

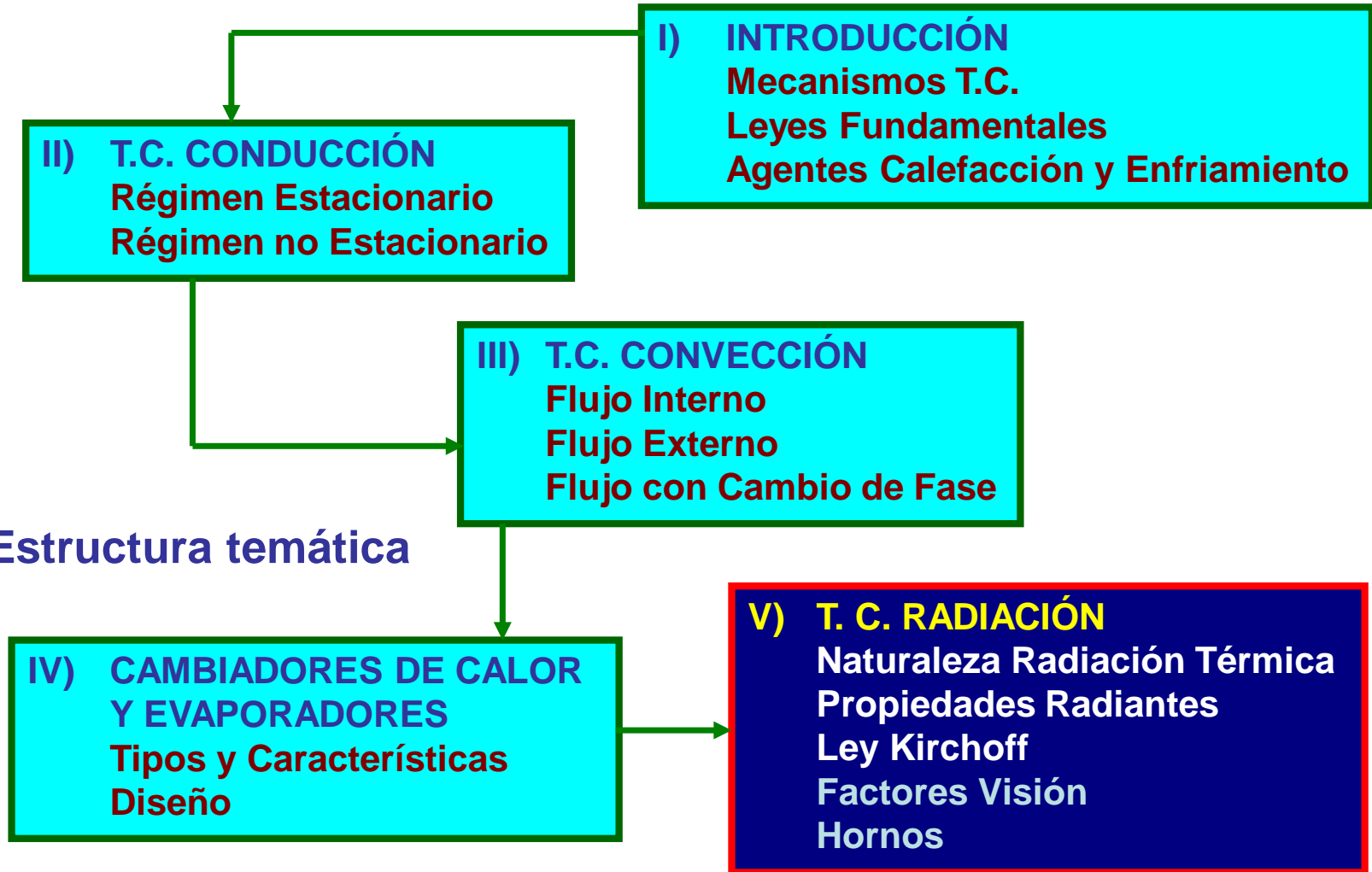
**Ingeniería Térmica**

**Curso 2016/17**

**TEMA 9.-**

**TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN I**

# TEMA 8.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN I



Estructura temática

# TEMA 8.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN I

## OBJETIVOS

**Objetivo general:** Este tema tiene por finalidad aprender a evaluar el flujo de calor que se transmite por radiación desde una superficie.

### **Objetivos específicos:**


- **Conocer las leyes fundamentales que rigen la radiación térmica.**
- **Evaluar el flujo de calor que se transmite por radiación en una determinada aplicación.**
- **Determinar la temperatura de una superficie que intercambia calor por radiación con el ambiente.**
- **Explicar y definir términos como: Radiación térmica, Cuerpo negro, Cuerpo gris, Emisividad, Superficie refractaria, Factor de visión.**

# TEMA 8.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN I

## CONTENIDOS DEL TEMA

- 1) **Introducción. Naturaleza de la radiación térmica**
- 2) **Definiciones matemáticas importantes**
- 3) **Intensidad de la radiación**
- 4) **Emisión de la radiación**
- 5) **Recepción de la radiación, radiosidad**
- 6) **Cuerpo negro**
- 7) **Emisión de radiación en superficies reales**
- 8) **Leyes de Kirchoff: superficies grises.**
- 9) **Propiedades radiantes de las superficies reales. Radiación medioambiental.**

# INTRODUCCIÓN. NATURALEZA DE LA RADIACIÓN TÉRMICA

PROCESO MEDIANTE EL CUAL UN CUERPO EMITE ENERGÍA RADIANTE EN VIRTUD DE SU TEMPERATURA ( $T > 0 \text{ K}$ )  Dualidad onda - corpúsculo

**EMISIÓN**  $e = h\nu$  (fotón)

**$\nu$**  : frecuencia de la emisión ( $\text{s}^{-1}$ )

**$h$**  : cte de Planck:  $6,62377 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

## RECEPCIÓN

aumenta la energía del cuerpo (rotación, traslación, vibración)

**TRANSMISIÓN** (ondas electromagnéticas)

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

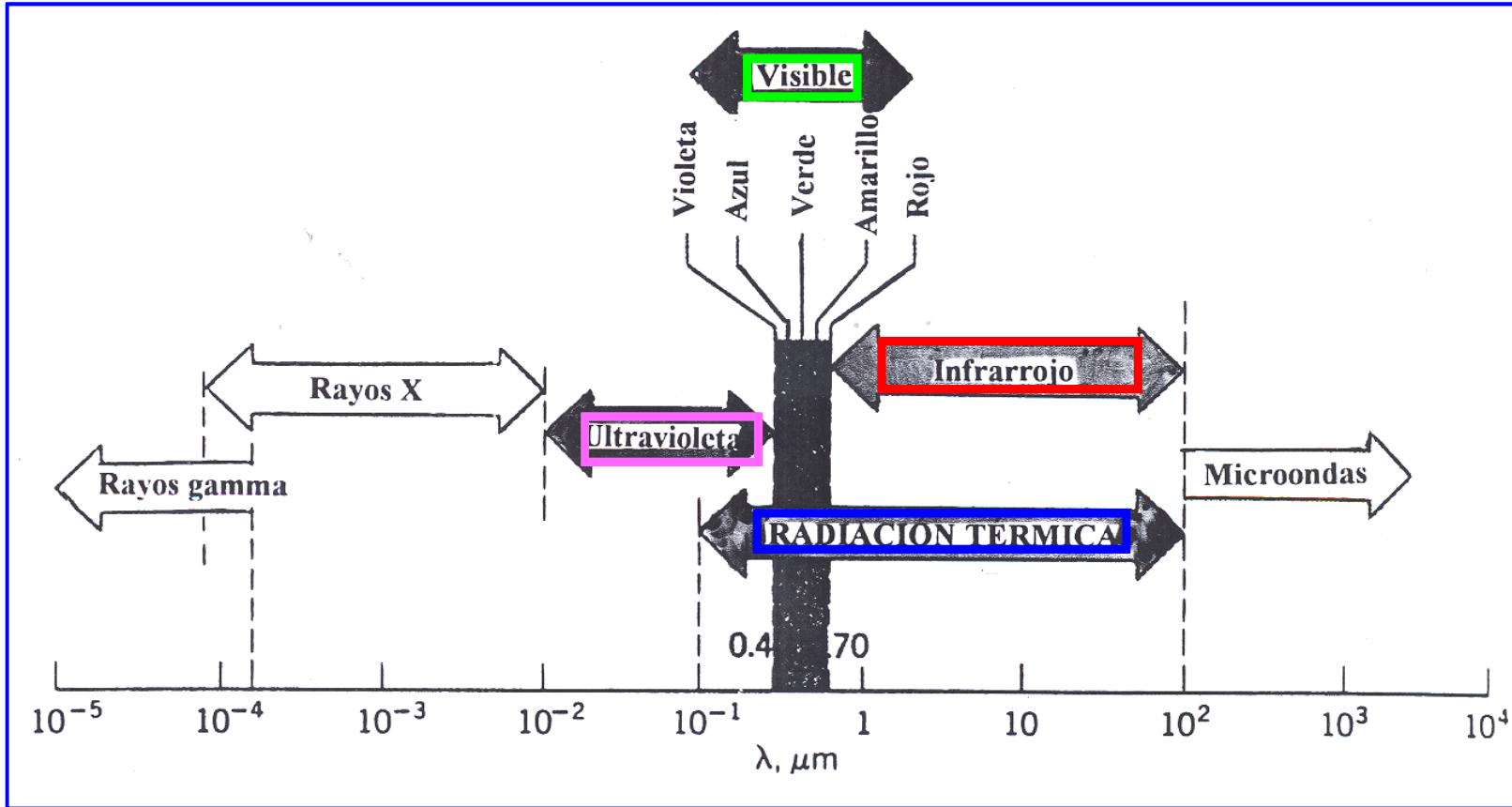
$$c_0 = 2,99776 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$n = \frac{c_0}{c}$$

$$n \cong 1 \text{ (gases)} \quad 1,5 \text{ (sólidos y líquidos)}$$

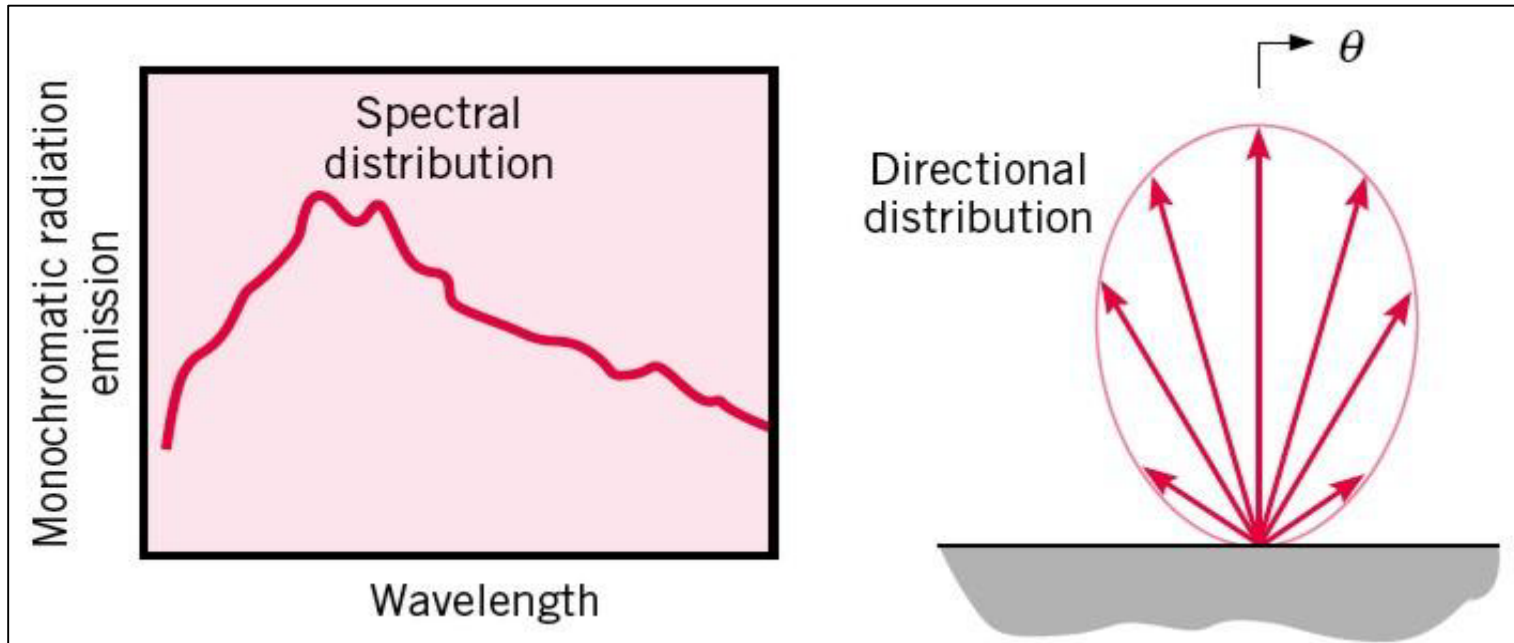
# INTRODUCCIÓN. NATURALEZA DE LA RADIACIÓN TÉRMICA

## ESPECTRO DE LA RADIACIÓN



# INTRODUCCIÓN. NATURALEZA DE LA RADIACIÓN TÉRMICA

## INTERCAMBIO DE CALOR POR RADIACIÓN



Radiación monocromática  $\rightarrow \lambda$

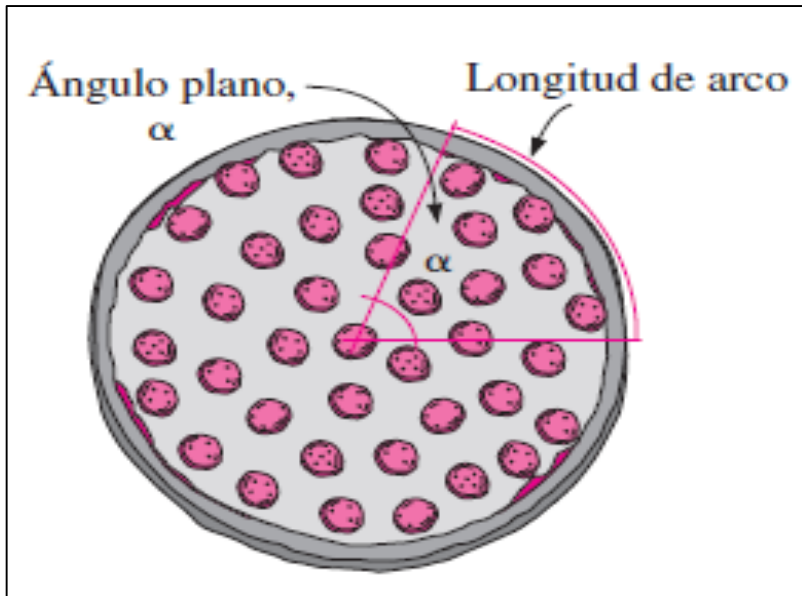
Radiación total  $\rightarrow$  Todas las  $\lambda$

Radiación direccional  $\rightarrow \theta$

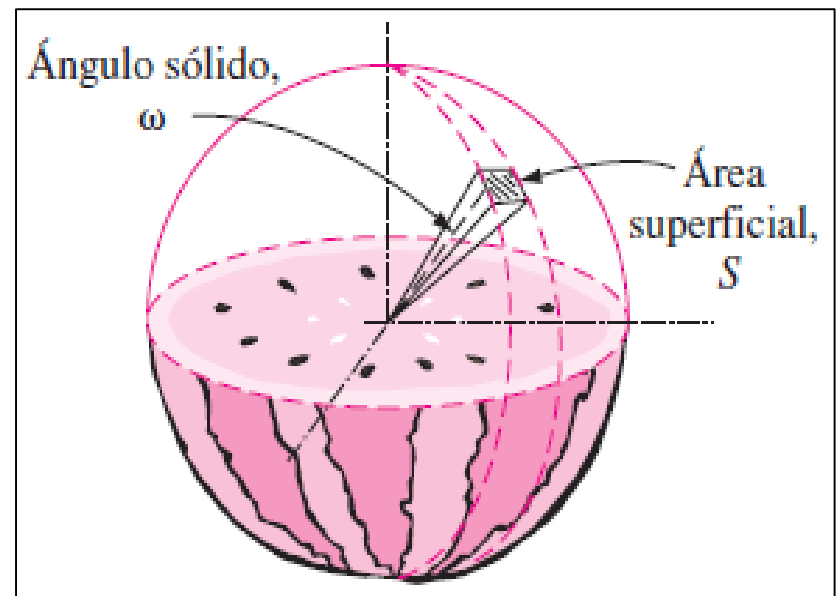
Radiación hemisférica  $\rightarrow$  Todos las  $\theta$

# DEFINICIONES MATEMÁTICAS IMPORTANTES

## Ángulo plano



## Ángulo sólido



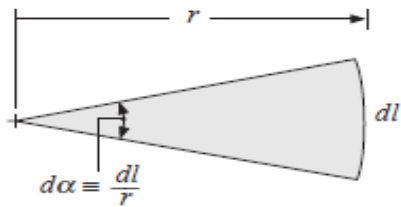
Ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado

Se corresponde con la zona del espacio limitada por una superficie cónica.

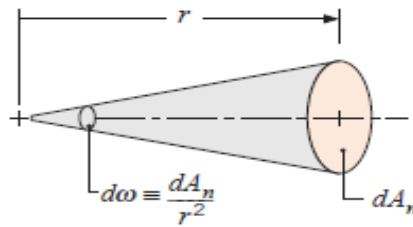


# DEFINICIONES MATEMÁTICAS IMPORTANTES

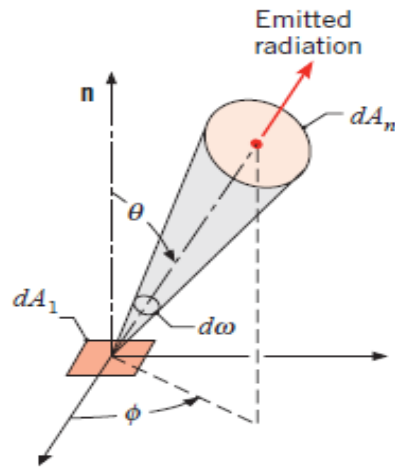
## Coordenadas esféricas



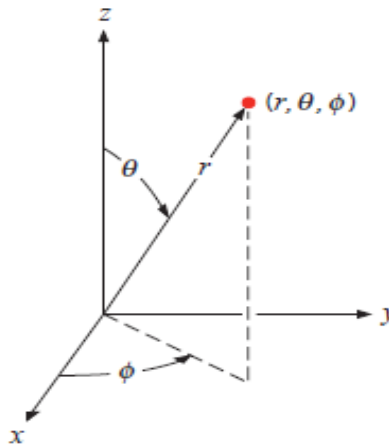
(a)



(b)



(c)



(d)

$r$ : radio

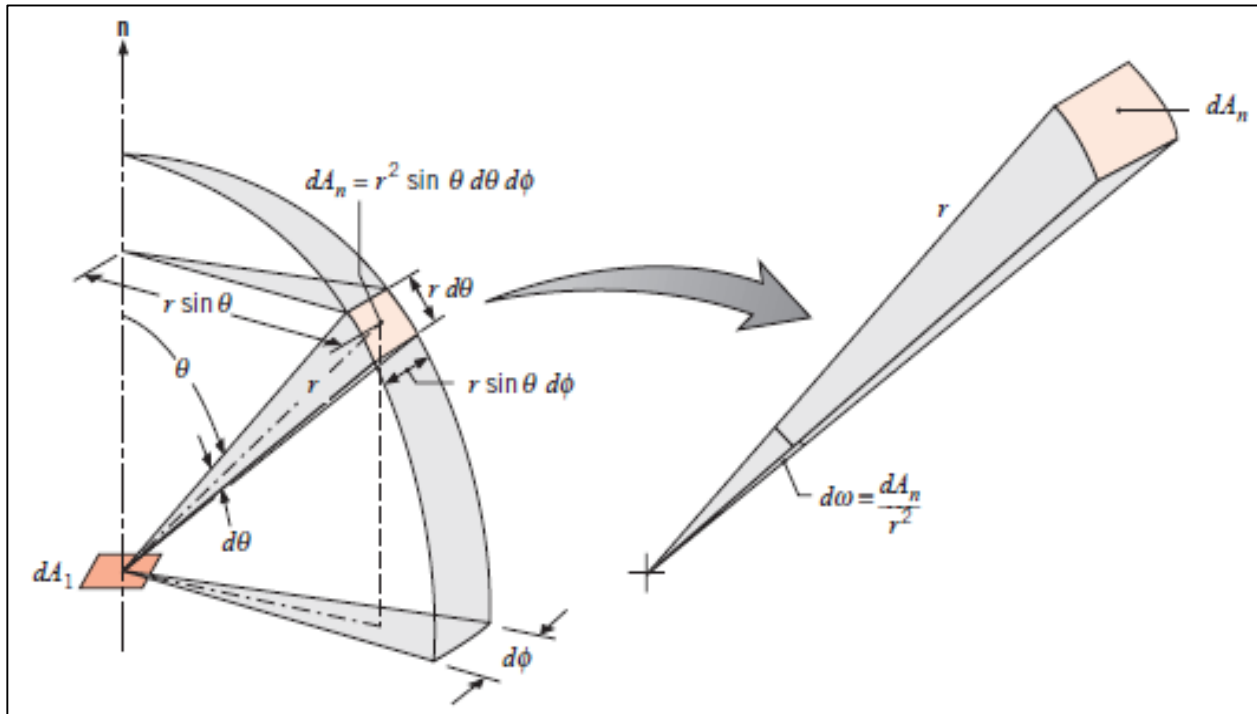
$\theta$ : ángulo cenital ( $0 - \pi/2$ )

$\phi$ : ángulo acimutal ( $0 - 2\pi$ )

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

# DEFINICIONES MATEMÁTICAS IMPORTANTES

## Ángulo sólido subtendido sobre un área $dA_n$



$$d(A_n) = \text{base} \times \text{altura}$$

$$d(A_n) = r \cdot d(\theta) \times r \cdot \text{sen}(\theta) \cdot d(\phi)$$

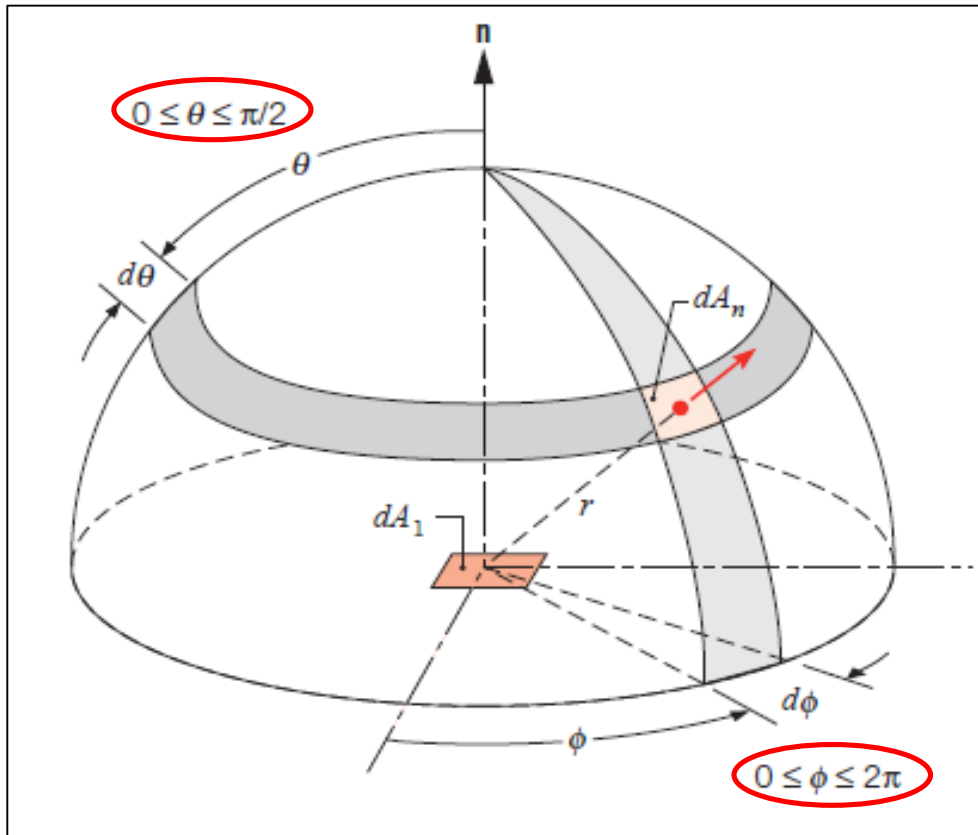
$$d(A_n) = r^2 \cdot \text{sen}(\theta) \cdot d(\theta) \cdot d(\phi)$$



$$d(\omega) = \text{sen}(\theta) \cdot d(\theta) \cdot d(\phi)$$

# DEFINICIONES MATEMÁTICAS IMPORTANTES

Ángulo sólido subtendido sobre un área  $dA_n$



$$\int_h d(\omega) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{sen}(\theta) \cdot d(\theta) \cdot d(\phi)$$
$$\omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} \text{sen}(\theta) \cdot d(\theta) = 2\pi \text{ sr}$$

## INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN

Velocidad a la que la energía es emitida por unidad de ángulo sólido y por unidad de área perpendicular a la dirección de la radiación

$$I = \frac{E}{t \cdot A \cdot \omega} = \frac{Q}{A \cdot \omega}$$

### Intensidad direccional, monocromática

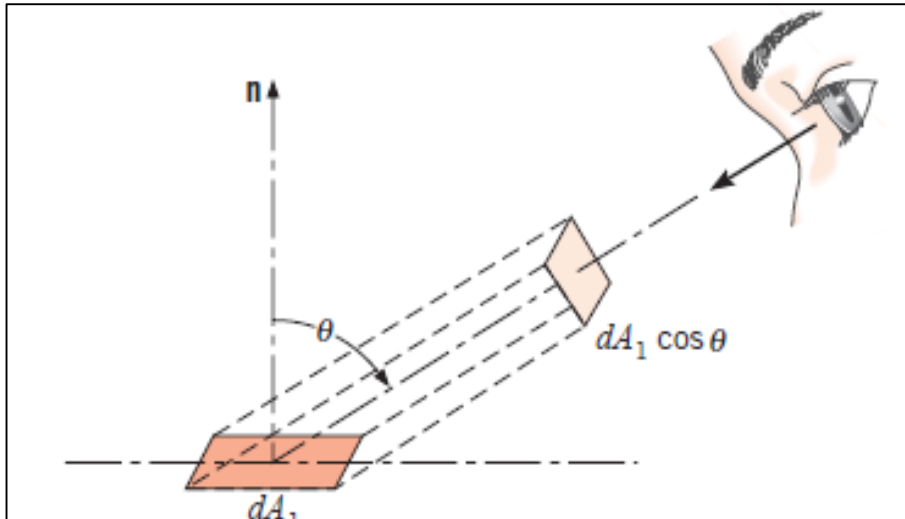
En la dirección  $\omega + d\omega$ , con longitud de onda  $\lambda + d\lambda$ , por unidad de área normal a la dirección de la radiación

### Intensidad direccional, total

En la dirección  $\omega + d\omega$ , con cualquier longitud de onda, por unidad de área normal a la dirección de la radiación

# INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN

## Intensidad direccional, monocromática



$$I_{\lambda, \omega}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dQ}{dA_n \cdot d\omega \cdot d\lambda} = \frac{dQ}{dA_1 \cdot \cos \theta \cdot d\omega \cdot d\lambda}$$
$$I_{\lambda, \omega}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dQ_\lambda}{dA_n \cdot d\omega} = \frac{dQ_\lambda}{dA_1 \cdot \cos \theta \cdot d\omega}$$

## Intensidad direccional, total

$$I_\omega = \int_0^\infty I_{\lambda, \omega} d\lambda$$

## EMISIÓN DE LA RADIACIÓN: PODER EMISOR (E)

Cantidad de radiación emitida por la superficie emisora, por unidad de superficie emisora, en todas las direcciones.

**Poder emisor monocromático, hemisférico ( $E_\lambda$ )**

Con longitud de onda  $\lambda + d\lambda$ , en todas las direcciones, por unidad de superficie emisora

**Poder emisor total (E)**

Con cualquier longitud de onda, en todas las direcciones, por unidad de superficie emisora

## EMISIÓN DE LA RADIACIÓN: PODER EMISOR (E)

Cantidad de radiación emitida por la superficie emisora, por unidad de superficie emisora, en todas las direcciones.

### Poder emisor monocromático, hemisférico ( $E_\lambda$ )

Con longitud de onda  $\lambda + d\lambda$ , en todas las direcciones, por unidad de superficie emisora

### Poder emisor total (E)

Con cualquier longitud de onda, en todas las direcciones, por unidad de superficie emisora

## INTENSIDAD DE RADIACIÓN

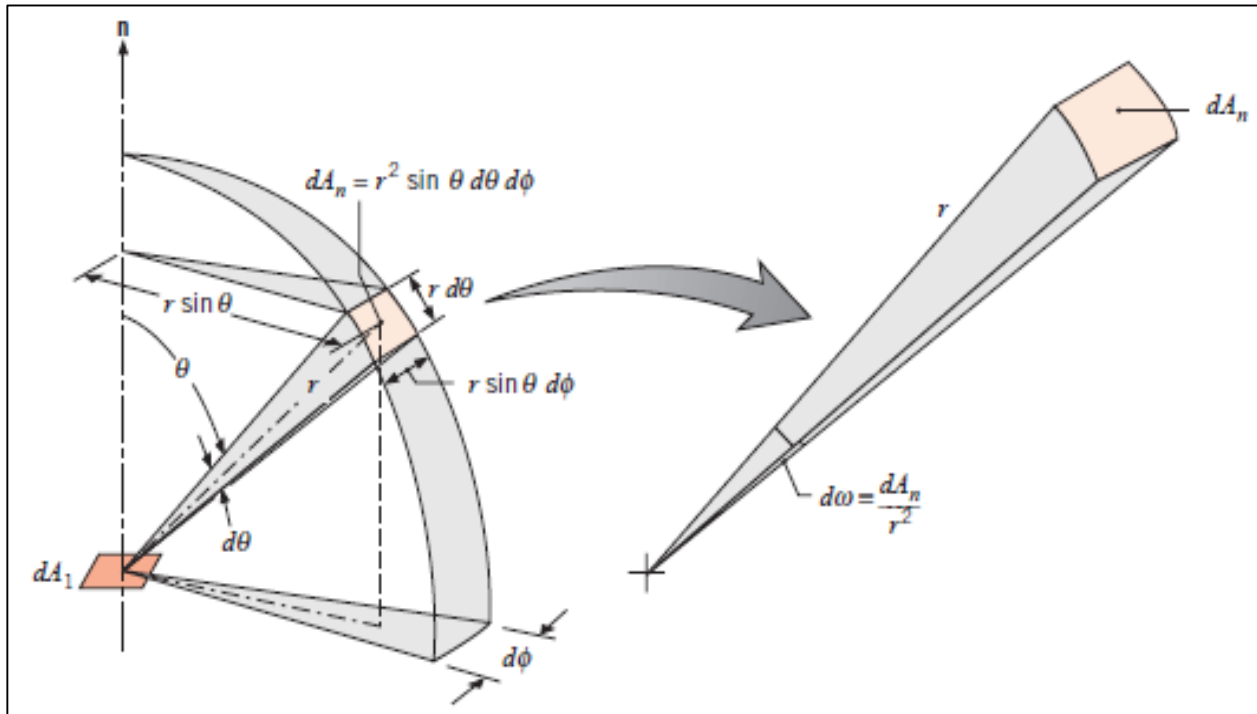
- En una sola dirección.
- Superficie normal a la radiación

## PODER EMISOR:

- En todas las direcciones
- Superficie la del emisor

# EMISIÓN DE LA RADIACIÓN: PODER EMISOR (E)

## Relación entre intensidad y poder emisor



$$d(A_n) = \text{base} \times \text{altura}$$

$$d(A_n) = r \cdot d(\theta) \times r \cdot \text{sen}(\theta) \cdot d(\phi)$$

$$d(A_n) = r^2 \cdot \text{sen}(\theta) \cdot d(\theta) \cdot d(\phi)$$



$$d(A_n) = dA_1 \cdot \cos(\theta)$$

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

$$d(\omega) = \text{sen}(\theta) \cdot d(\theta) \cdot d(\phi)$$

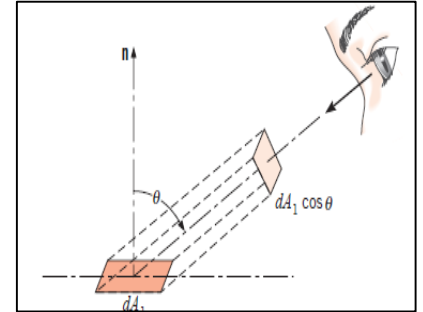


# EMISIÓN DE LA RADIACIÓN: PODER EMISOR (E)

## Relación entre intensidad y poder emisor

$$dE = \frac{dQ}{dA_1}$$

$$dI_{\omega} = \frac{dQ}{dA_n \cdot d\omega}$$



$$dE = \frac{dQ}{dA_1} = \frac{dQ}{\frac{dA_n}{\cos \theta}} = dI_{\omega} \cdot \cos \theta \cdot d\omega$$

$$dA_1 = dA_n / \cos \theta$$

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

$$dE_{\lambda} = dI_{\lambda, \omega} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi$$

$$dE = dI_{\omega} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi$$

## EMISIÓN DE LA RADIACIÓN: PODER EMISOR (E)

### Relación entre intensidad y poder emisor

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

$$E = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,\omega} \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \cdot d\lambda$$

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

$\lambda$  : longitud de onda (0 -  $\infty$ )

$\theta$  : ángulo cenital (0 -  $\pi/2$ )

$\phi$  : ángulo acimutal (0 -  $2\pi$ )

# EMISIÓN DE LA RADIACIÓN: PODER EMISOR (E)

## Relación entre intensidad y poder emisor

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

$$E = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,\omega} \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \cdot d\lambda$$

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

$\lambda$  : longitud de onda (0 -  $\infty$ )

$\theta$  : ángulo cenital (0 -  $\pi/2$ )

$\phi$  : ángulo acimutal (0 -  $2\pi$ )

Emisor difuso



$$I_{\lambda,\omega} = I_{\lambda}$$

$$I_{\omega} = I$$

Intensidad no es f (dirección)

$$E_{\lambda}(\lambda) = I_{\lambda} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi = I_{\lambda} \cdot (2\pi - 0) \cdot \int_0^{\pi/2} \cos\theta \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \cdot d\phi$$

$$E_{\lambda}(\lambda) = I_{\lambda} \cdot (2\pi - 0) \cdot \left[ -\frac{1}{2} \cdot (\cos^2 \pi/2 - \cos^2 0) \right] = \pi \cdot I_{\lambda}$$

$$E_{\lambda}(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda}$$

$$E = \pi \cdot I$$

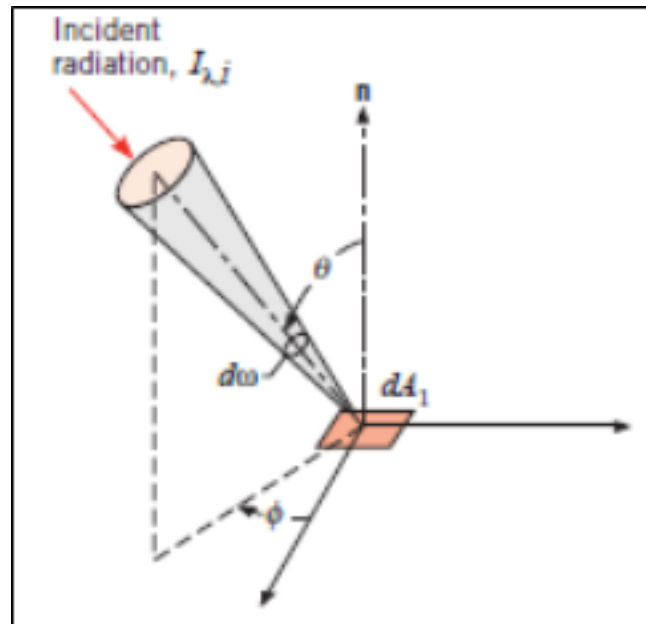
## RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

Velocidad a la que la radiación procedente de todas las direcciones incide sobre una superficie, por unidad de área de la superficie que recibe la radiación.

PARTE SE ABSORBE

PARTE SE REFLEJA

PARTE SE TRANSMITE



## RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

Velocidad a la que la radiación procedente de todas las direcciones **incide** sobre una superficie, por unidad de área de la superficie que recibe la radiación.

PARTE SE ABSORBE

PARTE SE REFLEJA

PARTE SE TRANSMITE

**Irradiación monocromática, hemisférica ( $G_\lambda$ )**

Con longitud de onda  $\lambda + d\lambda$ , en todas las direcciones, por unidad de área de superficie receptora

**Irradiación total (G)**

Con cualquier longitud de onda, en todas las direcciones, por unidad de superficie emisora

# RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

## Absorbancia, reflectancia y transmitancia

$$G = a \cdot G + r \cdot G + t \cdot G$$

$$a + r + t = 1$$

a: absorbancia total, hemisférica  
r: reflectancia total, hemisférica  
t: transmitancia total, hemisférica

$$G_\lambda = a_\lambda \cdot G_\lambda + r_\lambda \cdot G_\lambda + t_\lambda \cdot G_\lambda$$

$$a_\lambda + r_\lambda + t_\lambda = 1$$

$a_\lambda$ : absorbancia monocromática, hemisférica  
 $r_\lambda$ : reflectancia monocromática, hemisférica  
 $t_\lambda$ : transmitancia monocromática, hemisférica

$$I_{\lambda,\omega} = a_{\lambda,\omega} \cdot I_{\lambda,\omega} + r_{\lambda,\omega} \cdot I_{\lambda,\omega} + t_{\lambda,\omega} \cdot I_{\lambda,\omega}$$

$$a_{\lambda,\omega} + r_{\lambda,\omega} + t_{\lambda,\omega} = 1$$

$a_{\lambda,\omega}$ : absorbancia monocromática, direccional  
 $r_{\lambda,\omega}$ : reflectancia monocromática, direccional  
 $t_{\lambda,\omega}$ : transmitancia monocromática, direccional

$$I_\omega = a_\omega \cdot I_\omega + r_\omega \cdot I_\omega + t_\omega \cdot I_\omega$$

$$a_\omega + r_\omega + t_\omega = 1$$

$a_\omega$ : absorbancia total, direccional  
 $r_\omega$ : reflectancia total, direccional  
 $t_\omega$ : transmitancia total, direccional

# RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

## Absorbancia, reflectancia y transmitancia

$$G = a \cdot G + r \cdot G + t \cdot G$$

$$a + r + t = 1$$

a: absorbancia total, hemisférica

r: reflectancia total, hemisférica

t: transmitancia total, hemisférica

$$G_\lambda = a_\lambda \cdot G_\lambda + r_\lambda \cdot G_\lambda + t_\lambda \cdot G_\lambda$$

$$a_\lambda + r_\lambda + t_\lambda = 1$$

$a_\lambda$ : absorbancia monocromática, hemisférica

$r_\lambda$ : reflectancia monocromática, hemisférica

$t_\lambda$ : transmitancia monocromática, hemisférica

## Relación entre intensidad e irradiación

Emisor difuso



$$I_{\lambda,\omega} = I_\lambda$$
$$I_\omega = I$$

Intensidad no es f (dirección)

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

$$G = \pi \cdot I_i$$

# RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

## Absorbancia

$$a_{\lambda,\omega}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)}$$

Absorbancia monocromática direccional

$$a_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$$

Absorbancia monocromática hemisférica

$$a = \frac{G_{abs}}{G}$$

$$a = \frac{\int_0^{\infty} a_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

Absorbancia total hemisférica



# RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

## Reflectancia

$$r_{\lambda,\omega}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)}$$

Reflectancia monocromática direccional

$$r_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$$

Reflectancia monocromática hemisférica

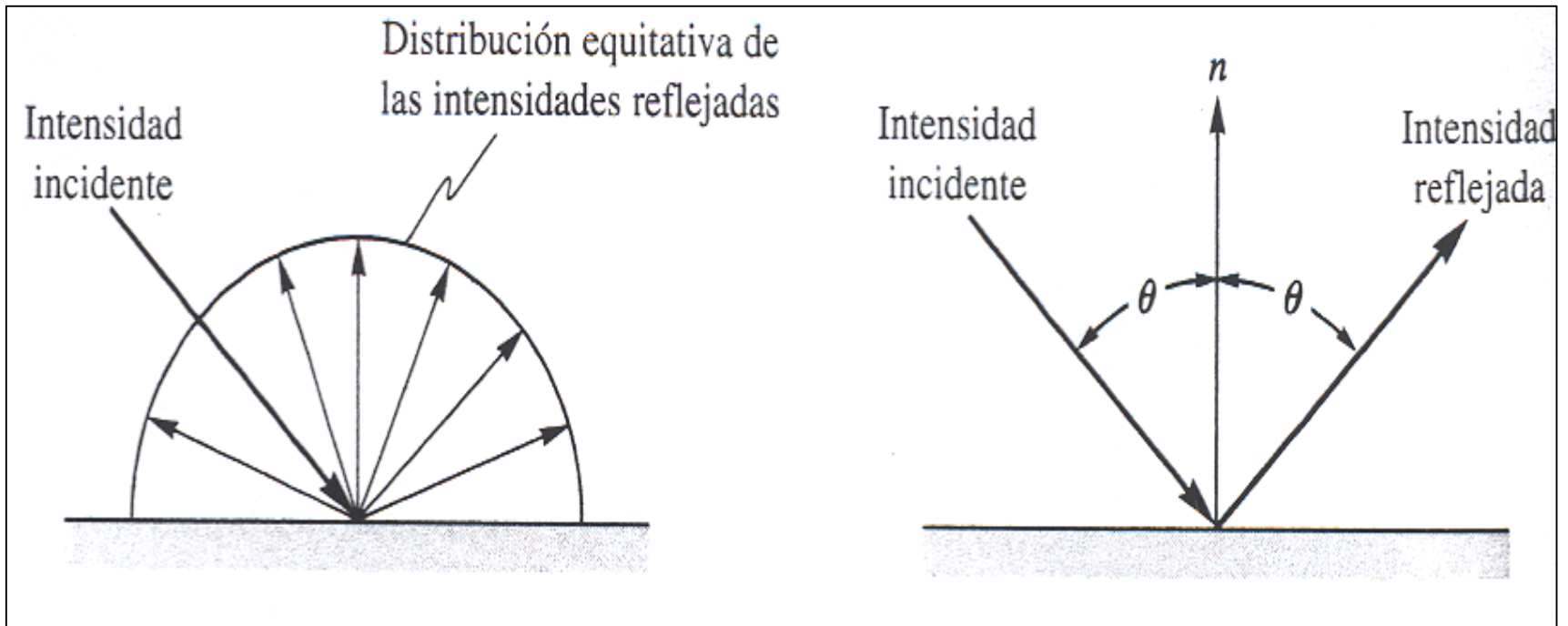
$$r = \frac{G_{ref}}{G}$$

$$r = \frac{\int_0^{\infty} r_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

Reflectancia total hemisférica

# RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

## Reflectancia



Superficie lisa

Superficie rugosa

# RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

## Transmitancia

$$t_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, tr}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$$

$$t = \frac{G_{tr}}{G}$$

$$t = \frac{\int_0^{\infty} t_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

Transmitancia monocromática hemisférica

Transmitancia total hemisférica

## RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN: IRRADIACIÓN (G)

**Medio semitransparente**

$$G = a \cdot G + r \cdot G + t \cdot G$$
$$a + r + t = 1$$

$$G_\lambda = a_\lambda \cdot G_\lambda + r_\lambda \cdot G_\lambda + t_\lambda \cdot G_\lambda$$
$$a_\lambda + r_\lambda + t_\lambda = 1$$

**Medio opaco**

**t = 0**



$$a + r = 1$$
$$a_\lambda + r_\lambda = 1$$

## RADIOSIDAD (J)

Velocidad a la cual la radiación abandona una superficie, por unidad de área de superficie del cuerpo emisor.

La radiosidad se diferencia del poder emisor en que **incluye**, además de la radiación emitida, la **porción de la radiación incidente** (la porción de la irradiación) que se refleja.

Puede ser monocromática ( $J_\lambda$ ) o total (J)

## RADIOSIDAD (J)

Velocidad a la cual la radiación abandona una superficie, por unidad de área de superficie del cuerpo emisor.

La radiosidad se diferencia del poder emisor en que **incluye**, además de la radiación emitida, la porción de la radiación incidente (la porción de la irradiación) que se refleja.

Puede ser monocromática ( $J_\lambda$ ) o total ( $J$ )

### Relación entre intensidad y radiosidad

Emisor difuso



$$I_{\lambda,\omega} = I_\lambda$$
$$I_\omega = I$$

Intensidad no es f (dirección)

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

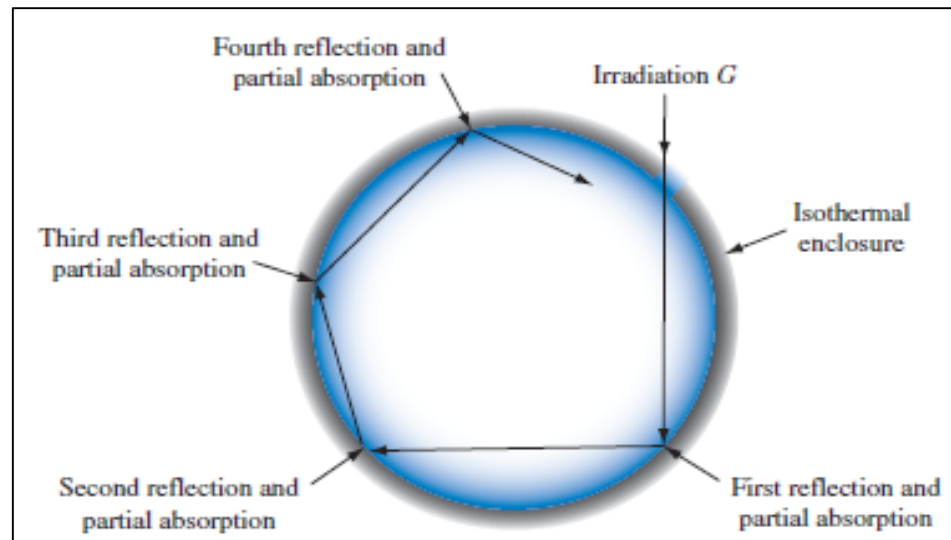
$$J = \pi \cdot I_{e+r}$$

## CUERPO NEGRO

Absorbe toda la radiación incidente, independientemente de  $\lambda$  y de la dirección, a cualquier temperatura → **absorbedor ideal**

Para una  $T$  y  $\lambda$  dadas, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro → **emisor ideal**

Aunque la radiación emitida por un cuerpo negro es  $f(\lambda, T)$ , no es  $f(\text{dirección})$   
→ **emisor difuso**



## CUERPO NEGRO

### Ley de la distribución espectral de Planck

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

Emisor difuso



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

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

T (K) del cuerpo negro

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_0^2$$

$$= 3,742 \cdot 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

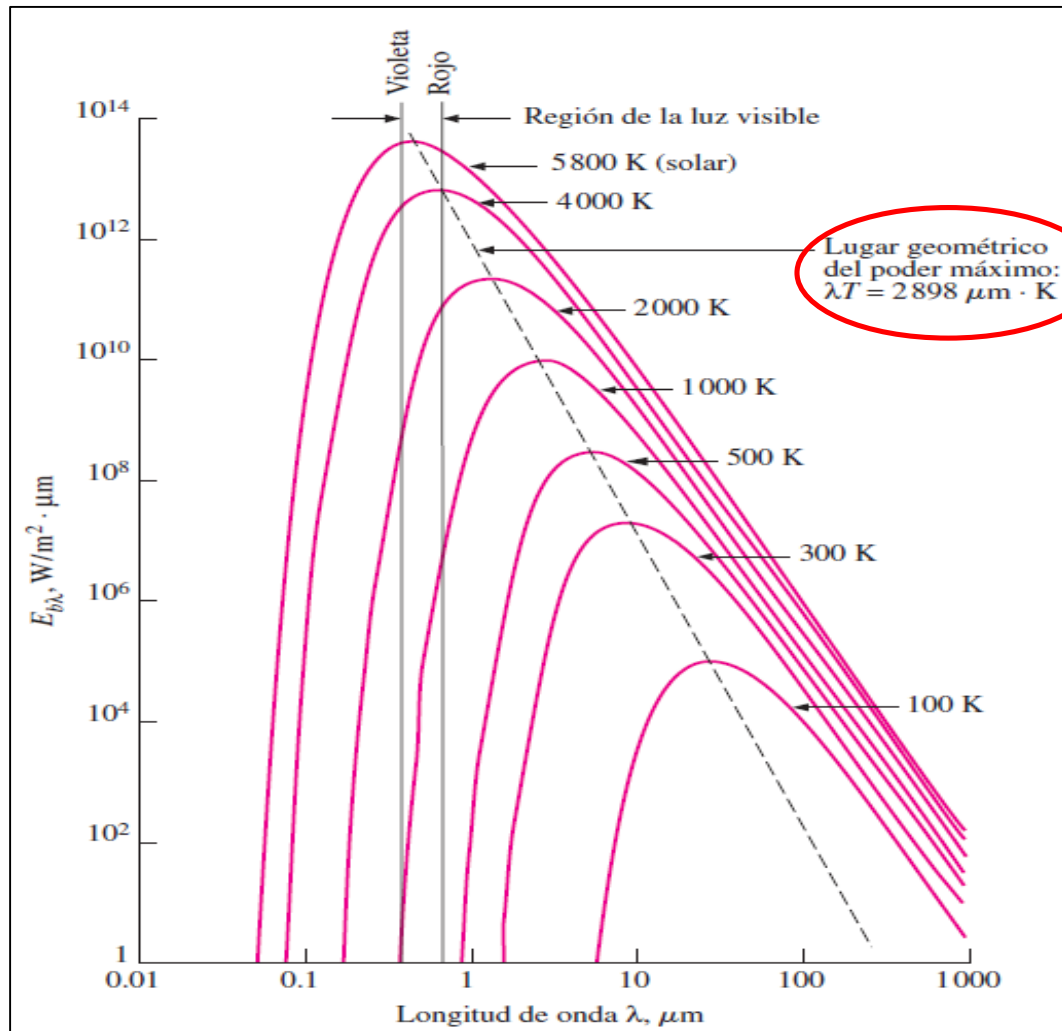
$$C_2 = h \cdot c_0 \cdot k$$

$$= 1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$$



# CUERPO NEGRO

## Ley de la distribución espectral de Planck



# CUERPO NEGRO

## Ley del desplazamiento de Wien

$$\frac{dE_{\lambda,b}}{d\lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\max} T = C_3$$

$$C_3 = 2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

## Ley de Stefan - Boltzmann

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

$$E_b = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

# CUERPO NEGRO

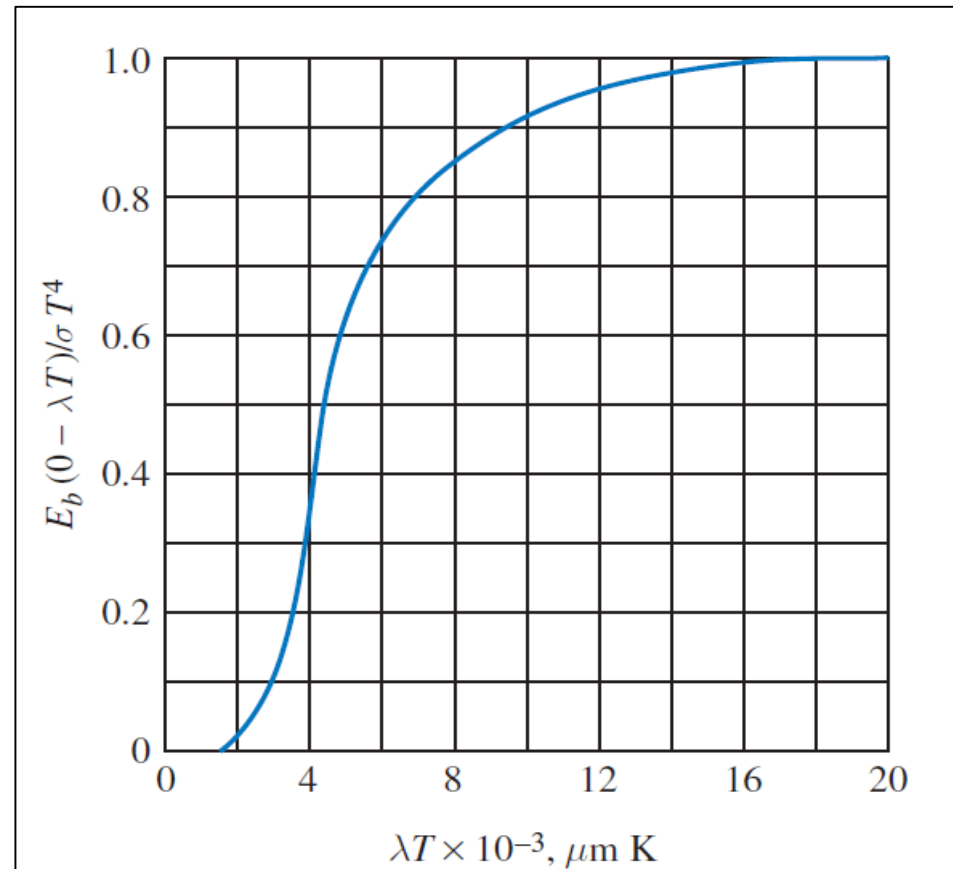
## Emisión en bandas de un cuerpo negro

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

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

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

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



## CUERPO NEGRO

### Emisión en bandas de un cuerpo negro (Incropera 7ª ed.)

$\lambda T$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ )	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$I_{\lambda, b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}$ ) <sup>-1</sup>	$\frac{I_{\lambda, b}(\lambda, T)}{I_{\lambda, b}(\lambda_{\text{max}}, T)}$
200	0.000000	$0.375034 \times 10^{-27}$	0.000000
400	0.000000	$0.490335 \times 10^{-13}$	0.000000
600	0.000000	$0.104046 \times 10^{-8}$	0.000014
800	0.000016	$0.991126 \times 10^{-7}$	0.001372
1,000	0.000321	$0.118505 \times 10^{-5}$	0.016406
1,200	0.002134	$0.523927 \times 10^{-5}$	0.072534
1,400	0.007790	$0.134411 \times 10^{-4}$	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	$0.589649 \times 10^{-4}$	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	$0.722318 \times 10^{-4}$	1.000000

## CUERPO NEGRO

### Emisión en bandas de un cuerpo negro (Incropera 7ª ed.)

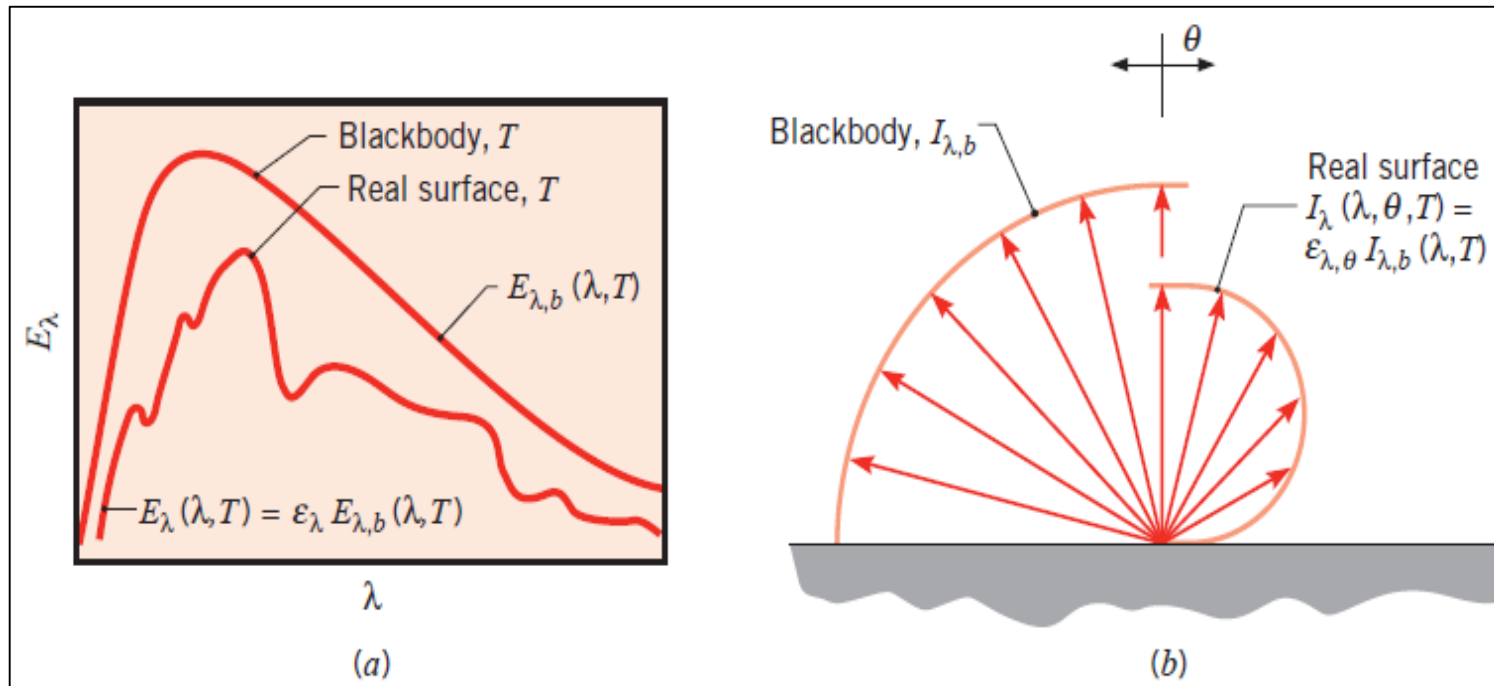
$\lambda T$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ )	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}$ ) $^{-1}$	$\frac{I_{\lambda,b}(\lambda, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda_{\text{max}}, T)}$
3,000	0.273232	$0.720254 \times 10^{-4}$	0.997143
3,200	0.318102	0.705974	0.977373
3,400	0.361735	0.681544	0.943551
3,600	0.403607	0.650396	0.900429
3,800	0.443382	$0.615225 \times 10^{-4}$	0.851737
4,000	0.480877	0.578064	0.800291
4,200	0.516014	0.540394	0.748139
4,400	0.548796	0.503253	0.696720
4,600	0.579280	0.467343	0.647004
4,800	0.607559	0.433109	0.599610
5,000	0.633747	0.400813	0.554898
5,200	0.658970	$0.370580 \times 10^{-4}$	0.513043
5,400	0.680360	0.342445	0.474092
5,600	0.701046	0.316376	0.438002
5,800	0.720158	0.292301	0.404671
6,000	0.737818	0.270121	0.373965
6,200	0.754140	$0.249723 \times 10^{-4}$	0.345724
6,400	0.769234	0.230985	0.319783
6,600	0.783199	0.213786	0.295973
6,800	0.796129	0.198008	0.274128
7,000	0.808109	0.183534	0.254090
7,200	0.819217	$0.170256 \times 10^{-4}$	0.235708

# CUERPO NEGRO

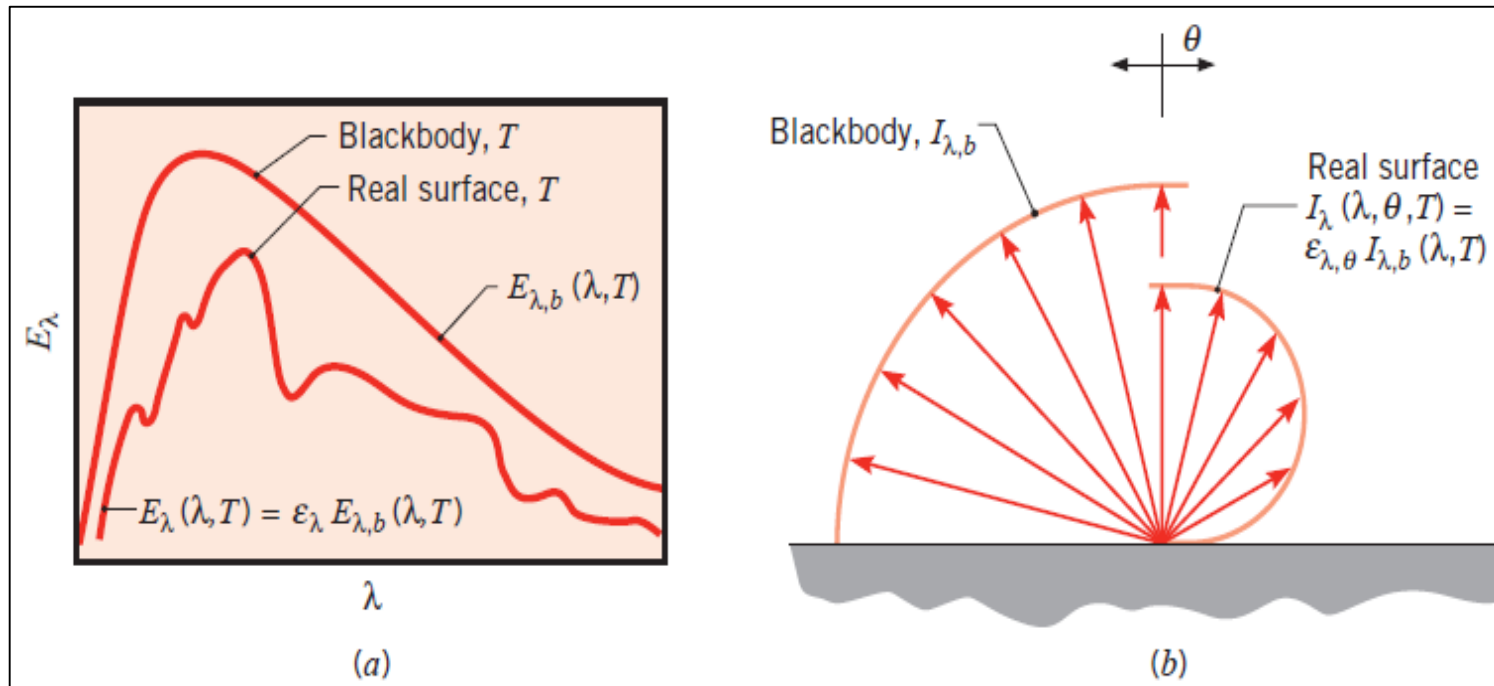
## Emisión en bandas de un cuerpo negro (Incropera 7ª ed.)

$\lambda T$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ )	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$I_{\lambda, b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}$ ) <sup>-1</sup>	$\frac{I_{\lambda, b}(\lambda, T)}{I_{\lambda, b}(\lambda_{\text{max}}, T)}$
7,400	0.829527	0.158073	0.218842
7,600	0.839102	0.146891	0.203360
7,800	0.848005	0.136621	0.189143
8,000	0.856288	0.127185	0.176079
8,500	0.874608	$0.106772 \times 10^{-4}$	0.147819
9,000	0.890029	$0.901463 \times 10^{-5}$	0.124801
9,500	0.903085	0.765338	0.105956
10,000	0.914199	$0.653279 \times 10^{-5}$	0.090442
10,500	0.923710	0.560522	0.077600
11,000	0.931890	0.483321	0.066913
11,500	0.939959	0.418725	0.057970
12,000	0.945098	$0.364394 \times 10^{-5}$	0.050448
13,000	0.955139	0.279457	0.038689
14,000	0.962898	0.217641	0.030131
15,000	0.969981	$0.171866 \times 10^{-5}$	0.023794
16,000	0.973814	0.137429	0.019026
18,000	0.980860	$0.908240 \times 10^{-6}$	0.012574
20,000	0.985602	0.623310	0.008629
25,000	0.992215	0.276474	0.003828
30,000	0.995340	$0.140469 \times 10^{-6}$	0.001945
40,000	0.997967	$0.473891 \times 10^{-7}$	0.000656
50,000	0.998953	0.201605	0.000279
75,000	0.999713	$0.418597 \times 10^{-8}$	0.000058
100,000	0.999905	0.135752	0.000019

# EMISIÓN DE RADIACIÓN EN SUPERFICIES REALES



# EMISIÓN DE RADIACIÓN EN SUPERFICIES REALES



## Emisividad

Relación entre poder emisor de una superficie y el poder emisor que tendría un cuerpo negro a la misma temperatura



# EMISIÓN DE RADIACIÓN EN SUPERFICIES REALES

## Emisividad

Emisividad monocromática, direccional

$$\varepsilon_{\lambda,\omega}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)}$$

Emisividad total, direccional

$$\varepsilon_{\omega}(\theta, \phi, T) = \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_b(T)}$$

Emisividad monocromática, hemisférica

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)}$$

Emisividad total, hemisférica

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)}$$

# EMISIÓN DE RADIACIÓN EN SUPERFICIES REALES

## Emisividad

Emisividad monocromática, direccional

$$\varepsilon_{\lambda,\omega}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)}$$

Emisividad total, direccional

$$\varepsilon_{\omega}(\theta, \phi, T) = \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_b(T)}$$

Emisividad monocromática, hemisférica

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)}$$

Emisividad total, hemisférica

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)}$$

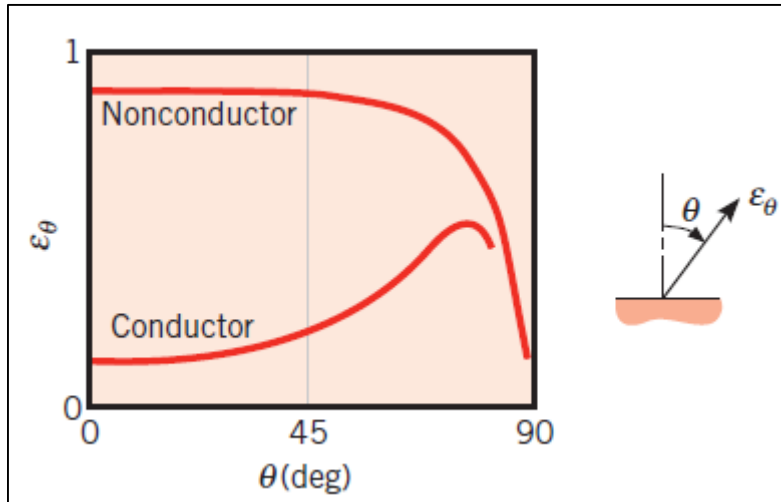
Emisividad total vs  
monocromática

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{E_b(T)}$$

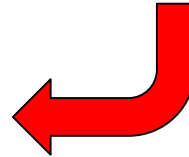
Emisor difuso:  $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon$

# EMISIÓN DE RADIACIÓN EN SUPERFICIES REALES

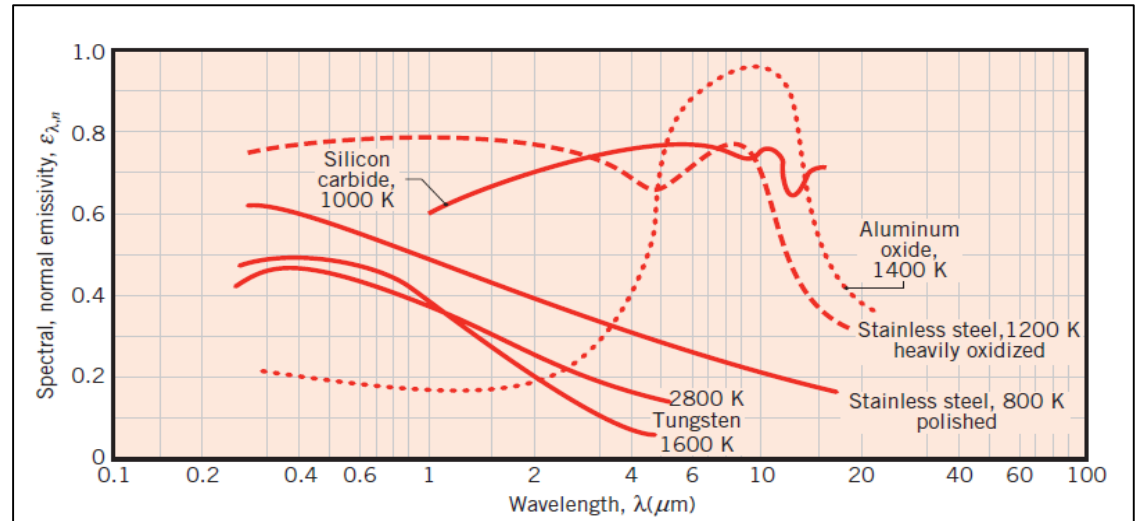
## Emisividad



$1 \leq (\epsilon / \epsilon_n) \leq 1,3 \rightarrow$  conductores  
 $0,95 \leq (\epsilon / \epsilon_n) \leq 1 \rightarrow$  no conductores



Sup. Metálicas  $\rightarrow \epsilon$  pequeña  
 Óxidos  $\rightarrow \uparrow\uparrow \epsilon$   
 No conductores  $\rightarrow \epsilon$  mayor  
 $\uparrow\uparrow T \rightarrow$  emisión se concentra  
 a  $\lambda \downarrow\downarrow$



# EMISIÓN DE RADIACIÓN EN SUPERFICIES REALES

## Emisividades hemisféricas de varias superficies (Kreith, 7ed)

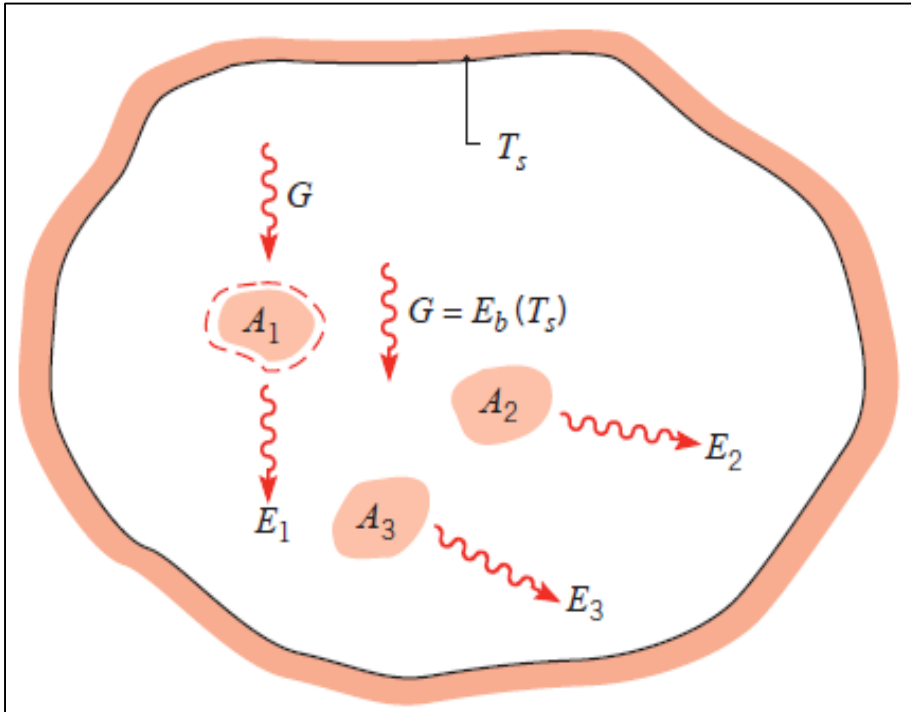
Material	Wavelength and Average Temperature				
	9.3 $\mu\text{m}$ 310 K	5.4 $\mu\text{m}$ 530 K	3.6 $\mu\text{m}$ 800 K	1.8 $\mu\text{m}$ 1700 K	0.6 $\mu\text{m}$ Solar ~6000 K
<b>Metals</b>					
Aluminum					
polished	~0.04	0.05	0.08	~0.19	~0.3
oxidized	0.11	~0.12	0.18		
24-ST weathered	0.4	0.32	0.27		
surface roofing	0.22				
anodized (at 1000°F)	0.94	0.42	0.60	0.34	
Brass					
polished	0.10	0.10			
oxidized	0.61				
Chromium					
polished	~0.08	~0.17	0.26	~0.40	0.49
Copper					
polished	0.04	0.05	~0.18	~0.17	
oxidized	0.87	0.83	0.77		
Iron					
polished	0.06	0.08	0.13	0.25	0.45
cast, oxidized	0.63	0.66	0.76		
galvanized, new	0.23			0.42	0.66
galvanized, dirty	0.28			0.90	0.89
steel plate, rough	0.94	0.97	0.98		
oxide	0.96		0.85		0.74
molten				0.3-0.4	
Magnesium	0.07	0.13	0.18	0.24	0.30
Molybdenum filament			~0.09	~0.15	~0.2 <sup>b</sup>
Silver					
polished	0.01	0.02	0.03		0.11
Stainless steel					
18-8, polished	0.15	0.18	0.22		
18-8, weathered	0.85	0.85	0.85		
Steel tube, oxidized		0.94			
Tungsten filament	0.03			~0.18	0.35 <sup>c</sup>
Zinc					
polished	0.02	0.03	0.04	0.06	0.46
galvanized sheet	~0.25				
<b>Building and Insulating Materials</b>					
Asbestos paper	0.93	0.93			

# EMISIÓN DE RADIACIÓN EN SUPERFICIES REALES

## Emisividades hemisféricas de varias superficies (Kreith, 7ed)

Material	Wavelength and Average Temperature				
	9.3 $\mu\text{m}$ 310 K	5.4 $\mu\text{m}$ 530 K	3.6 $\mu\text{m}$ 800 K	1.8 $\mu\text{m}$ 1700 K	0.6 $\mu\text{m}$ Solar ~6000 K
Asphalt	0.93		0.9		0.93
Brick					
red	0.93				0.7
fire clay	0.9		~0.7	~0.75	
silica	0.9		~0.75	0.84	
magnesite refractory	0.9			~0.4	
Enamel, white	0.9				
Marble, white	0.95		0.93		0.47
Paper, white	0.95		0.82	0.25	0.28
Plaster	0.91				
Roofing board	0.93				
Enameled steel, white				0.65	0.47
Asbestos cement, red				0.67	0.66
Paints					
Aluminized lacquer	0.65	0.65			
Cream paints	0.95	0.88	0.70	0.42	0.35
Lacquer, black	0.96	0.98			
Lampblack paint	0.96	0.97		0.97	0.97
Red paint	0.96				0.74
Yellow paint	0.95		0.5		0.30
Oil paints (all colors)	~0.94	~0.9			
White (ZnO)	0.95		0.91		0.18
Miscellaneous					
Ice	~0.97 <sup>d</sup>				
Water	~0.96				
Carbon					
T-carbon, 0.9% ash filament	0.82	0.80	0.79		
Wood	~0.72			0.53	
Glass	~0.93				
	0.90				(Low)

## LEYES DE KIRCHOFF. SUPERFICIES GRISES



Recinto de gran tamaño,  
cerrado e isoterma, que se  
comporta como un CN



G de cualquier cuerpo = E del CN

$$G = E_b(T_s)$$

Una vez alcanzado el equilibrio  $\rightarrow T_1 = T_2 = \dots T_n$

## LEYES DE KIRCHOFF. SUPERFICIES GRISES

Balance de energía sobre uno de los cuerpos  $\rightarrow q_{\text{neto}} = 0$

$$a_1 \cdot G \cdot A_1 - E_1(T_s) \cdot A_1 = 0$$

$$a_1 \cdot E_b(T_s) \cdot A_1 - E_1(T_s) \cdot A_1 = 0$$

$$\frac{E_1(T_s)}{a_1} = E_b(T_s)$$

Balance de energía sobre cada uno de los cuerpos  $\rightarrow q_{\text{neto}} = 0$

$$\frac{E_1(T_s)}{a_1} = \frac{E_2(T_s)}{a_2} = \dots = \frac{E_n(T_s)}{a_n} = E_b(T_s)$$



Ley de Kirchoff

## LEYES DE KIRCHOFF. SUPERFICIES GRISES

Balance de energía sobre uno de los cuerpos  $\rightarrow q_{\text{neto}} = 0$

$$a_1 \cdot G \cdot A_1 - E_1(T_s) \cdot A_1 = 0$$

$$a_1 \cdot E_b(T_s) \cdot A_1 - E_1(T_s) \cdot A_1 = 0$$

$$\frac{E_1(T_s)}{a_1} = E_b(T_s)$$

Balance de energía sobre cada uno de los cuerpos  $\rightarrow q_{\text{neto}} = 0$

$$\frac{E_1(T_s)}{a_1} = \frac{E_2(T_s)}{a_2} = \dots = \frac{E_n(T_s)}{a_n} = E_b(T_s)$$



Ley de Kirchoff

Como la absorbancia siempre es  $< 1 \rightarrow$  ningún cuerpo puede tener un poder emisor superior al de un cuerpo negro



## LEYES DE KIRCHOFF. SUPERFICIES GRISES

**EN EQUILIBRIO TÉRMICO Y RADIACIÓN DIFUSA**

$$\varepsilon = a$$

**FUERA DEL EQUILIBRIO TÉRMICO Y RADIACIÓN DIFUSA**

$$\varepsilon_{\lambda} = a_{\lambda}$$

**FUERA DEL EQUILIBRIO TÉRMICO Y RADIACIÓN NO DIFUSA**

$$\varepsilon_{\lambda, \omega} = a_{\lambda, \omega}$$

## LEYES DE KIRCHOFF. SUPERFICIES GRISES

### Superficies grises

Aquellas en las que la emisividad y la absorbancia monocromática ( $\epsilon_\lambda$  y  $a_\lambda$ ) son independientes de la longitud de onda para todo el espectro de la radiación emitida y absorbida.

$$\epsilon = \epsilon_\lambda$$

$$a = a_\lambda$$

# LEYES DE KIRCHOFF. SUPERFICIES GRISES

## Superficies grises

Aquellas en las que la emisividad y la absorbancia monocromática ( $\epsilon_\lambda$  y  $a_\lambda$ ) son independientes de la longitud de onda para todo el espectro de la radiación emitida y absorbida.

$$\epsilon = \epsilon_\lambda$$

$$a = a_\lambda$$

Ley de Kirchoff



$$\epsilon_\lambda = \epsilon = a_\lambda = a$$

Radiación difusa

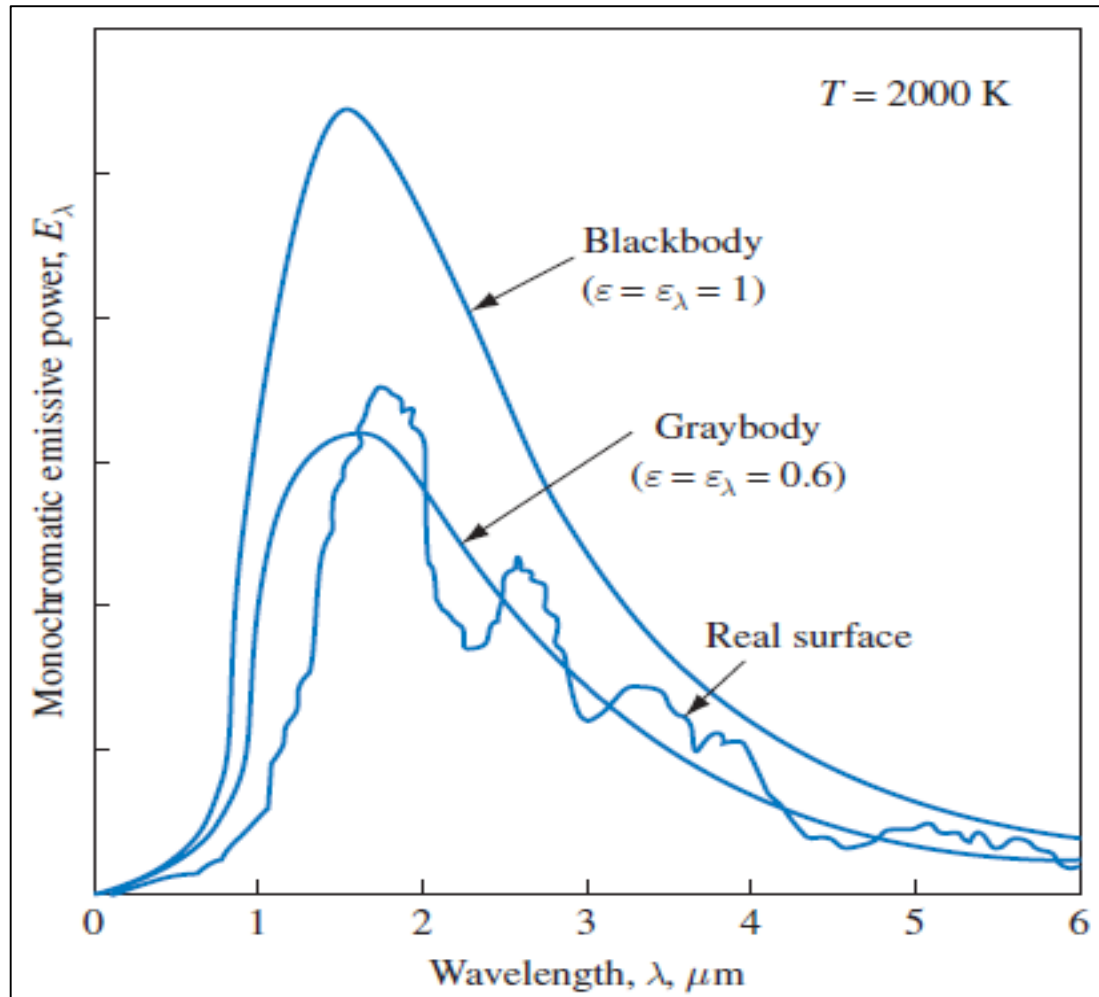


$$\epsilon_{\lambda,\omega} = \epsilon = a_{\lambda,\omega} = a$$

Superficie gris y difusa

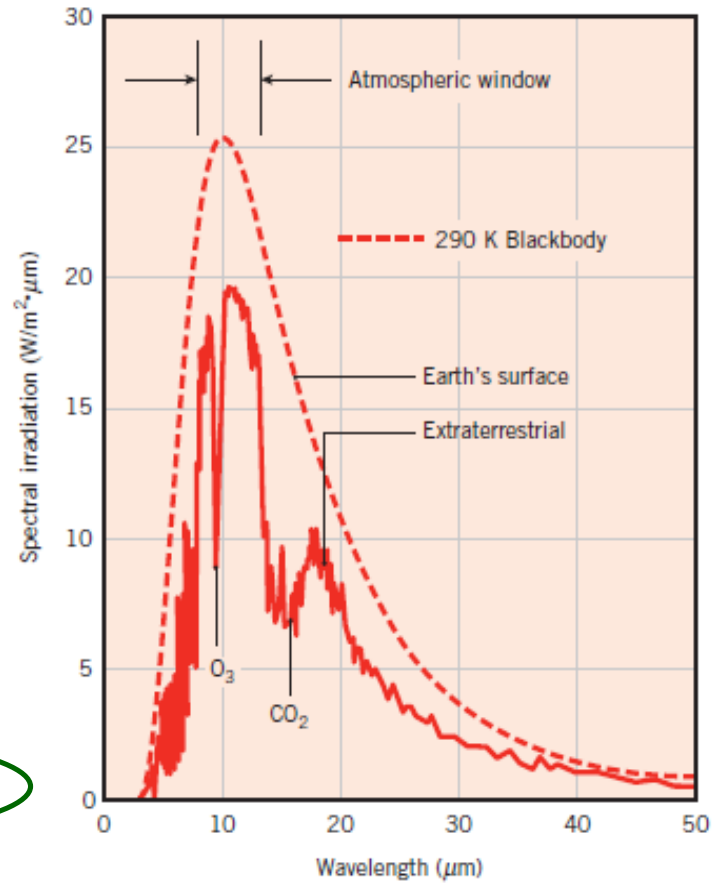
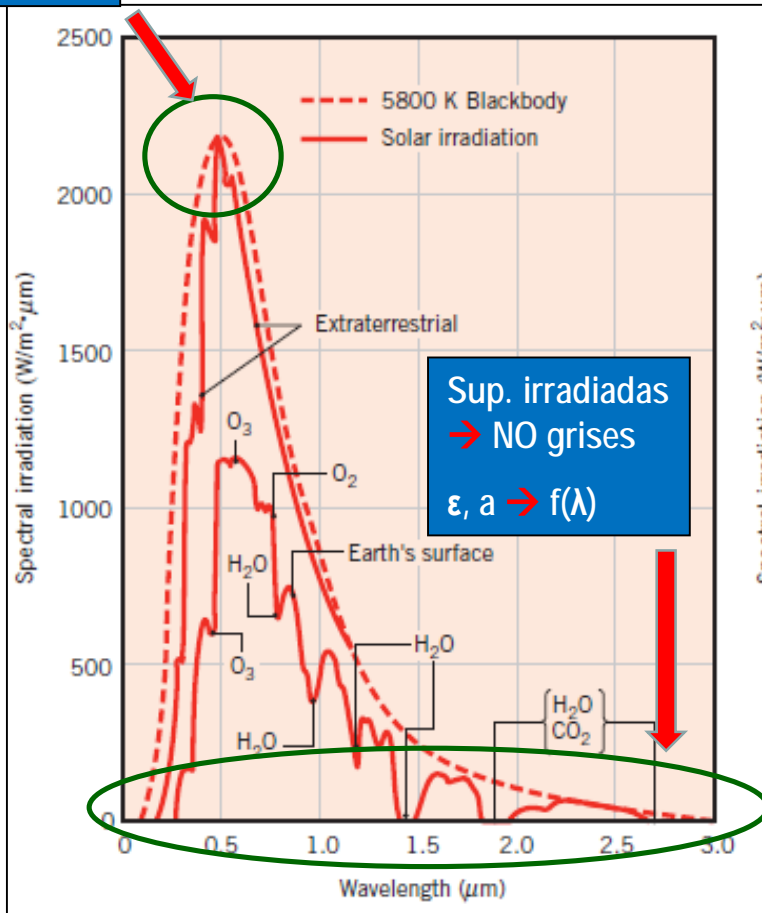
# LEYES DE KIRCHOFF. SUPERFICIES GRISES

## Superficies grises



# Cuerpo Negro

## RADIACIÓN MEDIOAMBIENTAL



Distribución espectral de la radiación que incide sobre la tierra (Incropera, 7ª ed)

Distribución espectral de la radiación ambiental emitida por la atmósfera (Incropera, 7ª ed)

# RADIACIÓN MEDIOAMBIENTAL

La radiación solar, al viajar por el espacio, ↓↓ su flujo ya que cada vez atraviesa una superficie esférica mayor.

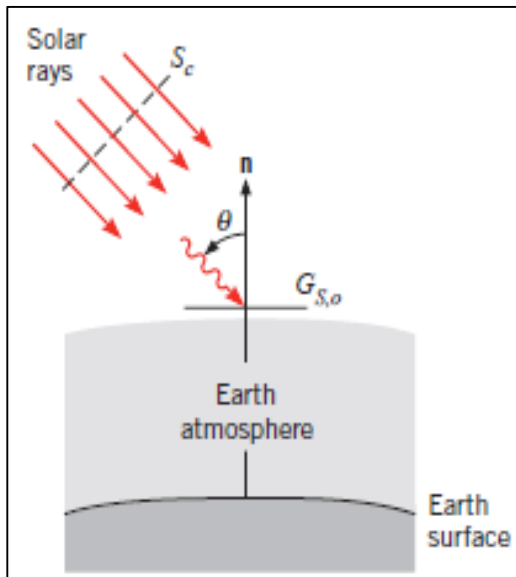
En la superficie de la tierra el flujo de radiación ha disminuido en  $(r_{\text{sol}} / \text{distancia}_{\text{tierra-sol}})^2$

## Constante solar ( $S_c$ )

Flujo de energía solar que incide sobre una superficie orientada perpendicularmente a los rayos del sol, sobre la cara exterior de la atmósfera y cuando el sol y la tierra se encuentran a la distancia media

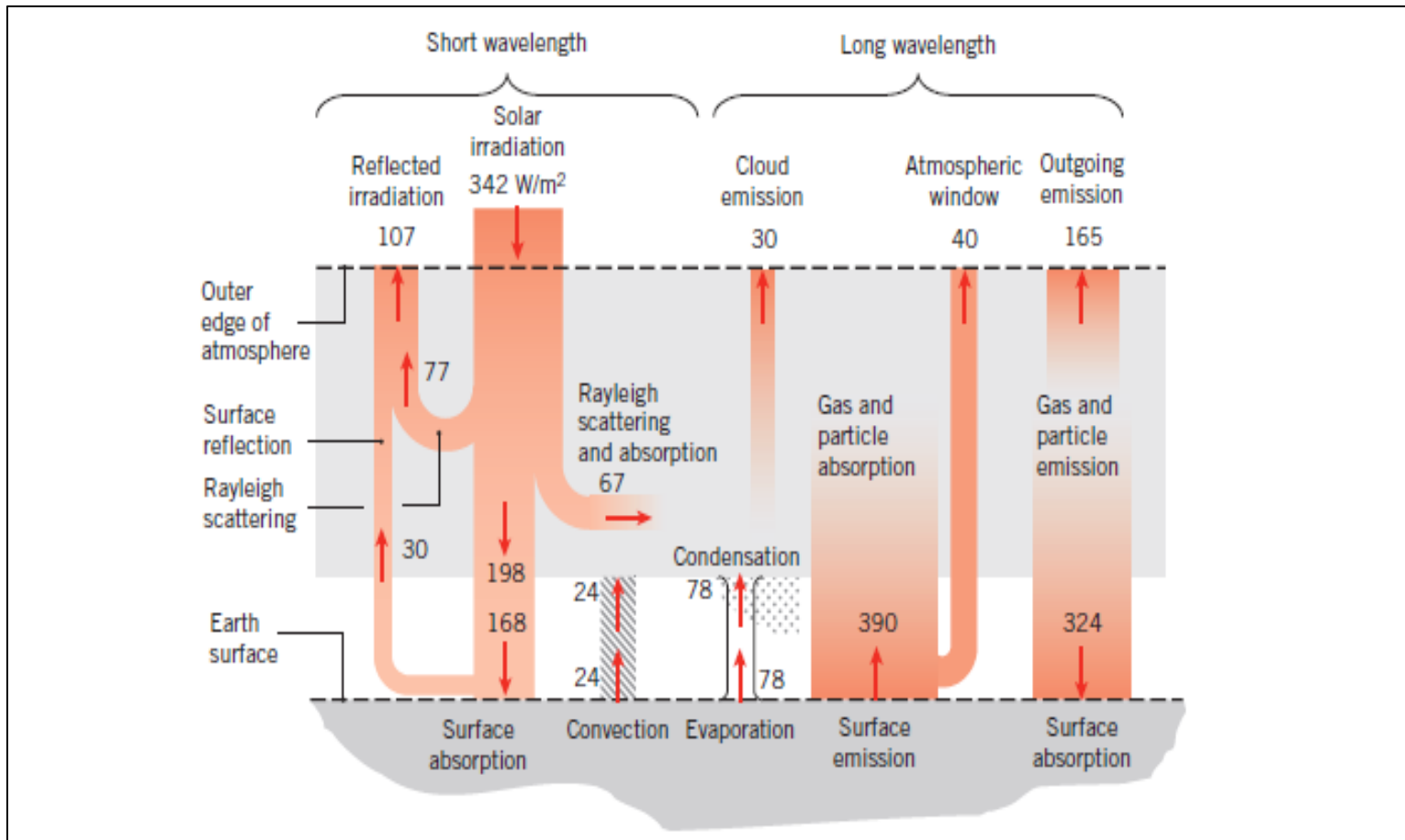
$$S_c = 1353 \text{ W/m}^2$$

$$G_s = S_c \cdot f \cdot \cos(\theta)$$



Superficie horizontal

# RADIACIÓN MEDIOAMBIENTAL



Balance de radiación en la atmósfera, para condiciones moderadas de temperatura y nubosidad (Incropera, 7<sup>a</sup> ed)

# TEMA 8.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN I

## Bibliografía

1. Incropera, F.P. y DeWitt, D.P. Fundamentos de Transferencia de calor. Ed. Prentice Hall. (1999), 4ª edición.
2. Kreith, F., Bohn, M.S. Principios de transferencia de calor. Ed. Thomson Paraninfo, S.A. (2002). 6ª Edición.
3. Costa, E y Col. Ingeniería Química 4. Transmisión de calor, Ed. Alhambra, (1986).

