

# Universidad Nacional de Río Negro

## Física Moderna A - 2017

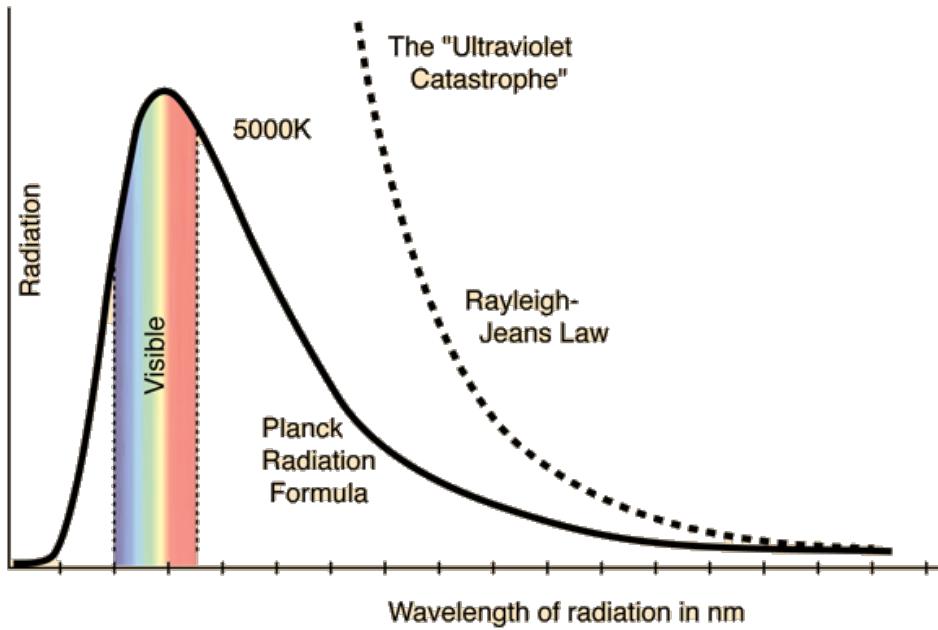
- **Unidad** 01 – La crisis del Siglo XX
- **Clase** 2/27 (U01C02) El cuerpo negro
- **Fecha** 14 Marzo 2017
- **Cont** Cuerpo negro
- **Cátedra** Asorey
- **Web**

<https://github.com/asoreyh/unrn-moderna-a>



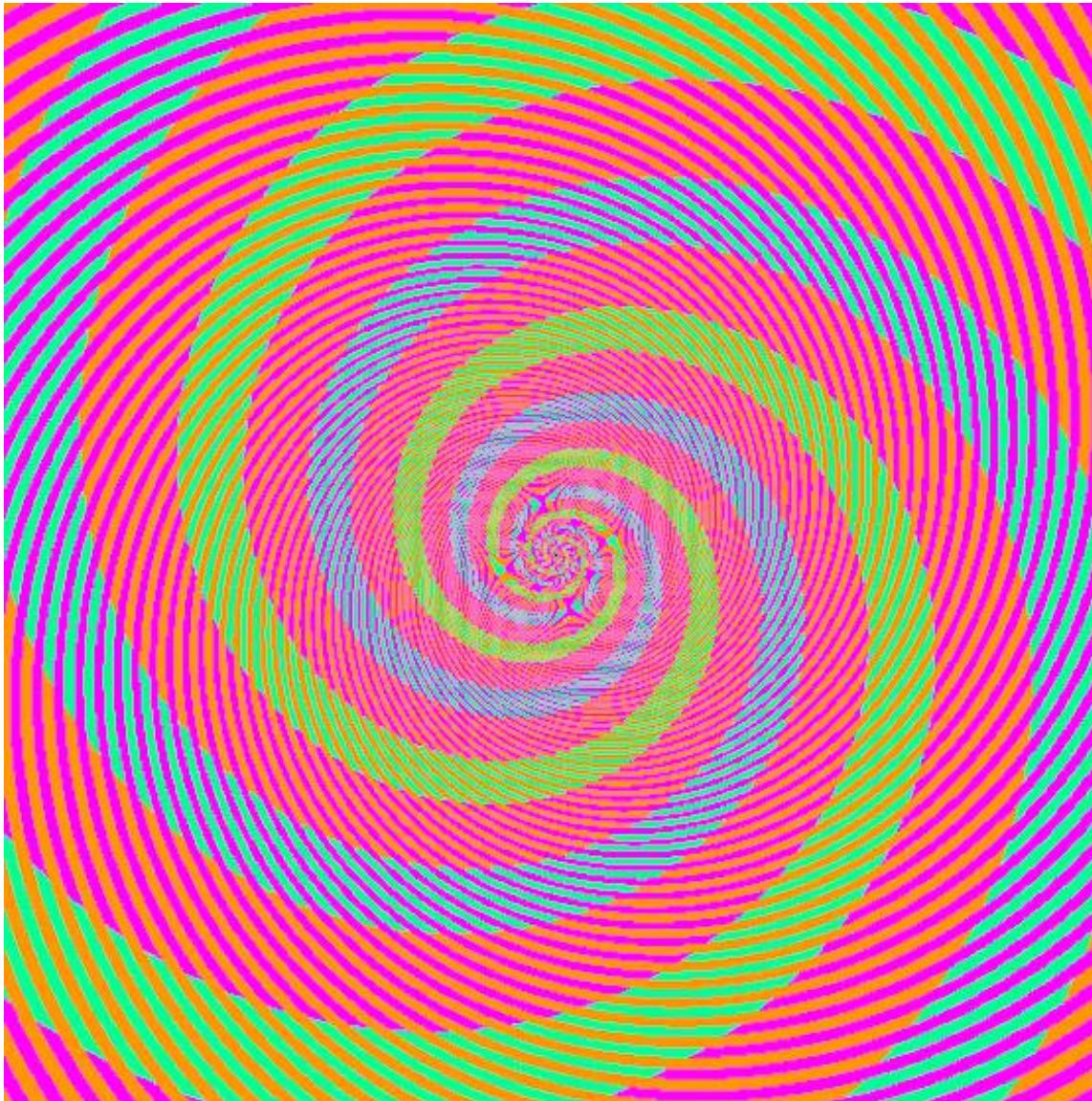
# Unidad 1: La crisis de principios del Siglo XX

## Martes 07 de Marzo al Jueves 16 de Marzo



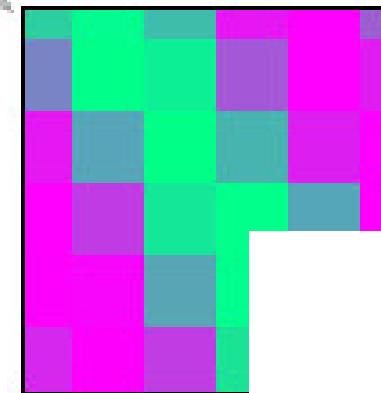
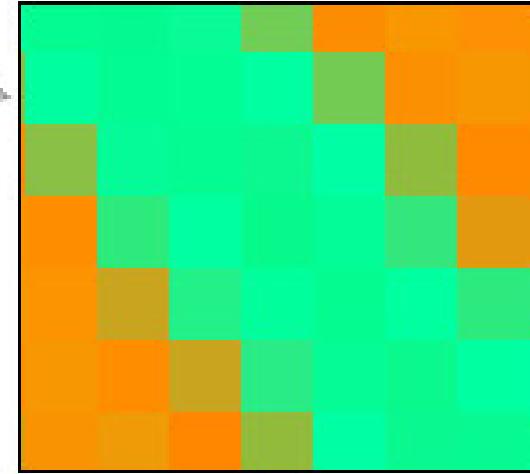
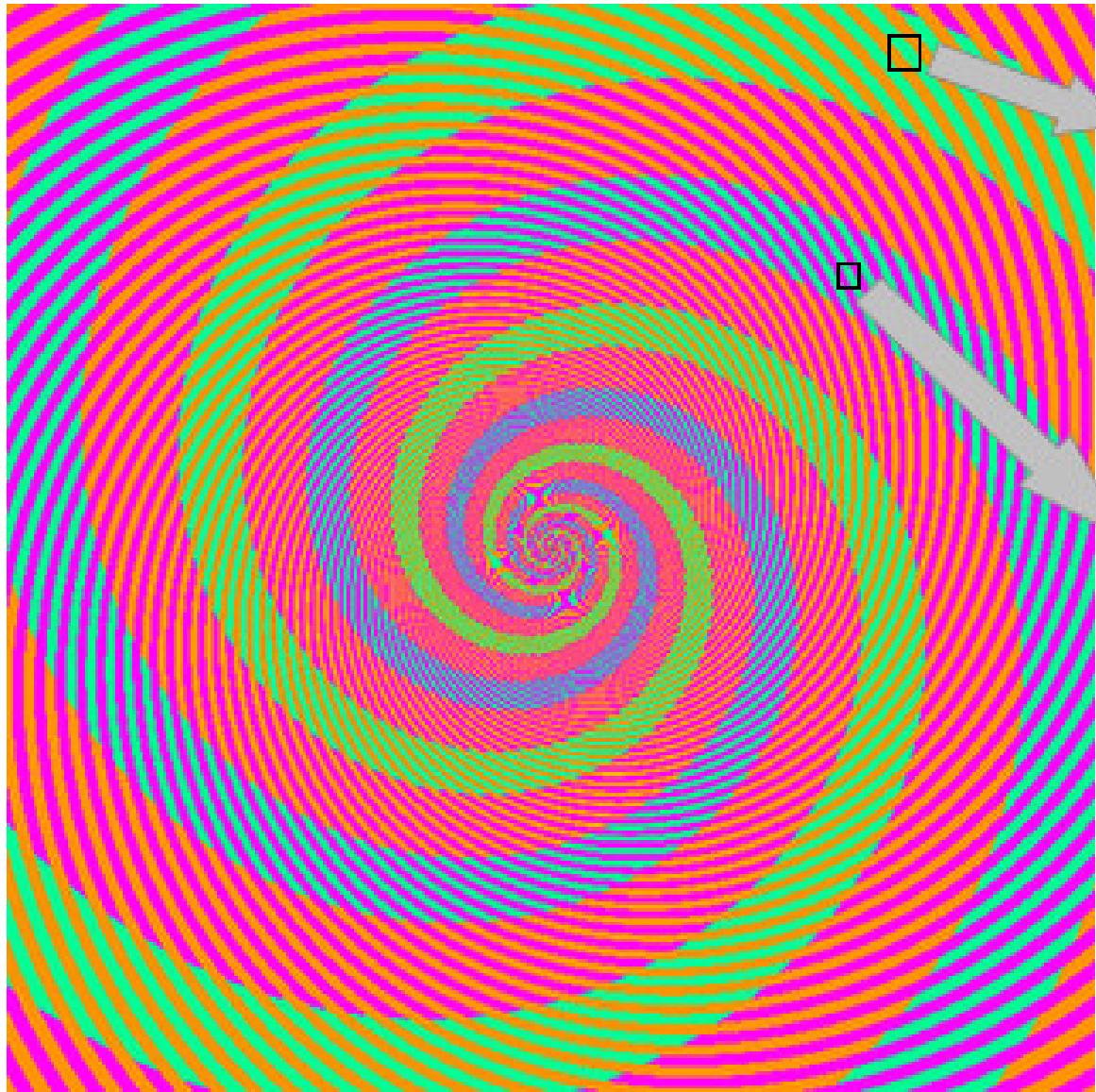
- **Introducción.** Nuestra comprensión, la interacción con el mundo y el gap sensorial. El cuerpo negro. Ejemplos y propiedades. Emisividad, reflectividad, absorcividad. La catástrofe del ultravioleta y la hipótesis de Planck. El campo electromagnético. El efecto fotoeléctrico y los fotones. Aportes de Albert Einstein. El efecto Compton.

¿seguros? ¿dé que color son estas espirales?

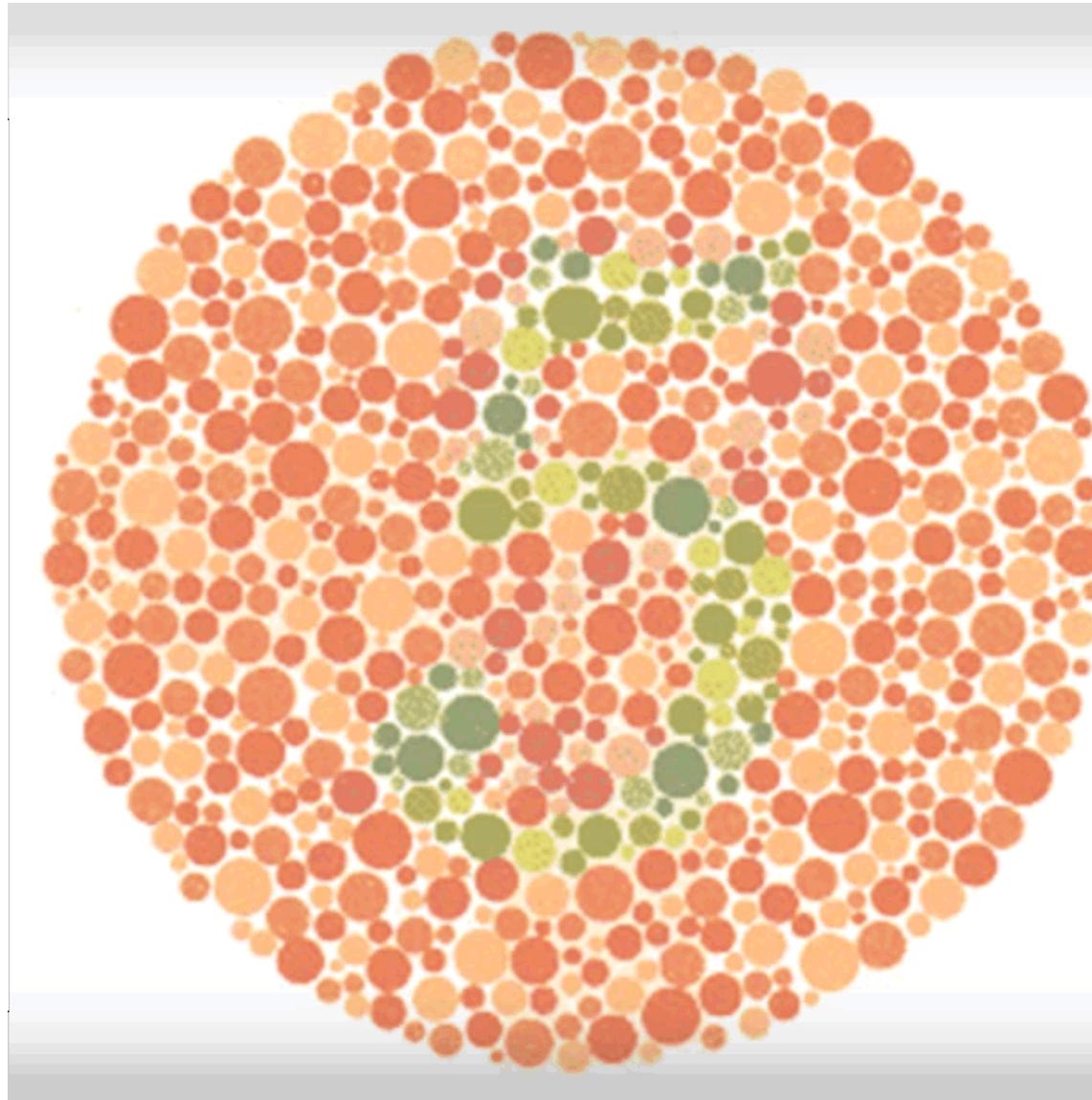




Creáme, era cierto



# Daltonismo

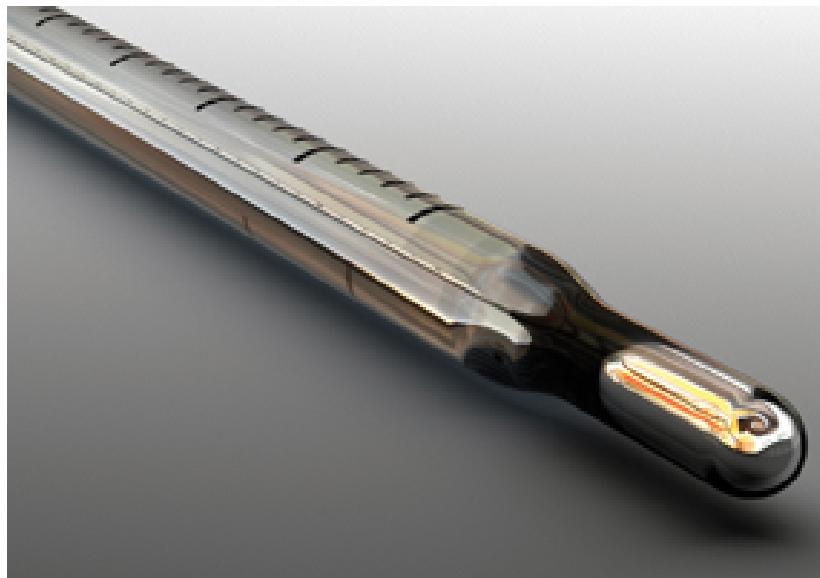




# Medir es interactuar

- ¿Cómo medimos la temperatura de alguien para saber si tiene fiebre?

# ¿cómo funcionan? Termómetros de mercurio, de contacto e infrarrojo



¿lo medirían de esta forma? ¿por qué?



# Imaginen el siguiente experimento mental



Hay un pájaro volando en una habitación.  
Necesito saber la posición y la velocidad del pájaro.  
¿Cómo lo averiguo?



# Imaginen el siguiente experimento mental

¿Y si apago la luz?

# Imaginen el siguiente experimento mental

Les doy una ayuda



Imaginen el siguiente experimento mental



Terminó nuestro experimento...





# Medir es interactuar...

- Pero ¿qué pasa cuando la interacción es “grande” respecto a lo que se quiere medir?
- ¿Y si no hay un método alternativo?
- Y si no podemos medir, ¿qué conocimiento podemos adquirir del sistema?



# Una crisis que produjo una revolución

- El Universo mecánico (hasta el Siglo XIX):  
*“Una inteligencia que en un instante dado supiera todas las fuerzas que actúan en la naturaleza y la posición de cada objeto en el universo - si estuviese dotada de un cerebro suficientemente vasto para hacer todos los cálculos necesarios - podría describir con una sola fórmula los movimientos de los mayores cuerpos astronómicos y los de los átomos más pequeños. Para tal inteligencia, nada sería incierto, el futuro, como el pasado, serían un libro abierto.”*

Pierre-Simon de Laplace



# Una crisis que produjo una revolución

- El Universo cuántico

*“En el mundo de lo muy pequeño, donde los aspectos corpusculares y ondulatorios son igual de significativos, las cosas no se comportan de ninguna forma que podamos entender a partir de nuestras experiencias diarias del mundo... todas las pinturas son falsas, y no existen analogías físicas que nos ayuden a comprender lo que pasa en el interior de los átomos. Los átomos se comportan como átomos, nada más”.*

John Gribbin

# El espectro electromagnético

- Radiación electromagnética → ondas electromagnéticas: oscilaciones acopladas del campo eléctrico y magnético
- El acoplamiento está dado por las Ec. de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

y

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\rightarrow c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299792458 \text{ m s}^{-1}$$

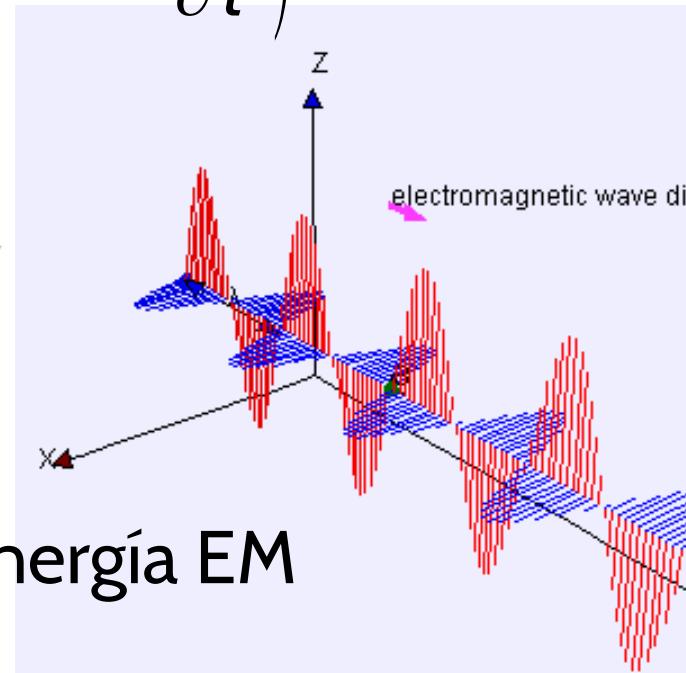
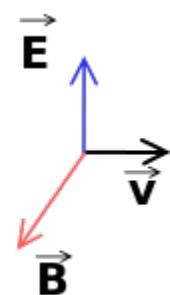
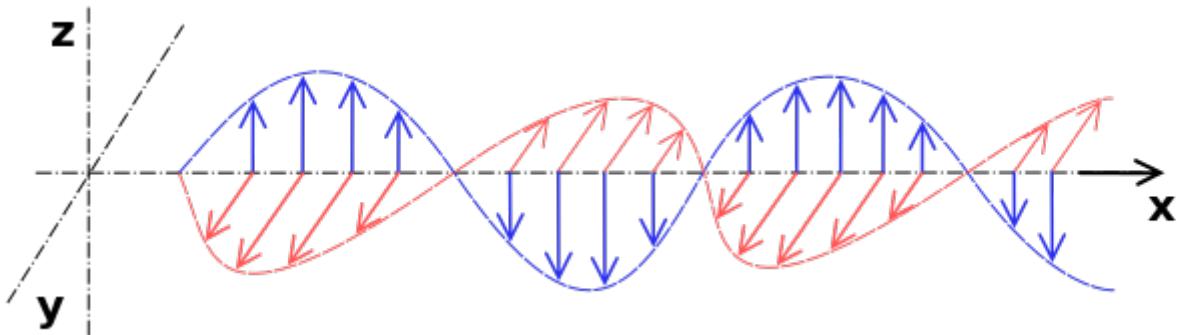
$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , permitividad del vacío

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs A}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , permeabilidad del vacío

# El espectro electromagnético

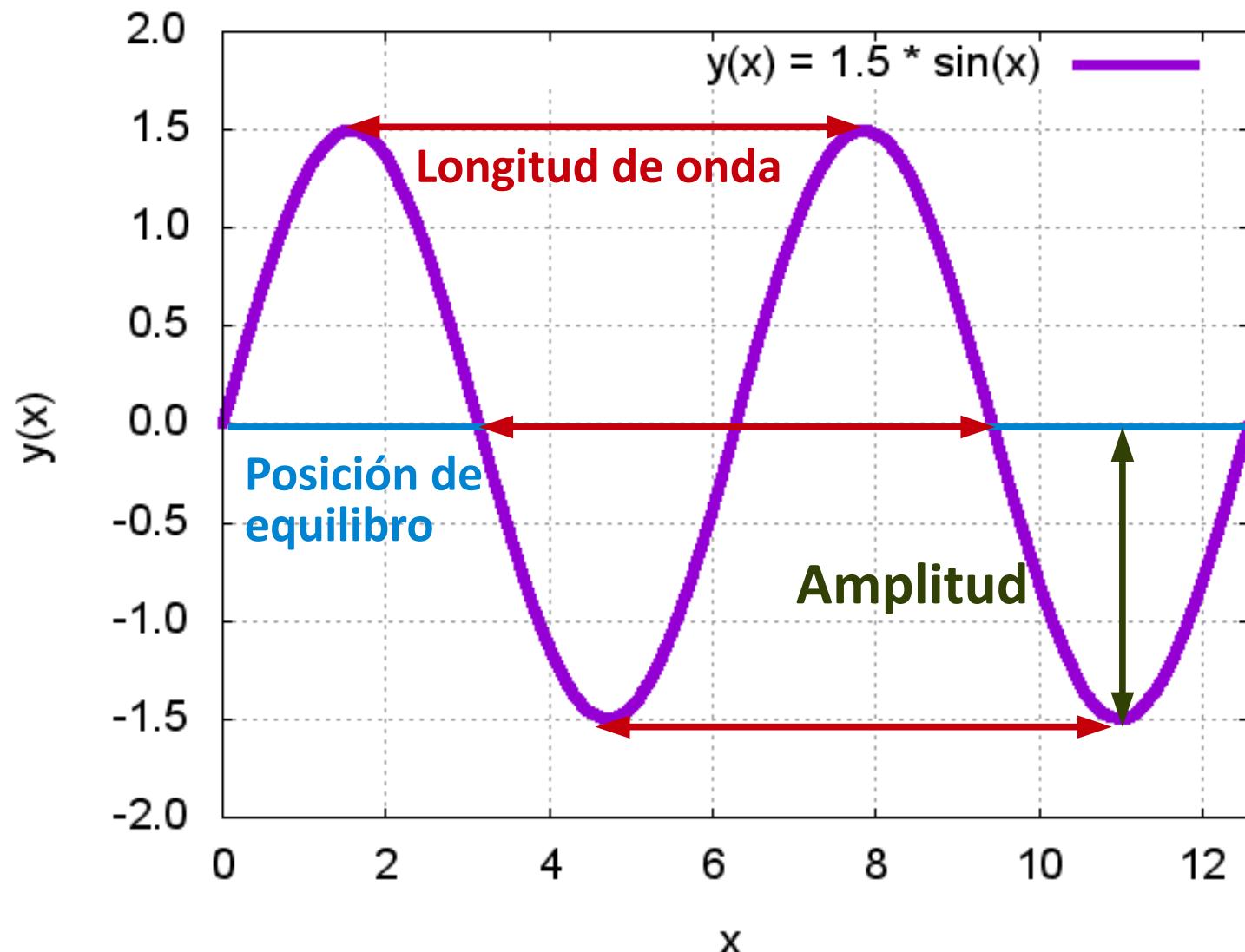
- Radiación electromagnética → ondas electromagnéticas: oscilaciones acopladas del campo eléctrico y magnético
- El acoplamiento está dado por las Ec. de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{y} \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

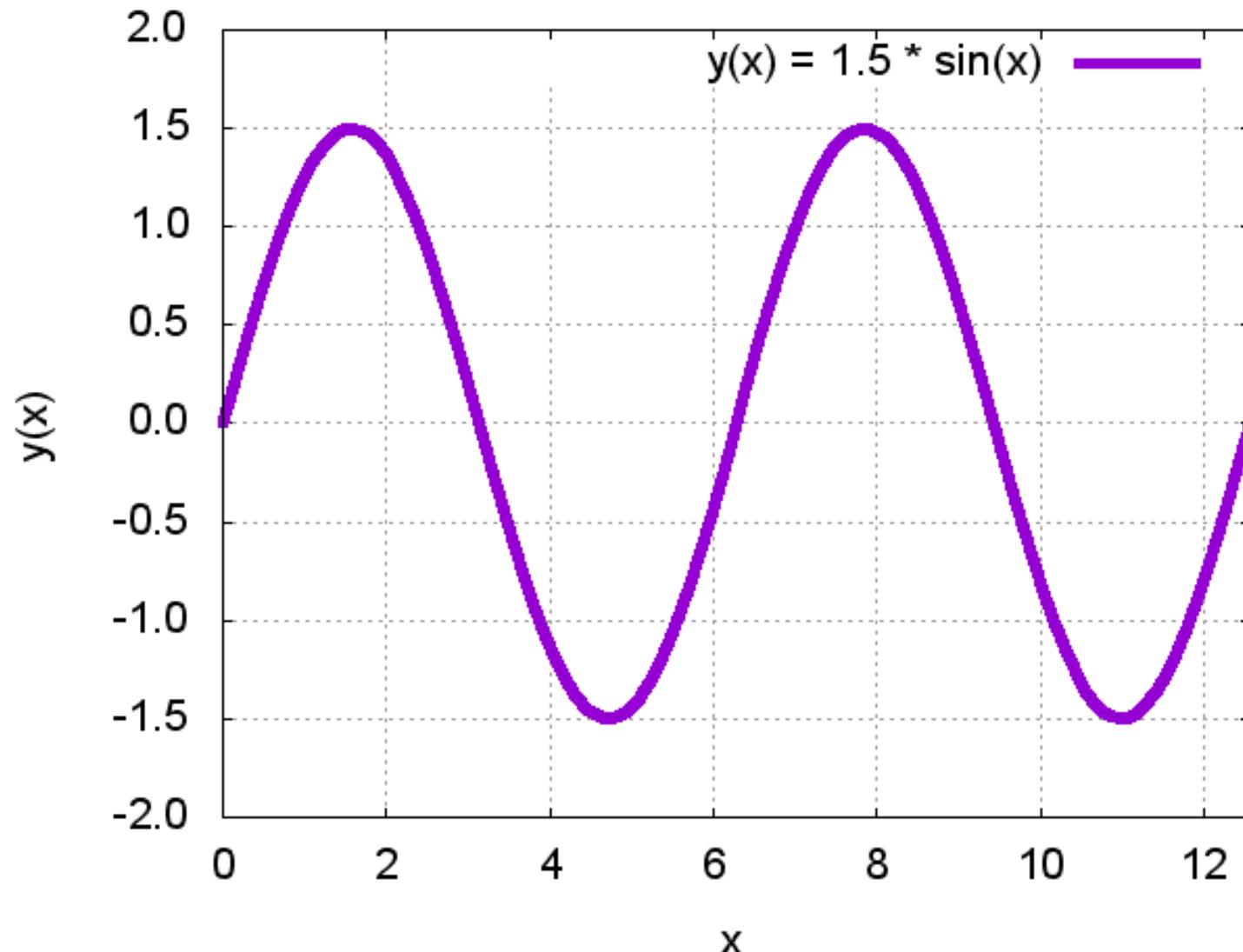


$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}, \text{ Poynting, flujo direccional de energía EM}$$

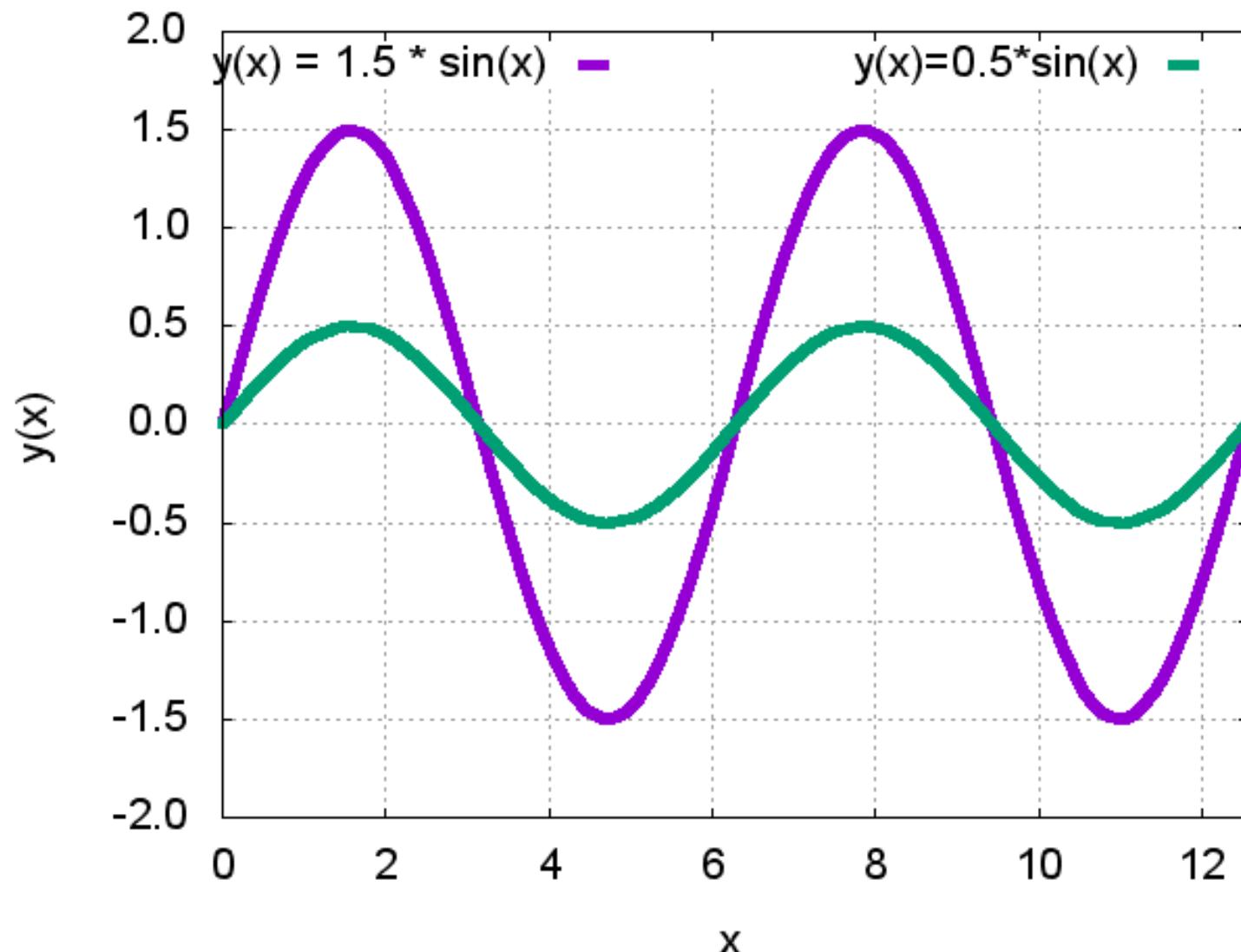
# Ondas periódicas



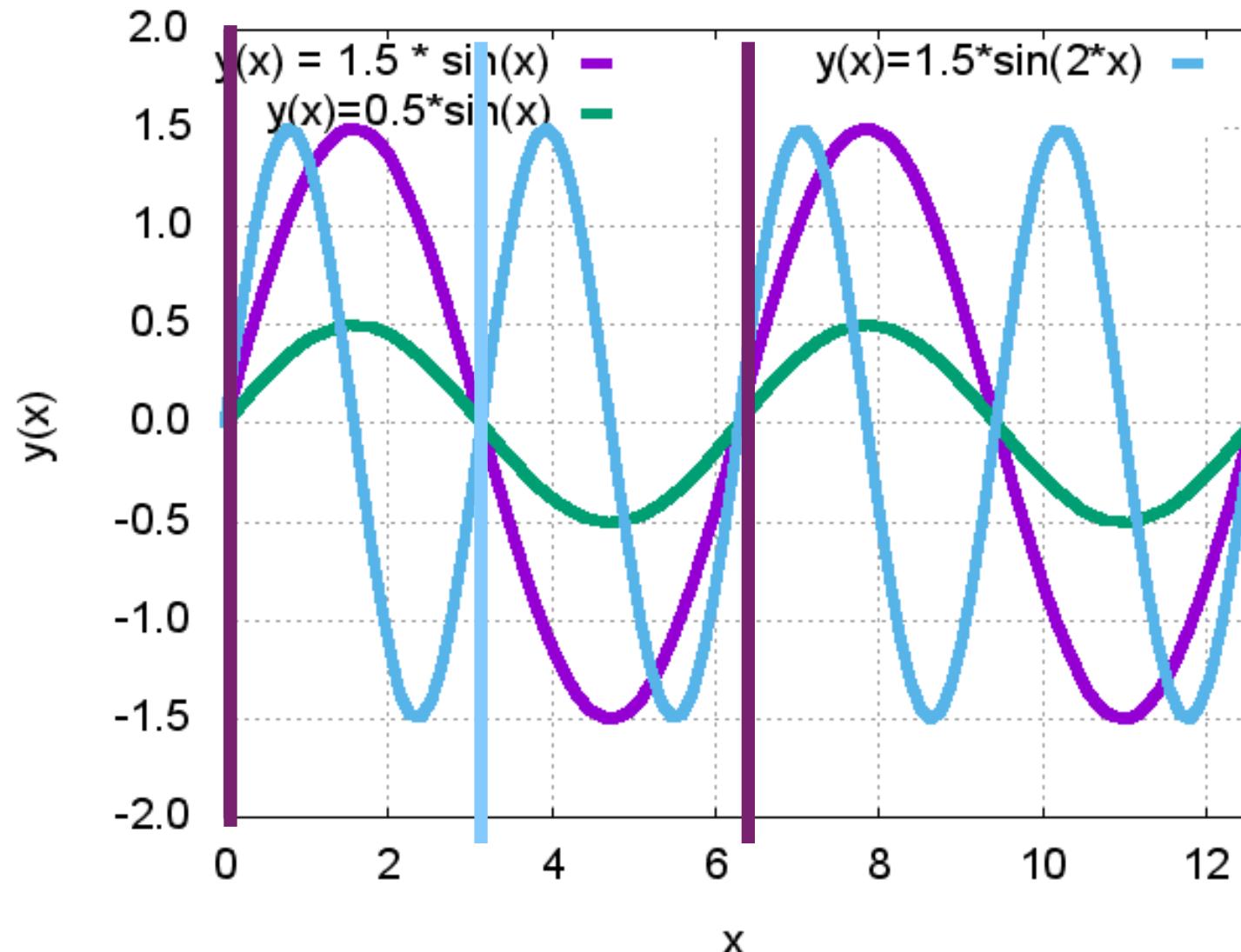
# Onda periódica



# Misma $\lambda$ , distinta amplitud

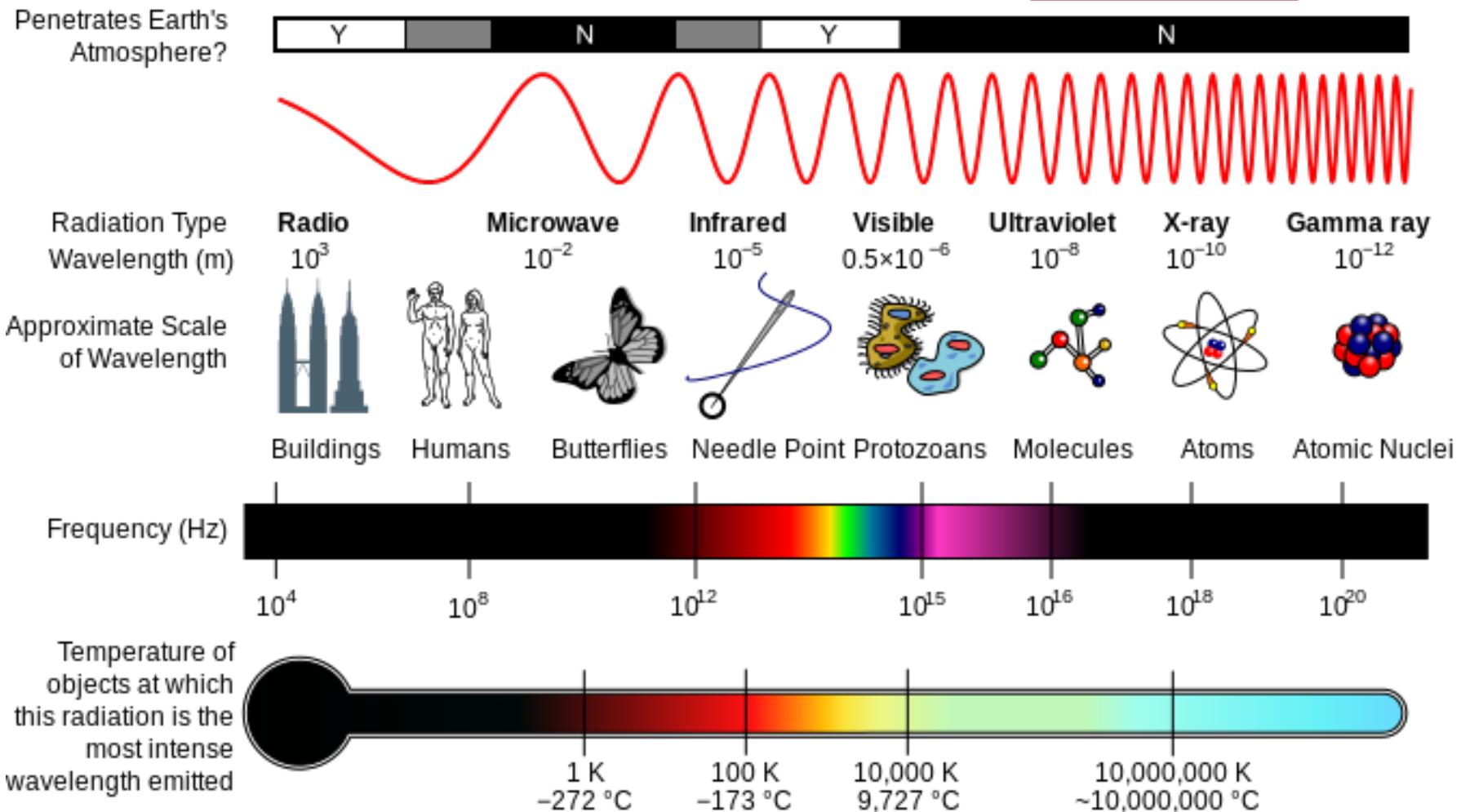


# Distinta $\lambda$ , misma amplitud



# La luz → Espectro Electromagnético

y como es una onda:  $c=f\lambda$



# Mismo objeto: Infrarrojo y visible

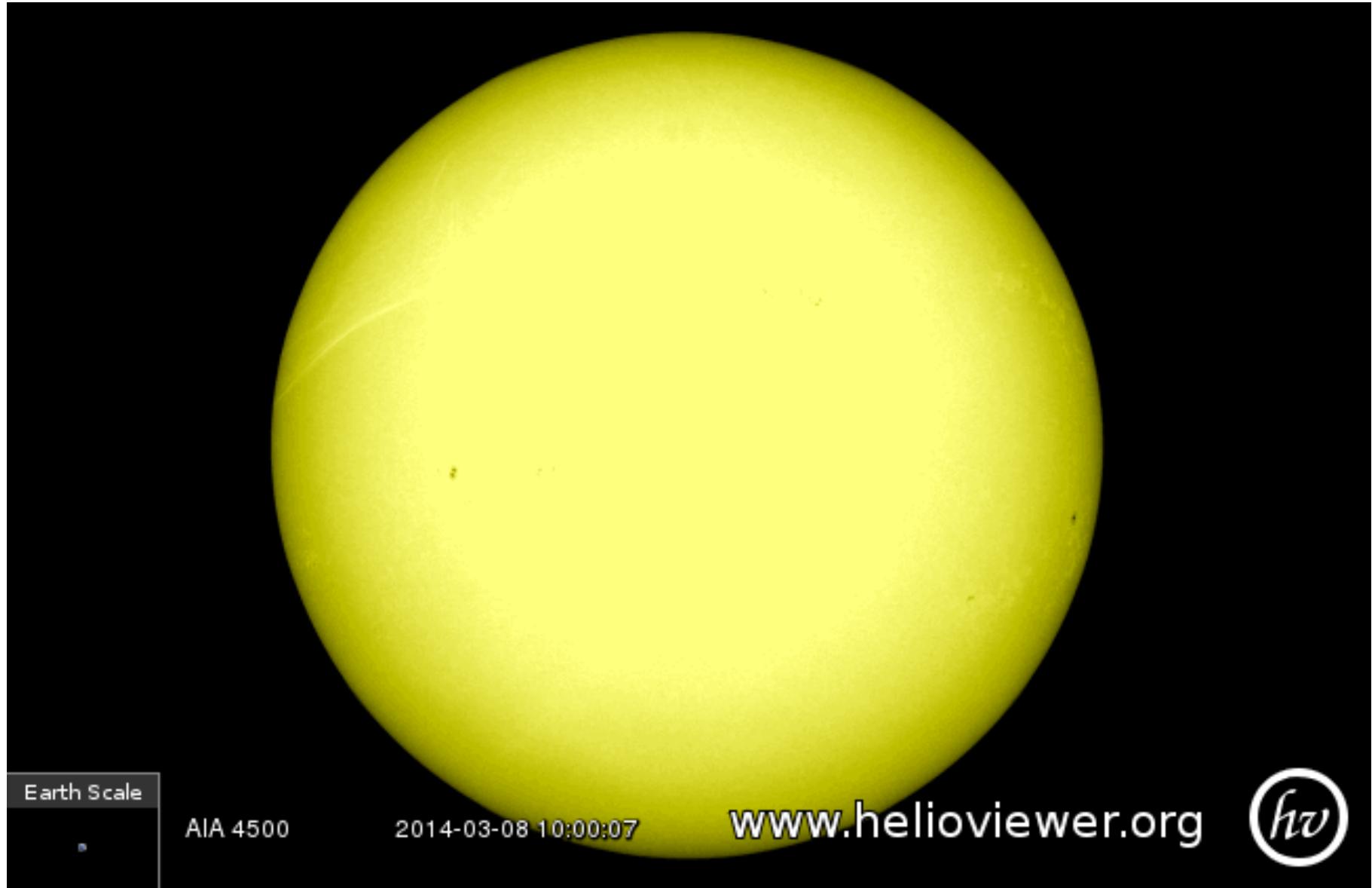
<http://crispme.com/50-amazing-examples-of-infrared-photography/>



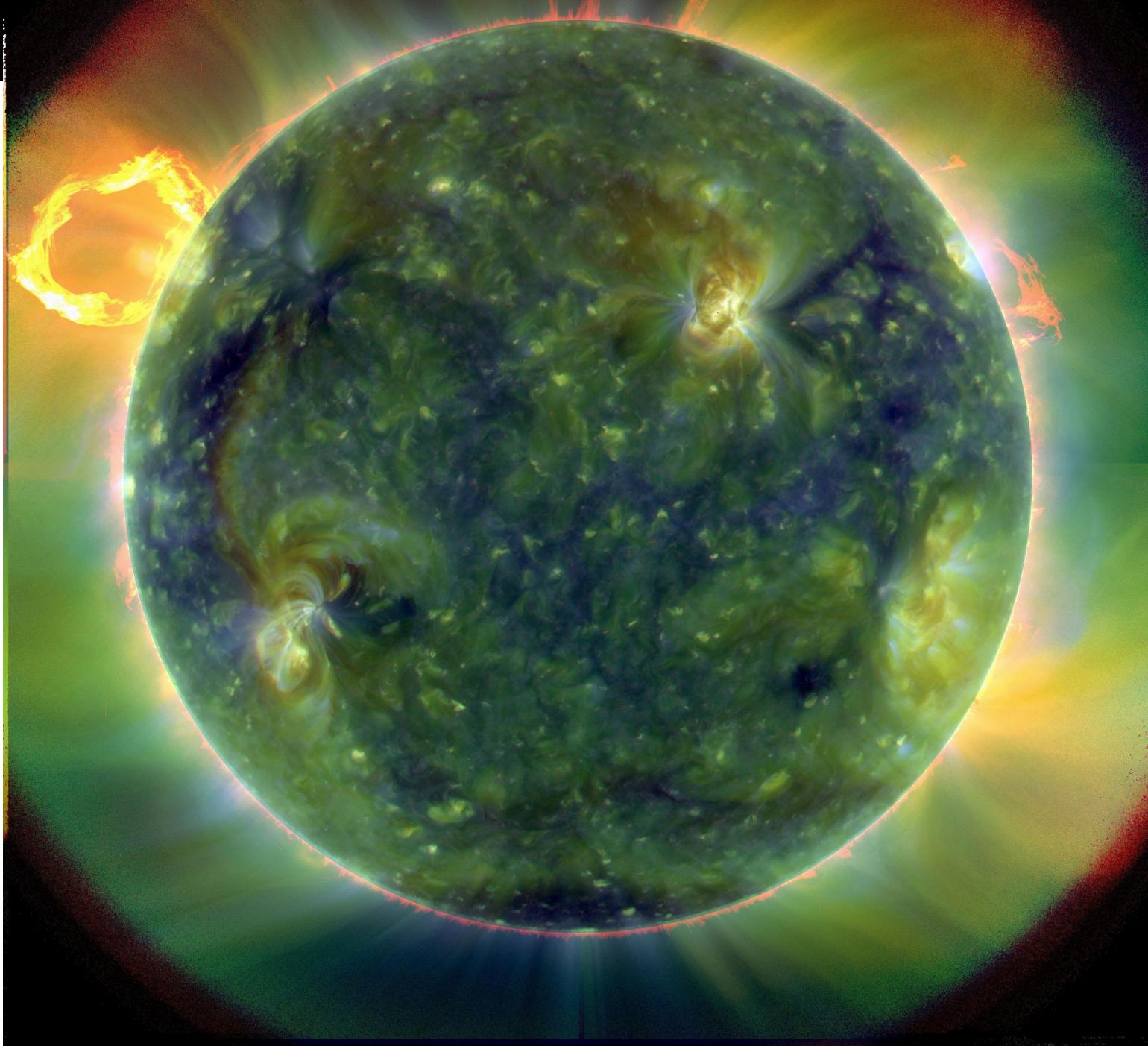
# Nuestra fuente de energía



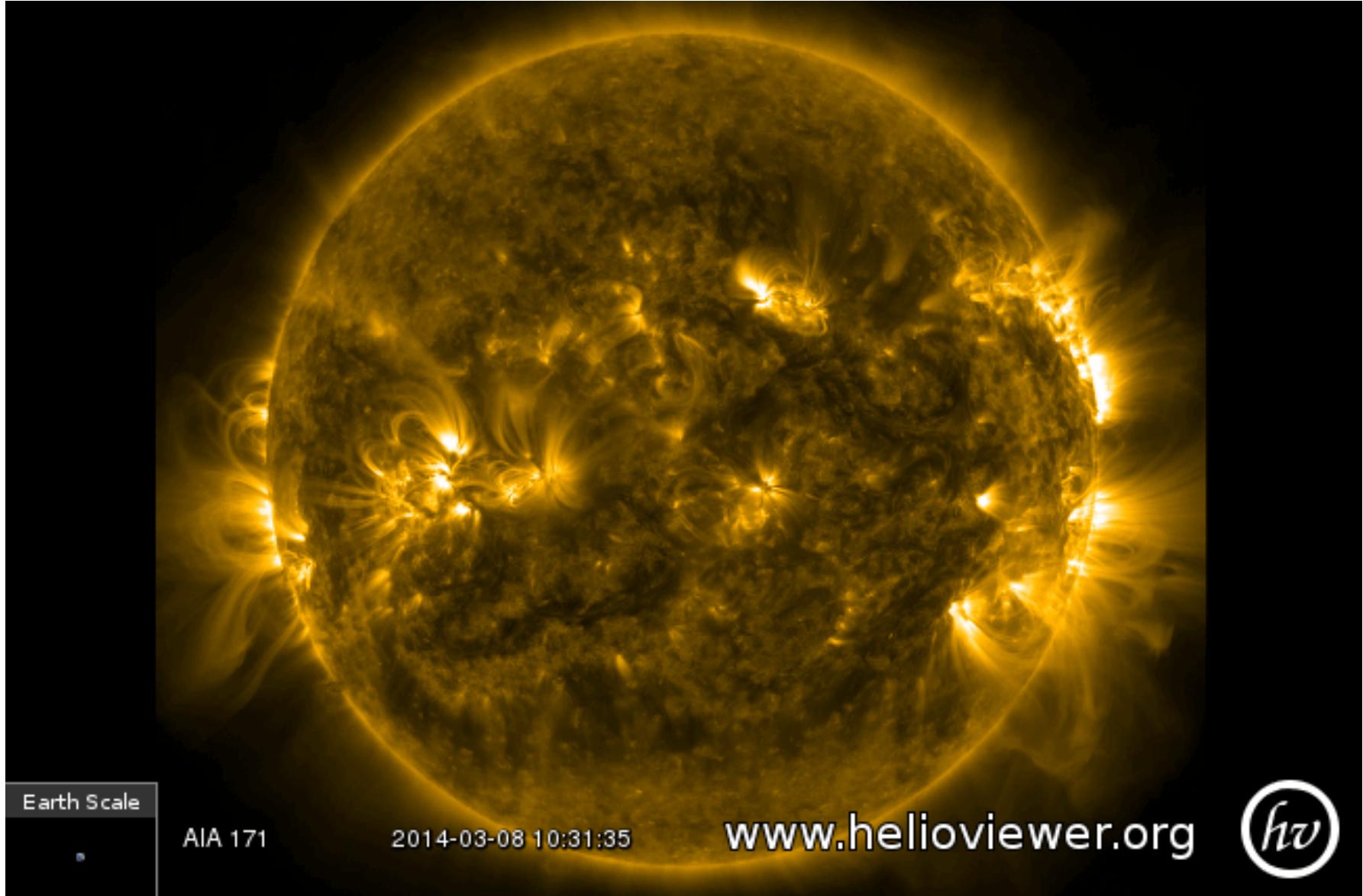
# ¿Amarillo o verde?



# Así es nuestro Sol



# Mirando en otras longitudes de onda



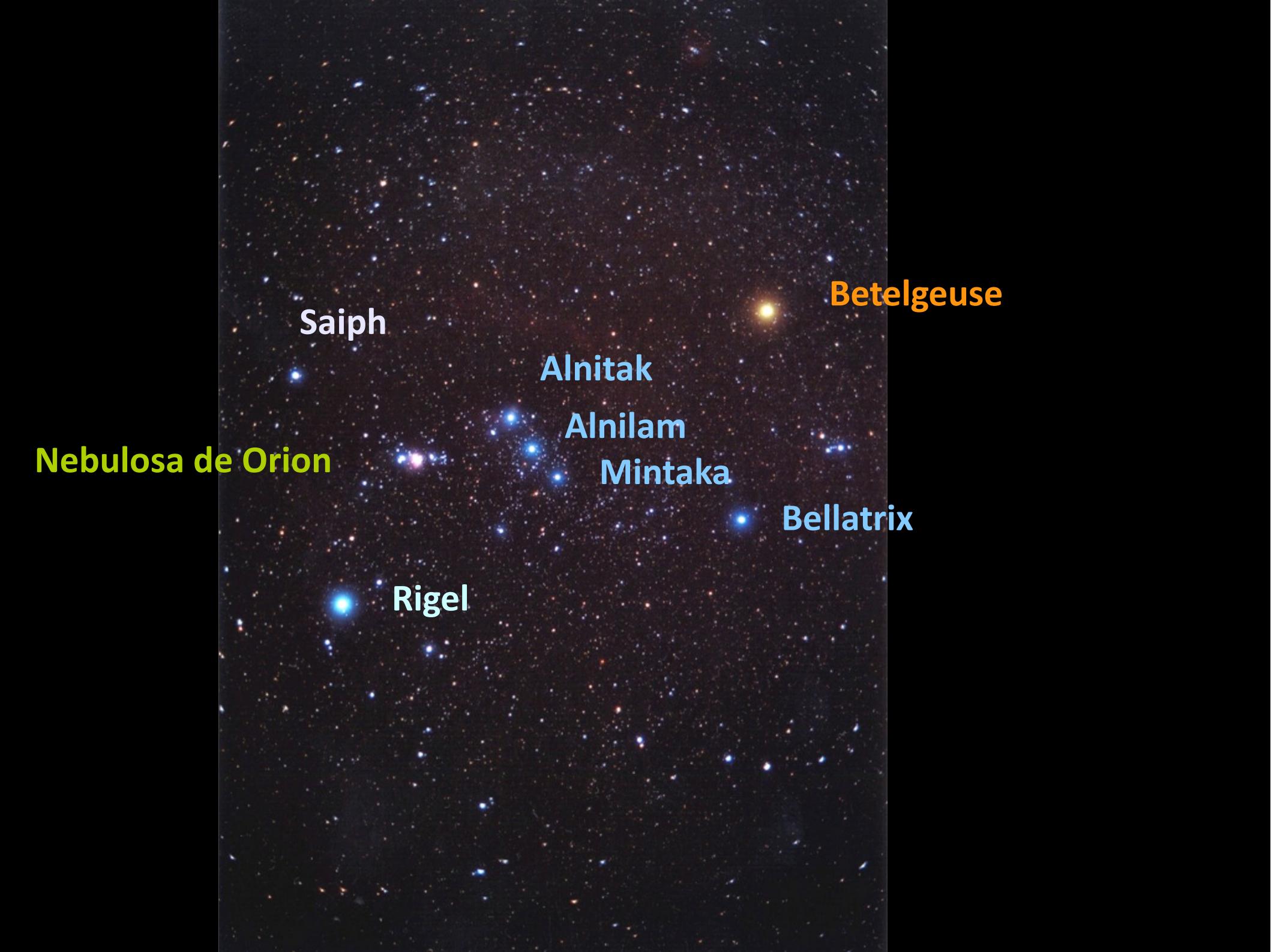
Earth Scale

AIA 171

2014-03-08 10:31:35

[www.helioviewer.org](http://www.helioviewer.org)





**Nebulosa de Orion**

Saiph

Rigel

Alnitak

Alnilam

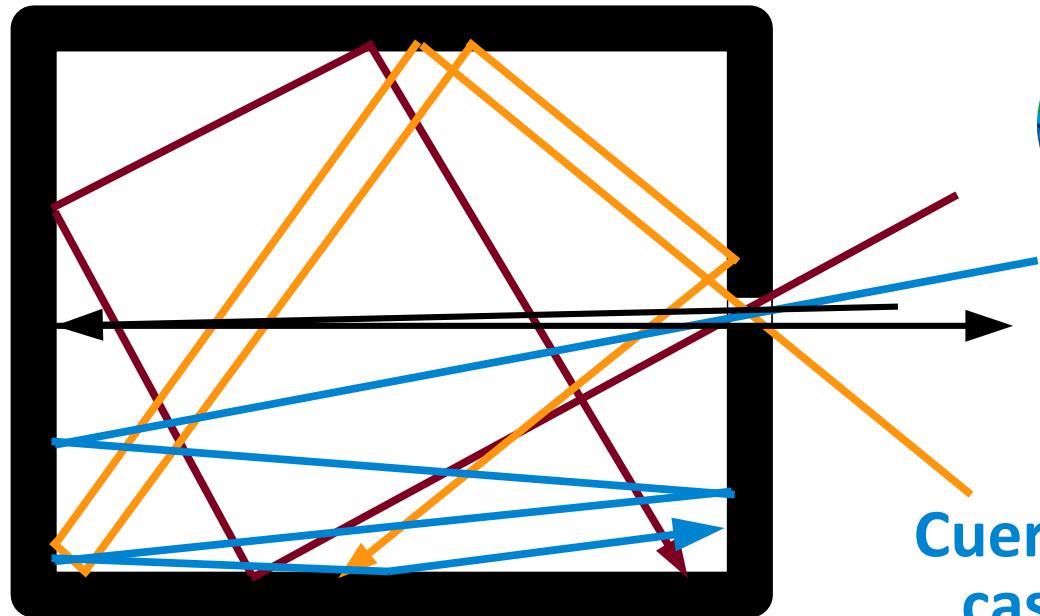
Mintaka

Betelgeuse

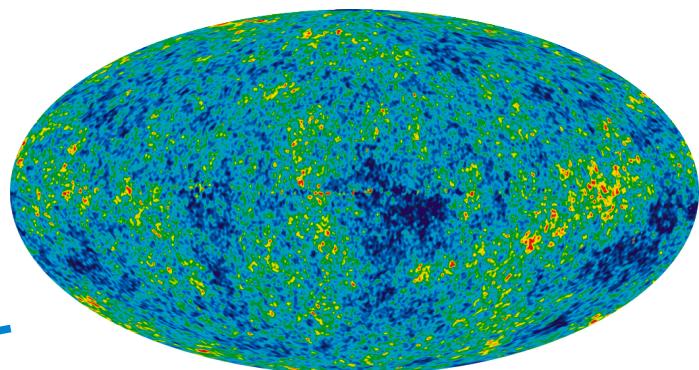
Bellatrix

# Un cuerpo negro es...

- Un **cuerpo negro** es un sistema físico ideal que absorbe toda la radiación electromagnética incidente sin importar su longitud de onda: **es un absorbente perfecto de radiación electromagnética**



Cuerpos negros  
casi ideales

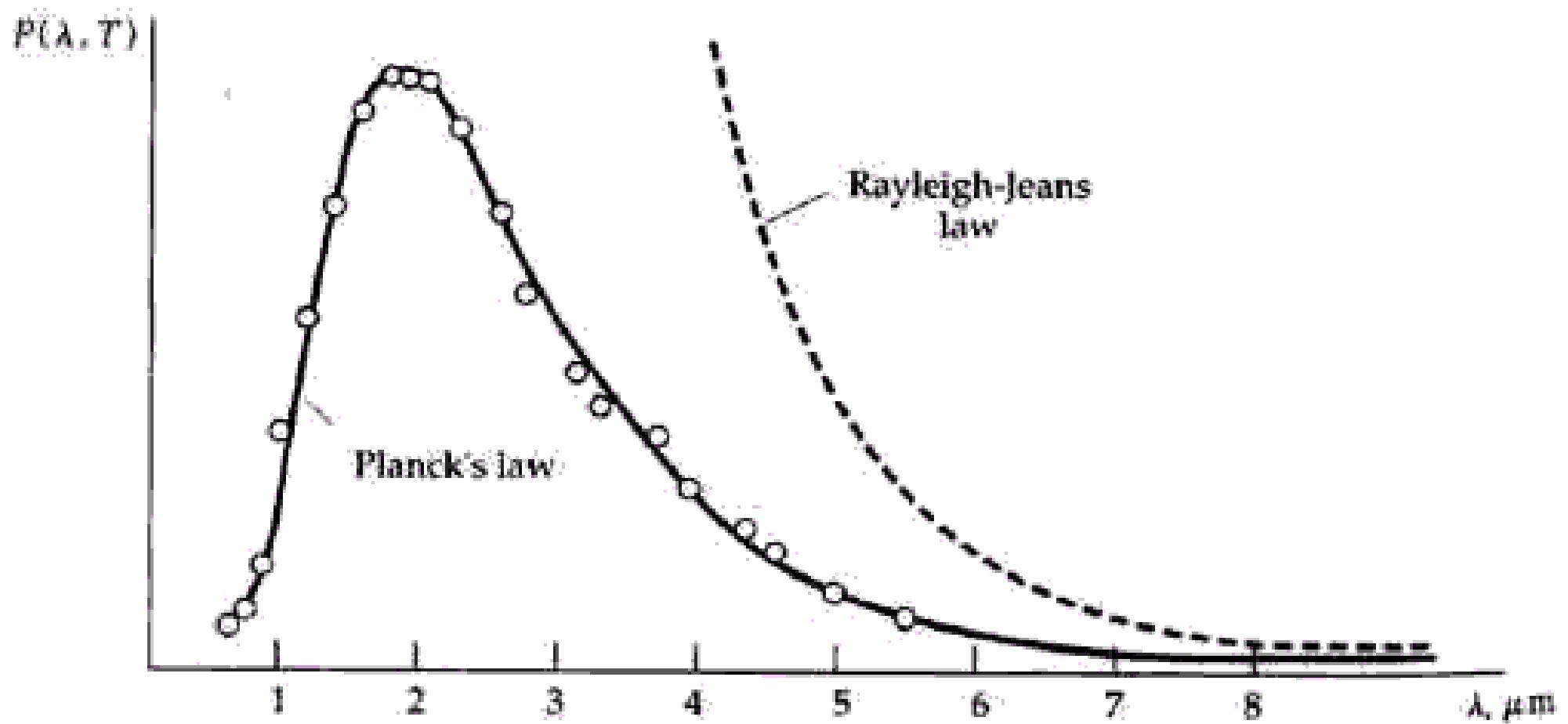




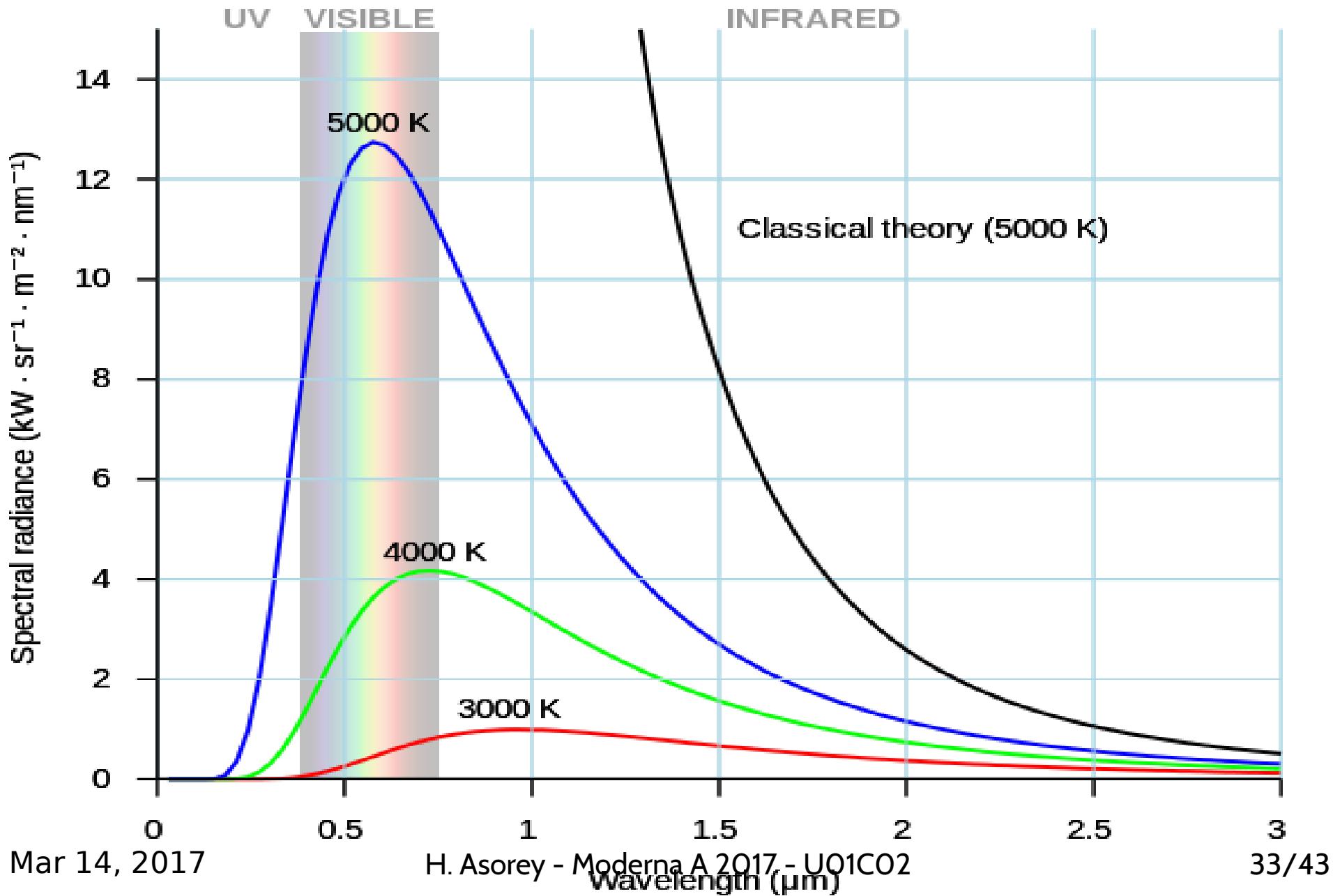
# En el principio...

- ¿Se acuerdan de la equipartición de la energía?
- En Física 1B, la energía interna de un gas ideal es:  
$$U = g \left( \frac{1}{2} k T \right) N$$
, donde  $g$  es el número de grados de libertad
- Si tengo un gas en una cavidad, aumento T, ¿qué pasa con U?
- La cavidad está llena de ondas electromagnéticas
- “Clásicamente”, la potencia radiada es proporcional a  $f^2$
- Al aumentar T, aumenta la frecuencia sin límite → potencia infinita

# Teoría versus experimento



# Otra imagen





# La solución de Planck

- La radiación electromagnética puede ser emitida o absorbida en cantidades discretas de energía:

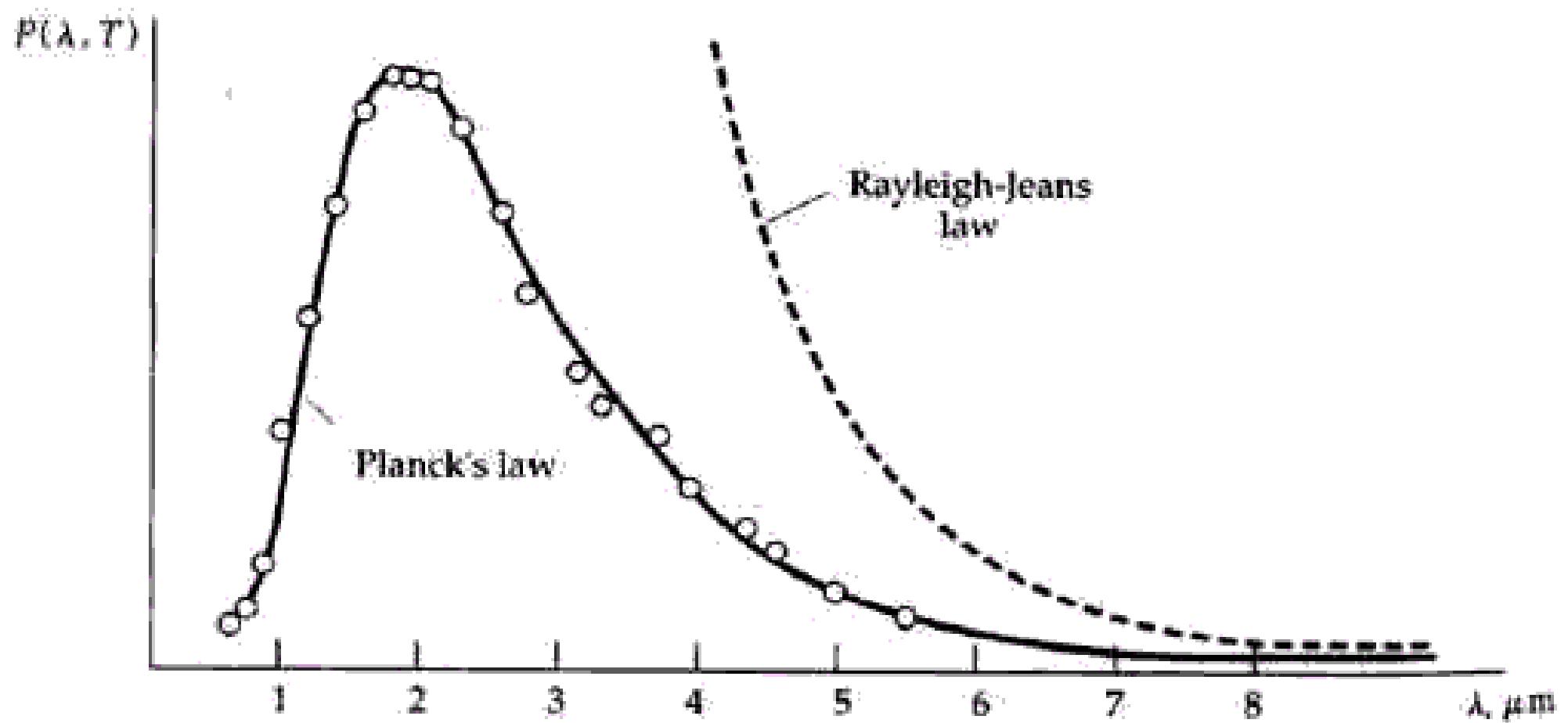
$$E_{EM} = hf \quad \text{ó también} \quad E_{EM} = \frac{hc}{\lambda}$$

- $h$  es la constante de Planck:

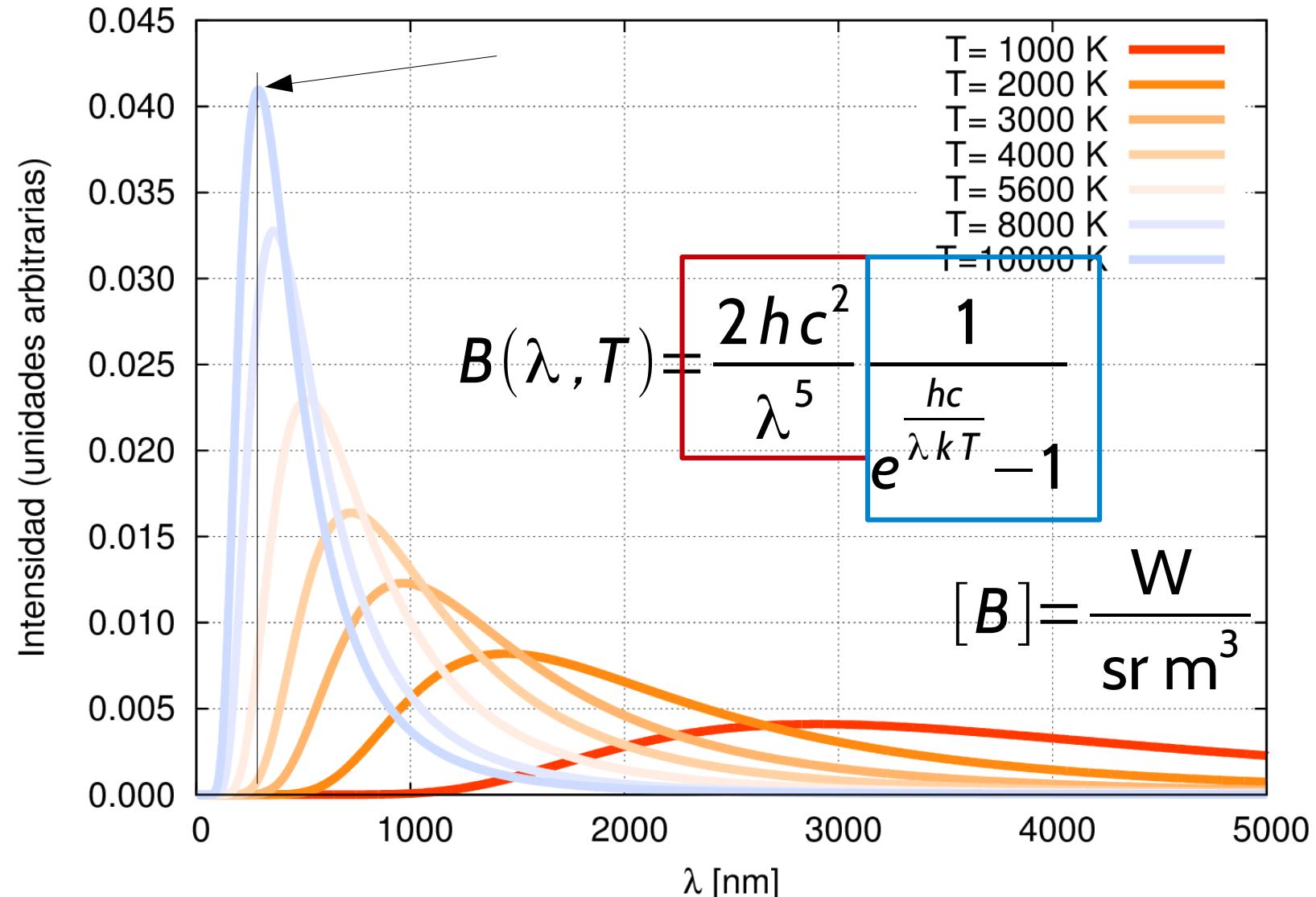
$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s} \quad \text{ó también} \quad h = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$$

- A estas cantidades (¿paquetes?) de energía se las llamó “**cuantos**” (*quanta* en inglés). Solucion “ad-hoc”

# Teoría versus experimento



# ¿Qué ruido hace un fotón al caer? ¡Planck!



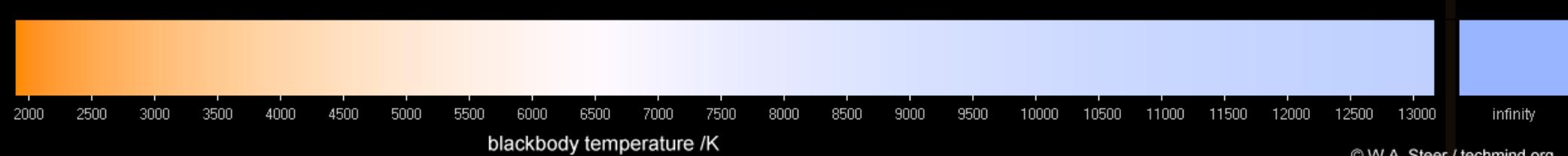
# Ley de desplazamiento de Wien, $\text{dB}/\text{dT} = 0$

- Valor de  $\lambda$  donde la emisión es máxima, receta usual:

$$\frac{d B}{d \lambda} = 0 \rightarrow \frac{d}{d \lambda} \left( \frac{2 h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \left( \frac{hc}{\lambda k T} \right) \left( \frac{\frac{hc}{\lambda k T}}{\frac{hc}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1}} \right) - 5 = 0 \Rightarrow \frac{x e^x}{e^x - 1} = 5, x = \frac{hc}{\lambda k T} = 4.9651$$

$$\lambda_{max} = \frac{\zeta}{T}, \quad \zeta = \frac{hc}{4,965 k}, \quad \zeta = 2,898 \frac{\text{mm}}{\text{K}}$$



# Emisión de energía total

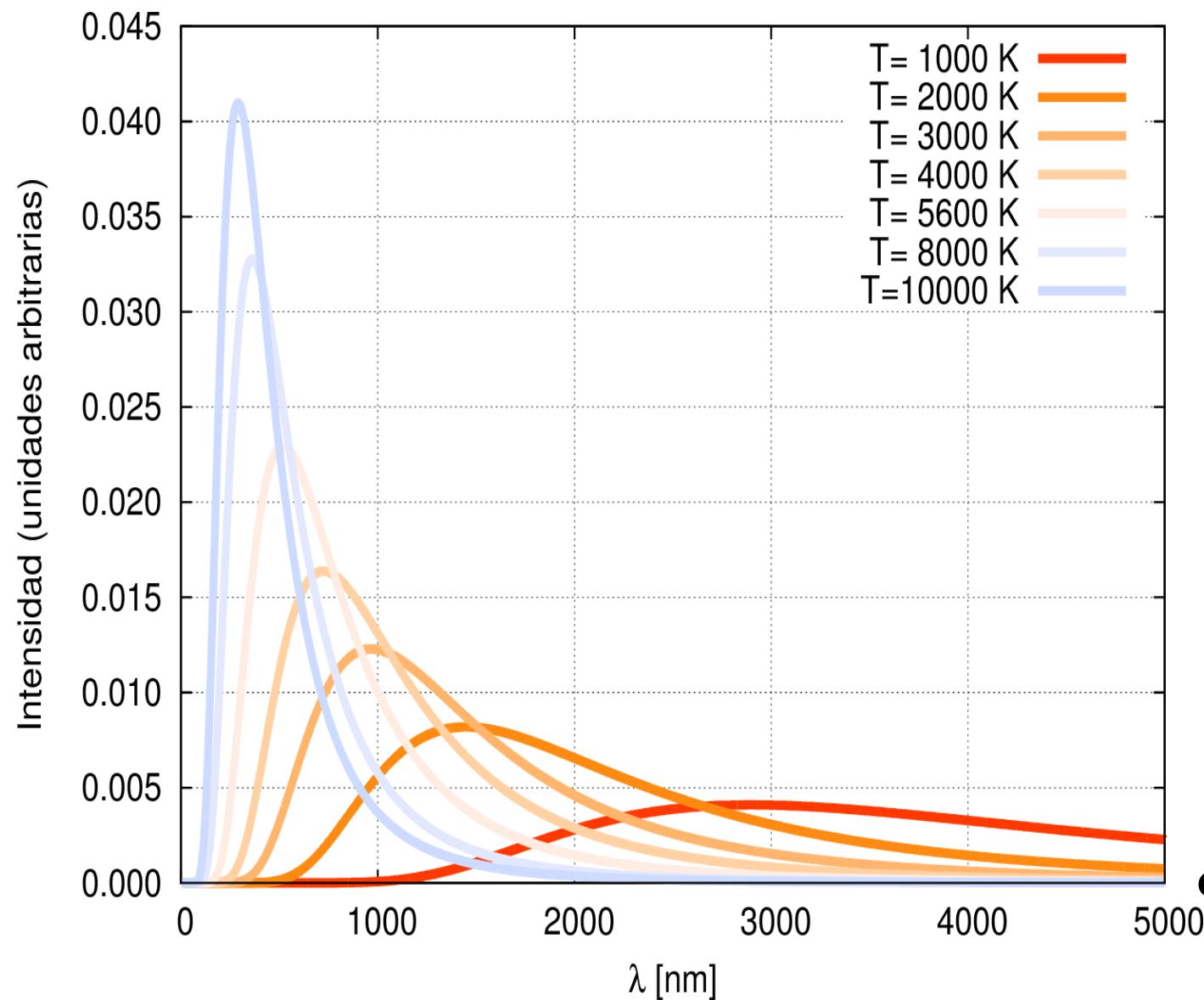
- $B$  es el flujopectral de energía, es decir a la energía emitida por un cuerpo negro a temperatura  $T$ , por unidad de superficie y unidad de ángulo sólido para cada longitud de onda del espectro electromagnético.
- Para calcular la emisión total → ¡integración!

• Esfera:  $L = \int_0^R dr \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta \int_0^\infty d\lambda \left( \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right)$

$L = (4\pi R^2) \left( \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} \right) T^4 \rightarrow L = 4\pi R^2 \sigma T^4$

Area del Cuerpo Negro      Temperatura Cuerpo Negro  
 $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann

# ¿Qué ruido hace un fotón al caer?



- Ley de Wien
  - Posición de  $\lambda_{\text{max}}$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}$$

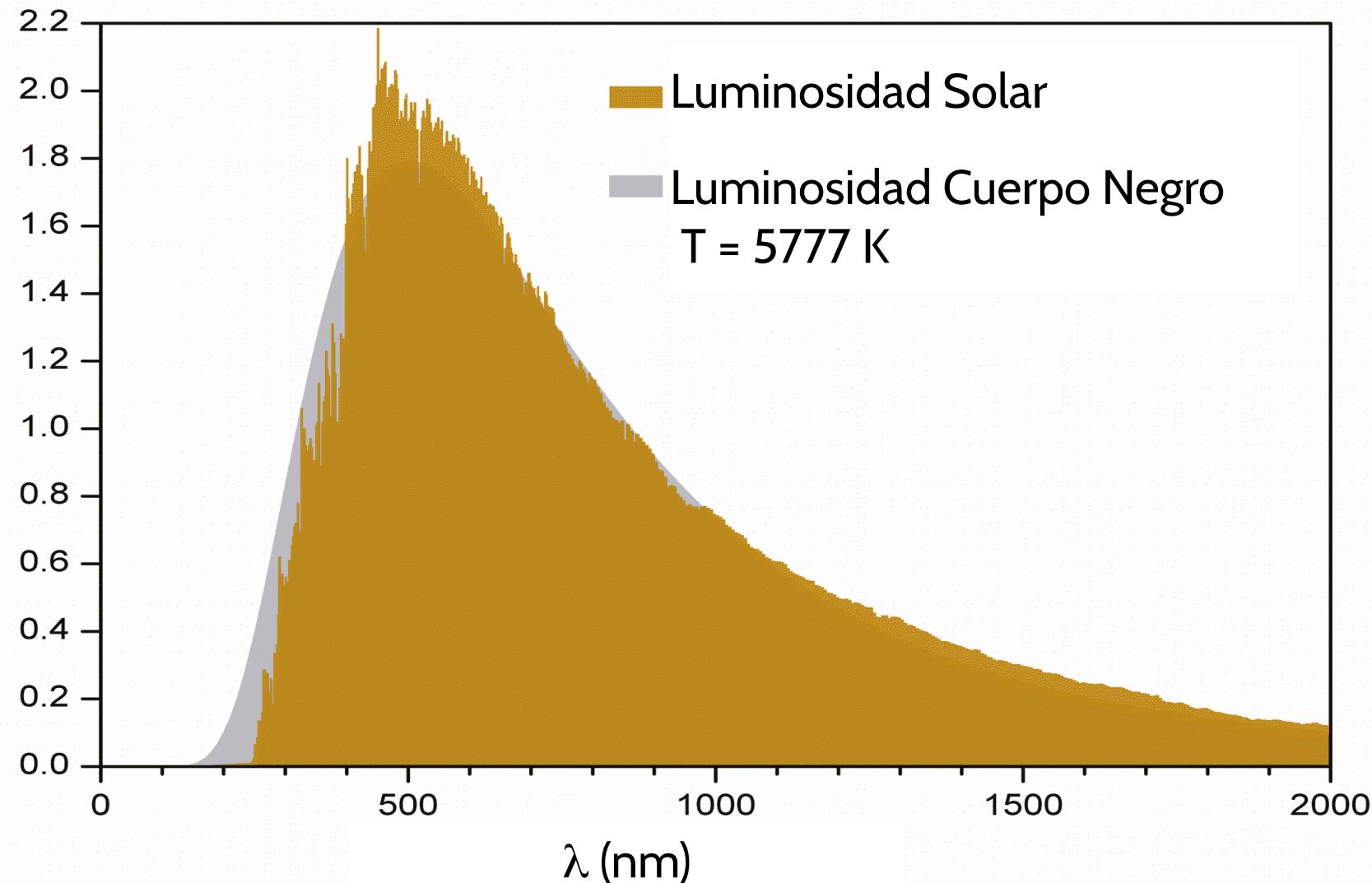
$$b = 2.9 \text{ mm K}$$

- Ley de Stefan-Boltzmann

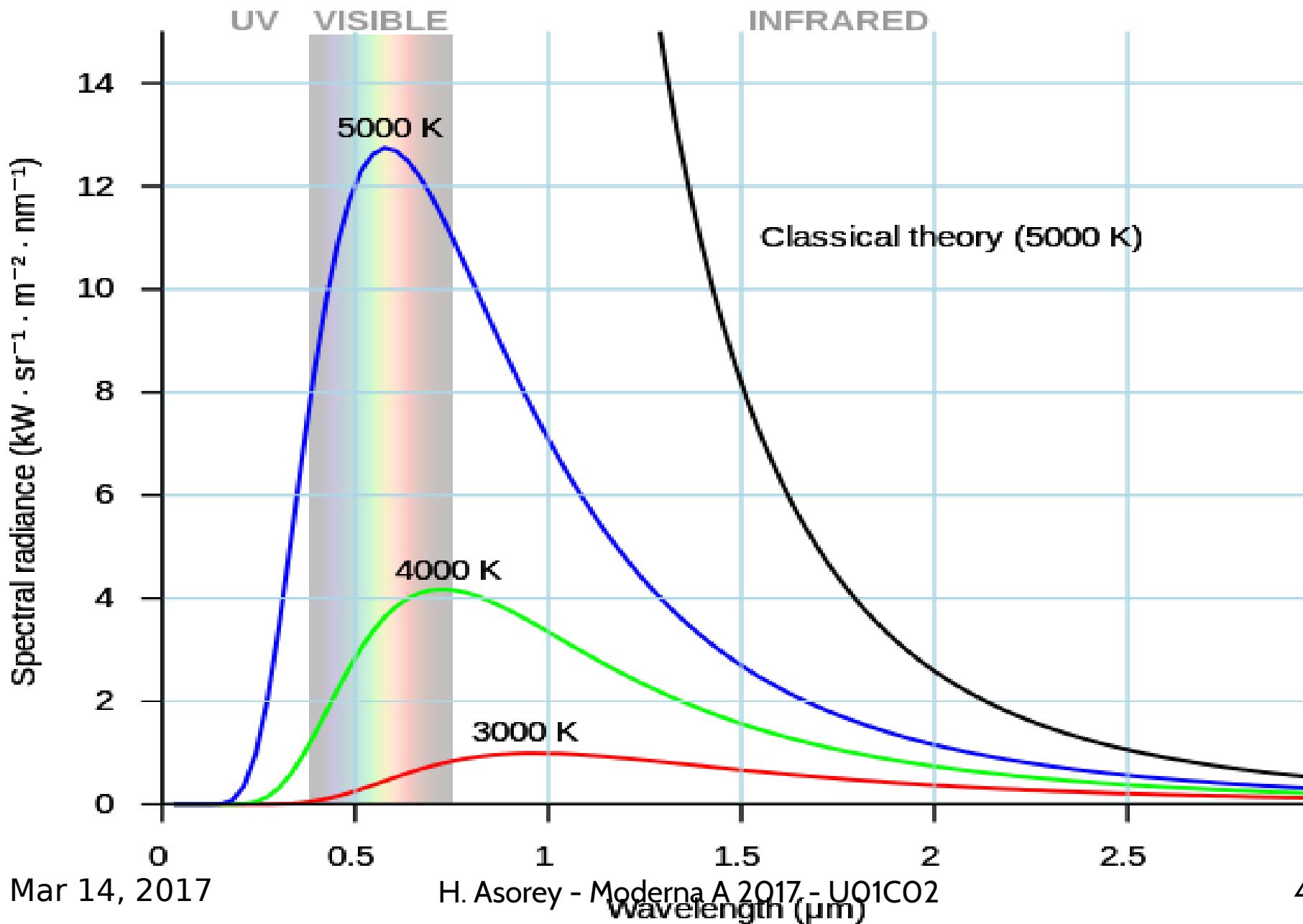
$$L \equiv \frac{\Delta E}{\Delta t} = \sigma A T^4$$

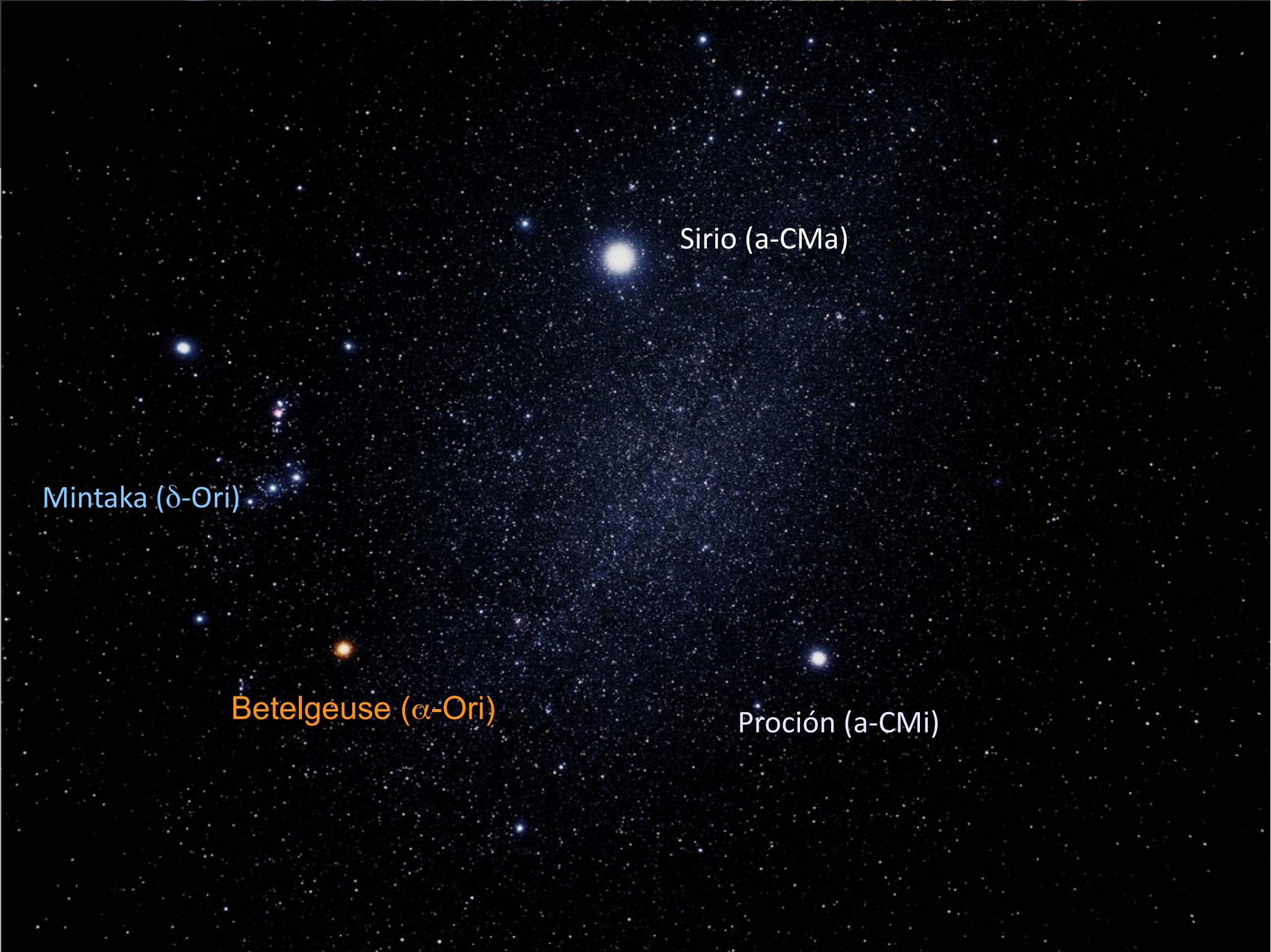
$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

# El Sol como un cuerpo negro



# El color dependerá de la emisión integrada en la región visible del espectro





Sirio (a-CMa)

Mintaka (δ-Ori)

Betelgeuse (α-Ori)

Proción (a-CMi)

Saiph

Rigel

Nebulosa de Orion

Alnitak  
Alnilam  
Mintaka

Betelgeuse

Bellatrix

