

GF3003

Introducción a la Meteorología y
Oceanografía

Ciencias Atmosféricas

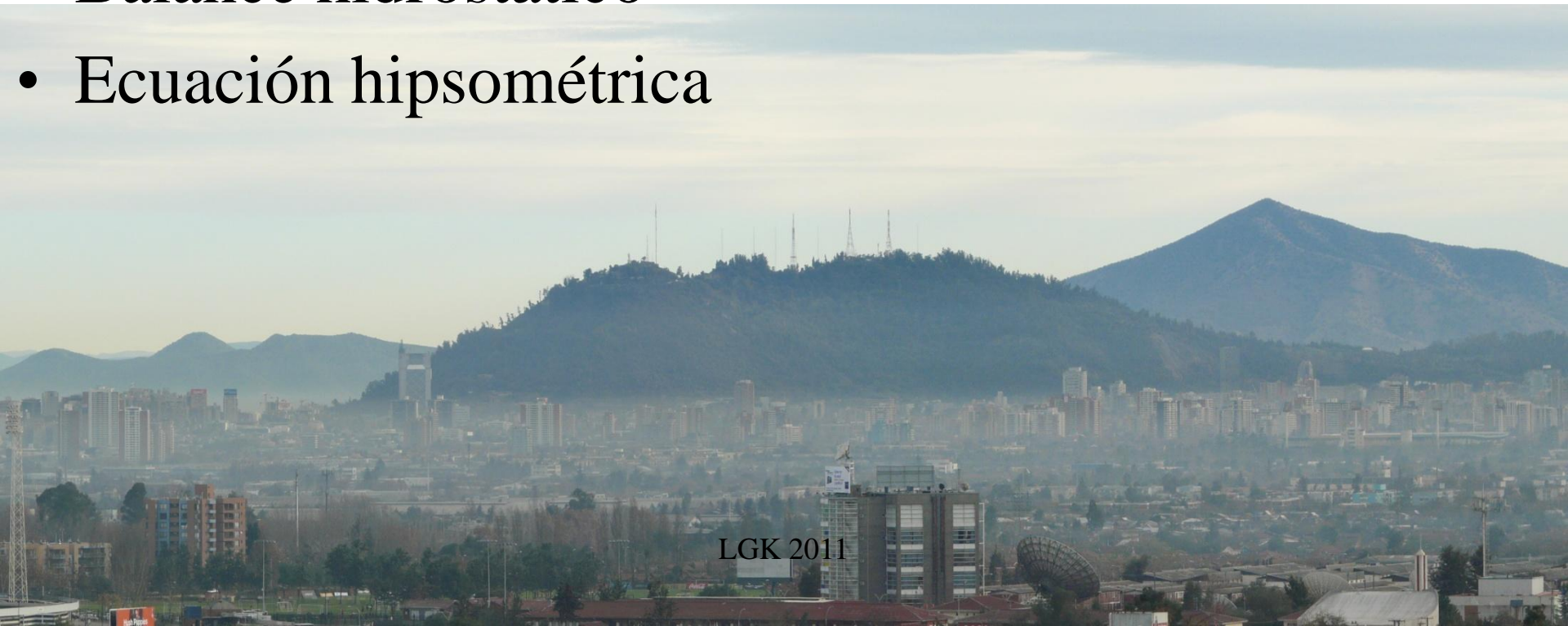
Laura Gallardo Klenner

Departamento de Geofísica de la
Universidad de Chile

Otoño 2011

HOY (Primera parte)

- Estratificación termodinámica y composición de la atmósfera
- Ecuación de estado termodinámico
- Balance hidrostático
- Ecuación hipsométrica

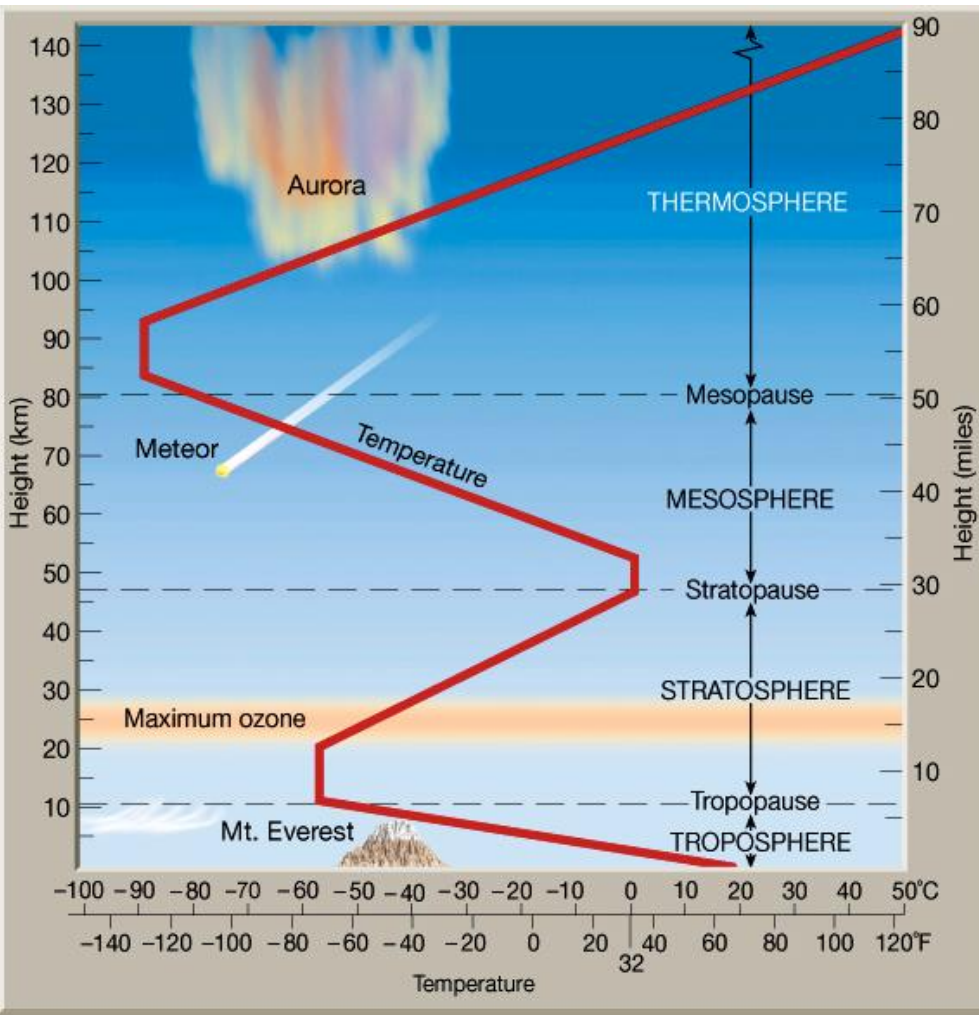


Más específicamente, el/la alumno/a será capaz de:

- **Describir y explicar la estratificación termodinámica de la atmósfera**
- **Describir los términos y resolver problemas usando la ecuación hipsométrica**

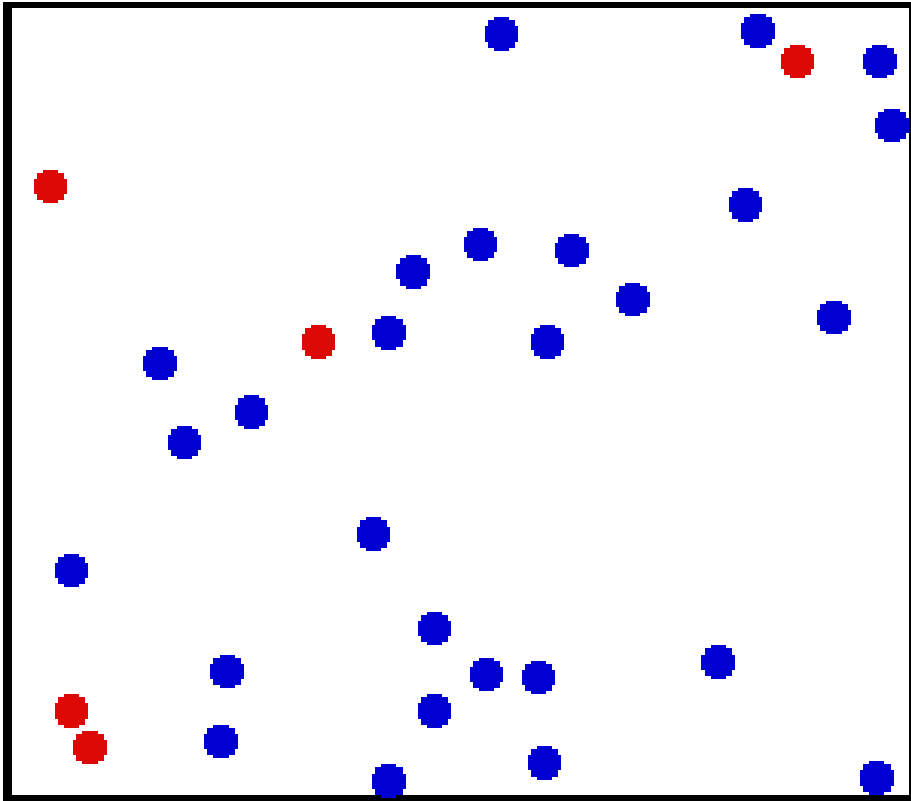


Estructura termodinámica



Perfil vertical de temperatura característico de la atmósfera terrestre

¿Pero qué es la temperatura?



$$\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT.$$

Estructura vertical de la atmósfera: $p(z)$, $T(z)$, $\mu(z)$

¿Cómo conocemos $T(z)$?

1830-1920: Mediciones hasta 10-12 km mediante Globos Aerostaticos

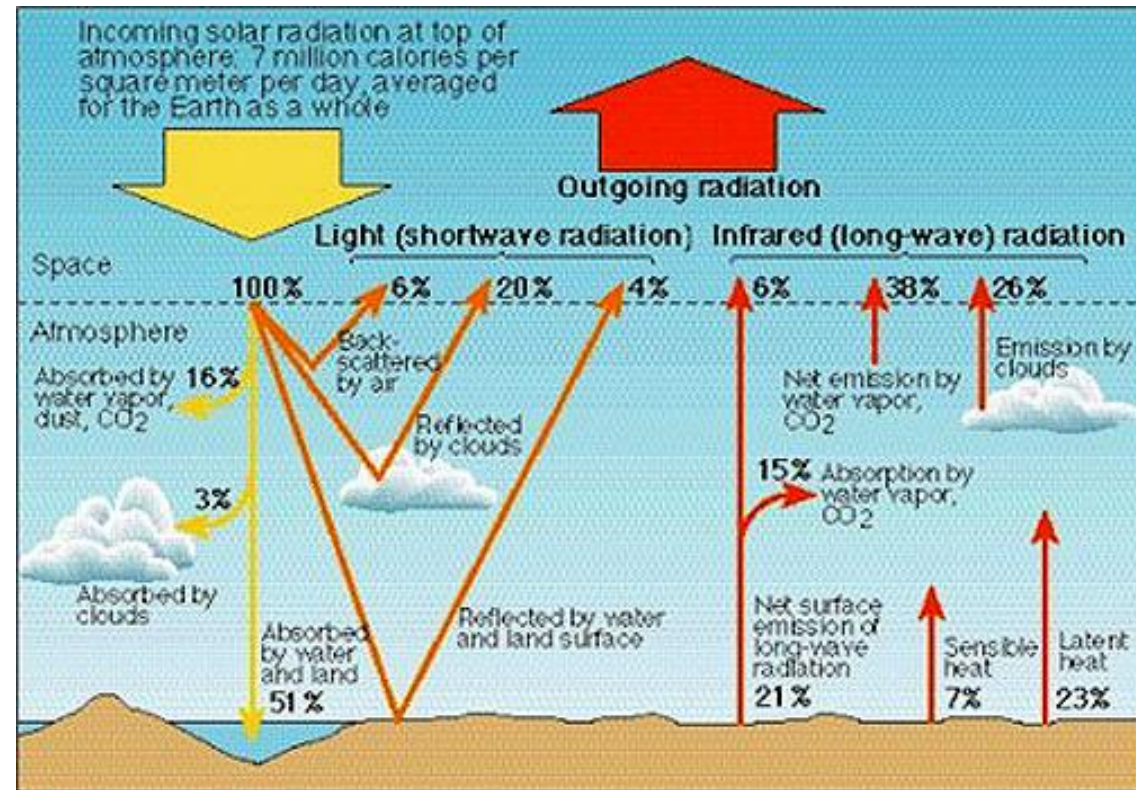
1920: Invención del radiosonda (hasta 40 km)

1950: Invención del Cohete-sonda (hasta 80 km)



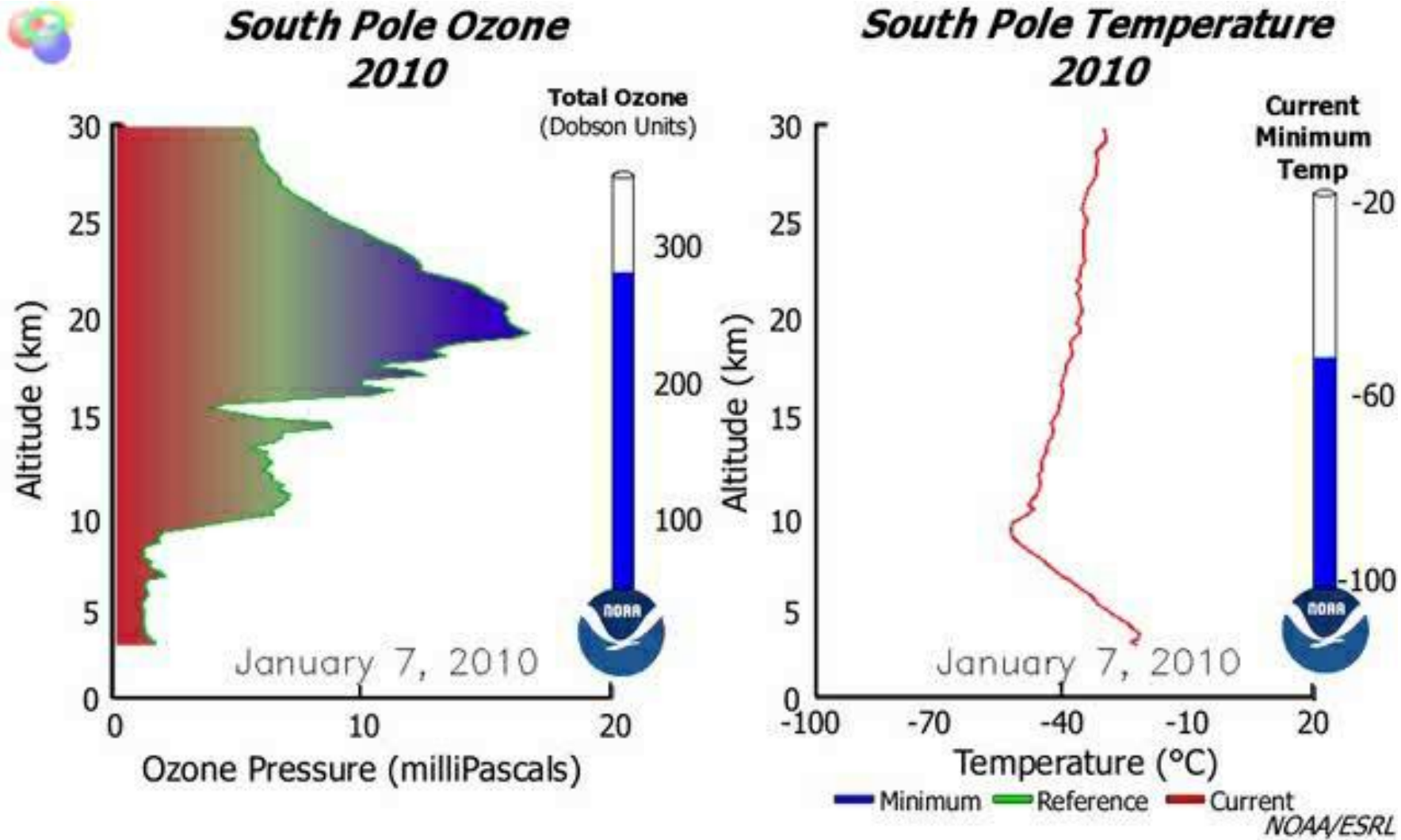
¿Por qué desciende generalmente la temperatura en la tropósfera?

- La tropósfera, que contiene el 75% de la masa atmosférica, es calentada desde abajo (el sol calienta la superficie)
- La condición es termodinámicamente inestable (aire caliente por debajo de aire frío)



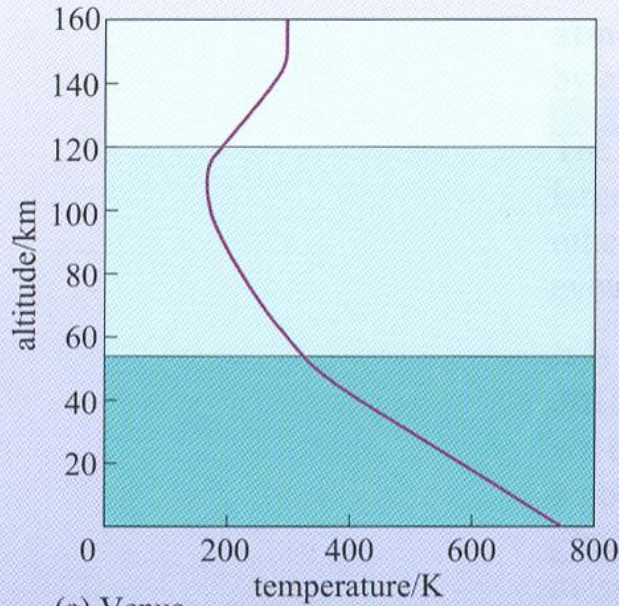
del griego τροπος (*tropos* = girar) y σφαιρα (*sphaira* = esfera).

¿Por qué aumenta la temperatura en la estratósfera?

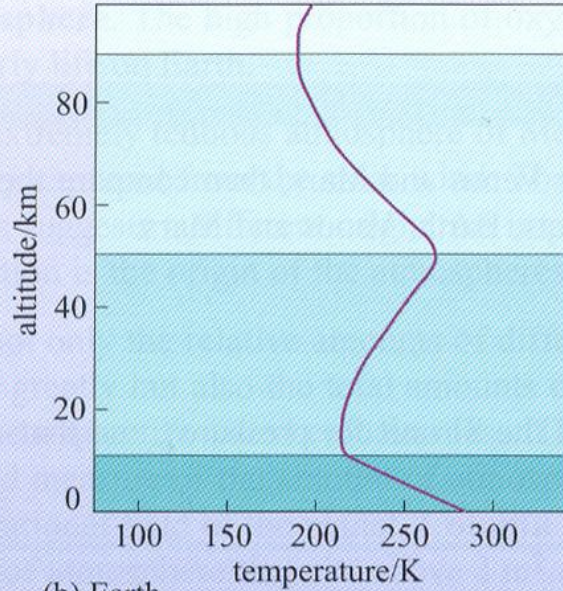


LGK 2011

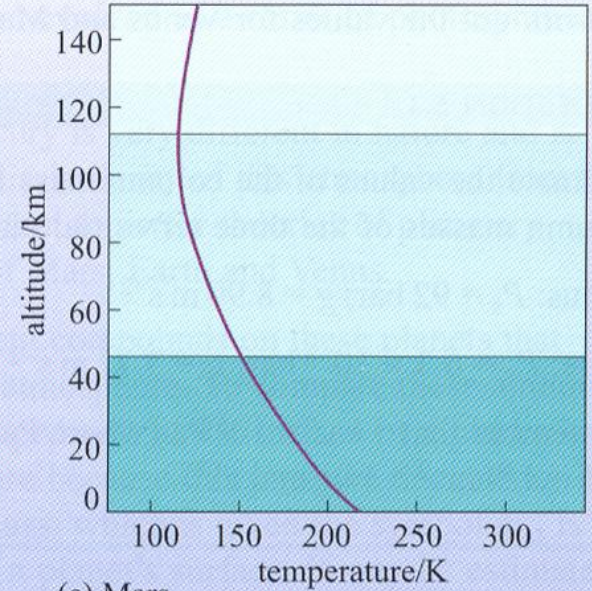
Por supuesto, según la composición cambia la estructura termodinámica



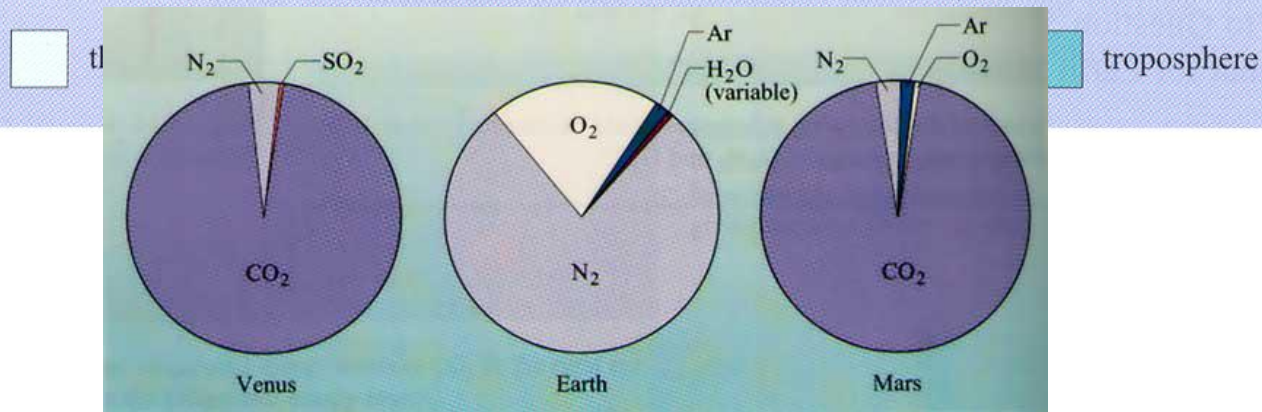
(a) Venus




(b) Earth



(c) Mars

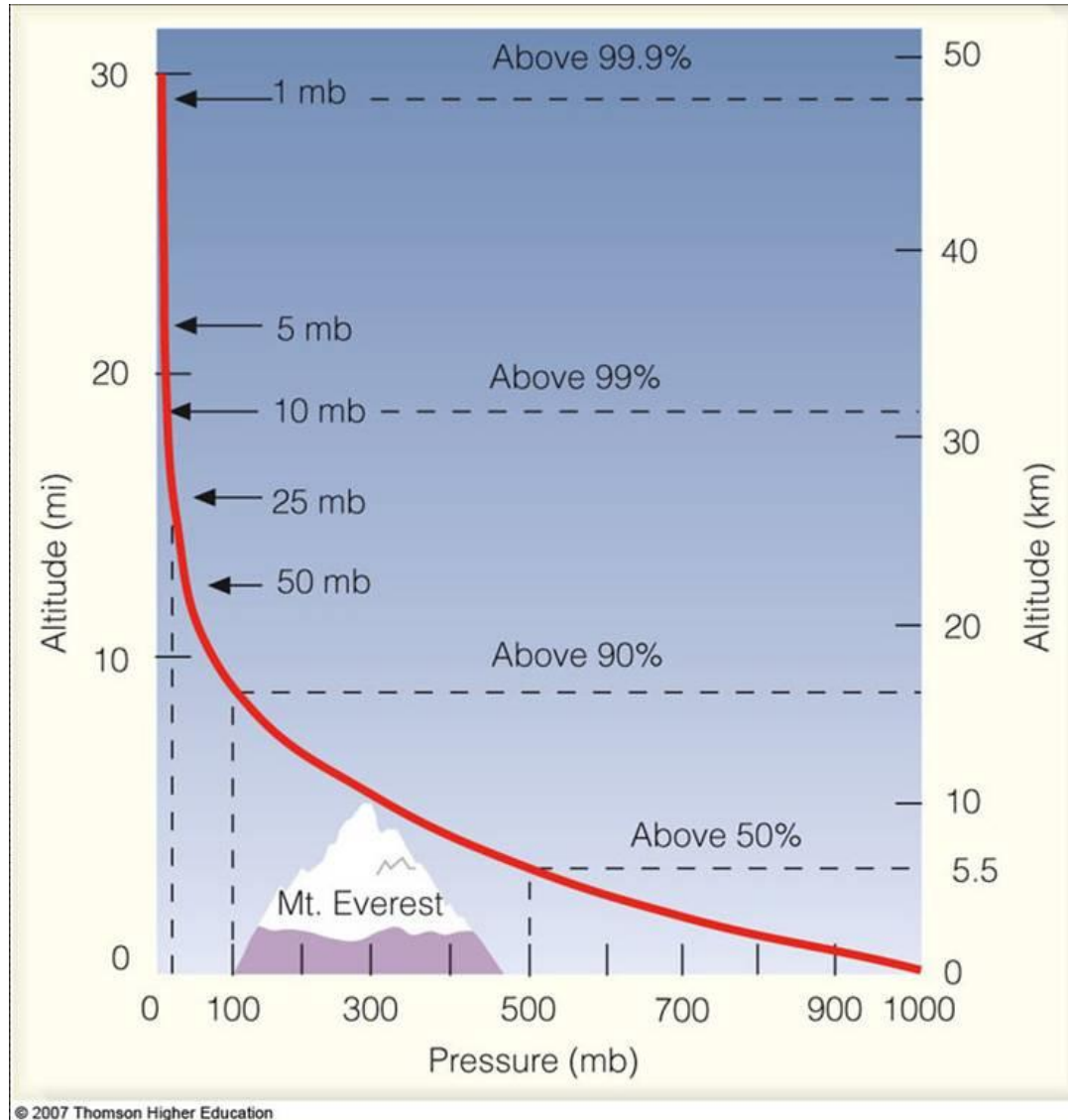




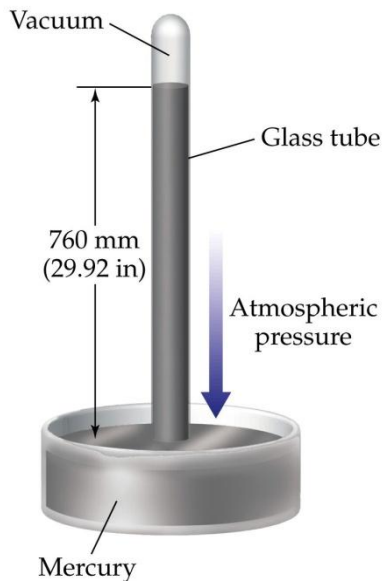
En la atmósfera
prevalecen los
movimientos
horizontales

Se comporta, grosso
modo, como un gas
ideal

¿Cómo cambia la presión con la altura?



Presión Atmosférica es “facil” de medir...mucho mas facil que la densidad del aire y la altura sobre el nivel del mar... e.g.: aviones emplean Altímetros (y actualmente GPS)



Barómetro de Mercurio

¿Porque $1013 \text{ hPa} = 76 \text{ cm Hg}$?
¿Porque no son de H_2O ?



Barómetro Aneroid

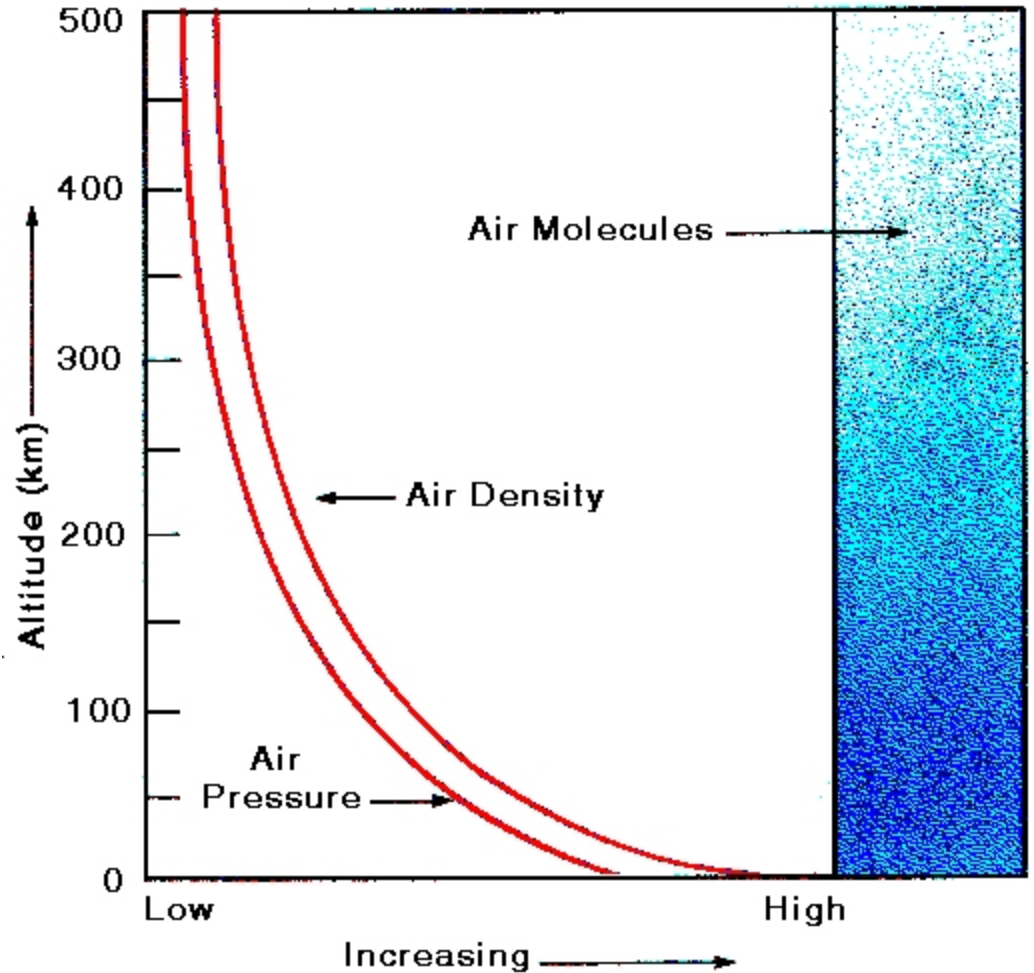
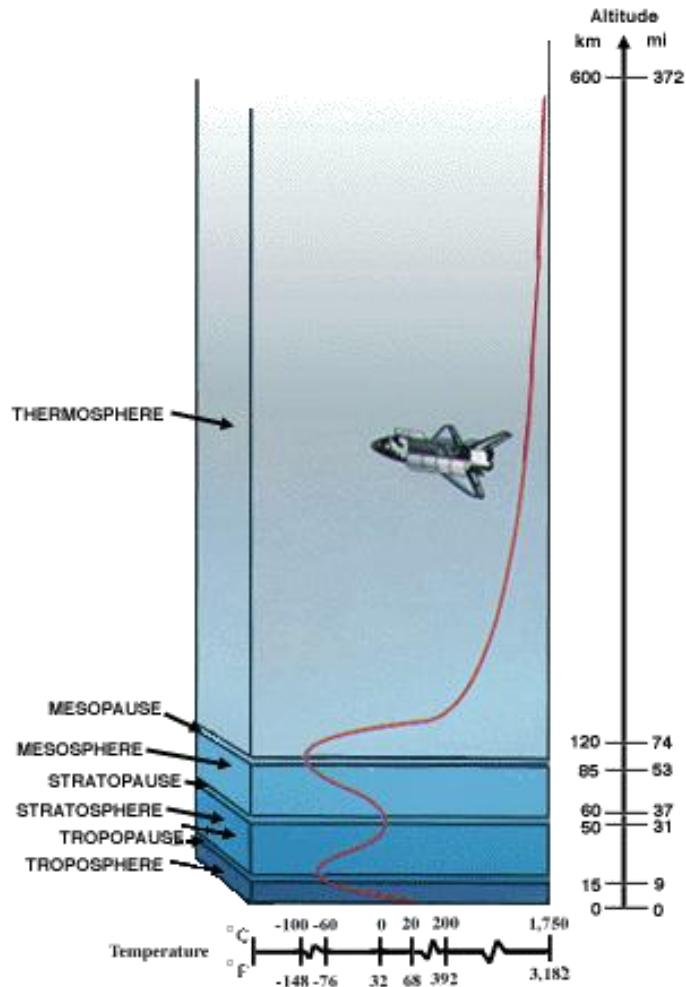
(presión atmosférica comprime un recipiente flexible con vacío en su interior)
LGK 2011



Barómetro piezoeléctrico

(presión atmosférica altera resistencia a corriente eléctrica de ciertos materiales)

Entonces:



Atmósfera como gas ideal

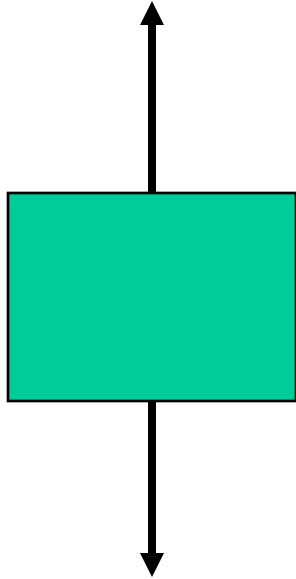
$$pV = nR^*T = \frac{m}{M}R^*T$$



$$p = \rho R T$$

$$R = 287 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]; M \approx 29 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]$$

Balance hidrostático



“La atmósfera no se cae...”

La fuerza de gravedad (hacia abajo) es compensada por el gradiente vertical de presión (hacia arriba)

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

$$p = \rho R T$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

$$\frac{\partial p}{p} = -\frac{g}{RT} \partial z$$

Esto da una excelente aproximación de la variación vertical de la presión. Excepto en situaciones con movimientos verticales intensos, por ejemplo, tornados.

Ecuación hipsométrica

$$\frac{\partial p}{p} = -\frac{g}{RT} \partial z$$

$$\Rightarrow \int_{p_s}^p \frac{\partial p}{p} = -\frac{g}{R} \int_0^z \frac{\partial z}{T}$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{p}{p_s}\right) = -\frac{g}{R} \int_0^z \frac{\partial z}{T}$$

$$o \quad p = p_s \exp\left(-\frac{g}{R} \int_0^z \frac{\partial z}{T}\right)$$

Ecuación
hipsométrica

$$\frac{\partial p}{p} = -\frac{g}{RT} \partial z$$

$$p_2 = p_1 \exp\left(-\frac{g}{R} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial z}{T}\right)$$

T ~ constante

$$\Rightarrow \Delta z = z_2 - z_1 \approx \frac{RT}{g} \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Isohipsas

$$\frac{\partial p}{p} = -\frac{g}{RT} \partial z = -\frac{1}{RT} \partial \phi, \quad \phi = \text{altura geopotencial}$$

$$p_2 = p_1 \exp\left(-\frac{1}{R} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial \phi}{T}\right)$$

$T \sim \text{constante}$

$$\Rightarrow \Delta \phi \approx RT \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Escala de altura (“*Scale height*”)

$$\frac{\partial p}{p} = -\frac{g}{RT} \partial z \quad \text{o} \quad p_2 = p_1 \exp\left(-\frac{g}{R} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial z}{T}\right)$$

Análisis dimensional

$$\Rightarrow H = \frac{RT}{g}$$

En H, la presión ha disminuido en 1/e para una atmósfera isotérmica

Preguntas para cuando estudien

- Estimar la masa de la atmósfera ($M_{\text{atm}} \sim 5 \times 10^{21}$ g) sabiendo que a nivel de superficie la presión es aproximadamente 1000 hPa
- ¿Cuál es la composición atmosférica de Júpiter?
¿Cómo es su estratificación térmica?



A black and white cat is sitting on a wooden railing. The cat's tail is raised high and is curved, showing a white underside. The cat has a white face with black markings around its eyes and ears. The background is a wooden fence and a blurred outdoor setting. A yellow rectangular box with the text "10 minutos" is overlaid on the right side of the image.

10 minutos

LGK 2011

HOY (Segunda parte)

- **Recuerdos:**
 - **Radiación electromagnética**
 - **Radiación de cuerpo negro**
 - **Ley de Kirchoff**
 - **Función de Planck**
 - **Ley de Wien**
 - **Ley de Stefan-Boltzmann**
- **Radiación solar**
- **Radiación terrestre**
- **Balance radiativo (1)**



Más específicamente, el/la alumno/a será capaz de:

- Definir los conceptos de (ir)radianza y espectro electromagnético
- Describir las leyes de Kirchoff, Wien, Stefan-Boltzmann
- Caracterizar la radiación solar y terrestre en términos de su espectro y temperatura equivalente
- Resolver la ecuación de Stefan-Boltzmann para situaciones simples



Ecuaciones de Maxwell

Divergence of the electric field is charge density on ϵ_0 . Divergence of magnetic field is, however, zero, meaning there are no magnetic monopoles.

Curl of the electric field is minus the rate of change of magnetic field, while curl of the magnetic field is μ_0 times the current density...

... plus the all-important displacement current term, which gives rise to the propagation of light! So... what do you think of that as an idea for a comic?

It's a bit formulaic.

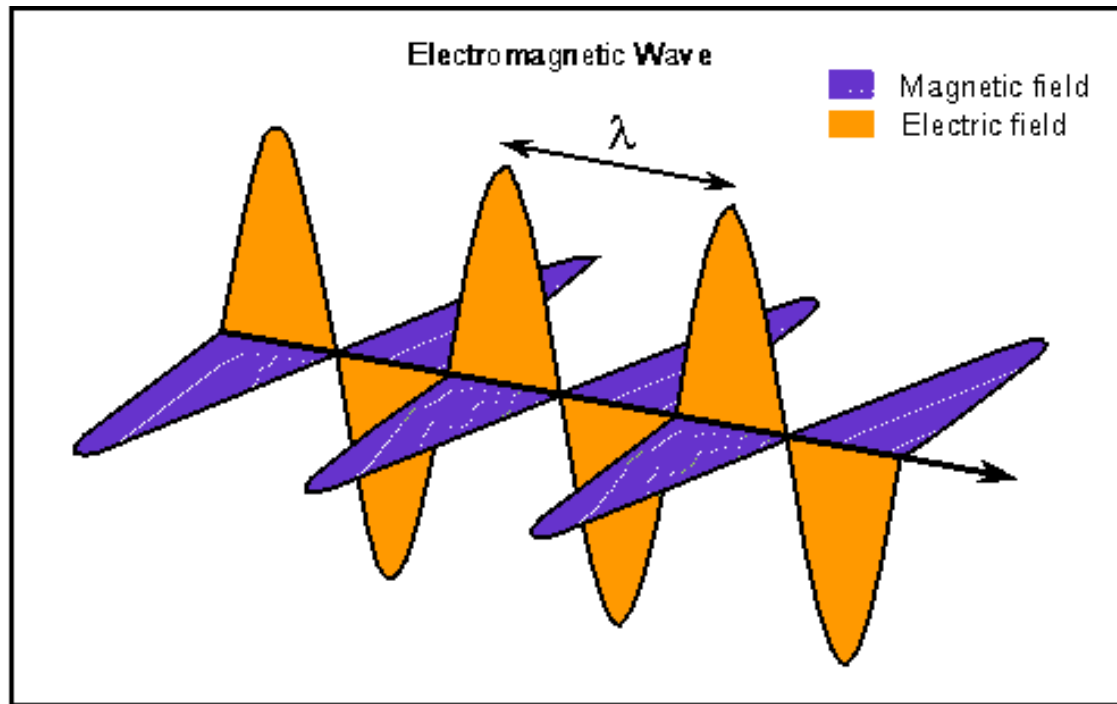


Name	Differential form
Gauss's law	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Gauss's law for magnetism	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Maxwell–Faraday equation (Faraday's law of induction)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
Ampère's circuital law (with Maxwell's correction)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

LGK 2011



Los campos electromagnéticos se pueden representar como ondas



Se las caracteriza por la longitud de onda

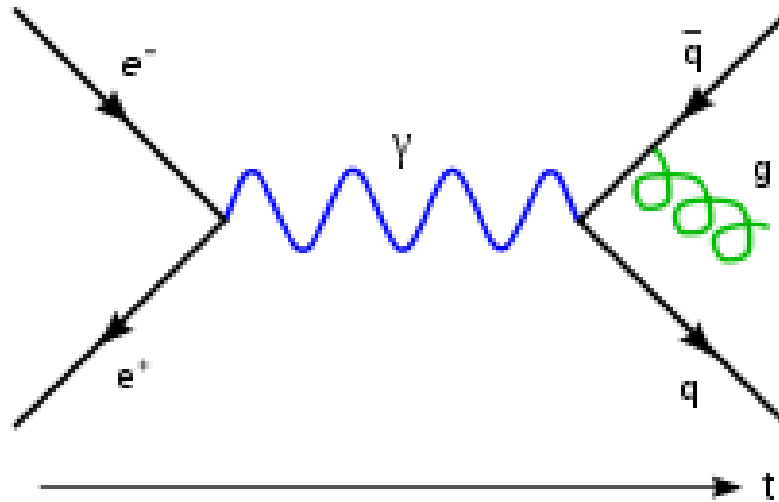
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{1}{\nu}$$

c : velocidad de la luz

Los campos electromagnéticos se pueden representar como partículas (fotones)



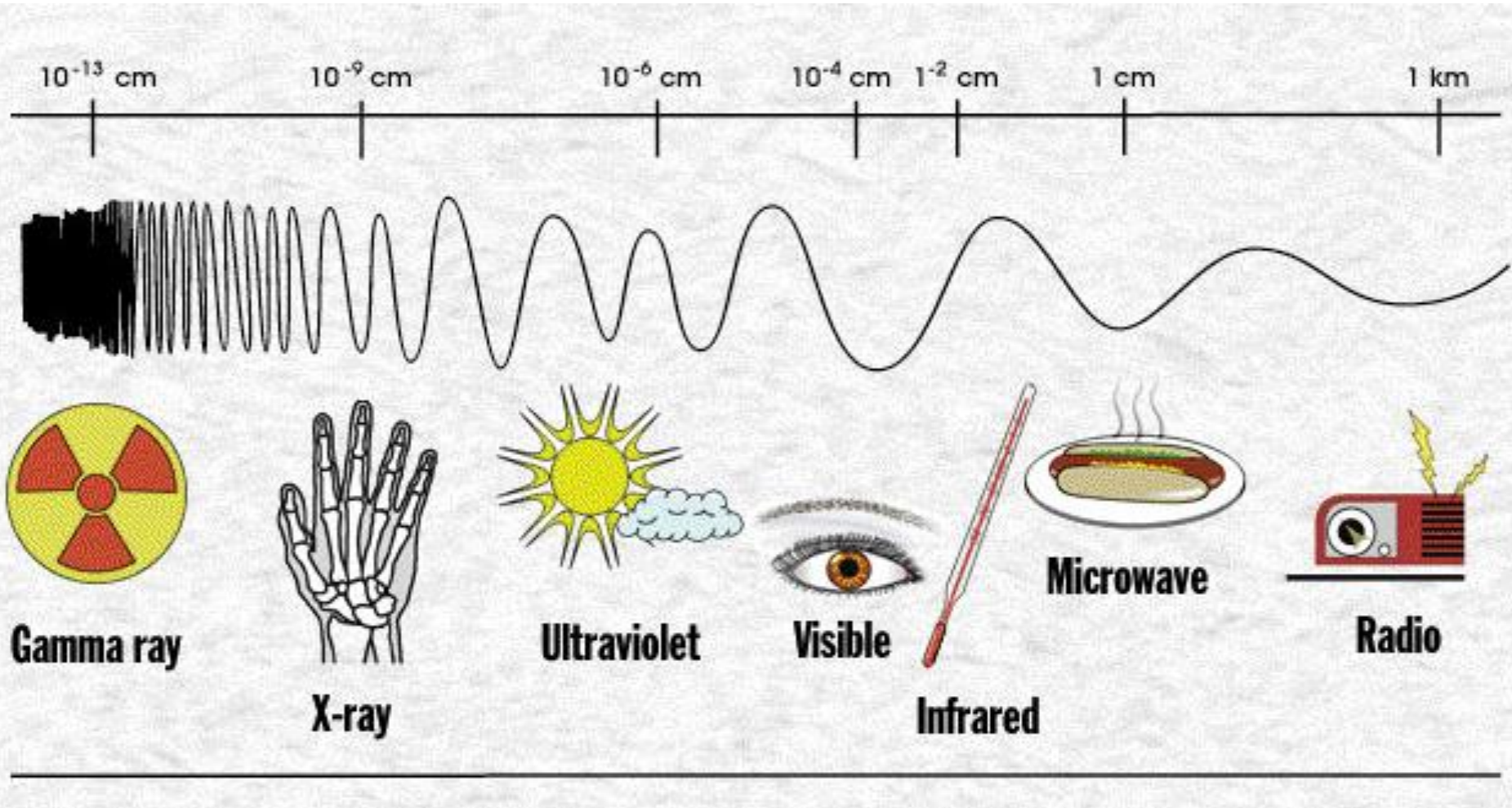
Max Planck ~1901



$$E = h\nu = \frac{\hbar}{\lambda}$$

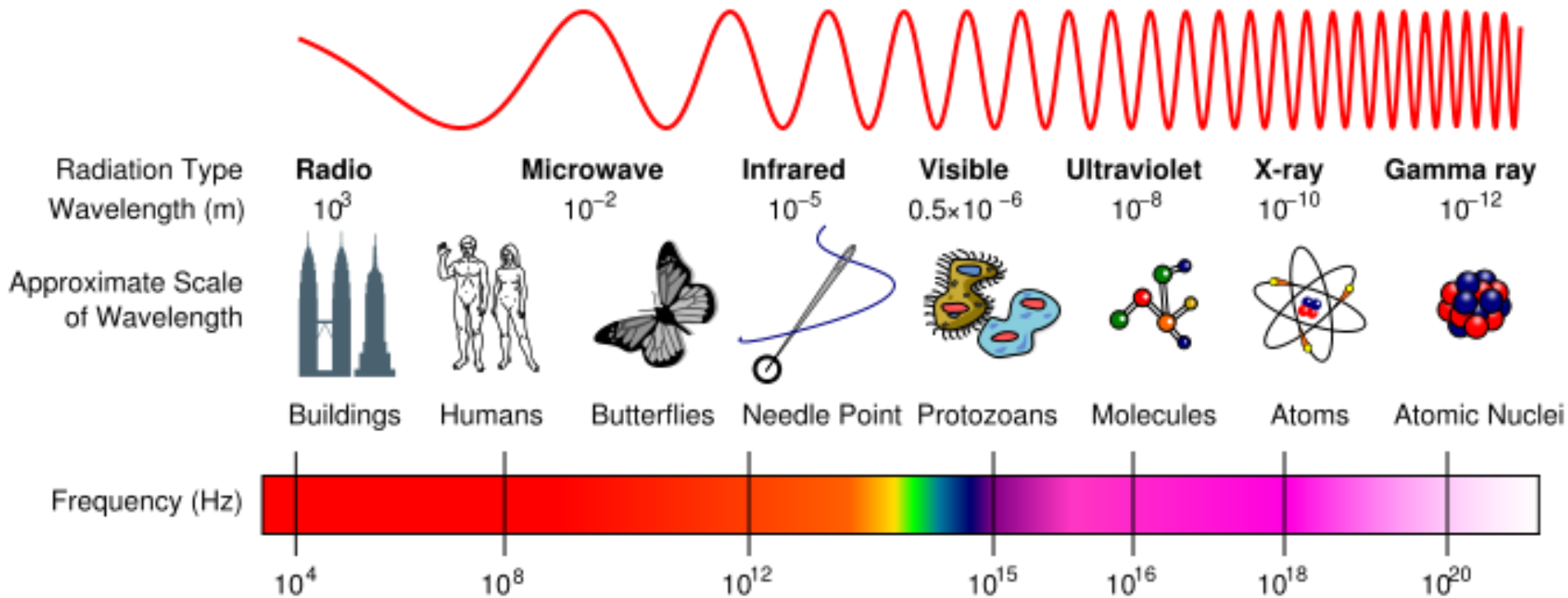
En el mundo microscópico, la energía/la fuerza se transfiere en forma discreta (*quanta*). La energía electromagnética en fotones de energía

En ciencias atmosféricas tratamos a **E** y **B** como ondas con energía $E=h\nu=h/\lambda$



A más energía, mayores frecuencias o longitudes de onda más cortas

$$E = h\nu = \frac{h}{\lambda}$$

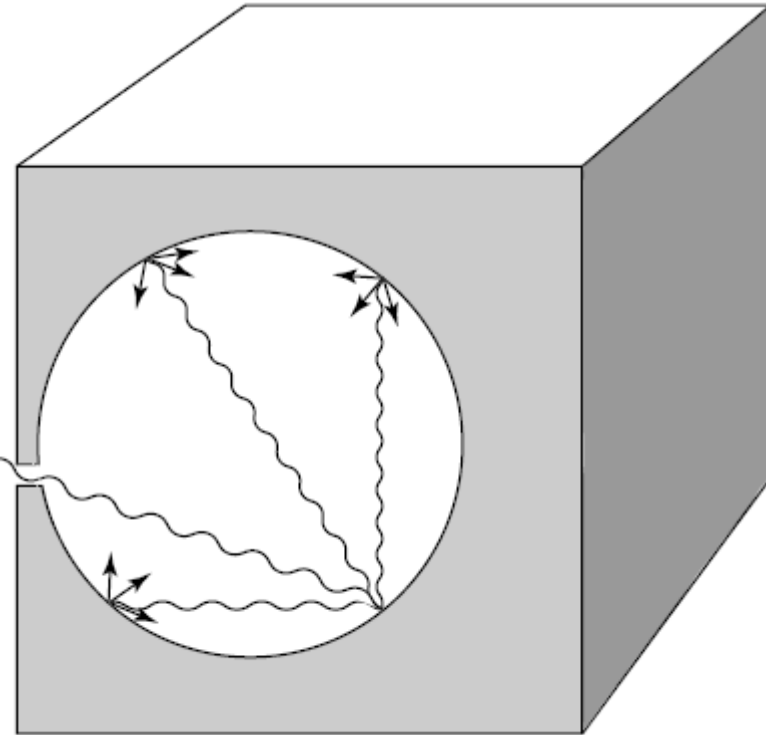


Radiación de “Cuerpo negro”

La luz queda atrapada (no se “ve”)

Es absorbida por las paredes y luego emitida

Absorción y emisión alcanzan equilibrio con la temperatura de las paredes (equilibrio termodinámico)



LGK 2011
Gustav Kirchhoff (1824-1887)

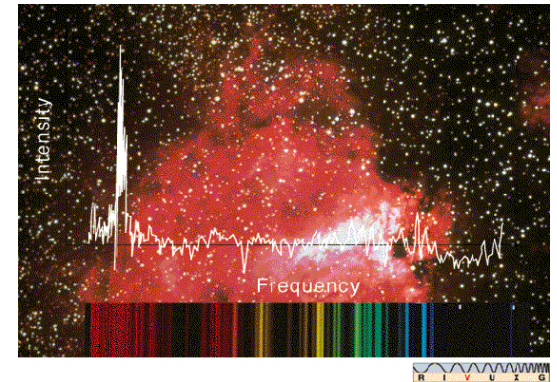
Kirchoff observó

$$\frac{E_{emitida}}{E_{absorbida}} = f(\lambda, T)$$

En un cuerpo negro:

$$\frac{E_{emitida}}{E_{absorbida}} = 1$$

- Un objeto sólido caliente produce luz en espectro continuo
- Un gas tenue produce luz con líneas espectrales en longitudes de onda discretas que dependen de la composición química del gas

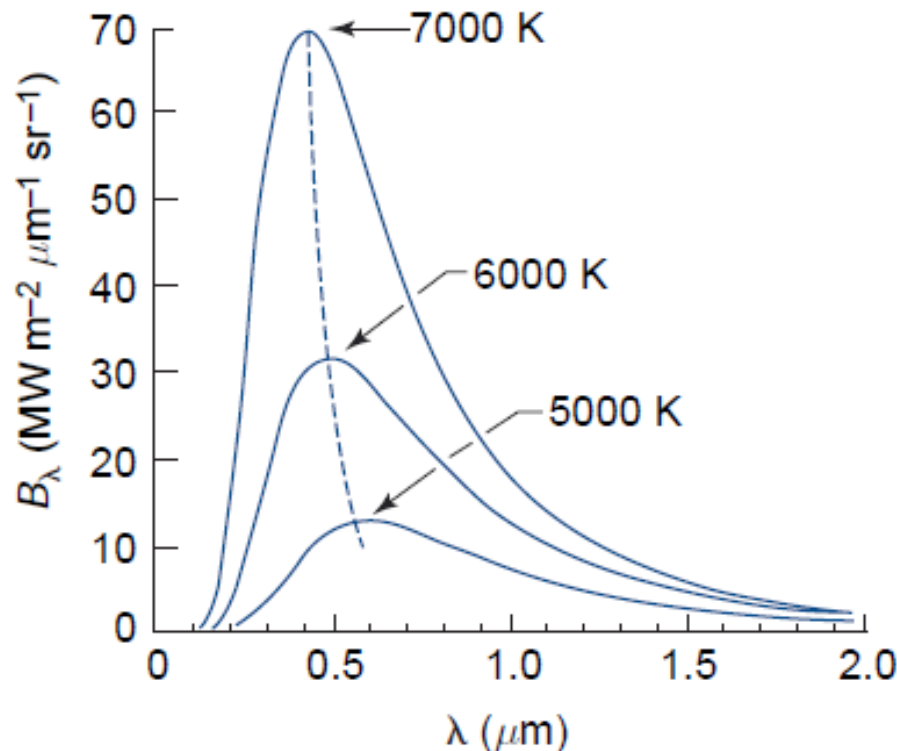


Función de Planck (~1901)



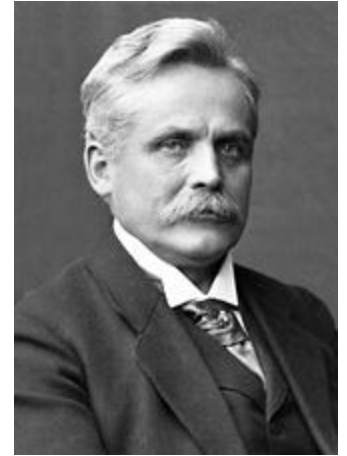
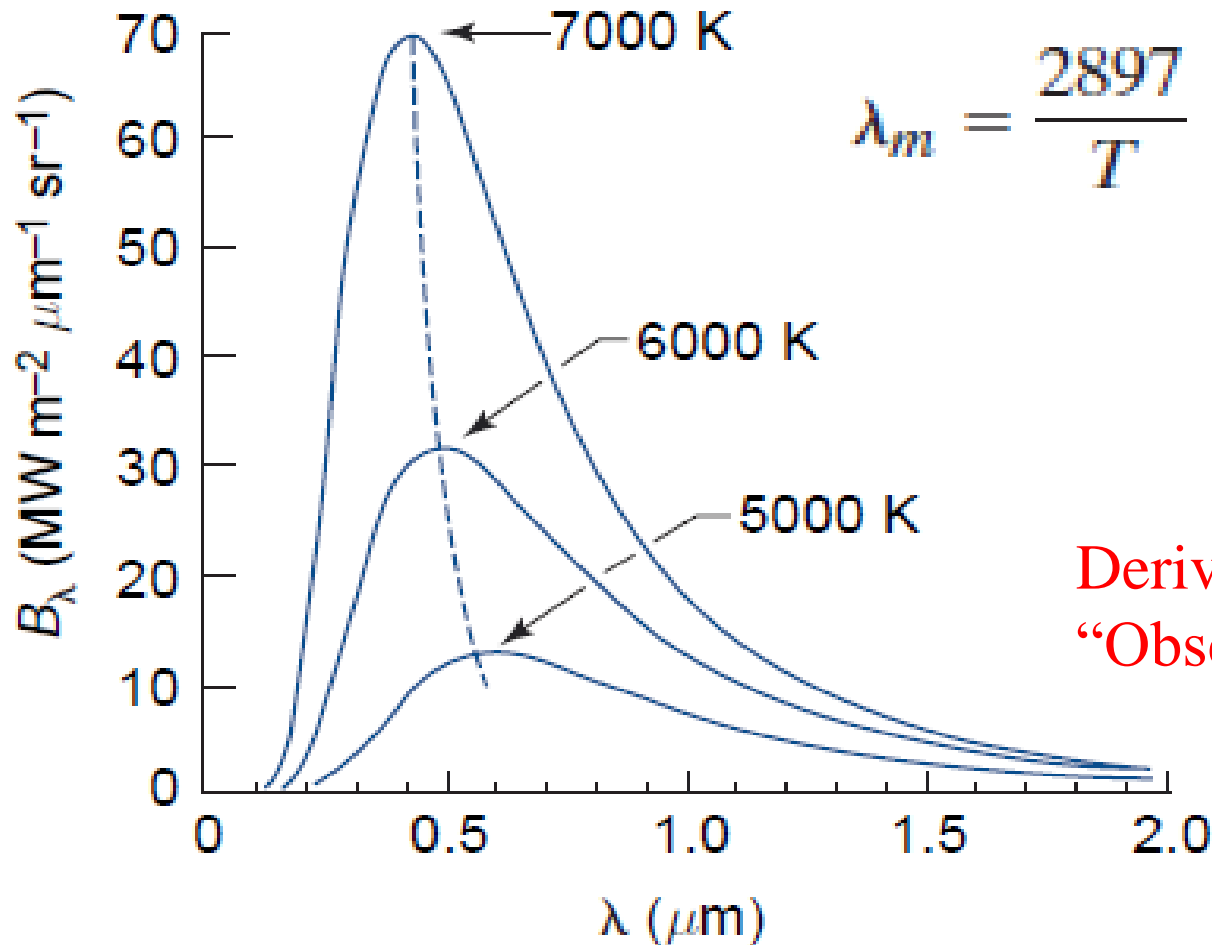
Las paredes del cuerpo negro están hechas de átomos que absorben/emiten en cuantas como osciladores electromagnéticos

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/K\lambda T} - 1)} = \frac{C_1\lambda^{-5}}{\pi(e^{C_2/\lambda T} - 1)},$$



Ley de Wien

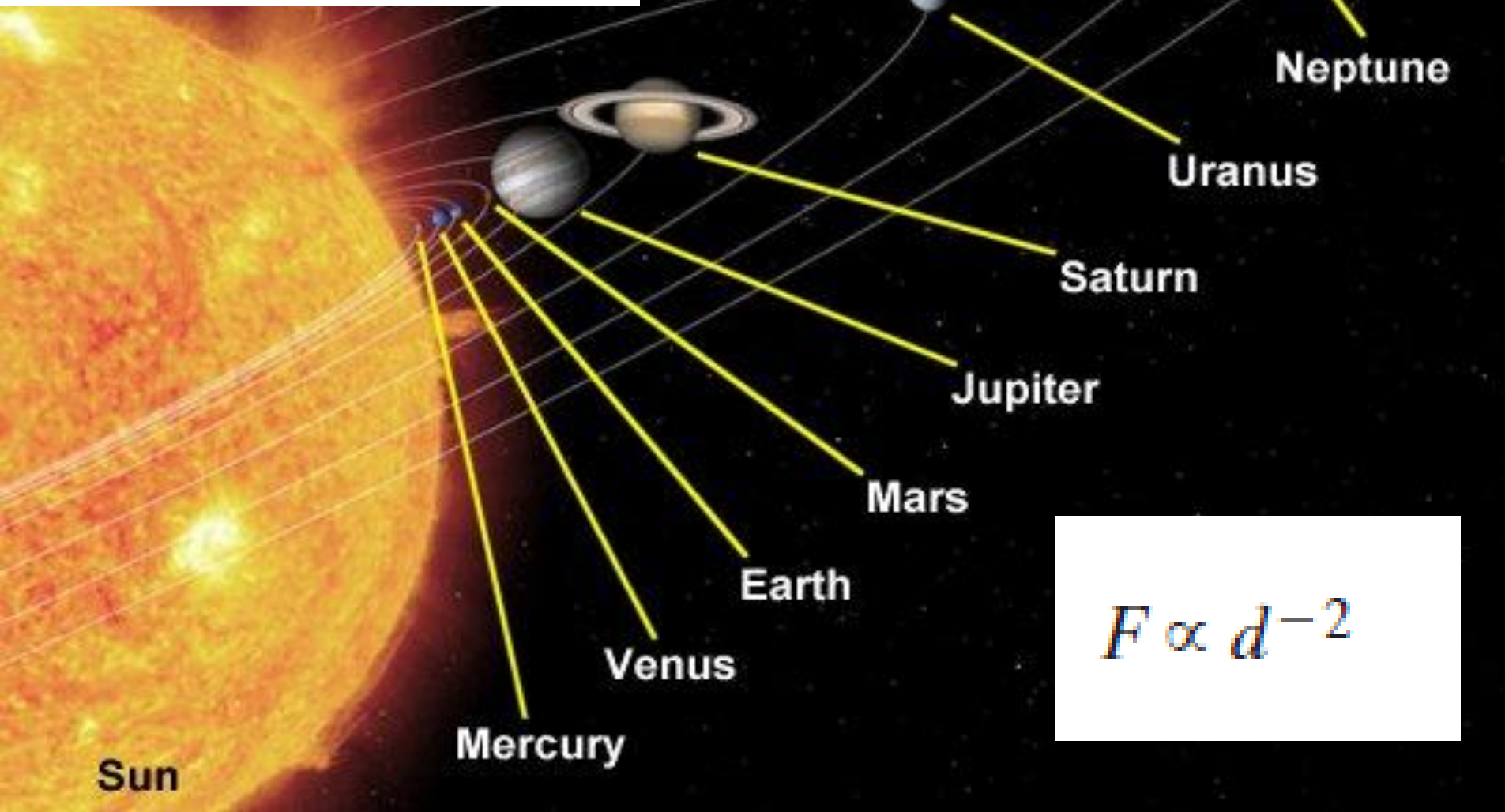
(λ del máximo de irradianza para T)



Derivada de función de Planck
“Observada” por Wien ~1893

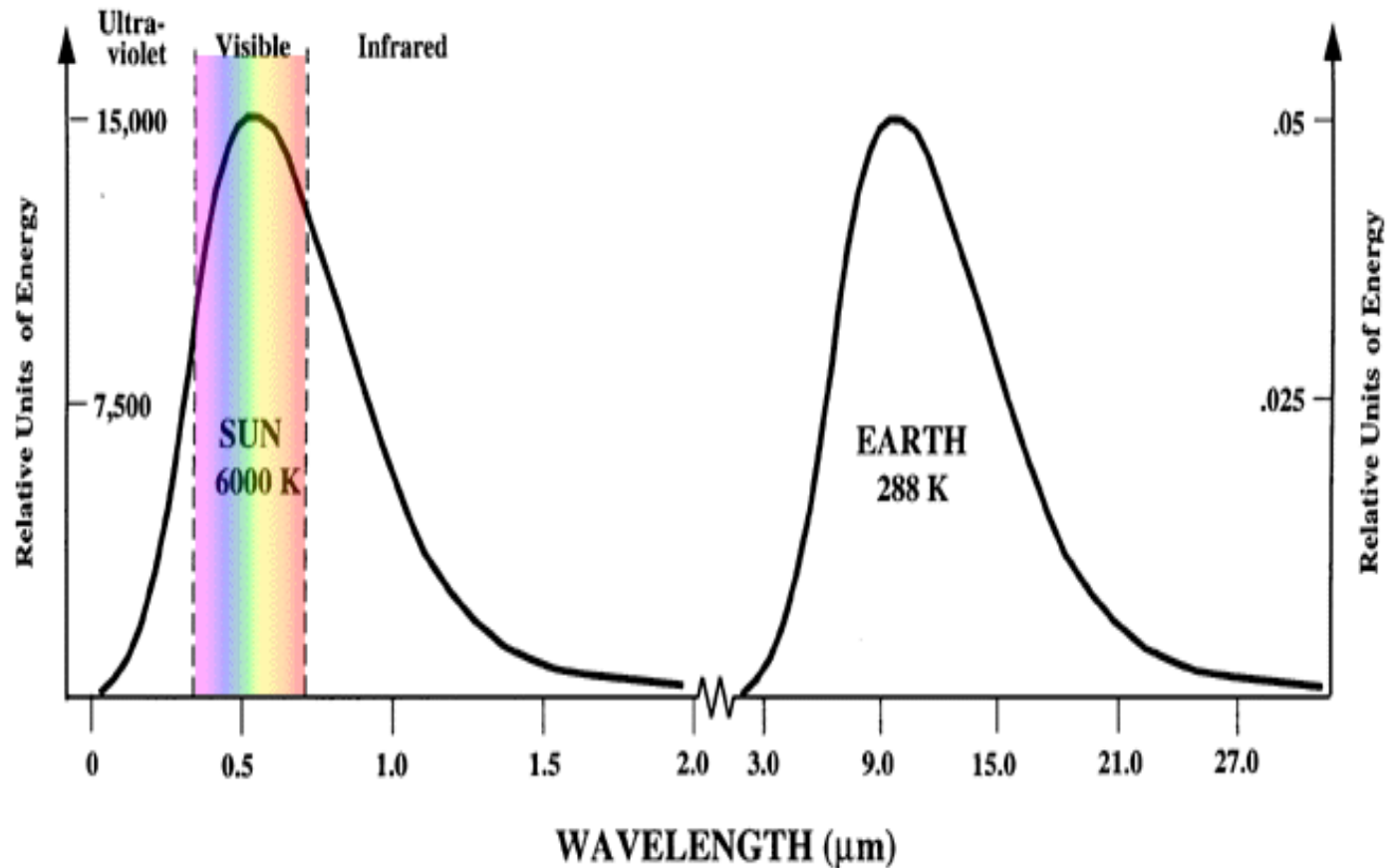
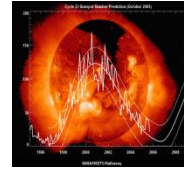
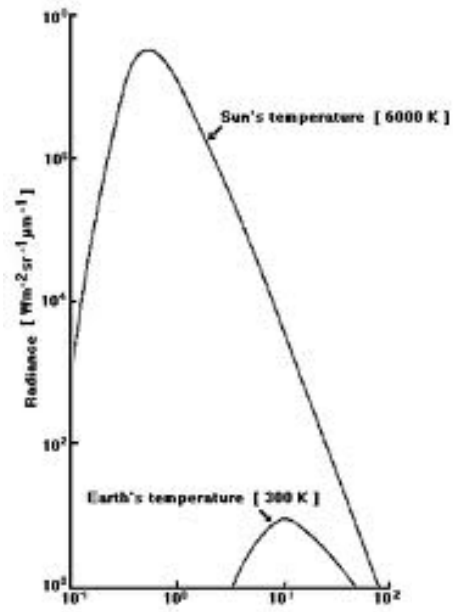
El flujo de fotones emanados del sol es \sim constante

$$E_s = F_s \times 4\pi d^2 = \text{const.}$$

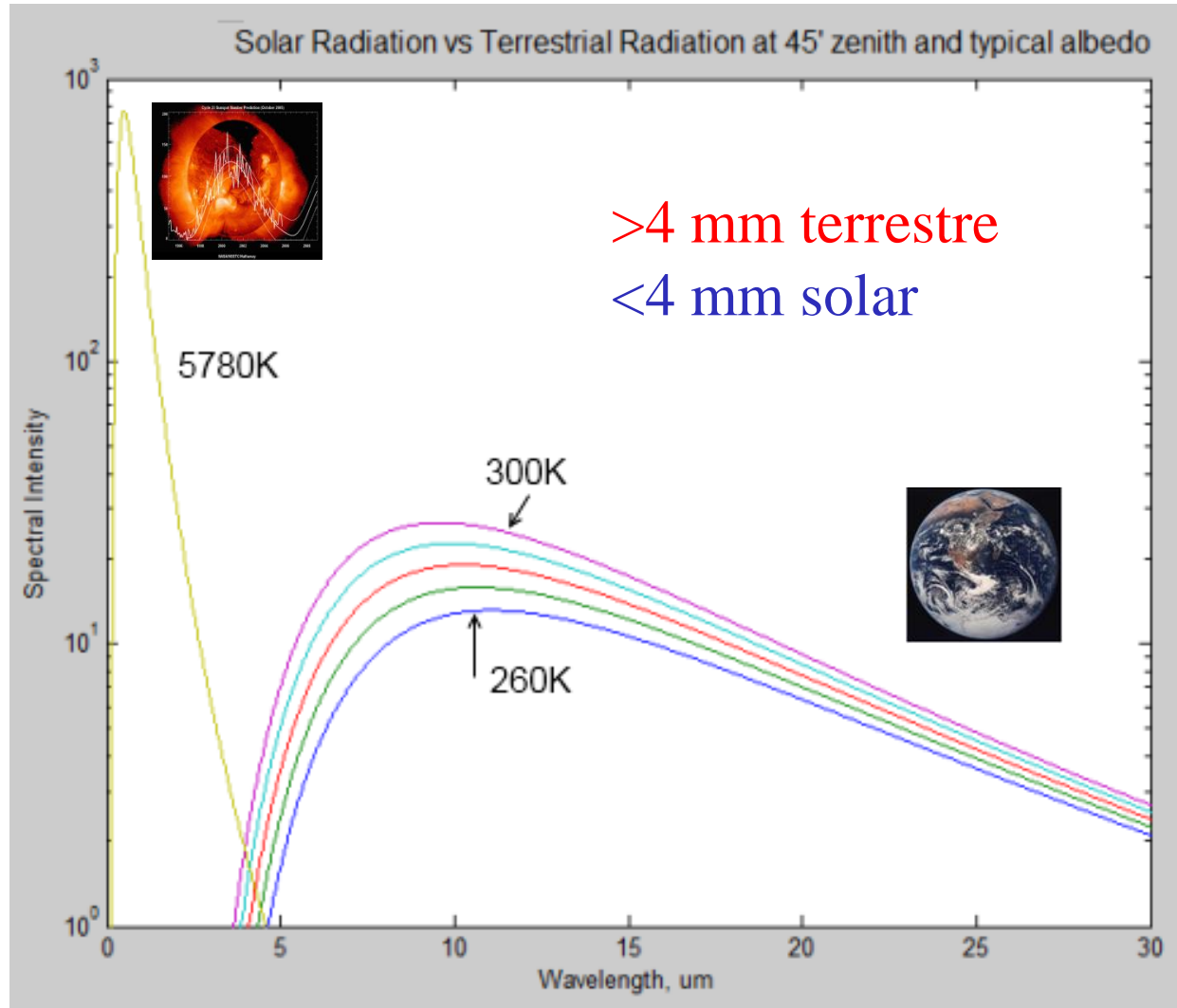


$$F \propto d^{-2}$$

El Sol y la Tierra como cuerpos negros

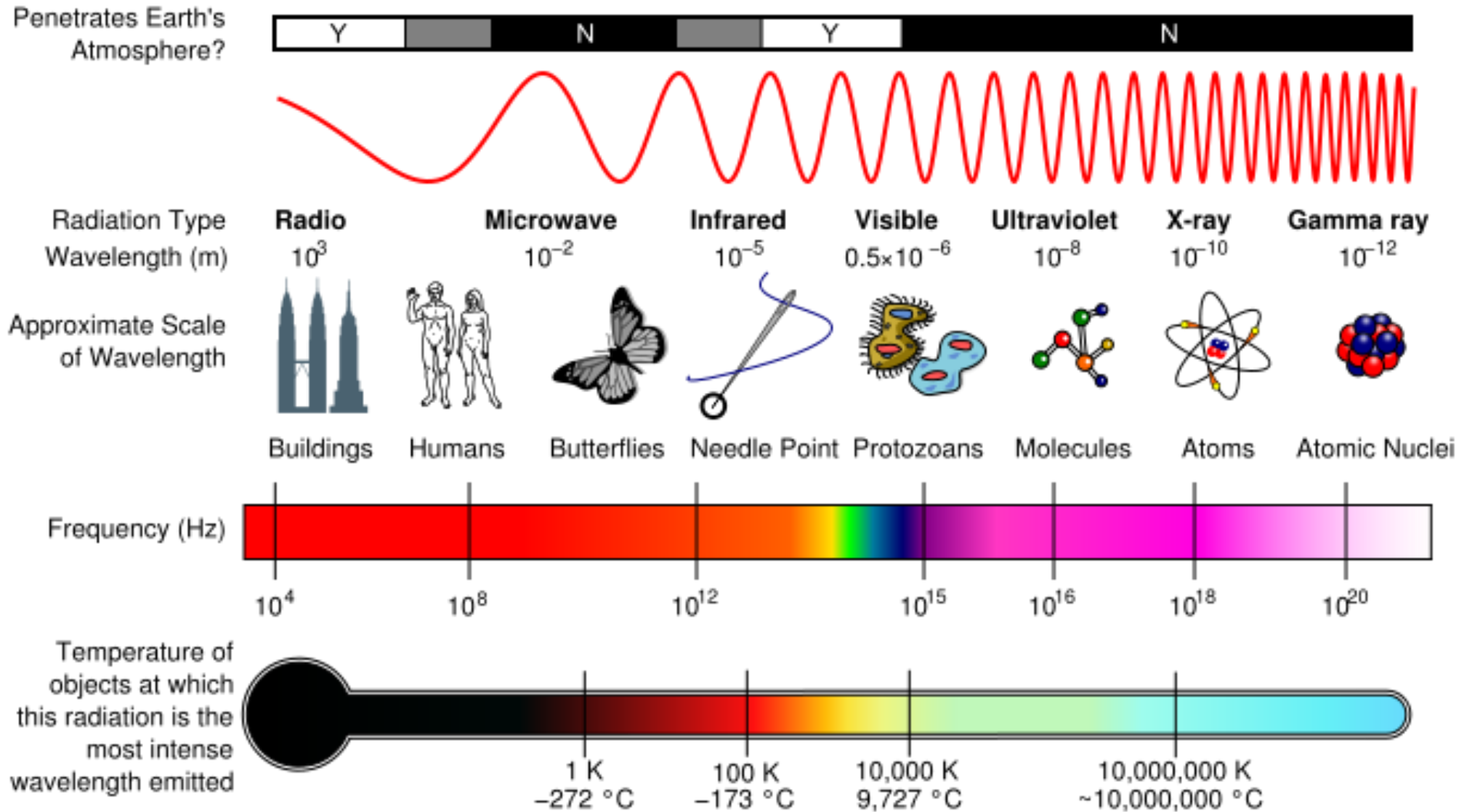


La radiación solar (“onda corta”) se traslapa “muy poco” con la readiación terrestre (“onda larga”)

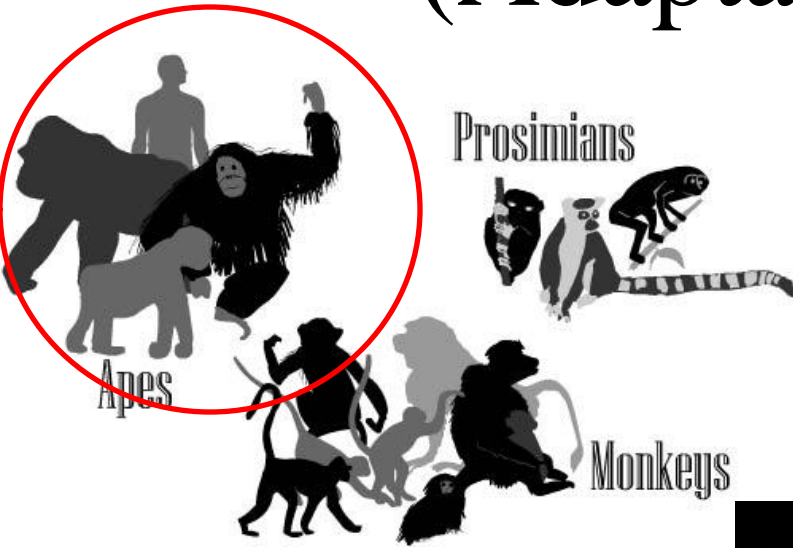


LGK 2011

Más sobre el espectro e-m



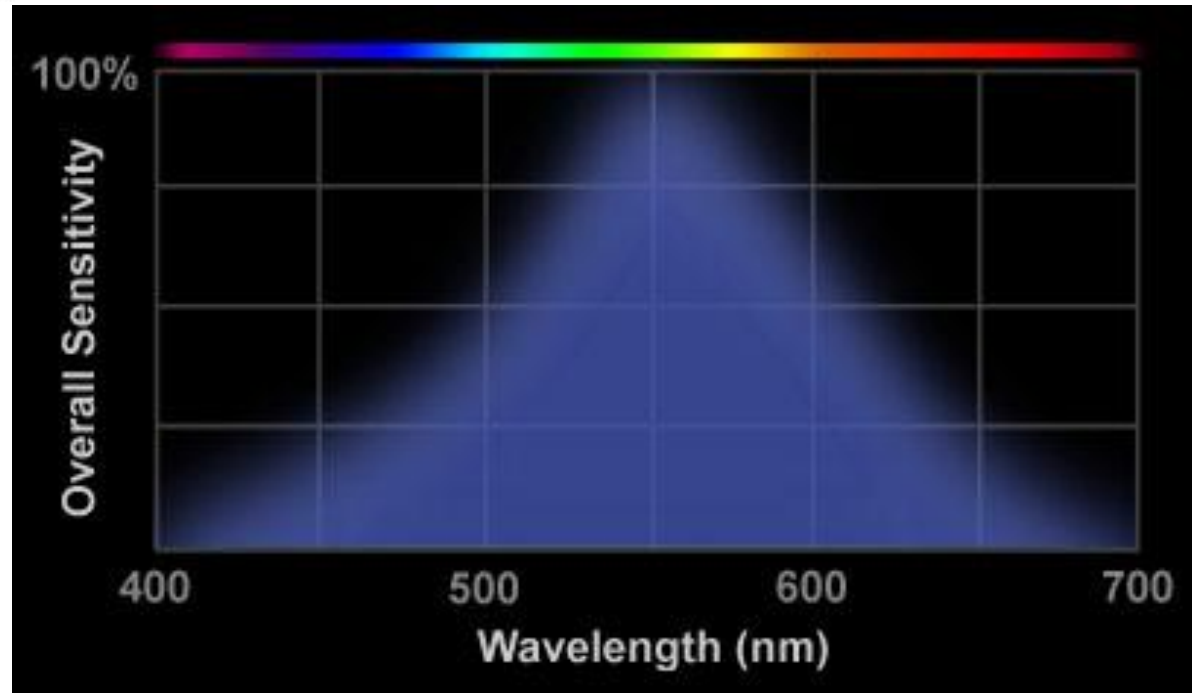
(Adaptación evolutiva)



Además, vemos en tres colores: verde, azul y rojo

La mayoría de los mamíferos ven en dos colores

Algunos reptiles ven en 4

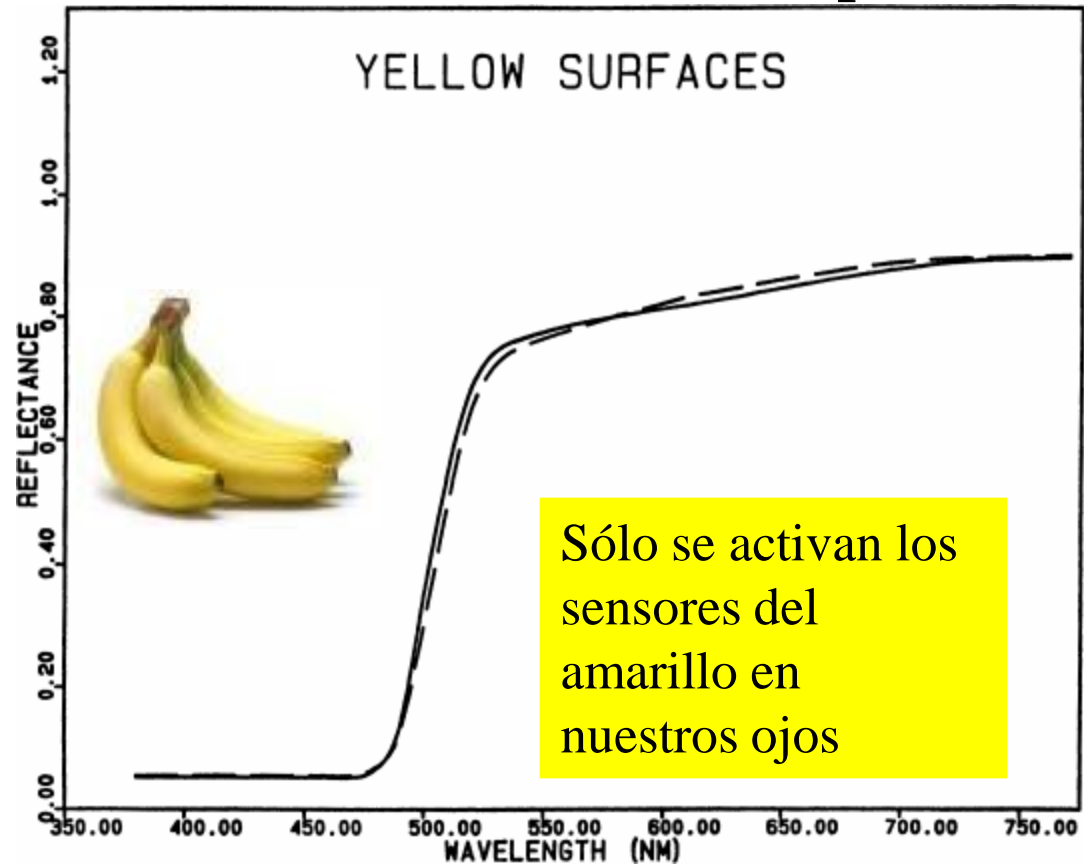


LGK 2011

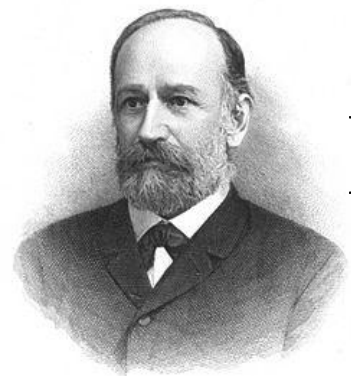
<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=evolution-of-primate-color-vision>

(Cómo vemos el color)

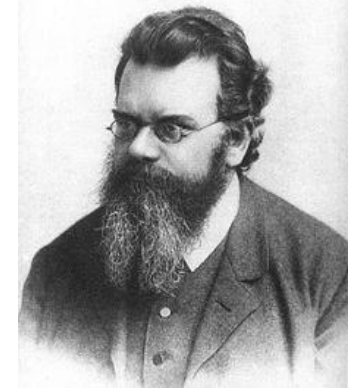
El color que **percibimos** depende de los sensores (retina) y del procesamiento de la señal en el cerebro: **no somos espectrómetros**



LGK 2011



Ley de Stefan-Boltzmann



Jožef Štefan (1835-1893)

Ludwig E. Boltzmann (1844-1906)

$$\int_{\lambda} B_{\lambda}(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad F = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2/\text{K}^4]$$

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 \hbar^3 c^2}$$
$$\sigma = 5.670400(40) \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

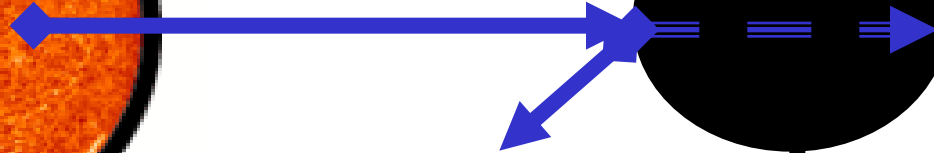
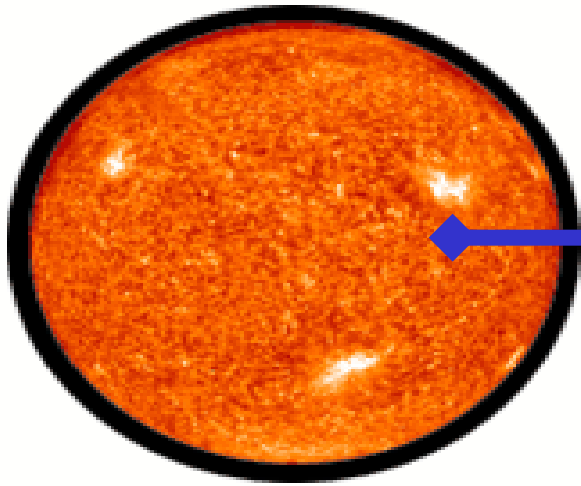
5 minutos



LGK 2010



El sol: nuestra fuente de energía ca. 1368 W/m^2



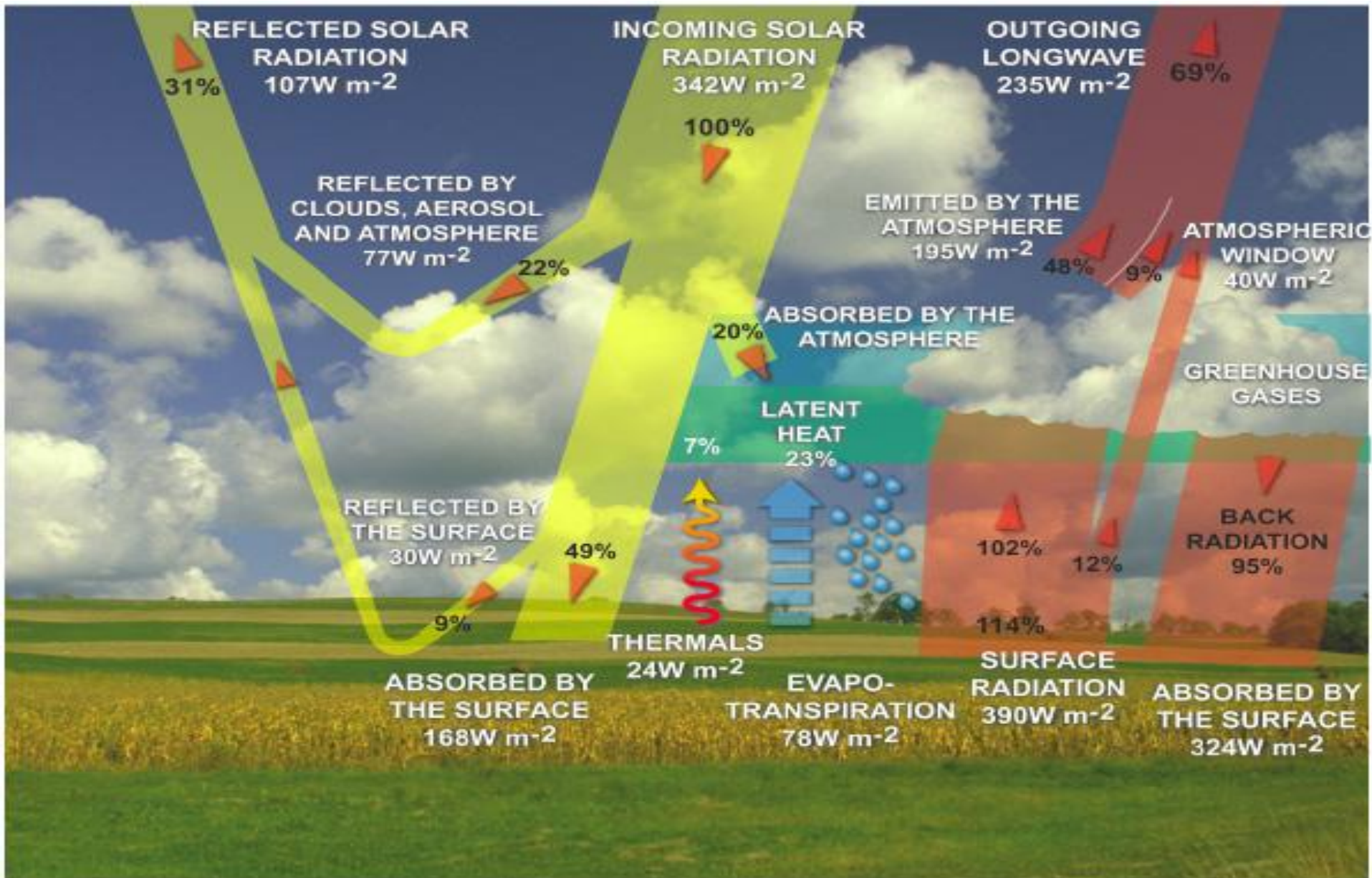
$$1368 \text{ (} Wm^{-2} \text{)}$$

$$\pi R^2$$

$$4\pi R^2$$

La energía solar (**ondas cortas**) es parcialmente reflejada y absorbida por la atmósfera pero en su mayoría calienta la superficie terrestre dando lugar a emisión térmica (**ondas largas**)

Balance radiativo



Balance radiativo sólo con albedo

$$E_{\text{entra}} = S(1 - \alpha)\pi R^2$$

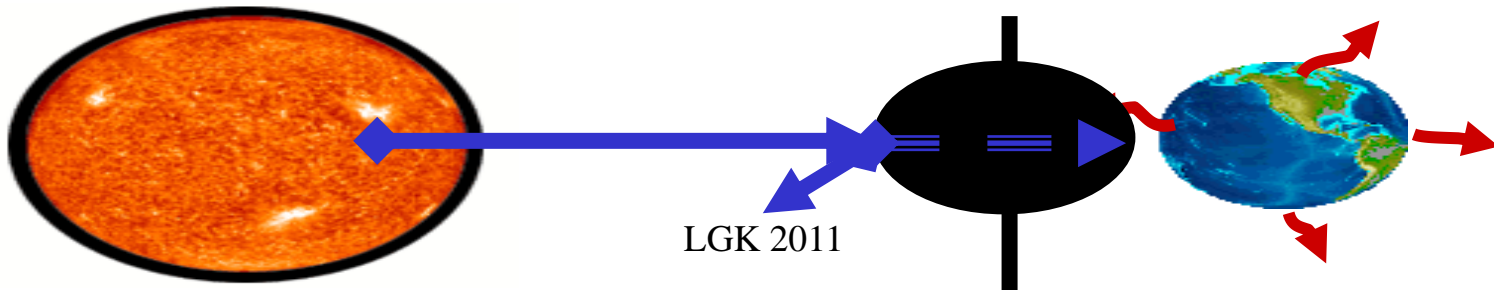
$$E_{\text{sale}} = \sigma T^4 4\pi R^2$$

$$E_{\text{entra}} = E_{\text{sale}}$$

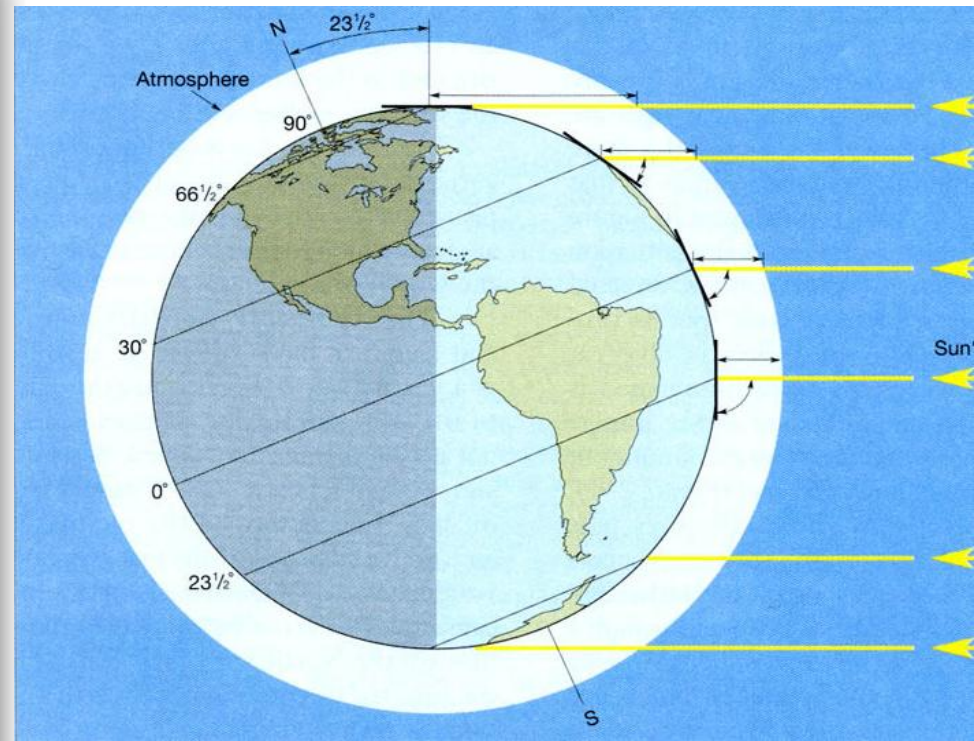
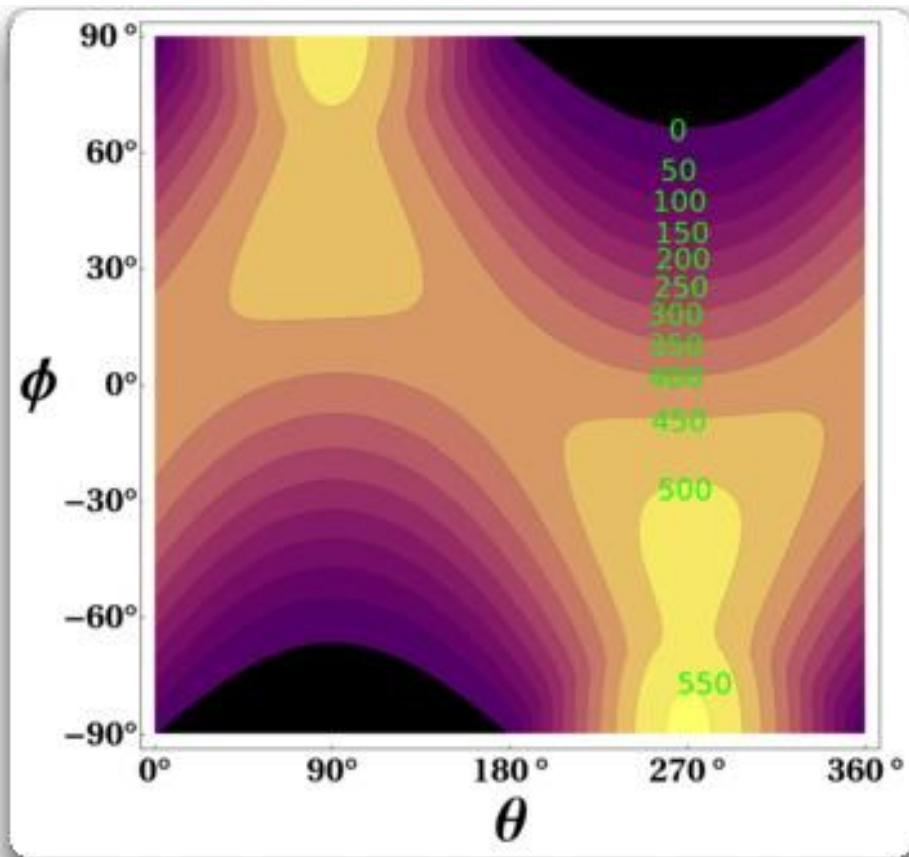
$$\Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{S(1 - \alpha)}{4\sigma}} \approx 255K$$

$$\alpha \approx 0.3$$

$$S \approx 1368 [W / m^2] = F / d^2$$



Lo anterior es un balance promedio sobre un año: varía según estación y latitud



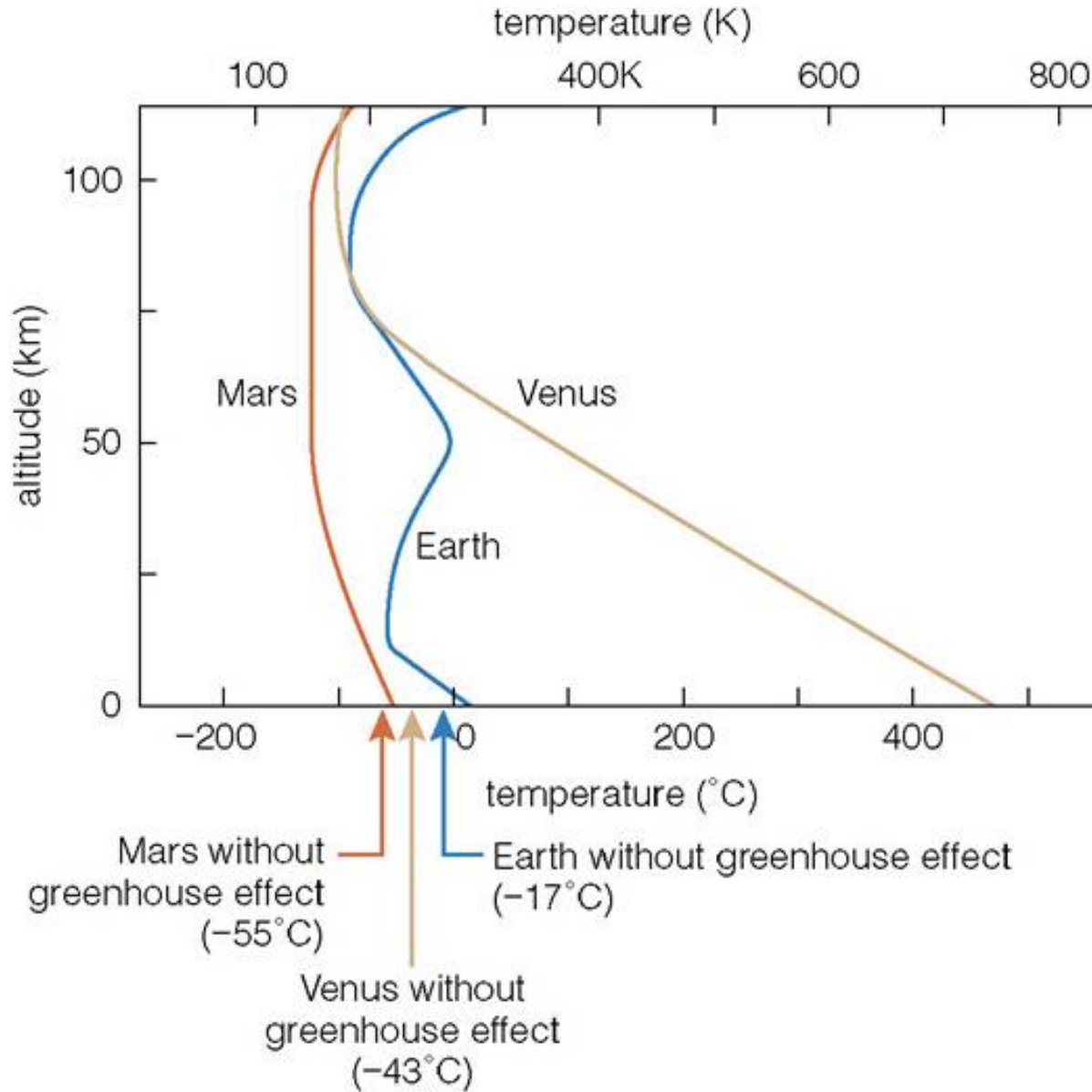
Calcular la temperatura radiativa equivalente suponiendo aprox. de cuerpo negro para:

	d (UA)	albedo	Teq(K) CN	Tsup(K) "Real"
Venus	0.72	0.77	227	230
Tierra	1.00	0.30	256	250
Marte	1.52	0.15	216	220
Júpiter	5.20	0.58	98	130

1. ¿Cuán buena es la aproximación de cuerpo negro? (Cuantifica)
2. ¿A qué podría deberse la discrepancia en el caso de Júpiter?

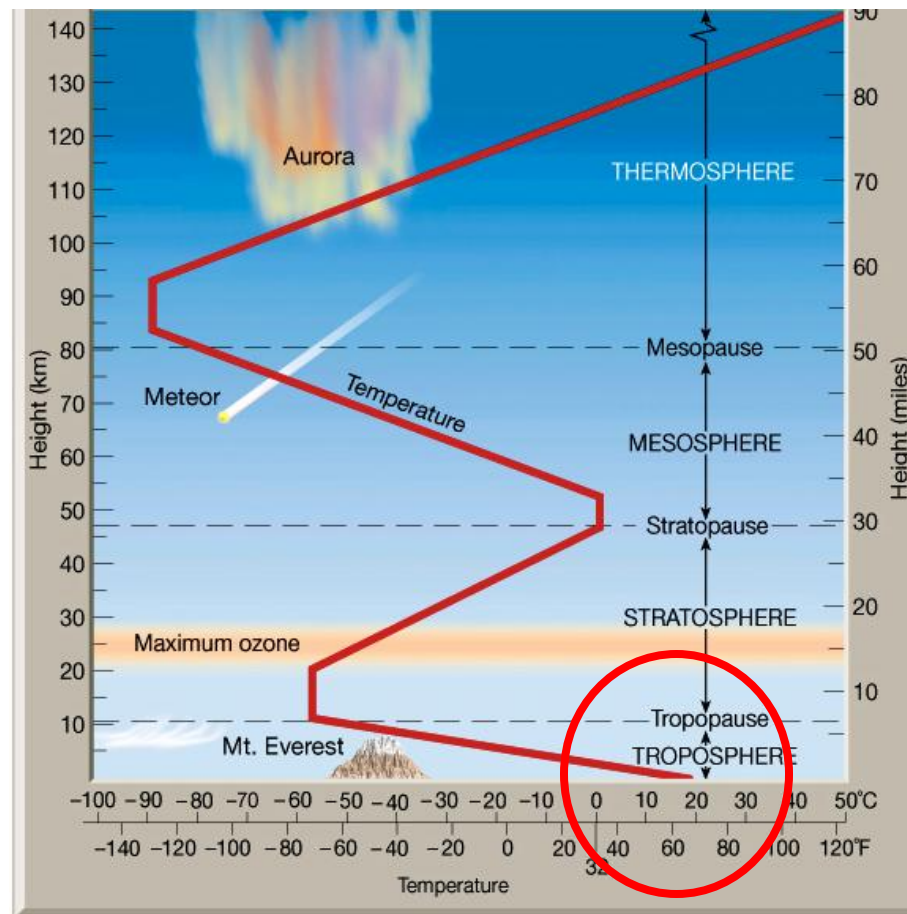
$$4\pi R^2 \sigma T_{eq}^4 = \frac{F}{d^2} (1 - \alpha) \pi R^2$$
$$\frac{F}{d^2} = 1368 \text{ W / m}^2 \text{ (Tierra)}$$

“Composition matters!!!”



¿Balance radiativo sólo con albedo?

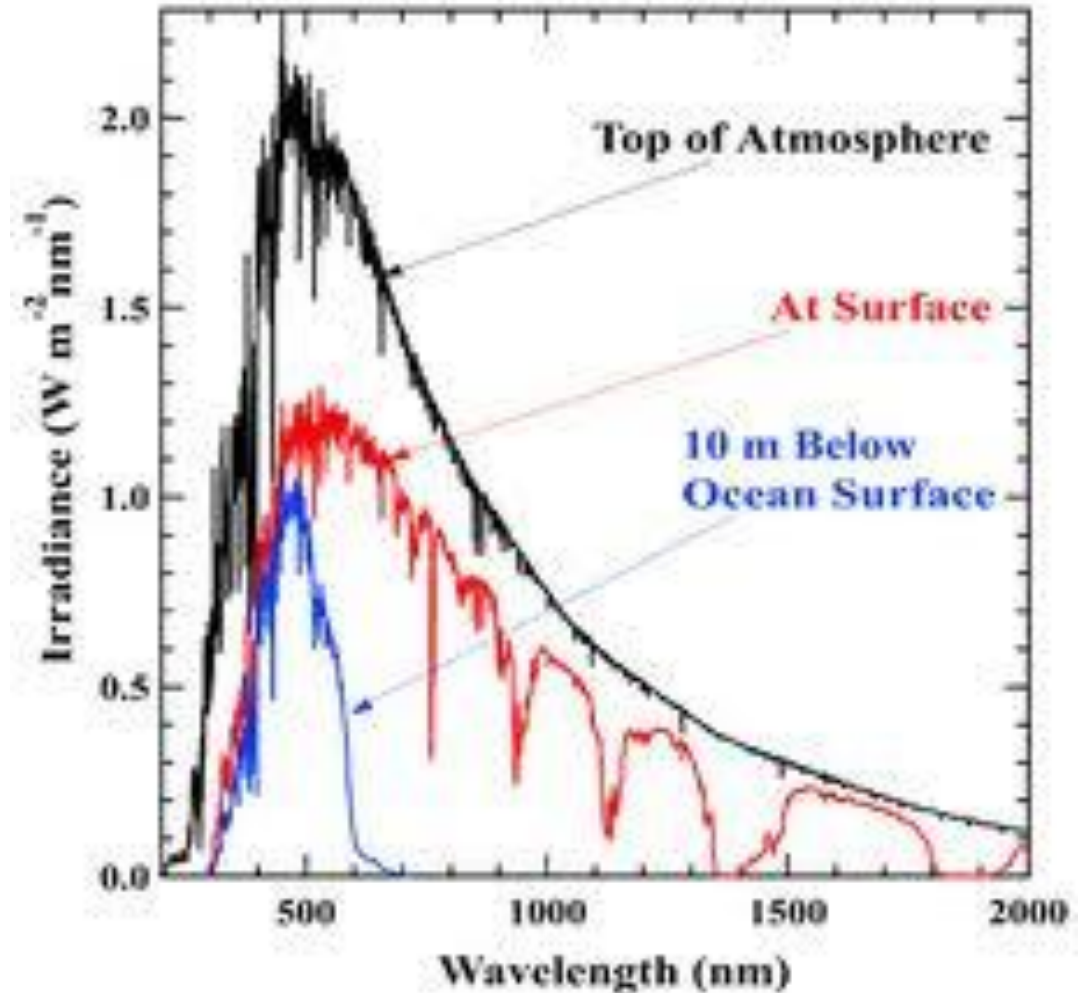
$$T = \sqrt[4]{\frac{S(1-\alpha)}{4\sigma}} \approx 255K = -18C$$



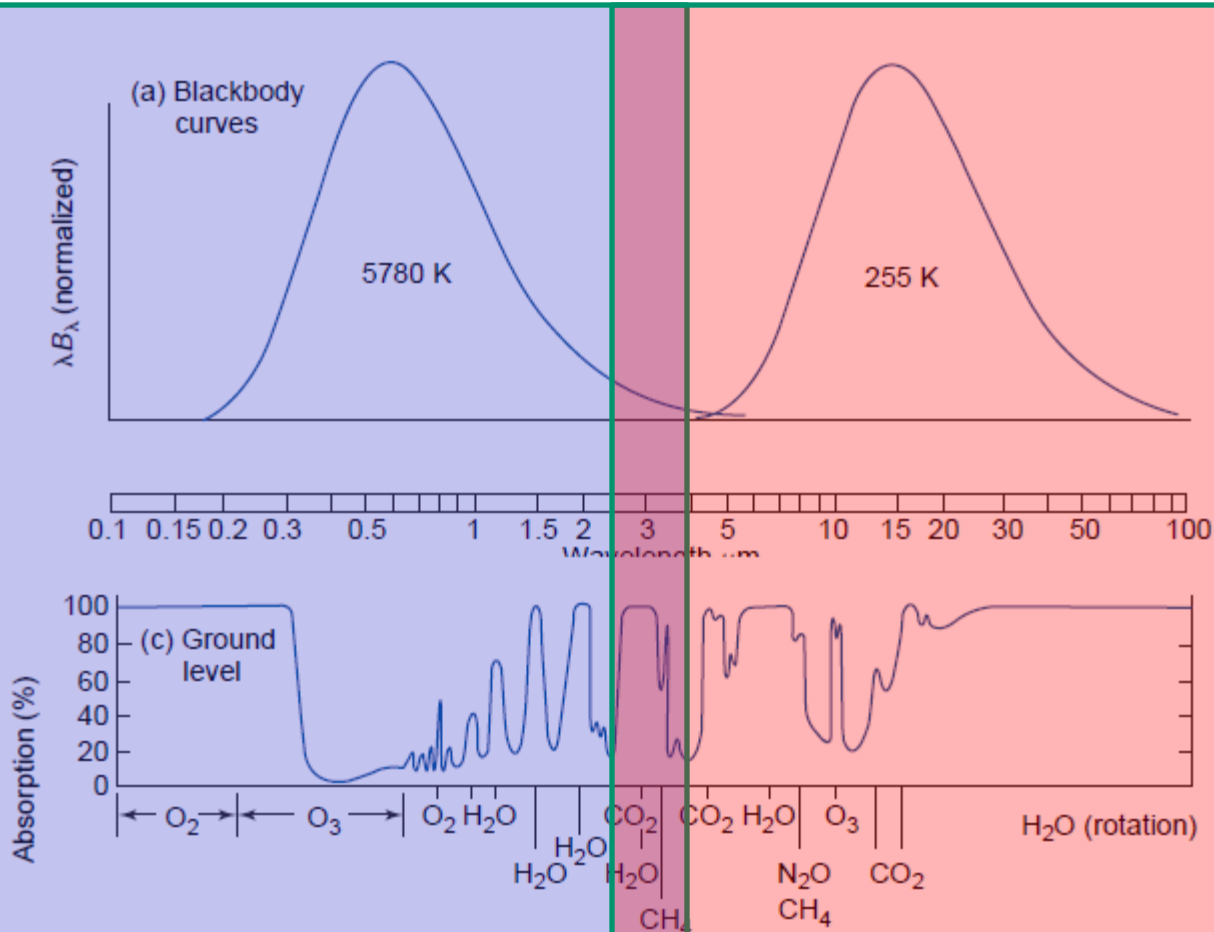
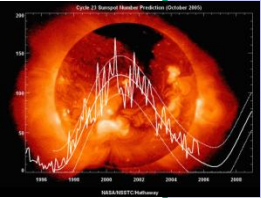
¡El albedo
no es el
único
parámetro!

Consideraciones para un mejor balance radiativo

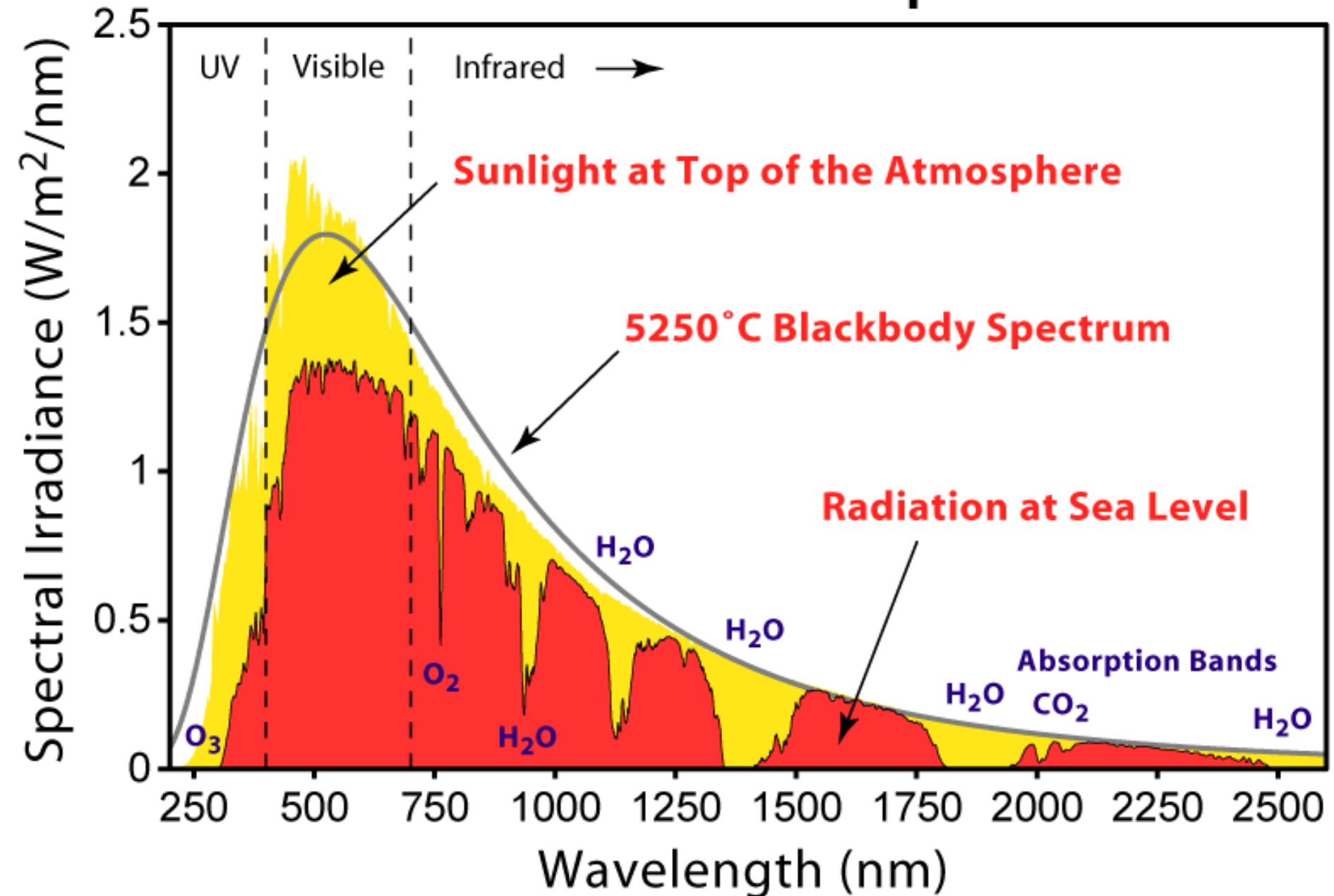
- La radiación solar no sigue del todo la función de Planck
- La atmósfera NO es transparente: ni a la radiación solar ni a la terrestre



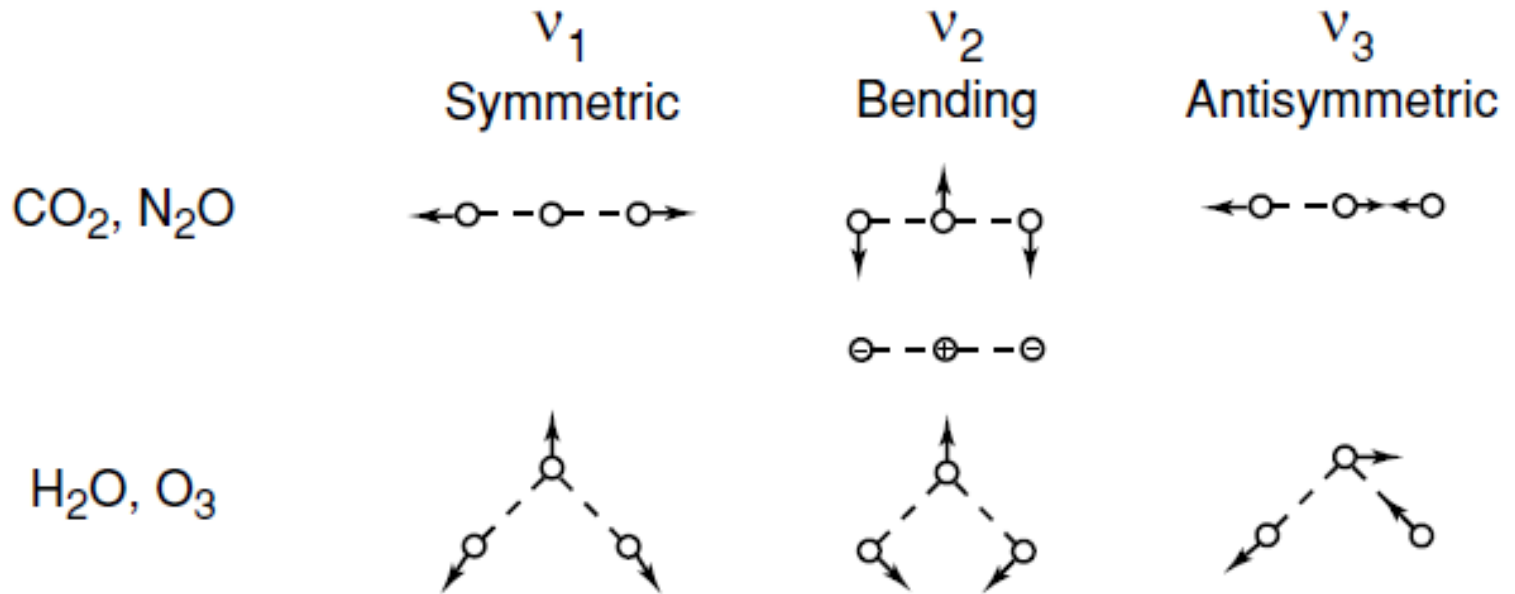
Radiación absorbida en la atmósfera



Solar Radiation Spectrum



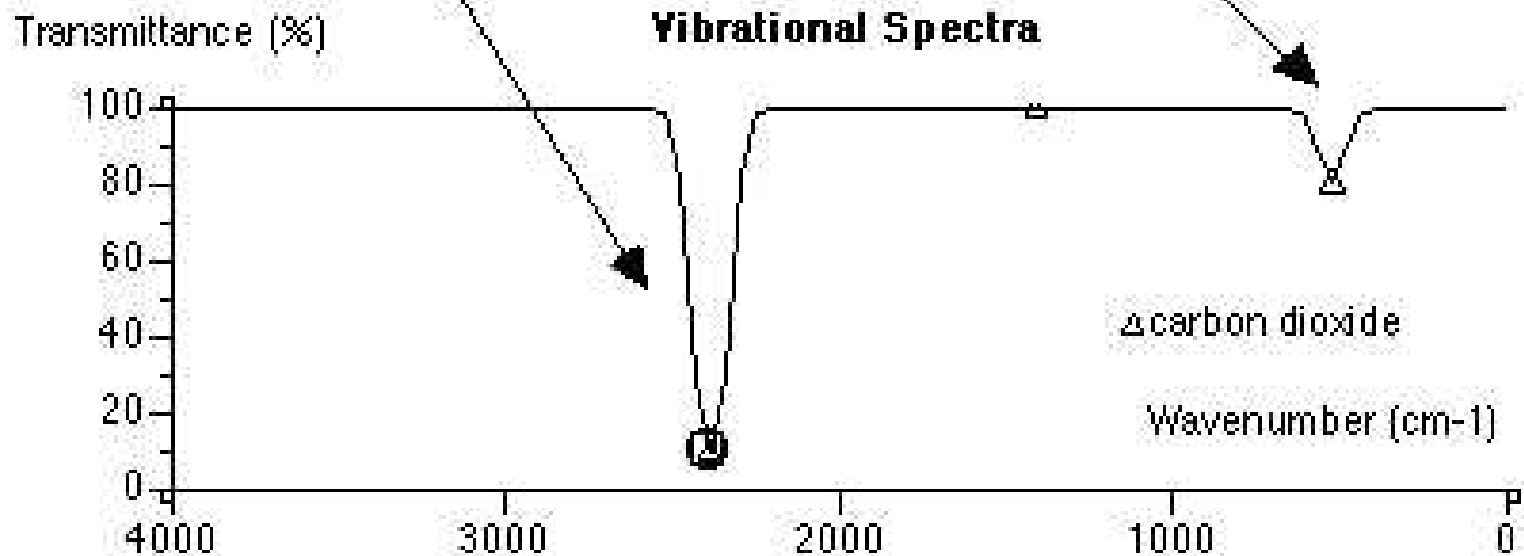
Absorción en el infra-rojo (gases de efecto invernadero)



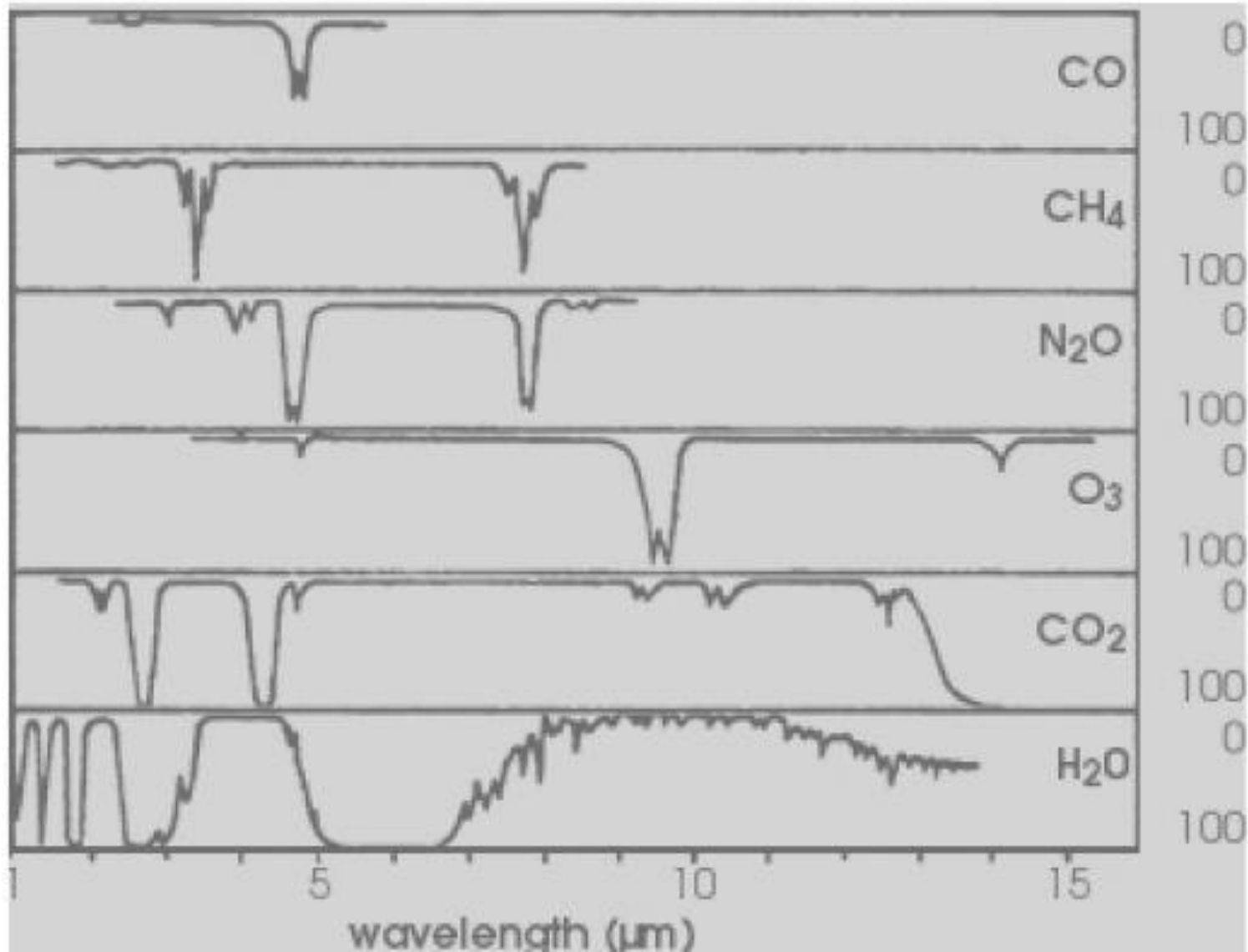
Modos de oscilación

Absorción por CO₂

Carbon Dioxide - Infrared Absorption



Absorción por gases de efecto invernadero (IR-visible cercano)

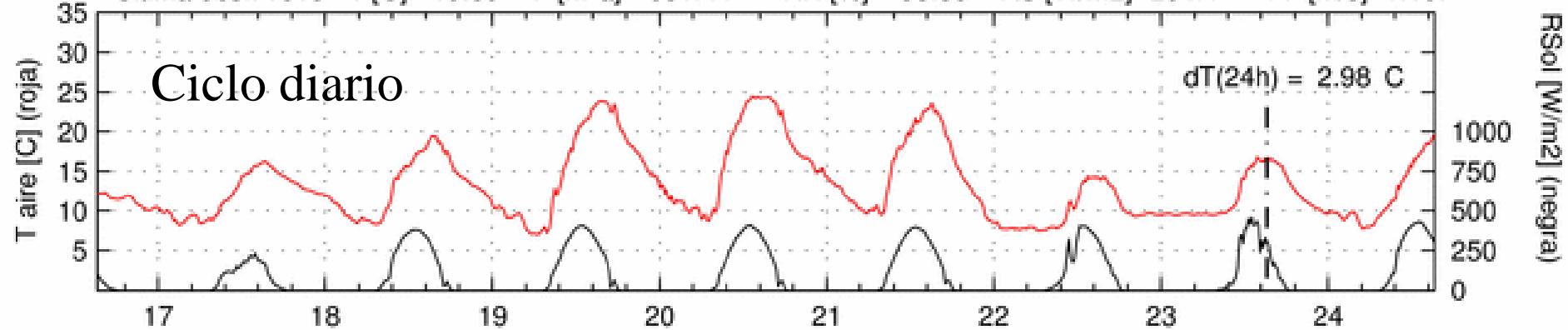




Laboratorio 1: Radiación

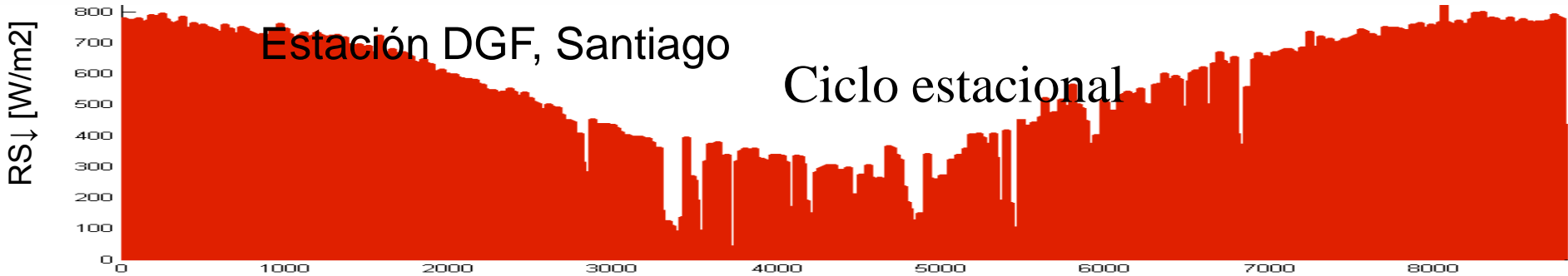
Martes 12 de Abril

Ultima obs.: 1615 T [C] = 19.59 P [hPa] = 951.44 RH [%] = 38.85 RS [W/m2] = 294.4 FF [m/s] = 1.197



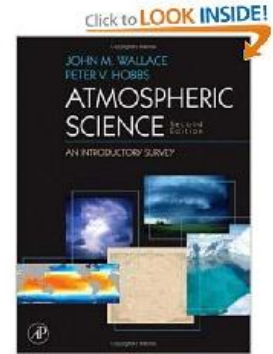
Estación DGF, Santiago

Ciclo estacional



Tiempo (año 2008)

Lecturas (1)



- Obligatoria
 - Wallace and Hobbs, Atmospheric Science
 - Ch. 1.: 1.3.1; 1.3.2; 1.3.4
 - Ch. 3.: 3.1, 3.2
 - Antropoceno (<http://www.mpch-mainz.mpg.de/~air/anthropocene/Text.html>)



- Opcional
 - Planetary atmospheres
(<http://lasp.colorado.edu/~bagenal/3720/index.html>)



- Más sobre química atmosférica GF3022
(Contaminación atmosférica)

Lecturas (2)

- Obligatoria
 - Wallace and Hobbs, Atmospheric Science (Ch. 4.: 4.2; 4.3)
- Opcional
 - <http://scienceofdoom.com/2010/06/01/the-sun-and-max-planck-agree/>
 - A Graduate-Level Online Module for Teaching Remote Sensing of Tropospheric NO² from Space...<http://pubs.acs.org/doi/pdfplus/10.1021/ed086p750>
- Más sobre transferencia radiativa
 - GF3004 (Sistema Climático)
 - GF500 (Física de la Atmósfera)

