

CTE II:

Las Estrellas - Propiedades Físicas

Espectros Estelares

---

Cecilia Mateu

Instituto de Física, Facultad de Ciencias  
Universidad de la República

# Unidad I: Estrellas

# ¿Cómo conocemos las Propiedades de la Estrellas?

---

- **Propiedades Extrínsecas:**

- **Posición:** Angular + Distancia (Paralaje)
- **Velocidad**

- **Propiedades Estelares (Intrínsecas):**

- Temperatura
- Luminosidad
- Radio
- Masa

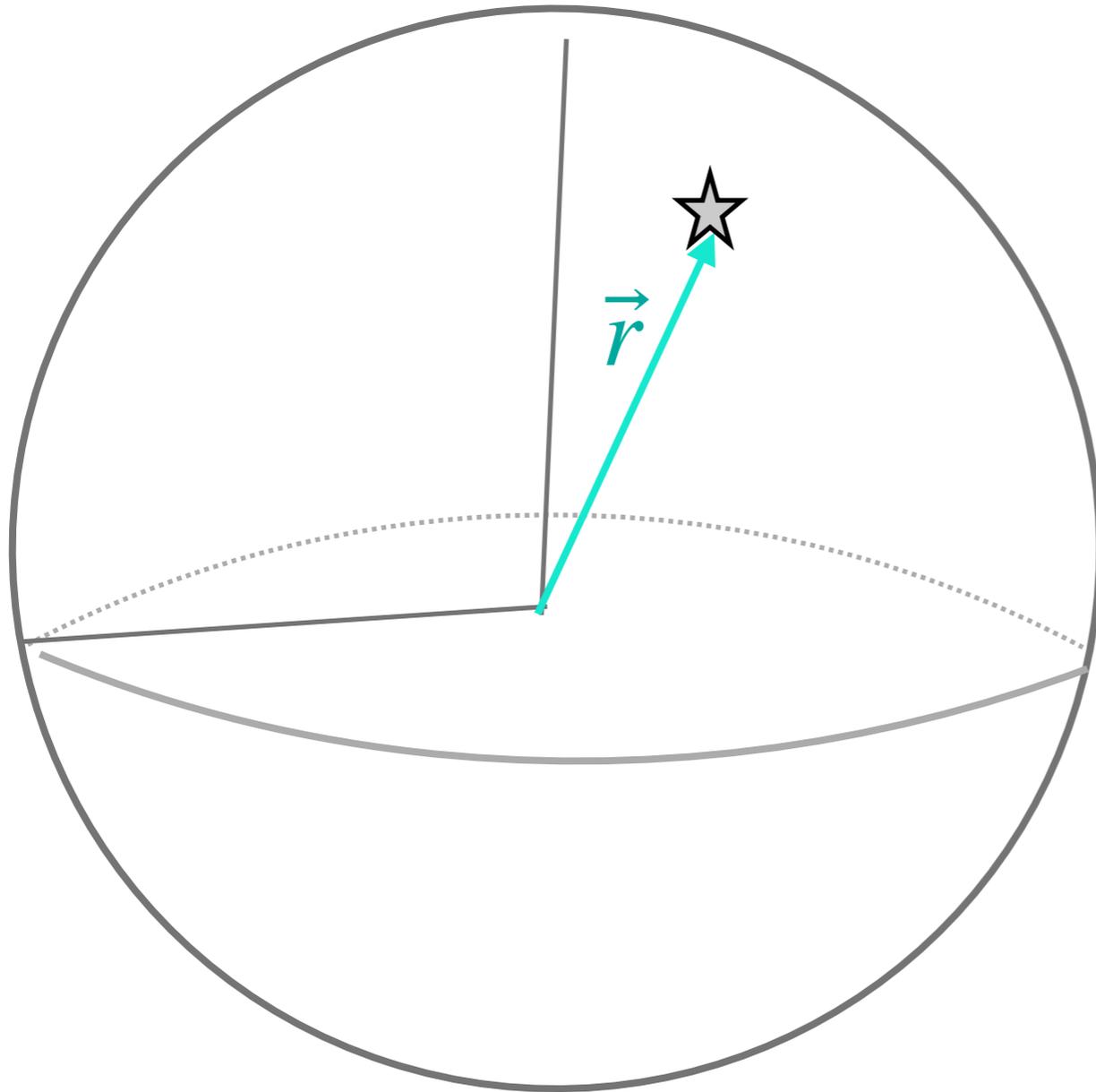
- **Propiedades Aparentes** (dependen tanto de las intrínsecas, como de las extrínsecas):

- Ej.: Brillo observado, tamaño angular...

# **Posición y Velocidad**

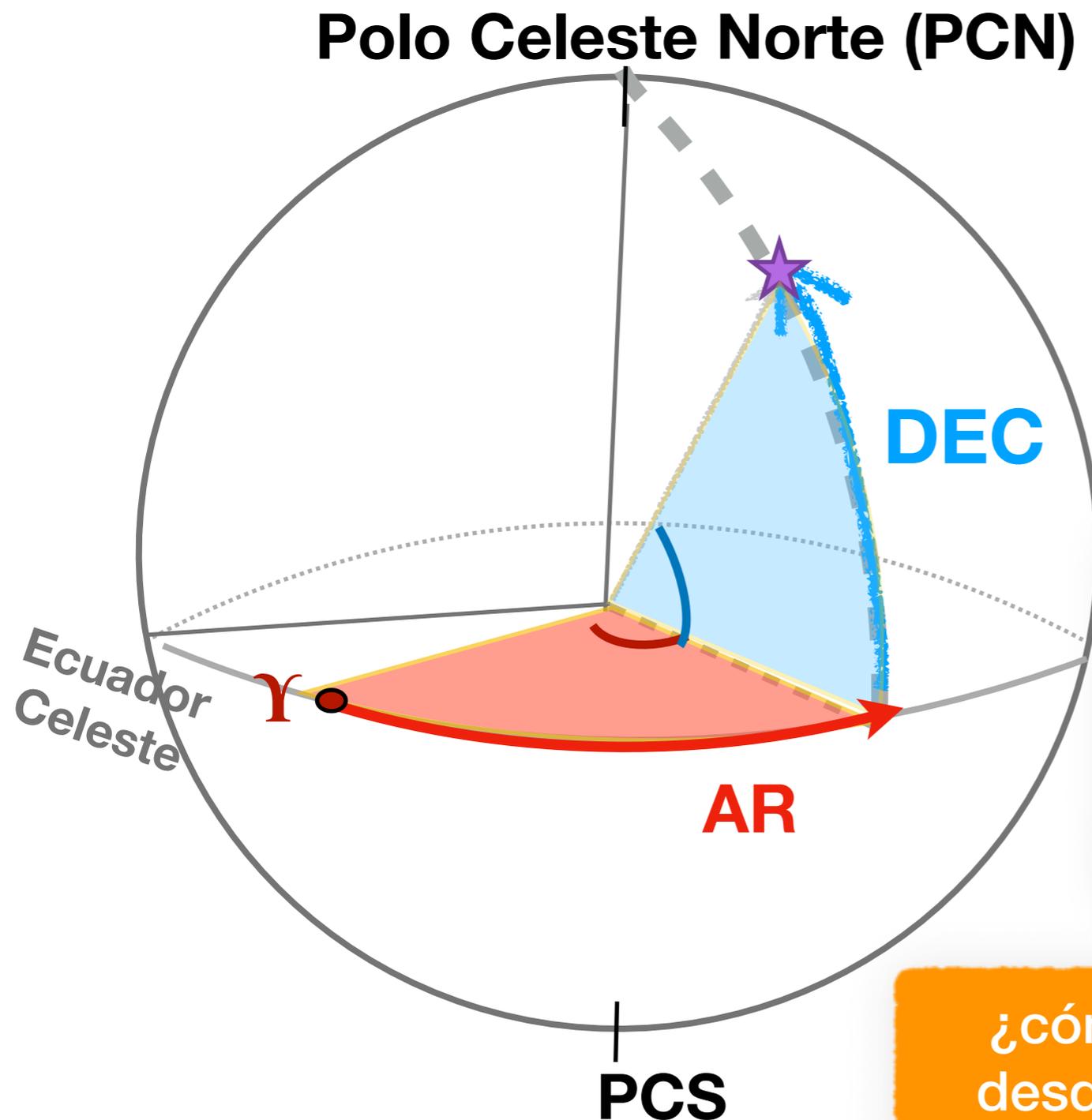
# Posición

---



- Para definir la posición (vector) necesitamos 3 componentes
- Conviene hacerlo en coordenadas esféricas:
  - Posición angular: 2 coordenadas angulares
  - Distancia

# Coordenadas Ecuatoriales Absolutas



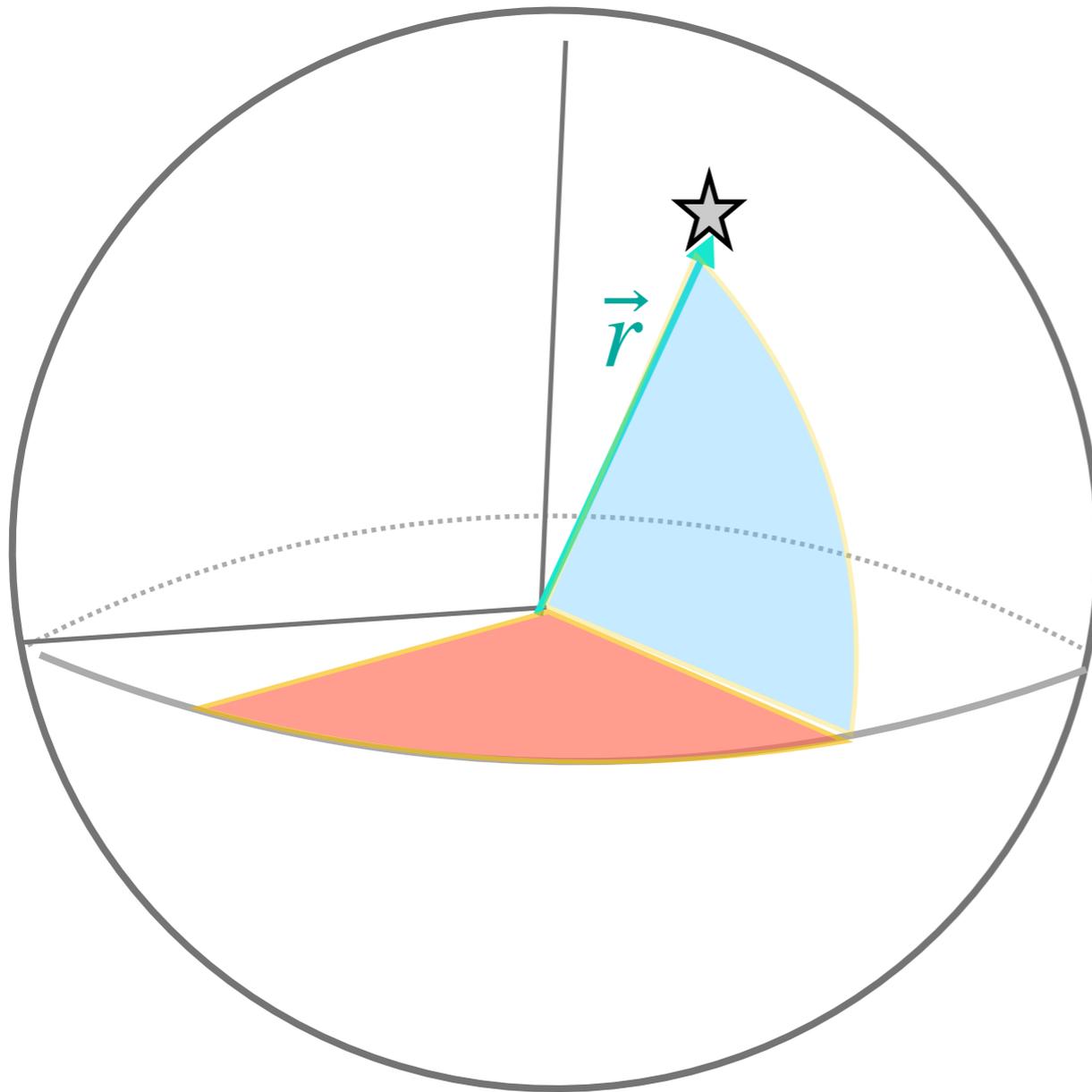
- **Declinación ( $\delta$ )**: altura angular respecto al plano del Ecuador Celeste
- **Ascensión Recta (AR o  $\alpha$ )**: ángulo acimutal (o longitud) desde el punto vernal  $\Upsilon$

Es un sistema absoluto - las coordenadas de un objeto celeste no dependen del observador en este sistema, *no cambian debido al movimiento diario*

¿cómo se observa una estrella dada desde un punto dado de la Tierra? -> **Astronomía Fundamental**

# Posición

---



- Para definir la posición (vector) necesitamos 3 componentes
- Conviene hacerlo en coordenadas esféricas:
  - 2 ángulos ( $\alpha$ ,  $\delta$ )
  - distancia  $r$
- **¿cómo se mide la distancia?**

# La Escala de Distancias

# Unidades

---

- UA
  - distancia (media) Tierra-Sol: aprox. 150 millones de km
- Año luz
  - distancia recorrida por la luz en un año. Velocidad de la luz 300.000 km/s  $\rightarrow 9.461 \times 10^{12}$  km
- Parsec: necesitamos la definición de paralaje...

# 1º Peldaño: Telemetría

En un instante de tiempo:

- Se mide la distancia a Venus a partir de la demora en el rebote de una señal de radar ( $d=ct$ )
- Se mide la distancia angular E entre Venus y el Sol (Elongación) en el momento de máxima elongación
- Resolviendo este triángulo se calcula el valor de la Unidad Astronómica (UA)

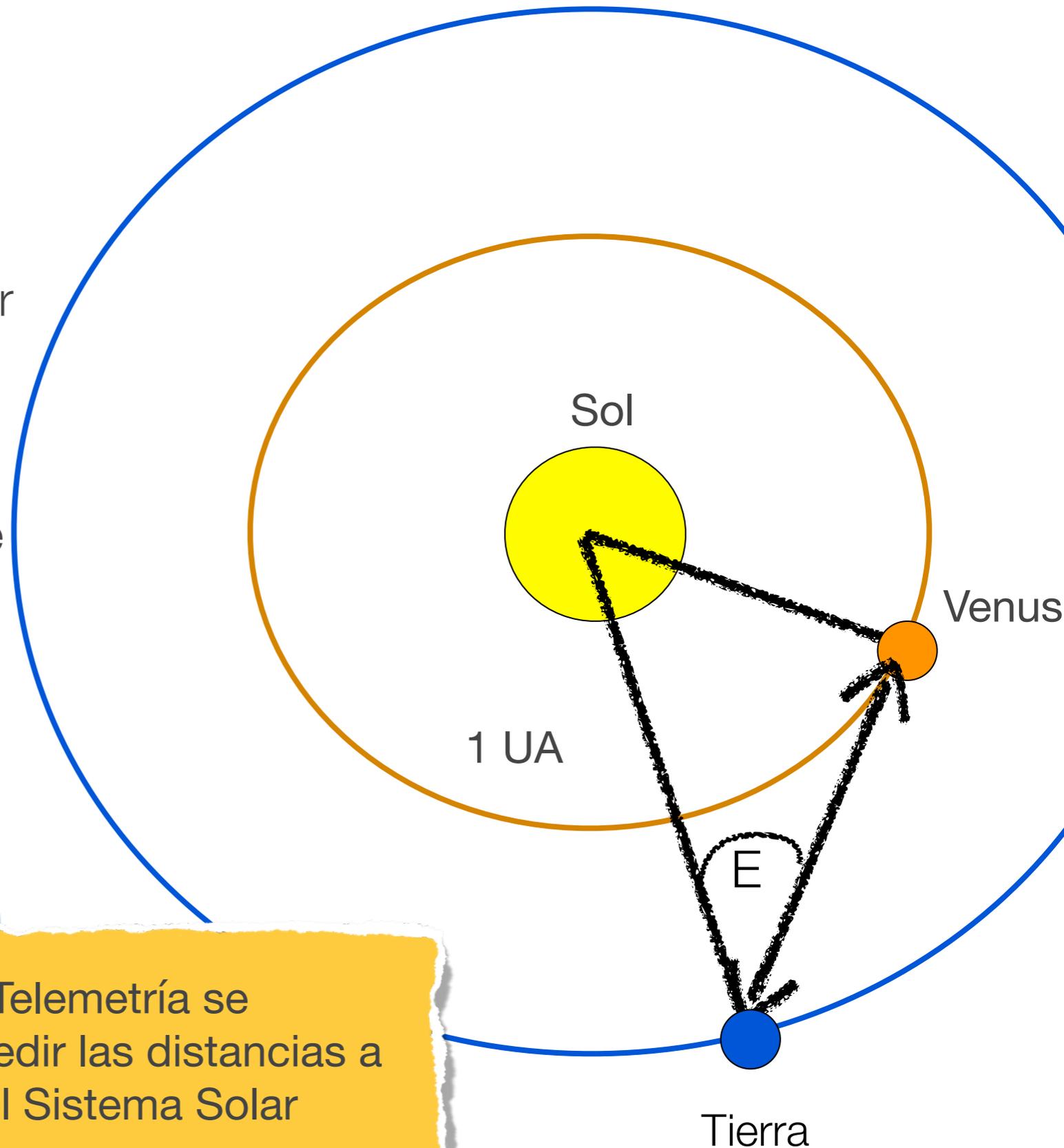
transmitter



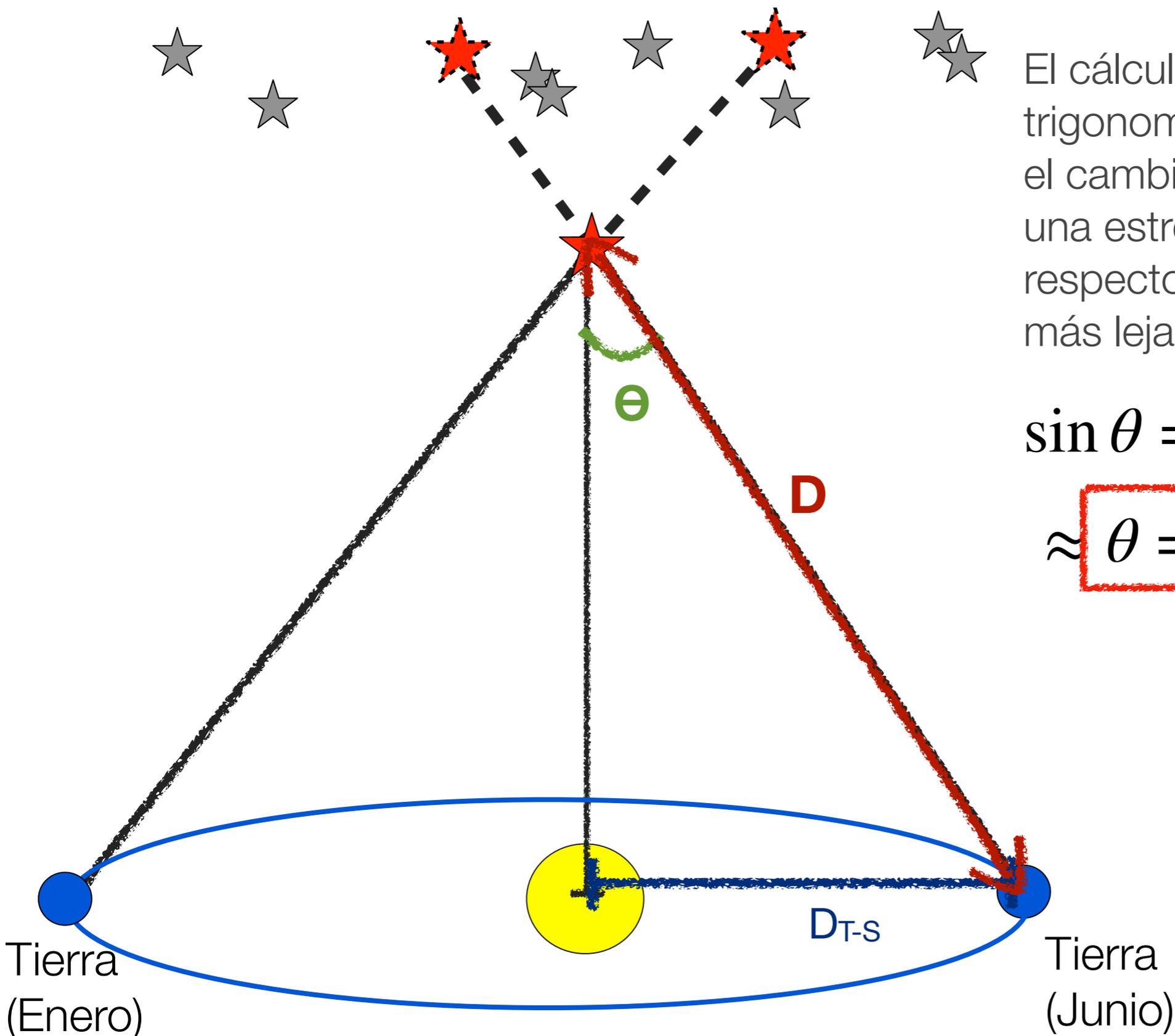
receiver

Mediante Telemetría se pueden medir las distancias a objetos del Sistema Solar

Útil hasta ~50 UA



# 2º Peldaño: Paralaje Trigonométrica



El cálculo de paralajes trigonométricos consiste en medir el cambio de posición angular de una estrella (ángulo de paralaje  $\theta$ ), respecto de estrellas u objetos más lejanos, que parecen fijos

$$\sin \theta = D_{T-S} / D$$

$$\approx \theta = D_{T-S} / D$$

El ángulo de paralaje  $\theta$  disminuye conforme aumenta la distancia

# Unidades

---

- UA
  - distancia (media) Tierra-Sol: aprox. 150 millones de km
- Año luz
  - distancia recorrida por la luz en un año. Velocidad de la luz 300.000 km/s  $\rightarrow 9.461 \times 10^{12}$  km
- **Parsec**: dos formas de verlo
  - distancia a la cual un objeto tiene un paralaje de 1"
  - distancia a la cual el ángulo que subtiende 1 UA es 1"

# Resumendo: escala de distancias

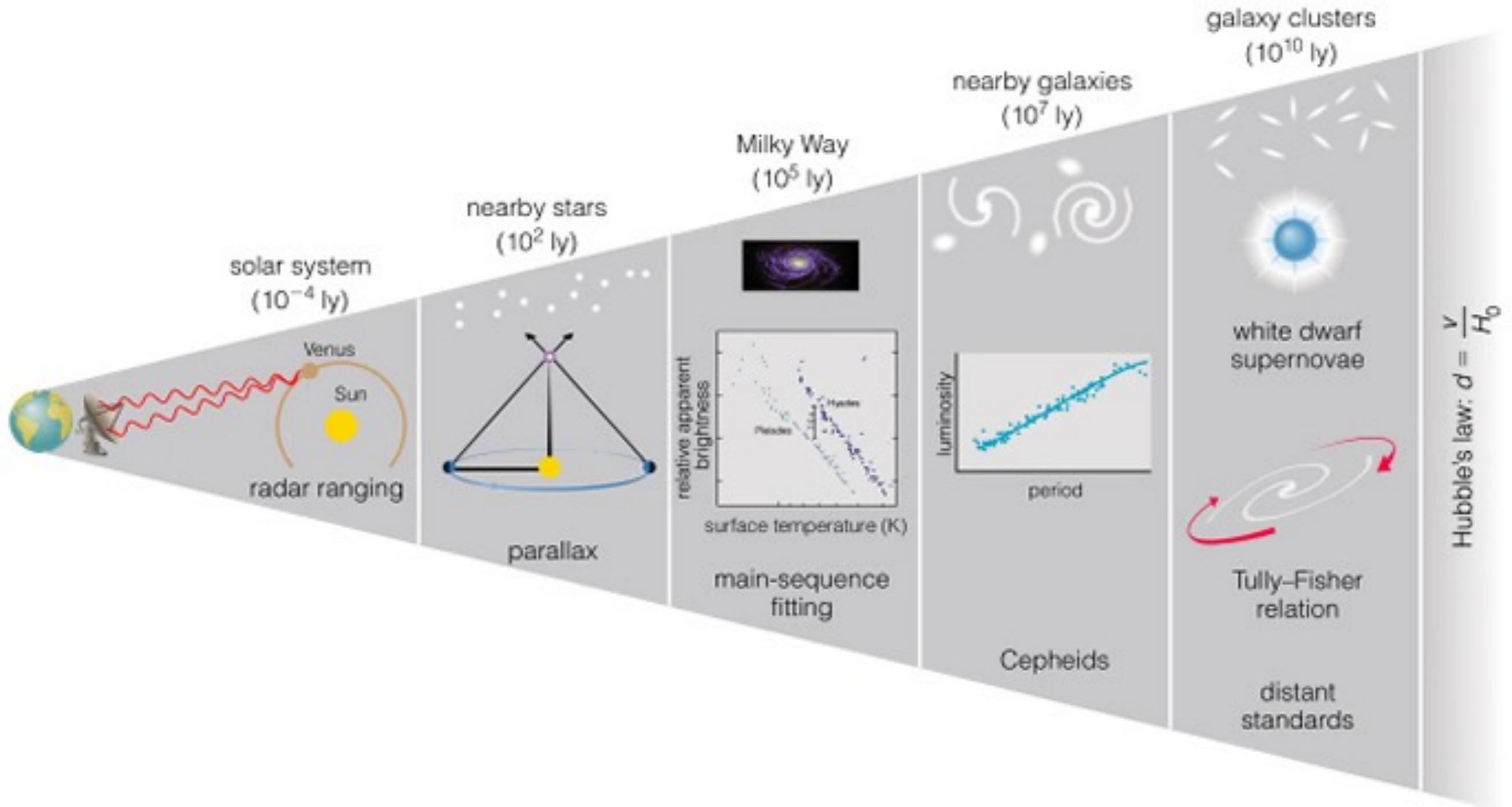
---

- Los ángulos de paralaje son muuuy pequeños...sólo se pueden medir hasta las estrellas más cercanas
  - Satélite Hipparcos (años '90) [~120mil estrellas]
    - precisión de ~10 **mili**-segundos de arco
  - Satélite Gaia (2013-hoy) [~miles de millones de estrellas (literalmente)]
    - precisión de ~10 **micro**-segundos de arco!

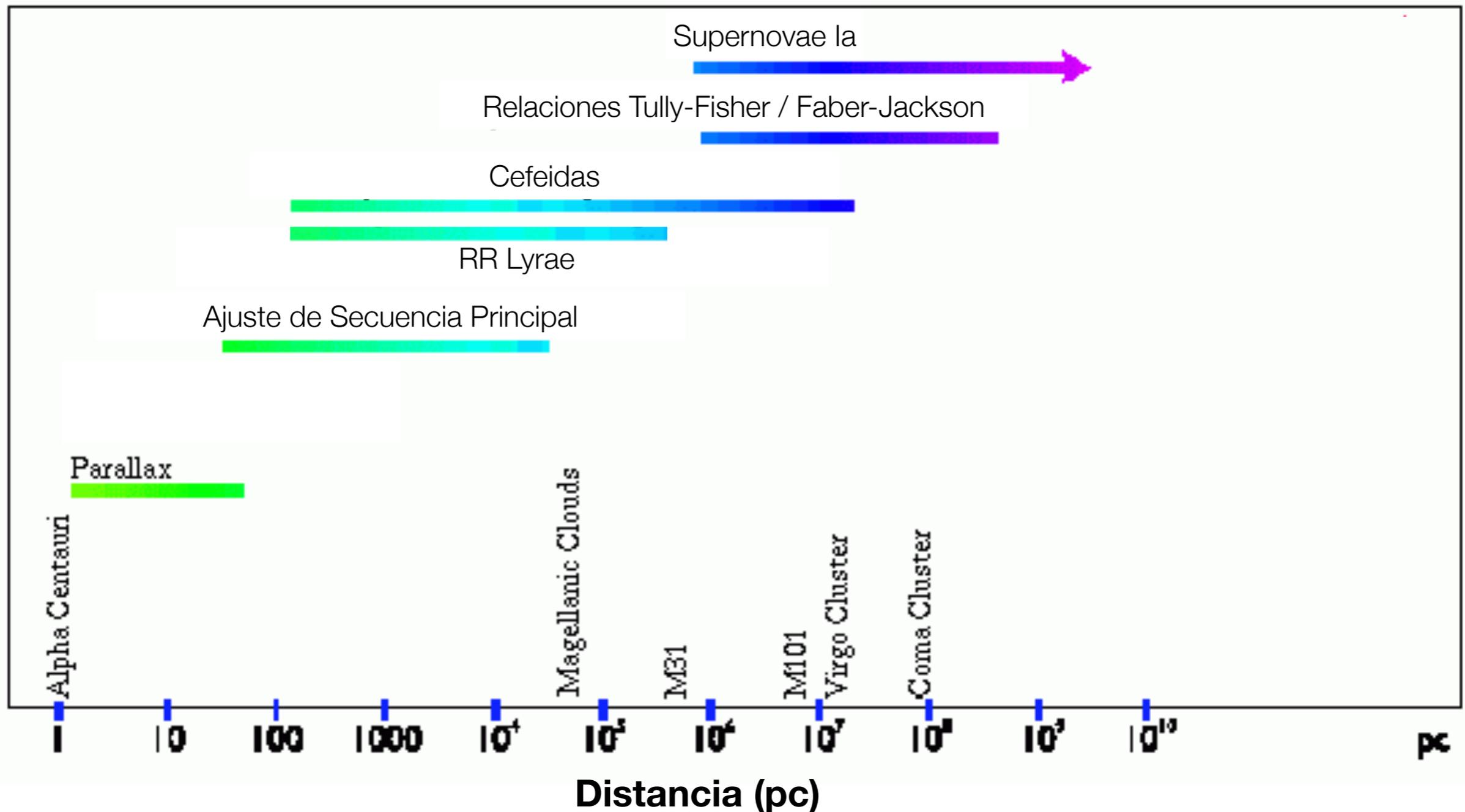


15 micro-segundos de arco es el ángulo que subtiende **una moneda de 2 pesos .... puesta en la Luna!**

# La Escala de Distancias

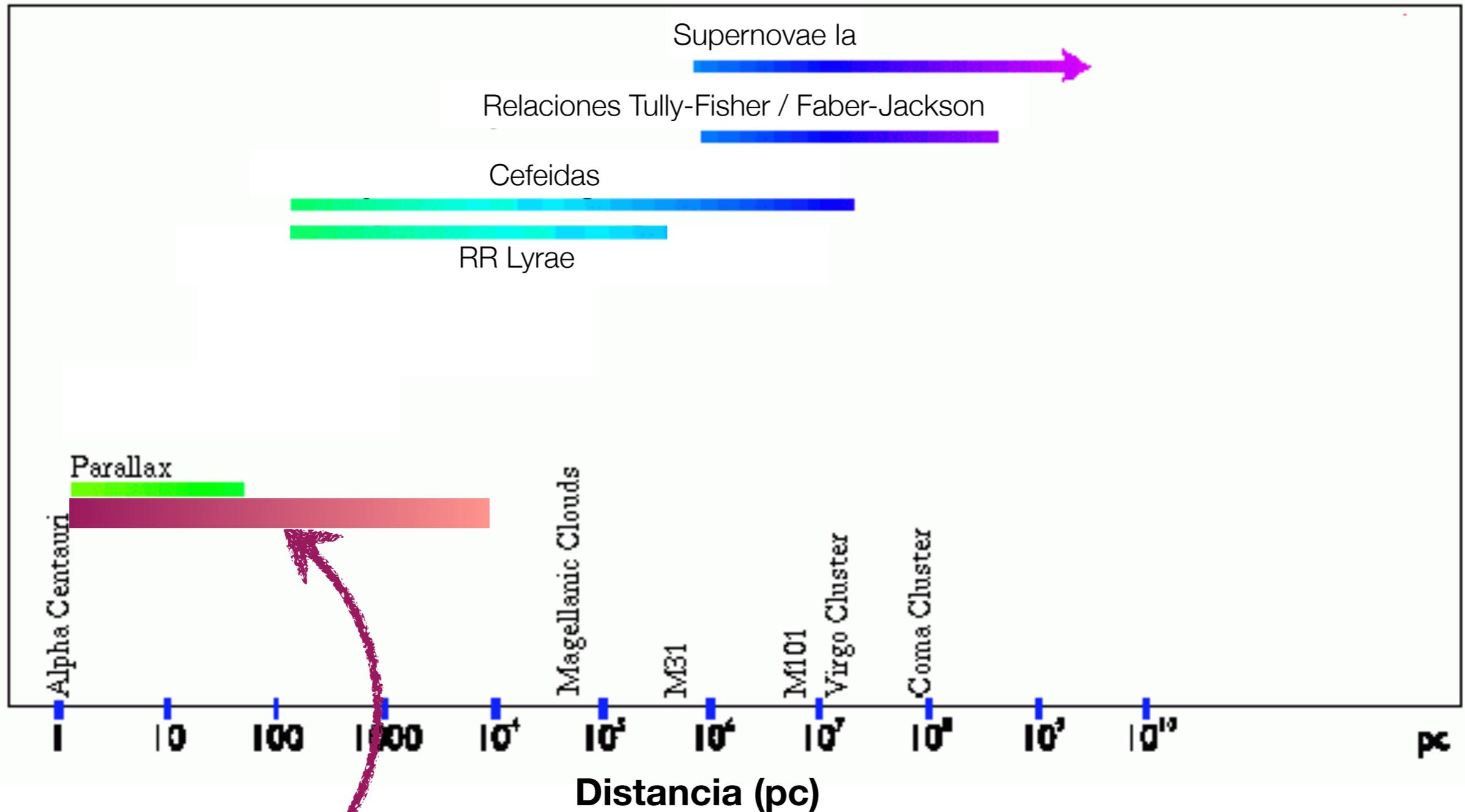


# La escala de distancias



**Importante:** El rango de distancias que cubre cada “peldaño” solapa con el anterior y depende de éste, y por lo tanto, de todos los anteriores implícitamente.

# La escala de distancias



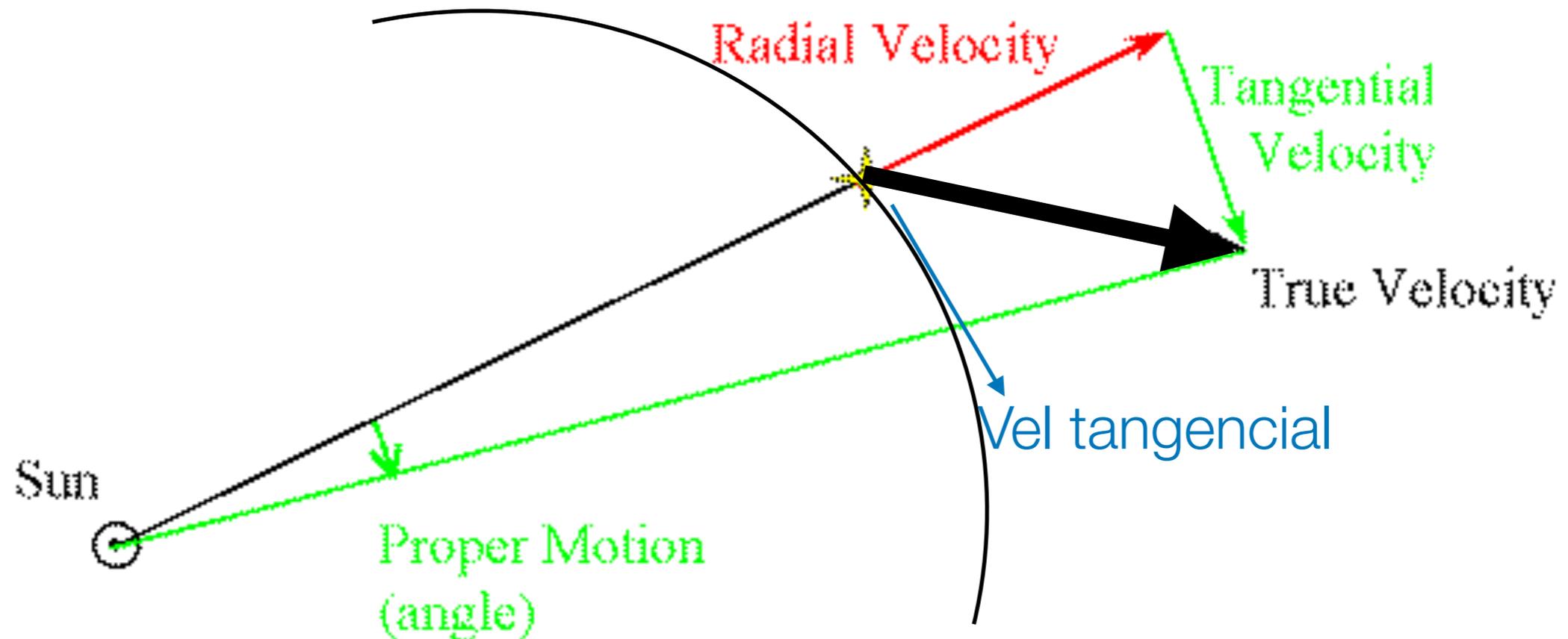
## Gaia DR2-DR4

Con Gaia ahora (desde 2018) se pueden calibrar directamente las relaciones P-L con medidas del paralaje de RRLs y Cefeidas (se elimina un peldaño intermedio)

Medida de la velocidad

# La medida de la velocidad: Velocidad Tangencial y Velocidad Radial

- Primero, descomponemos la velocidad en dos componentes: tangencial (en el plano del cielo) y radial (en la dir hacia el observador)

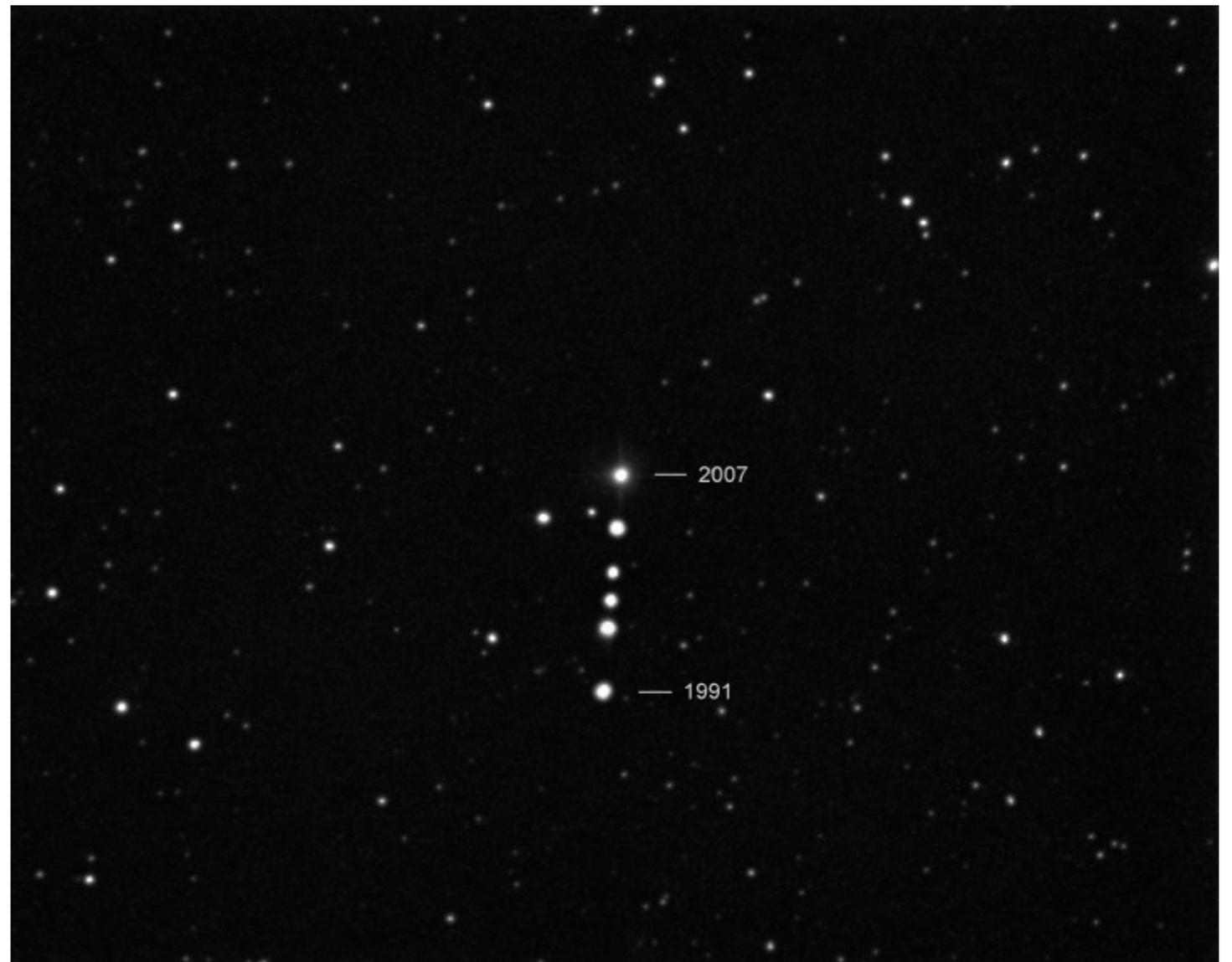


$$\text{Movimiento propio} = \text{Vel. angular} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{V_{tan}}{D}$$

# La medida de velocidad (I): **movimiento propio**

---

- Para objetos cercanos podemos medir el cambio de posición angular en el cielo (movimiento propio)
- Se mide típicamente en milisegundos de arco por año



# La medida de velocidad (I): **movimiento propio**

---

- Para objetos cercanos podemos medir el cambio de posición angular en el cielo (movimiento propio)
- Se mide típicamente en mili-segundos de arco por año
- La misión Gaia es capaz de medir movimiento propio con una precisión de decenas de micro-arcsec/año



# La medida de velocidad (II): **Velocidad Radial**

---

- podemos medir la velocidad radial (en dirección acercándose o alejándose de nosotros)

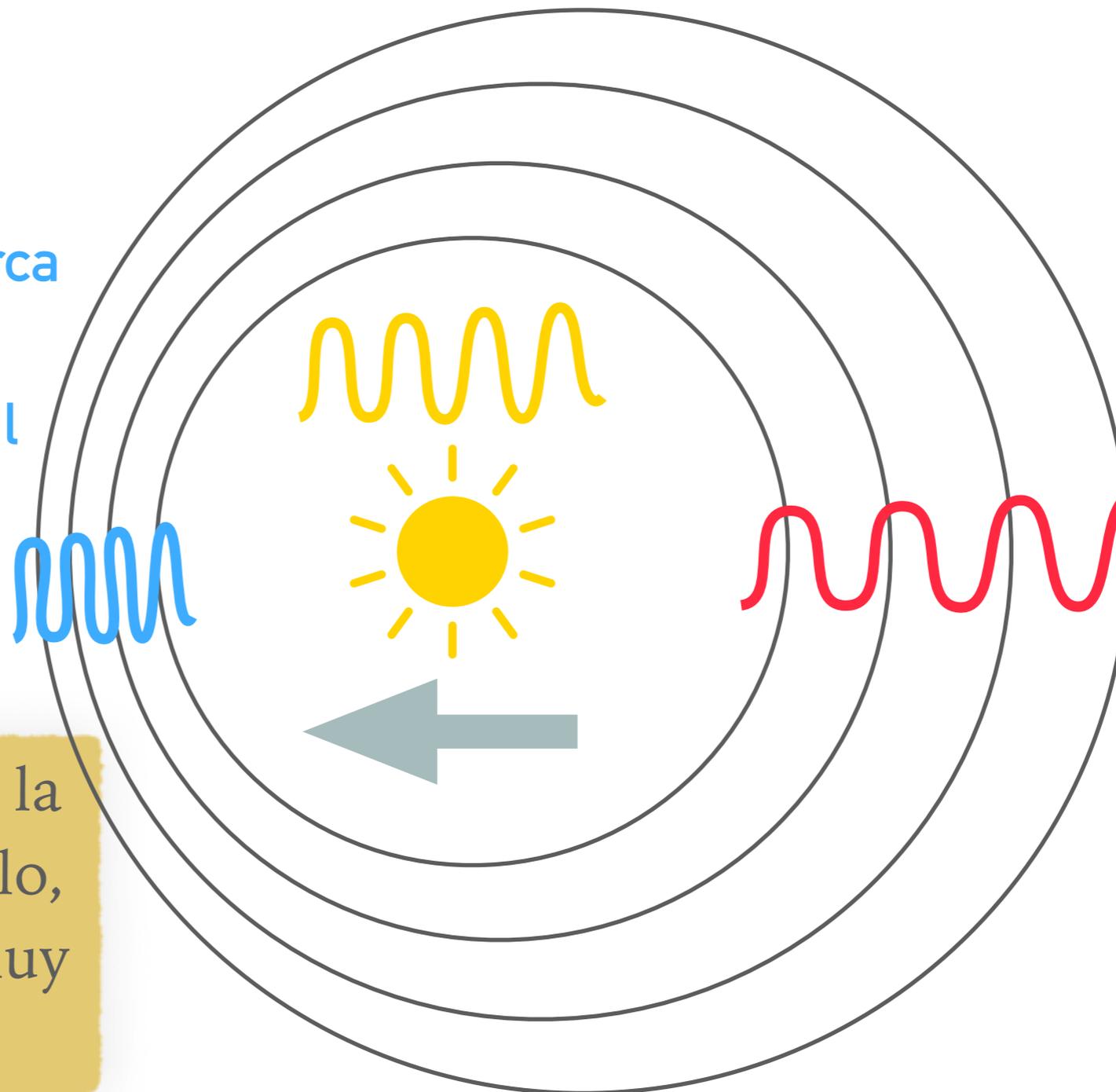
**Efecto Doppler:**  
cambio en tono del sonido según la velocidad de la fuente



# La medida de velocidad (II): **Velocidad Radial**

**Efecto Doppler:**  
cambio en tono del sonido según la velocidad de la fuente

se acerca  
=  
+ azul



se aleja  
=  
+ roja



esto mismo pasa con la luz y podemos medirlo, incluso en galaxias muy lejanas

# El Corrimiento al Rojo (Redshift)

El corrimiento al rojo  $z$  se define como

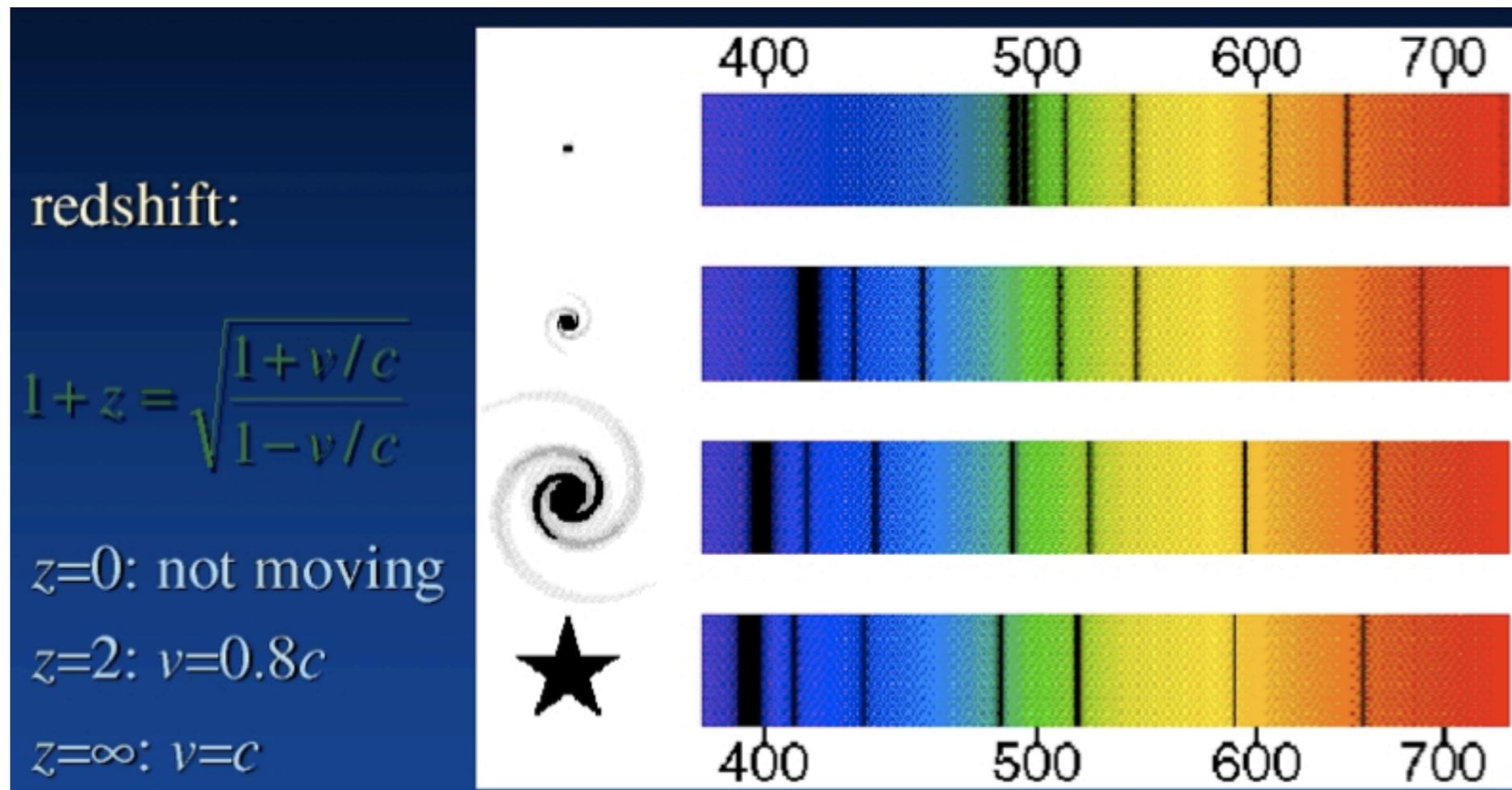
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{reposo}}{\lambda_{reposo}}$$

La expresión clásica que relaciona  $z$  con la velocidad radial:

$$z = \frac{v_r}{c}$$

La expresión relativista es la más general y está dada por:

$$z = \frac{1 + v_r/c}{\sqrt{1 - v_r^2/c^2}} - 1$$



# ¿Cómo conocemos las Propiedades de la Estrellas?

---

- **Propiedades Extrínsecas:**

- **Posición:** Angular + Distancia (Paralaje)
- **Velocidad**

- **Propiedades Estelares (Intrínsecas):**

- Temperatura
- Luminosidad
- Radio
- Masa

- **Propiedades Aparentes** (dependen tanto de las intrínsecas, como de las extrínsecas):

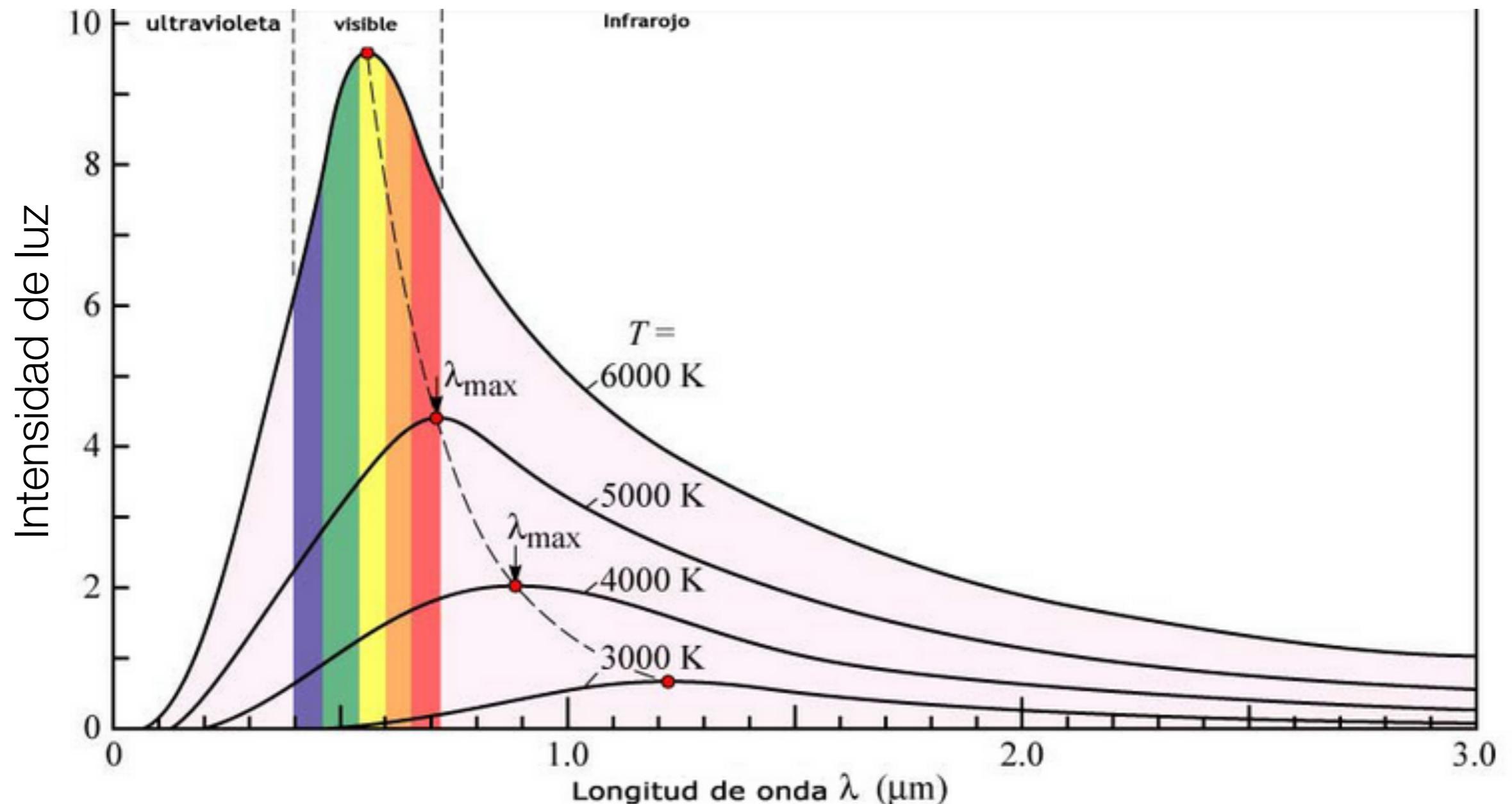
- Ej.: Brillo observado, tamaño angular...

# Espectros Estelares, Magnitudes y Colores

Cuerpo Negro (Repasar CTE I)

# Radiación de Cuerpo negro (CTE I - Repaso)

- Un **cuerpo negro** es un objeto que absorbe toda la energía (no refleja) que incide sobre él y la re-emite por completo (sin pérdida) - [Kirchoff 1862]



- Cuidado: el *cuerpo negro* no es negro, emite radiación en todas las longitudes de onda

# Radiación de Cuerpo negro

- La predicción de la forma analítica del espectro de un cuerpo negro de temperatura  $T$  es uno de los grandes éxitos de la teoría cuántica (lo verán en Física Moderna)

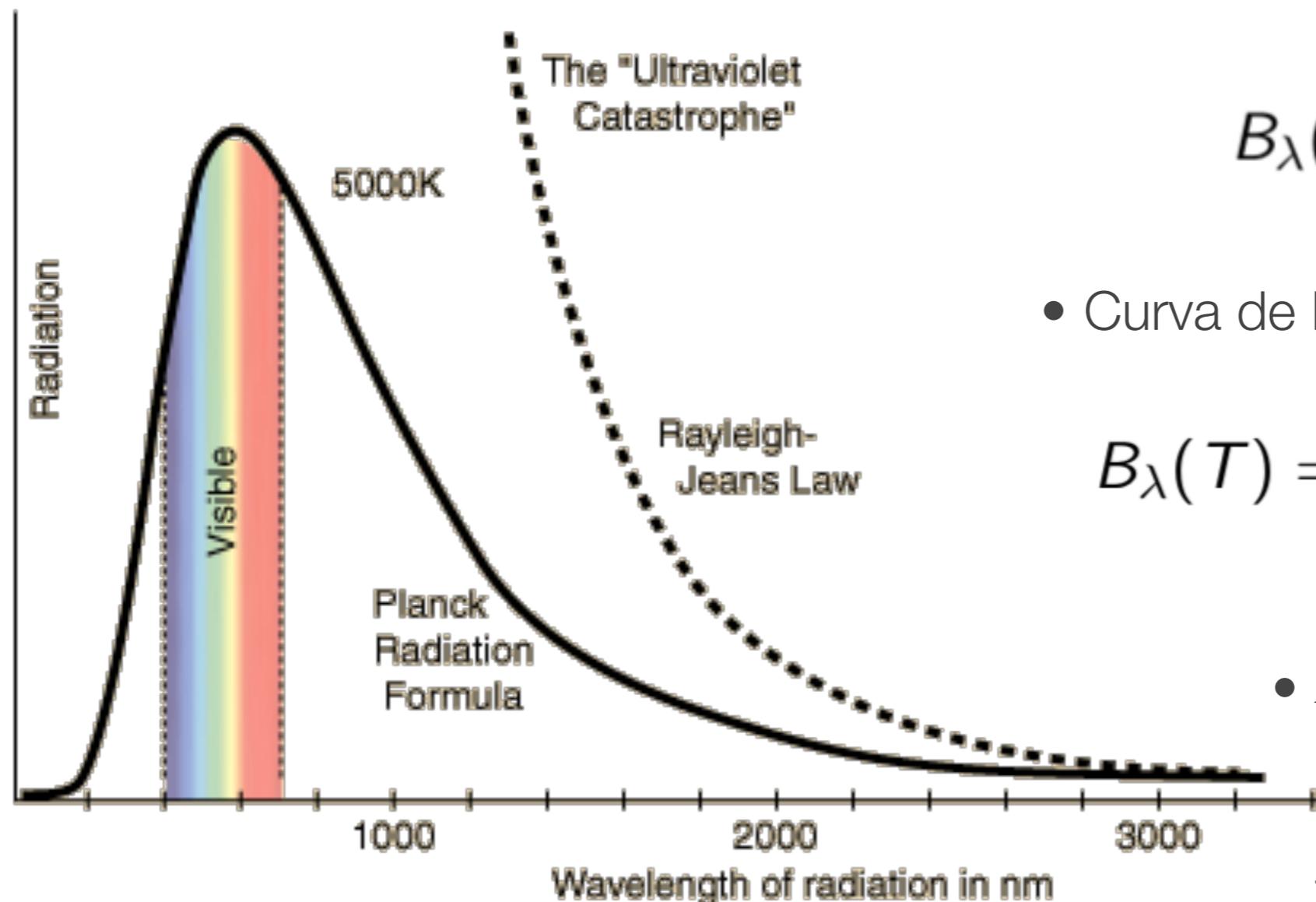
- Modelo clásico de Rayleigh-Jeans:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}$$

- Curva de Planck (modelo cuántico):

$$B_{\lambda}(T) = \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$

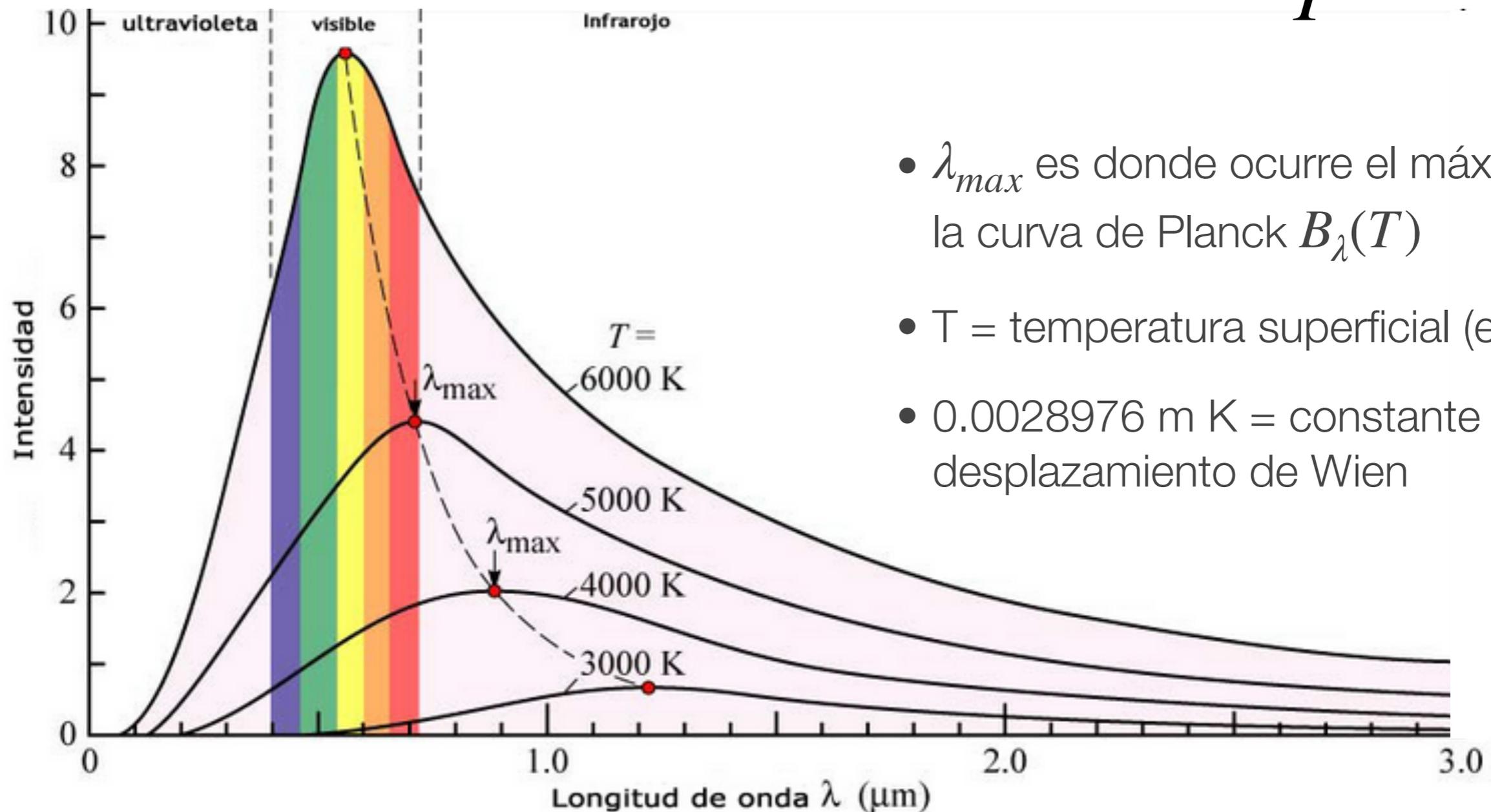
- $B_{\lambda}(T)$  es la cantidad de energía radiada por unidad de área por unidad de tiempo por longitud de onda



# Ley de desplazamiento de Wien

- **Ley de Wien:** La longitud de onda del máximo de emisión de un cuerpo negro es inversamente proporcional a su temperatura

$$\lambda_{max} = \frac{0.0028976 \text{ m K}}{T}$$



- $\lambda_{max}$  es donde ocurre el máximo de la curva de Planck  $B_{\lambda}(T)$
- T = temperatura superficial (en K)
- 0.0028976 m K = constante de desplazamiento de Wien

# Ley de Stefan-Boltzman

---

- La cantidad de energía total  $B(T)$  que emite un cuerpo negro es mayor cuanto mayor es su temperatura
- Se calcula haciendo la integral de la curva de Planck en  $\lambda$ :

$$B(T) = \int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} d\lambda$$

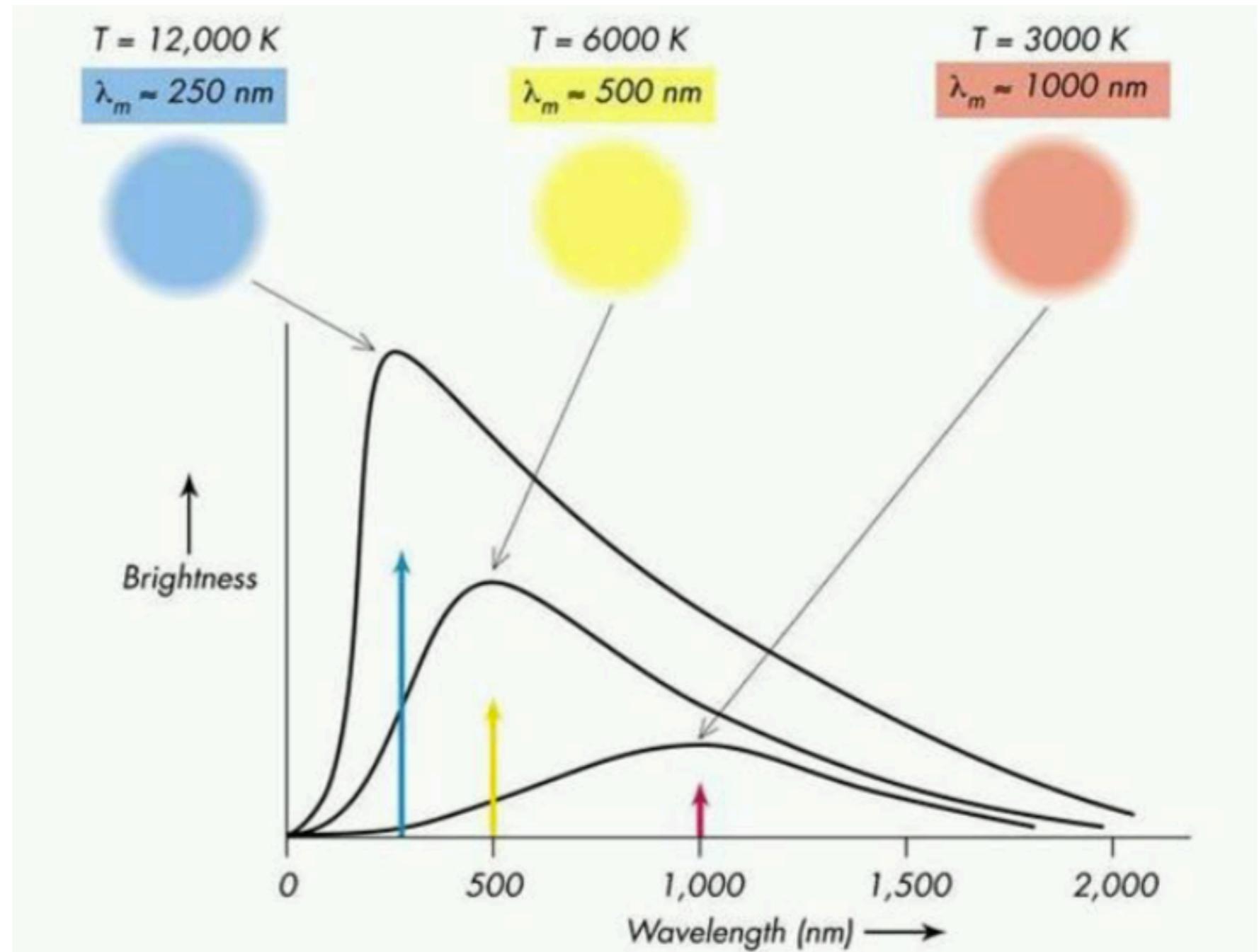
- El resultado es la **Ley de Stefan-Boltzman**:

$$B(T) = \sigma T^4$$

- La energía total (por unidad de área por unidad de t) es **simplemente proporcional a la temperatura a la 4!**

# Resumen - Cuerpo Negro

- El pico de emisión de un cuerpo negro de mayor temperatura ocurre a longitudes de onda más cortas (=frecuencias altas)
- Un cuerpo negro de mayor temperatura emite más energía total (por unidad de área)



# Flujo y Luminosidad

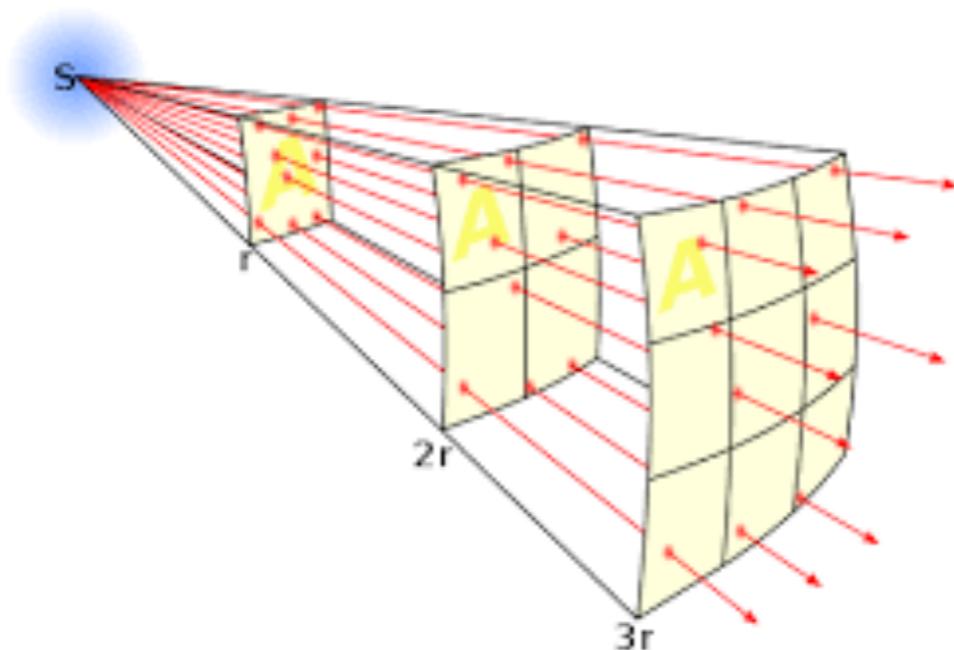
---

- La Luminosidad  $L$  es la energía **total** emitida (**por unidad de tiempo**) **por toda la superficie de la estrella** (de radio  $R$ ):

$$L = \text{Superficie} \times B(T) = 4\pi R^2 \times \sigma T^4$$

Luminosidad = Brillo intrínseco

- pero la fuente emite en todas direcciones, así que *si la fuente está a una distancia  $d$* , **lo que nos llega es el flujo**  $\equiv$  **cantidad de energía recibida por unidad de tiempo por unidad de área**:



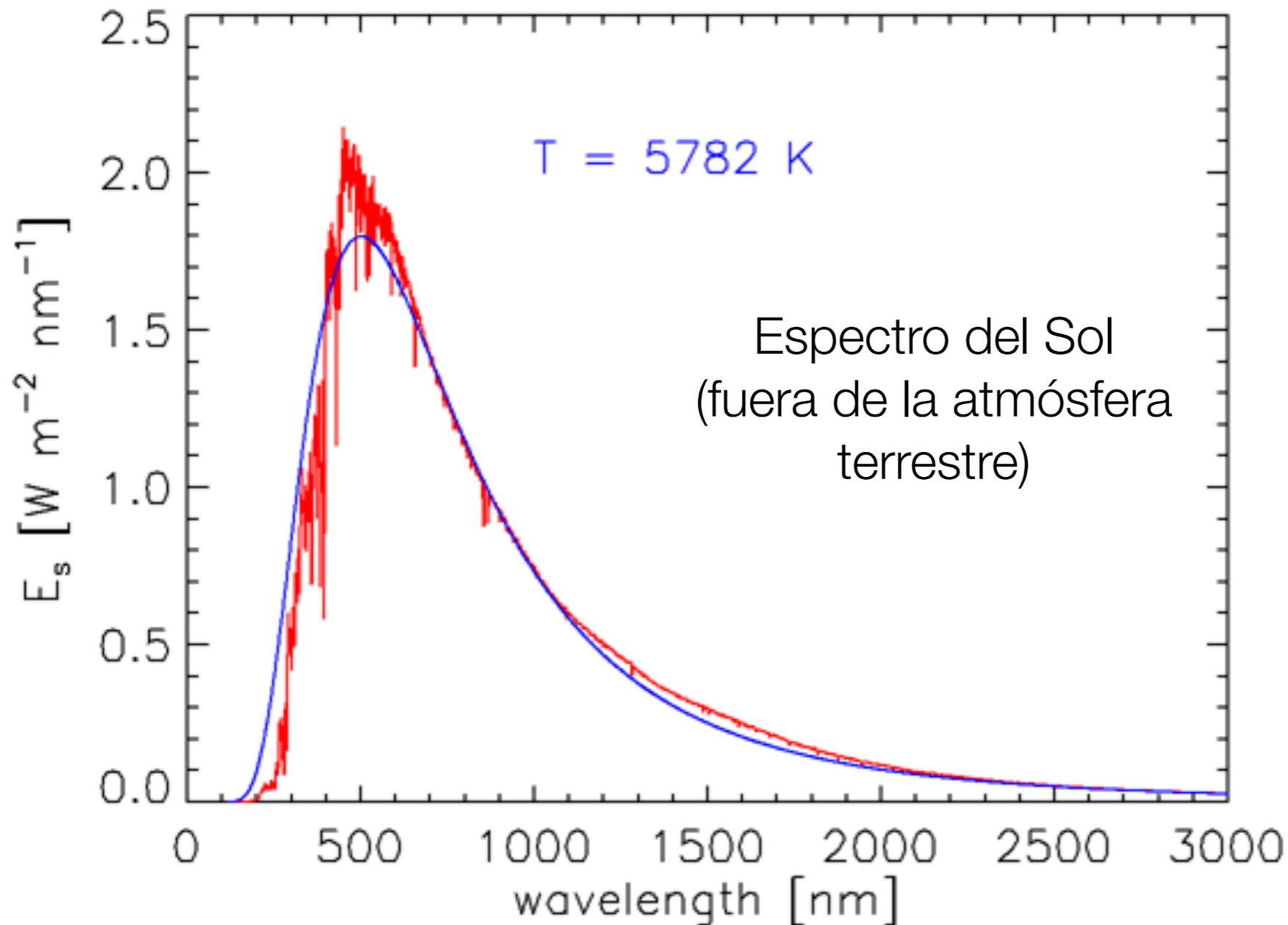
$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

Flujo = Brillo aparente

# Espectros Estelares

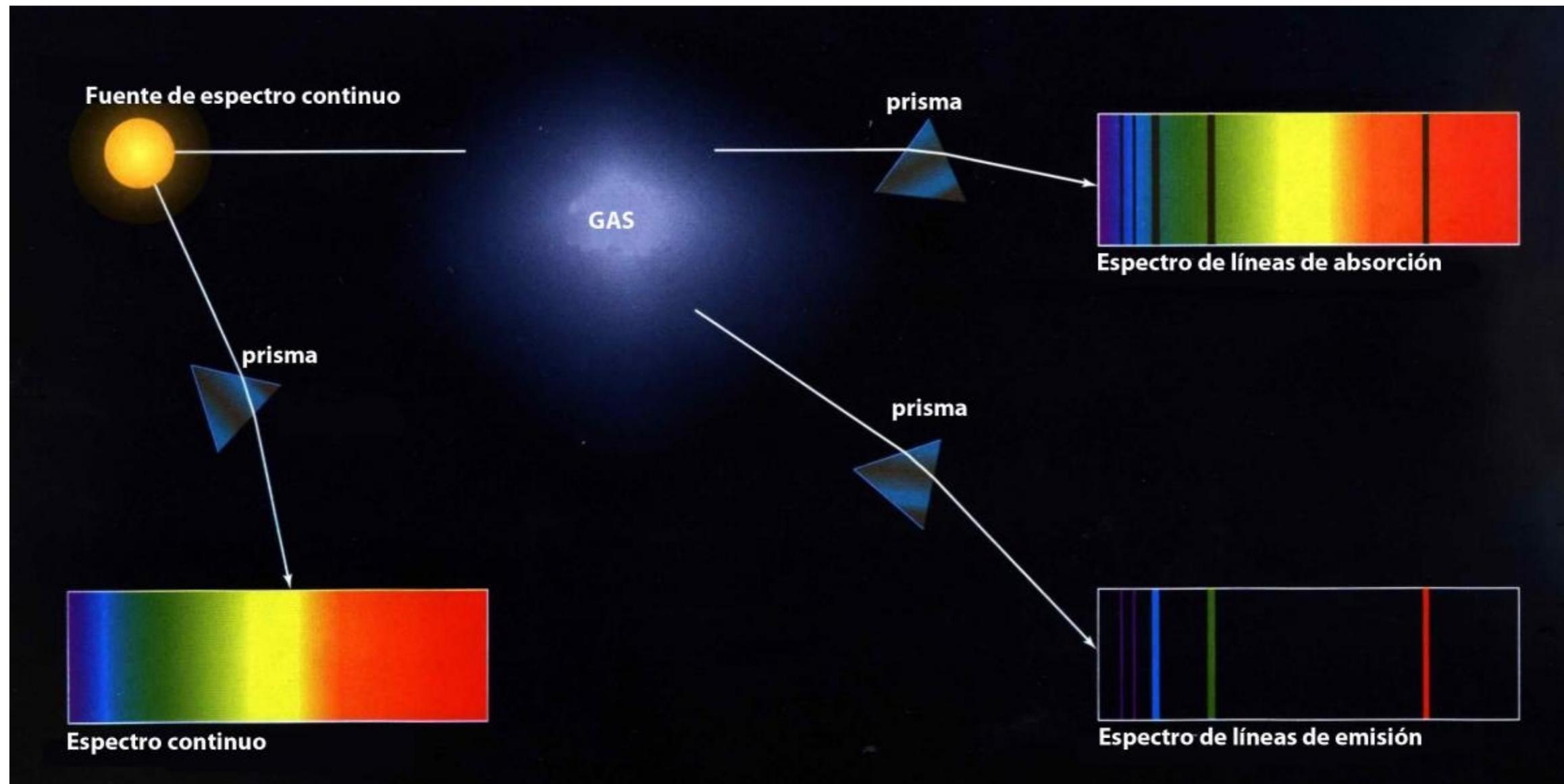
# Espectros Estelares

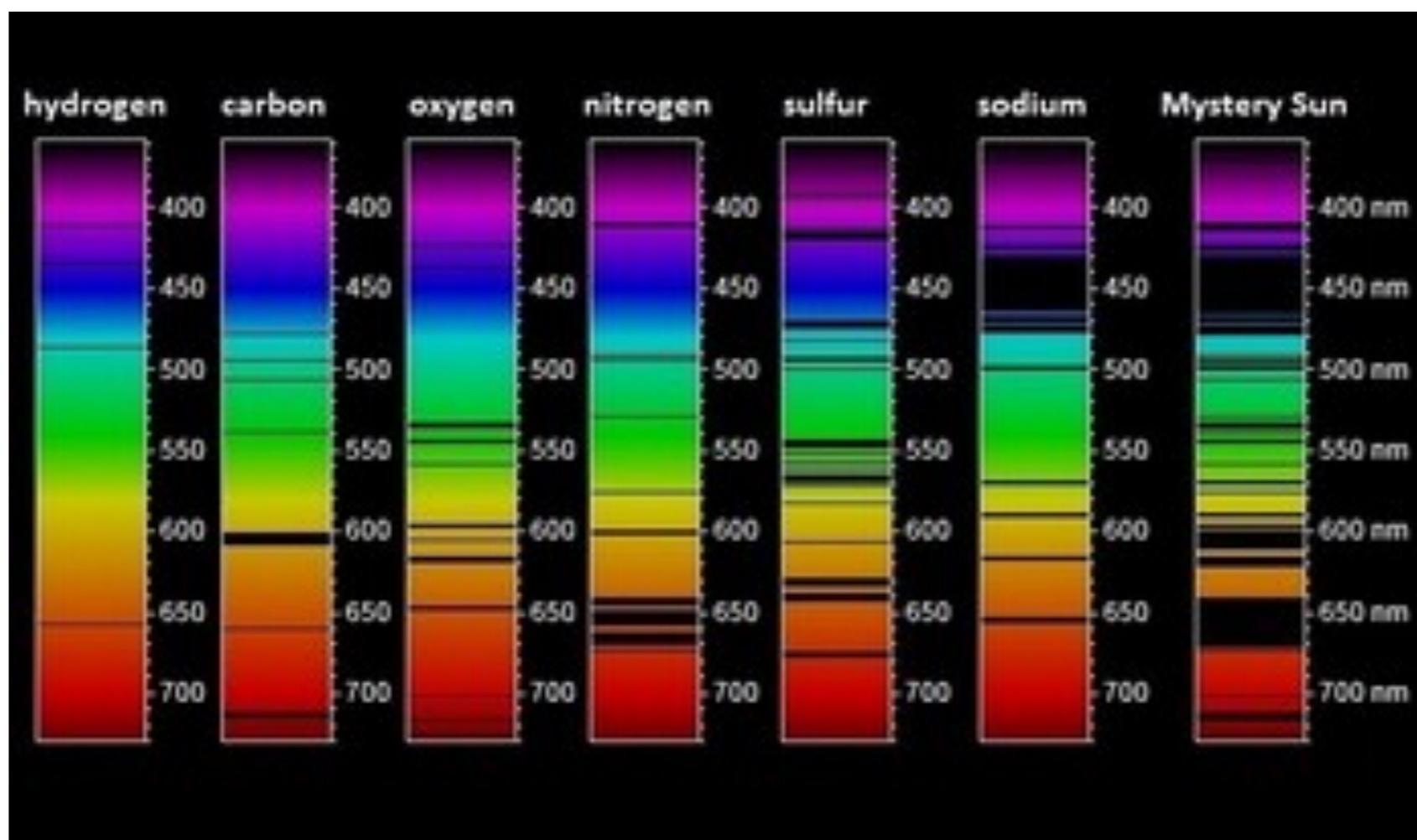
- Los espectros de la mayoría de las estrellas se pueden aproximar razonablemente bien por espectros de cuerpo negro
  - **Temperatura Efectiva:** la temperatura del cuerpo negro que emite la misma cantidad de energía total que la estrella



# Leyes de Kirchoff

- **1° Ley:** un sólido, líquido o gas emite un espectro continuo (ej. cuerpo negro)
- **2° Ley:** un gas caliente (excitado) emite un espectro de líneas discretas, característico de cada sustancia química
- **3° Ley:** un gas frío irradiado absorberá radiación del espectro continuo de la fuente en líneas discretas (en las mismas long. de onda del espectro corresp. de emisión)





## SPECTRA SHOWING DIFFERENT ELEMENTS

CARBON



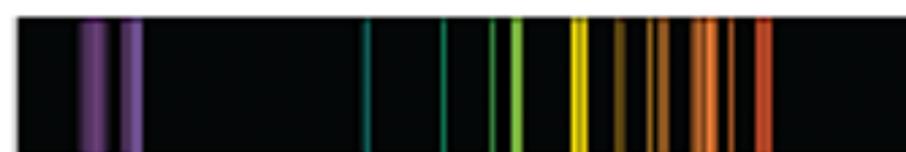
OXYGEN



NITROGEN

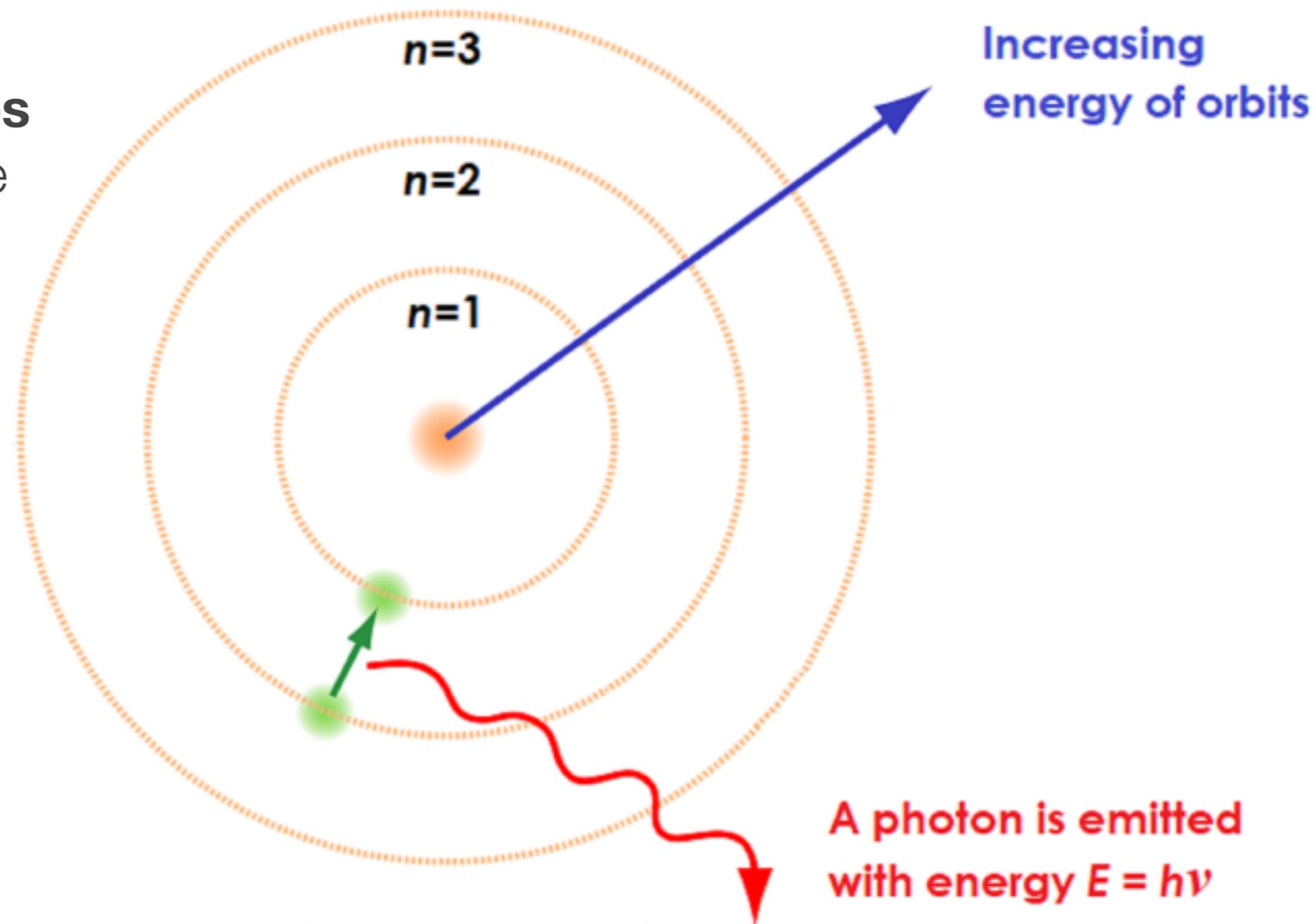


IRON



# Modelo cuántico del átomo

- La teoría cuántica explica por qué el espectro de emisión o absorción de un átomo (o molécula) es discreto
- Las líneas corresponden a transiciones entre los **niveles de energía del átomo**, que son **discretos** (están cuantizados)



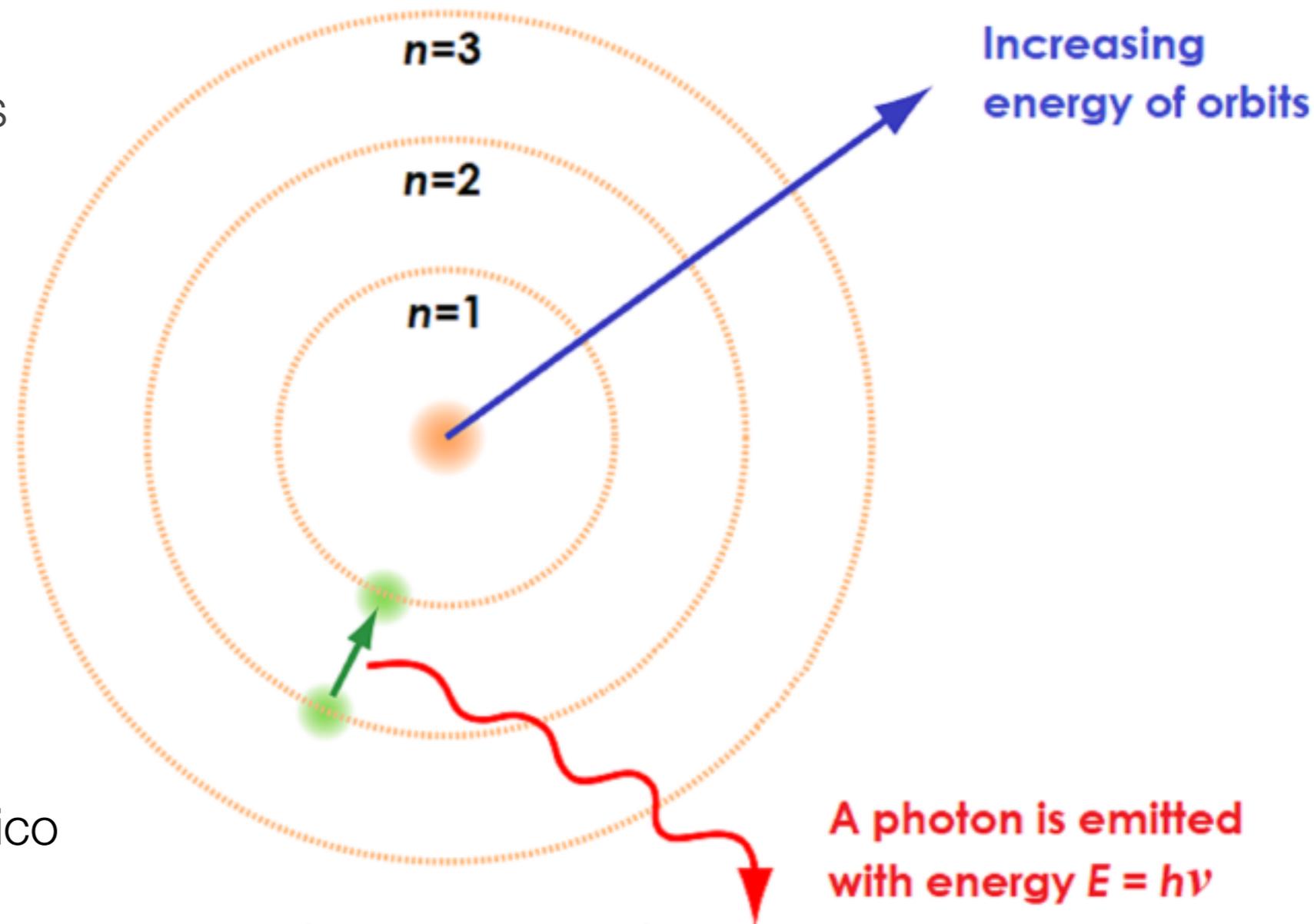
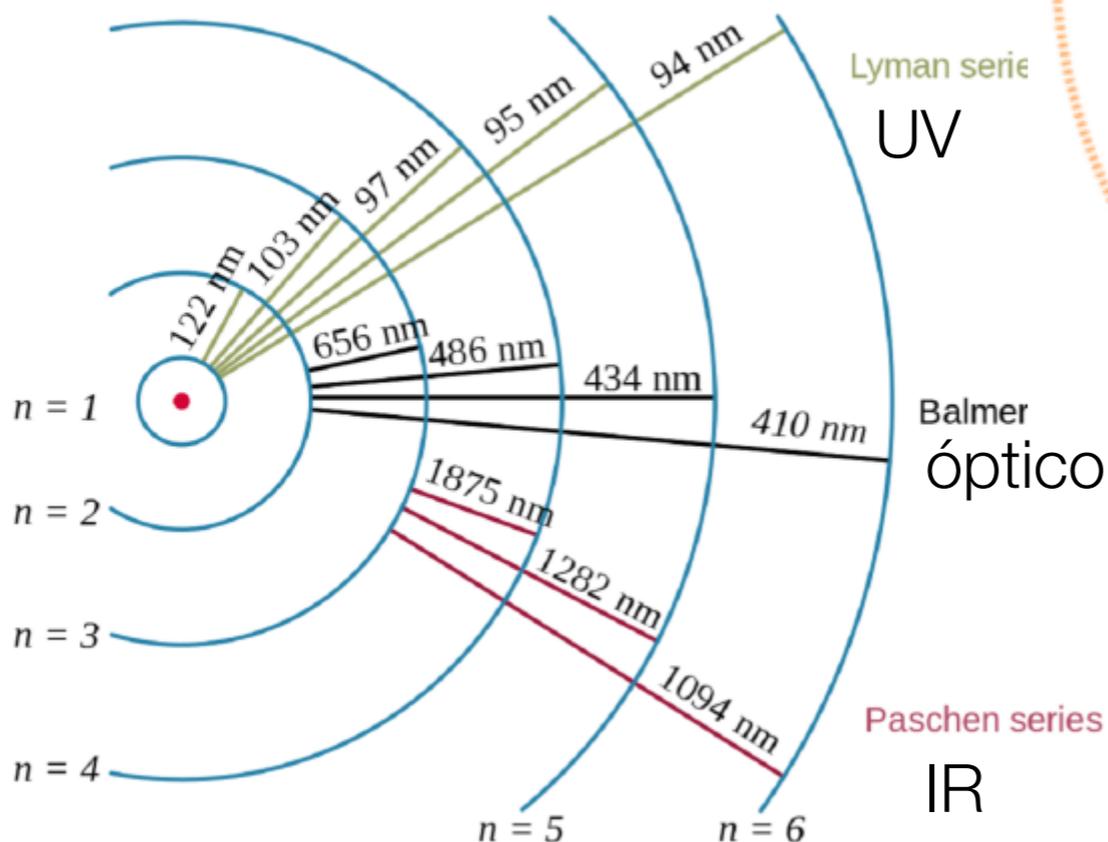
Energía de un fotón

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

# Modelo cuántico del átomo

- La teoría cuántica explica por qué el espectro de emisión o absorción de un átomo (o molécula) es discreto
- Las líneas corresponden a transiciones entre los niveles de energía del átomo, que son discretos (están cuantizados)

## Átomo de Hidrógeno

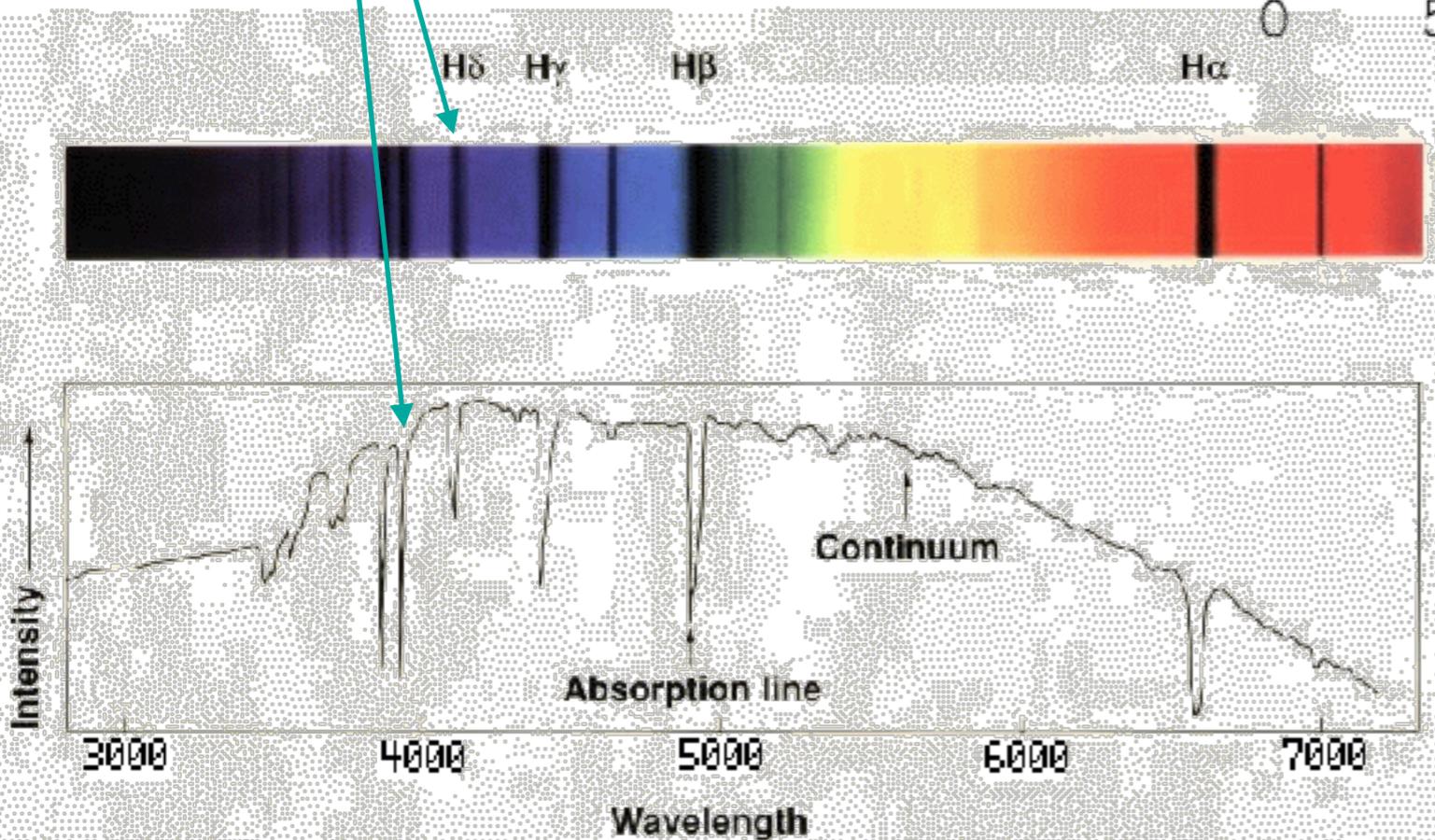
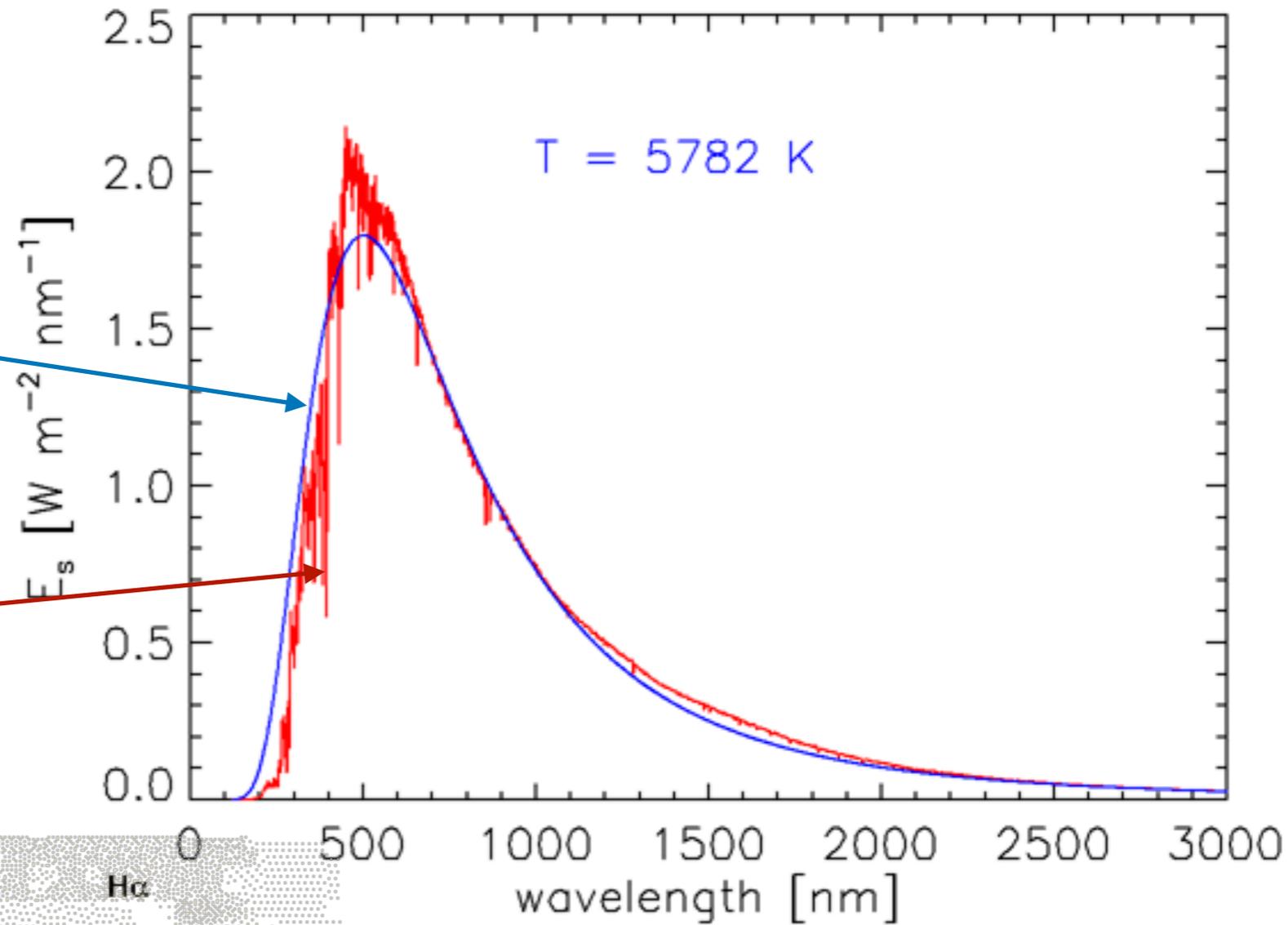


Energía de un fotón

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

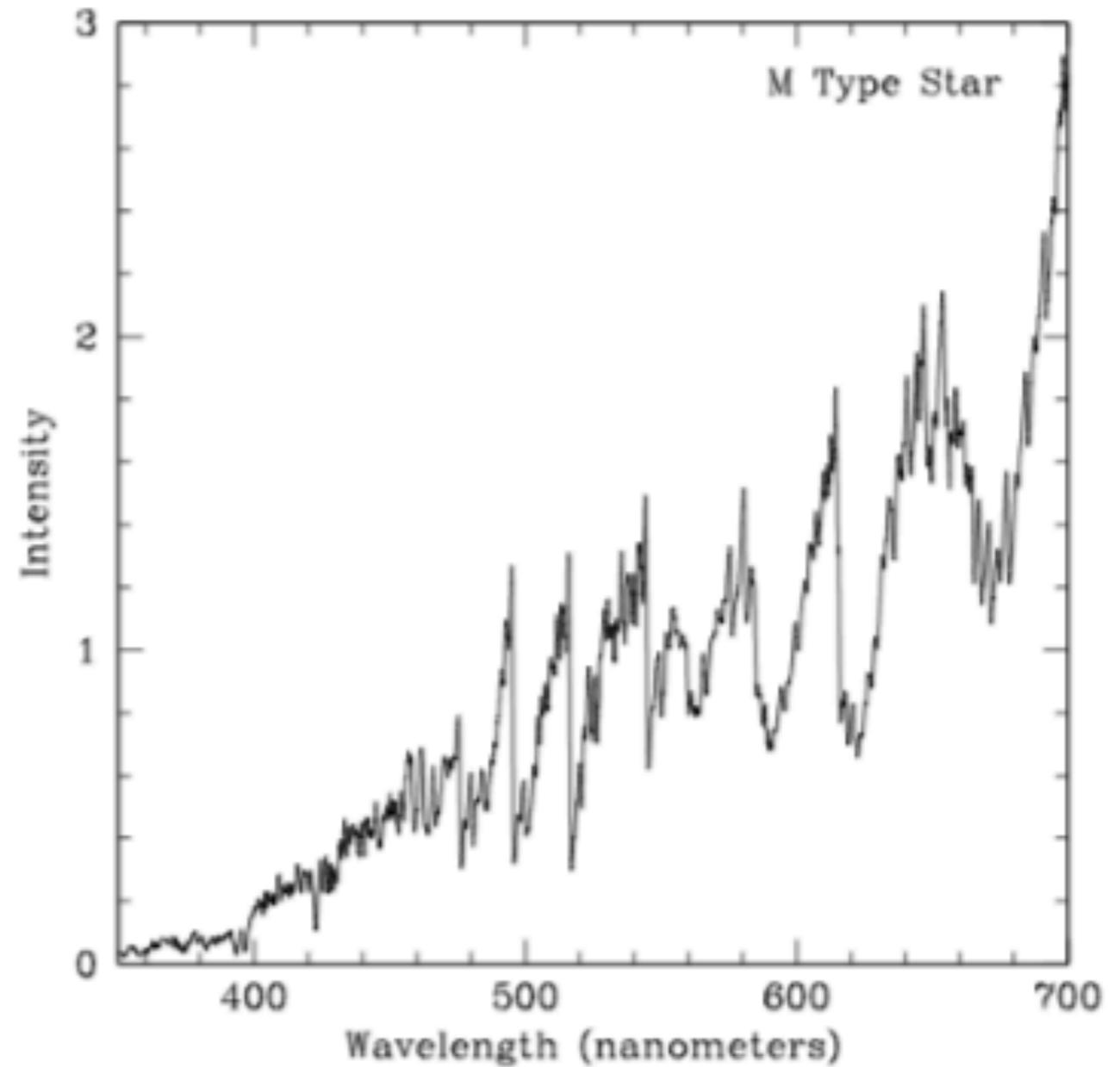
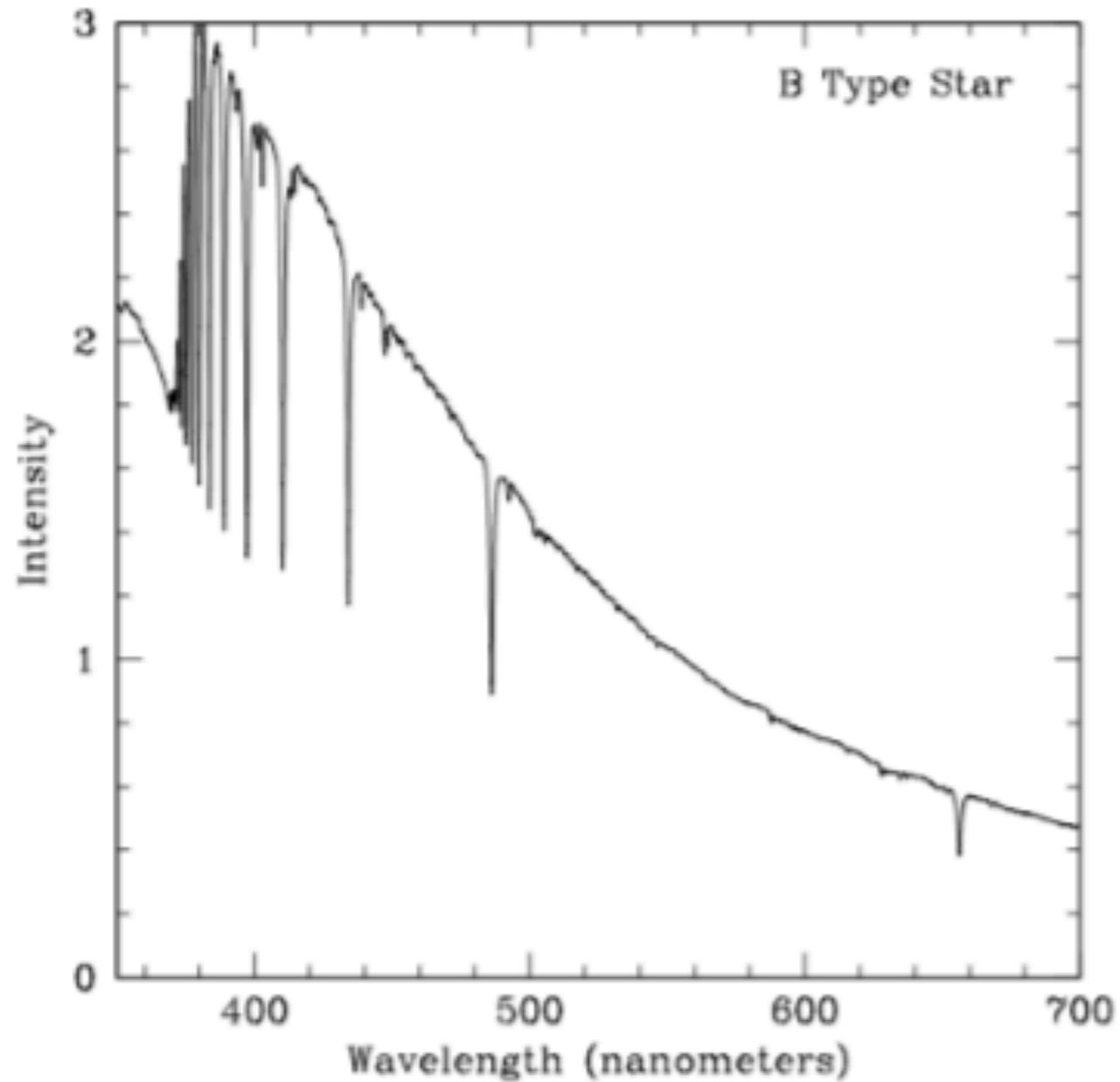
# Espectros Estelares

- El “continuo” de los espectros de la mayoría de las estrellas es aproximadamente como el de un cuerpo negro
- Sobre éste están las líneas de absorción de los diferentes elementos (y a veces de emisión también)



# Estrellas y temperaturas

---



¿cuál es más caliente?