



# *FÍSICA AMBIENTAL*

## Tema 5. RADIACIÓN

### Equipo docente:

Antonio J. Barbero García

Alfonso Calera Belmonte

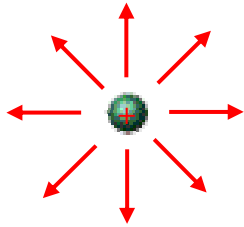
Pablo Muñiz García

José Ángel de Toro Sánchez

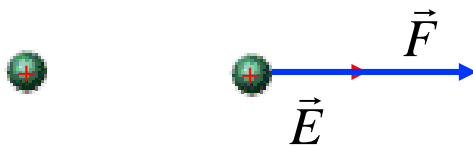
Departamento de Física Aplicada  
UCLM

# CARGA ELÉCTRICA

CARGAS ESTÁTICAS → INFLUENCIA SOBRE OTRAS CARGAS

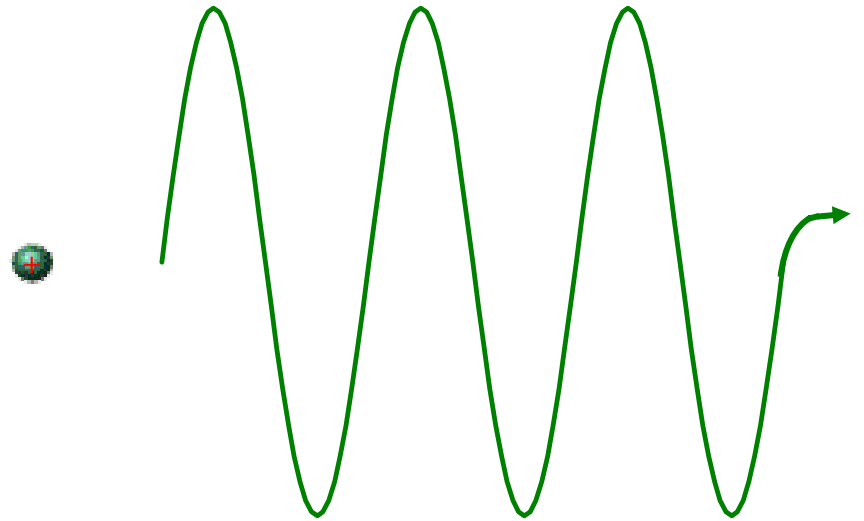


Campo eléctrico  
 $\vec{E}$



El campo eléctrico  
almacena energía

CARGAS EN MOVIMIENTO



# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (O.E.M.)

O.E.M.

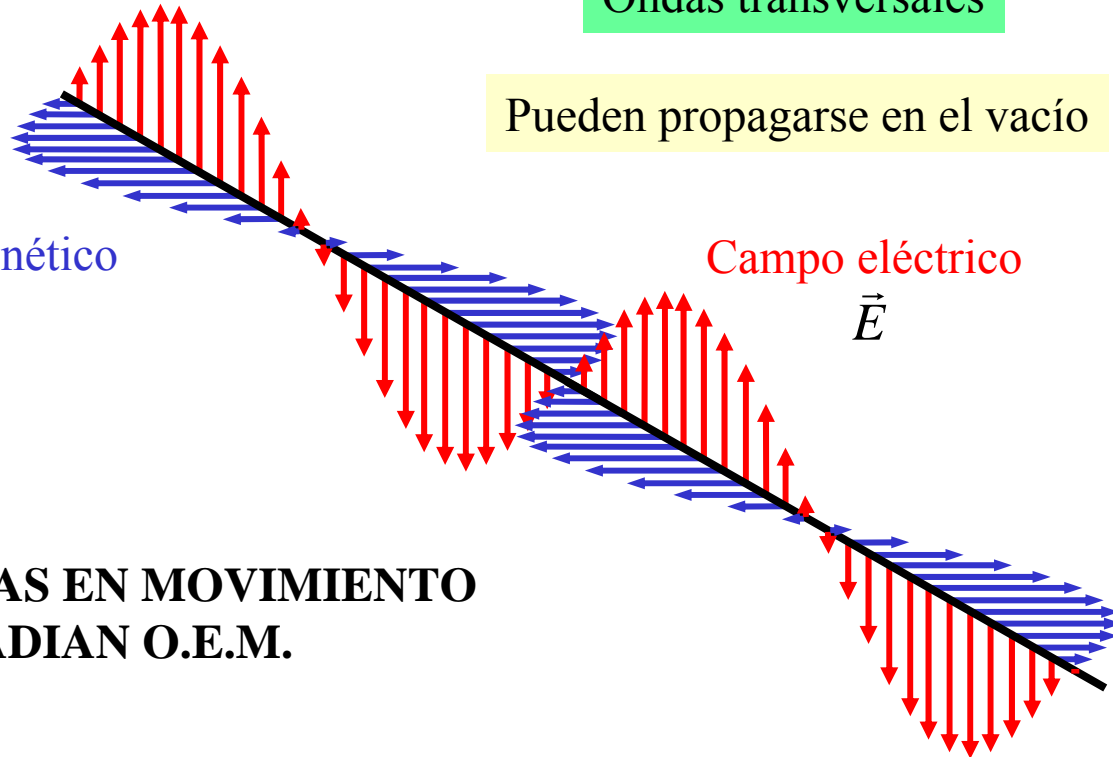
Perturbación en el espacio y en el tiempo que transmite energía asociada a un campo eléctrico y a un campo magnético mutuamente perpendiculares. Estos campos oscilan temporalmente en forma sinusoidal a medida que se propagan, y pueden describirse matemáticamente empleando combinaciones de funciones armónicas.

Ondas transversales

Pueden propagarse en el vacío

Campo magnético  
 $\vec{H}$

Campo eléctrico  
 $\vec{E}$



**LAS CARGAS EN MOVIMIENTO  
RADIAN O.E.M.**

# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (II)



## PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN UNA O.E.M.

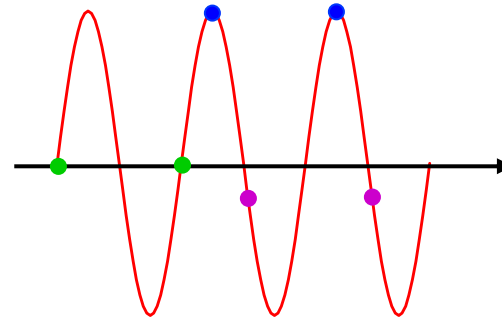
### FRECUENCIA $f$

Número de oscilaciones completas por unidad de tiempo de los campos eléctrico y magnético. Se mide en Hercios (Hz).  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$

La frecuencia es una característica de la O.E.M. **independiente** del medio en que se propague.

### LONGITUD DE ONDA $\lambda$

Distancia entre dos puntos consecutivos que tienen la misma fase.



La longitud de onda (para una frecuencia dada) depende de las características del medio en que se propaga la onda.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN ( $c = 300000 \text{ km/s}$  en el vacío)

$$c = \lambda \cdot f$$

# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (III)



## PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN UNA O.E.M. (Cont)

### FRECUENCIA ANGULAR $\omega$

Número de oscilaciones de los campos eléctrico y magnético en el tiempo necesario para que la fase cambie en  $2\pi$ .

### NÚMERO DE ONDA $k$

Número de ondas contenido en una distancia en que la fase cambia en  $2\pi$ .

### VECTOR DE PROPAGACIÓN $\vec{k}$

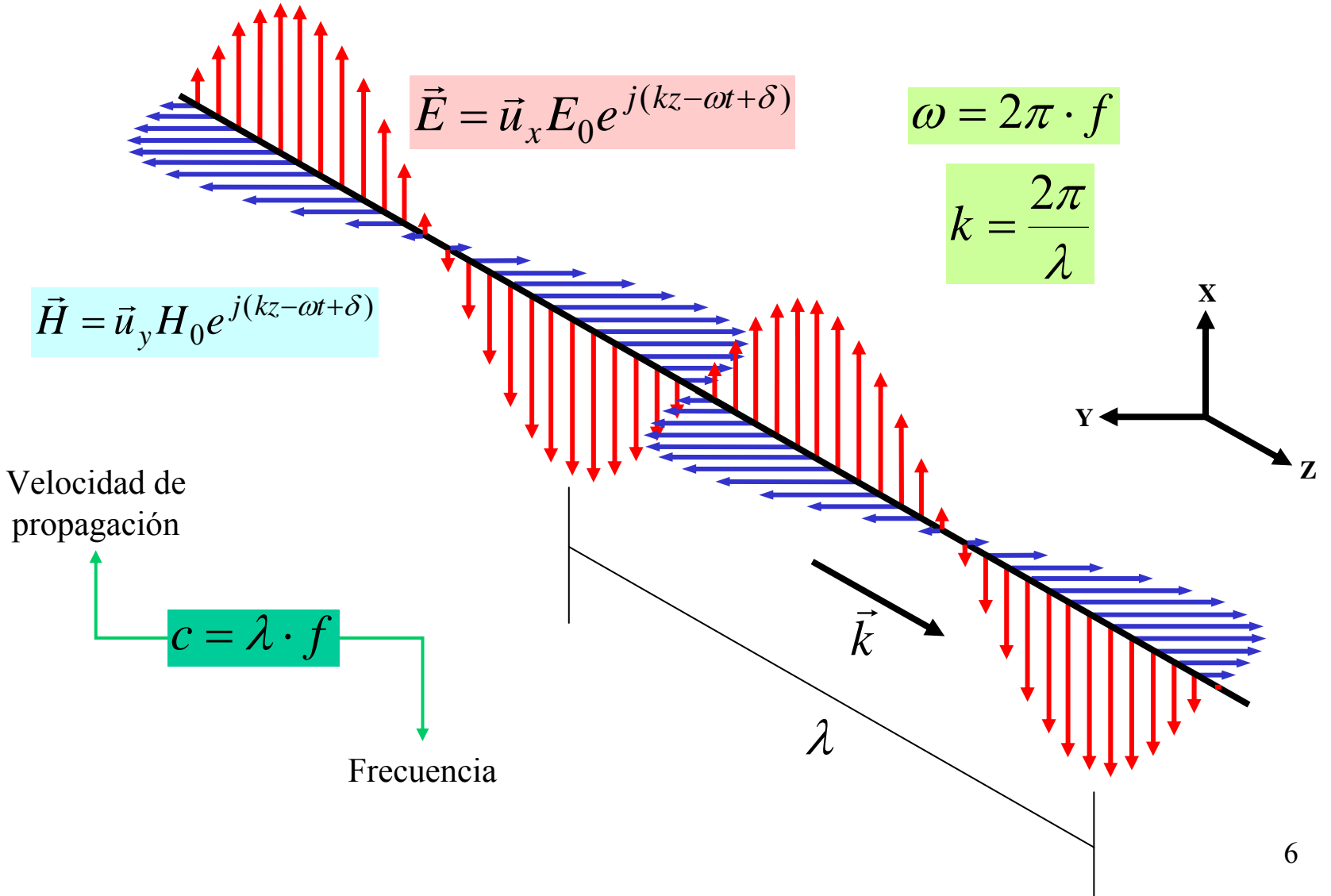
Dirección y sentido vectorial en que viaja la O.E.M.

### VECTOR DE POYNTING

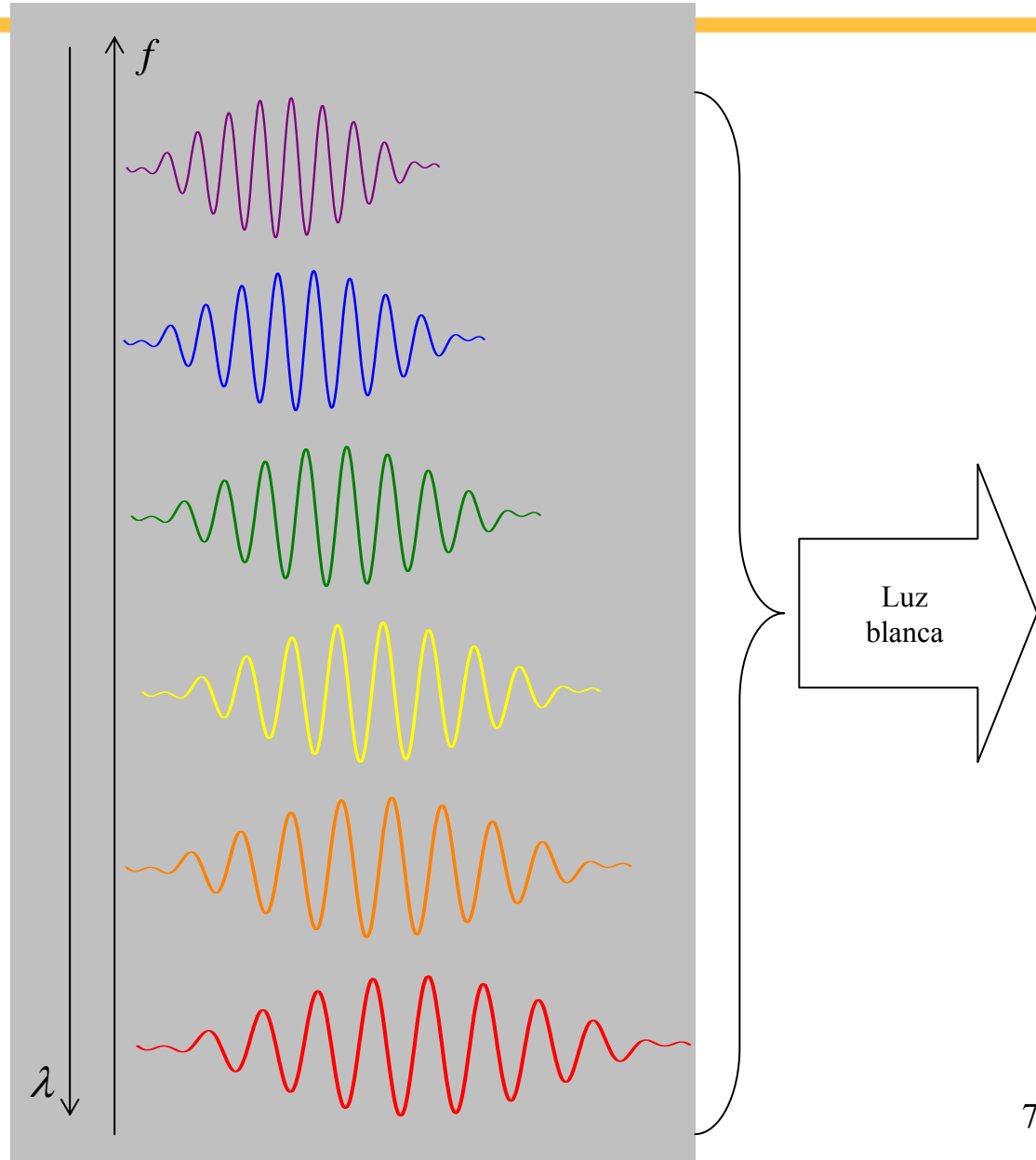
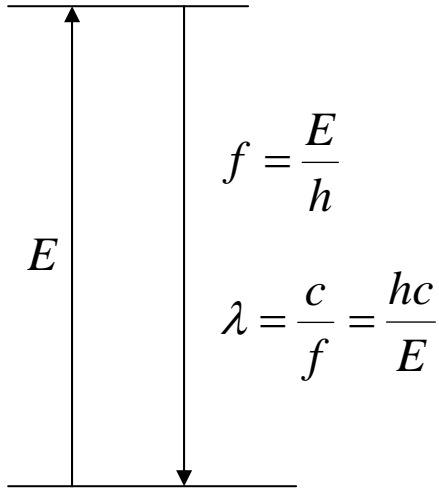
Dirección y sentido vectorial del flujo de energía asociado a la transmisión de energía electromagnética.

# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (IV)

## ONDA PLANA



## FOTONES



# ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Espectro electromagnético es el conjunto diferenciado de las distintas radiaciones EM, agrupadas según su frecuencia o según su longitud de onda.

$$\text{Energía} = h \cdot f$$

Constante de Planck  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$$f = \frac{c}{\lambda} \approx \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{0.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 3 \cdot 10^{15} \text{ Hz} = 3 \cdot 10^6 \text{ GHz}$$

$$\text{Energía} = (6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) (3 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}) \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

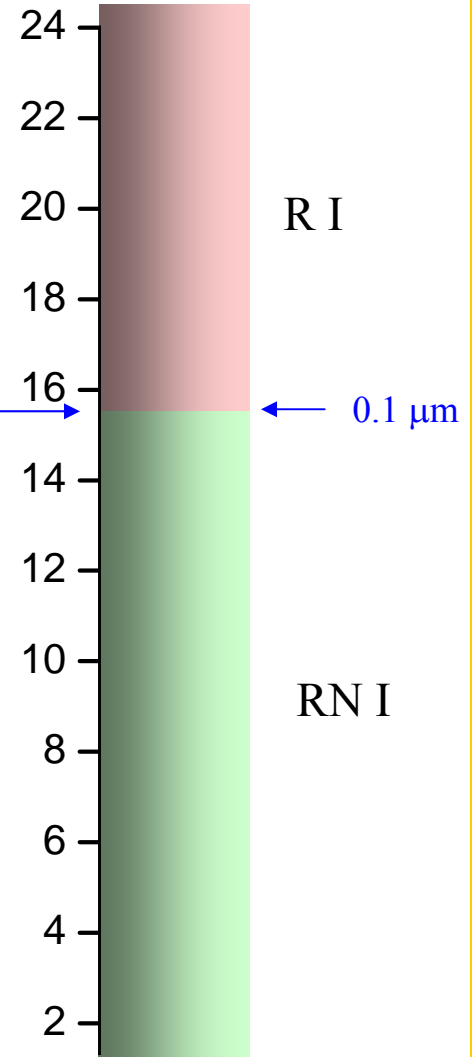
$3 \cdot 10^6 \text{ GHz}$

$0.1 \mu\text{m}$

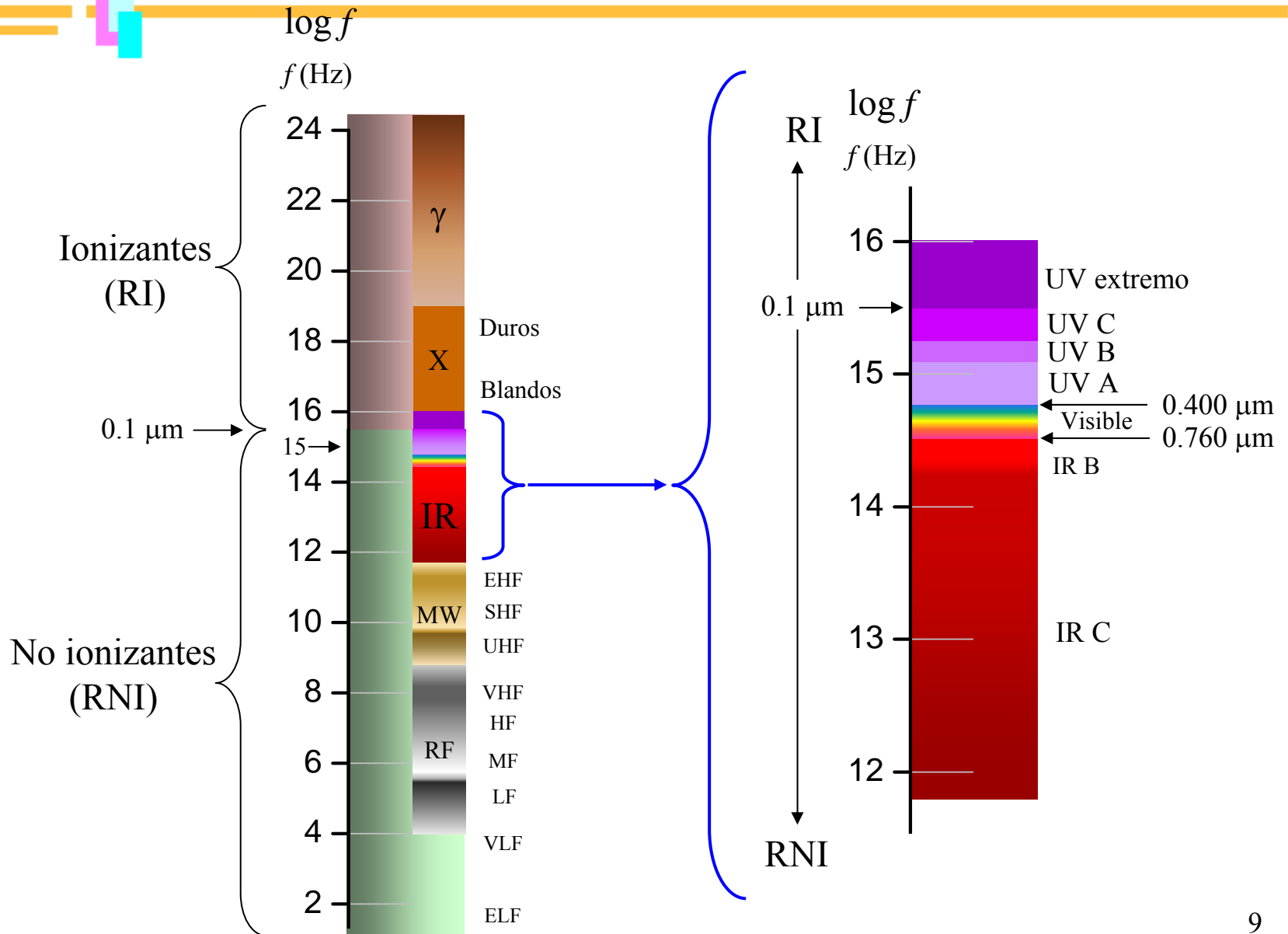
E  
N  
E  
R  
G  
Í  
A

$\log f$

$f(\text{Hz})$



# ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (II)

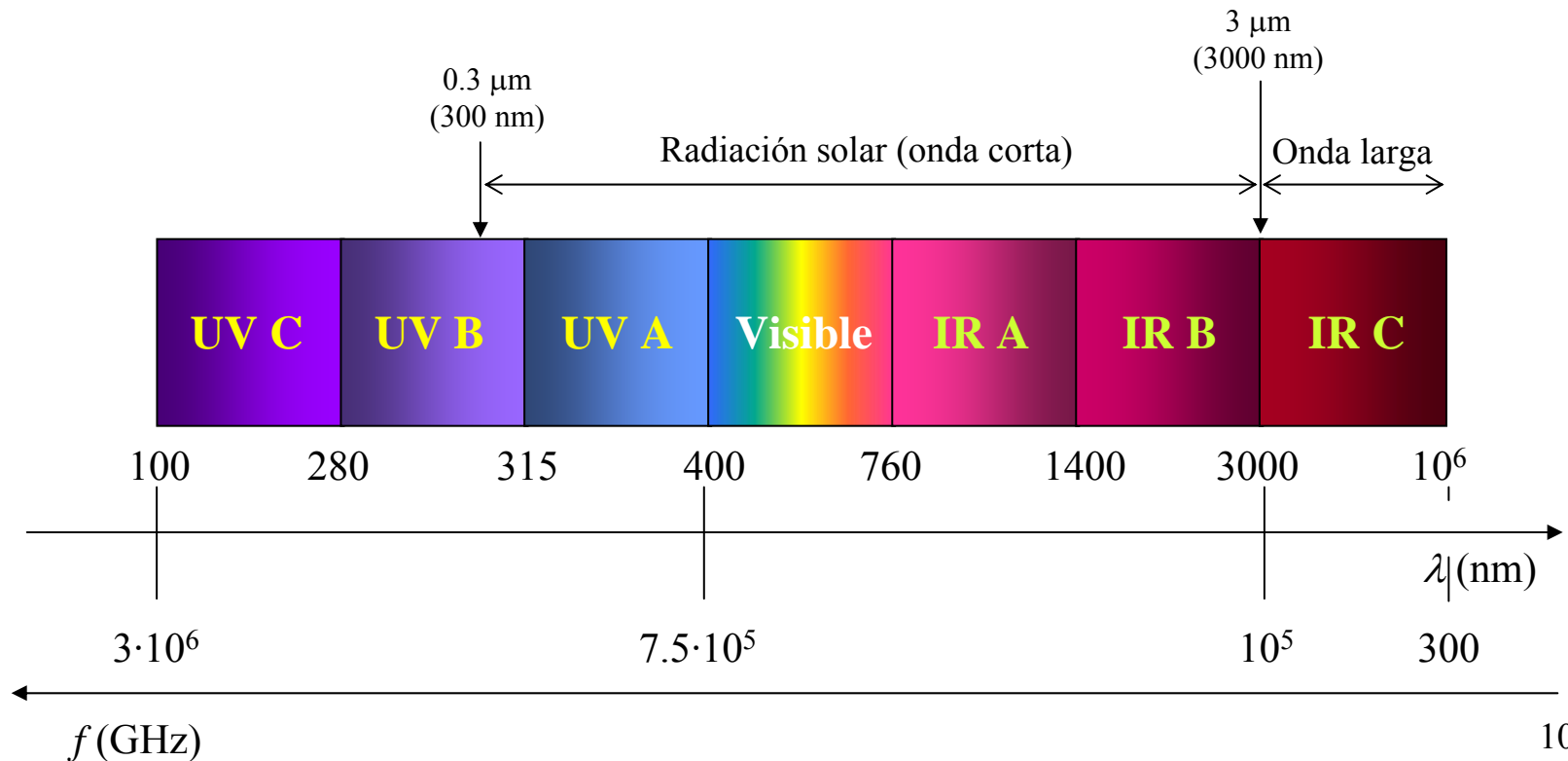


# ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (III)

## RADIACIONES NO IONIZANTES:

No tienen energía suficiente para producir efectos apreciables de ionización en los materiales.

Bandas espectrales adoptadas por la Comisión Internacional de Iluminación (Commission International de l'Eclairage, CIE) para UV, visible e IR



# EMISOR IDEAL DE O.E.M.



Un **cuerpo negro** es aquel que emite la máxima cantidad de radiación a cada longitud de onda y en todas direcciones (a una temperatura dada). También absorbe toda la radiación incidente en todas las direcciones para cada longitud de onda.

La **potencia emisiva espectral** (o monocromática)  $e_{b\lambda}$  de un cuerpo negro es la energía emitida por unidad de tiempo y unidad de área en cada longitud de onda (o frecuencia). Es una función de la temperatura.

Ecuación de Planck

$$e_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left[ e^{C_2/\lambda T} - 1 \right]} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$$

$$\lambda \rightarrow \mu\text{m} \quad T \rightarrow \text{K}$$

$$C_1 = 3.7427 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu\text{m}^4$$

$$C_2 = 1.4388 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

## EMISOR IDEAL DE O.E.M. (II)

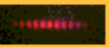
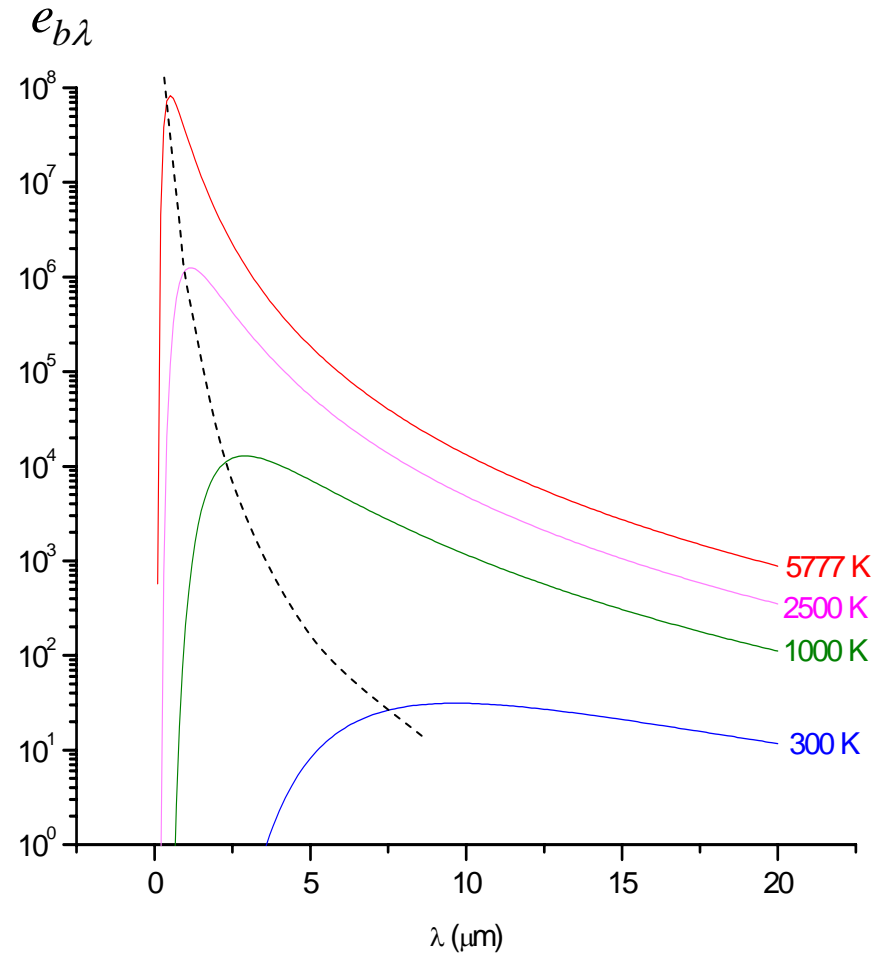


A medida que la temperatura de un cuerpo negro se incrementa se observa que:

La potencia emisiva se incrementa para cada longitud de onda

La cantidad relativa de energía emitida a longitudes de onda cortas se incrementa

La posición del máximo de potencia emisiva se desplaza hacia longitudes de onda más cortas



# EMISOR IDEAL DE O.E.M. (III)



## Ley de Stefan-Boltzmann

La potencia emisiva de un cuerpo negro dentro de un ancho de banda  $d\lambda$  es  $e_{b\lambda} \cdot d\lambda$ . La potencia emisiva total  $e_b$  es la radiación que abandona el cuerpo negro a todas las longitudes de onda, y está dada por:

$$e_b = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} e_{b\lambda} d\lambda = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot [e^{C_2/\lambda T} - 1]} d\lambda \quad e_b = \sigma T^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$$

$$\text{Constante de Stefan-Boltzmann } \sigma = 5.6866 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$$

## Ley de desplazamiento de Wien

La longitud de onda correspondiente al máximo de emisión es inversamente proporcional a la temperatura.

$$\lambda_{max} = \frac{2897.8}{T} \quad (\mu\text{m})$$

## EMISOR IDEAL DE O.E.M. (IV)

## Ejemplo

Cuerpo negro radiando un total de  $e_b = 7.250 \cdot 10^4 \text{ Wm}^{-2}$ . Determínese su temperatura, la longitud de onda del máximo de emisión y representétese su potencia emisiva espectral en función de la longitud de onda.

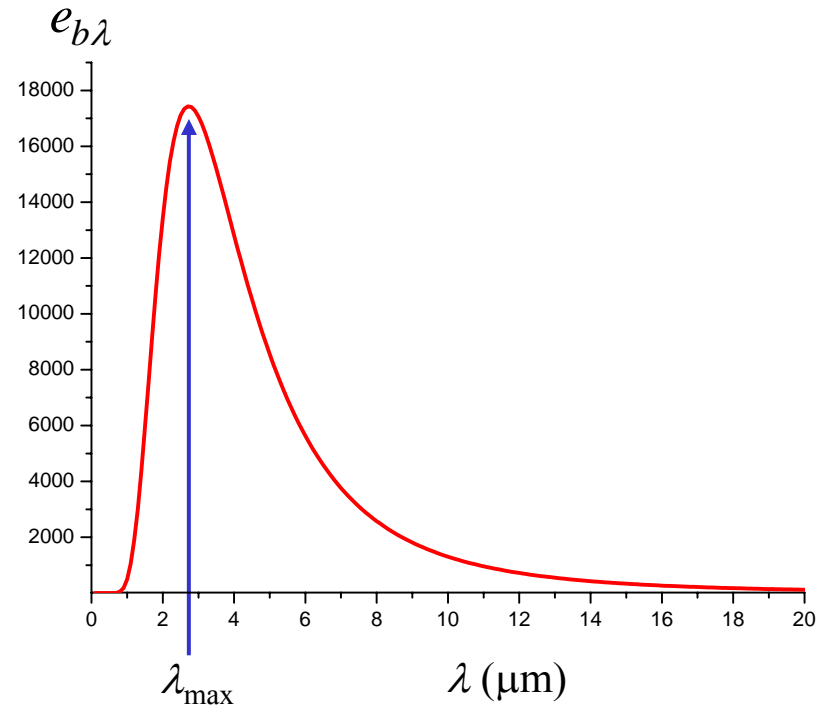
Según la ley de Stefan-Boltzmann

$$e_b = \sigma T^4$$

$$T = \left( \frac{7.250 \cdot 10^4}{5.6866 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/4} = 1062.6 \text{ K}$$

Según la ley de Wien

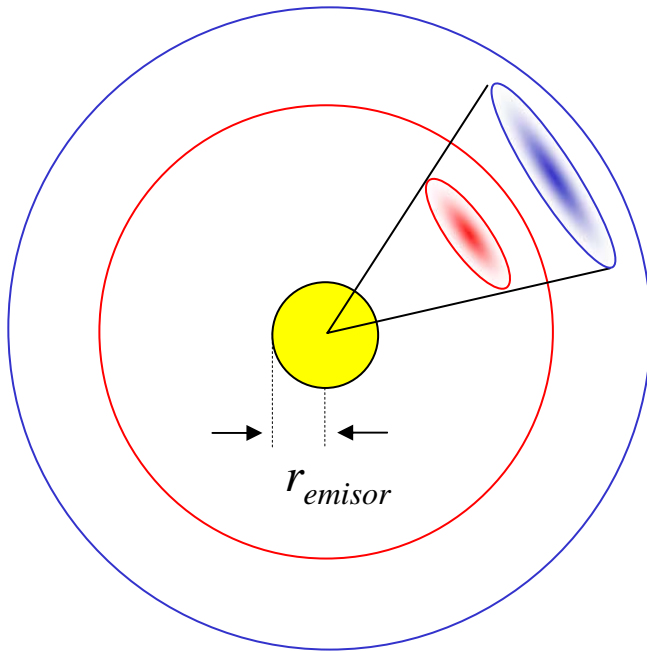
$$\lambda_{max} = \frac{2897.8}{1062.6} = 2.73 \mu\text{m}$$



# IRRADIANCIA ESPECTRAL

La irradiancia espectral  $I_{0n\lambda}$  corresponde al flujo energético **recibido** a cada longitud de onda por una superficie situada perpendicularmente a la marcha de los rayos colocada a la distancia  $r$  del cuerpo negro emisor.

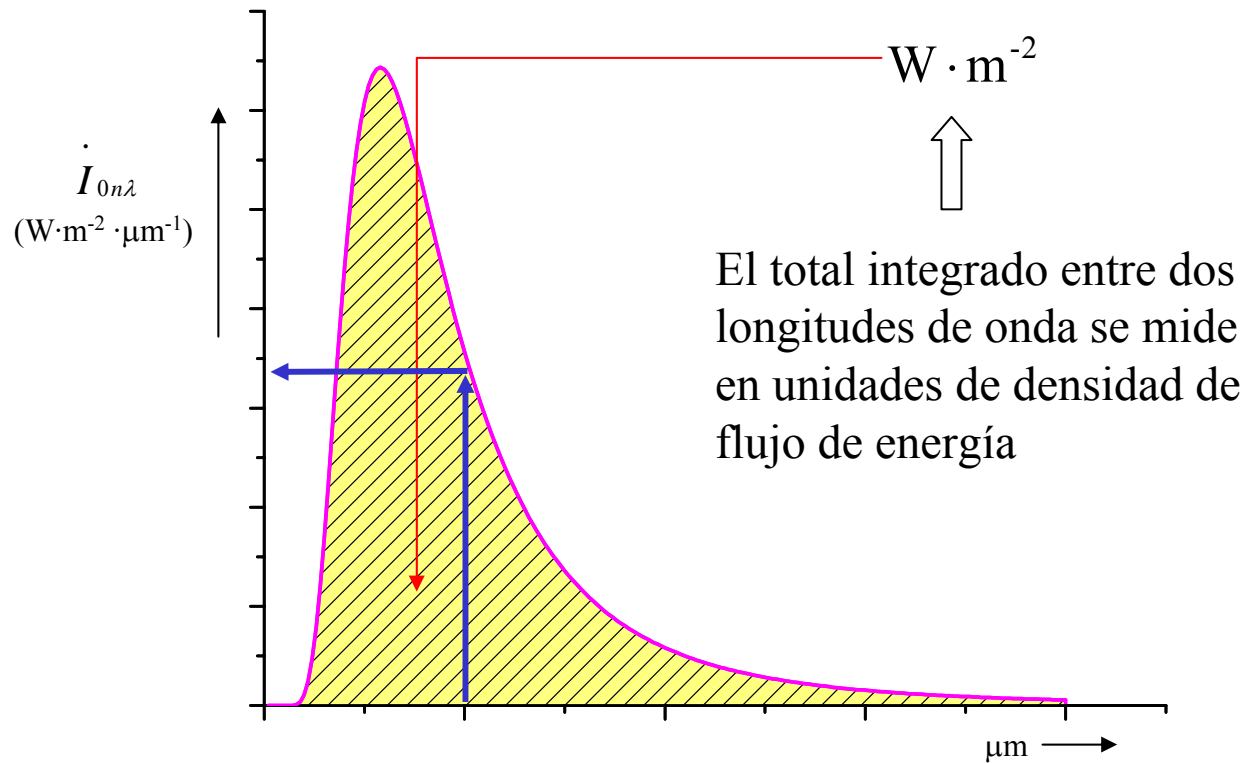
$$I_{0n\lambda} = e_{b\lambda} \left( \frac{r_{emisor}}{r} \right)^2$$



La energía radiada se distribuye sobre una superficie cada vez mayor en proporción al cuadrado del radio → el flujo disminuye inversamente al cuadrado del radio a medida que nos alejamos de la fuente

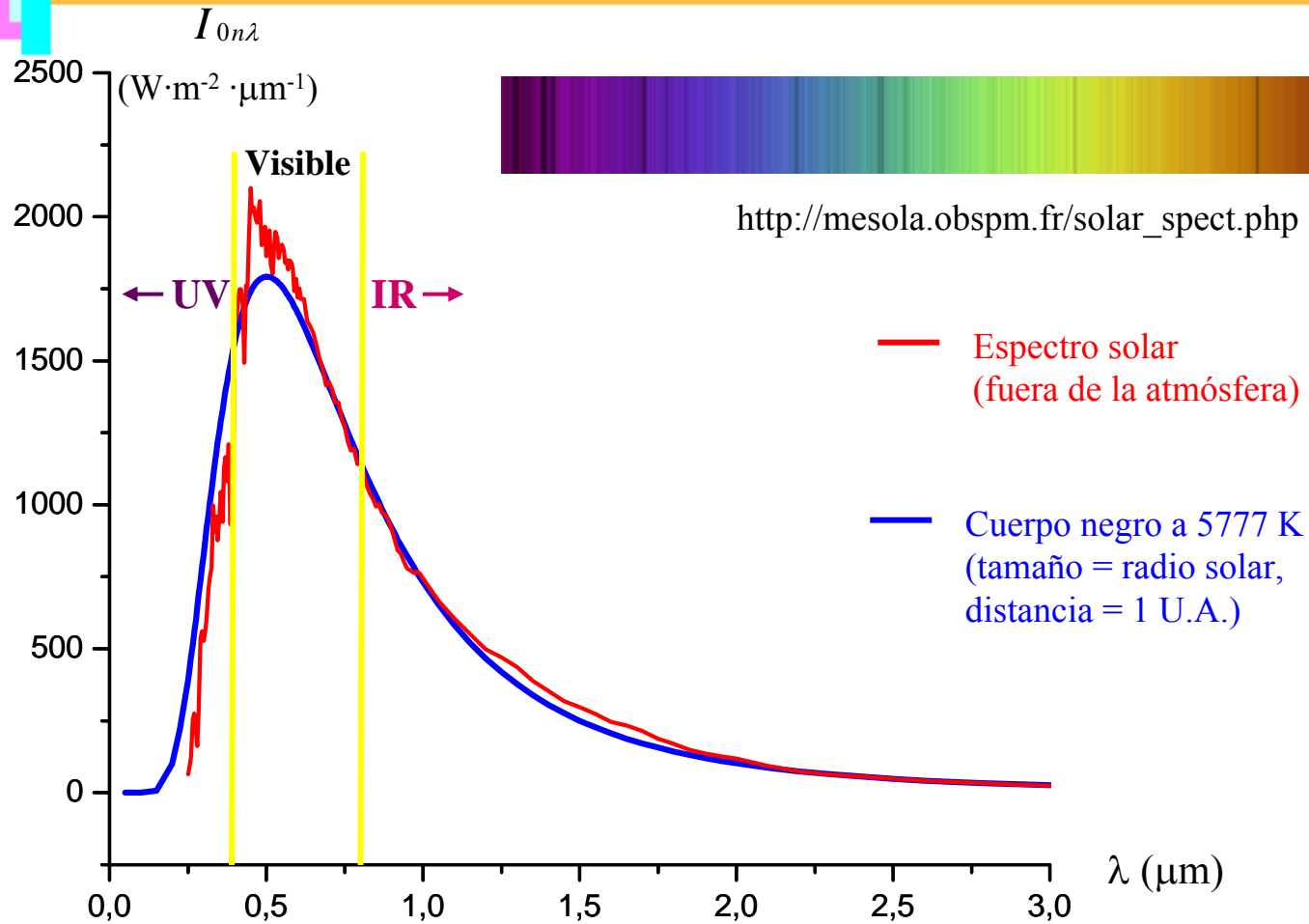
## IRRADIANCIA ESPECTRAL (II)

$\dot{I}_{0n\lambda}$  → Irradiancia espectral promediada sobre una pequeña anchura de banda centrada en  $\lambda$  (se mide en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ )



Geométricamente corresponde a la superficie comprendida bajo la curva de irradiancia espectral y el eje de abscisas

# ESPECTRO SOLAR: EL SOL COMO CUERPO NEGRO

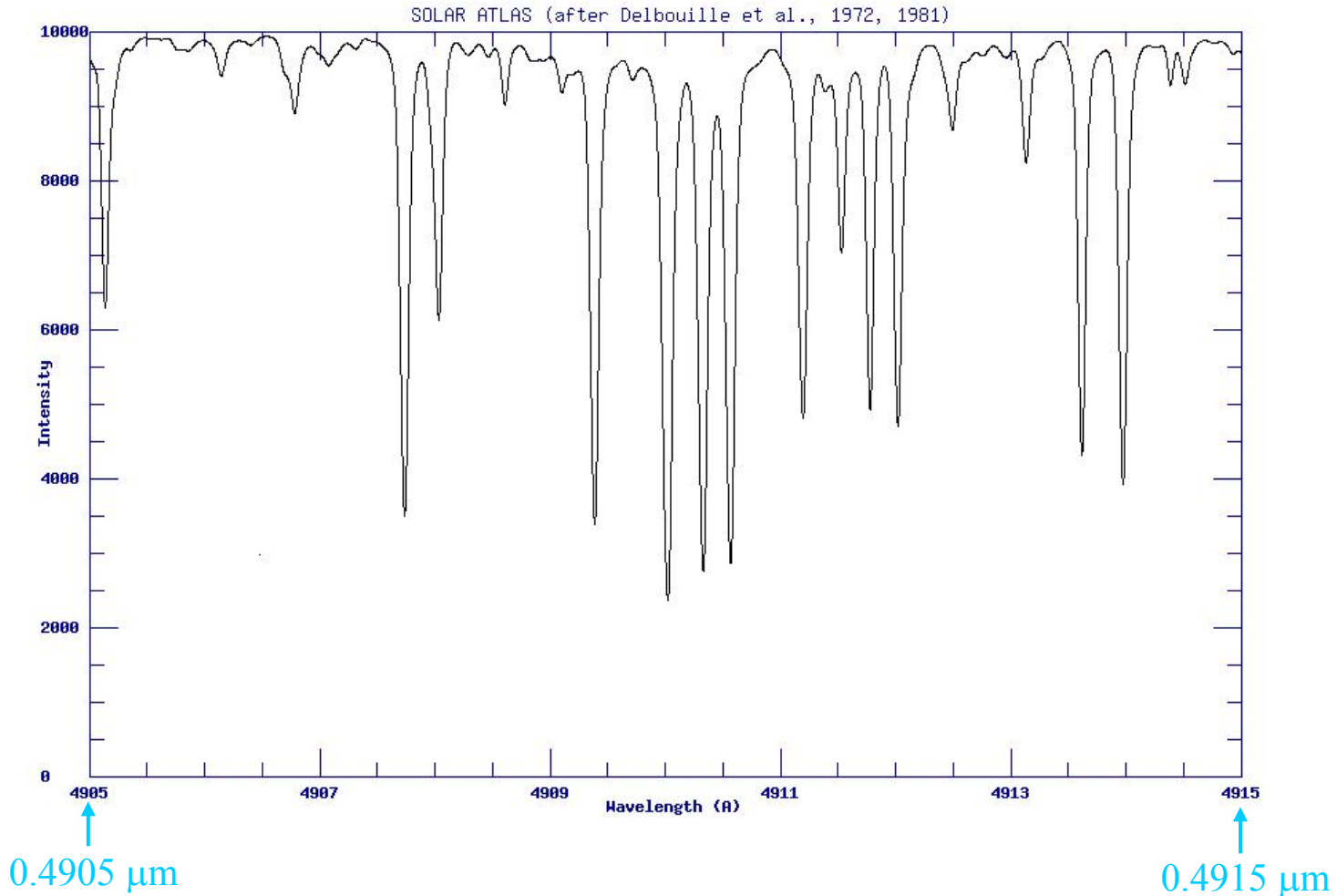


$I_{0n\lambda}$  → Irradiancia espectral promediada sobre una pequeña anchura de banda centrada en  $\lambda$  (se mide en  $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ )

# LÍNEAS DE ABSORCIÓN EN EL ESPECTRO SOLAR



DEBIDAS A DISTINTOS ELEMENTOS PRESENTES EN EL SOL (EJEMPLO)

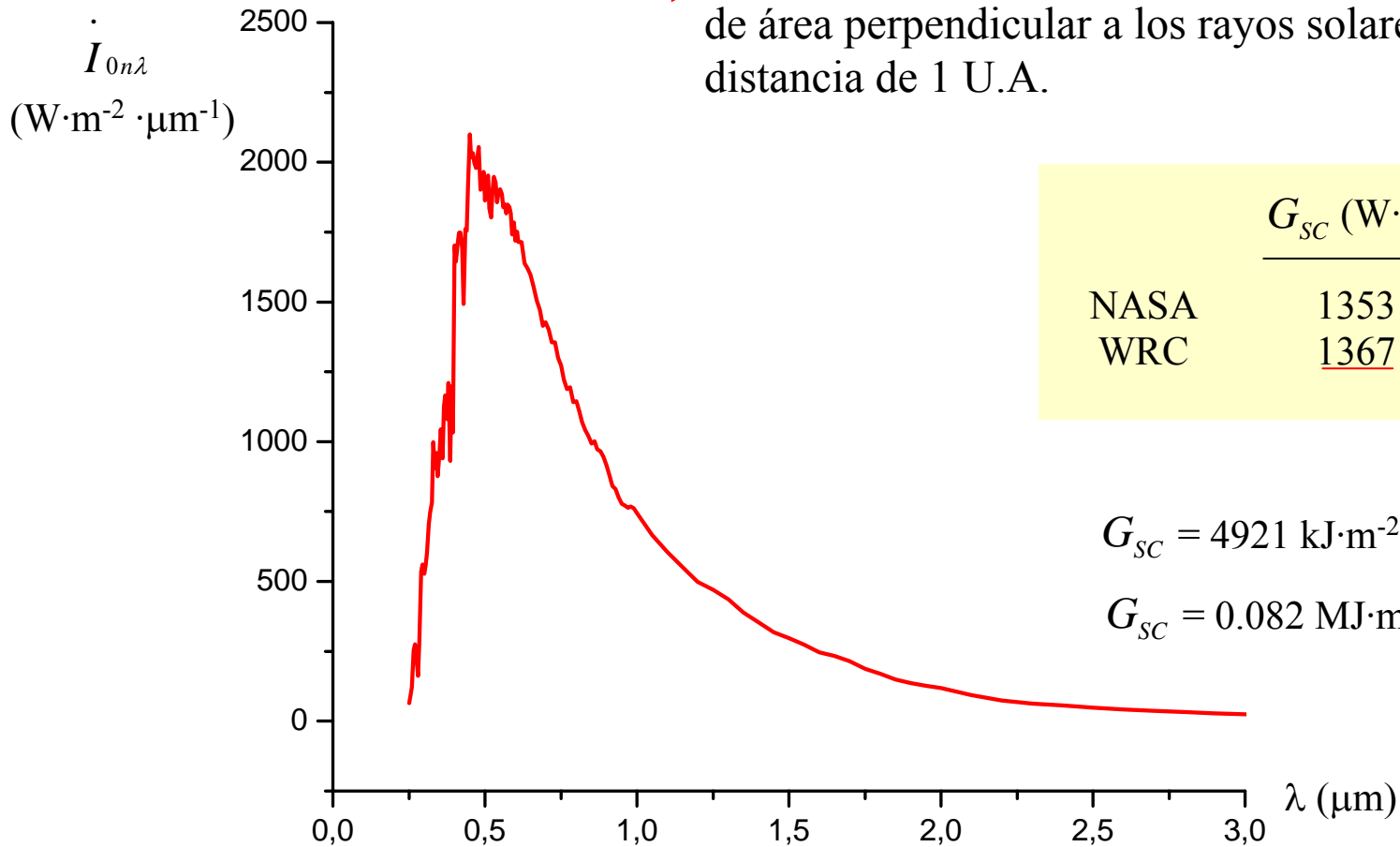


[http://mesola.obspm.fr/solar\\_spect.php?step=1](http://mesola.obspm.fr/solar_spect.php?step=1)

# ESPECTRO SOLAR: EL SOL COMO CUERPO NEGRO (II)

## CONSTANTE SOLAR

Flujo total de energía solar (a todas las longitudes de onda) incidente sobre una unidad de área perpendicular a los rayos solares a una distancia de 1 U.A.



|      | $G_{SC}$ (W·m <sup>-2</sup> ) |
|------|-------------------------------|
| NASA | 1353                          |
| WRC  | <u>1367</u>                   |

$$G_{SC} = 4921 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$G_{SC} = 0.082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$$

Otras unidades      1 langley (ly) = 41.86 kJ/m<sup>2</sup>       $G_{SC} = 2.0 \text{ ly/min}$

# FLUJO DE ENERGÍA SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES FUERA DE LA ATMÓSFERA

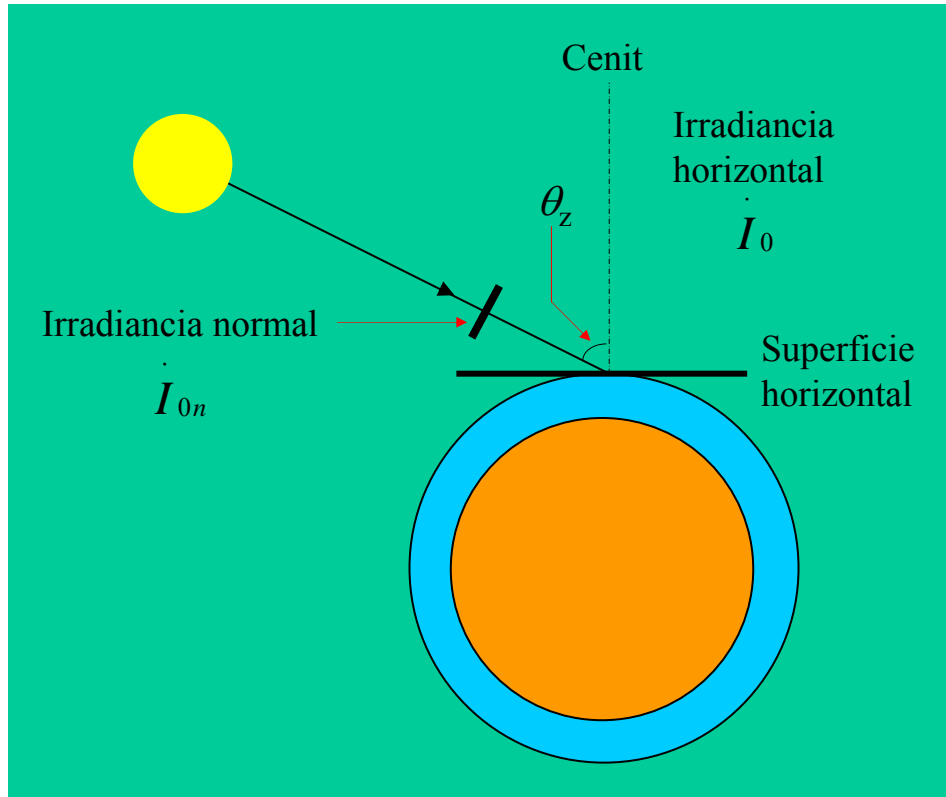
Flujo de energía

Irradiación extraterrestre ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) sobre una superficie normal a los rayos solares

$$\dot{I}_{0n} = G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 = G_{SC} E_0$$

Irradiación extraterrestre ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) sobre una superficie horizontal

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0n} \cos \theta_z$$



$$\dot{I}_0 = G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z = G_{SC} E_0 \cos \theta_z$$

$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  sobre superficie horizontal

# RADIACIÓN EXTRATERRESTRE

La radiación que alcanza una superficie perpendicular a los rayos del sol en el límite superior de la atmósfera es:

$$\dot{I}_{0n} = G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 = G_{SC} E_0$$

Constante solar

$$G_{SC} = 0.082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$$

Factor excentricidad  
(distancia relativa inversa)

$$d_r = E_0 = \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0.033 \cos \left[ \frac{2\pi J}{365} \right]$$

$$J = \text{día del año} \quad (J = 1 \dots 365)$$

Intensidad local de radiación: está determinada por el ángulo entre la dirección de los rayos solares y la normal a la superficie en el límite de la atmósfera. Este ángulo cambia durante el día y también según la latitud y las estaciones.

$$R_a = \dot{I}_0 = \dot{I}_{0n} \cos \theta_z$$

Ángulo cenital

$$R_a = G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z = G_{SC} E_0 \cos \theta_z$$

**Radiación extraterrestre**  
(radiación astronómica)

# RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (II)

## Cálculo para periodos diarios

Integración de la ecuación

$$R_a = G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z = G_{SC} E_0 \cos \theta_z$$

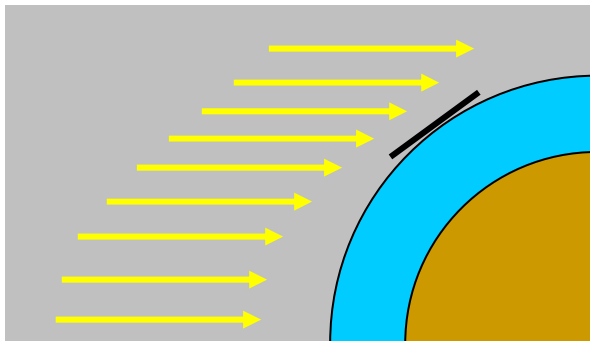
Energía total recibida por unidad de superficie en el intervalo de 1 día

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 [\omega_s \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \sin \omega_s] \quad (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1})$$

0.082 MJ·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \delta \cdot \tan \Phi)$$

(Ángulo horario a la salida del sol)



# RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (III)

Ejemplo 1. Usando la ecuación integrada

Para el día 1 de agosto ( $J=213$ ) a una latitud de  $40^\circ$  N se tiene:

$$G_{SC} = 0.082 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1} \quad d_r = 0.9778484 \quad \text{Declinación: } \delta = 18.22^\circ$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\text{tg } \delta \cdot \text{tg } \Phi) = \cos^{-1}(-\text{tg } 18.22^\circ \cdot \text{tg } 40^\circ) = 106.03^\circ = 1.8506 \text{ rad}$$

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 [\omega_s \text{ sen } \Phi \text{ sen } \delta + \cos \Phi \cos \delta \text{ sen } \omega_s] =$$

$$= \frac{24 \cdot 60}{\pi} 0.082 \cdot 0.9778484 [1.8506 \cdot \text{sen } 40^\circ \cdot \text{sen } 18.22^\circ + \cos 40^\circ \cdot \cos 18.22^\circ \cdot \text{sen } 106.03^\circ] =$$

$$= \frac{24 \cdot 60}{\pi} 0.082 \cdot 0.9778484 [0.3719 + 0.6993] = 38.89 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$$

# RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (IV)



Ejemplo 2. Integración gráfica de la ecuación  
Determinación de la radiación astronómica el día 1 de agosto.

$$J = 213 \quad \text{Declinación: } \delta = 18.22^\circ \quad \text{Latitud: } \Phi = 40^\circ \text{ N}$$

$$G_{SC} = 0.082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$R_a = G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z = G_{SC} E_0 \cos \theta_z$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \Phi + \cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \omega$$

$$d_r = E_0 = \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0.033 \cos \left[ \frac{2\pi J}{365} \right]$$

# RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (V)

Cálculos y preparación datos para representación gráfica

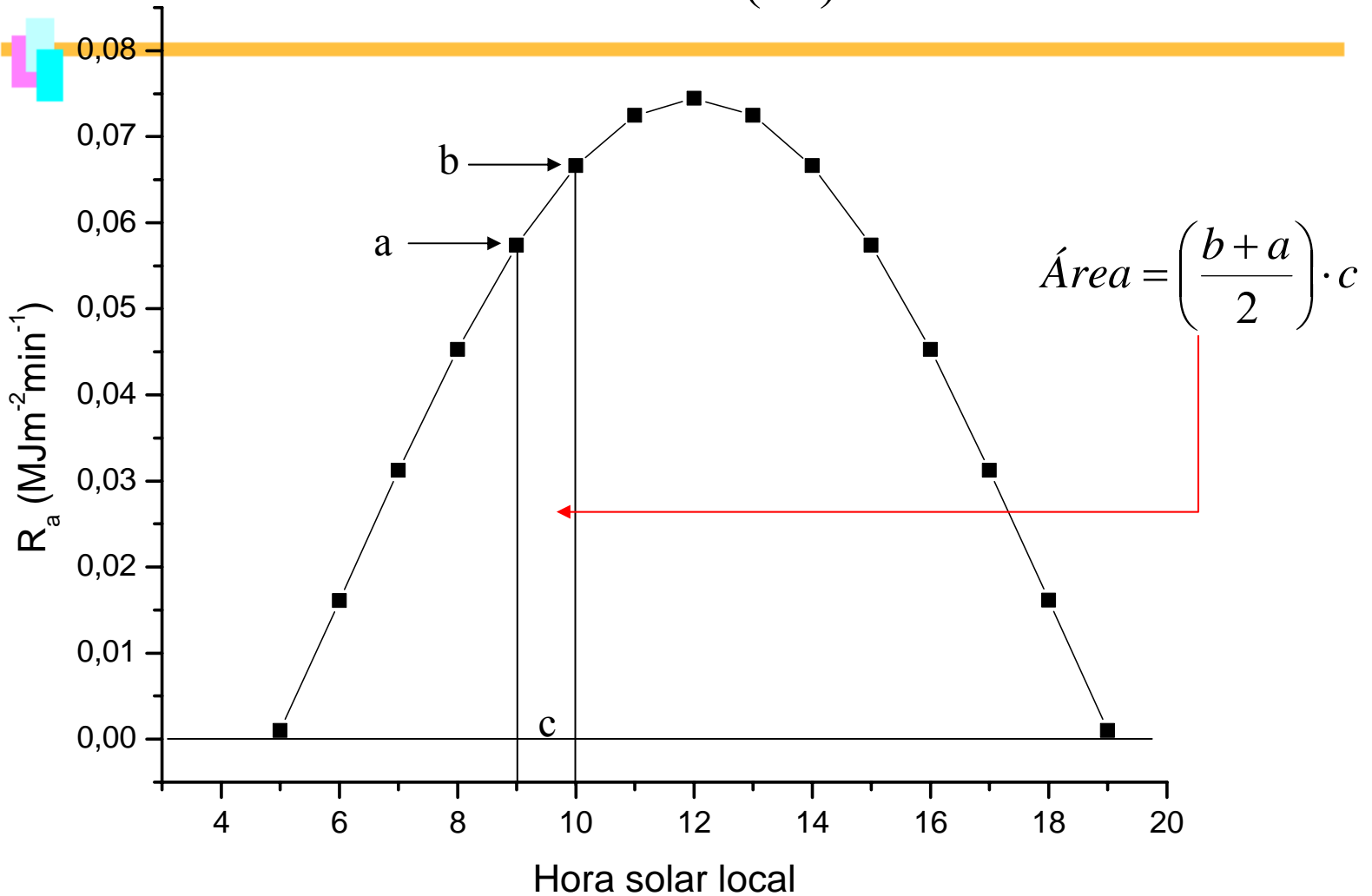
$$G_{SC} = 0.082 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1} \quad J = 213 \quad d_r = 0.9778484$$

| HSL | $\omega$ |      | $\cos \theta_z$ | $R_a$  |   |
|-----|----------|------|-----------------|--|---|
|     | rad      | °    |                 | 1 h ×<br>MJm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> | 60 min ×<br>MJm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> |
| 5   | 1,8326   | 105  | 0,01265         | 0,00101                                      | 0,06087   |
| 6   | 1,5708   | 90   | 0,20098         | 0,01612                                      | 0,96691   |
| 7   | 1,3090   | 75   | 0,38930         | 0,03122                                      | 1,87295   |
| 8   | 1,0472   | 60   | 0,56480         | 0,04529                                      | 2,71725   |
| 9   | 0,7854   | 45   | 0,71550         | 0,05737                                      | 3,44226   |
| 10  | 0,5236   | 30   | 0,83113         | 0,06664                                      | 3,99858   |
| 11  | 0,2618   | 15   | 0,90382         | 0,07247                                      | 4,34830   |
| 12  | 0,0000   | 0    | 0,92862         | 0,07446                                      | 4,46758   |
| 13  | -0,2618  | -15  | 0,90382         | 0,07247                                      | 4,34830   |
| 14  | -0,5236  | -30  | 0,83113         | 0,06664                                      | 3,99858   |
| 15  | -0,7854  | -45  | 0,71550         | 0,05737                                      | 3,44226   |
| 16  | -1,0472  | -60  | 0,56480         | 0,04529                                      | 2,71725   |
| 17  | -1,3090  | -75  | 0,38930         | 0,03122                                      | 1,87295   |
| 18  | -1,5708  | -90  | 0,20098         | 0,01612                                      | 0,96691   |
| 19  | -1,8326  | -105 | 0,01265         | 0,00101                                      | 0,06087   |

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \Phi + \cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \omega$$

$$R_a = G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z = G_{SC} E_0 \cos \theta_z$$

## RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (VI)



$$S = \sum_{i=1}^n \left( \frac{b_i + a_i}{2} \right) \cdot c_i = 0.65470 \text{ MJm}^{-2}\text{min}^{-1} \cdot \text{h} = 0.65470 \cdot 60 \text{ MJm}^{-2} = 39.28 \text{ MJm}^{-2}$$

Suma diaria:  $39.28 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$

(compárese con  $38.89 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ) 26

# RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (VII)

## Cálculo de la radiación extraterrestre $R_a$ para periodos cortos

La radiación astronómica para cada día del año y para cada latitud puede estimarse a partir de la constante solar, la declinación del día y la hora de comienzo y fin del periodo de cálculo.

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \left[ (\omega_2 - \omega_1) \text{sen } \Phi \text{sen } \delta + \cos \Phi \cos \delta (\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1) \right]$$

$0.082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$

$\omega_1 = \omega - \frac{\pi \cdot t_1}{24}$

$\omega_2 = \omega - \frac{\pi \cdot t_1}{24}$

$R_a$  en  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hora}^{-1}$   
 (o periodo más corto)

Intervalo de tiempo de cálculo  
 (para 1 hora,  $t=1$ ; para 30 min,  $t=0.5$ )

Determinación de  $\omega$ , véase página siguiente

# RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (VIII)

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (\text{Ángulo de tiempo solar a mitad del periodo})$$

$t$ : hora estándar (en fracción decimal) a mitad del periodo, e.g, entre las 15 y las 16,  $t = 15.5$

$L_z$ : Longitud del centro de la zona de tiempo local (en grados al OESTE de Greenwich).  
Ejemplos: Para costa este de EEUU,  $L_z = 75^\circ$ ; zona del Pacífico EEUU,  $L_z = 120^\circ$ ; para Bangkok,  $L_z = 255^\circ$ ; para El Cairo  $L_z = 330^\circ$ .

$L_m$ : Longitud del lugar de medida (en grados al oeste de Greenwich).

$S_c$ : Corrección estacional para la hora solar (en horas)

$$S_c = 0.1645 \text{sen}(2b) - 0.1255 \text{cos}(b) - 0.025 \text{sen}(b)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (\text{J es el número de día del año})$$

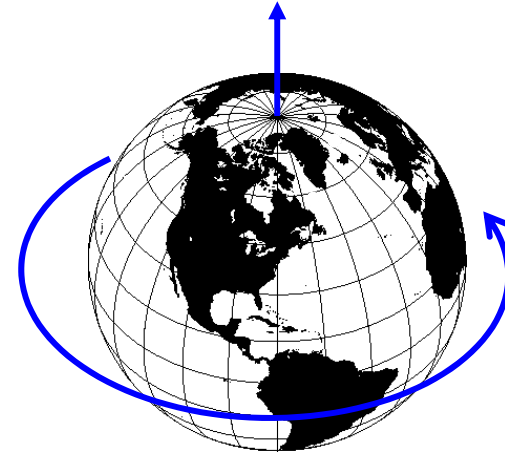
# CONSTANTE SOLAR MEDIA

Constante solar  $G_{SC} = 0.082 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1} = 1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$



Círculo de radio 6740 km

Energía interceptada:  
Proporcional a  $\pi R^2$



La energía se recibida en 1 día se distribuye en un área  $4\pi R^2$

Para calcular la cantidad media de energía solar que alcanza la Tierra **(EN LOS NIVELES SUPERIORES DE LA ATMÓSFERA)** por metro cuadrado de superficie, hay que multiplicar la constante solar por el área del círculo terrestre y dividir este resultado por la superficie.

Constante solar media

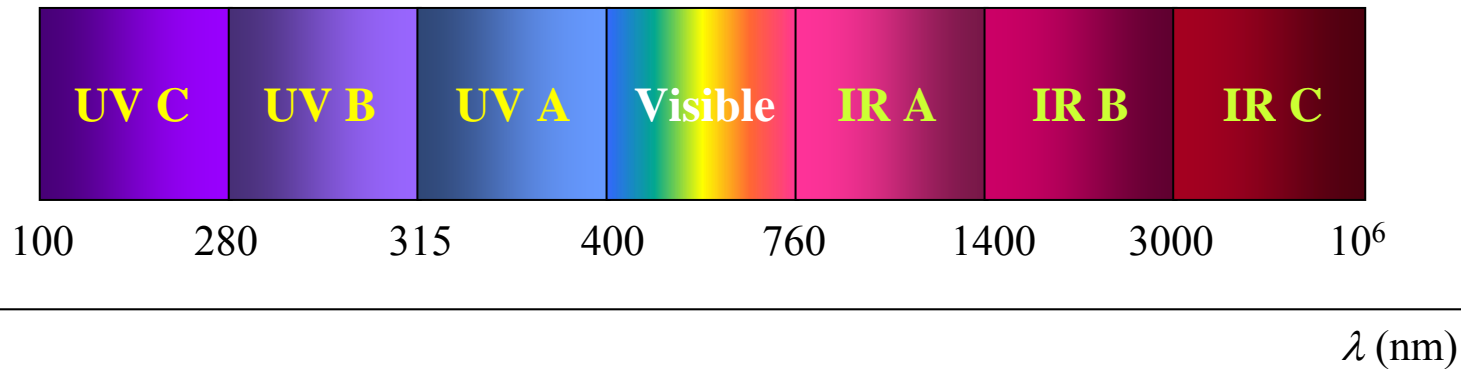
$342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

29

# RADIACIÓN DE ONDA CORTA

Radiaciones comprendidas en el intervalo entre  $0,3 \mu\text{m}$  y  $3 \mu\text{m}$  (300 nm-3000 nm)

Comprende parte de UV, el visible y parte del IR



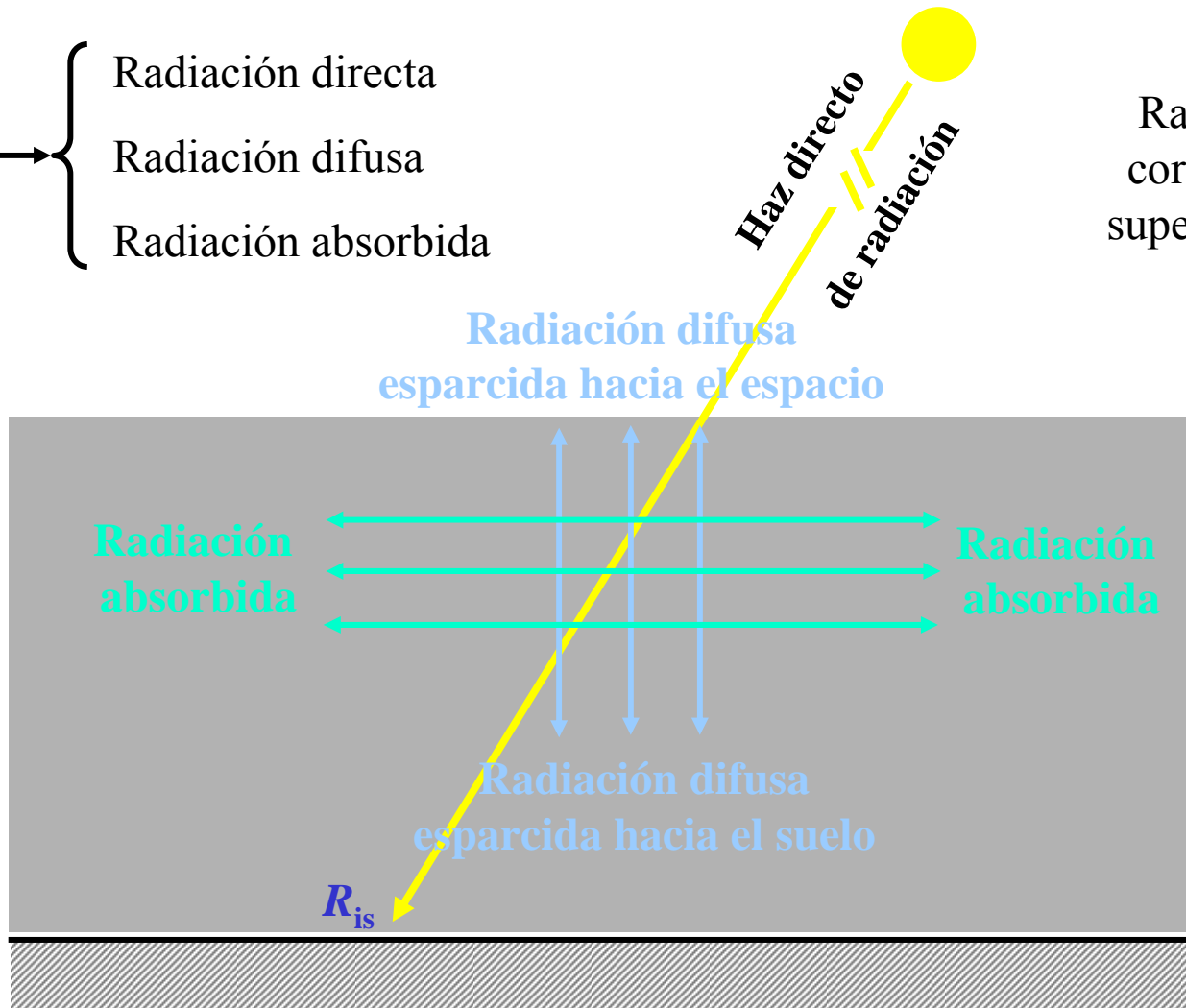
Procedentes del Sol, alcanzan la superficie de la Tierra

# RADIACIÓN DE ONDA CORTA (II)

LA ATMÓSFERA DEJA PASAR LA MAYOR PARTE DE LA ONDA CORTA

- Radiación directa
- Radiación difusa
- Radiación absorbida

Radiación de onda corta que alcanza la superficie de la Tierra



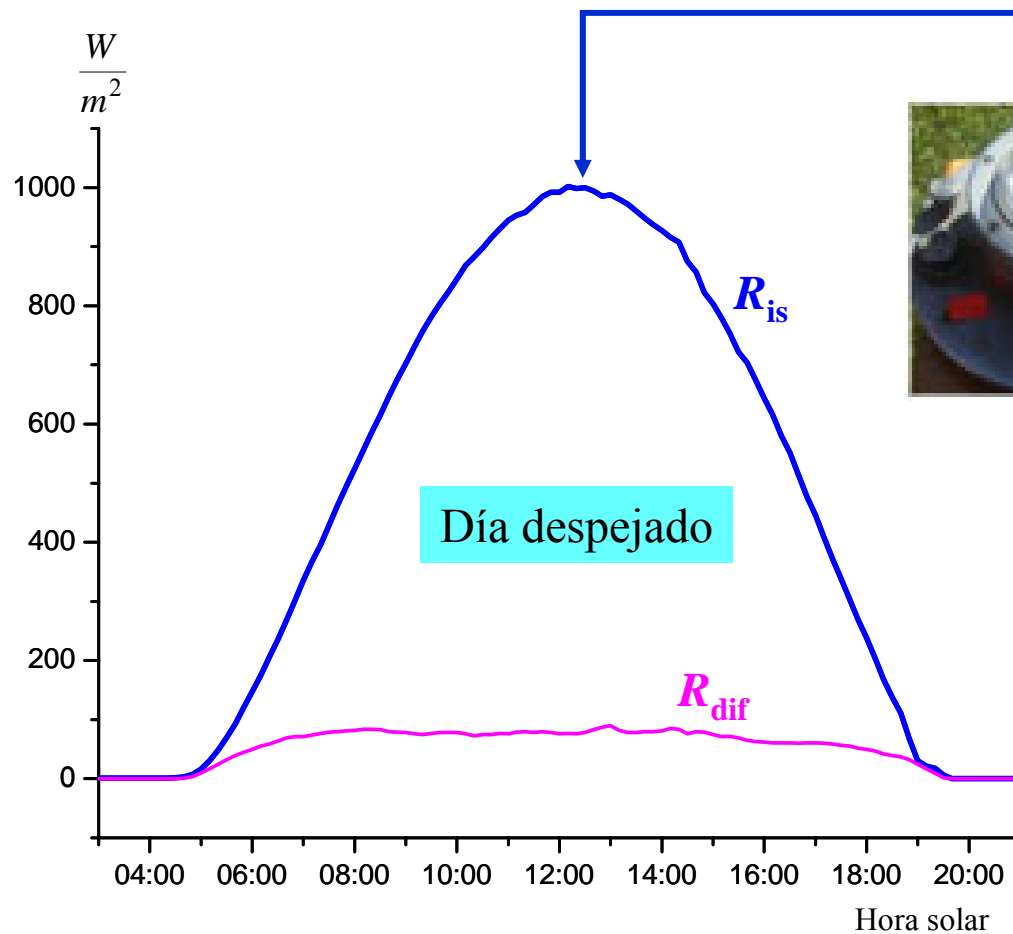
Tiene una componente directa y otra componente difusa

Valores típicos en un día despejado

**80% - 20%**

# RADIACIÓN DE ONDA CORTA (III)

Su medida en superficie: piranómetro



Radiación de onda corta día 15 junio 1999

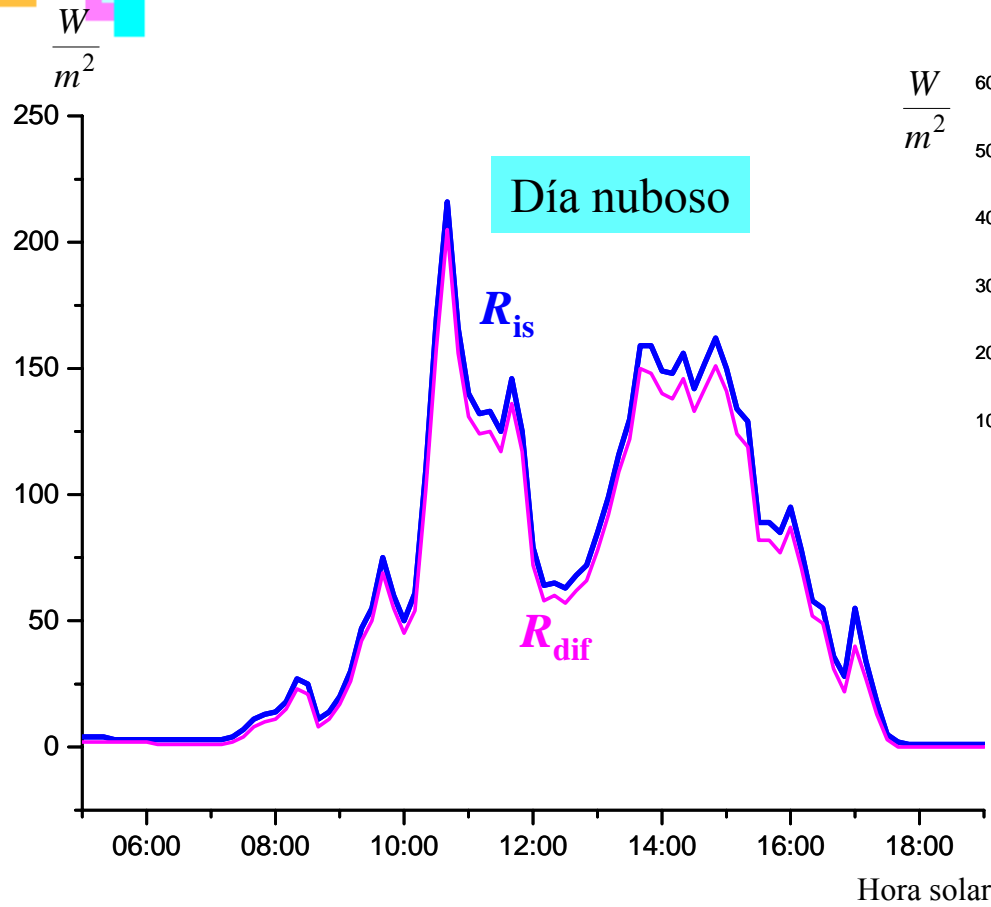
Datos piranómetros Anchor Station, 39° N, 1° 50' W



Un piranómetro mide la  $R_{is}$  incidente sobre su cúpula

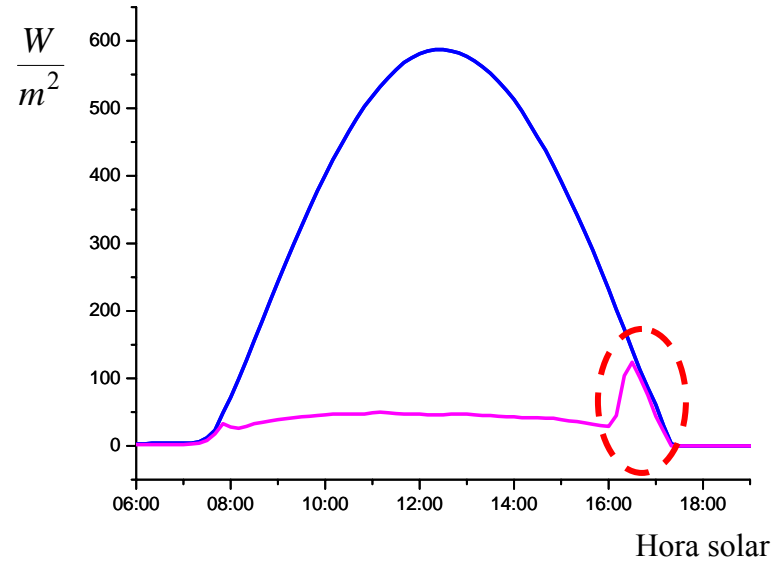
0,3  $\mu\text{m}$  - 3  $\mu\text{m}$

# RADIACIÓN DE ONDA CORTA (IV)



Radiación de onda corta día 29 enero 1998

Datos piranómetros Anchor Station, 40° N (aprox.)

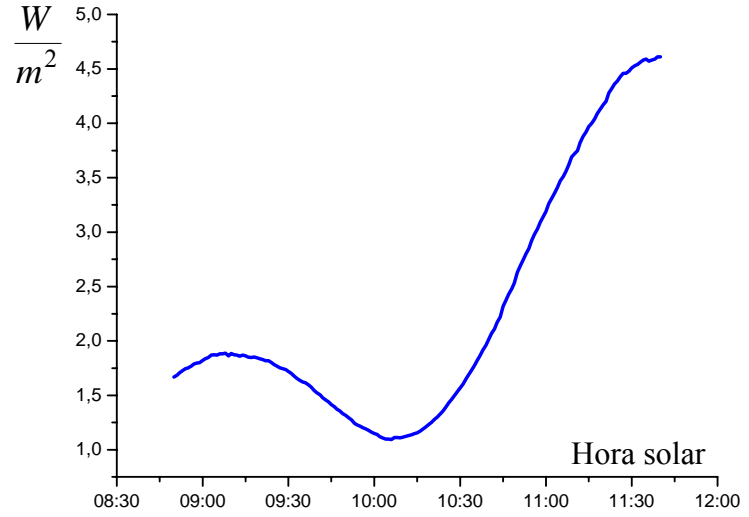
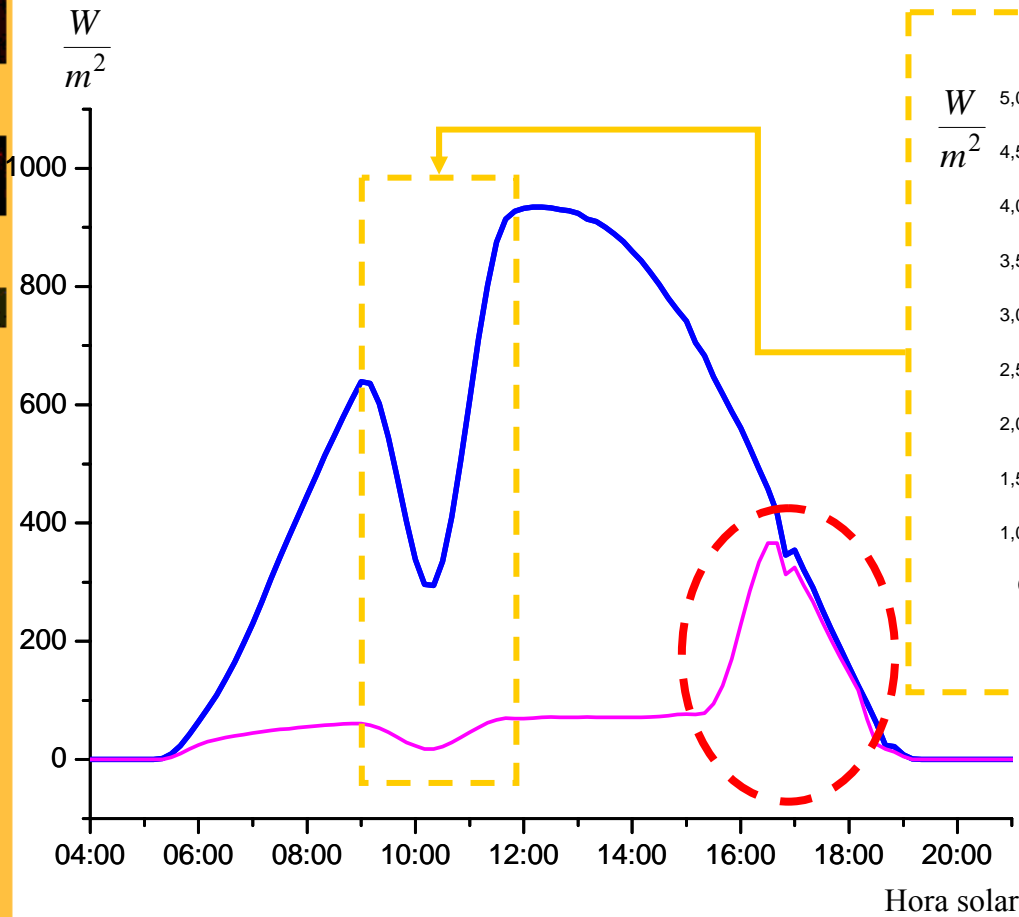


Comparación:  
Radiación de onda corta día 30 enero 2000

### Características día nublado:

- \* Disminuye radiación incidente
- \* Aumenta radiación difusa

# RADIACIÓN ONDA CORTA (V)



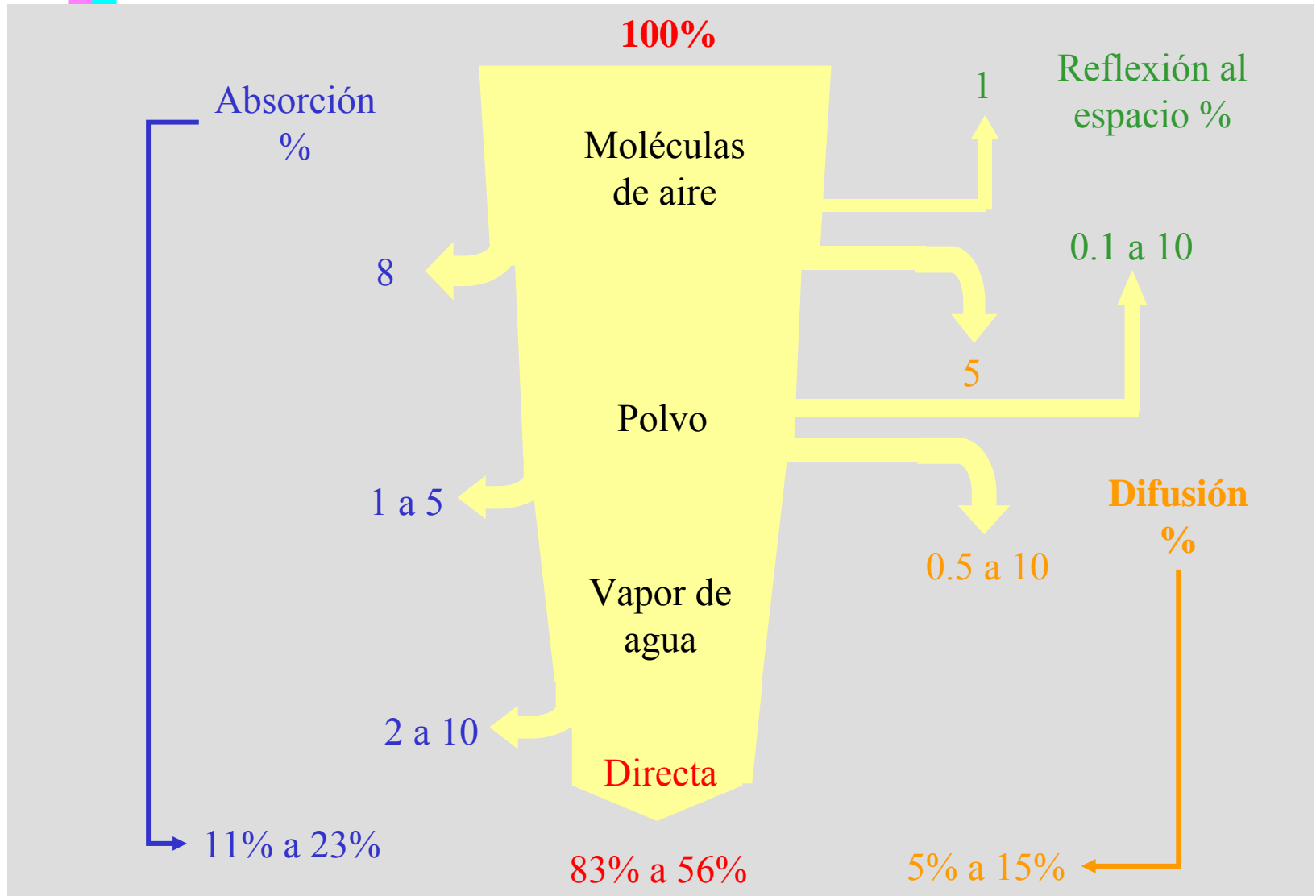
Radiación UV 0.365  $\mu\text{m}$

Radiación de onda corta día 11 agosto 1999

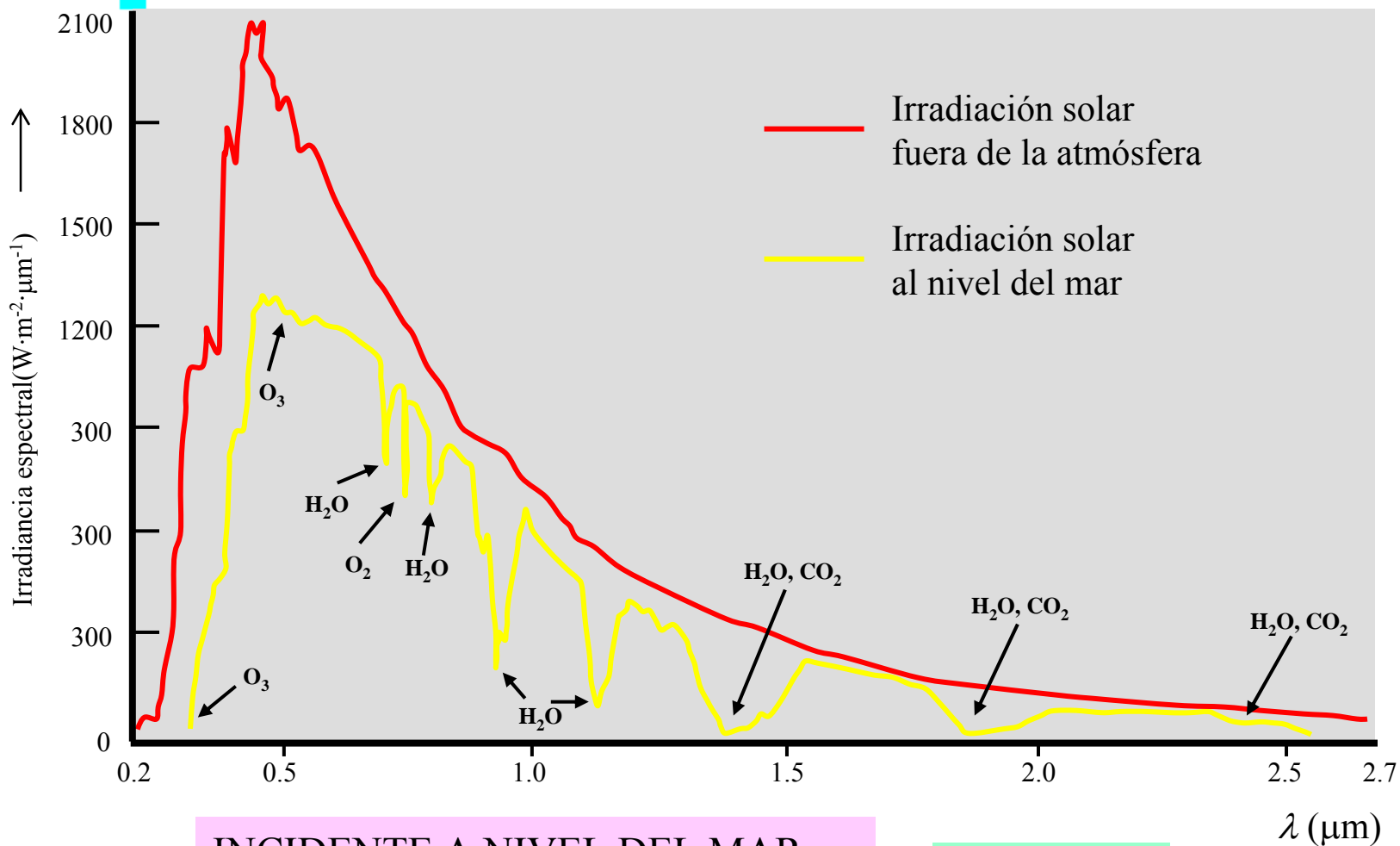


# RADIACIÓN SOLAR A TRAVÉS DE LA ATMÓSFERA

(Estimación día claro)



# RADIACIÓN A NIVEL DEL MAR



INCIDENTE A NIVEL DEL MAR  
 $\approx 70\%$  CONSTANTE SOLAR MEDIA

$\approx 240 W \cdot m^{-2}$

# RADIACIÓN REFLEJADA: ALBEDO

La fracción de la radiación incidente que resulta reflejada se denomina

**ALBEDO ( $\alpha$ )**

Se expresa como fracción o porcentaje

Depende del tipo de superficie:

Mar, tierra mojada: albedo bajo

$\alpha < 0.10$

Cubierta vegetal: albedo intermedio

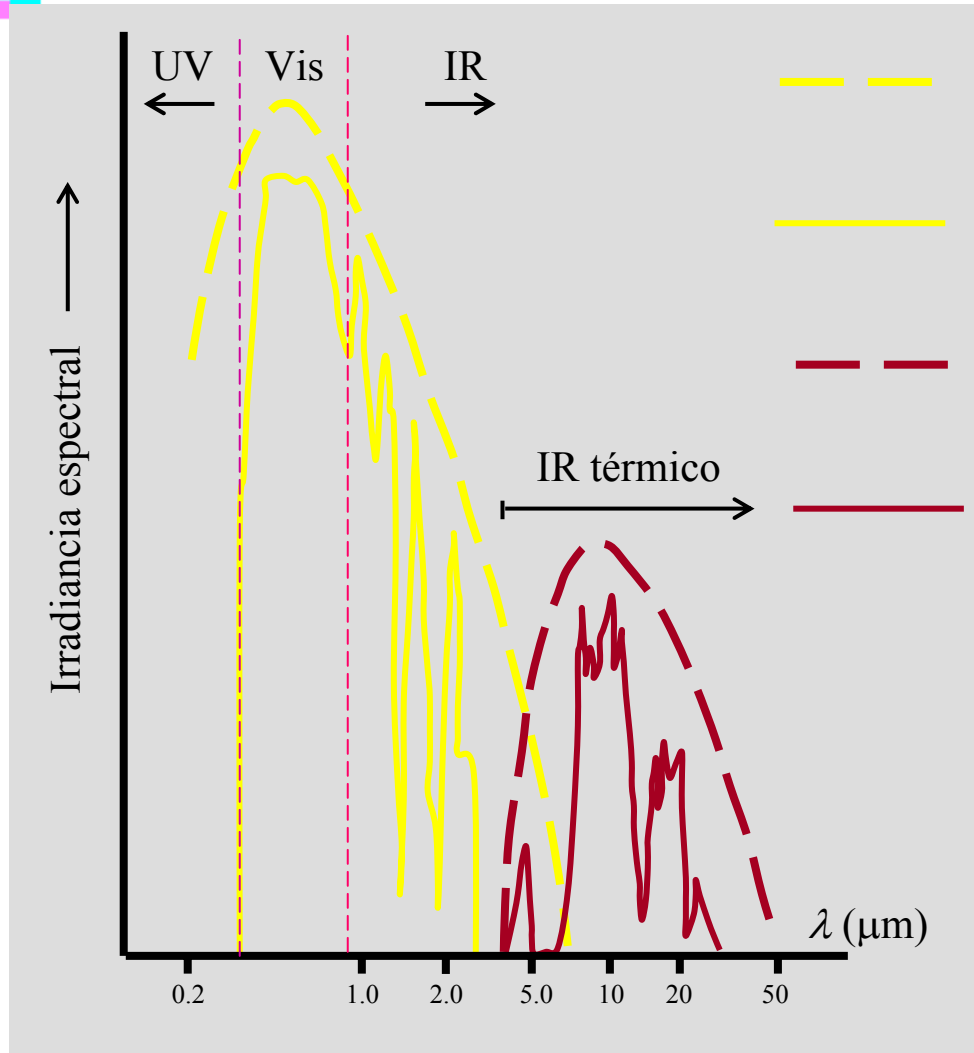
0.20-0.25

Nieve, nubes: albedo alto

Puede alcanzar 0.90

Valor promedio albedo Tierra  $\alpha \approx 30\%$

# RECEPCIÓN Y EMISIÓN DE RADIACIÓN EN SUPERFICIE



Radiación de cuerpo negro a  $\approx 6000\text{ }^\circ\text{C}$

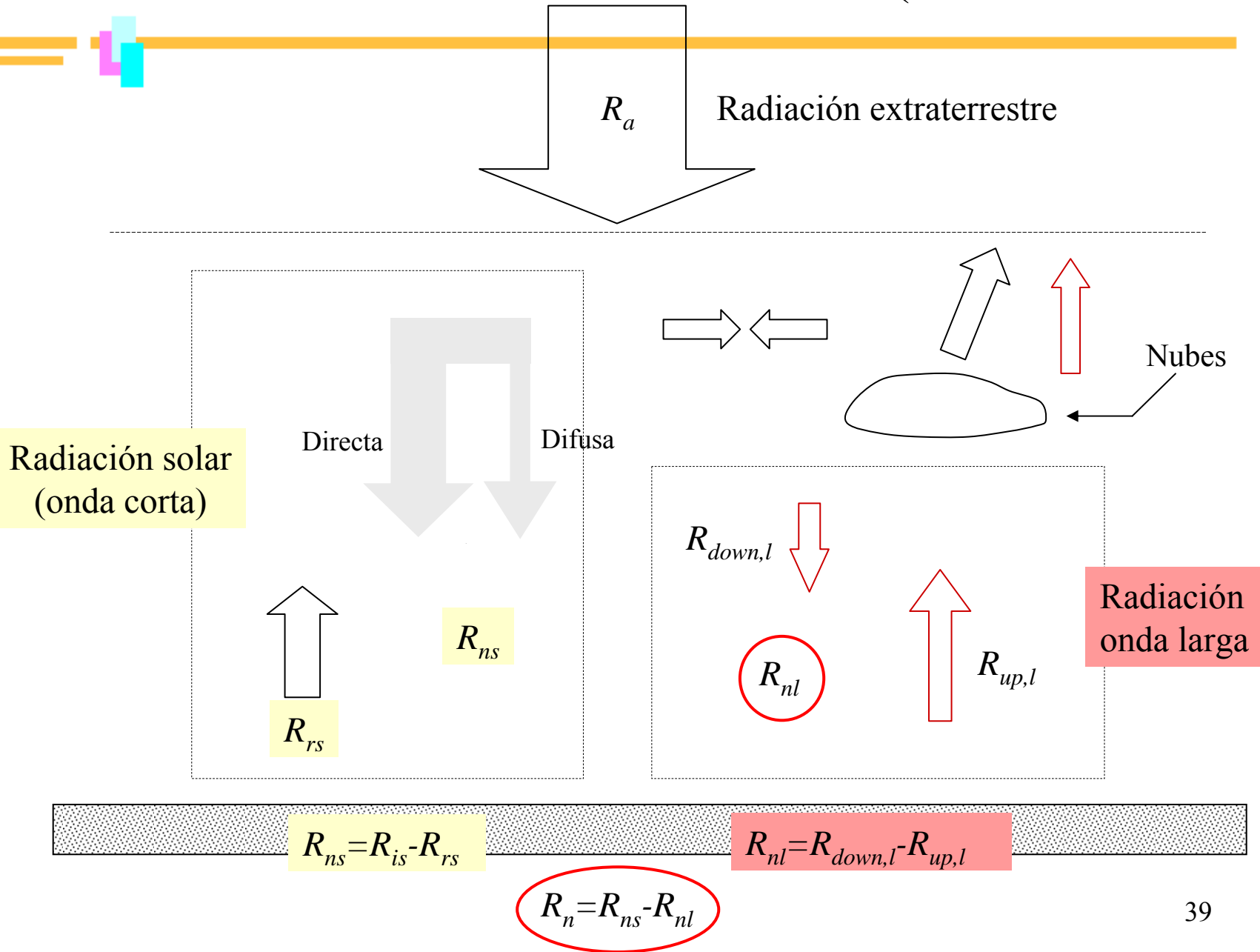
Radiación de onda corta incidente en superficie

Radiación de cuerpo negro a  $\approx 15\text{ }^\circ\text{C}$

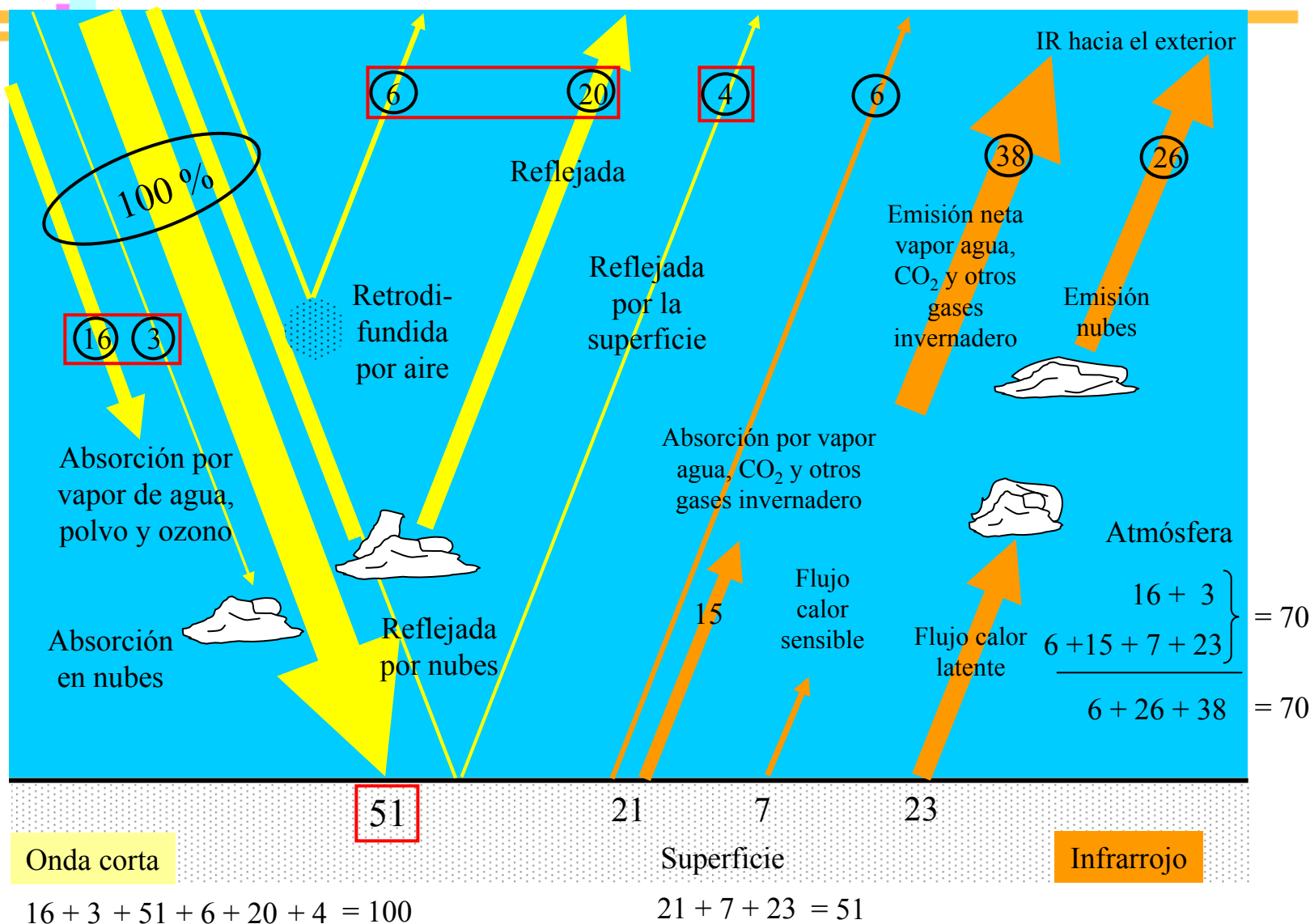
Radiación térmica emitida por superficie

LA SUPERFICIE  
RECIBE  
RADIACIÓN DE  
ONDA CORTA y  
REEMITE  
RADIACIÓN DE  
ONDA LARGA

# RECEPCIÓN Y EMISIÓN EN SUPERFICIE (COMPONENTES)



# BALANCE DE RADIACIÓN (PROMEDIO)



## EJEMPLO. PROBLEMA EXAMEN JULIO 2004



Considere la tabla de datos adjunta, donde aparecen tabulados datos de  $R_{is}$  y radiación difusa desde la salida del sol hasta su puesta, en intervalos de media hora, para el día 27 de junio de 2000.

La estación de superficie que tomó los datos se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas geográficas:  $39^\circ$  N,  $1^\circ 50'$  W.

- Representétese gráficamente en papel milimetrado la  $R_{is}$  y la radiación difusa y comente de que tipo de día se trataba.
- Calcule la radiación solar incidente. Si el albedo era 0.25, calcúlese la radiación absorbida a lo largo del día por la superficie.
- En el supuesto de que el día hubiese sido totalmente despejado y sabiendo que la atmósfera absorbe el 25% de la radiación extraterrestre, calcúlese que radiación solar habría incidido en la superficie en ese caso

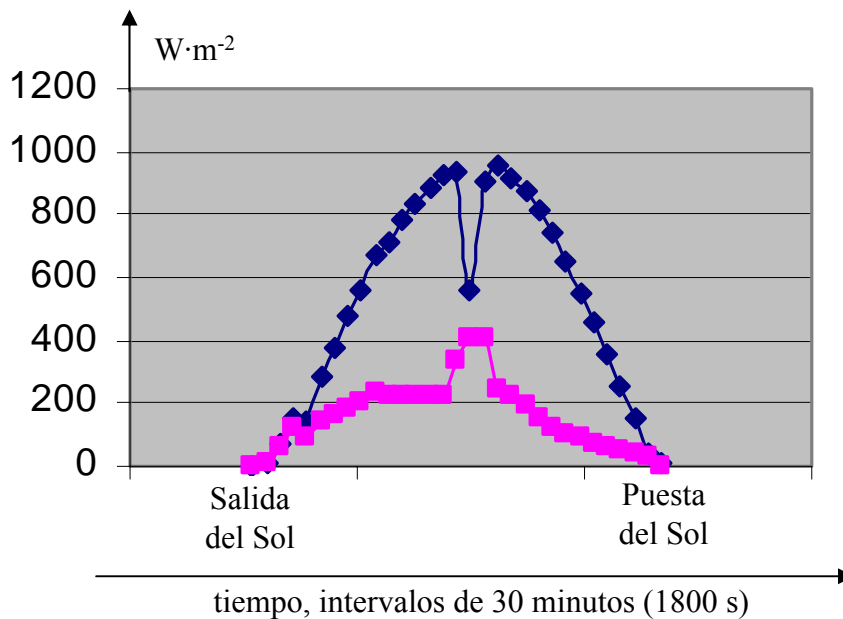
| $R_{is}$ | $R_{dif}$ |
|----------|-----------|
| 1        | 0         |
| 11       | 8         |
| 75       | 62        |
| 157      | 117       |
| 138      | 92        |
| 287      | 144       |
| 377      | 163       |
| 473      | 183       |
| 559      | 203       |
| 668      | 238       |
| 711      | 221       |
| 783      | 222       |
| 838      | 223       |
| 880      | 220       |
| 922      | 219       |
| 937      | 334       |
| 558      | 408       |
| 903      | 405       |
| 952      | 241       |
| 915      | 220       |
| 874      | 192       |
| 813      | 153       |
| 739      | 117       |
| 648      | 100       |
| 554      | 89        |
| 461      | 74        |
| 358      | 61        |
| 257      | 48        |
| 156      | 39        |
| 39       | 27        |
| 11       | 5         |

Unidades:  $W \cdot m^{-2}$

# EJEMPLO. CONTINUACIÓN

| 27-jun-00               |      |                 |
|-------------------------|------|-----------------|
| Ris                     | Rdif | Acum Ris        |
| 1                       | 0    |                 |
| 11                      | 8    | 10800           |
| 75                      | 62   | 77400           |
| 157                     | 117  | 208800          |
| 138                     | 92   | 265500          |
| 287                     | 144  | 382500          |
| 377                     | 163  | 597600          |
| 473                     | 183  | 765000          |
| 559                     | 203  | 928800          |
| 668                     | 238  | 1104300         |
| 711                     | 221  | 1241100         |
| 783                     | 222  | 1344600         |
| 838                     | 223  | 1458900         |
| 880                     | 220  | 1546200         |
| 922                     | 219  | 1621800         |
| 937                     | 334  | 1673100         |
| 558                     | 408  | 1345500         |
| 903                     | 405  | 1314900         |
| 952                     | 241  | 1669500         |
| 915                     | 220  | 1680300         |
| 874                     | 192  | 1610100         |
| 813                     | 153  | 1518300         |
| 739                     | 117  | 1396800         |
| 648                     | 100  | 1248300         |
| 554                     | 89   | 1081800         |
| 461                     | 74   | 913500          |
| 358                     | 61   | 737100          |
| 257                     | 48   | 553500          |
| 156                     | 39   | 371700          |
| 39                      | 27   | 175500          |
| 11                      | 5    | 45000           |
| <b>W·m<sup>-2</sup></b> |      | <b>28888200</b> |

*i* ↓



$$R_{rs} = \alpha R_{is} = 0.25 \cdot 28,88820 = 7,22205 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$$

Absorbido:  $R_{ns} = R_{is} - R_{rs} = 21,55515 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$

$$c = 1800 \text{ s}$$

$$S = \sum_{i=1}^N \left( \frac{R_{is}(i+1) + R_{is}(i)}{2} \right) \cdot c$$

Unidades:  $\text{Wm}^{-2}\text{s} = \text{Jm}^{-2}$

# EJEMPLO. CONTINUACIÓN 2

Comentario: se trata de un día parcialmente nublado, con incidencia especialmente acusada a mediodía solar, y menos nublado por la tarde. Véase que la radiación difusa antes del mediodía solar va creciendo, no forma la típica meseta plana de un día totalmente despejado; esto indica la presencia de cobertura nublada, aunque no demasiado espesa. A mediodía aproximadamente la nubosidad se desarrolló bastante más como indica la brusca caída de la  $R_{is}$  y la importante subida de la radiación difusa, aunque en poco tiempo esta nubosidad desapareció, dando paso a una situación similar a la de la mañana aunque seguramente con menos nubosidad total, ya que la bajada de la radiación difusa es más pronunciada.

## Latitud $\varphi$

(Hemisf. Norte=1; Hemisf. Sur= -1)

|                         |              |          |
|-------------------------|--------------|----------|
| Latitud                 | <b>39,00</b> | N/S      |
| grados minutos segundos | 1/-1         |          |
| <b>39</b>               | <b>0</b>     | <b>0</b> |
|                         | <b>1</b>     |          |

|               |
|---------------|
| $\varphi$     |
| Latitud       |
| (rad)         |
| <b>0,6807</b> |

## Cálculo de la declinación solar $\delta$

(Función del día del año J)

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$$

|          |                |                                 |
|----------|----------------|---------------------------------|
| J        | <b>179</b>     | (nº de orden del día del año)   |
| $\delta$ | <b>0,40603</b> | <rad deg> <b>23,26</b> (declin) |

## Cálculo del ángulo horario salida sol $\omega_s$

$$\omega_s = \arccos\left[-\tan(\varphi)\tan(\delta)\right]$$

|            |                |                         |
|------------|----------------|-------------------------|
| $\omega_s$ | <b>1,92639</b> | <rad deg> <b>110,37</b> |
|------------|----------------|-------------------------|

## Cálculo de la radiación extraterrestre $R_a$ (a la latitud $\varphi$ , el día del año J)

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{SC} d_r \left[ \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \right]$$

|       |                |                                  |   |
|-------|----------------|----------------------------------|---|
| $R_a$ | <b>41,7318</b> | MJm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> | Radiación incidente sobre superficie plana en límite superior atmósfera<br>Valor integrado para 1 día |
|-------|----------------|----------------------------------|---|

Si la atmósfera absorbiese el 25%, a la superficie llegaría

$$(1 - 0.25) \cdot R_a = 0.75 \cdot 41,7318 = 31,29885 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{día}$$

# EFECTO INVERNADERO

La temperatura de la Tierra viene determinada por la cantidad de radiación que alcanza y calienta la superficie

## Modelo simple para calcular la temperatura en la Tierra

1º) La radiación solar es interceptada por un disco del radio de la Tierra y por tanto la cantidad promedio disponible en el suelo es

$$G_{SC} \cdot \pi R^2 \cdot (1 - \alpha)$$

Constante solar  $\nearrow$   $\nearrow$  Radio de la Tierra  $\searrow$  Albedo

2º) La Tierra radia en el IR térmico como un cuerpo negro a una temperatura T. A dicha temperatura la energía radiada en promedio es

$$4\pi R^2 \cdot \sigma T^4$$

Radio de la Tierra  $\nearrow$   $\nearrow$  Constante de Boltzmann  $\searrow$  Temperatura absoluta

## EFECTO INVERNADERO (II)



- 3º) La temperatura de equilibrio se alcanza cuando la energía incidente y la energía irradiada son iguales. La temperatura de cuerpo negro que equilibra la entrada y la salida se obtiene igualando los dos términos anteriores.

$$G_{SC} \cdot \pi R^2 \cdot (1 - \alpha) = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4$$

$$G_{SC} = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\sigma = 5.6866 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

$$\alpha = 0.30$$

$$T = \left[ \frac{G_{SC}(1 - \alpha)}{4\sigma} \right]^{1/4} = 254.7 \text{ K} \approx -18^\circ \text{C}$$

A esta temperatura, y de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann, la potencia emisiva de un cuerpo negro es

$$e_b = \sigma T^4 = 239 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Este es el valor de la constante solar efectiva

## EFECTO INVERNADERO (III)

Pero la temperatura media de la Tierra en superficie es aproximadamente  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , no  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ !

Esto corresponde aproximadamente a una emisión de cuerpo negro de  $391\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

*Hay que explicar por qué, si la Tierra irradia como cuerpo negro  $239\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , su temperatura media en superficie se encuentra alrededor de  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  por encima de la que le corresponde.*

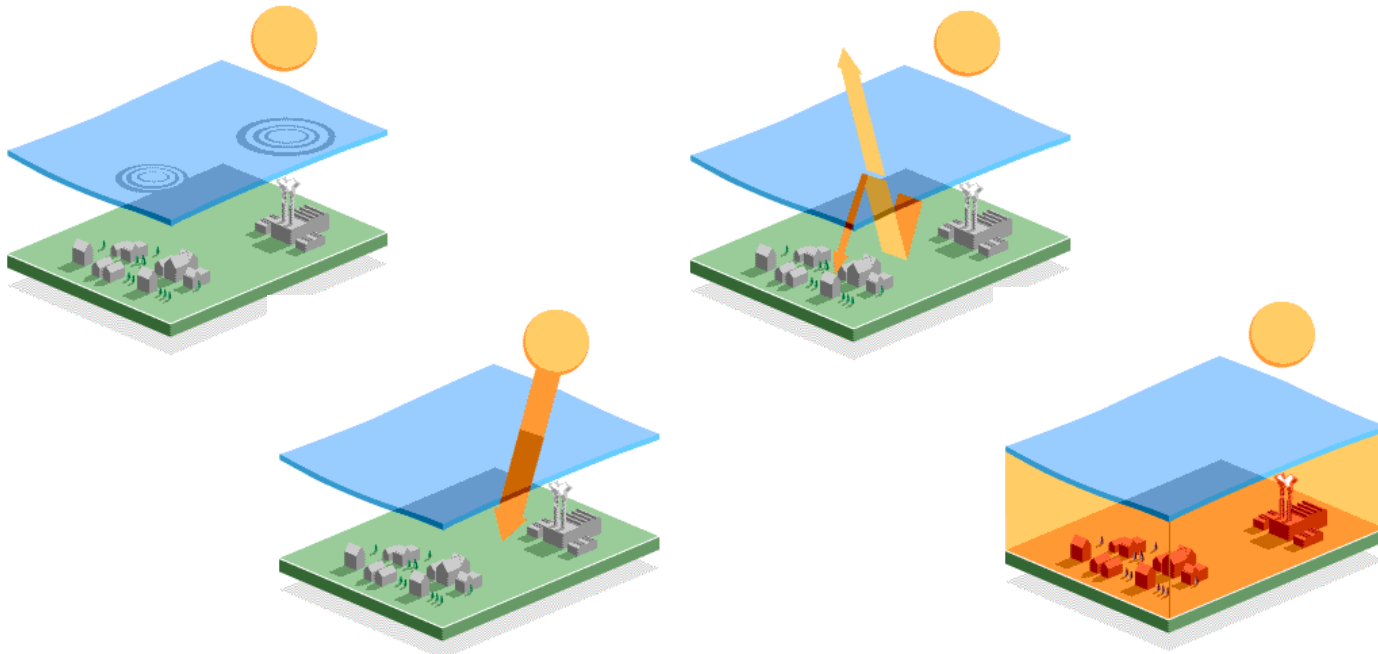
- Los diferentes gases componentes de la atmósfera no absorben de igual forma las distintas frecuencias que componen la radiación de onda corta.
- Algunos gases, como oxígeno y nitrógeno son transparentes a casi todas las frecuencias
- Otros gases como vapor de agua, dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno son transparentes a las radiaciones de onda corta, pero absorben las radiaciones de onda larga.

# EFFECTO INVERNADERO (IV)

La atmósfera deja pasar la mayor parte de la radiación de onda corta procedente del exterior, pero absorbe la mayor parte de la radiación de onda larga reemitida por la Tierra.

Como resultado la atmósfera se calienta y mantiene la temperatura en superficie por encima del valor que correspondería a un cuerpo negro en equilibrio radiativo.

(Efecto invernadero)



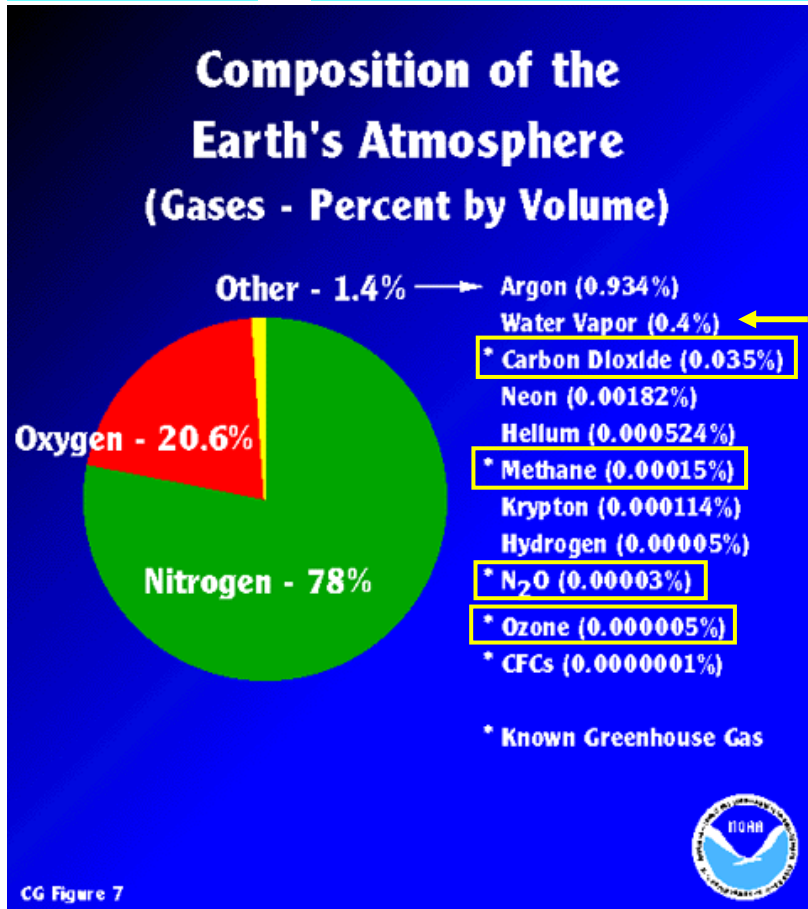
# EFEECTO INVERNADERO (V)

## GASES QUE INTERVIENEN EN EL EFECTO INVERNADERO NATURAL

Cielo claro

60 al 70% del efecto invernadero

Vapor de agua



Orden decreciente en contribución

dióxido de carbono

metano

N<sub>2</sub>O

ozono (estratosfera)

Posibilidad de reforzamiento del efecto invernadero: Incremento de las concentraciones naturales de los gases de invernadero y aparición de nuevas especies químicas en la atmósfera a causa de la actividad humana

## EFECTO INVERNADERO (VI)



## Summary of the Gases That Absorb Infrared Radiation - The Greenhouse Gases

| <u>Greenhouse Gas</u> | <u>Sources</u>  | <u>Average Time in<br/>the Atmosphere</u> |
|-----------------------|---|---|
| Carbon Dioxide        | Fossil Fuel Burning,<br>Deforestation                           | 500 Years                                 |
| Methane               | Cattle, Rice Paddies, Landfills,<br>Gas Leaks, Mining, Termites | 7 - 10 Years                              |
| Nitrous Oxide         | Fossil Fuel Burning,<br>Fertilizers                             | 140 - 190 Years                           |
| CFCs                  | Refrigerators, Aerosols,<br>Air Conditioners, Foam/Plastics     | 65 - 110 Years                            |
| Ozone                 | Automobile Exhausts,<br>Electrical Generation                   | Hours to days in the<br>Lower Atmosphere  |

Source - A Planet Under Siege: Global Systems Science  
Lawrence Hall of Science  
University of California - Berkeley, 1992



CG Figure-21a

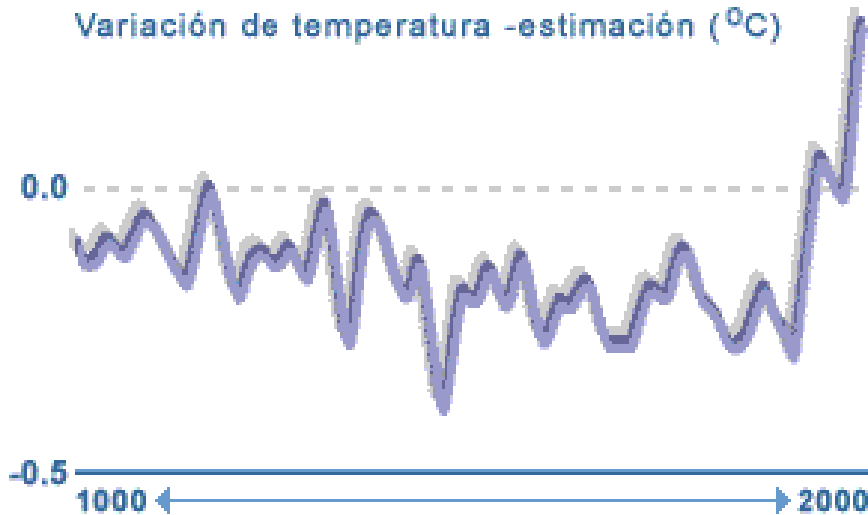
# CALENTAMIENTO GLOBAL



## INCREMENTOS DE TEMPERATURA

### Cambios a largo plazo

Variación de temperatura -estimación ( $^{\circ}\text{C}$ )



[http://www.bbc.co.uk/spanish/especiales/clima/temp\\_changes.shtml](http://www.bbc.co.uk/spanish/especiales/clima/temp_changes.shtml)

Incrementos de concentración desde 1750:

$\text{CO}_2$ : 280 ppm a 360 ppm (29%)

Óxidos de nitrógeno:  
280 ppb a 360 ppb (11%)

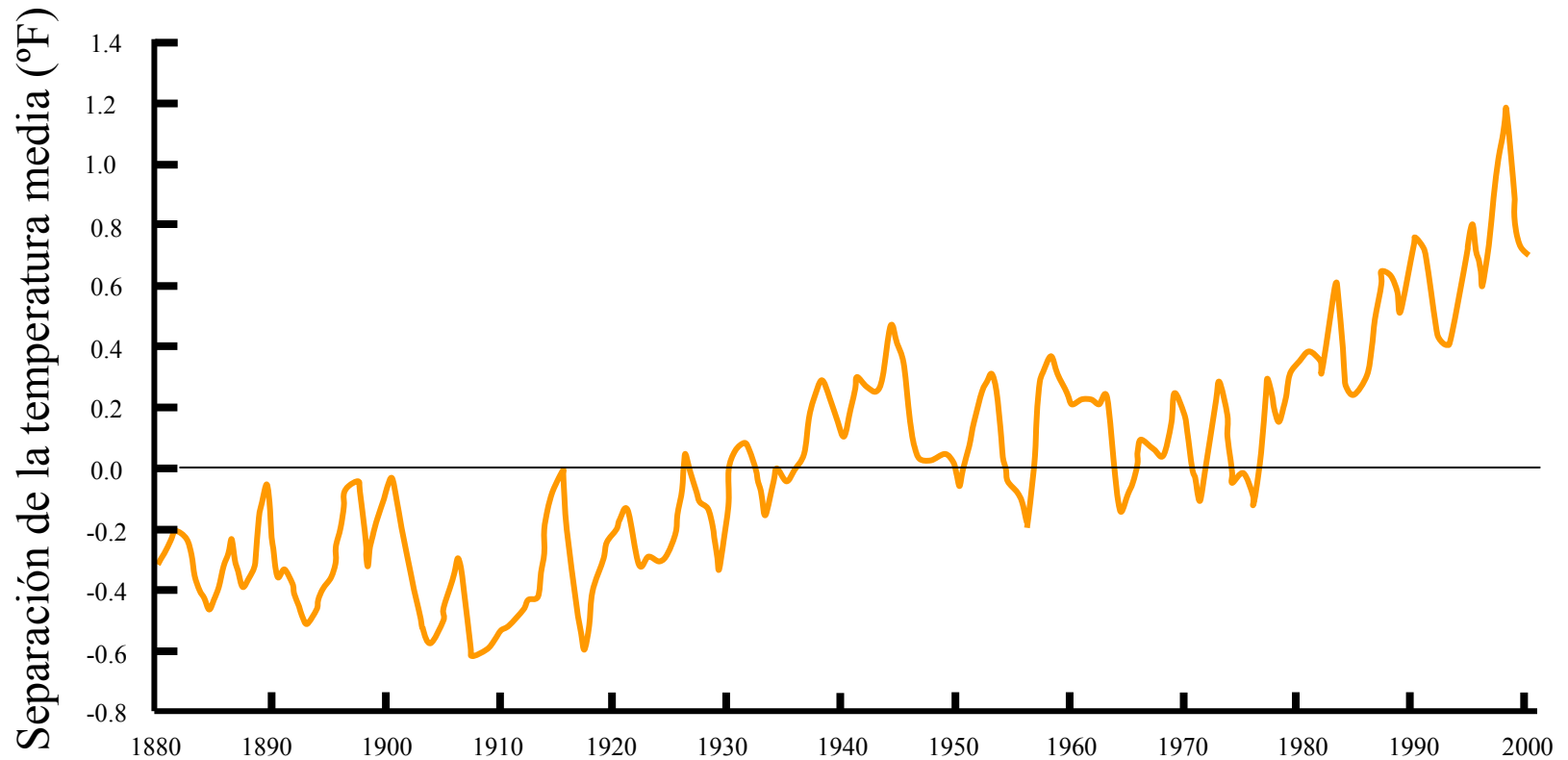
Metano: 0.70 ppm a 1.70 ppm (143%)

<http://zebu.uoregon.edu/1998/es202/113.html>

# CALENTAMIENTO GLOBAL (II)



## Cambio global de temperatura (1880-2000)

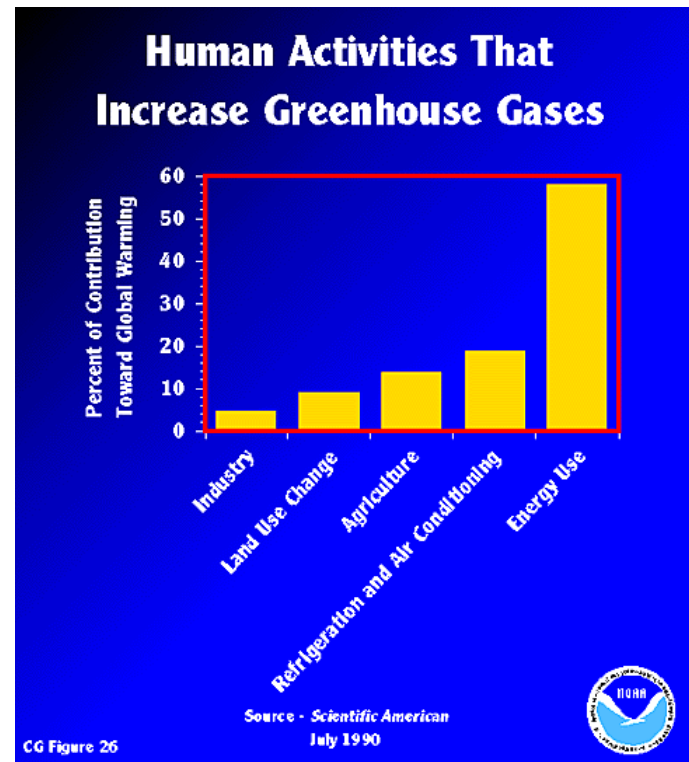
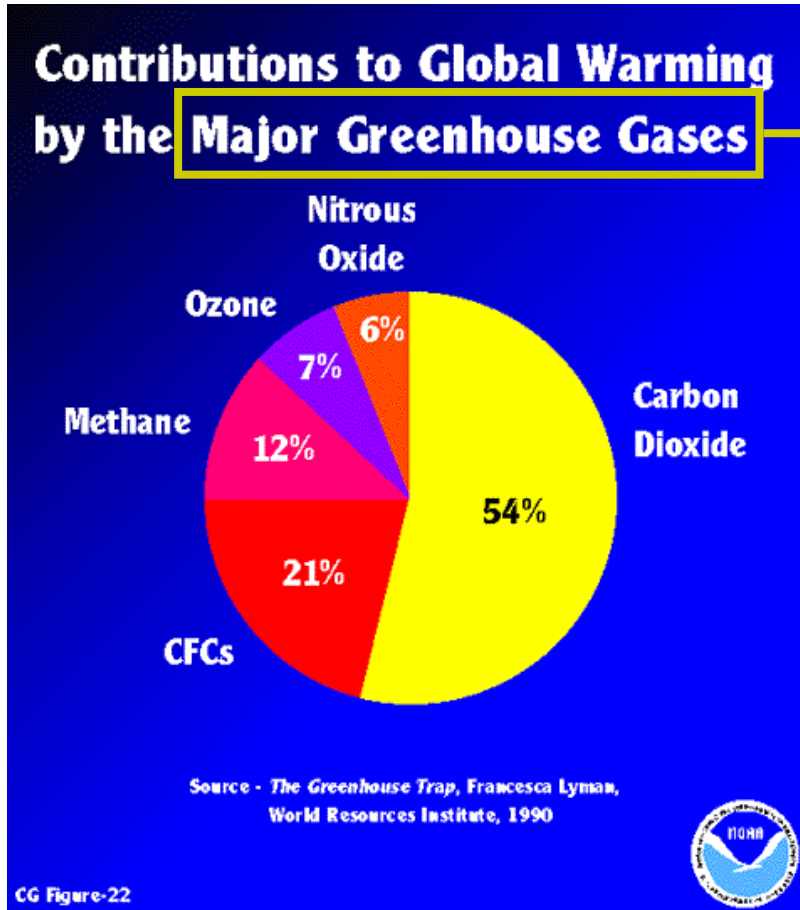


<http://yosemite.epa.gov/oar/globalwarming.nsf/content/Climate.html>

Fuente original: U.S. National Climatic Data Center, 2001

# CALENTAMIENTO GLOBAL (III)

Excepto vapor de agua

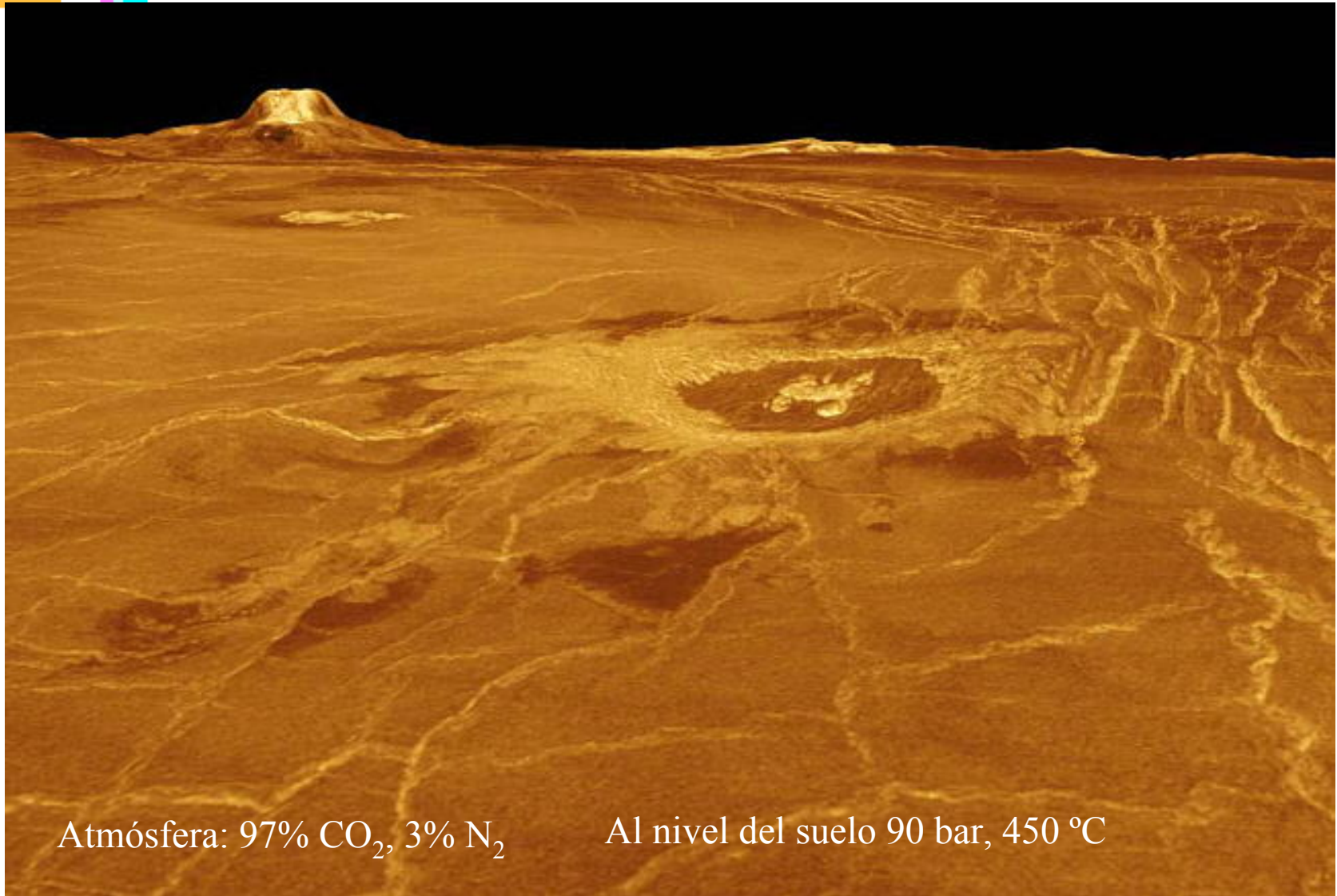


[http://www.fsl.noaa.gov/~osborn/CG\\_Figure\\_26.gif.html](http://www.fsl.noaa.gov/~osborn/CG_Figure_26.gif.html)

[http://www.fsl.noaa.gov/~osborn/CG\\_Figure\\_22.gif.html](http://www.fsl.noaa.gov/~osborn/CG_Figure_22.gif.html)

[http://earthobservatory.nasa.gov/Laboratory/PlanetEarthScience/GlobalWarming/GW\\_toc.html](http://earthobservatory.nasa.gov/Laboratory/PlanetEarthScience/GlobalWarming/GW_toc.html)

# UN CASO EXTREMO DE EFECTO INVERNADERO



Atmósfera: 97% CO<sub>2</sub>, 3% N<sub>2</sub>

Al nivel del suelo 90 bar, 450 °C



### Radiación de cuerpo negro

[http://hea-www.harvard.edu/~efortin/thesis/html/Black\\_body.shtml](http://hea-www.harvard.edu/~efortin/thesis/html/Black_body.shtml)

<http://hea-www.harvard.edu/~efortin/thesis/html/Spectroscopy.shtml>

[http://whatis.techtarget.com/definition/0,,sid9\\_gci869620,00.html](http://whatis.techtarget.com/definition/0,,sid9_gci869620,00.html)

### Espectro solar

1985 Wehrli Standard Extraterrestrial Solar Irradiance Spectrum (199.5-10075.0 nm)

<http://rredc.nrel.gov/solar/standards/am0/>

<http://rredc.nrel.gov/solar/standards/am0/wehrli1985.new.html>

### Conceptos sobre radiación solar (idioma: inglés)

<http://edmall.gsfc.nasa.gov/inv99Project.Site/Pages/science-briefs/ed-stickler/ed-irradiance.html>

### Radiación solar en la atmósfera. Balance de radiación

[http://www.geog.ucsb.edu/~joel/g110\\_w03/chapt03/solar\\_atm/solar\\_atm.html](http://www.geog.ucsb.edu/~joel/g110_w03/chapt03/solar_atm/solar_atm.html)

# BIBLIOGRAFÍA y DOCUMENTACIÓN (II)



Sobre balance de energía y efecto invernadero

[http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/353BalEn.htm#Efecto invernadero natural](http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/353BalEn.htm#Efecto%20invernadero%20natural)

<http://www.science.org.au/nova/016/016key.htm>

<http://www.fsl.noaa.gov/~osborn/CLIMGRAPH2.html>