

Aspectos básicos de termodinámica I: Radiación en la atmósfera

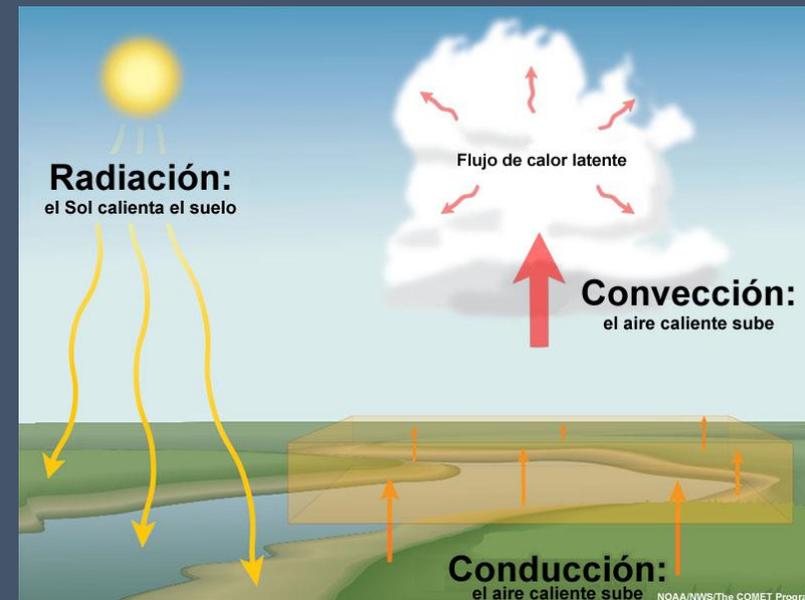
Fase Presencial Curso PIB-M 2022



- El calor es una forma de energía, que se transfiere entre dos cuerpos a diferente temperatura.
- Se transmite de diversas formas:
 - Conducción (movimiento molecular). Contacto. El aire es un mal conductor.
 - Convección (movimiento en fluidos). Diferente densidad
 - Radiación (ondas electromagnéticas). Se puede propagar en el vacío.
 - También en fluidos por turbulencia y advección. Aspectos dinámicos.

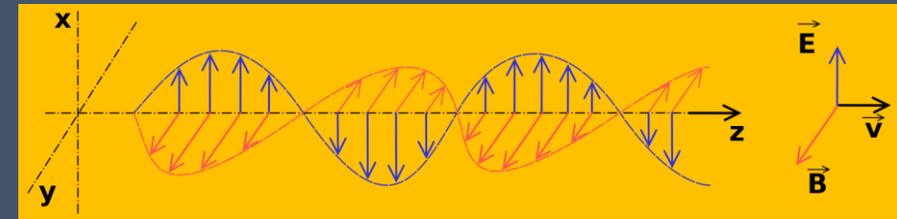


<https://concepto.de/transferencia-de-calor/>

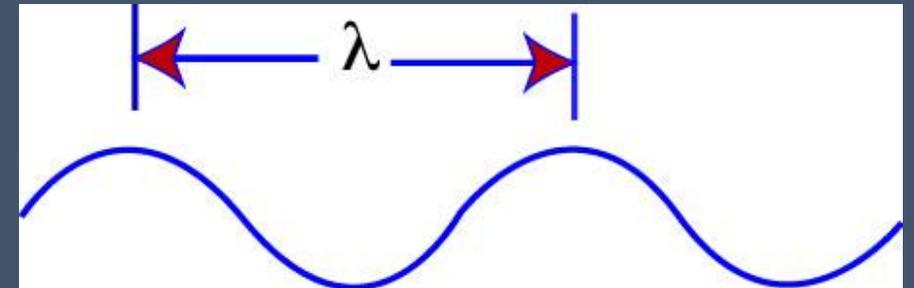


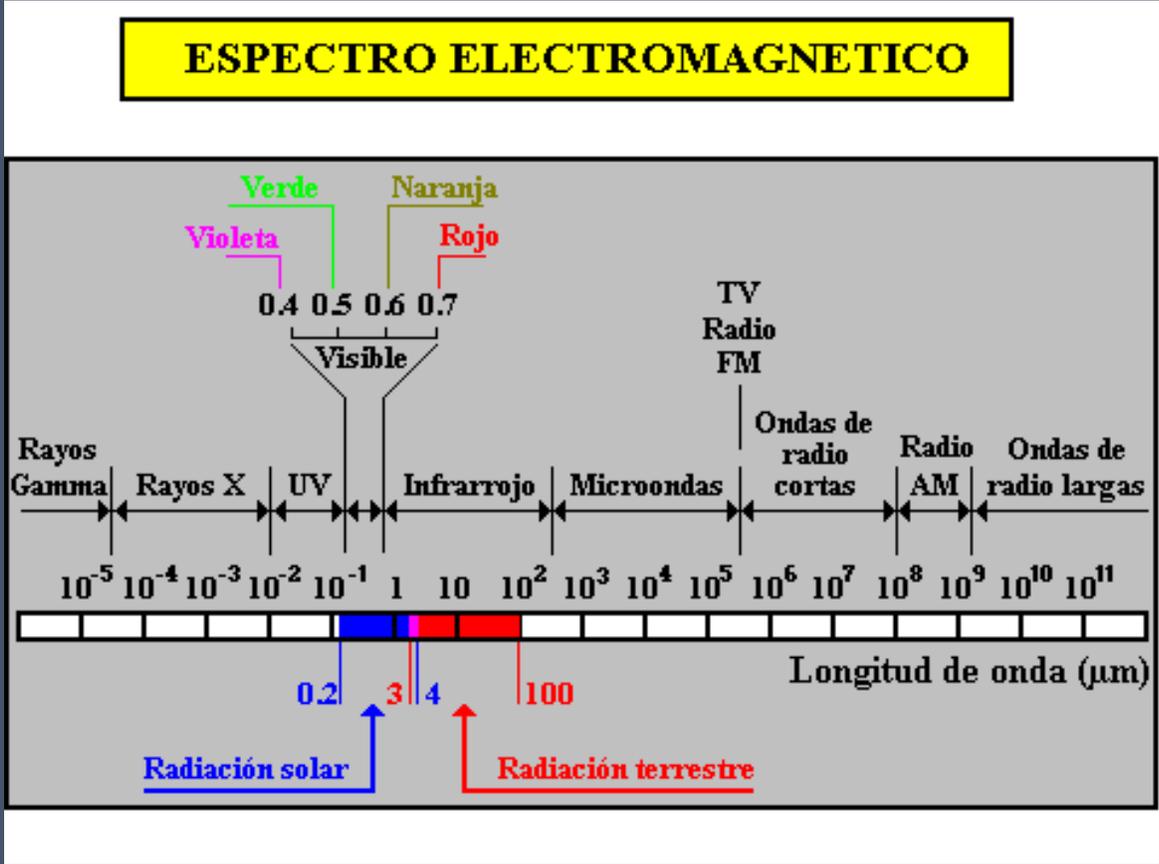
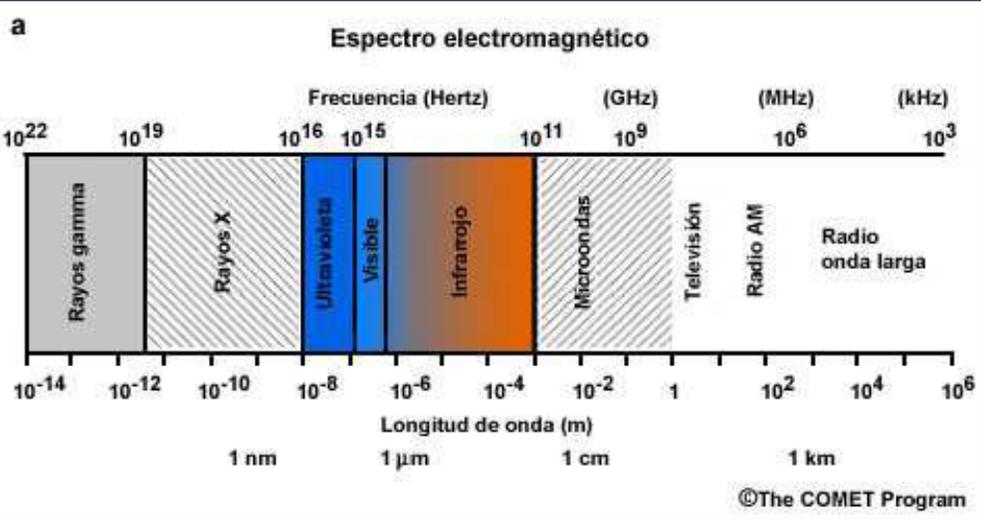
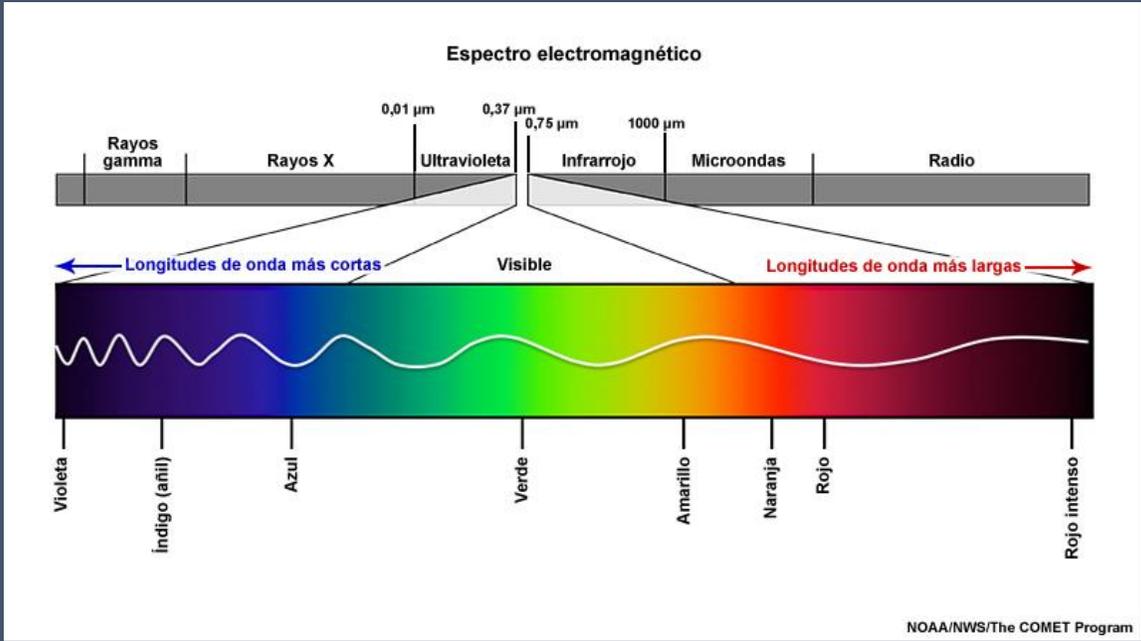
Radiación electromagnética

- Cargas eléctricas en movimiento
 - campos eléctricos y magnéticos perpendiculares
 - propagación ondas sinusoidales
 - Funciones armónicas
- Longitud de onda (λ) y frecuencia (ν)
 - VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN ($c = 300\,000$ km/s en el vacío)
 - $c = \lambda \cdot \nu$
- Energía:
 - fotones
 - Constante de Planck: $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s
 - $E = h \cdot \nu$



https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica#/media/Archivo:Onde_electromagnetique.svg





Absorción energía fotones

- Energía rotacional (momento dipolar)
- Energía vibracional (momento dipolar)
- Excitación electrónica, disociación o ionización

Definiciones básicas

- ❑ *Flujo radiante* (ϕ): Energía emitida o recibida por unidad de tiempo (Potencia). Unidades: Joules por segundo o watts ($1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$).
- ❑ *Radiancia o Emitancia* (E) es la energía radiante total emitida por un cuerpo por unidad de superficie y unidad de tiempo. Unidades: Wm^{-2} .
- ❑ *Irradiancia* (R) es la energía radiante recibida por un cuerpo por unidad de superficie y unidad de tiempo. Unidades: Wm^{-2} .
- ❑ Equilibrio radiativo: La irradiancia es igual a la radiancia.

Cuerpo Negro

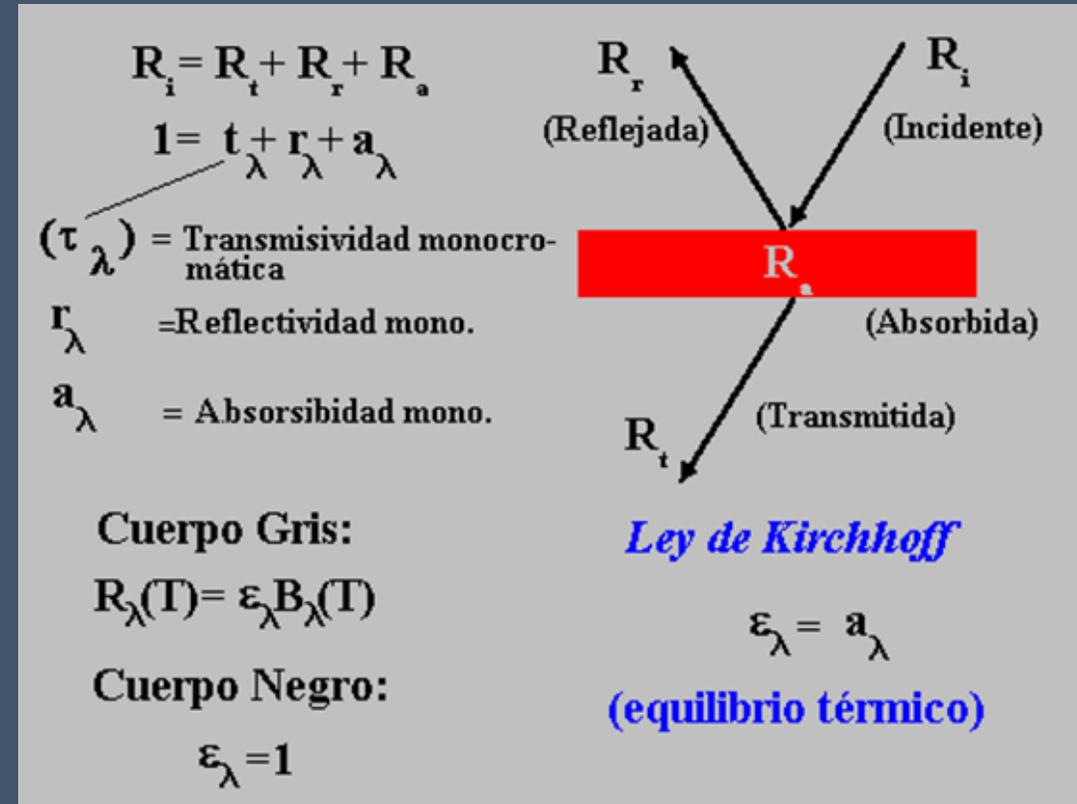
- **Todos los cuerpos con temperatura superior a 0 K emiten radiación.**(Ley Rayleigh-Jeans y Ley de Planck)
- Un cuerpo negro (ideal) es aquel que emite la máxima cantidad de radiación a cada longitud de onda y en todas direcciones (a una temperatura dada). También absorbe toda la radiación incidente en todas las direcciones para cada longitud de onda (absorbancia igual a la unidad)
- Un cuerpo que absorbe intensamente radiación en una longitud de onda determinada, también emite intensamente en esa longitud de onda.
- La radiación del cuerpo negro es isotrópica y sólo depende de su temperatura

❑ Absorbancia, Reflectancia y Transmitancia (fracciones de la radiación recibida que es absorbida, reflejada o transmitida)

❑ **Emisividad ϵ_λ** : La razón entre la potencia emitida por un cuerpo a la temperatura T y la potencia que ese cuerpo emitiría al obedecer la ley de radiación de Planck. Por tanto para un cuerpo negro su valor es 1.

❑ **Cuerpo gris**. Material cuya emisividad es inferior a 1. Su emisividad viene determinada por la ley de Kirchoff.

❑ **Ley de Kirchoff**. Establece la relación entre la energía emitida por un cuerpo gris en relación a un cuerpo negro $E_\lambda = \epsilon_\lambda B_\lambda$ donde E_λ es la radiancia del cuerpo gris, ϵ_λ es la emisividad del cuerpo gris y B_λ es la irradiancia de cuerpo negro, todos a la longitud de onda λ .



- **Ley de Planck:** La radiancia espectral (o monocromática) B_λ (E_λ) de un cuerpo negro es la energía emitida por unidad de tiempo y unidad de área en cada longitud de onda. Es una función de la temperatura

$$B_\lambda = 2hc^2 / (\lambda^5 [\exp(hc / \lambda kT) - 1])$$

donde B_λ es la radiancia a la longitud de onda λ (m), T es la temperatura absoluta (K) y $h = 6,6262 \times 10^{-34}$ J·s es la constante de Planck, $k = 1,3806 \times 10^{-23}$ J K⁻¹ es la constante de Boltzmann y c es la velocidad de la luz, equivalente a 299 7929 458 m s⁻¹.

$$E_\lambda^* = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot [\exp(c_2 / (\lambda \cdot T)) - 1]}$$

$$c_1 = 3.74 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4, \text{ and} \\ c_2 = 1.44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}.$$

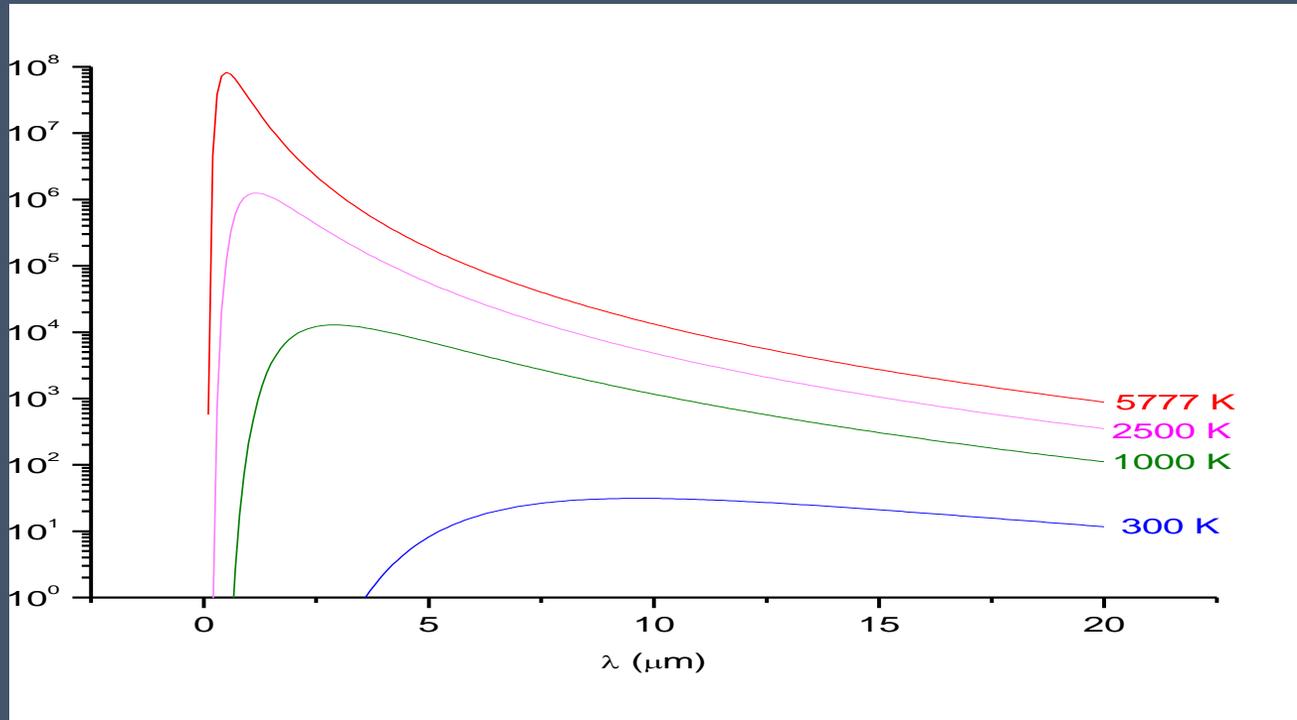
- Hallar la radiancia monocromática de luz verde (0,53μm) para un cuerpo negro a la temperatura de 3000 K.

$$E_{\lambda}^* = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot [\exp(c_2 / (\lambda \cdot T)) - 1]}$$

$$E_{\lambda}^* = \frac{(3.74 \times 10^8 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^4) / (0.53 \mu\text{m})^5}{\exp\left[(1.44 \times 10^4 \text{ K}\mu\text{m}) / (0.53 \mu\text{m} \cdot 3000 \text{ K}) \right] - 1}$$

$$= \underline{\underline{1.04 \times 10^6}} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot \mu\text{m}^{-1}$$

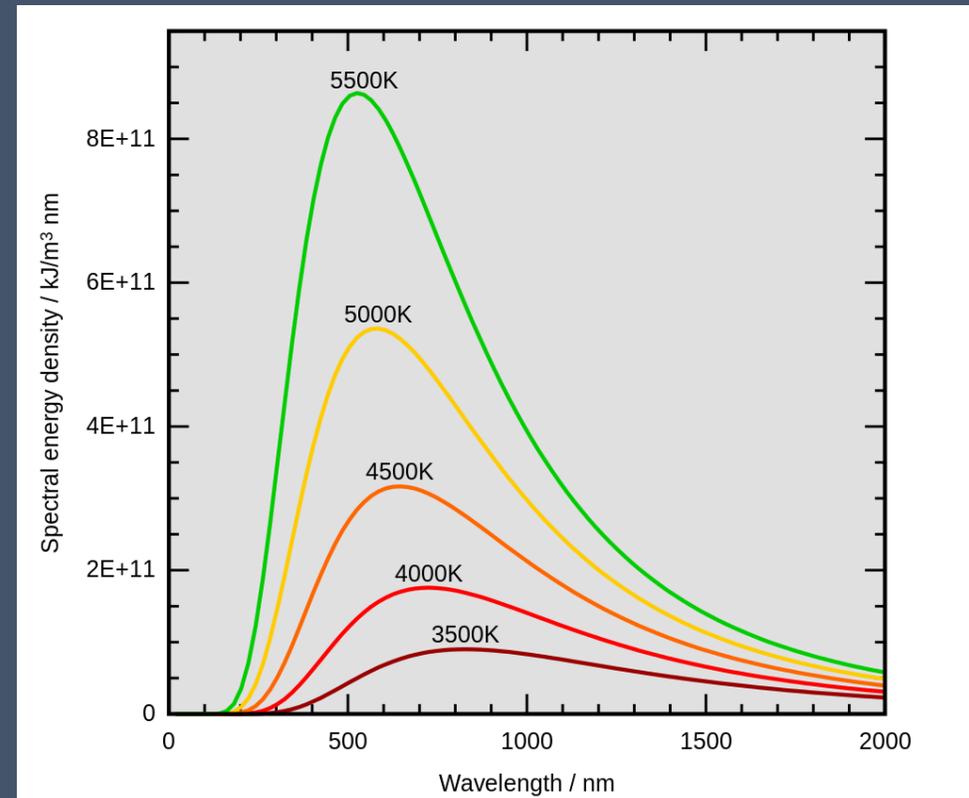
- La emisividad total (radiancia) de un cuerpo negro, teniendo en cuenta todas las longitudes de onda se obtiene integrando el área definida por ley de Planck (función de la temperatura).
- A mayor temperatura del cuerpo negro:
 - Para cada longitud de onda la energía emitida es mayor.
 - El máximo de emisividad ocurre a menores longitudes de onda



- **Ley de Stefan-Boltzmann.** La emitancia radiante E es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta $E = \sigma T^4$ Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.6866 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

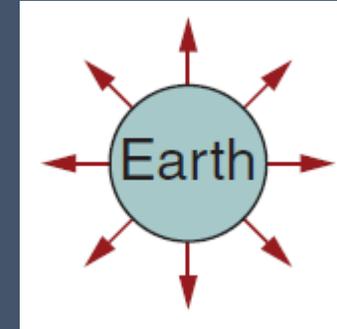
- **Ley de Wien.** Derivando la radiancia respecto a la longitud de onda en la ecuación de Planck e igualando a 0, obtenemos el pico de radiancia a una determinada longitud de onda.
- El máximo de radiancia de un cuerpo negro se produce a una longitud de onda determinada por la ley de Wien, a mayor temperatura el pico se produce a menor longitud de onda.

$$\lambda_{max} = \frac{0.2897756}{T} (cm)$$



- Cual es la radiancia, la radiación total emitida por la Tierra y la longitud de onda para el pico de emisividad, considerada como un cuerpo negro a una temperatura $T=255\text{ K}$?

$$E^* = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}) \cdot (255 \text{ K})^4 = \underline{240 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}.$$



$$A = 4\pi r^2 = 4 \times 3.14 \times (5370000)^2 = 5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2$$

$$E_T = E^* \times A = 1.22 \times 10^{17} \text{ W}$$

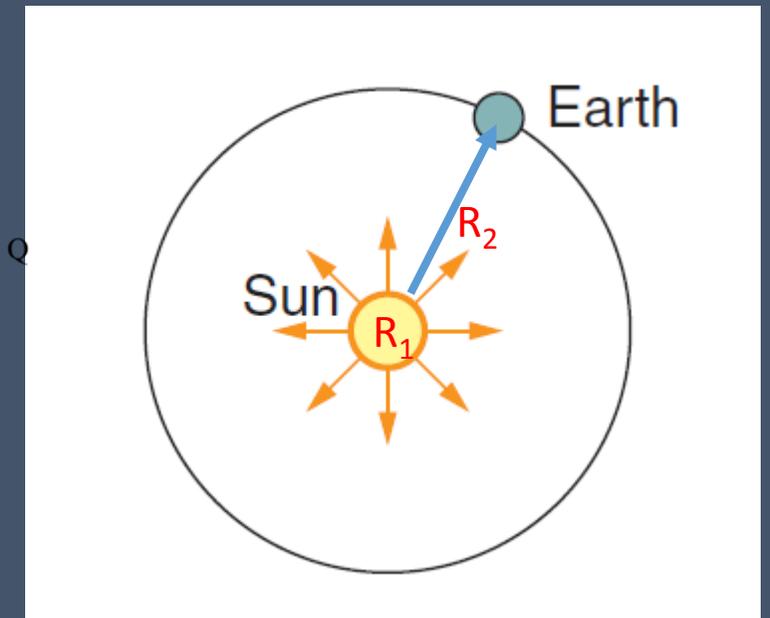
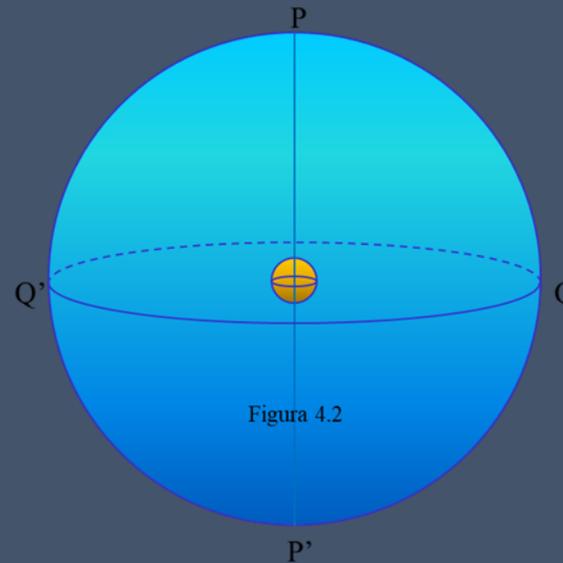
$$\lambda_{\text{max}} = (2897 \text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}) / (255 \text{ K}) = \underline{11.36 \text{ }\mu\text{m}}$$

- Estimar el valor de la irradiancia solar que alcanza la órbita de la Tierra, considerando una temperatura del Sol de 5770 K, un radio solar de $6,96 \times 10^5$ km, y un radio orbital terrestre de $1,495 \times 10^8$ km.

$$E_1^* = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}) \cdot (5770 \text{ K})^4 \\ = 6.285 \times 10^7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

$$4\pi R_1^2 E_1 = 4\pi R_2^2 E_2$$

$$E_2 = E_1^* \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2$$



$$S_o = E_2^* = (6.285 \times 10^7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}) \cdot \\ (6.96 \times 10^5 \text{ km} / 1.495 \times 10^8 \text{ km})^2 = \underline{\underline{1362 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}}.$$

Problema 2.1 Sabiendo que la energía que emite el Sol cada segundo es $3,9 \times 10^{26}$ J y que el radio de la fotosfera solar, que es la capa solar visible más externa, es $R_S = 6,96 \times 10^8$ m, calcule:

- a) La potencia de la radiación solar o luminosidad.
- b) El flujo de potencia o emitancia en la fotosfera.

- c) La irradiancia o flujo de radiación solar que incide sobre el panel solar de una nave espacial situada a una distancia $d = 1 \times 10^{12}$ m del centro del Sol.
- d) Si el panel tiene una superficie de 10 m^2 y está orientado perpendicularmente a los rayos solares, la potencia que recibe.

a) La potencia total o luminosidad del Sol es $L_S = 3,9 \times 10^{26}$ W.

b) El flujo de potencia emitida o emitancia solar es el cociente entre la luminosidad y el área de la superficie de la fotosfera, es decir,

$$E = \frac{L_S}{4\pi R_S^2} = 6,4 \times 10^7 \text{ W m}^{-2}.$$

c) Cuando la radiación llega al satélite la potencia de la radiación solar se ha distribuido uniformemente sobre una superficie esférica centrada en el Sol y de radio igual a la distancia de la nave al Sol. Así, la irradiancia en la nave espacial es

$$I_R = \frac{L_S}{4\pi d^2} = 31 \text{ W m}^{-2}.$$

d) La potencia de la radiación solar que incide en el panel solar es el producto del flujo por la superficie

$$P = I_R A = 310 \text{ W}.$$

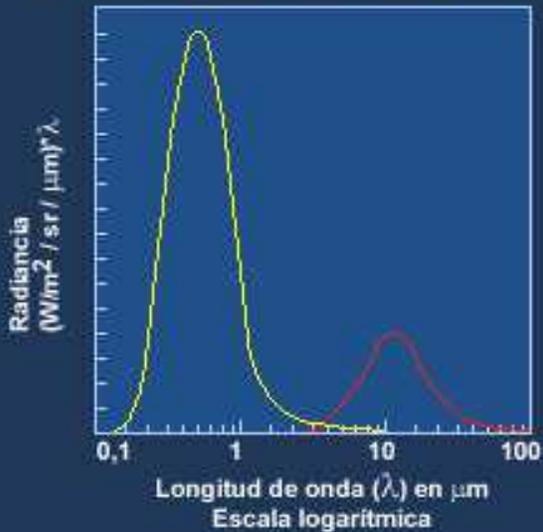
Radiación Solar: Cuerpo negro a 6000 K. entre 0,15 μm y 4(5) μm máximo a 0,5 μm . Onda corta

44 % visible , 7 % UV y 49 % IR.

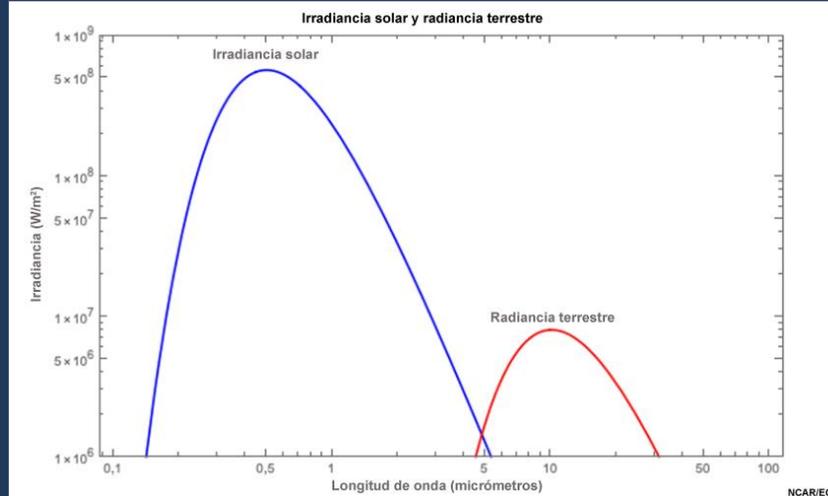
Radiación Terrestre: Cuerpo negro a 300 K. entre 5 y 25 (100) μm con máximo a 10 (11) μm . Onda larga.

Atmósfera: Fuerte absorción vapor de agua, también CO_2 y O_3 .

Curvas de cuerpo negro solar y térmica

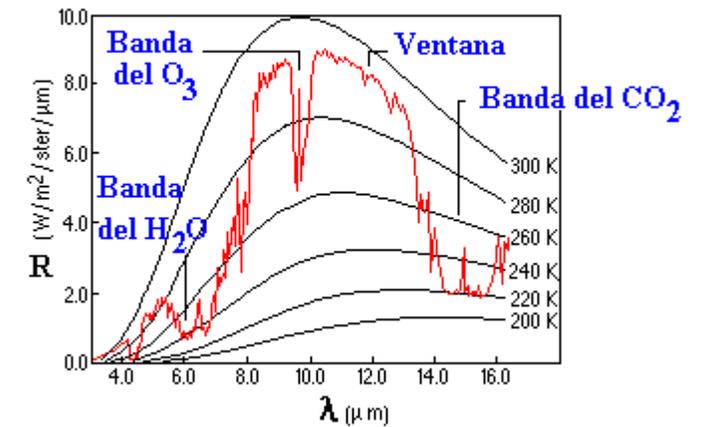


©The COMET Program



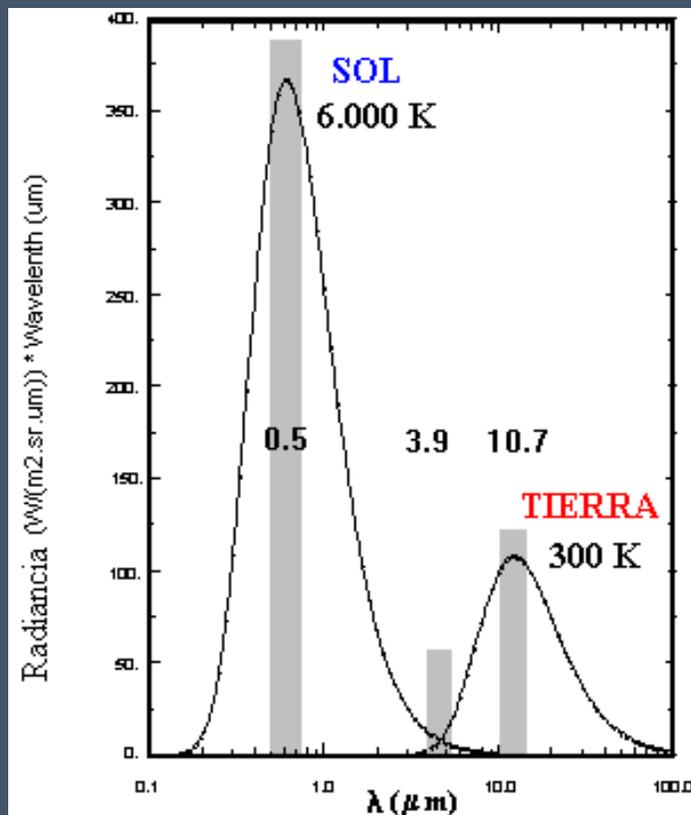
NCAR/IEOL

RADIACION TERRESTRE (Superficie + Atmósfera)



Ventanas y Bandas de Absorción

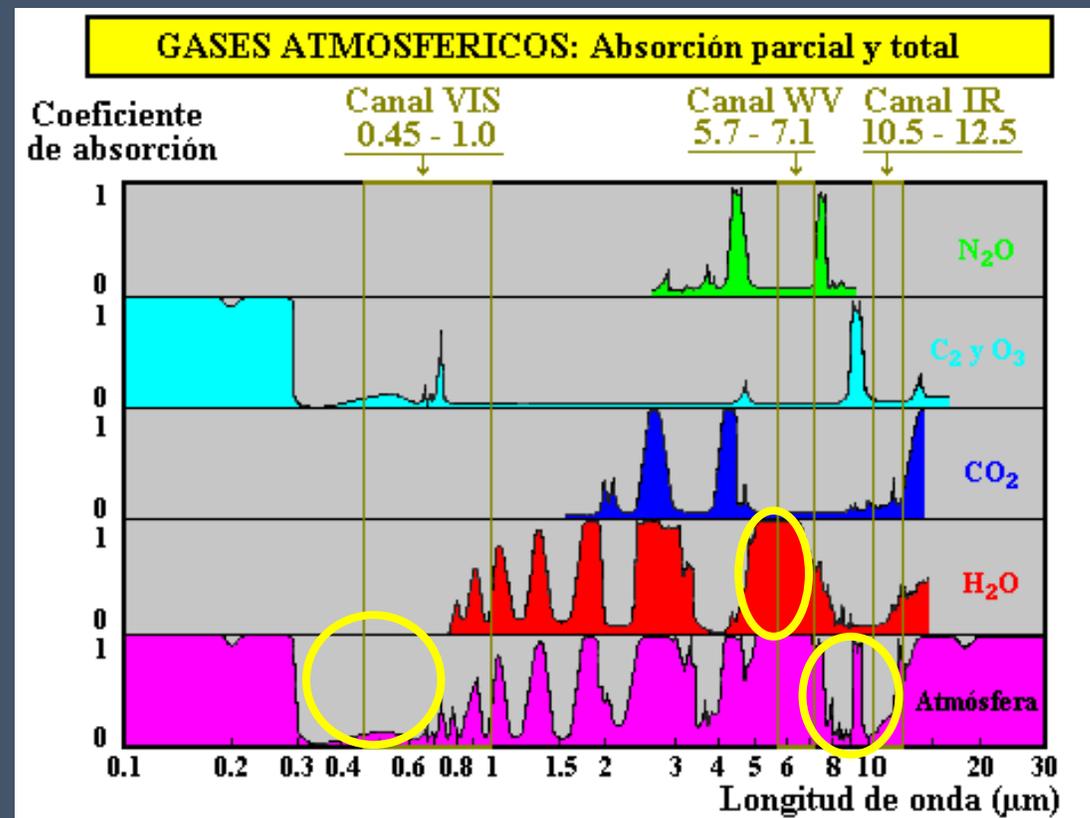
Ventana atmosférica 8-11 μm (satélites meteorológicos) (0,6-07 μm)
5- 8 μm existe una fuerte banda de absorción del vapor de agua



Curvas de radiancia de Planck para el Sol (6000 °K) y la Tierra (300°K)

Máximos de emisión del Sol y la Tierra

Zona del espectro común entre las curvas de emisión



GASES ATMOSFERICOS: Absorción parcial y total

Coeficiente de absorción

Canal VIS
0.45 - 1.0

Canal WV
5.7 - 7.1

Canal IR
10.5 - 12.5

N_2O

C_2 y O_3

CO_2

H_2O

Atmósfera

Longitud de onda (μm)

❖ Absorción y dispersión en la atmósfera

Moléculas diatómicas y triatómicas (momento dipolar)

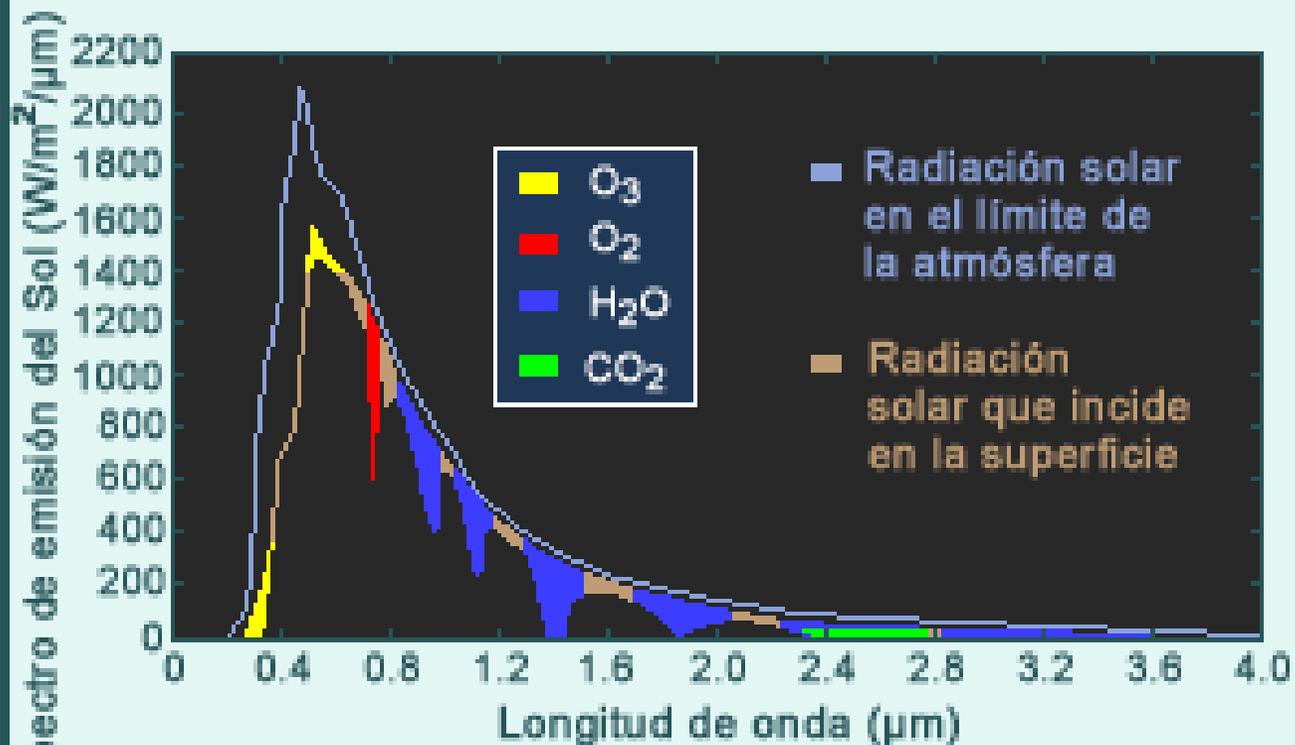
Ozono

0,20-0,29 UVC

0,29-0,32 UVB

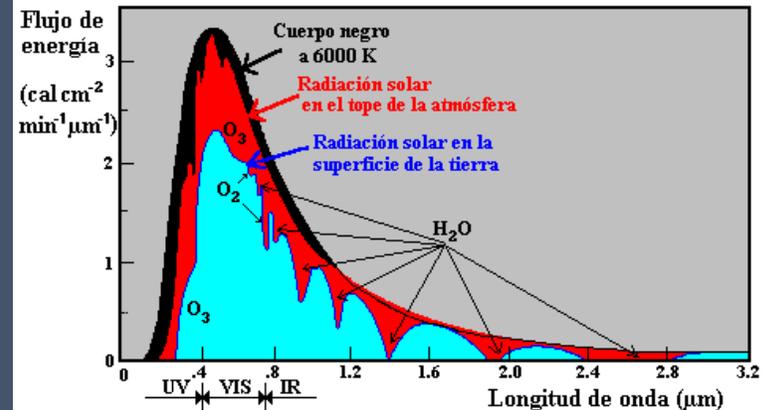
0,32-0,40 UVA

Absorción molecular de la radiación solar

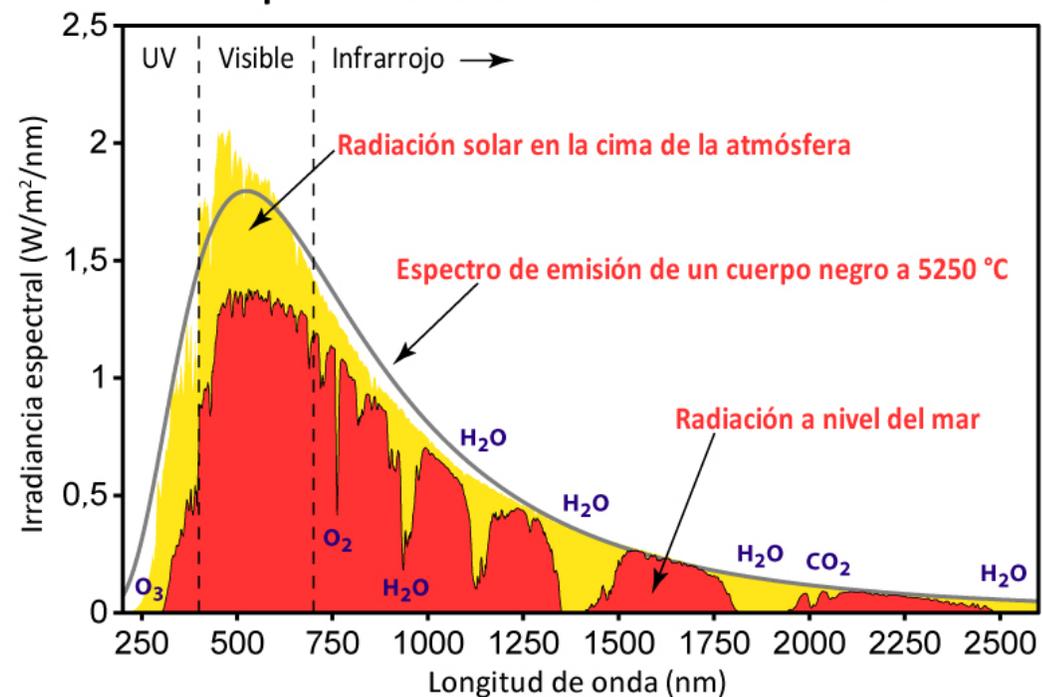


The COMET Program

DISTRIBUCION ESPECTRAL DE LA RADIACION SOLAR



Espectro de la radiación solar



- RADIACIÓN DE ONDA CORTA:**

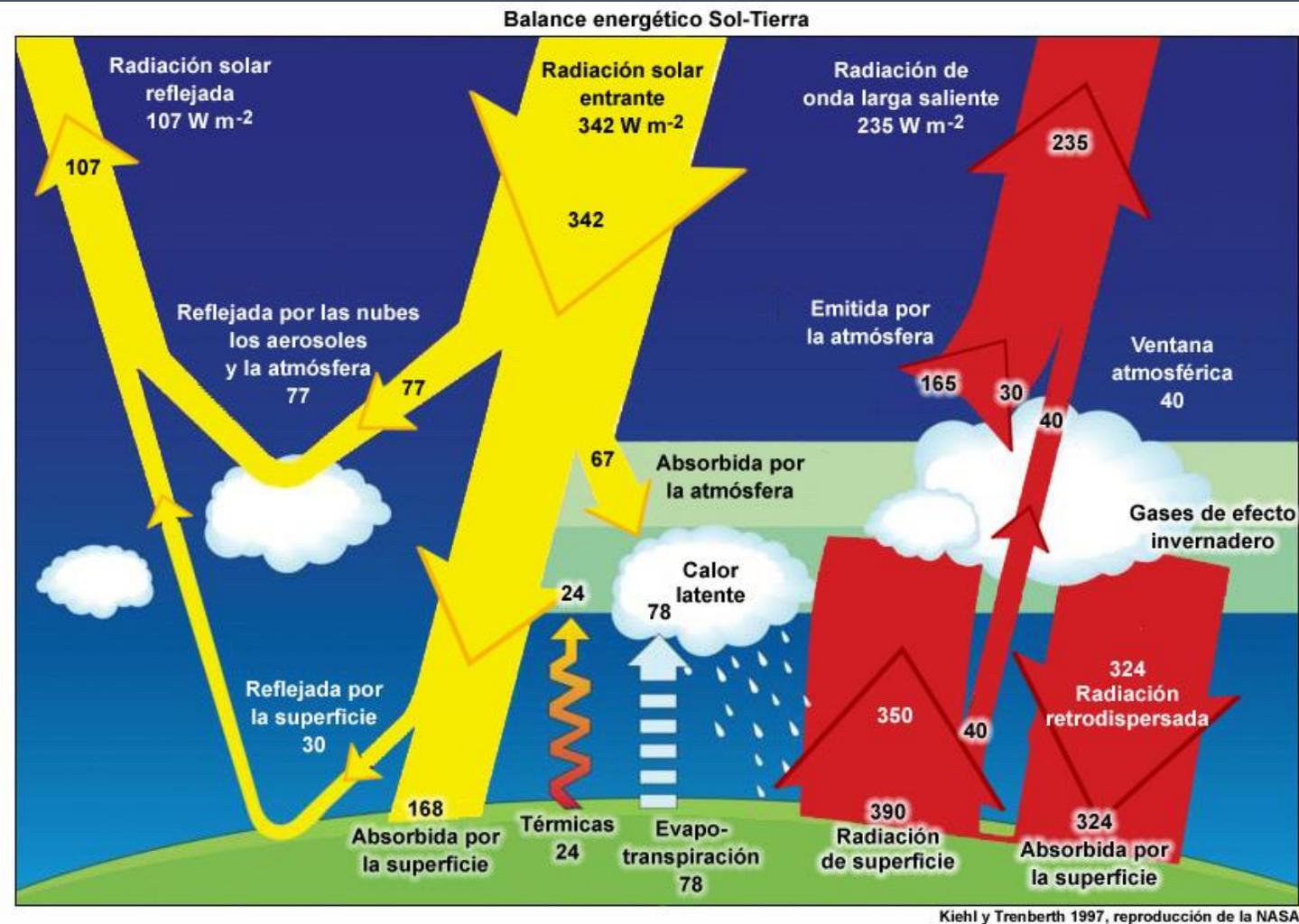
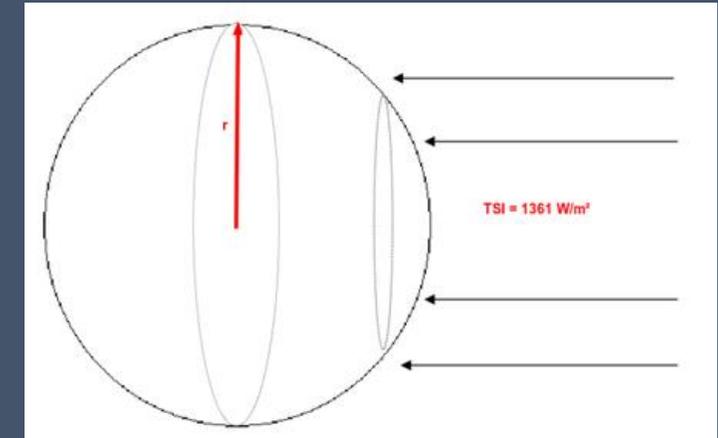
Albedo planetario: 30 %

Absorbido por la atmósfera 20 %

Absorbido por la superficie 50 %

$$342 = 107 + 235$$

BALANCE GLOBAL



ALBEDO MEDIO DE DIFERENTES SUPERFICIES	
Cumulonimbos (grandes y espesos) 92%	Arena 60% (Arenas Blancas, Nuevo México, USA)
Cumulonimbos (pequeños hasta 6 Km) 86%	Estratos 42% (poco espesos sobre mar)
Nieve fresca 80% - 85%	Cirros 36% (aislados sobre tierra)
Agua 50% - 80% (sol cerca del horizonte)	Cirroestratos 32% (aislados sobre tierra)
Cirroestratos 74% (esposos, con nubes más bajas)	Cúmulos de buen tiempo 29% (mas de 80% y sobre tierra)
Cúmulos y estratocúmulos 69% (más del 80% y sobre tierra)	Hierba 20% - 25%
Estratocúmulos 68% (más del 80% y sobre tierra)	Tierras secas 15% - 25%
Estratos 64% (esposos y sobre mar)	Tierras húmedas 10%
Estratocúmulos 60% (dentro de capas nubosas sobre mar)	Bosques 5% - 10%
Nieve vieja 50% - 60%	Agua 3% - 5% (sol cerca del cénit)

Superficie: $168 + 324 = 24 + 78 + 390$

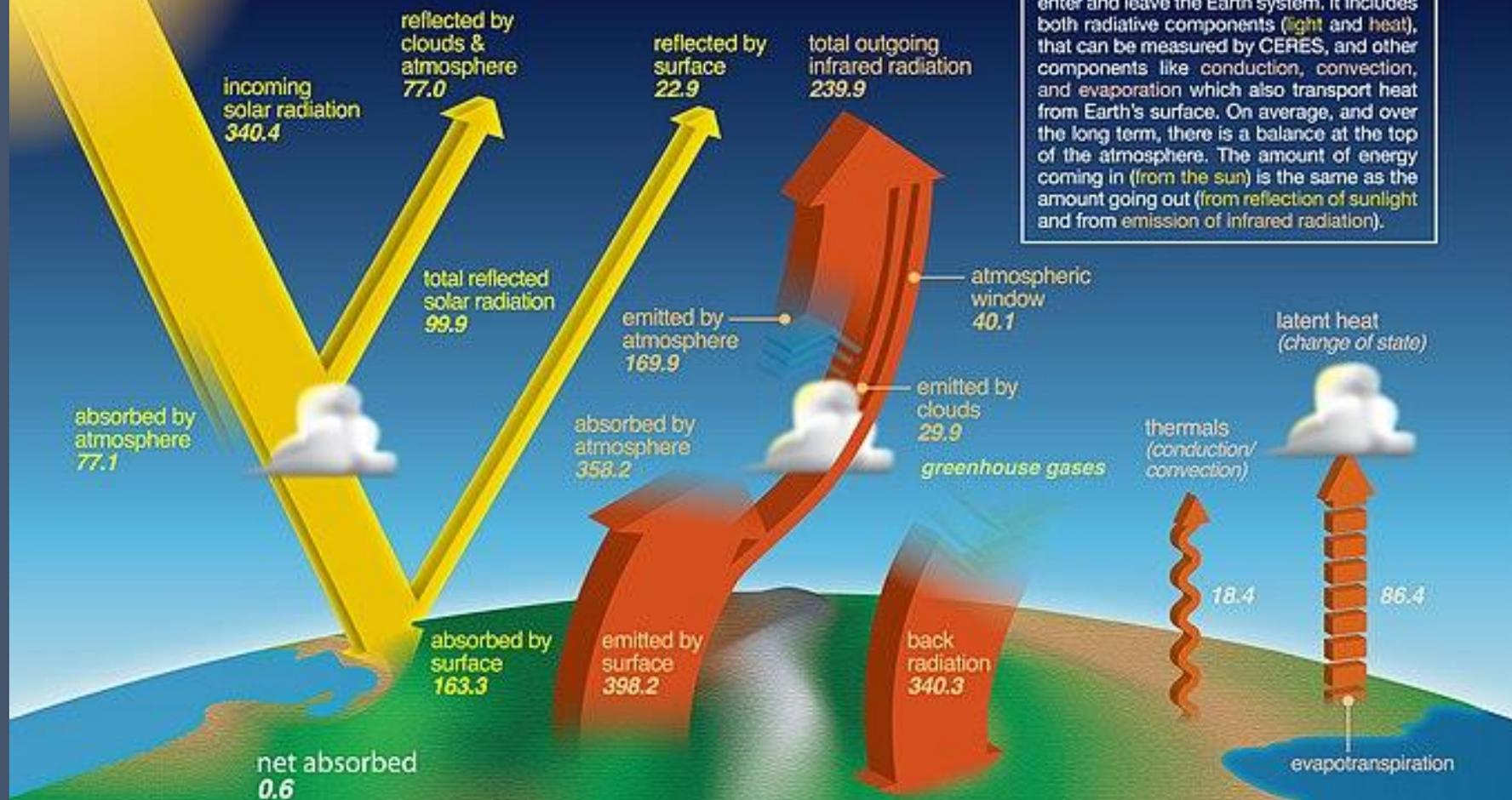
Limite superior: $342 = 235 + 107$

Atmósfera: $67 + 78 + 24 + 350 = 324 + 165 + 30$



earth's energy budget

The Earth's energy budget describes the various kinds and amounts of energy that enter and leave the Earth system. It includes both radiative components (light and heat), that can be measured by CERES, and other components like conduction, convection, and evaporation which also transport heat from Earth's surface. On average, and over the long term, there is a balance at the top of the atmosphere. The amount of energy coming in (from the sun) is the same as the amount going out (from reflection of sunlight and from emission of infrared radiation).



All values are fluxes in Wm^{-2}
and are average values based on ten years of data

Bibliografía

- Termodinámica de la atmósfera ;J.V. Iribarne y W.L. Godson ; [traducción, Francisco Valero Rodríguez y Rafael Cubero Robles] Ministerio de Medio Ambiente, Centro de Publicaciones,1996
- Problemas de meteorología. I, Estática y termodinámica de la atmósfera. Carlos García-Legaz Martínez; Federico Castejón de la Cuesta; Instituto Nacional de Meteorología (España).Editorial: Madrid : Instituto Nacional de Meteorología, 1986.
- Problemas de meteorología y climatología. Zúñiga et al. UNED.
- Meteorología y Clima. Casas y Alarcón. UPC
- R. Stull. Practical Meteorology.
https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/
- Problemas Meteorología Superior. Antonio Naya.