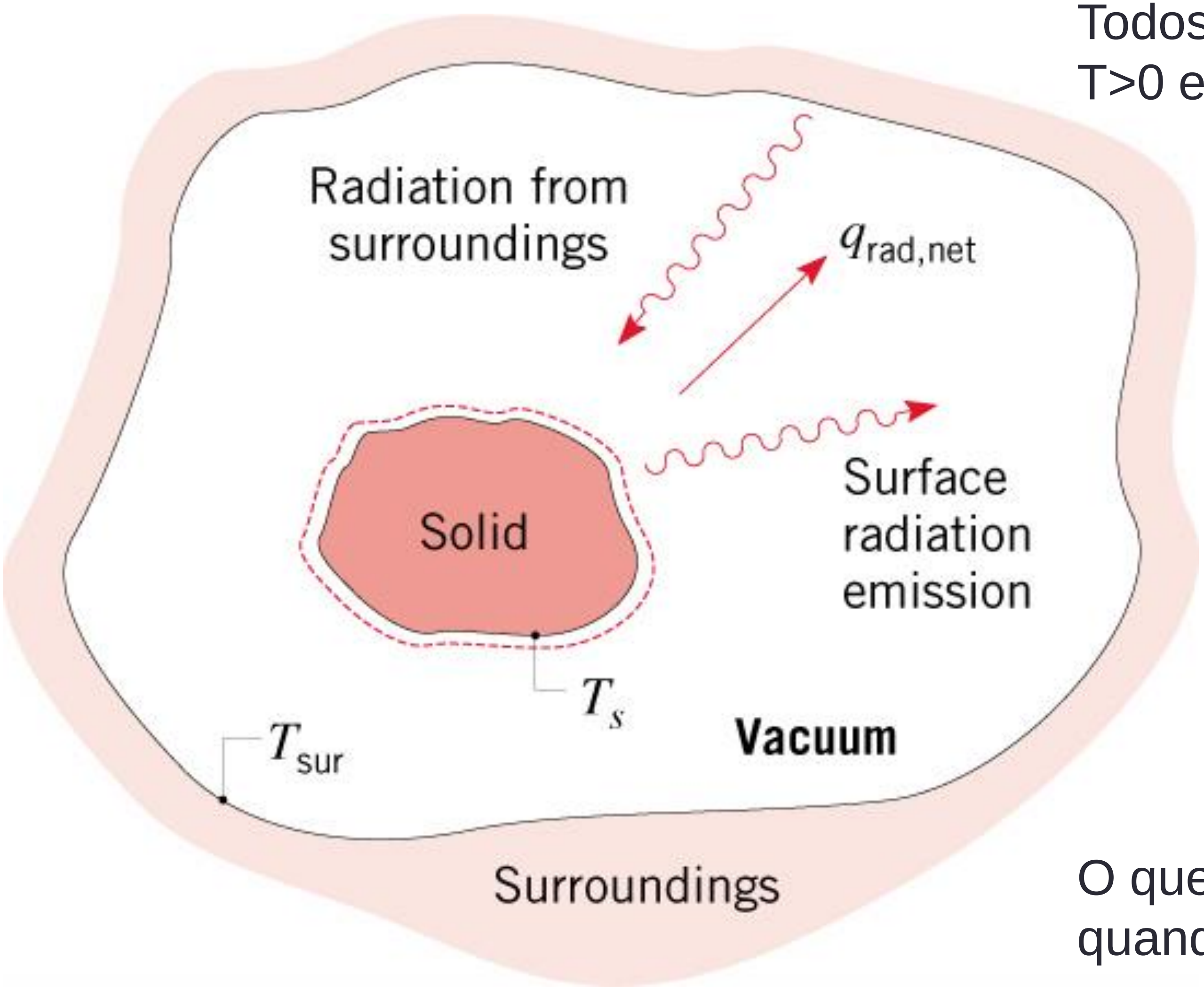
RADIAÇÃO E ENERGIA SOLAR

Miguel Centeno Brito

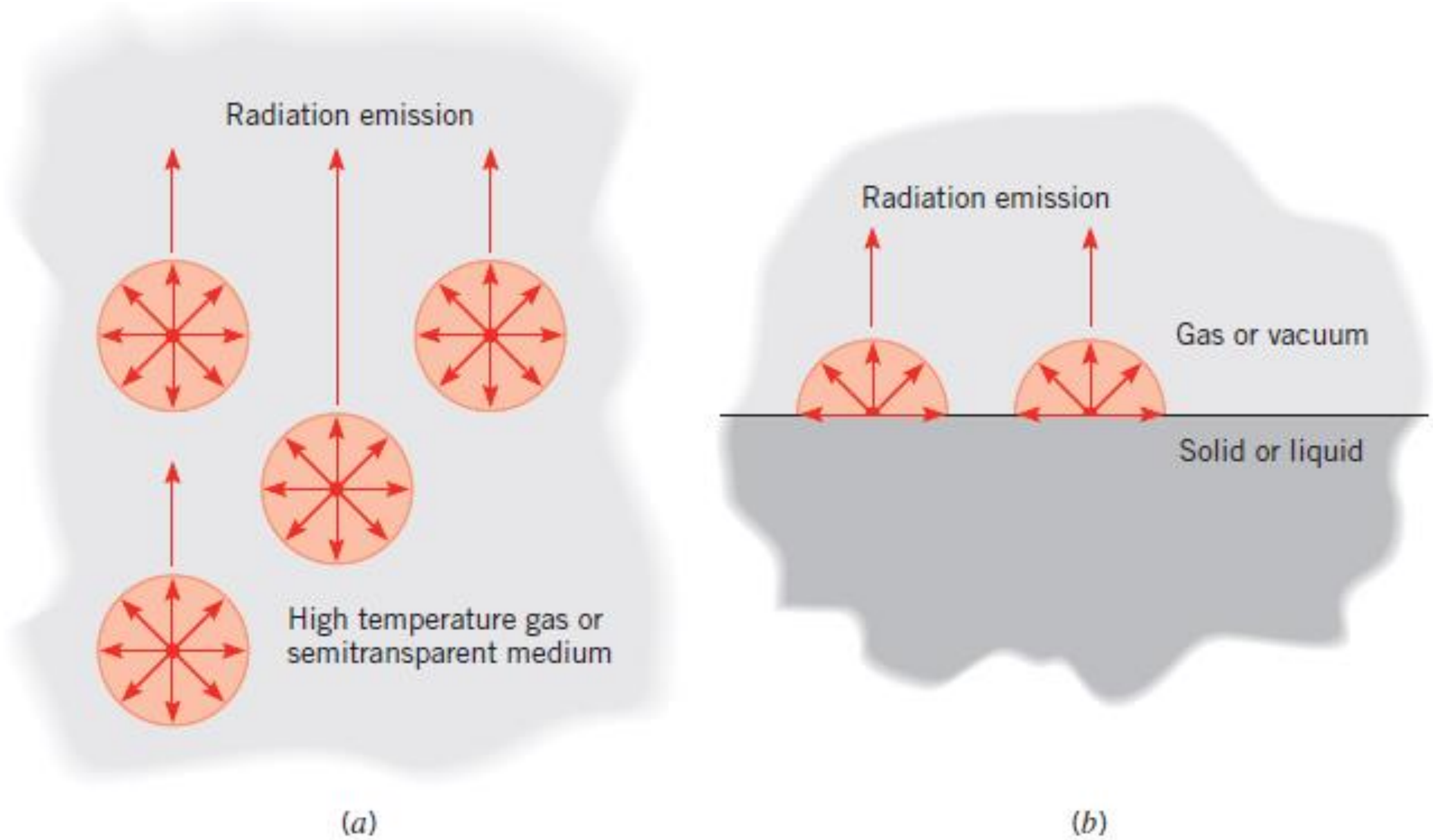
Conceitos fundamentais



Todos os corpos com T>0 emitem radiação.

O que é que acontece quando $T_s > T_{sur}$?

Conceitos fundamentais



A emissão de radiação de um gás ou de um sólido ou líquido semitransparentes é um fenómeno **volúmico**. A emissão de radiação de um sólido ou líquido opaco é essencialmente um fenómeno de **superfície**.

Conceitos fundamentais

A natureza da luz | **dualidade onda-partícula**
Alguns processos de radiação podem ser melhor descritos considerando a sua natureza corpuscular (e.g. efeito **fotoeléctrico**) enquanto outros exigem uma descrição ondulatória (e.g. fenómenos de **interferência**).

"Once and for all I want to know what I'm paying for. When the electric company tells me whether light is a wave or a particle I'll write my check."

- Partículas de luz são **fotões**.
- Ondas de luz são **ondas electromagnéticas**.

Conceitos fundamentais

A natureza da luz | **dualidade onda-partícula**
Alguns processos de radiação podem ser melhor descritos considerando a sua natureza corpuscular (e.g. efeito **fotoeléctrico**) enquanto outros exigem uma descrição ondulatória (e.g. fenómenos de **interferência**).

Comprimento de onda

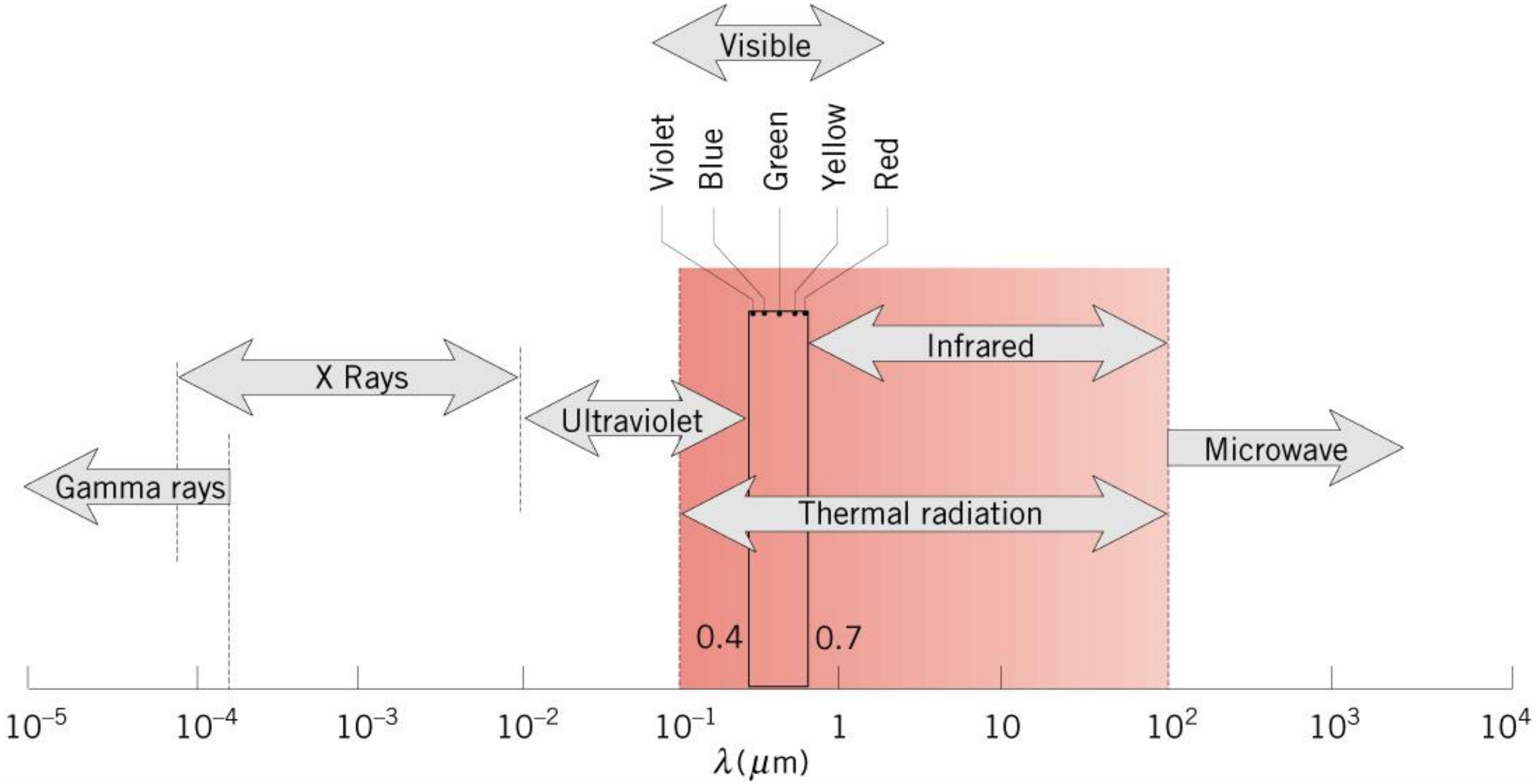
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Velocidade da luz
No caso de propagação no vácuo:
$c = 2.998 \times 10^8$ m/s

Frequência

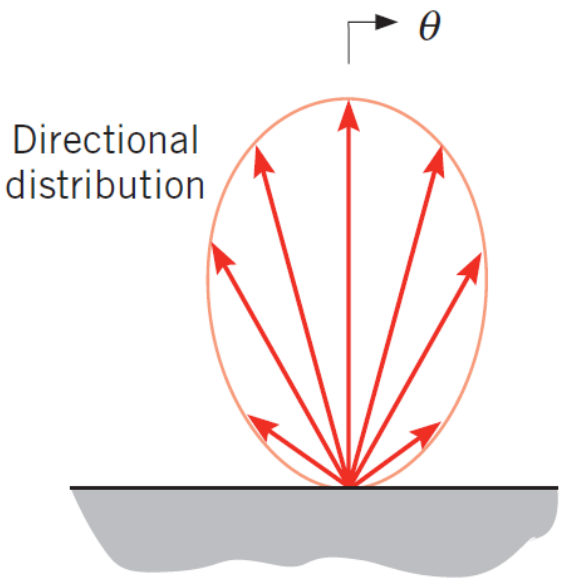
Conceitos fundamentais

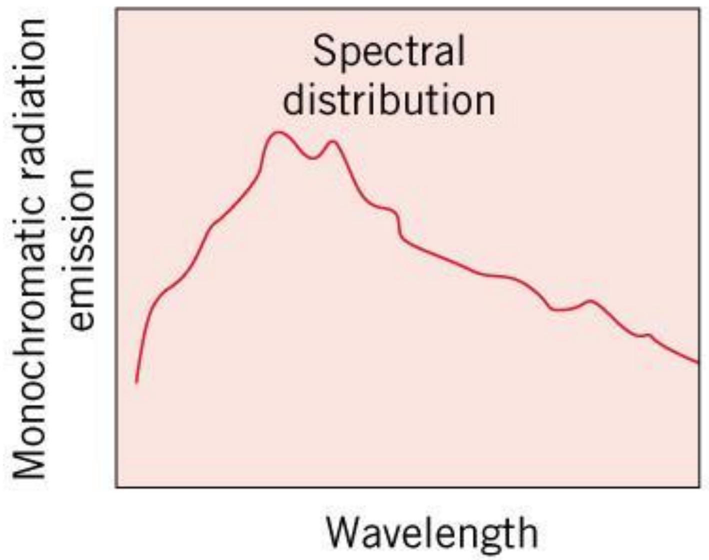
Espectro electromagnético



Emissão de radiação

Complicações:
A intensidade da radiação emitida por um corpo depende do comprimento de onda e da direcção!

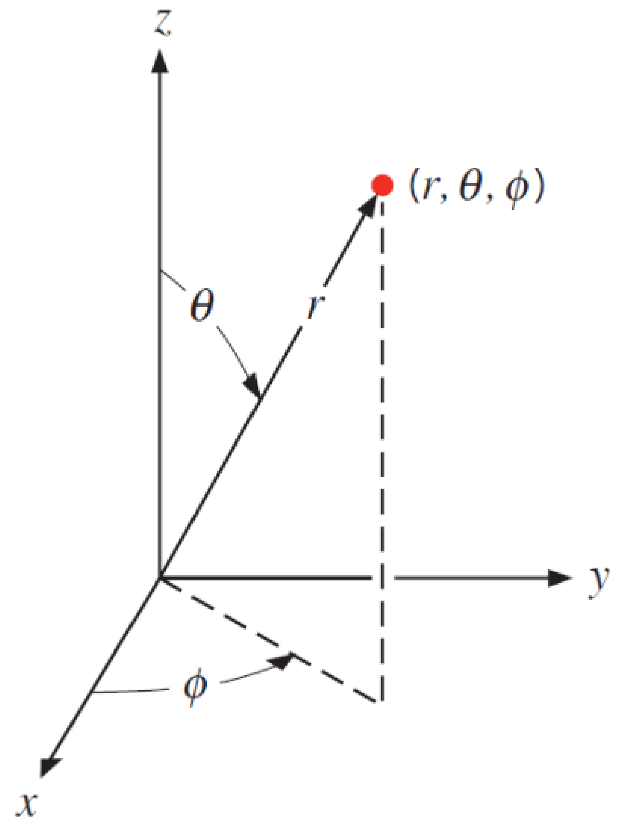




Emissão de radiação

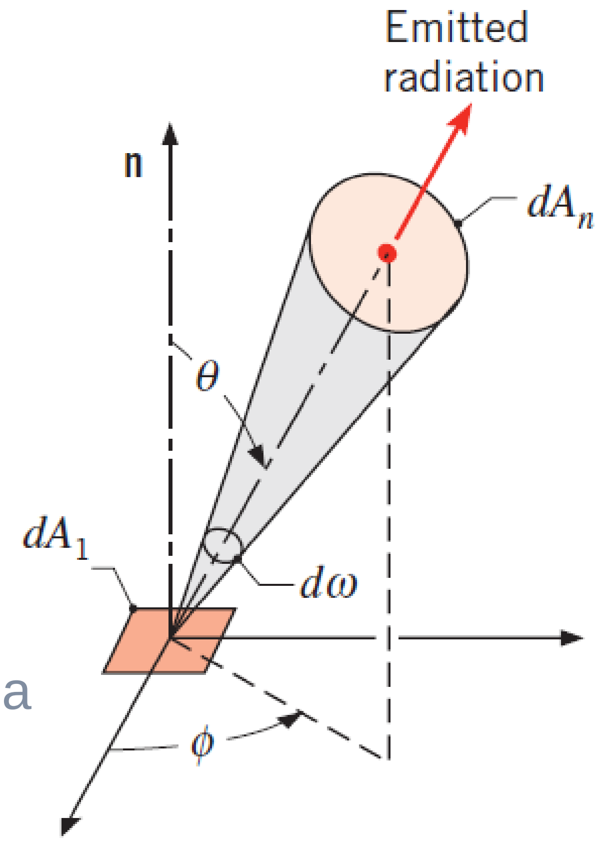
Usando coordenadas esféricas, podemos descrever a distribuição direccional da radiação com dois ângulos:

- o ângulo polar ou zénite, θ
- ângulo azimutal, ϕ



Emissão de radiação

A quantidade de radiação emitida por uma superfície dA_1 que se propaga numa dada direcção $(\theta\,,\,\phi)$ é definida pelo ângulo sólido diferencial associado a essa direcção:



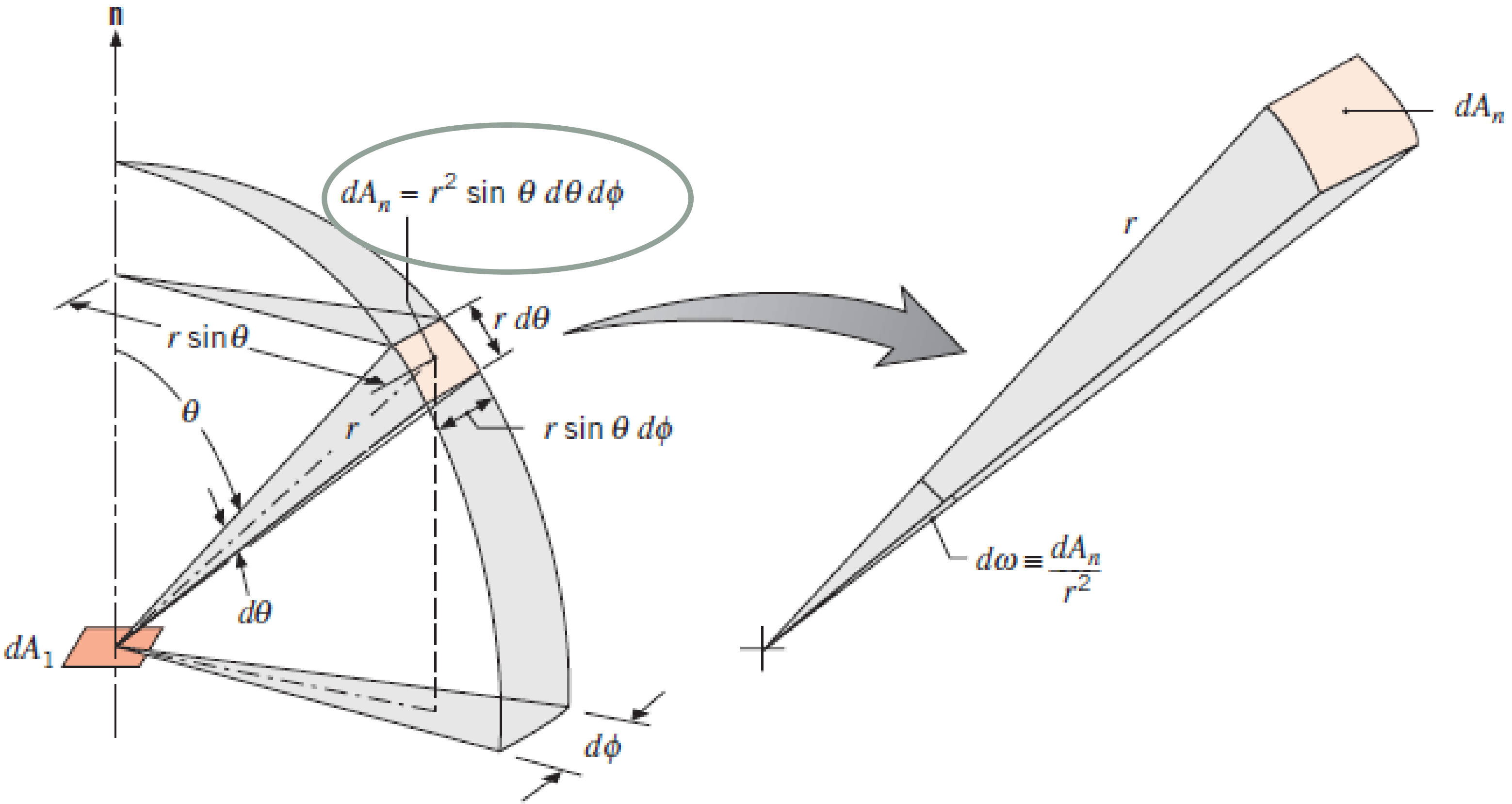
$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2}$$

dA_n é um elemento de área da superfície de uma esfera imaginária, perpendicular a $(\theta\,,\,\phi)$

Nota: por analogia a 2D, o ângulo plano diferencial é descrito como a área entre dois raios de um círculo infinitamente próximos e portanto

$$dl = d\alpha \times l \;\leftrightarrow d\alpha = \frac{dl}{r}$$

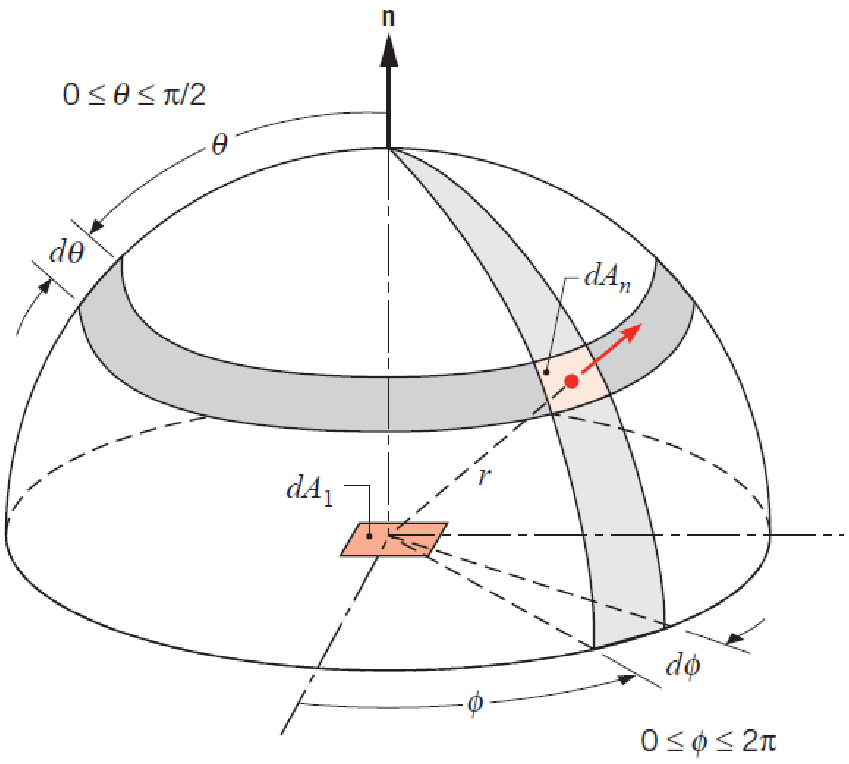
Emissão de radiação



$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} = \frac{r^2 \sin\theta\, d\theta\, d\phi}{r^2}$$ logo $$d\omega = \sin\theta\, d\theta\, d\phi$$

Emissão de radiação

Um ponto numa superfície opaca com área dA_1 emite radiação em todas os elementos de área dA_n de um hemisfério imaginário por cima da superfície.



Emissão de radiação

Um ponto numa superfície opaca com área dA_1 emite radiação em todas os elementos de área dA_n de um hemisfério imaginário por cima da superfície.

O ângulo sólido associado a esse hemisfério é simplesmente:

$$\omega_{hemi} = \int d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin\theta \, d\theta \, d\phi = 2\pi \int_0^{\pi/2} d\theta = 2\pi \ sr$$

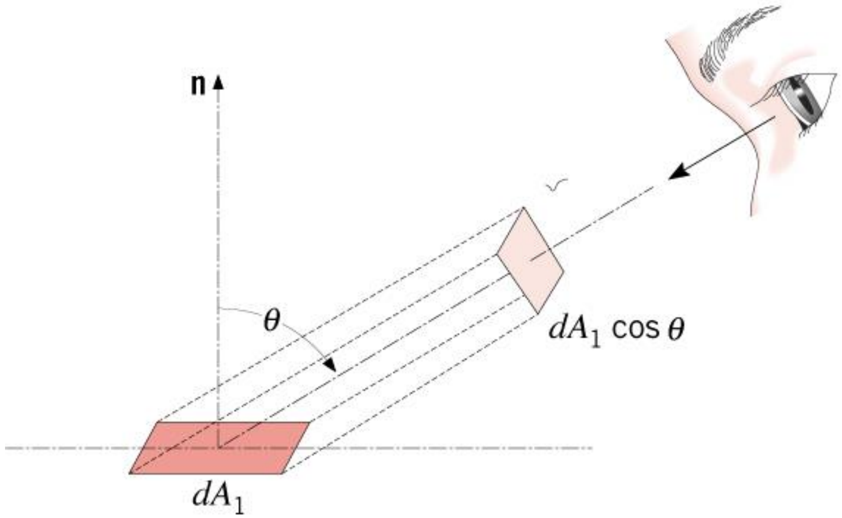
As unidades de um ângulo sólido é o estereorradiano (sr)

Emissão de radiação

Intensidade espectral de radiação

é definida como

- o fluxo de calor (W/m^2)
- segundo uma unidade de ângulo sólido para uma dada direcção ($W/m^2.sr$)
- e um intervalo unitário de comprimento de onda para um dado comprimento de onda ($W/m^2.sr.\mu m$)



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

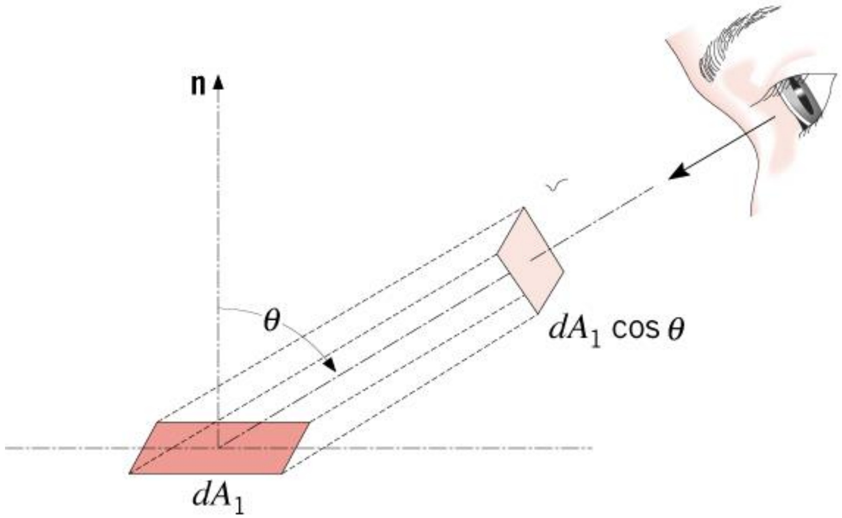
A área relevante é a **área projectada**.
Qual a intensidade espectral de radiação
quando $\theta = 0$?
quando $\theta = \pi/2$?

Emissão de radiação

Intensidade espectral de radiação

é definida como

- o fluxo de calor (W/m^2)
- segundo uma unidade de ângulo sólido para uma dada direcção ($W/m^2.sr$)
- e um intervalo unitário de comprimento de onda para um dado comprimento de onda ($W/m^2.sr.\mu m$)



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

Se a intensidade espectral de radiação não varia com a direcção, dizemos que a superfície é **difusa**, e a radiação é **isotrópica**.

Emissão de radiação

Intensidade de radiação

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

$$dq_\lambda\equiv\frac{dq}{d\lambda}=I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi)dA_1\cos\theta\cdot d\omega$$

Taxa a que radiação com o comprimento de onda λ sai de dA_1 e passa por dA_n
Tem unidades de W/μm.

Por unidade de área da superfície emissora, o **fluxo de calor** é portanto

$$dq''_\lambda\equiv\frac{dq_\lambda}{dA_1}=I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\cdot d\omega=I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta\cdot d\theta\cdot d\phi$$

pois

$$d\omega=\sin\theta\;d\theta\;d\phi$$

Emissão de radiação

Conhecendo a intensidade de radiação espectral, e as suas distribuições espectrais e direccionais, podemos determinar o fluxo de calor emitido por uma superfície integrando dq''_λ.

A **potência espectral de emissão** (W/m² µm) é a emissão espectral para todas as direcções possíveis:

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

A **potência emitida total** (W/m²) é a emissão para todas as direcções e comprimentos de onda possíveis:

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

Emissão de radiação

Um **emissor difuso** é uma superfície que emite radiação que é independente da direcção, ou seja

$$I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi)=I_{\lambda,e}(\lambda)$$

Intensidade espectral de um emissor difuso

Nesse caso podemos escrever

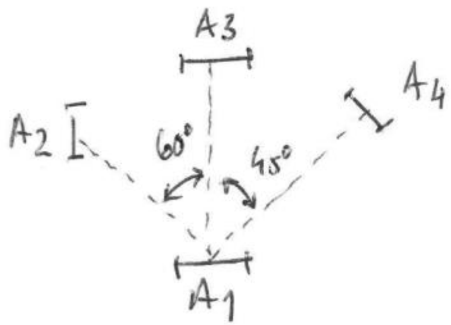
$$E_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda)\cos\theta\sin\theta\cdot d\theta\cdot d\phi = \pi\, I_{\lambda,e}(\lambda)$$

e

$$E = \pi\, I_e$$

Intensidade total de um emissor difuso

Exemplo



Emissão de radiação difusa

$I_n = 7000$ W/m² sr (direcção normal)

$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 10^{-3}\ m^2$

distância = 0.5 m

a) Qual a intensidade da emissão em cada uma das três direcções?

b) Quais os ângulos sólidos correspondentes às três superfícies?

c) Qual a radiação interceptada pelas três superfícies?

Exemplo

RESPOSTAS

(hipótese: vamos assumir que $\frac{A_j}{r_j^2} \ll 1$ e portanto podemos considerar superfícies diferenciais).

a) Da definição de emissor difuso a intensidade de radiação é igual em todas as direcções, e portanto

$$I = 7000 \ W/m^2.sr$$

Exemplo

b) $$d\omega = \frac{dA_n}{r^2}$$

Como A_3 e A_4 são normais à direcção da radiação o sólido ângulo é directamente:

$$\omega_{3-1} = \omega_{4-1} = \frac{A_3}{r^2} = \frac{10^{-3}\ m^2}{(0.5\ m)^2} = 4 \times 10^{-3}\ sr$$

Para A_2 precisamos de determinar a área projectada

$$\omega_{2-1} = \frac{A_2 \cos \theta_2}{r^2} = \frac{10^{-3}\ m^2 \cdot \cos 30^\circ}{(0.5\ m)^2} = 3.46 \times 10^{-3}\ sr$$

Exemplo

c) $q_{1-j} = I \times A_1 \cos\beta_1 \cdot \omega_{j-1}$ $\quad (j = 2, 3, 4)$

↳ ângulo entre normal a A_1 e a direcção da radiação

logo

$$q_{1-2} = 7000 \frac{W}{m^2 sr} \times 10^{-3} m^2 \times \cos 60° \times 3.46 \times 10^{-3} sr$$

$$= 12.1 \times 10^{-3} W$$

$$q_{1-3} = 7000 \frac{W}{m^2 sr} \times 10^{-3} m^2 \times \cos 0° \times 4 \times 10^{-3} sr$$

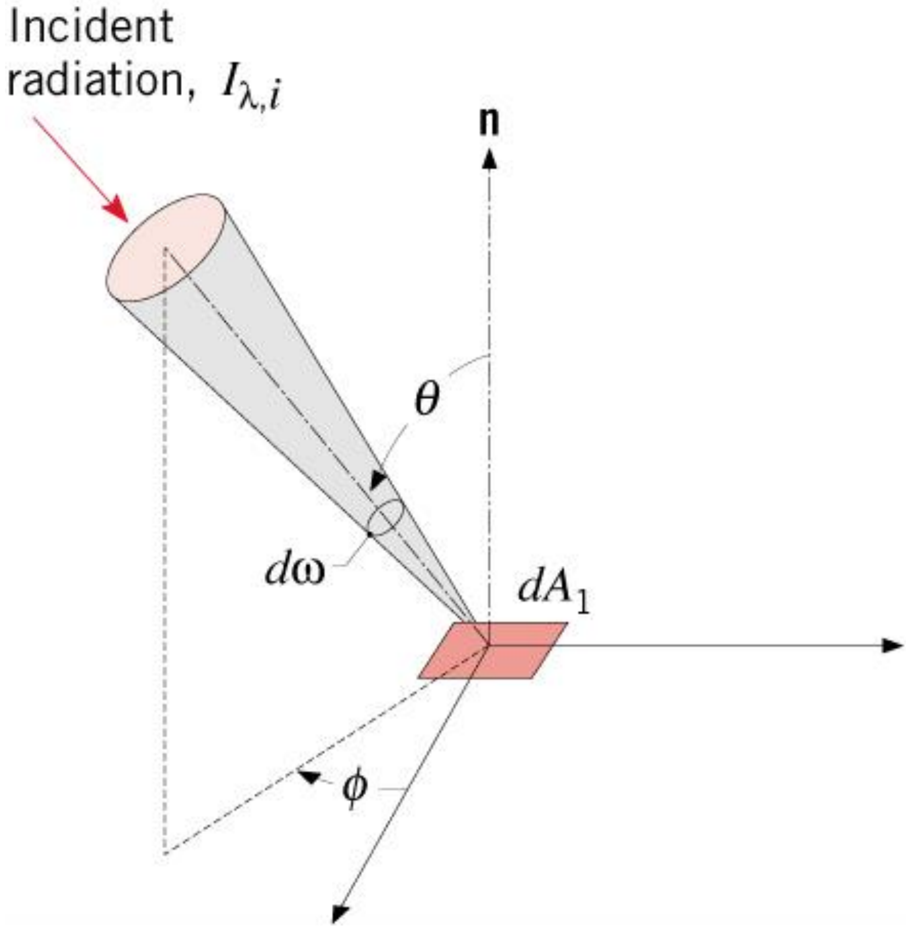
$$= 28 \times 10^{-3} W$$

$$q_{1-4} = 7000 \frac{W}{m^2 sr} \times 10^{-3} m^2 \times \cos 45° \times 4 \times 10^{-3} sr$$

$$= 19.8 \times 10^{-3} W$$

Radiação incidente

Da mesma forma que fizemos para a radiação emitida por uma superfície, podemos descrever a intensidade espectral da radiação incidente, com comprimento de onda λ, proveniente de uma direcção (θ, ϕ) por unidade de área da superfície que intercepta essa radiação, por unidade de ângulo sólido e unidade de comprimento de onda,.



Radiação incidente

A soma da radiação incidente para todas as direcções é denominada **IRRADIAÇÃO.**

A **irradiação espectral** (W/m^2 μm) é a radiação incidente espectral de todas as direcções possíveis:

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

Notar o *i* de incidente em vez de o *e* de emissão!!

Radiação incidente

A soma da radiação incidente para todas as direcções é denominada **IRRADIAÇÃO.**

A **irradiação espectral** (W/m^2 μm) é a radiação incidente espectral de todas as direcções possíveis:

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

A **irradiação total** (W/m^2) é a radiação incidente de todas as direcções e comprimentos de onda possíveis:

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

Radiação incidente

No caso de radiação incidente ser difusa $I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)=I_{\lambda,i}(\lambda)$

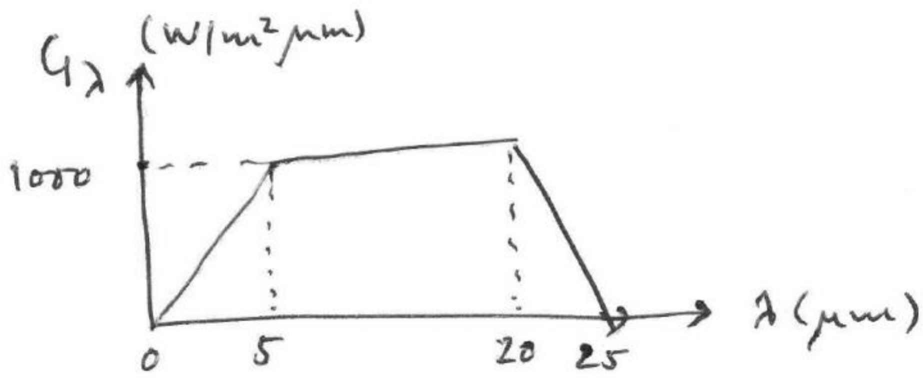
temos

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

$$G = \pi\, I_i$$

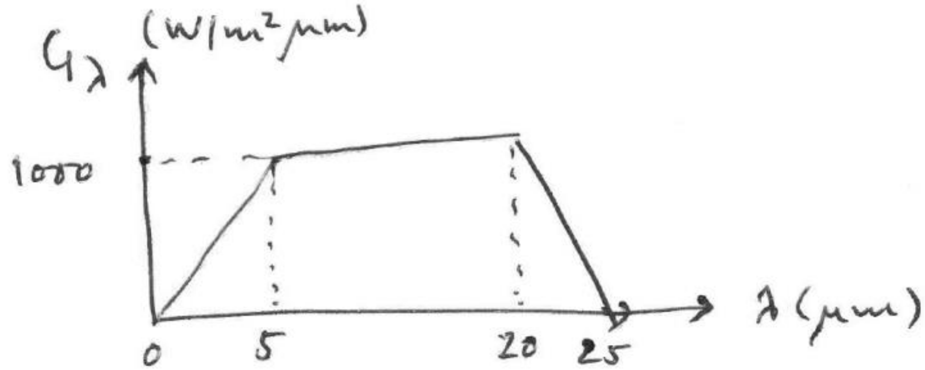
Exemplo

Considerar a seguinte distribuição espectral de irradiação.



Determinar a irradiação total?

Exemplo



RESPOSTA

$$G = \int_0^\infty G_\lambda \, d\lambda$$

ou, integrando por partes

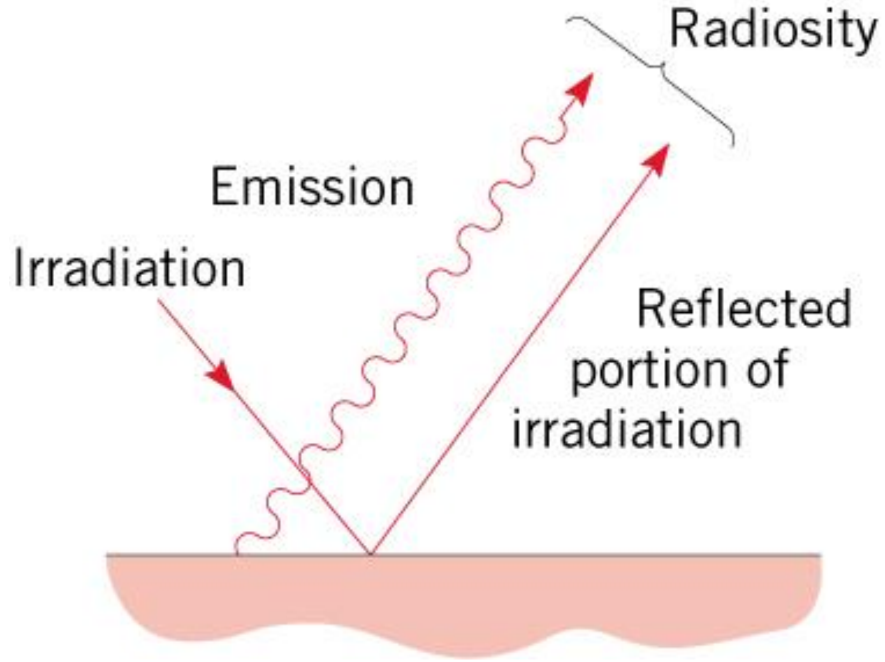
$$G = \int_0^5 G_\lambda \, d\lambda + \int_5^{20} G_\lambda \, d\lambda + \int_{20}^{25} G_\lambda \, d\lambda + \int_{25}^{\infty} G_\lambda \, d\lambda$$

$$G = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot (5-0) + 1000\,(20-5) + \frac{1}{2} \cdot 1000\,(25-20) + 0$$

$$G = 20\,000 \ W/m^2$$

Radiosidade

É definida como a toda a radiação que sai da superfície, nomeadamente a radiação emitida e a radiação reflectida.



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

$$J = \int_0^{\infty} J_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda \qquad J_\lambda(\lambda) = \pi\, J_{\lambda,e+r}(\lambda) \qquad J = \pi\, I_{e+r}$$

Radiação do corpo negro

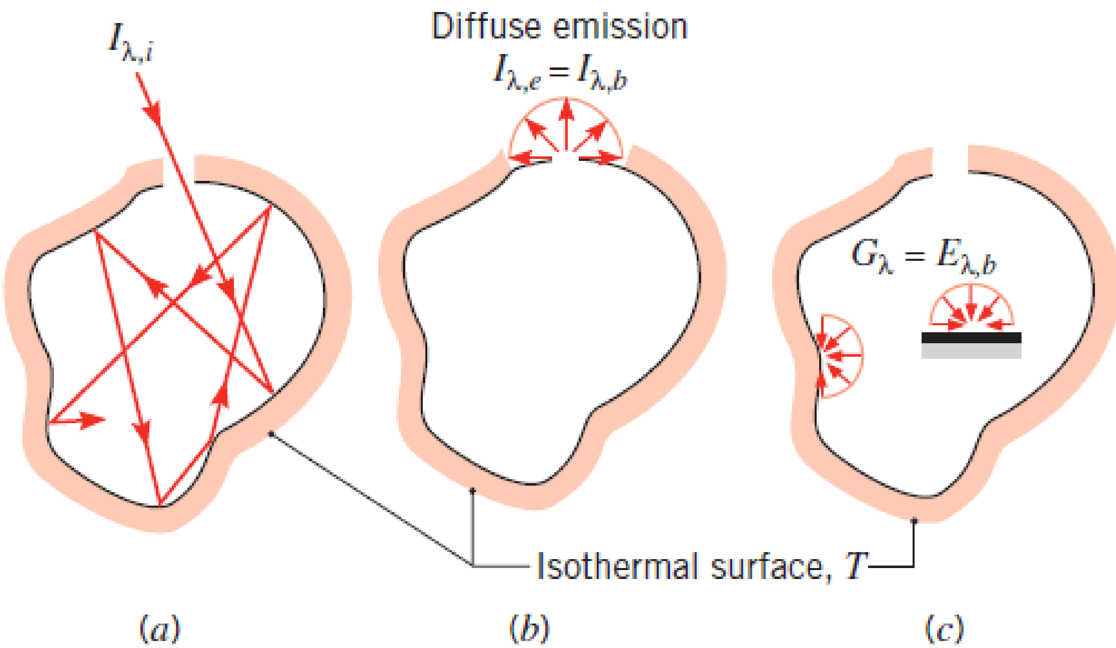
Corpo negro é uma superfície ideal com as seguintes características:

- Absorve toda a radiação incidente, independente da direcção e do comprimento de onda
- Para uma determinada temperatura e comprimento de onda, 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 direcção; logo, o corpo negro é um emissor difuso.

Corpo negro é um absorvedor e emissor perfeito, que serve como padrão de comparação para as propriedades radiativas de superfícies reais.

Radiação do corpo negro

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



Absorção completa

Emissão difusa pela abertura

Irradiação difusa nas superfícies internas

A radiação de corpo negro existe na cavidade independentemente da sua superfície ser altamente reflectiva ou absorvente!!

Radiação do corpo negro

Distribuição de Planck

A distribuição espectral da emissão do corpo negro é dada por

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

h = 6.6256x10^{-34} J.s

k = 1.3805x10^{-23} J/K

c_o=2.998x10^{8} m/s

T é temperatura do corpo negro (K)

Radiação do corpo negro

Distribuição de Planck

A potência espectral emitida pelo corpo negro é

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

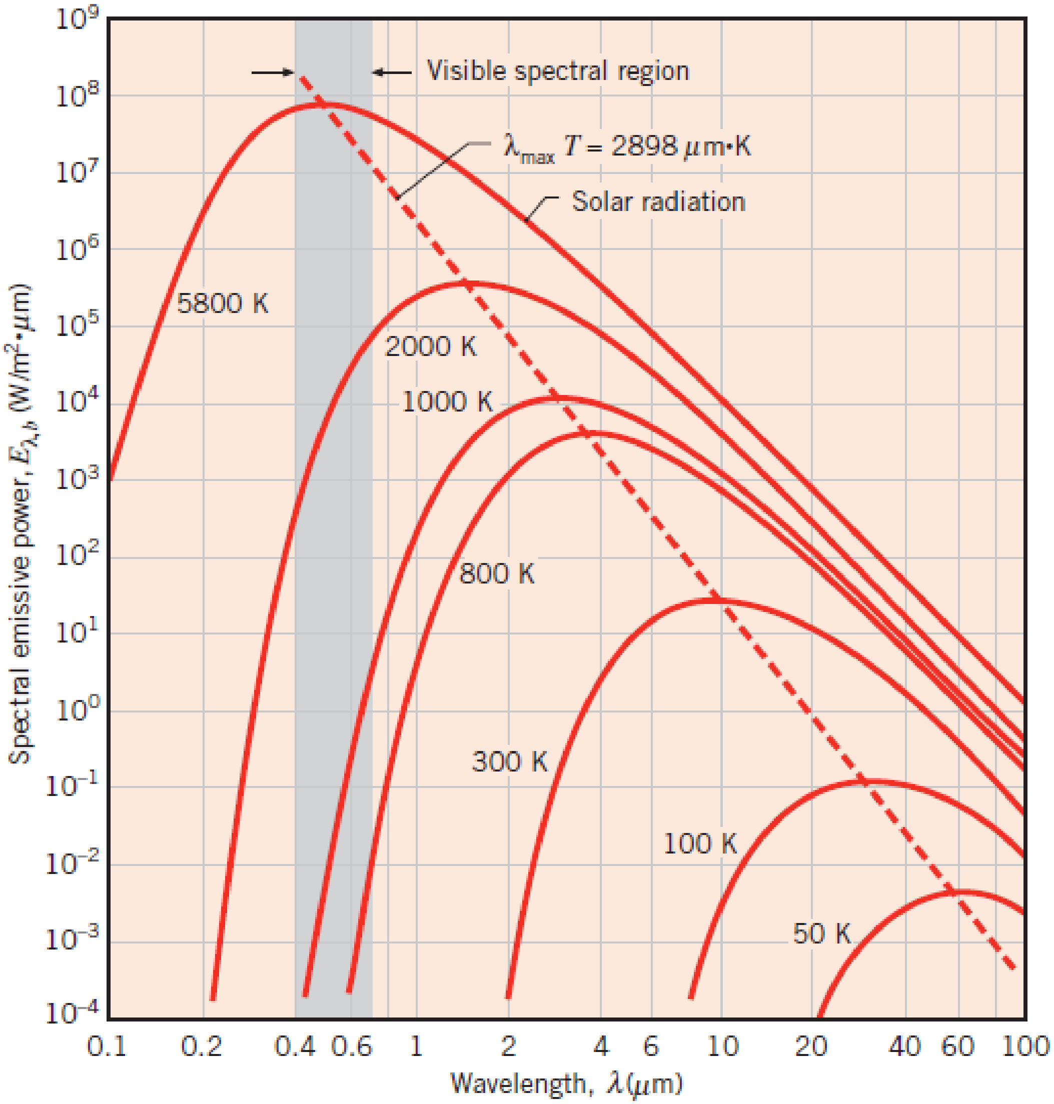
$C_1 = 2\pi h c_o = 3.742 \times 10^8$ W. $\mu m^4/m^2$
$C_2 = (h c_o / k) = 1.439 \times 10^4$ μm.K

Radiação do corpo negro

Distribuição de Planck

Notar que:

- A radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda;
- Para todos os comprimentos de onda, a magnitude da radiação emitida cresce com a temperatura;
- Pico de radiação diminui com o aumento da temperatura;

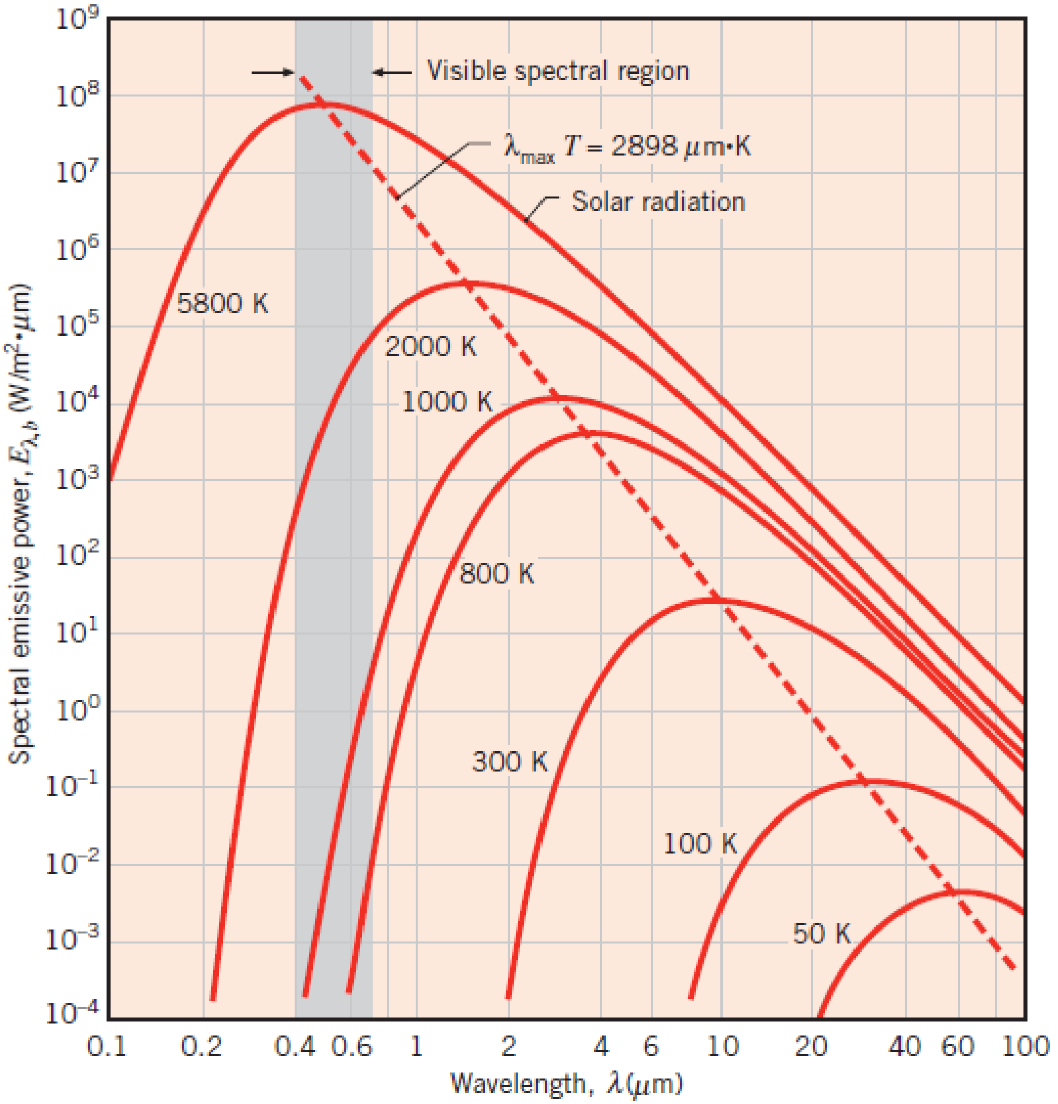


Radiação do corpo negro

Distribuição de Planck

… e ainda:

- A radiação solar pode ser aproximada por um corpo negro a 5800 K;
- Uma fracção importante da potência está na região visível do espectro;
- Por outro lado, para T< 800 K, a emissão é predominantemente na região infravermelho, e não é visível ao olho humano.



Radiação do corpo negro

Distribuição de Planck

A potência espectral emitida pelo corpo negro é

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

Derivando em ordem a λ e igualando a zero obtemos a Lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{max} T = C_3$$

C_3 = 2898 μm K

- Para o espectro solar (5800K) o pico encontra-se no centro da região do visível (0.5μm).
- Para uma lâmpada de luz branca de filamento de tungsténio (2900 K) o pico encontra-se já no infravermelho (1μm)

Radiação do corpo negro

Lei de Stefan-Boltzman

A potência espectral emitida pelo corpo negro é

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

E portanto a potência emitida por um corpo negro é

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

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

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

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

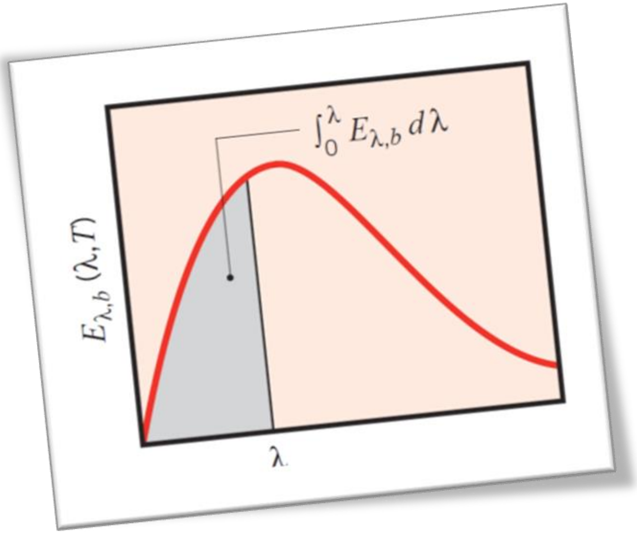
Porque a emissão do corpo negro é difusa!

Radiação do corpo negro

Emissão por bandas

A fracção da emissão total de um corpo negro que está num intervalo de comprimentos de onda (banda) é dado por:

$$F_{(0\to\lambda)} \equiv \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda,b}\, d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\sigma T^4} = \int_0^{\lambda T} \frac{E_{\lambda,b}}{\sigma T^5}\, d(\lambda T) = f(\lambda T)$$



Radiação do corpo negro

Emissão por bandas

A fracção da emissão total de um corpo negro que está num intervalo de comprimentos de onda (banda) é dado por:

$$F_{(0\to\lambda)} \equiv \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda,b}\, d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\sigma T^4} = \int_0^{\lambda T} \frac{E_{\lambda,b}}{\sigma T^5}\, d(\lambda T) = f(\lambda T)$$

Para um intervalo entre λ_1 e λ_2 temos

$$F_{(\lambda_1\to\lambda_2)} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{\lambda,b}\, d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\sigma T^4} = F_{(0\to\lambda_2)} - F_{(0\to\lambda_1)}$$

Radiação do corpo negro

Emissão por bandas

TABLE 12.2 Blackbody Radiation Functions

λT $(\mu m \cdot K)$	$F_{(0\to\lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda,T)/\sigma T^5$ $(\mu m \cdot K \cdot sr)^{-1}$	$\dfrac{I_{\lambda,b}(\lambda,T)}{I_{\lambda,b}(\lambda_{max},T)}$
200	0.000000	0.375034×10^{-27}	0.00000
400	0.000000	0.490335×10^{-13}	0.00000
600	0.000000	0.104046×10^{-8}	0.00001
800	0.000016	0.991126×10^{-7}	0.00137
1,000	0.000321	0.118505×10^{-5}	0.016406
1,200	0.002134	0.523927×10^{-5}	0.072534
1,400	0.007790	0.134411×10^{-4}	0.186082
1,600	0.019718	0.249130	0.344904
1,800	0.039341	0.375568	0.519949
2,000	0.066728	0.493432	0.683123
2,200	0.100888	0.589649×10^{-4}	0.816329
2,400	0.140256	0.658866	0.912155
2,600	0.183120	0.701292	0.970891
2,800	0.227897	0.720239	0.997123
2,898	0.250108	0.722318×10^{-4}	1.000000
3,000	0.273232	0.720254×10^{-4}	0.997143
3,200	0.318102	0.705974	0.977373
3,400	0.361735	0.681544	0.943551
3,600	0.403607	0.650396	0.900429
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

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