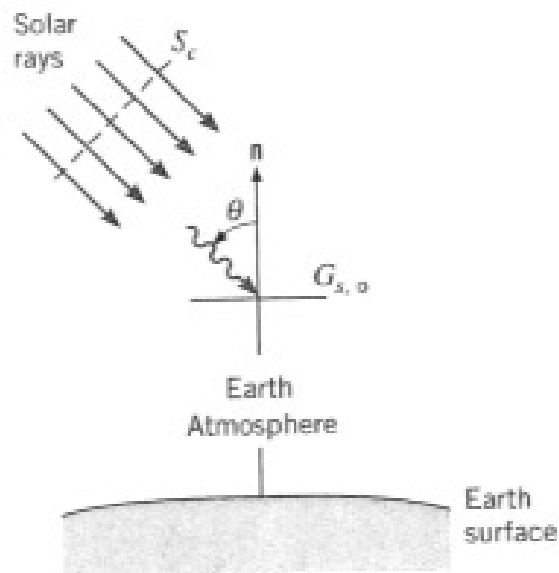
- para um CN: $\varepsilon = \alpha$

-Superfície cinza: superfície na qual ε_{λ} e α_{λ} independem de λ nas regiões espectrais da irradiação e da emissão da superfície

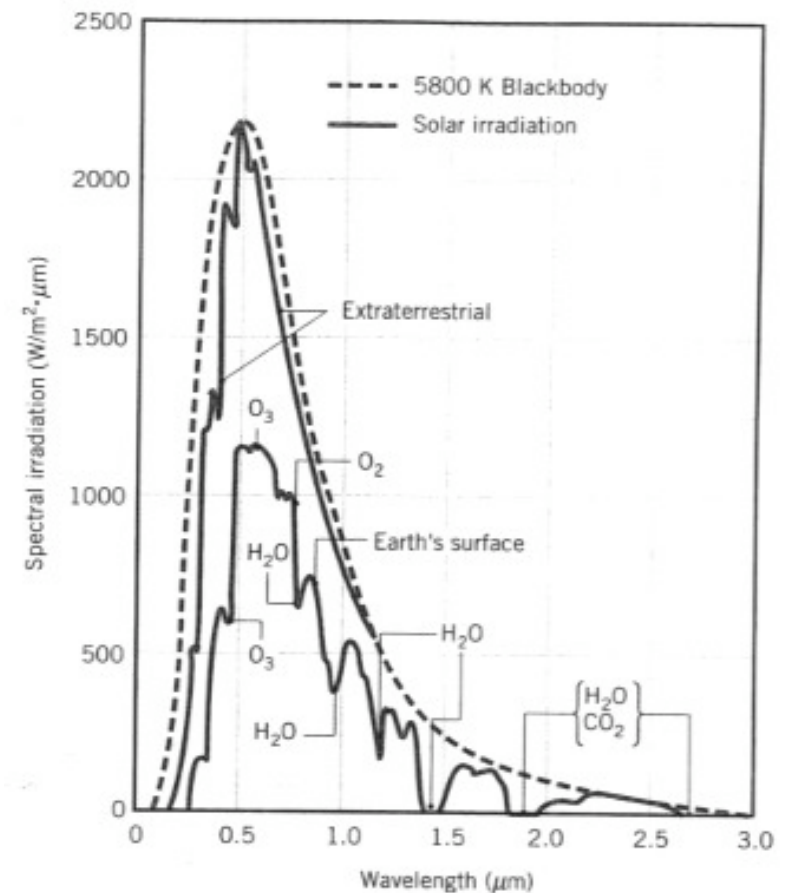
-Superfície cinza difusa: ε e α independem de λ e de θ

-Radiação solar:

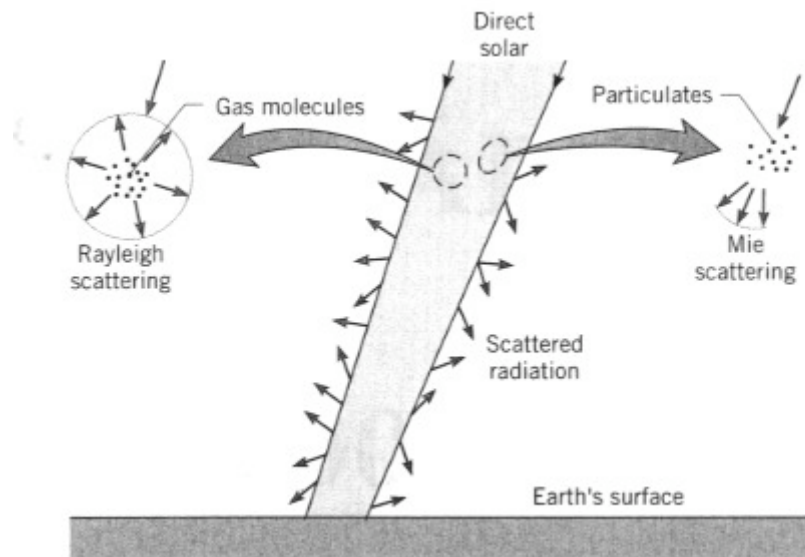
-Sol: fonte de radiação esférica ($d=1.39 \times 10^9$ m) localizada a 1.5×10^{11} m da superfície terrestre



-o espectro de distribuição da radiação solar assemelha-se ao de um CN a $T=5800$ K



-Quando a radiação solar ultrapassa a atmosfera terrestre, a sua magnitude e direção se alteram, devido a absorção e espalhamento pelos constituintes presentes na atmosfera



-Potência emitida pela superfície da terra:

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

$$\varepsilon \approx 1 \text{ (p/ a água = 0.97)}$$

-Irradiação terrestre devida a emissão da atmosfera:

$$G_{atm} = \sigma T_{céu}^4$$