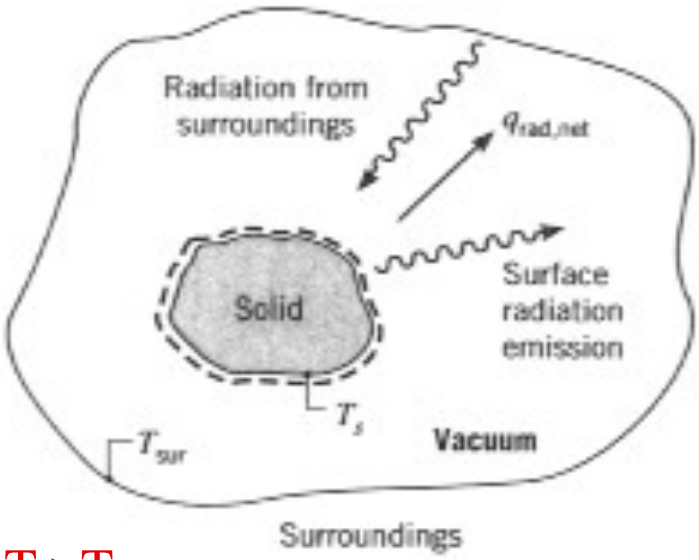
Capítulo 12: Radiação

- 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

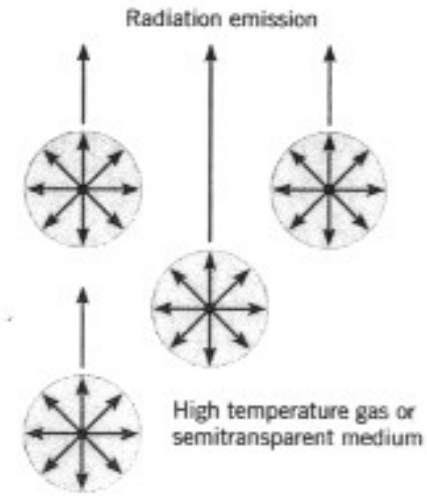


$T_s > T_{viz}$

- 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

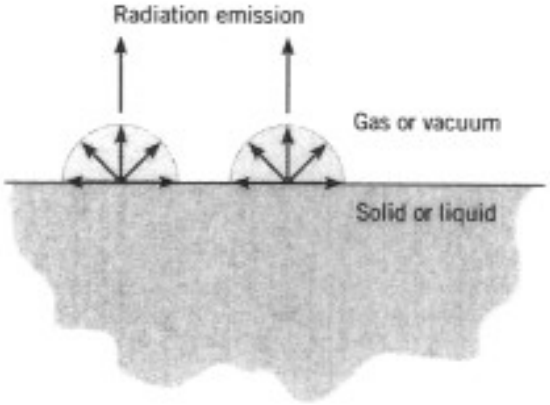
- Formas de emissão de radiação

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

velocidade da luz
no meio

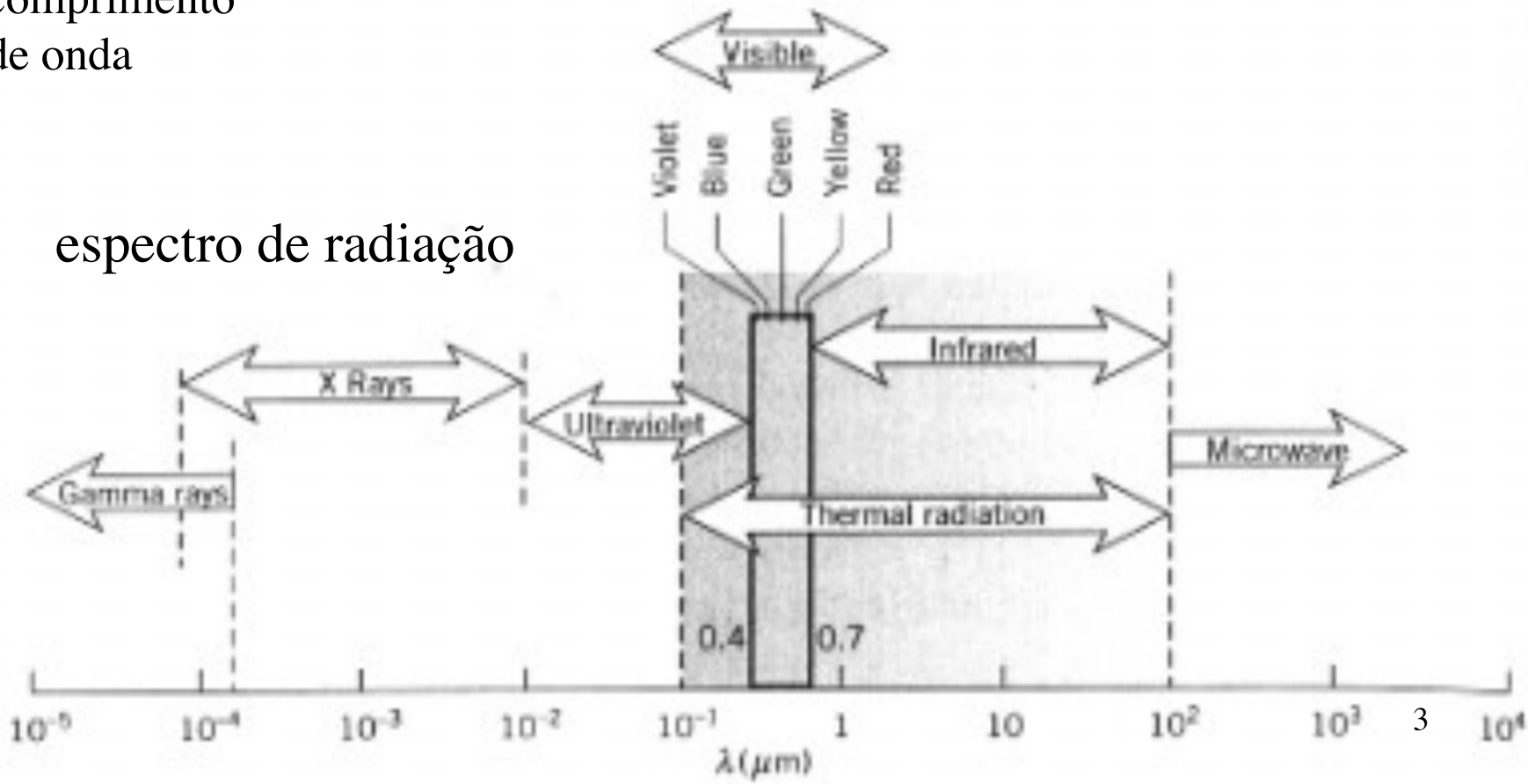
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

No vácuo, $c=2.998\times10^{8}$ m/s

frequência

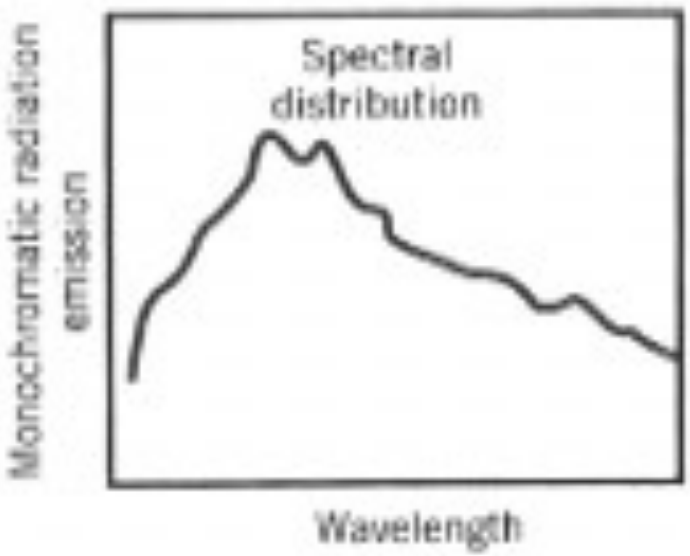
comprimento
de onda

espectro de radiação

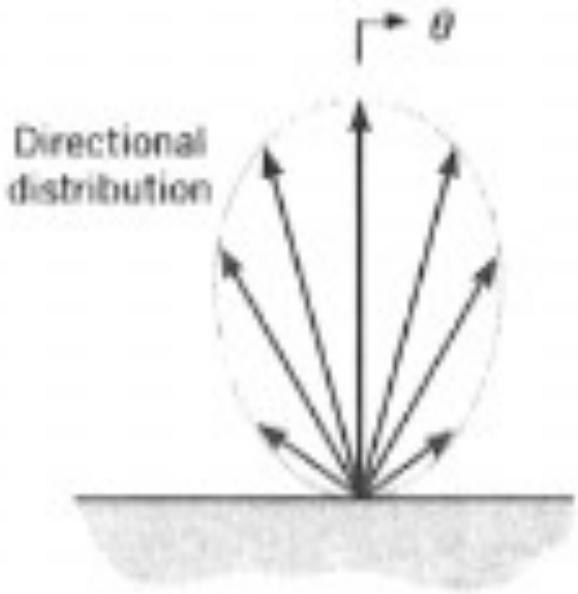


magnitude da radiação depende do comprimento de onda

uma superfície pode emitir radiação em direções preferenciais



(a)

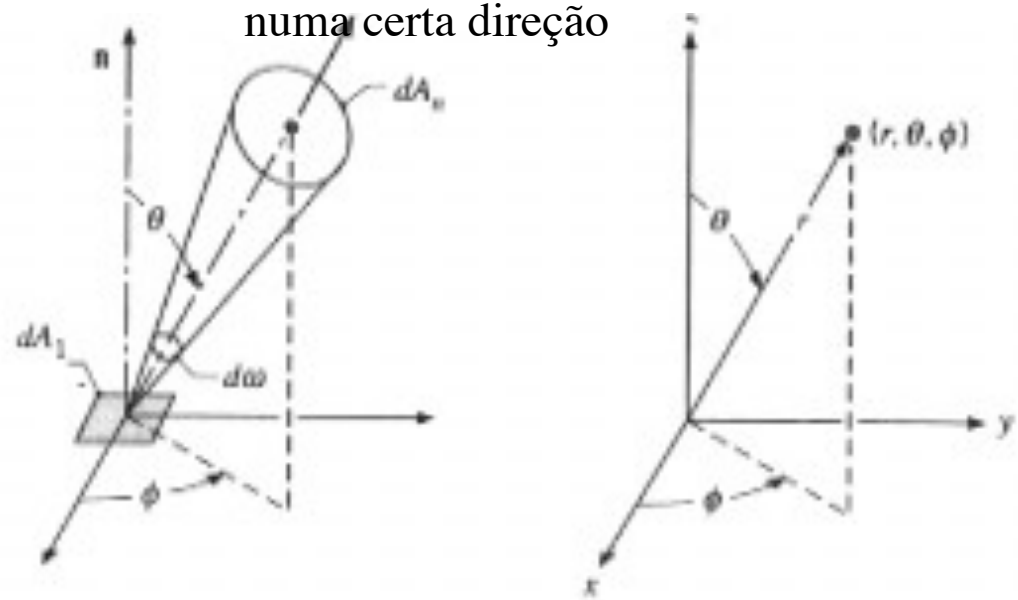


(b)

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

- Intensidade de radiação

radiação emitida de dA_1 numa certa direção



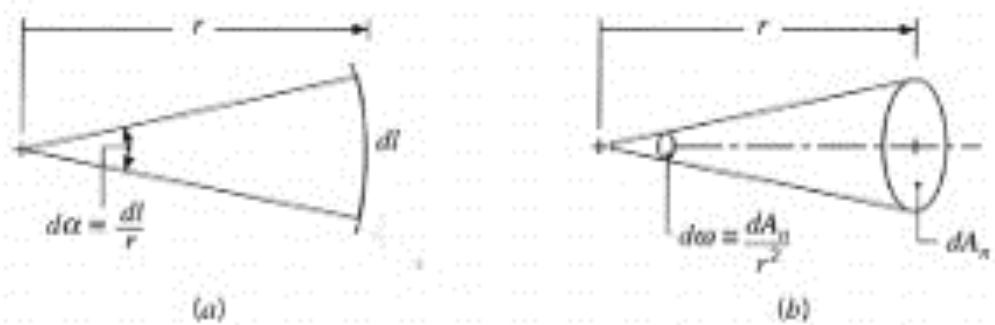
-Intensidade espectral: taxa que a energia radiante é emitida em λ na direção (θ,ϕ), por unidade de área da superfície que emite normal a esta direção, por unidade do ângulo sólido $d\omega$ em torno desta direção e por unidade do intervalo do comprimento de onda dλ

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

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

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

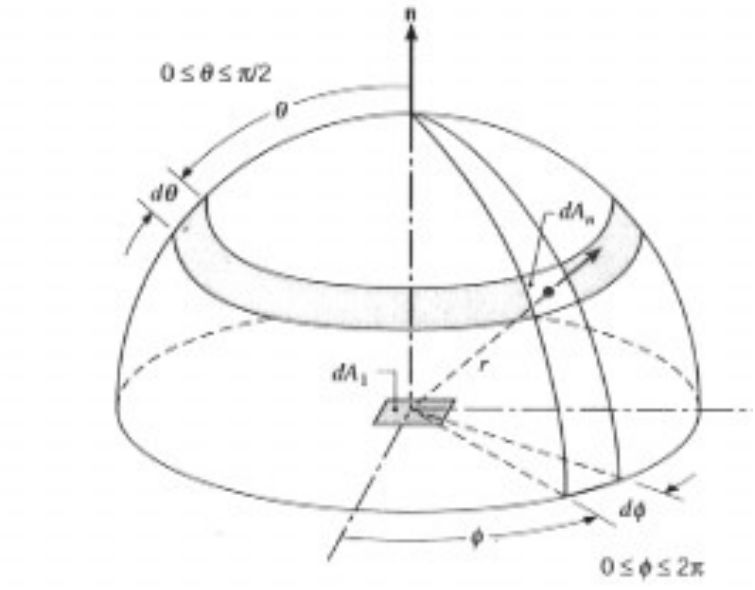
ângulo sólido $d\omega = dA_n/r^2$



$$dq_\lambda'' = I_{\lambda,e} \cos\theta \, \mathrm{sen}\theta \, d\theta \, d\omega$$

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

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



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

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

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

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

- Potência emitida: quantifica a quantidade de radiação emitida por unidade de área

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

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

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

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

- 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

- Irradiação espectral G_λ: taxa de radiação de λ incidente sobre uma superfície, por unidade de área da superfície e por $d\lambda$

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

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

$$\underbrace{G}_{\text{Irradiação total}} = \int_0^{\infty} G_\lambda(\lambda)d\lambda$$

- Se a radiação incidente é difusa:

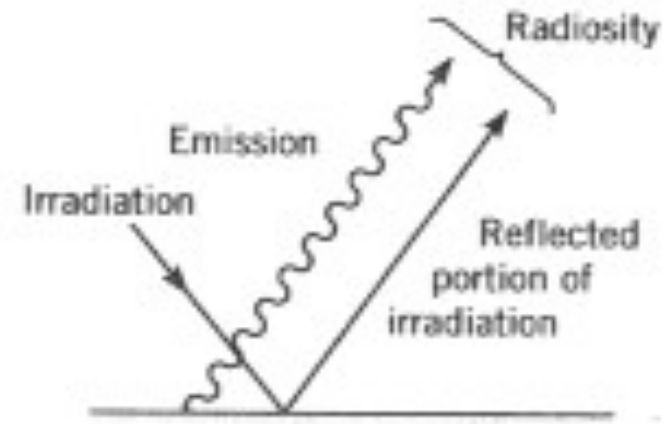
$$G_\lambda(\lambda) = \pi\, I_{\lambda,i}(\lambda)$$
$$G = \pi\, I_i$$

-Radiosidade espectral J_λ: taxa de radiação λ que deixa uma unidade de 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

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

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



- 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:

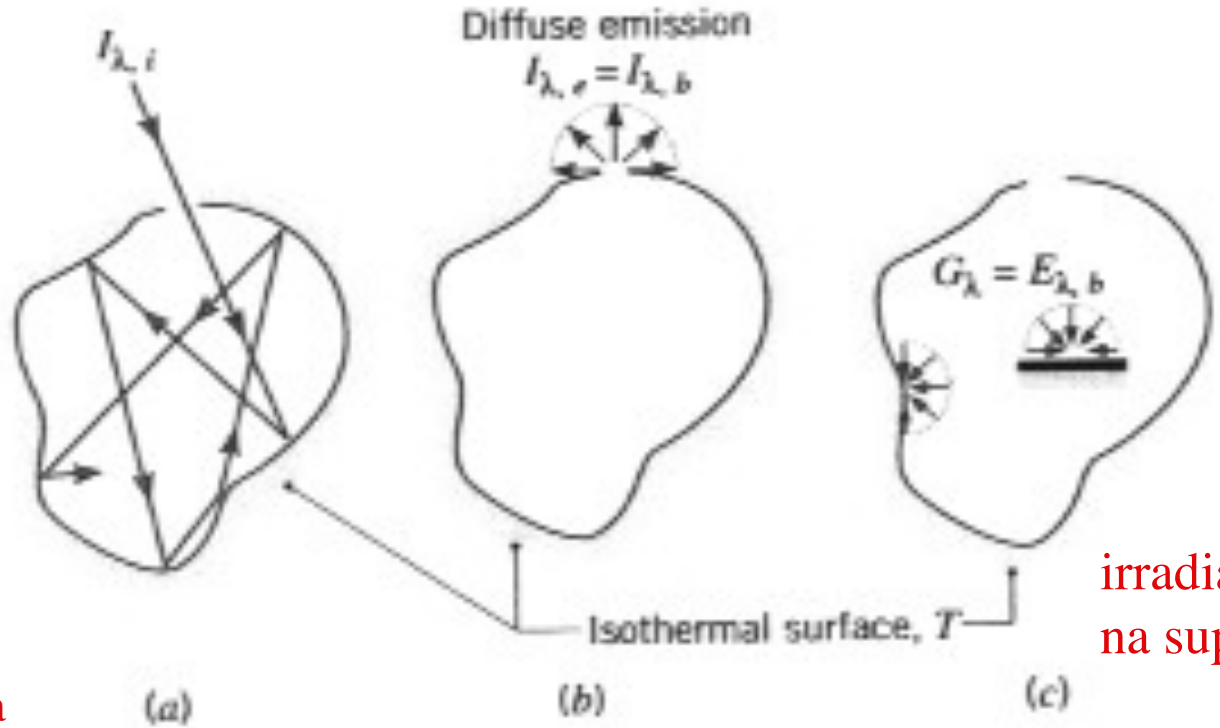
-Corpo negro é uma superfície ideal com as seguintes características:

- 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:

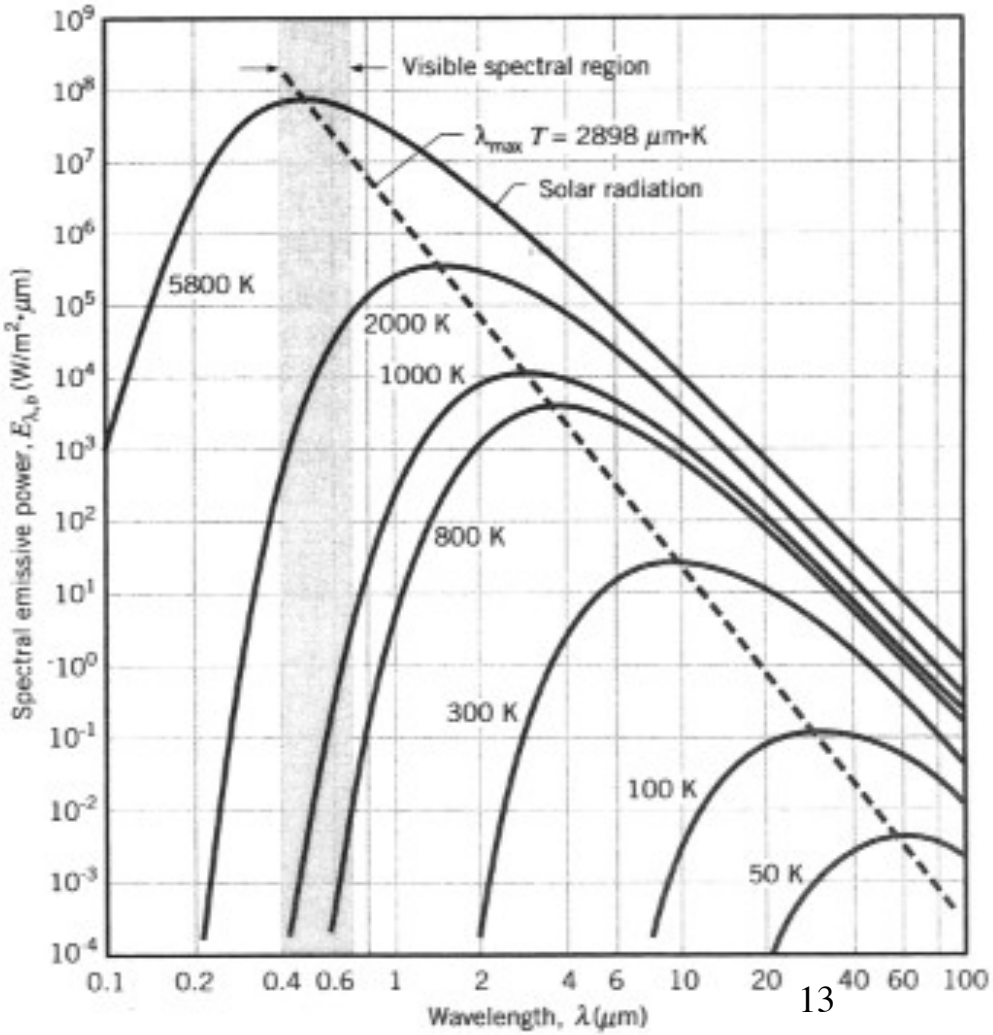
$$I_{\lambda,cn} = \frac{2hc_o^2}{\lambda^5\left[\exp(hc_o/\lambda kT)-1\right]}$$

h = 6.6256x10^{-34} J.s
k = 1.3805x10^{-23} J/K
c_o=2.998x10^8 m/s
T - temperatura absoluta do corpo negro

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

$C_1=2\pi hc_o$=3.742x10^8 W. μm^4/m^2
$C_2=(hc_o/k)$=1.439x10^4 μm.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 corpo negro

$$E_{cn} = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5\left[\mathbf{exp}(C_2 / \lambda T) - 1\right]} d\lambda \quad \Rightarrow E_{cn} = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.670 \,\mathbf{x}\, 10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4 \qquad\qquad I_{cn} = \frac{E_{cn}}{\pi}$$

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

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

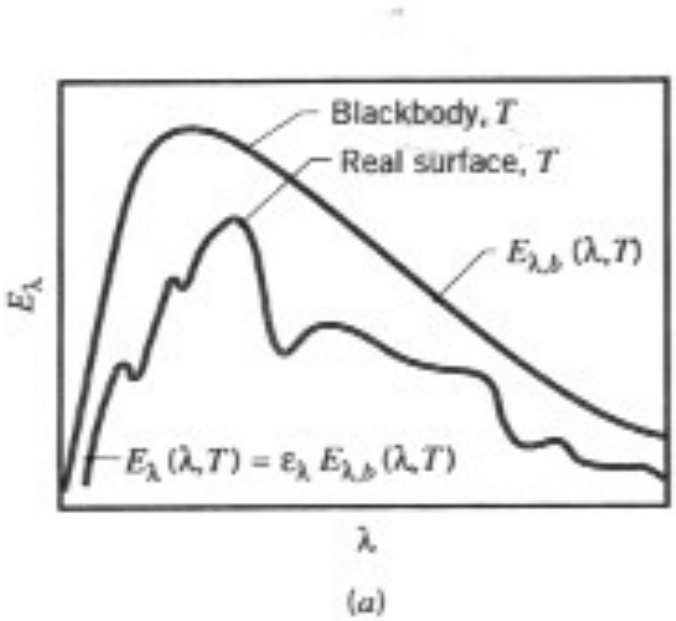
- Fração de radiação entre λ_1 e λ_2:

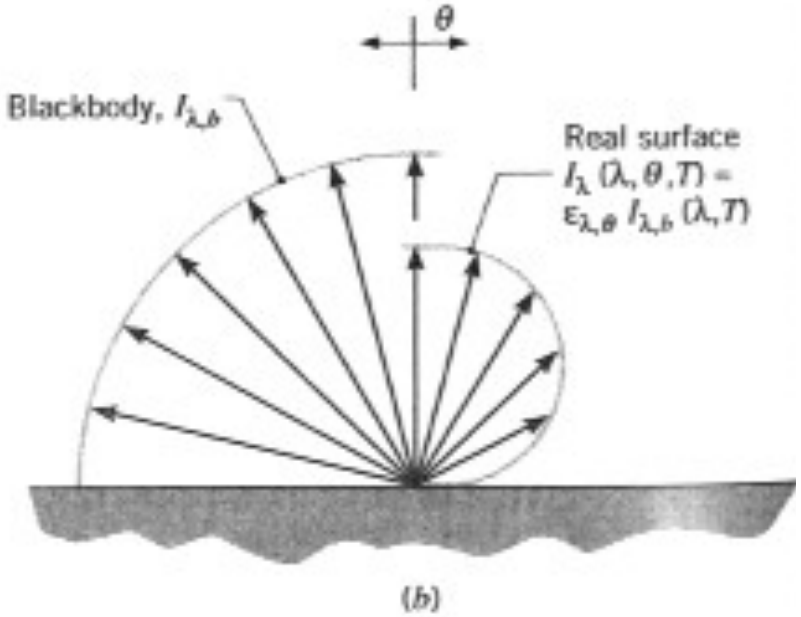
$$F_{\lambda_1\to\lambda_2} = F_{0\to\lambda_2} - F_{0\to\lambda_1}$$

- Emissão de superfície

-Emissividade ε=razão entre a radiação emitida por uma superfície real e aquela emitida por um corpo negro 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 ($\varepsilon_{\lambda,\theta} = I_{\lambda,e}/I_{\lambda,cn}$)

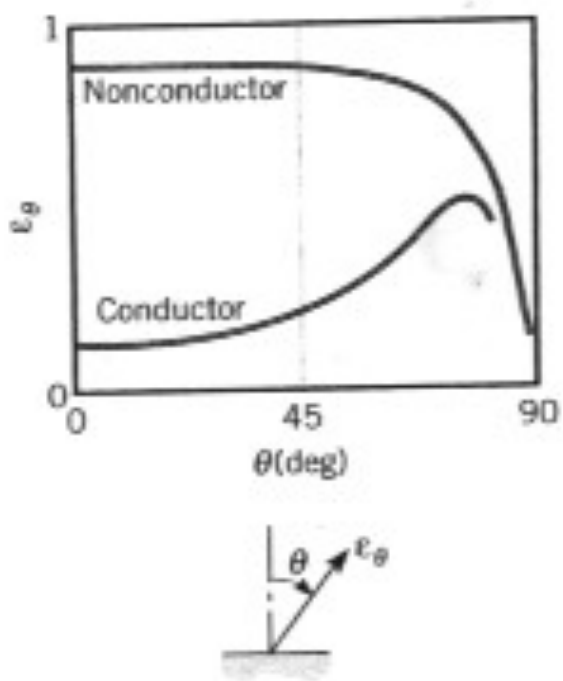


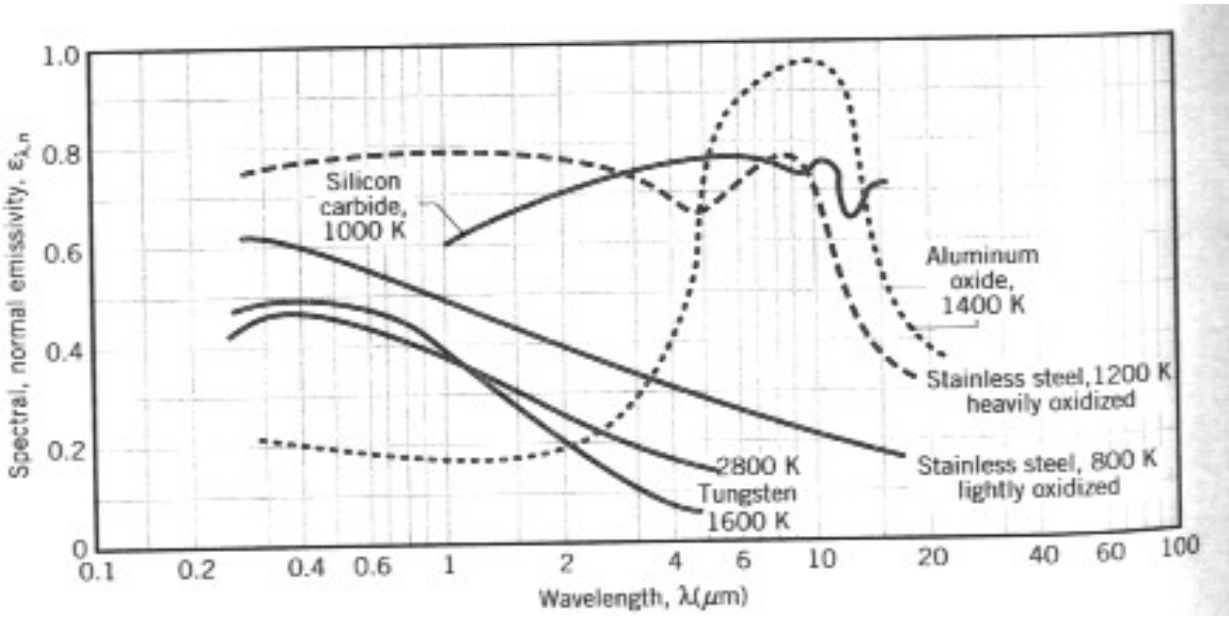


-Emissividade hemisférica espectral: razão entre a radiação emitida por uma superfície real num hemisfério, num comprimento de onda, e aquela emitida por um CN a mesma temperatura ($\varepsilon_{\lambda,T} = E_\lambda / E_{\lambda,cn}$)

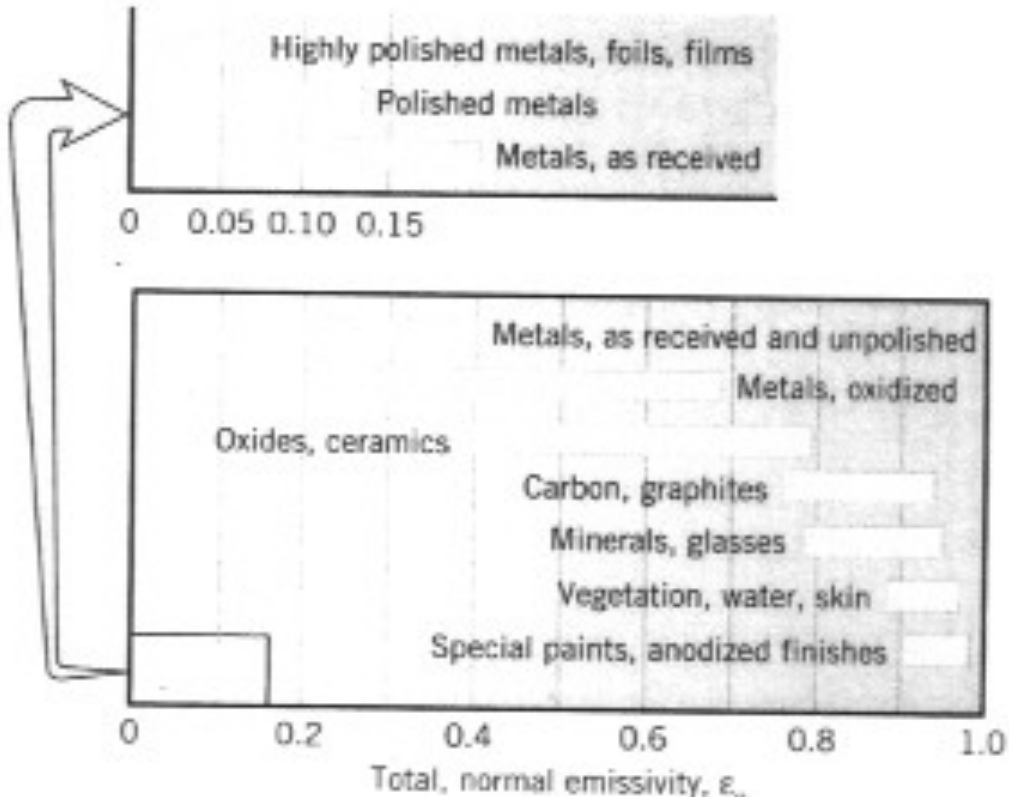
-Emissividade hemisférica total: $\varepsilon(T) = E(T)/E_{cn}(T)$

-Em geral pode-se utilizar a aproximação de que ε é praticamente constante com θ $\Rightarrow \varepsilon \approx \varepsilon(\theta=0) = \varepsilon_n$

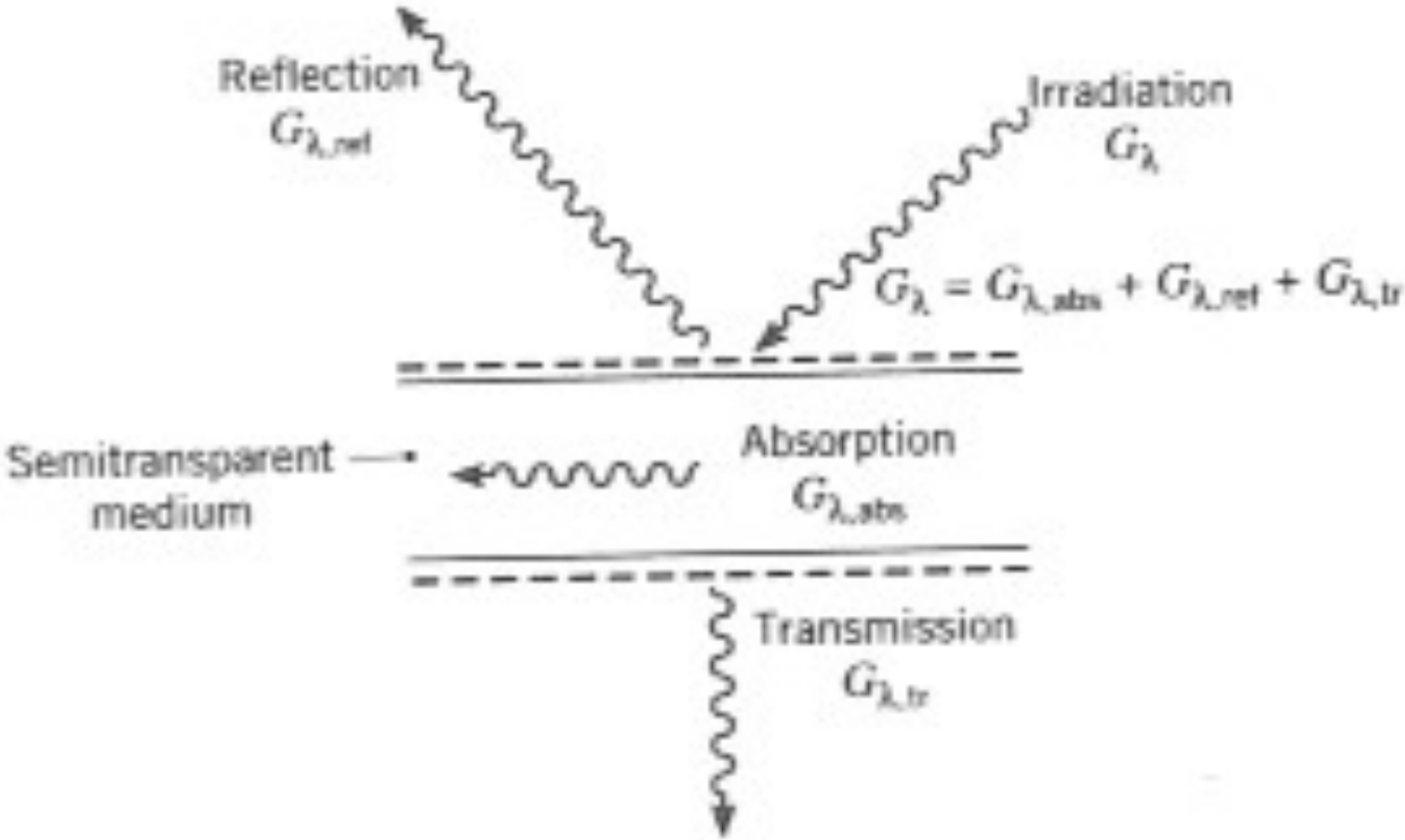




-Emissividade de superfícies metálicas é pequena
-Camadas oxidantes aumentam significativamente a emissividade de superfícies metálicas
-Emissividade de não condutores é relativamente alta
-Emissividade de condutores cresce com a temperatura
-Emissividade depende fortemente da natureza da superfície



- 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)

- Absortividade, refletividade e transmissibilidade da 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.

-<u>Absortividade</u>: determina a fração da irradiação absorvida pela pela superfície

- espectral direcional: $\alpha_{\lambda,\theta}=I_{\lambda i,abs}/I_{\lambda,i}$

- espectral hemisférica: $\alpha_{\lambda}(\lambda)=G_{\lambda,abs}(\lambda)/G_{\lambda}(\lambda)$

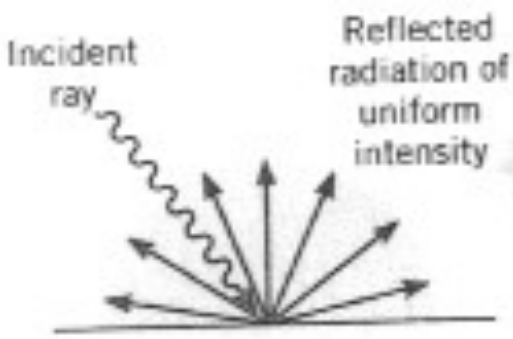
- hemisférica total: $\alpha=G_{abs}/G$

-Absortividade é pouco dependente da temperatura da superfície

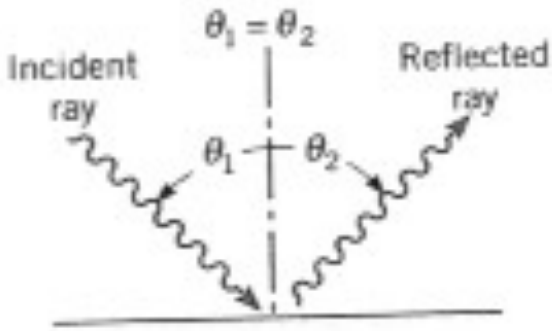
-<u>Refletividade</u>: determina a fração de radiação incidente que é refletida pela superfície

- espectral direcional: $\rho_{\lambda,\theta}=I_{\lambda i,ref}/I_{\lambda,i}$
- espectral hemisférica: $\rho_{\lambda}(\lambda)=G_{\lambda,ref}(\lambda)/G_{\lambda}(\lambda)$
- hemisférica total: $\rho=G_{ref}/G$

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



Reflexão difusa



Reflexão especular

-<u>Transmissibilidade</u>:

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

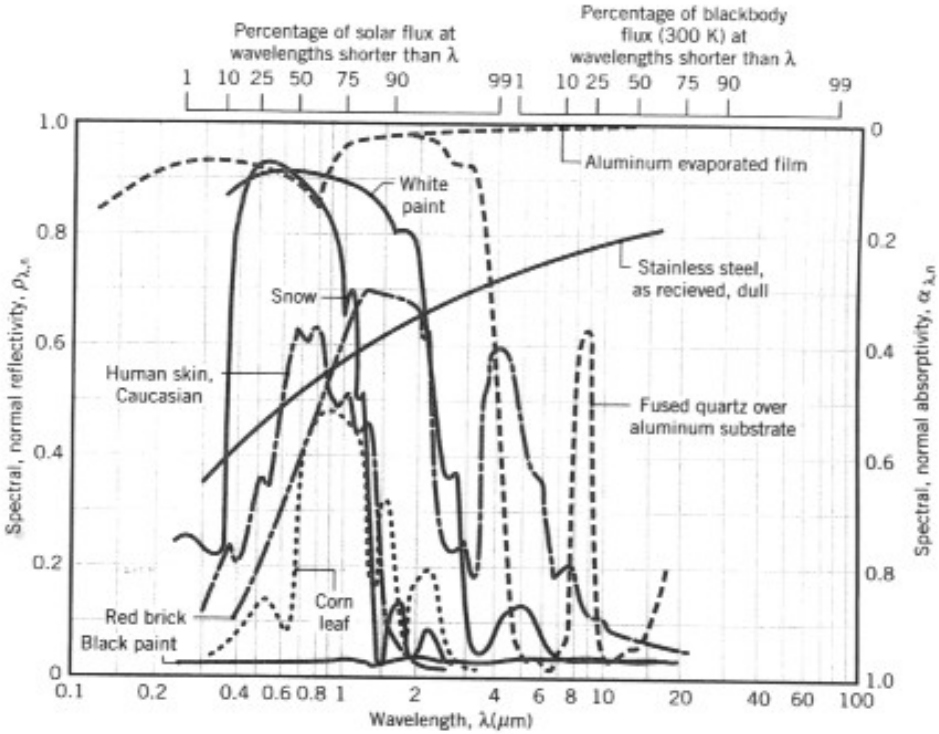
-Usando as definições acima e a equação de balanço de radiação ($G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr}$) para um meio semitransparente:

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

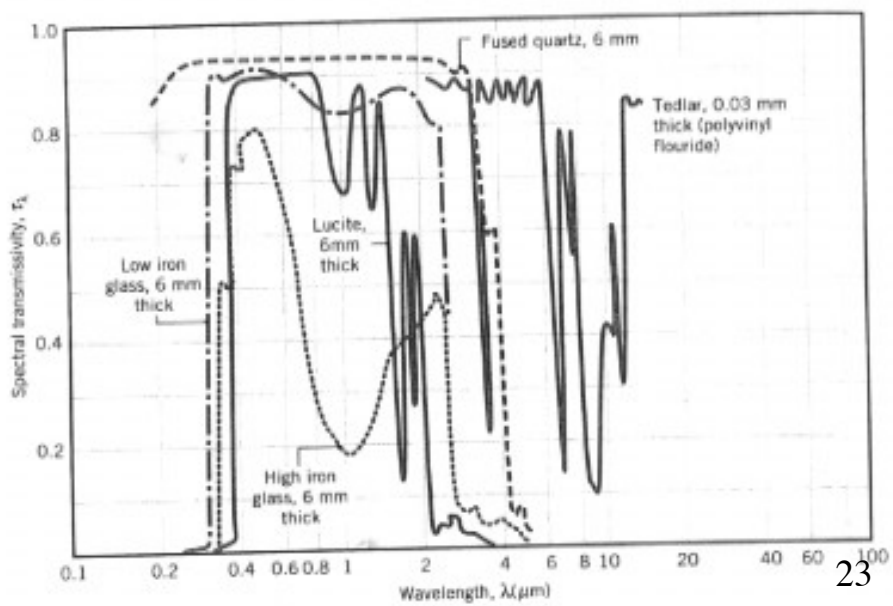
-Para propriedades médias ao longo de todo o espectro:

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

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

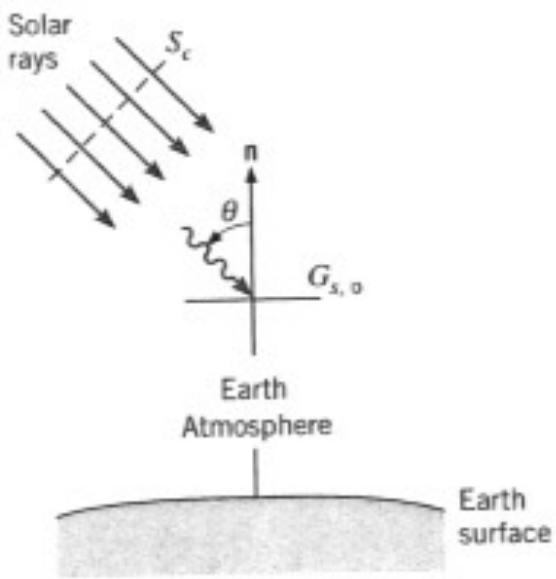
- para um CN: $\varepsilon=\alpha$

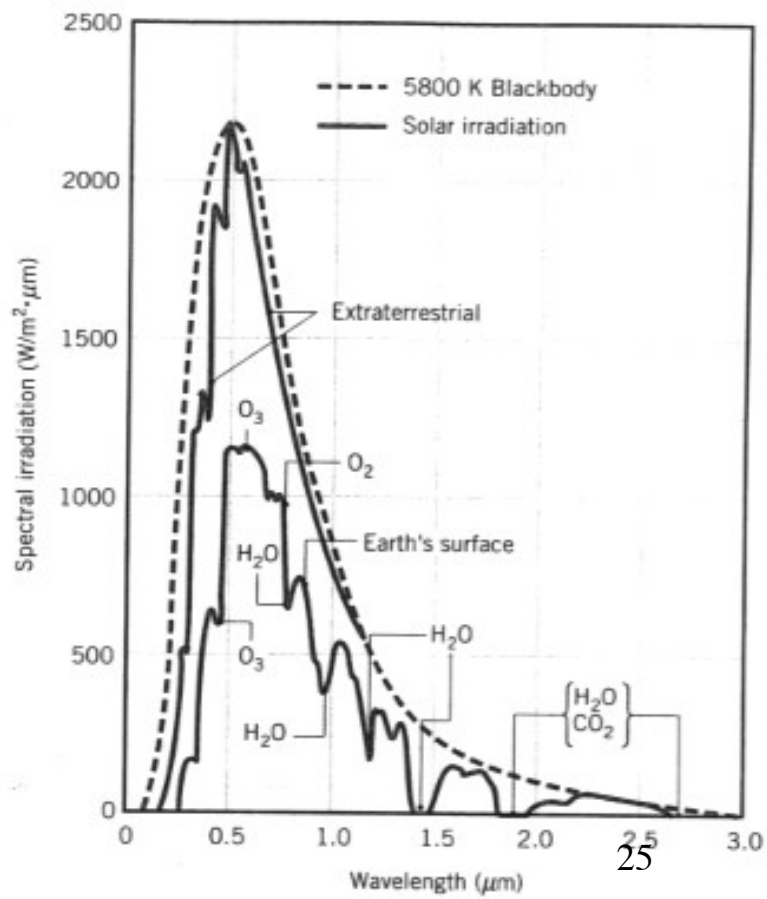
-Superfície cinza: superfície na qual ε_λ e α_λ independem de λ nas regiões espectrais da irradiação e da emissão da superfície

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

-Radiação solar:

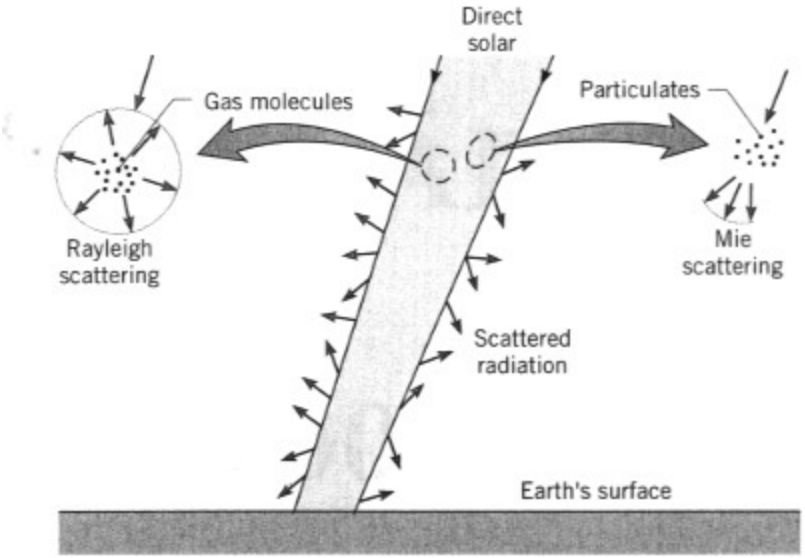
-Sol: fonte de radiação esférica (d=1.39x10^9 m) localizada a 1.5x10^{11}m da superfície terrestre





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

-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:

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

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

-Irradiação terrestre devida a emissão da atmosfera:

$$G_{atm} = \sigma T_{céu}^{\ 4}$$

RESUMO

- Poder Emissivo, E : taxa na qual a radiação é emitida de uma superfície por unidade de área

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda)d\lambda$$

- Irradiação, G: taxa na qual a radiação incide sobre uma superfície por unidade de área

$$G = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda)d\lambda$$

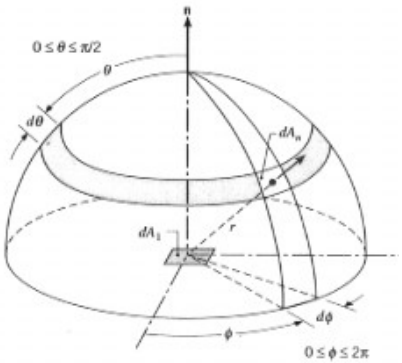
- Radiosidade, J: taxa na qual a radiação deixa uma superfície por unidade de área

$$J = \int_0^\infty J_\lambda(\lambda)d\lambda$$

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

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

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



- Intensidade espectral, I_λ: taxa que a energia radiante em λ na direção (θ,ϕ), por unidade de área da superfície normal a esta direção, por unidade do ângulo sólido $d\omega$ em torno desta direção e por unidade do intervalo do comprimento de onda dλ
  - Intensidade espectral emitida, $I_{\lambda e}$ (energia emitida, área que emite)
  - Intensidade espectral incidente, $I_{\lambda i}$ (energia incidente, área receptora)
  - Intensidade espectral emitida + refletida, $I_{\lambda e+r}$ (energia e área que deixa a superfície)

- Emissor difuso

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

$$E = \pi\, I_e$$

Radiação incidente difusa

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

$$G = \pi\, I_i$$

Refletor e emissor difuso

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

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

- ***Frações da irradiação***:
  - refletividade= ρ ; absortividade= α, transmissibilidade= τ

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

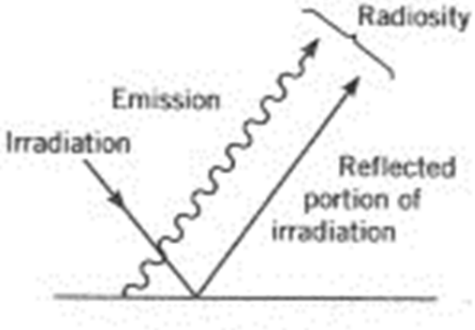
- ***Corpo negro:*** $\varepsilon = 1$, $\alpha = 1$, $\rho = \tau = 0$

Lei de Stefan Boltzmann: $E_{cn} = \sigma T^4$; $\sigma = 5{,}670 \times 10^{-8}$ W/(m^{2}K^4)

- ***Corpo real:*** $E = \varepsilon \sigma T^4$ ε = emissividade

- ***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

- ***Radiosidade***: $J = E + \rho G$



- ***Superfície opaca*** (τ=0)

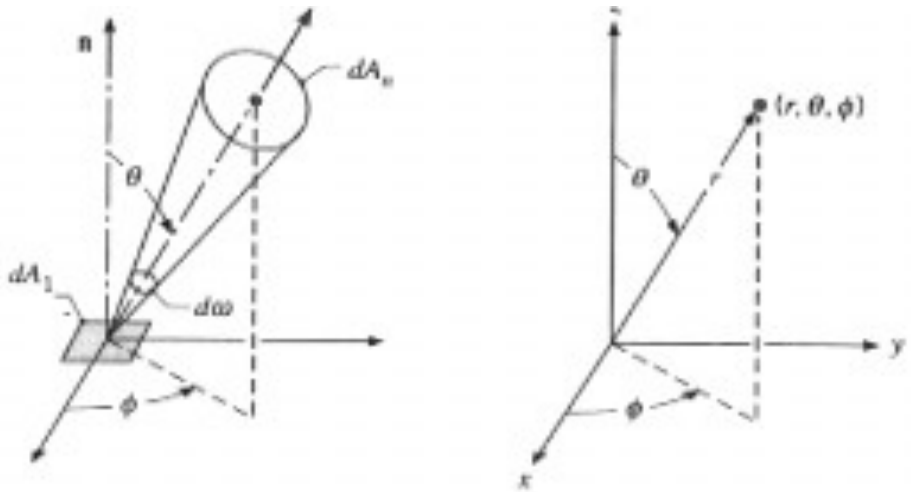
$$q''_{rad} = J - G = E + \rho G - G = E - \alpha G =$$
$$\varepsilon \sigma T^4 - \alpha G$$

- *Taxa de calor com a qual a radiação de comprimento de onda λ deixa a superfície com área dA_1 e passa pela área A_n*

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

$$dq_{1\to n} = \int_{A_1}\int_{\lambda} dq_{\lambda_{1\to n}} d\lambda = \int_{A_1}\int_{\lambda} I_{\lambda,e} dA_1 \cos\theta \, d\omega d\lambda = I_e \cos\theta \, d\omega$$

radiação emitida de dA_1
numa certa direção



ângulo sólido $d\omega = dA_n/r^2$