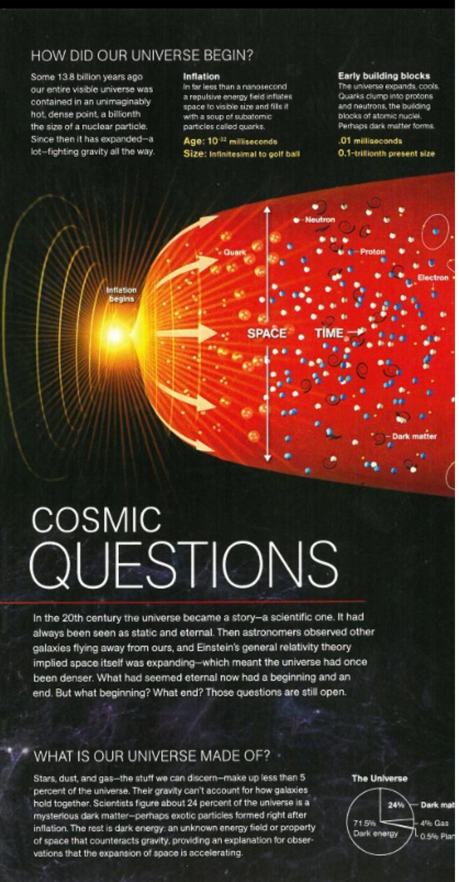
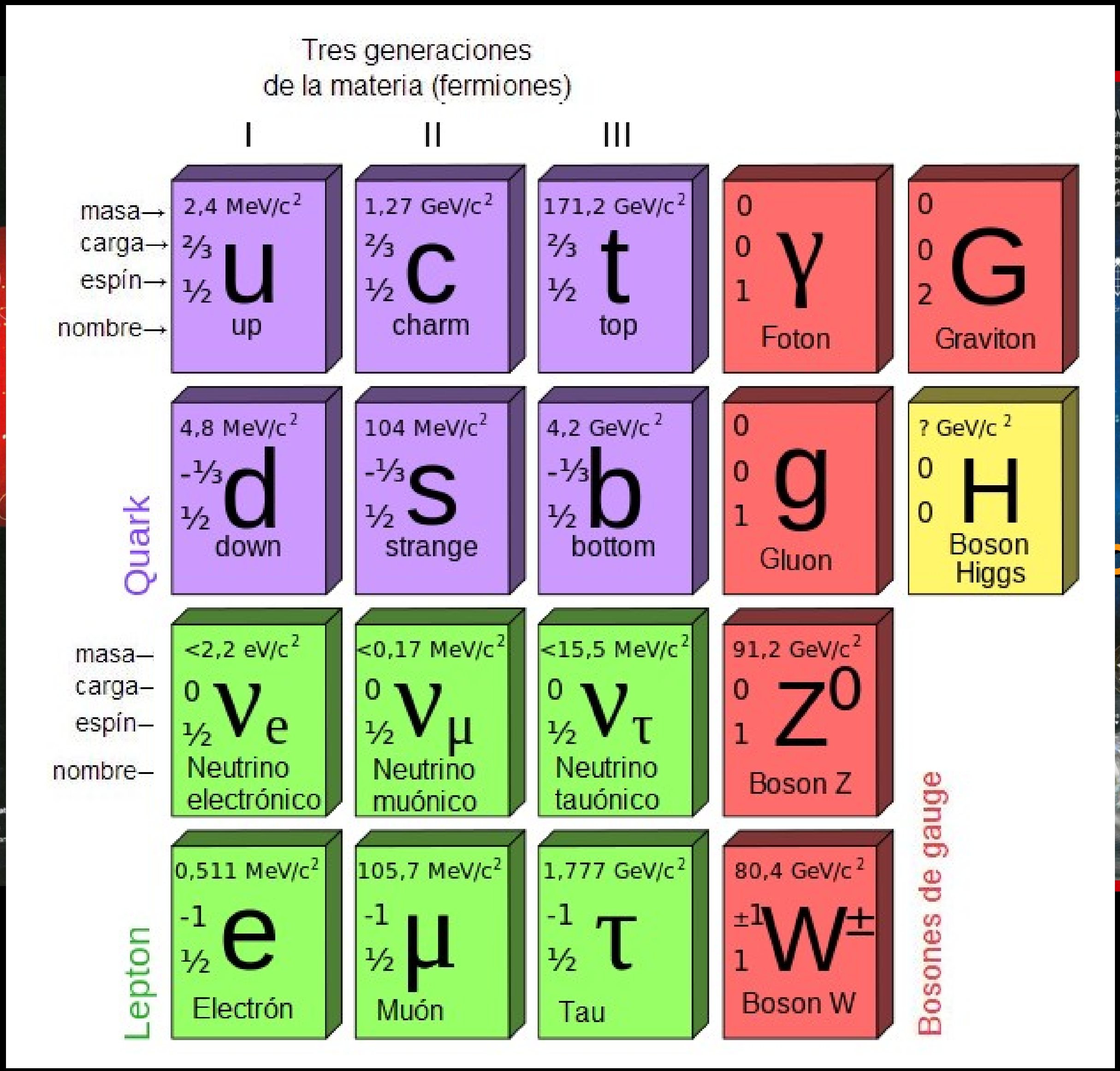
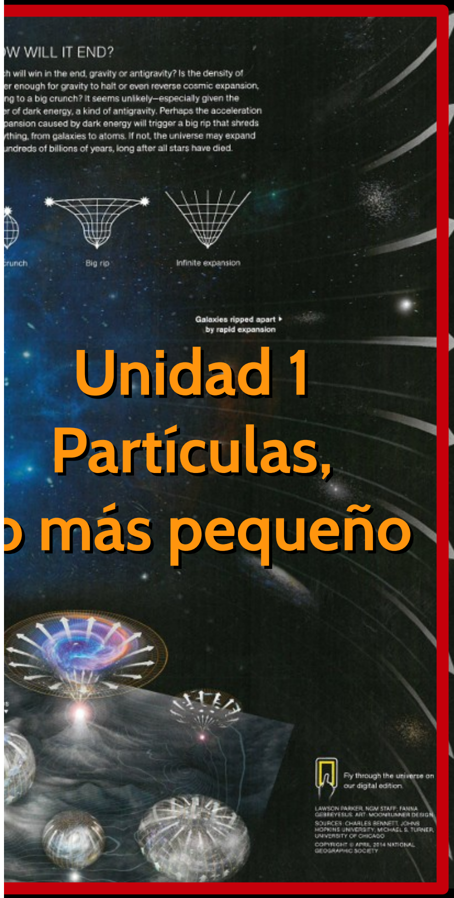
Universidad Nacional de Río Negro
Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2021

- **Unidad** 02–Astrofísica, estrellas y planetas
- **Clase** U02 C01 - 5/16
- **Fecha** 01 Sep 2021
- **Cont** Estrellas
- **Cátedra** Asorey

Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio







Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio

U2: Astrofísica, escalas intermedias
5 encuentros, del 01/Sep al 29/Sep

- Estrellas.
  - Modelos politrópico. La fusión nuclear estelar.
  - Clasificación estelar. Diagrama H-R.
  - Evolución estelar. Nebulosas.
- Planetas
  - El Sistema Solar
  - Exoplanetas
  - Vida en el Universo: Astrobiología.
- Trabajo unidad → fecha máxima de entrega 12/Nov

Estrellas

Objeto astronómico que consiste en un esferoide de plasma autogravitante y luminoso

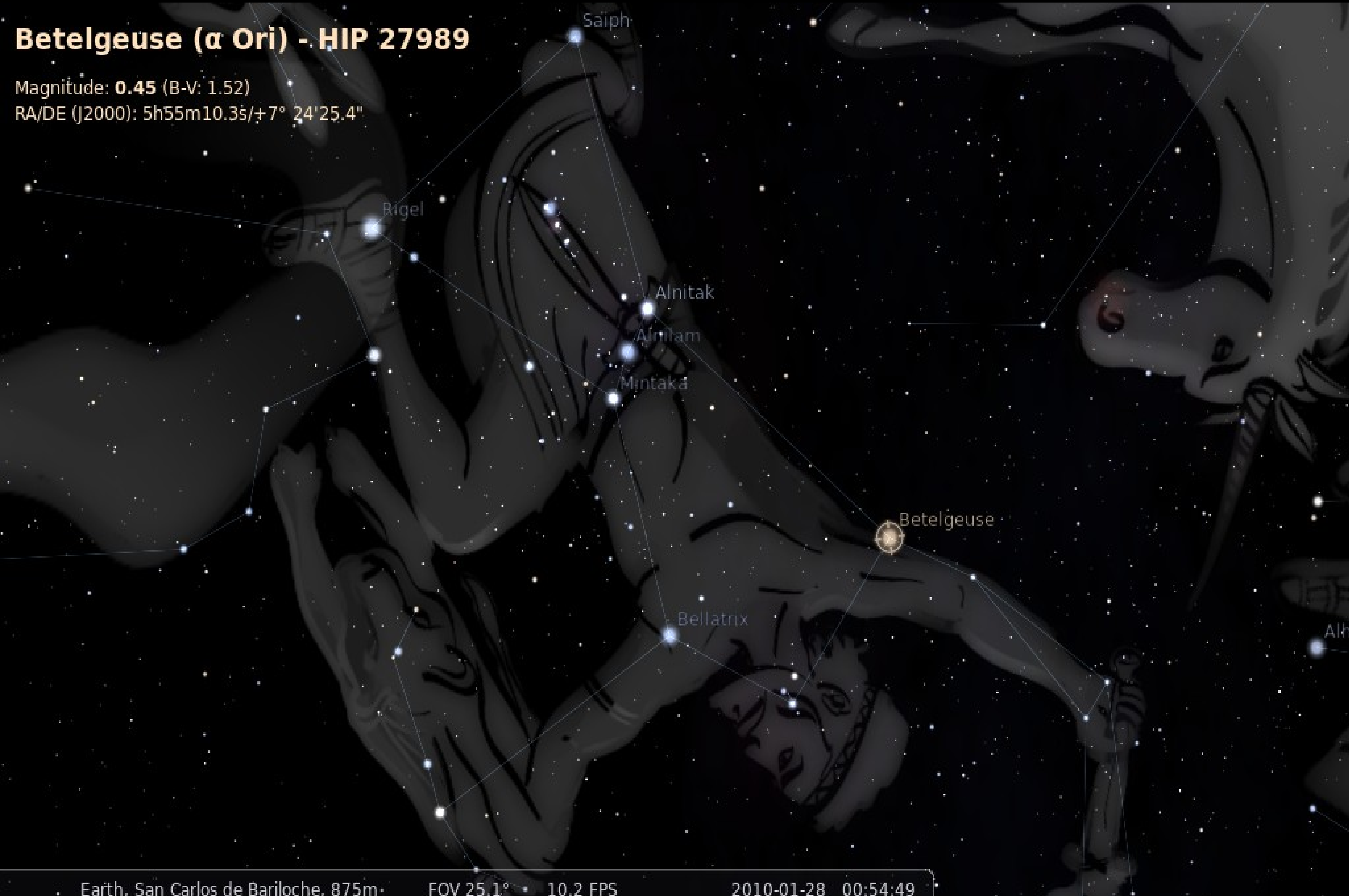
Orión, el cazador

Miremos al cielo... en el Norte!

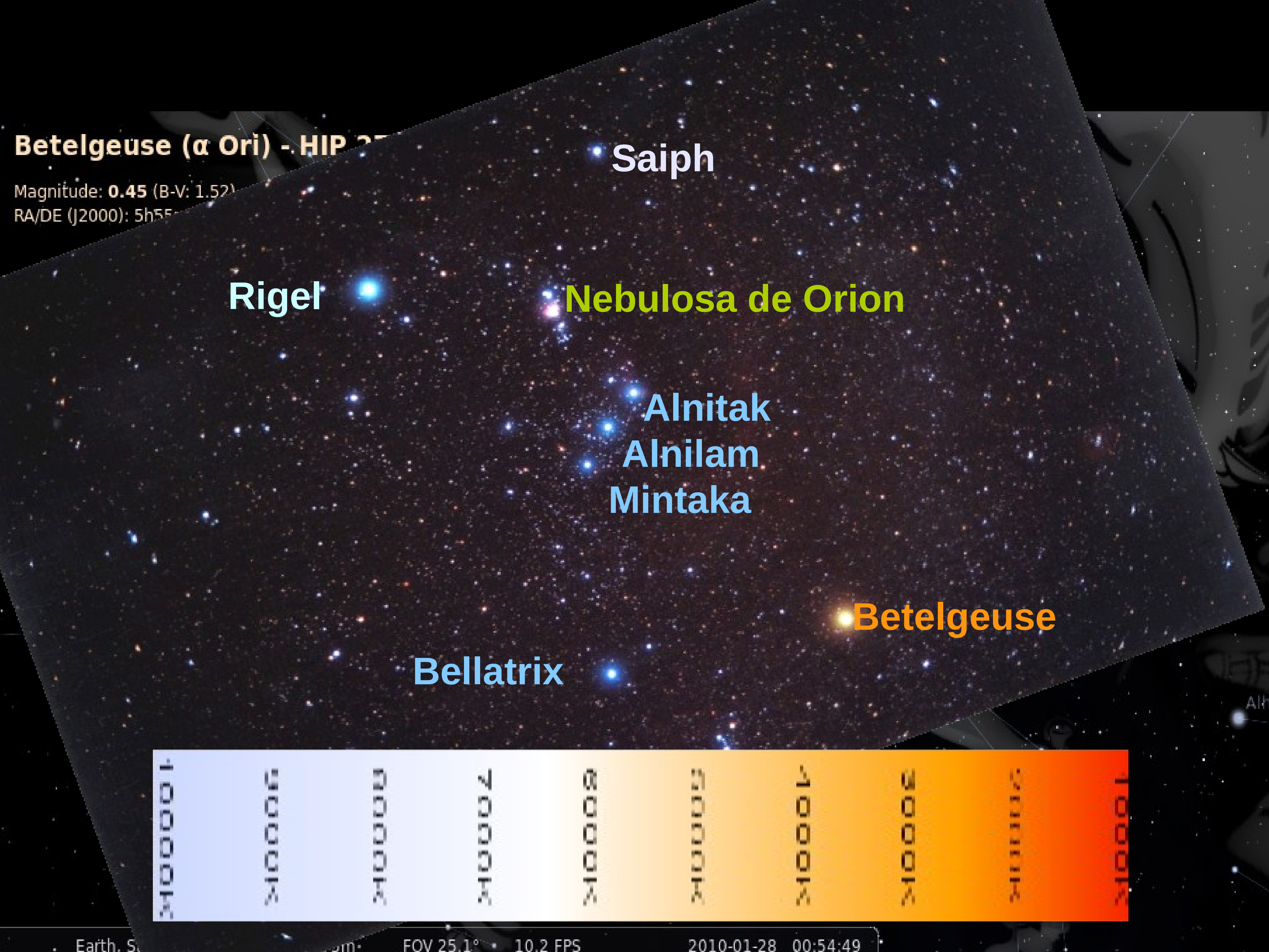
Miremos al cielo... en el Ecuador!

Miremos al cielo... en el Sur!

Miremos al cielo... en el Sur!



Miremos al cielo... en el Sur!


Saiph
Rigel
Nebulosa de Orion
Alnitak
Alnilam
Mintaka
Betelgeuse
Bellatrix
10000K
9000K
8000K
7000K
6000K
5000K
4000K
3000K
2000K
1000K
Magnitude: 0.45 (B-V: 1.52)
FOV 25.1°
10.2 FPS
2010-01-28 00:54:49

No todas son iguales

- Estado de evolución (edad)
- Temperatura
- Constitución inicial
- Masa
- **Energía emitida por unidad de tiempo: Luminosidad**

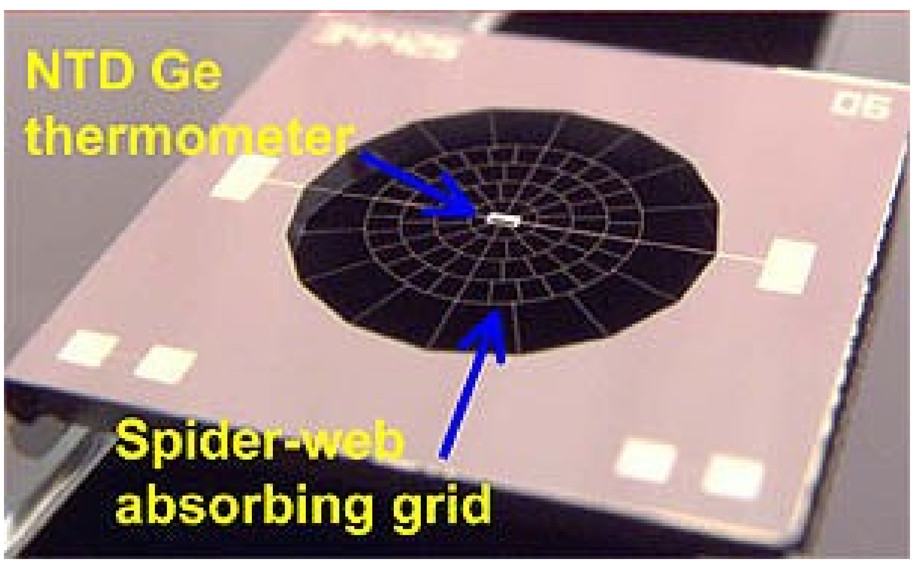
$$\boxed{L = \frac{\Delta E}{\Delta t}}$$

- Y además...

No todas están a la misma distancia

¿Cómo se mide la luminosidad?

- **Bolómetro**: instrumento para medir el flujo de radiación electromagnética en distintas bandas (IR,V,UV...)



- Uso la definición del flujo sobre la superficie esfera: $F = \frac{L}{4\pi d^2}$

- Conociendo la distancia ***d***, puedo calcular la luminosidad: $L = 4\pi d^2 F$

  Ó, conociendo L, calculo ***d***

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

Dos sistemas binarios

- Sistema Sirio (α-CMa), 8.6 al
- Binaria (50.1a):
  Sirio A (A1), Sirio B(dA2)

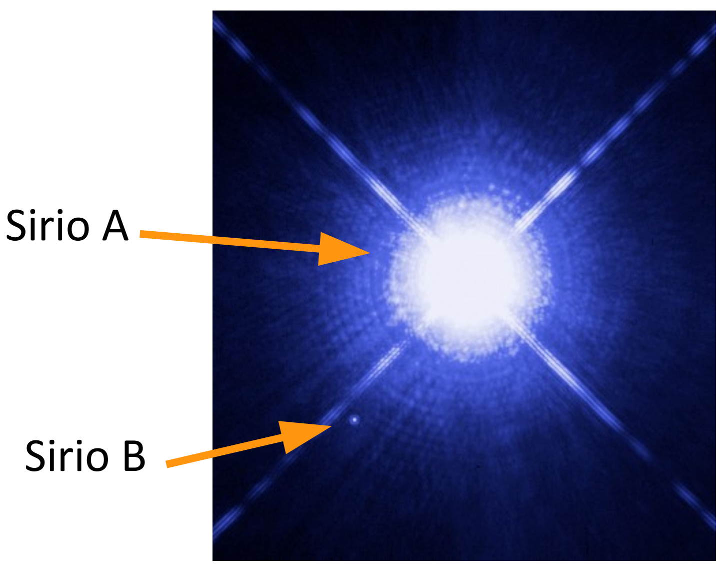
  $M=2\ M_{o}$ $T=9900K$

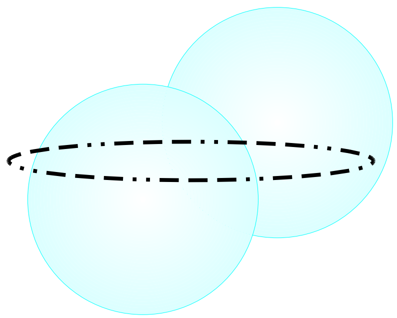
  $L=25\ L_{o}$ $R=1.7R_{o}$

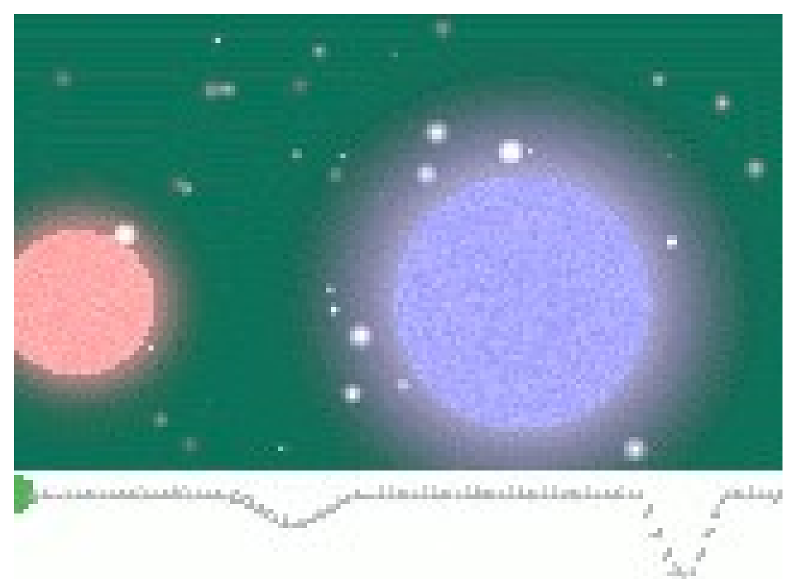
- Sistema Mintaka (δ-Ori), 900 al
- Binaria Eclipsante(5.73d): Mintaka A (O9.5) y Mintaka B (B0.5)

  $M=20M_{o}$ $T=33000K$

  $L=90000\ L_{o}$ $R=16R_{o}$








Sin embargo, en el cielo…

Sin embargo, en el cielo…

¿Cuál les parece que es la diferencia?

- Mintaka

  ($2x90000L_o/25L_o$)~7000 veces más luminosa que Sirio

- pero está

  (900al / 8.6al) ~ 100 veces más lejos respecto a Sirio

- **Magnitud aparente (m)**
  - **Brillo (b) de un cuerpo "visto" desde La Tierra**
  - Hiparco de Nicea (190AC-120AC) 850 est. ← Ptolomeo: Clasificó las estrellas en seis magnitudes: Magnitud **1**: Top 20, Magnitud **6**: Apenas visibles
  - **Norman Pogson (1829-1891):**
    - **Una estrella m=1(m_1) es 100 veces más brillante que una m=6(m_6)**

$$\frac{b_1}{b_6}=100$$

    - **¿Cómo se relacionan entre sí?**

Relación entre magnitudes

- Conviene usar un factor uniforme k:

$$\frac{b_1}{b_6}=100 \rightarrow \frac{b_1}{b_2}=k\,,\,\frac{b_2}{b_3}=k\,,\ldots \rightarrow b_1=k\,b_{2,}\,b_2=k\,b_3\ldots$$

- Entonces,

$$b_1=\left(k\,k\,k\,k\,k\right)b_6 \rightarrow \frac{b_1}{b_6}=k^5$$

Finalmente,

$$k^5=100 \rightarrow k=\sqrt[5]{100}=2.51189 \rightarrow \boxed{k\simeq 2.5}$$

Una estrella de brillo b_1 es dos veces y media más brillante que una estrella de brillo b_2

$$\boxed{b_i\simeq 2.5\,b_{i+1}}$$

Relación entre brillo y magnitud

- Ahora
  - a la estrella con brillo b_1 le asignamos magnitud m_1
  - a la estrella con brillo b_2 le asignamos magnitud m_2
- ¿Cómo se relaciona el factor de brillo con la diferencia en magnitudes?

$$¿\,(m_1 - m_2) \qquad b_1/b_2?$$

- La respuesta del ojo es logarítmica:

Relación entre brillo y magnitud

- Proponemos

$$\left(\frac{b_1}{b_2}\right)=2.5 \rightarrow \left(\frac{b_i}{b_j}\right)=2.5^{(m_j-m_i)}$$

- Si, $m_i=m_j \rightarrow m_i-m_j = 0 \rightarrow b_i = b_j$
- Si, $m_i=m_j+1 \rightarrow m_i-m_j = 1 \rightarrow b_i = 2.5\ b_j$
- Si, $m_i=m_j-1 \rightarrow m_i-m_j = -1 \rightarrow b_i = b_j/2.5$
- Despejando, se puede verificar que:

$$\left(\frac{b_i}{b_j}\right)=2.5^{(m_j-m_i)} \rightarrow \boxed{(m_i-m_j)=-2.5\log_{10}\left(\frac{b_i}{b_j}\right)}$$

¿Es cierto? Veamos

Supongamos dos estrellas, $m_i = 1$ y $m_j = 6$

$$m_i - m_j = -2.5 \log_{10}(b_i/b_j)$$

$$\rightarrow \quad -5 = -2.5 \log_{10}(b_i/b_j)$$

$$(-5/-2.5) = \log_{10}(b_i/b_j)$$

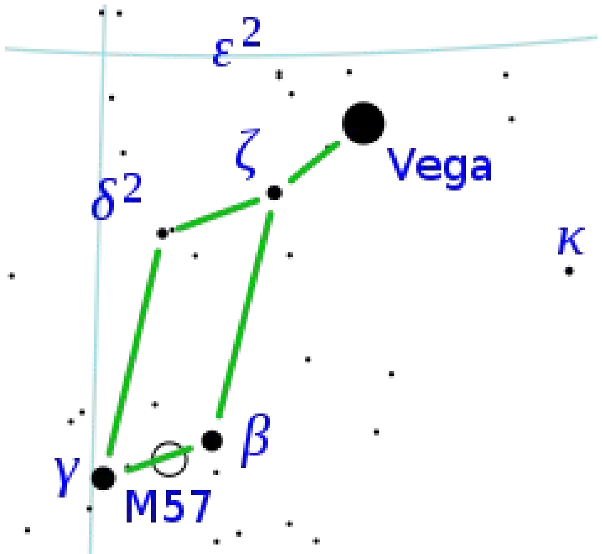
$$2 = \log_{10}(b_i/b_j)$$

$$10^2 = b_i/b_j$$

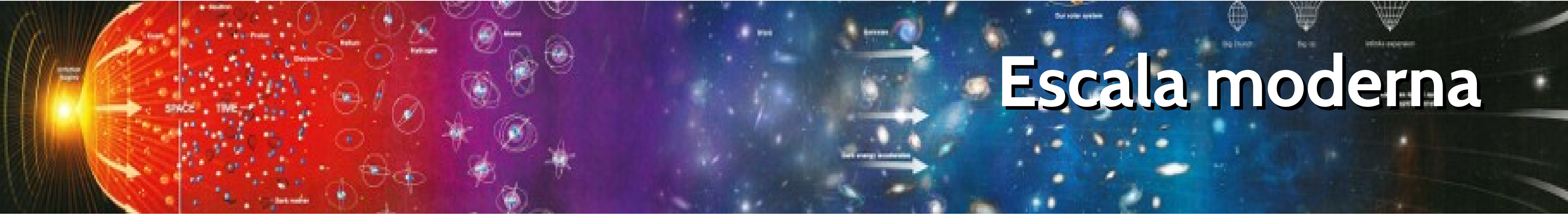
$$b_i = 100\, b_j$$

La estrella i es 100 veces más brillante que la estrella j

Cuando comparamos necesitamos referencias

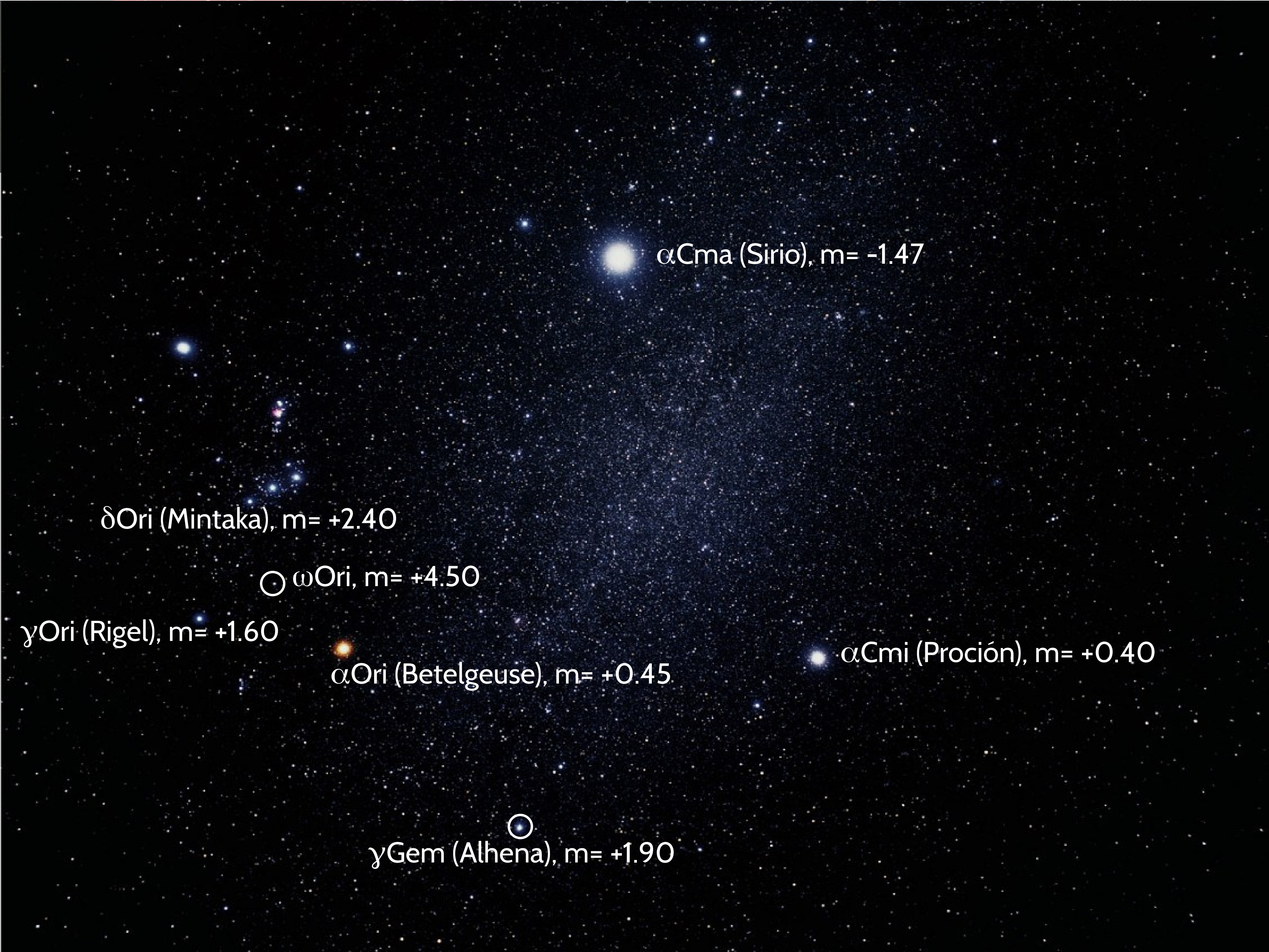


- La escala de magnitudes es **comparativa**
- Es necesario establecer una referencia (brillo)
- **Referencia de magnitud: Estrella Vega (αLyr), m=0**
- Vega, A0, blanca



Escala moderna

-26.73	**Sol (449000 veces la Luna)**
-12.6	Luna llena
-6.0	Supernova del Cangrejo (SN 1054)
-4.7	Venus (máximo)
-3.0	Marte (máximo)
-1.47	Sirio (estrella más brillante)
-0.7	Canopus (2da estrella)
0	**Vega (definición moderna)**
+3	Estrellas más débiles en una ciudad
+4.6	Ganímides (Luna de Júpiter)
+6	límite de visibilidad del ojo
+30	estrellas más débiles observadas (Telescopio espacial Hubble)


αCma (Sirio), m= -1.47
δOri (Mintaka), m= +2.40
ωOri, m= +4.50
γOri (Rigel), m= +1.60
αCmi (Proción), m= +0.40
αOri (Betelgeuse), m= +0.45
γGem (Alhena), m= +1.90

Pero... “no todas están a la misma distancia”

- El brillo se relaciona con el flujo, y el flujo es
  - Proporcional a la luminosidad
  - Inversamente proporcional a la distancia al cuadrado
- ¿Cómo cambia la magnitud aparente de una estrella si multiplico por 10 su distancia?

Pero... "no todas están a la misma distancia"

- Decuplicar distancia: flujo → flujo/100 y brillo → brillo/100

$$m_{nueva} - m_{vieja} = -2.5 \log_{10}\left(\frac{b_{nueva}}{b_{vieja}}\right)$$

$$m_{nueva} - m_{vieja} = -2.5 \log_{10}\left(\frac{b_{vieja}/100}{b_{vieja}}\right)$$

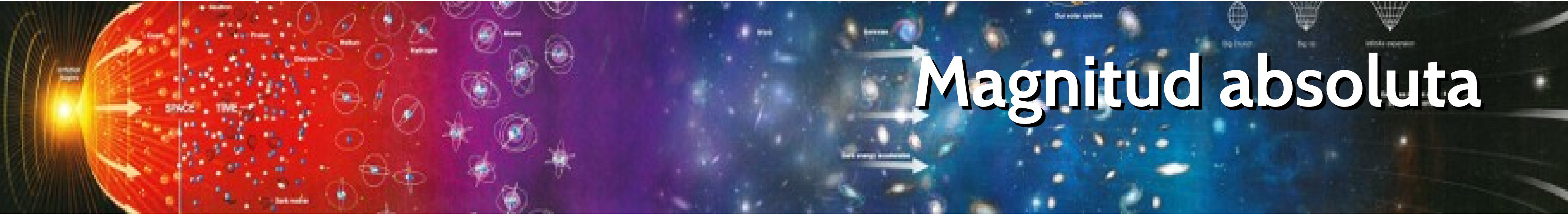
$$m_{nueva} - m_{vieja} = -2.5 \log_{10}\left(\frac{1}{100}\right)$$

$$m_{nueva} - m_{vieja} = -2.5 \times (-2)$$

$$m_{nueva} - m_{vieja} = 5$$

$$\boxed{m_{nueva} = m_{vieja} + 5}$$

Si aumento 10 veces la distancia de una estrella, su brillo disminuye 100 veces, y su magnitud aumenta en 5
Si era m=1, pasa a m=6



Magnitud absoluta

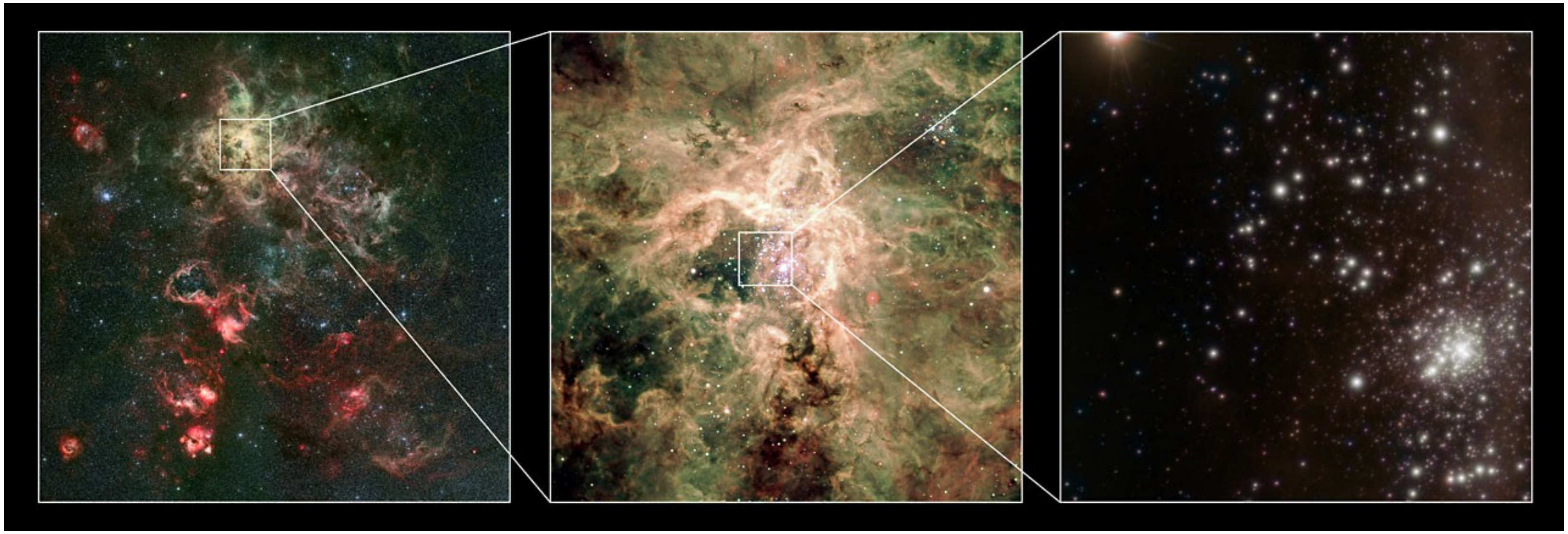
- **Magnitud absoluta M**, es la magnitud aparente que tendría una estrella si su distancia fuera de 10pc
  - Relación con la magnitud aparente **m** y la distancia **d**: (medida en parsecs):

$$M = m - 5\left(\log_{10}(d) - 1\right)$$

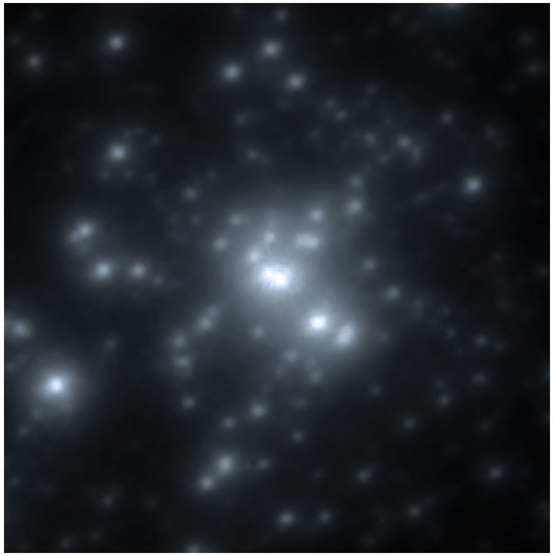
  - P.ej.: Si **d=10 pc**, **M** = m-5 [1-1] = m-5(0) = **m**
  - Magnitudes absolutas y aparentes:
    - Sol: m=-26.73, M=4.75
    - Mintaka (δOri): m=2.4, M=-4.84
    - Sirio (aCMa): m=-1.45, M=1.44

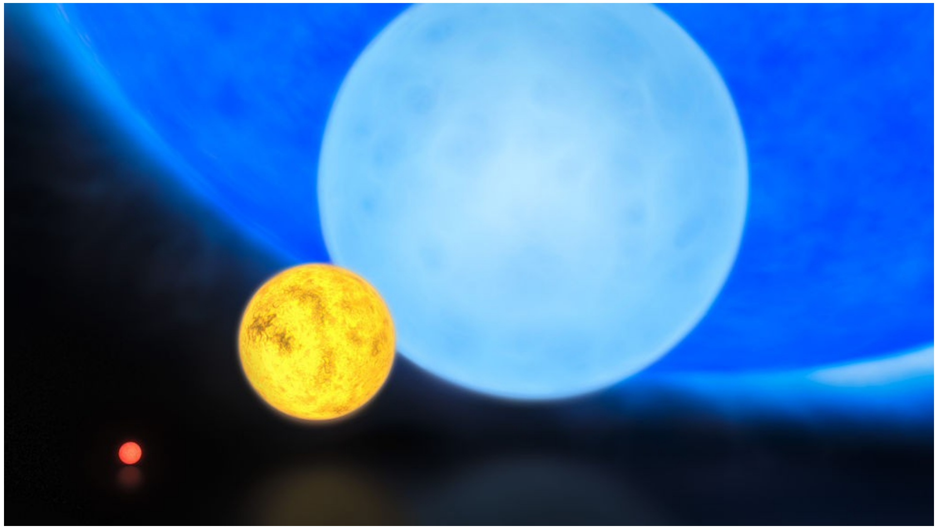
La estrella más brillante

- R136a1 es las estrella más masiva y brillante conocida
  - Masa ~ 265 Masas solares
  - Luminosidad ~ 8.7 millones de luminosidades solares
  - Forma parte del supercúmulo estelar 30 Doradus (Nebulosa Tarántula)
  - Se encuentra en la Gran Nube de Magallanes, a 165000 al (~50000 pc)



R136a1

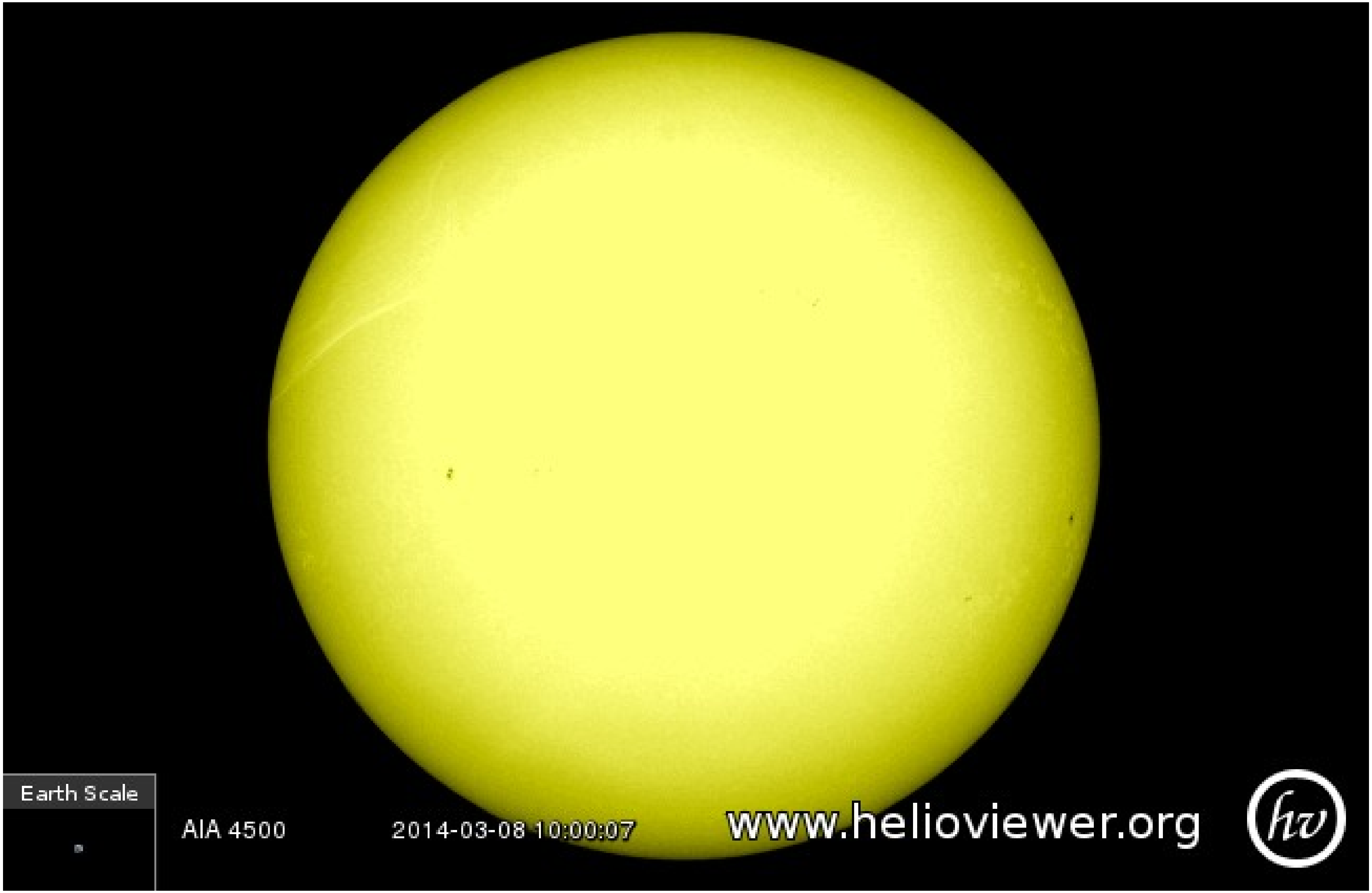




- m=12.28, M= -12.6
- ¡¡Si d=10 pc (32.6 al) brillaría tanto como la Luna llena!!
- Las más brillantes http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_luminous_known_stars

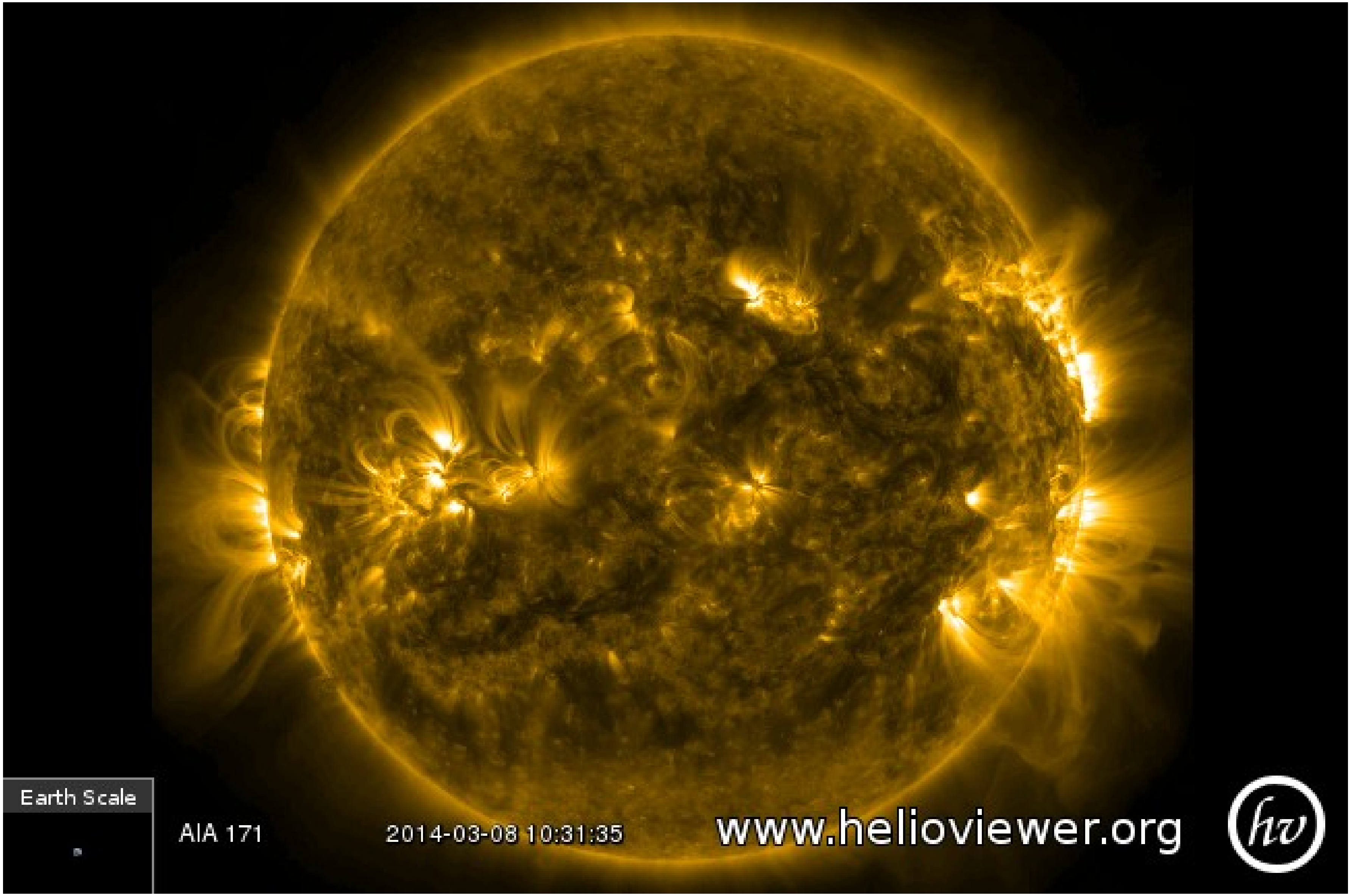
Nuestra fuente de energía

¿Amarillo o verde?



Así es nuestro Sol

Mirando en otras longitudes de onda



Es cómodo medir las cosas en términos solares

- Masa Solar:

$$M_{Sol}=1.989\times10^{30}\,\mathrm{kg}\simeq1000\,M_{Júpiter}\simeq333000\,M_{Tierra}$$

- Radio Solar:

$$R_{Sol}=6.96\times10^{8}\,\mathrm{m}=696000\,\mathrm{km}$$

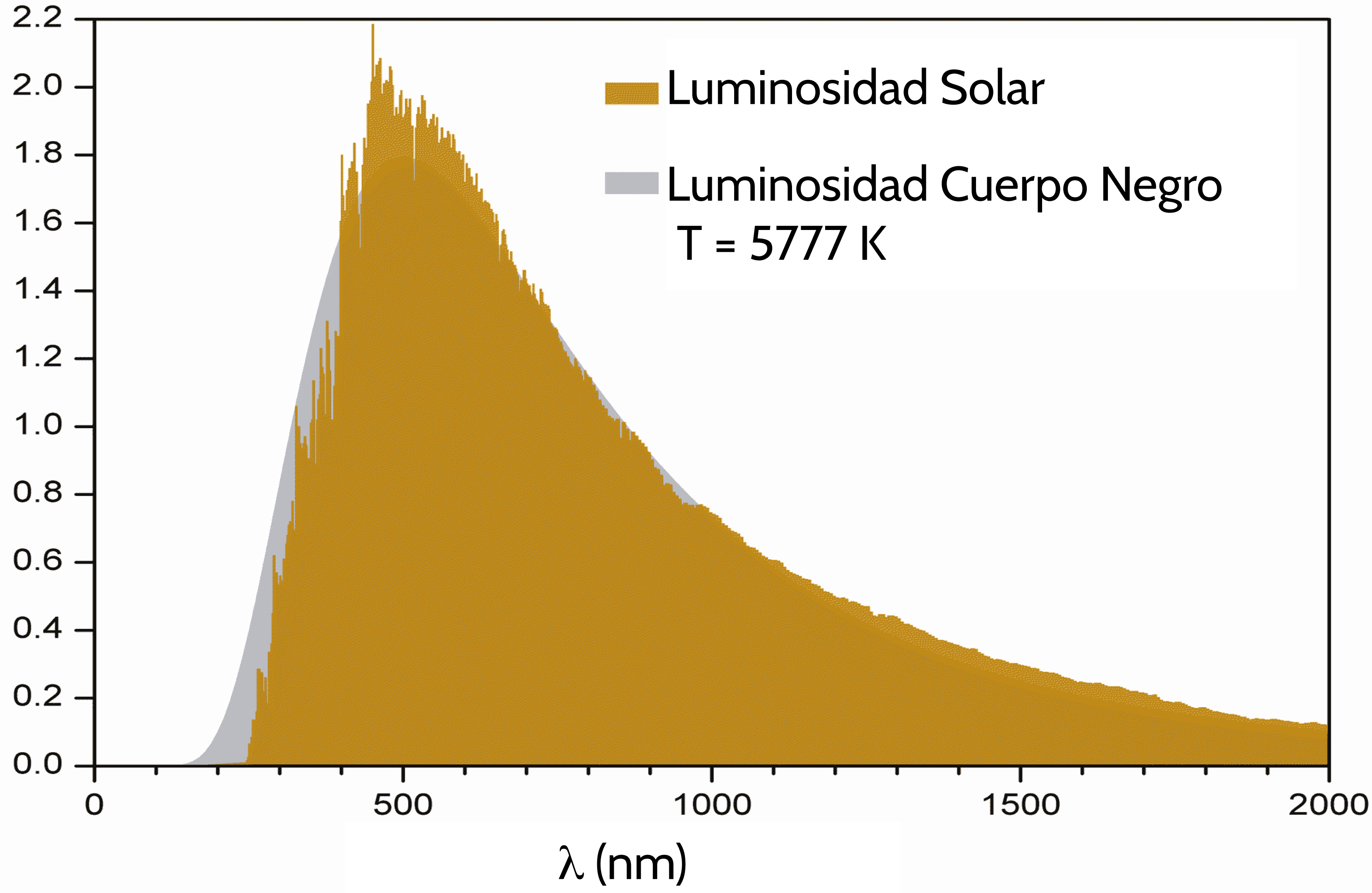
- Luminosidad Solar:

$$L_{Sol}=3.83\times10^{26}\,\mathrm{W}$$

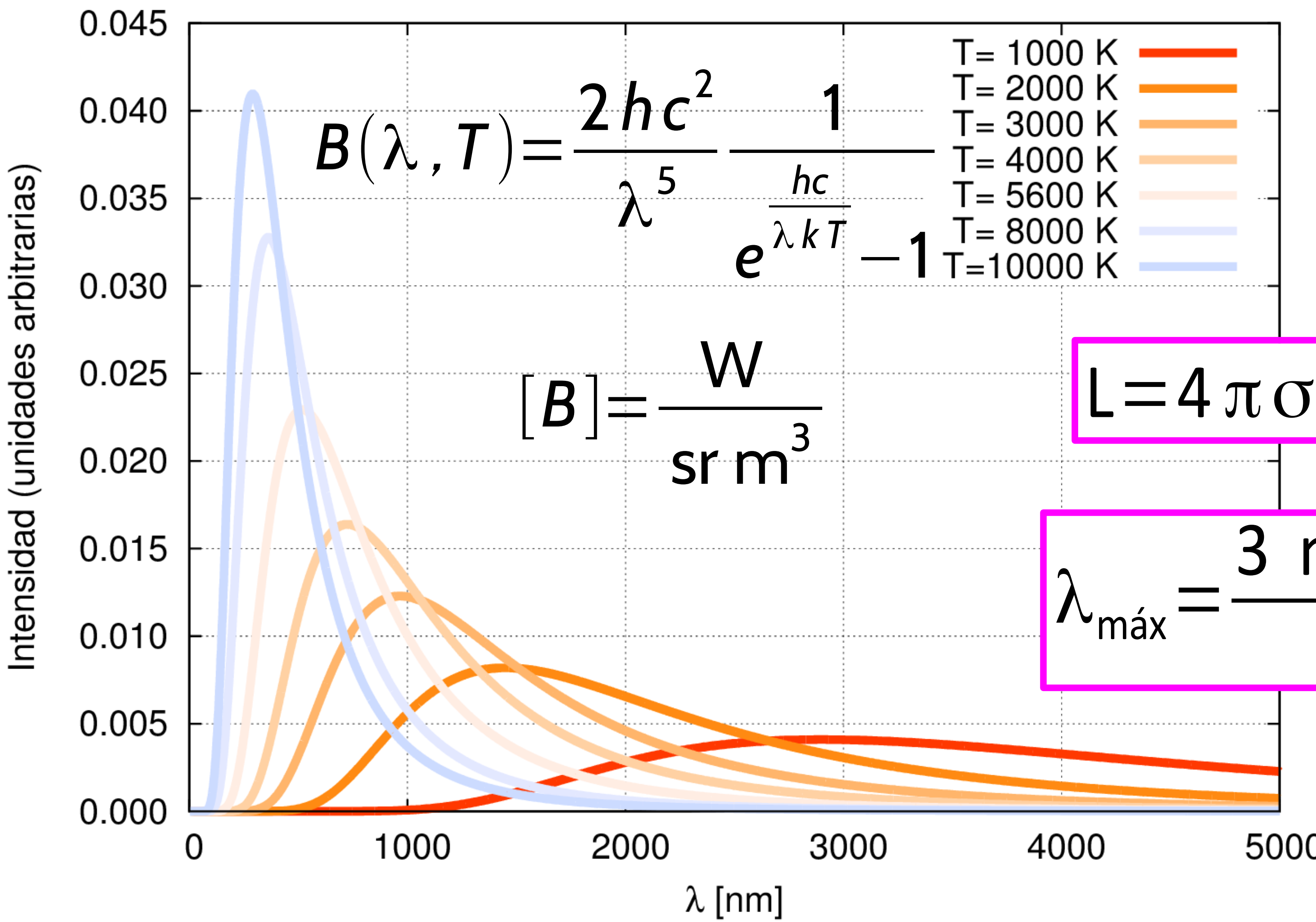
- Alto:

1 segundo de energía liberada en el Sol equivale a 800000 años de consumo humano (2013)

El Sol como un cuerpo negro



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



$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1}$$

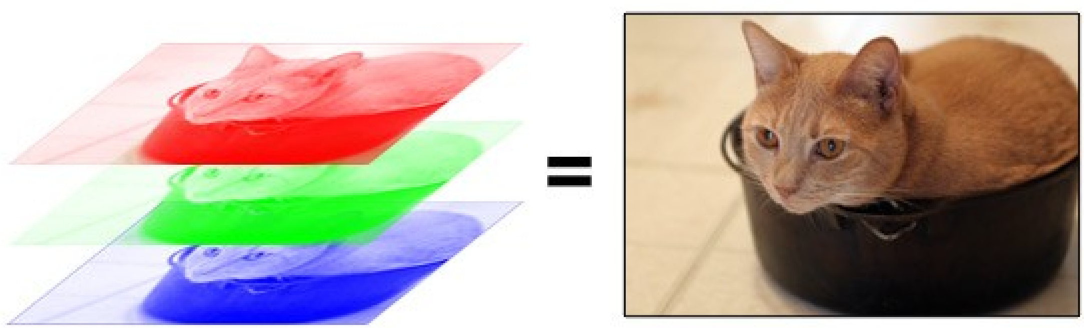
$$[B] = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{sr\,m^3}}$$

$$\boxed{L = 4\pi\sigma R^2 T^4}$$

$$\boxed{\lambda_{\text{máx}} = \frac{3\ \mathrm{mm\,K}}{T}}$$

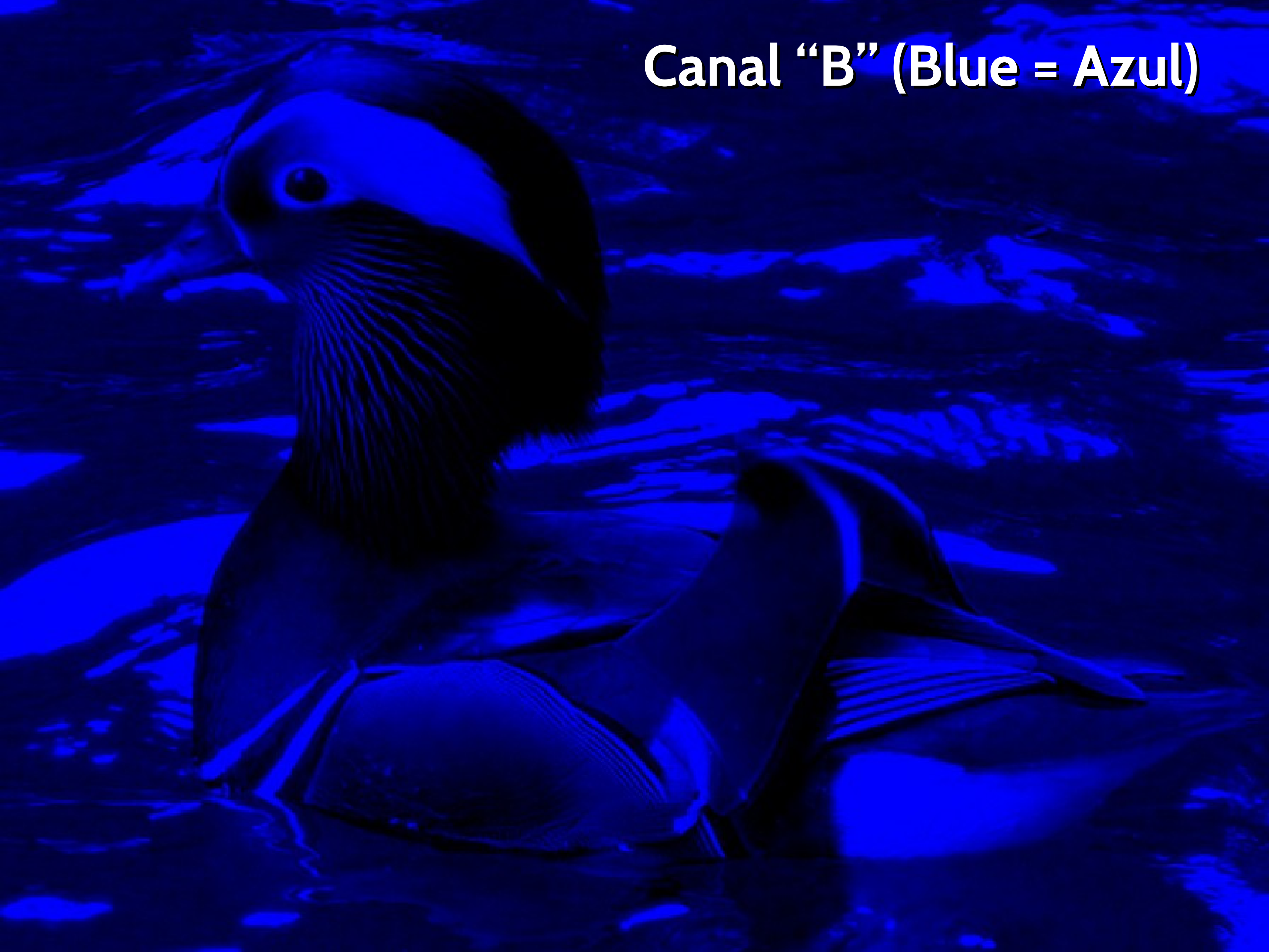
“Color” → Temperatura

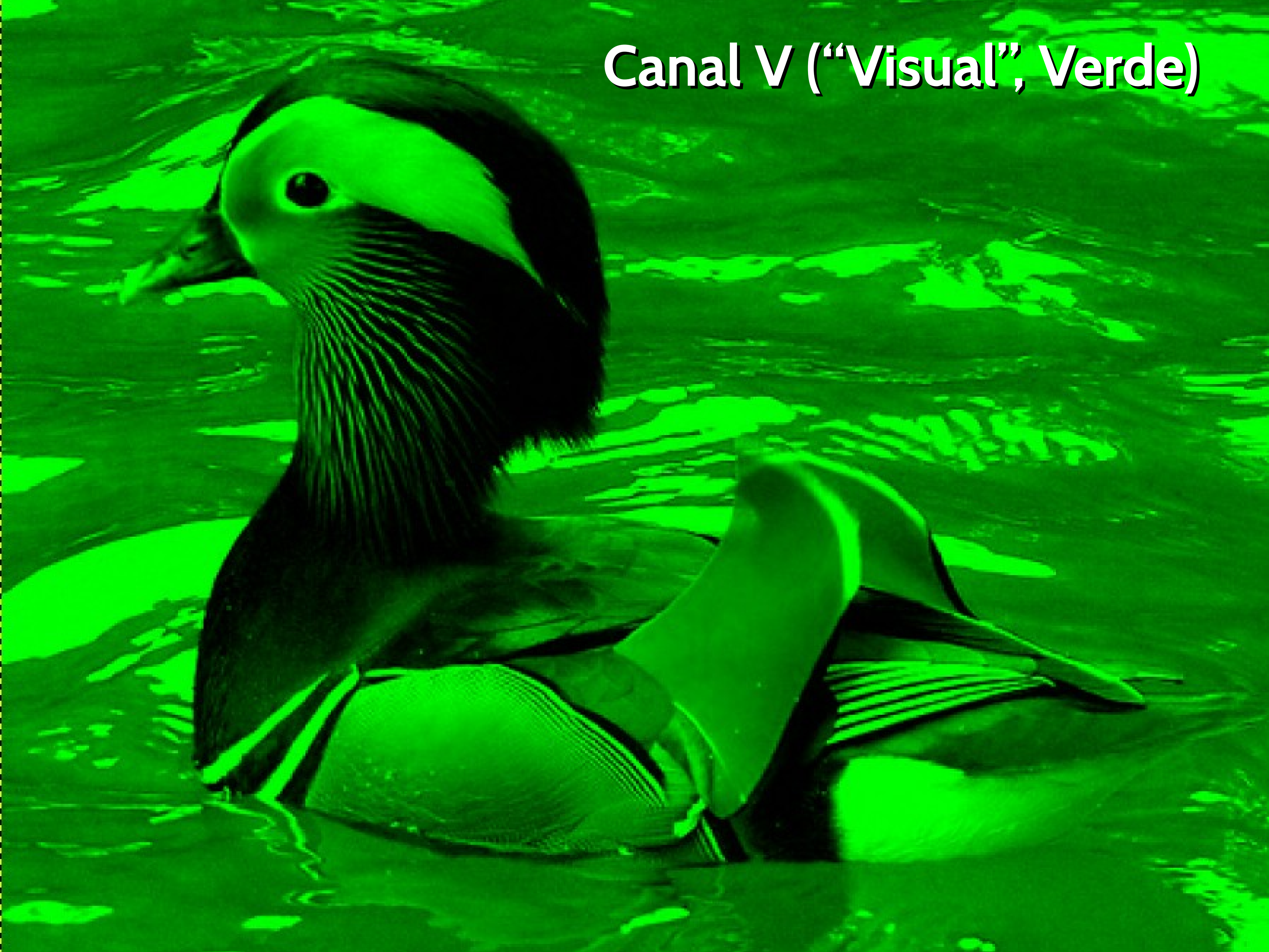
- ¿Cómo cuantificar el color?

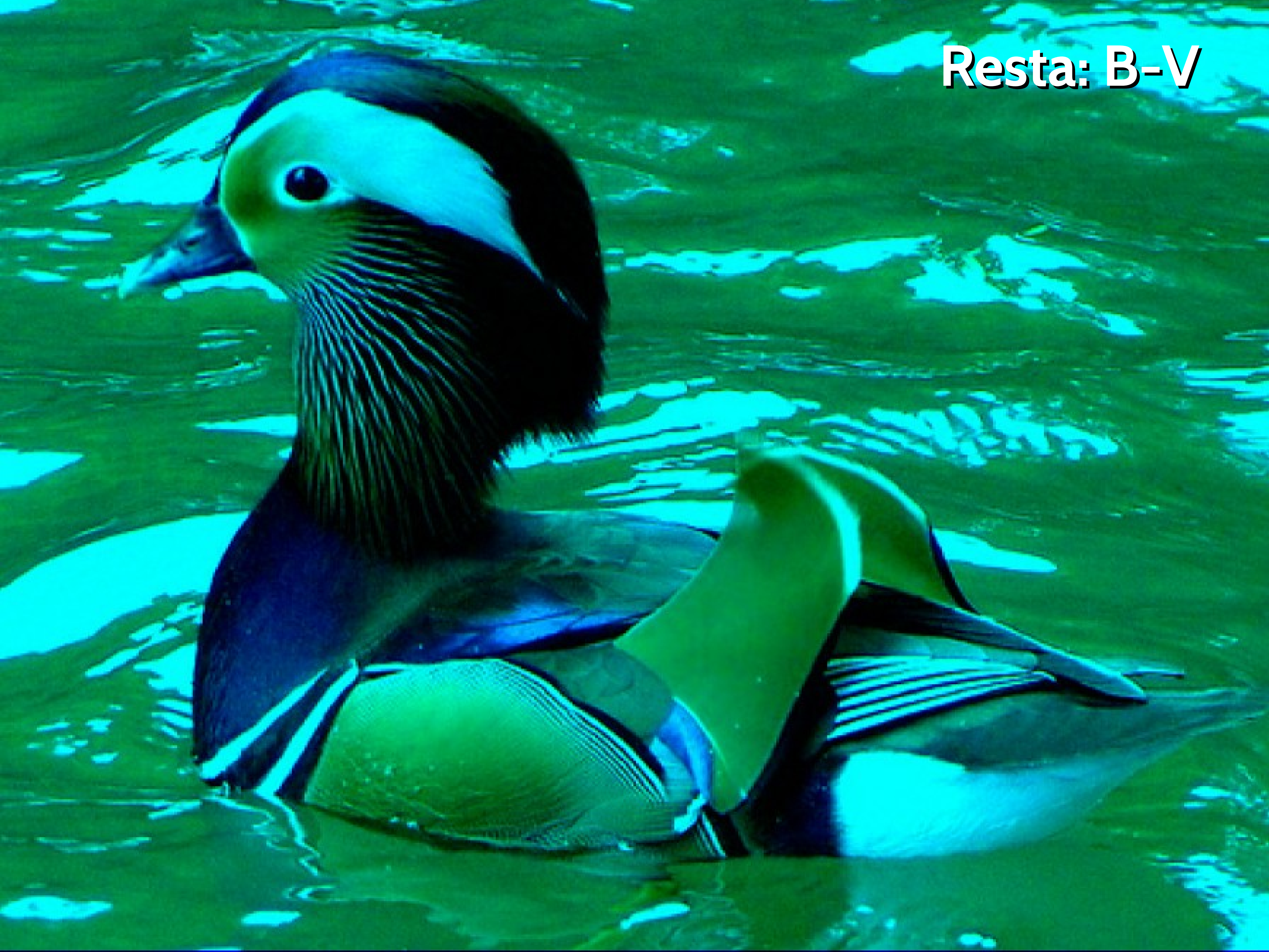


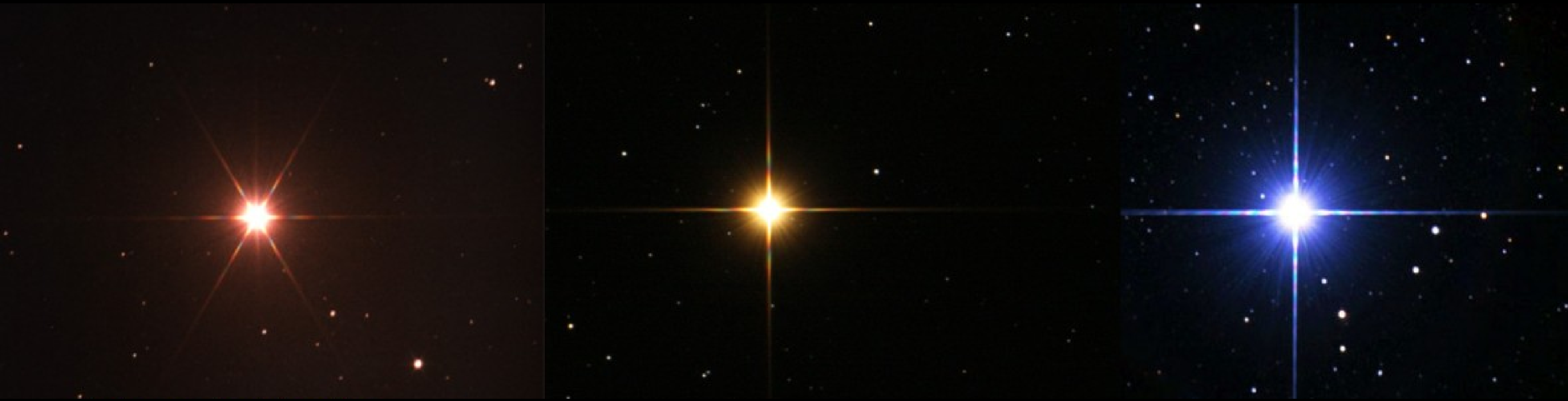

Canal “R” (Red = Rojo)

Canal “B” (Blue = Azul)



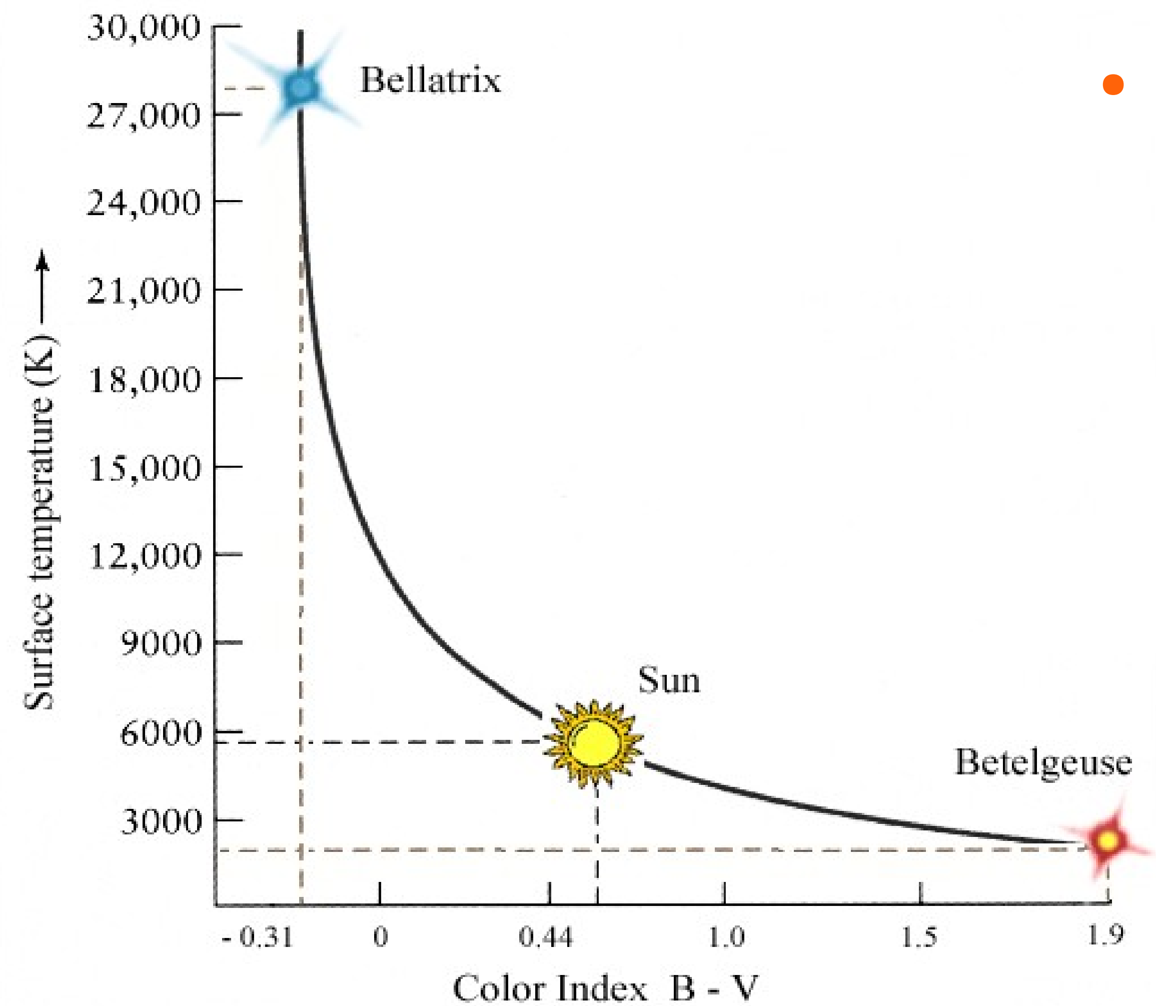

Canal V (“Visual”, Verde)


Resta: B-V



Para las estrellas → magnitudes

Se observa que para estrellas, B-V → T

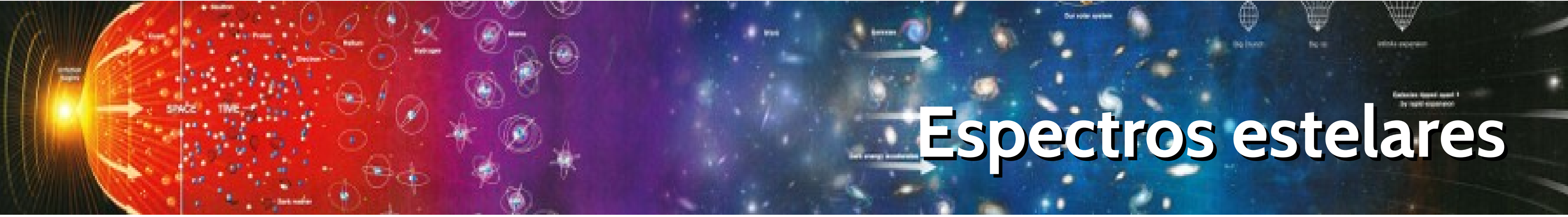


- Índice B-V
  - m_B=magnitud en el canal B
  - m_V=magnitud en el canal V

$$(B\text{-}V) = m_B - m_V$$

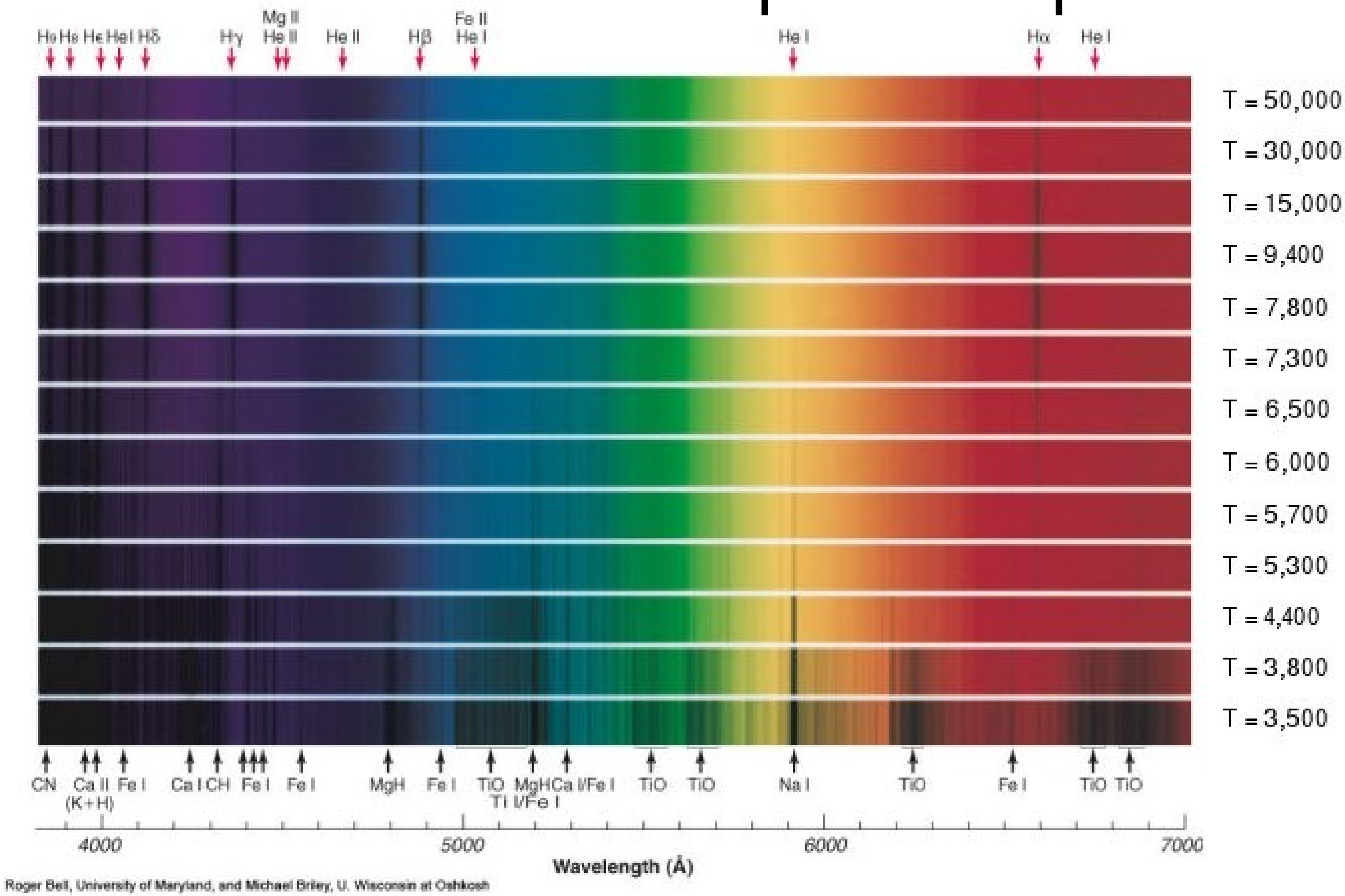
(Recordar que m es logarítmica)

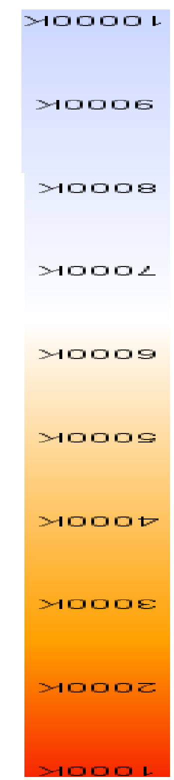
$$T = 4600\left(\frac{1}{0.92(B-V)+1.7} + \frac{1}{0.92(B-V)+0.62}\right)\text{K}$$



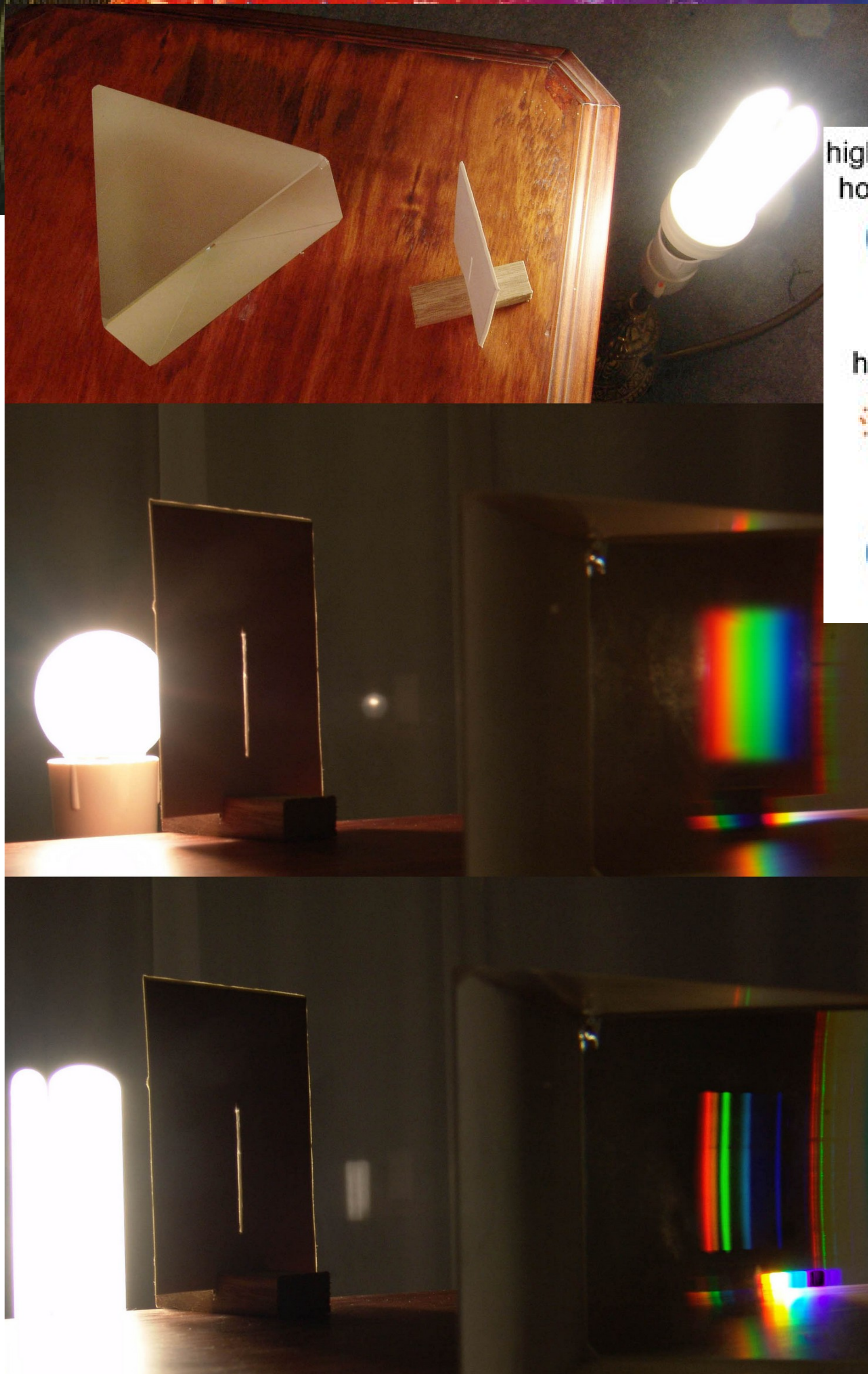
Espectros estelares

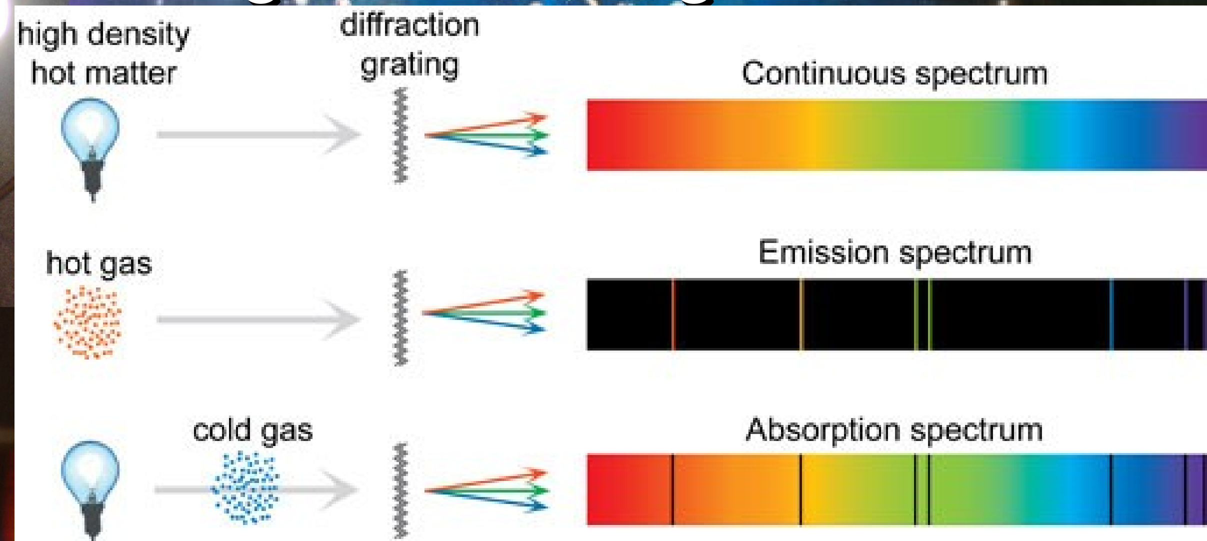
- Emisión continua→Cuerpo Negro→ Color→Temp.
- Espectro de Absorción→Composición química

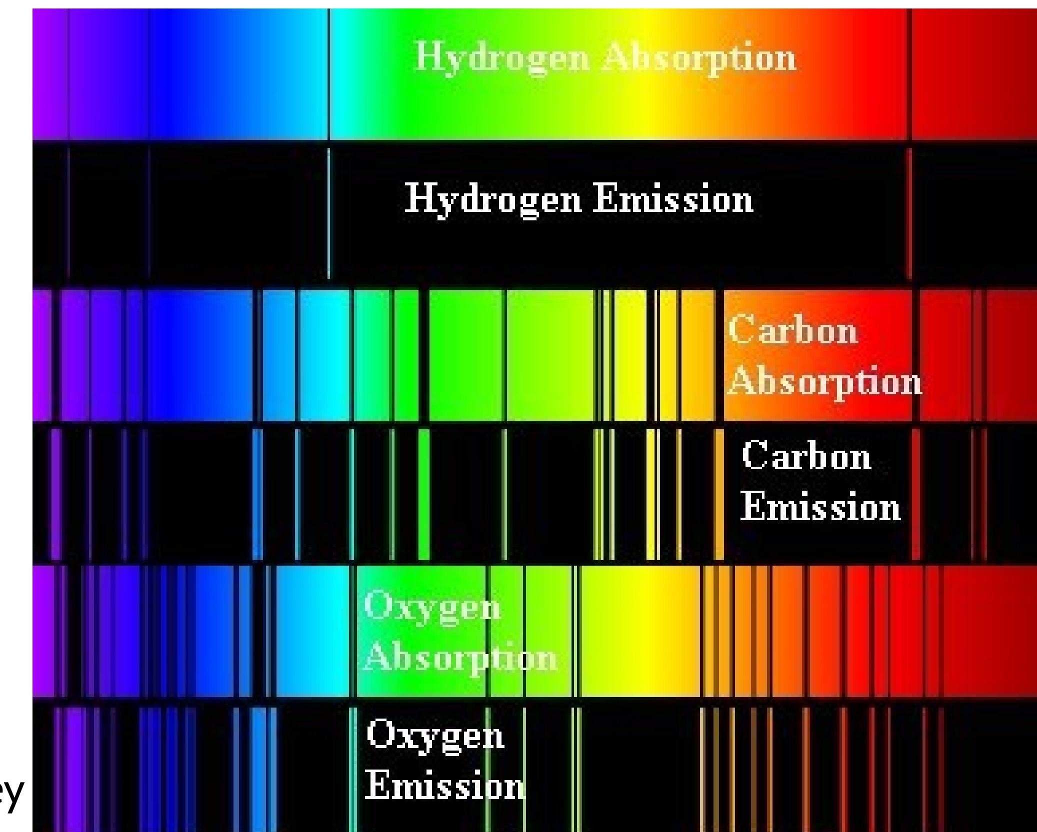




¿Emisión? ¿Absorción?

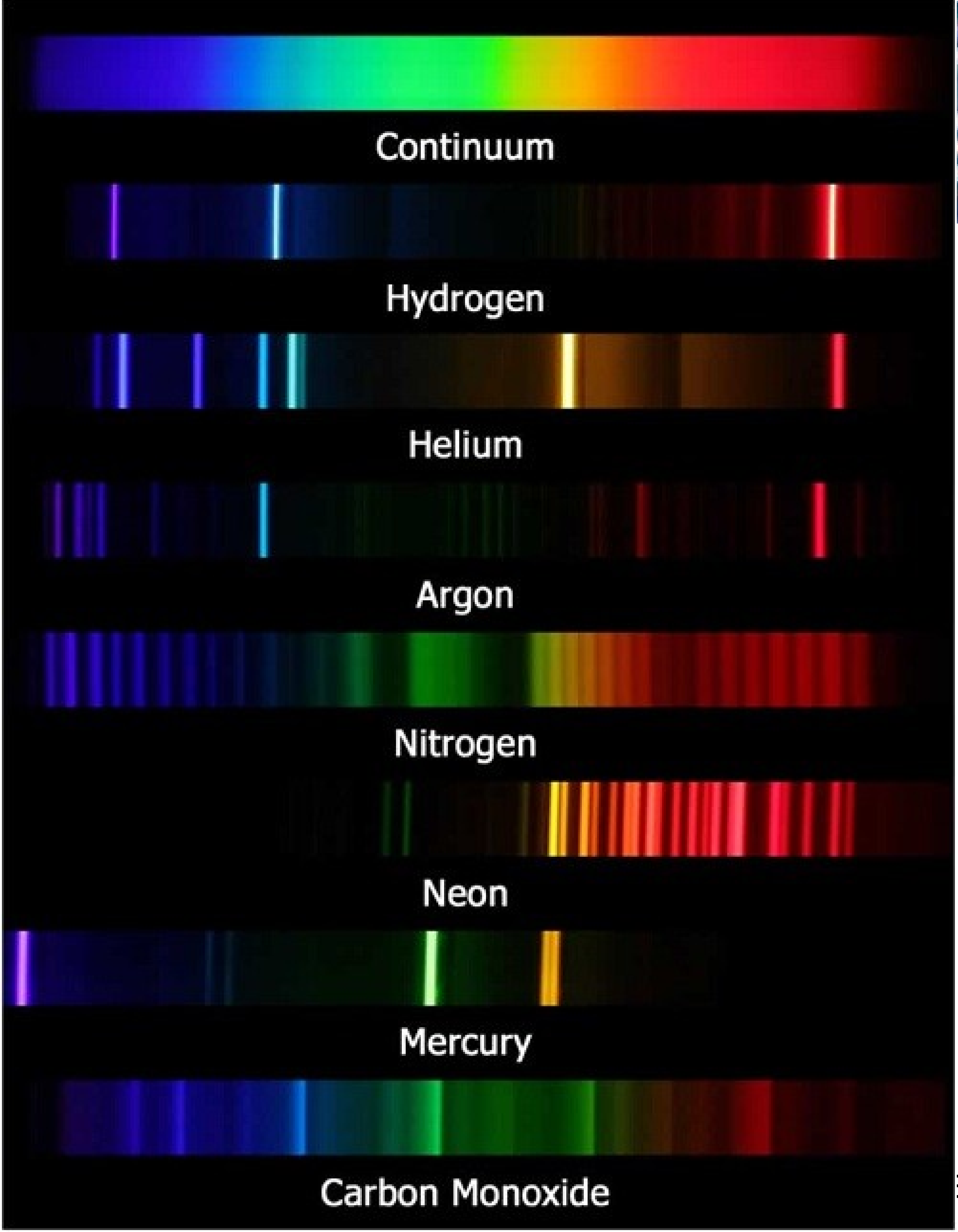


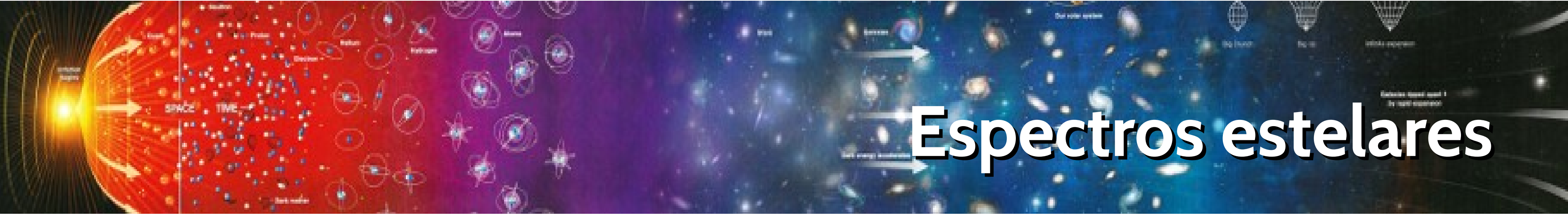




orey

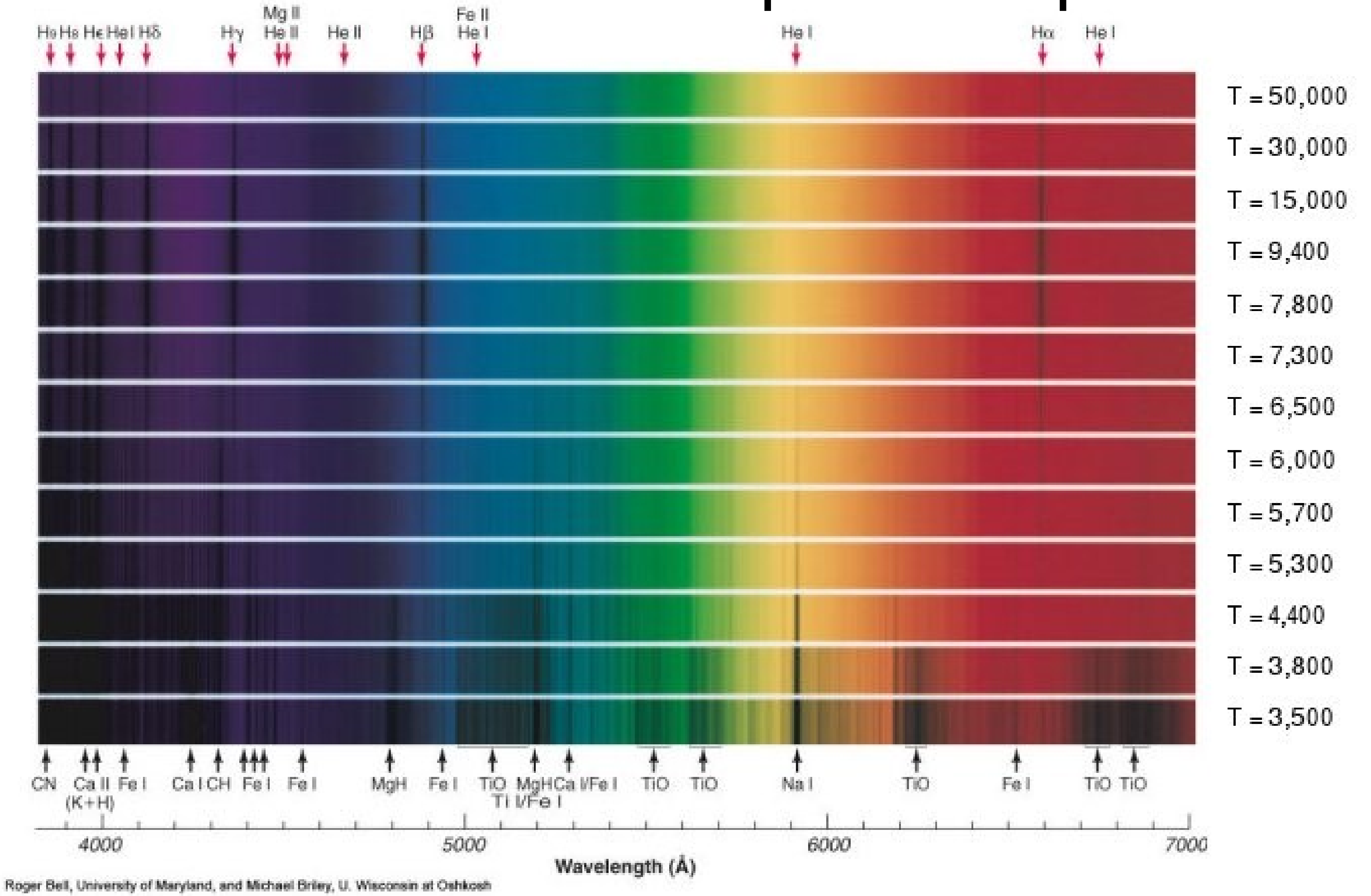
Espectrómetro CD

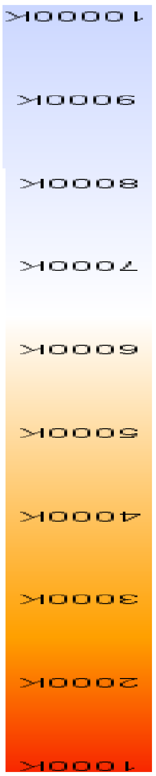




Espectros estelares

- Emisión continua→Cuerpo Negro→ Color→Temp.
- Espectro de Absorción→Composición química





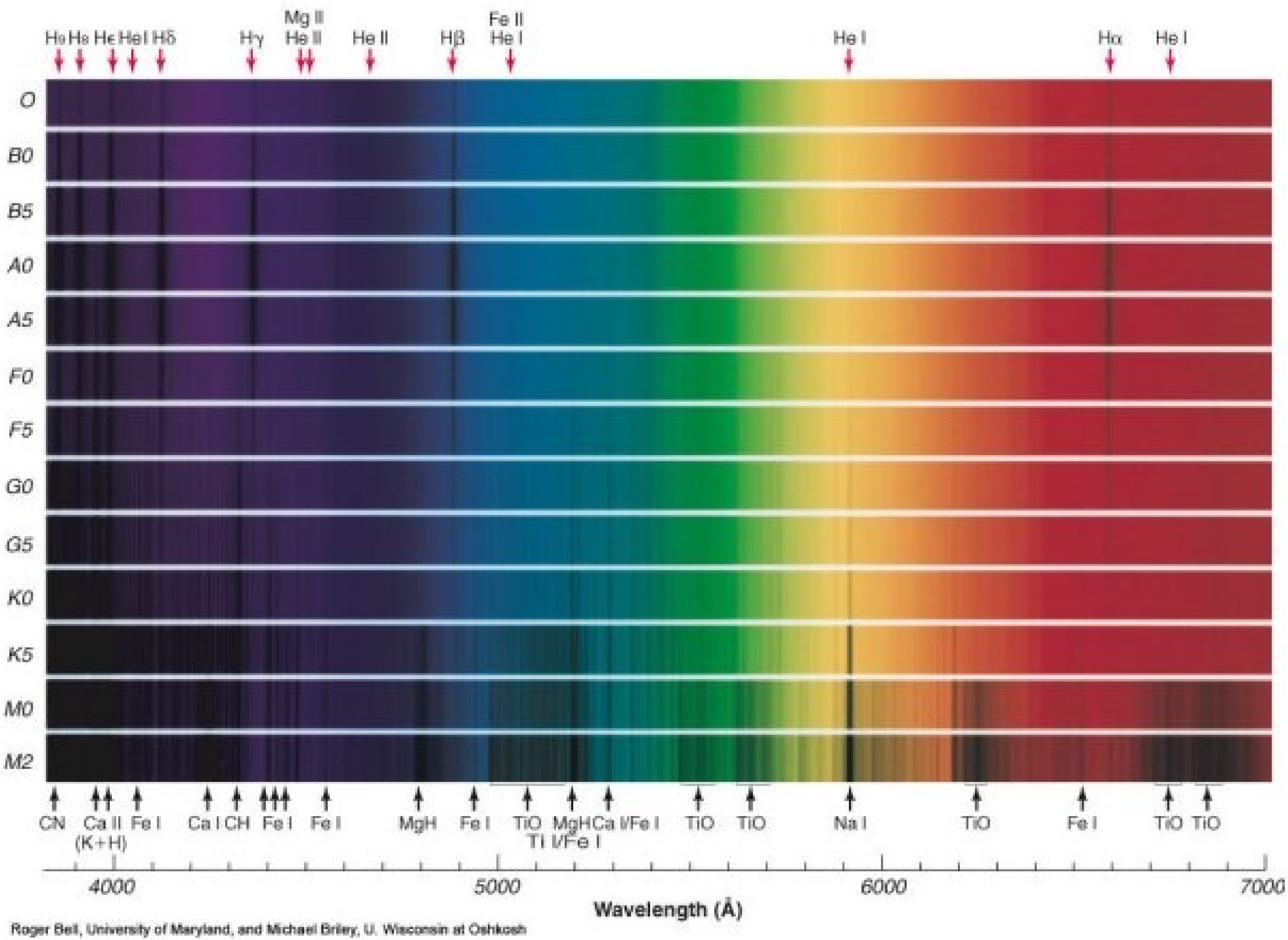
¡Podemos clasificarlas!

- A B C... por temperatura superficial

O B A F G K M R N S

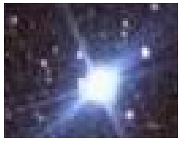
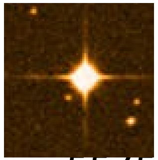
- **O**h **B**e **A** **F**ine **G**irl and **K**iss **M**e **R**ight **N**ow **S**weet
- **O**h **B**esame **A**mor, **F**asinadora **G**itana, **K**ilómetros **M**edian **R**ompiendo **N**uestros **S**ueños

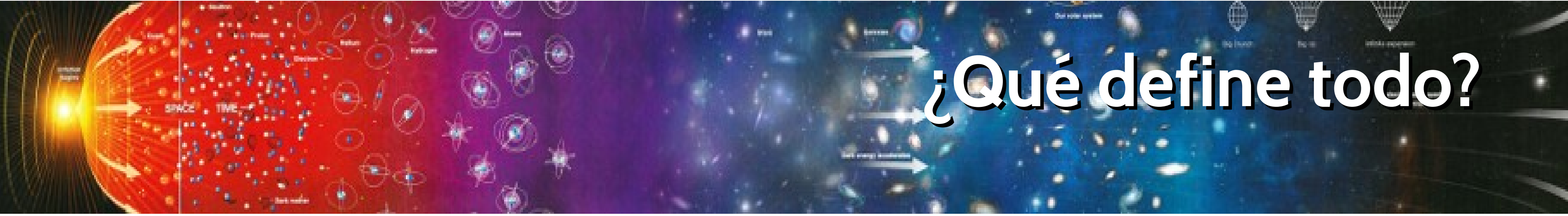
Clasificación espectral



Algunos ejemplos

Todo expresado en unidades solares (Radio, Masa, Luminosidad)

O	Azul; T > 33000 K	M > 16; R > 7; L > 30000	Mintaka (d-Ori)	
B	Blanco Azulado; 10000<T<30000K	2 < M < 16; 2 < R < 7; 25 < L < 30000	Rigel (b-Ori)	
A	Blanco; 7500<T<10000 K	1.4 < M < 2; 1.4 < R < 2; 5 < L < 25	Sirio (a-CMa)	
F	Blanco Amarillento 6000<T<7500 K	1.04 < M < 2; 1.1 < R <1.4; 1.5 < L < 5	Canopus (a-Car)	
G	Amarillo 5200<T<6000 K	0.8 < M < 1.04; 0.9 < R < 1.1; 0.6 < L < 1.5	Sol (el nuestro)	
K	Naranja 3700<T<5200 K	0.5 < M < 0.8; 0.7 < R < 0.9: 0.08 < L < 0.6	Arturo (a-Boo)	
M	Rojas T<3700 K	M < 0.5; R < 0.7; L < 0.08	Gliese 581 (Lib)	



¿Qué define todo?

- **Relaciones entre parámetros:**
  - Luminosidad (L)
  - Masa (M)
  - Temperatura (T)
  - Radio (R)

$$L \equiv \frac{\Delta E}{\Delta t} = 4\pi\sigma R^2 T^4$$

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

- **¿Cuál es el más importante en condiciones normales?**
  - **Cantidad de materia → Masa**
  - Está fijada por condiciones externas → Nacimiento

Para entender la estrella

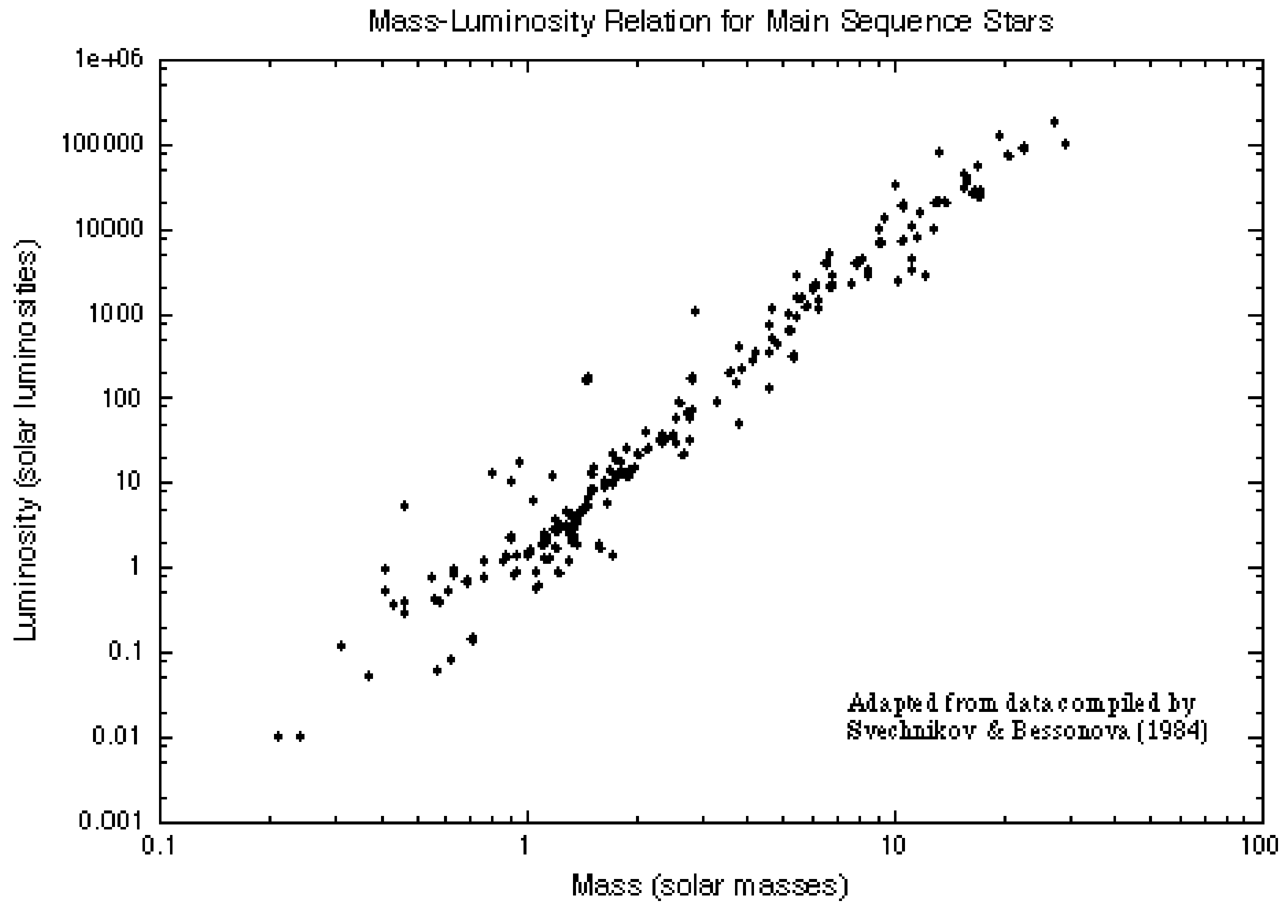
- Debemos averiguar estos parámetros:
  - Temperatura (T), Luminosidad (L), Radio estelar (R), Masa (M)

Luminosidad → Masa

- **Si: (0.1 < Masa Estelar < 50) masas solares:**
  L es proporcional a la M^4

- Nota: En general, M^a , con **a** entre 3 y 4 (~ masa)

$$\left(\frac{L_{Estrella}}{L_{Sol}}\right) = \left(\frac{M_{Estrella}}{M_{Sol}}\right)^4$$



Luminosidad → Masa

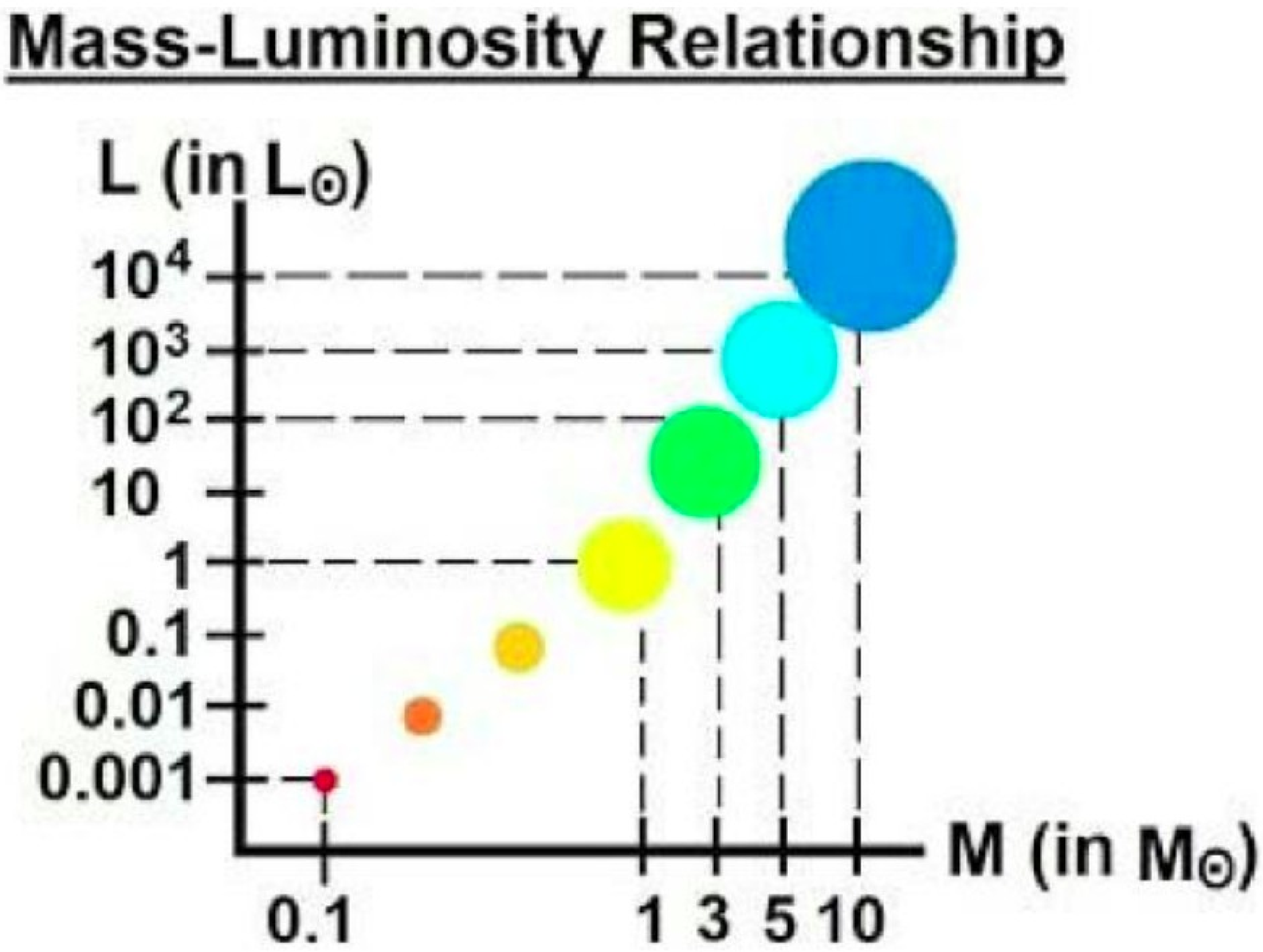


Fig. 2 Schematic representation of the mass-luminosity relation. Source: Astronomy – Ch. 17: The Nature of Stars: Mass-Luminosity Relationship