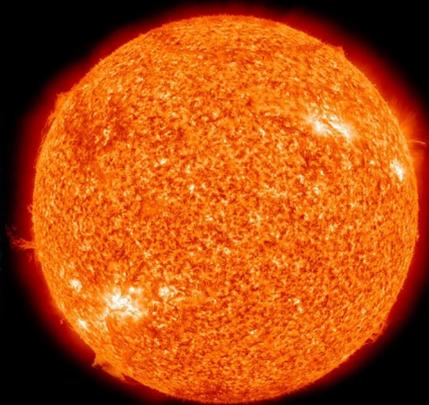


# VIDA Y MUERTE DE LAS ESTRELLAS



**PLANETARIO**  
DE MADRID



**AIRBUS**

# La vara de medir astronómica

**Año-luz:** distancia que recorre la luz en un año. Su valor se puede hallar multiplicando 300.000 km/s (velocidad de la luz) por 365 días (duración de un año) y por 86.400 (segundos que tiene un día). El resultado es casi 9 billones y medio de kilómetros).



La distancia del Sol a la Tierra es de 150 millones de km, que equivale a 8 minutos-luz y medio. La luz que recibimos del Sol en este instante salió de él hace 8 minutos y medio.

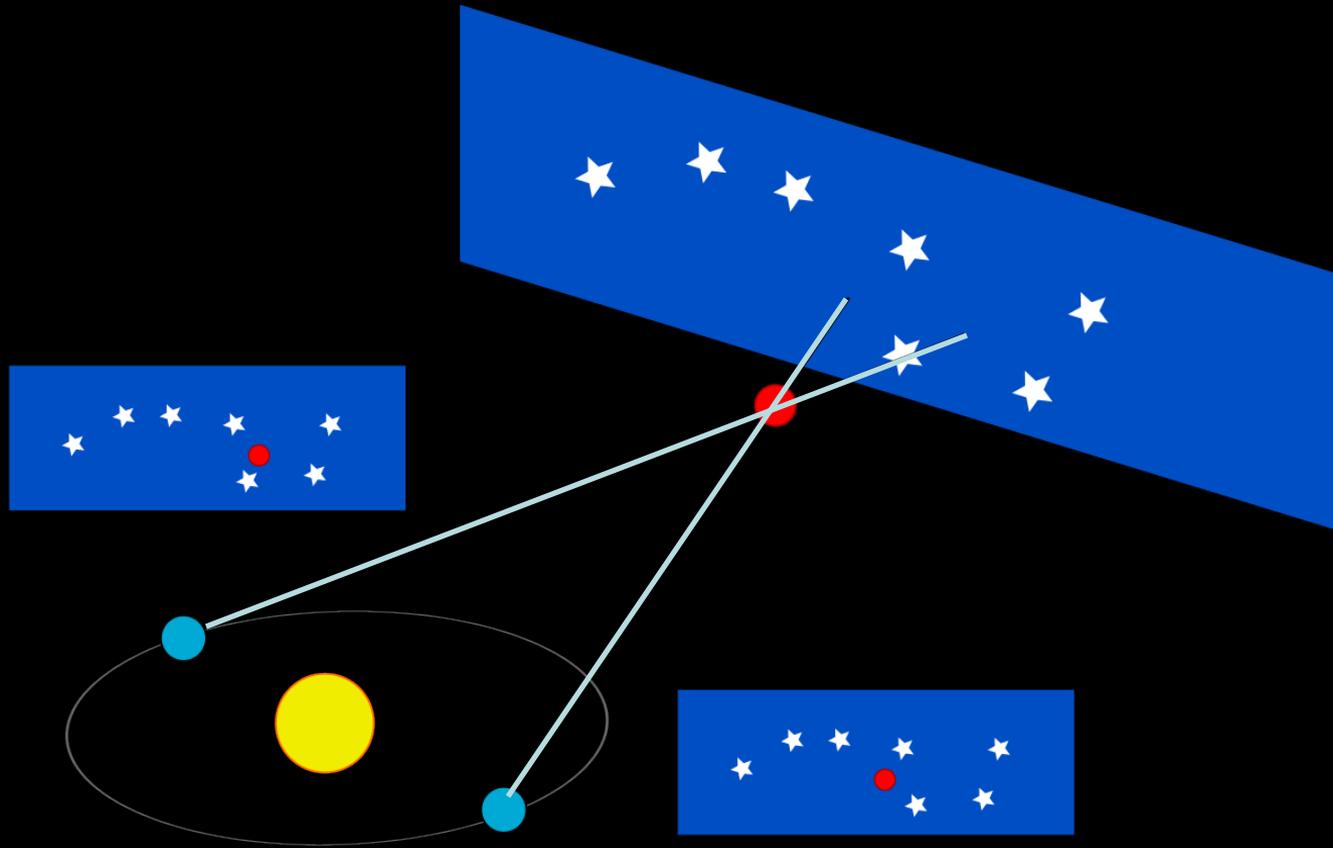


La estrella más cercana al Sistema Solar, Próxima Centauri, se encuentra a 4,2 años-luz. Un avión comercial, a unos 900 km/h, tardaría más de 5 millones de años en llegar a esa estrella.



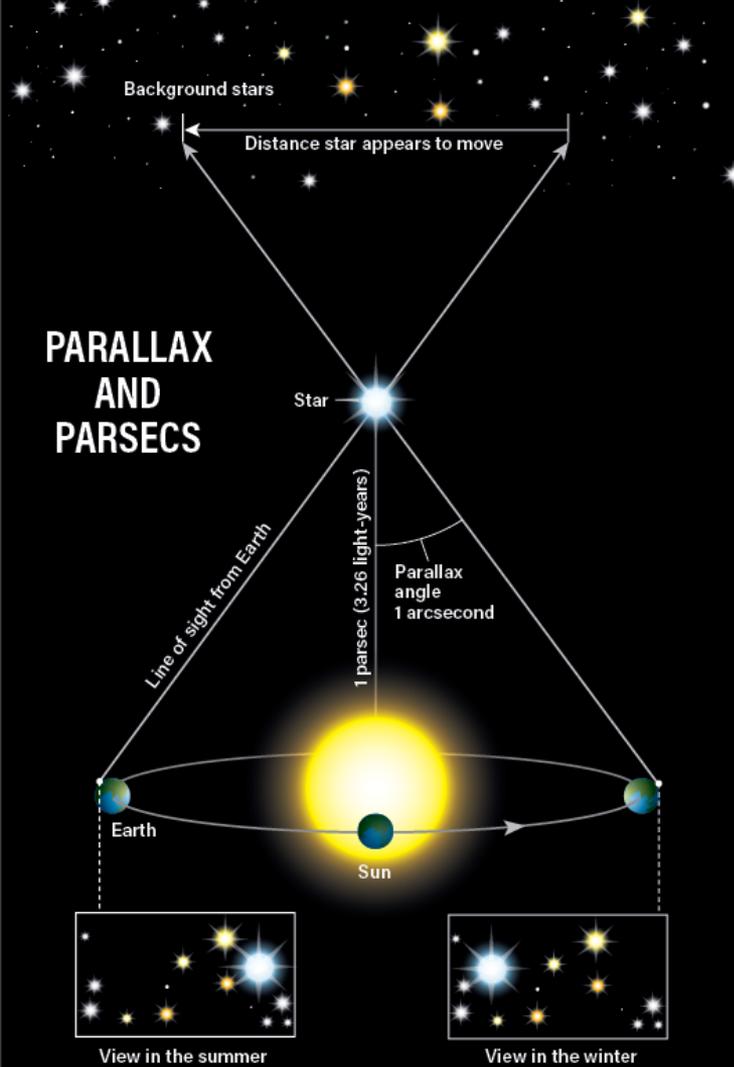
Tamaño de las estrellas

# Midiendo distancias a estrellas: la paralaje



# Definición de parsec (pc)

## PARALLAX AND PARSECS



# Brillo aparente de las estrellas

**Magnitud aparente (m):** comparando con una estándar (Vega), a la que se asigna magnitud aparente 0.0, la magnitud aparente de una estrella es:

$$m - 0.0 = -2.5 \log [F(\text{estrella})/F(\text{Vega})]$$

Estrella	Magnitud aparente	Magnitud absoluta
Sol	-26,72	+4,72
Sirio	-1,46	+1,42
Canopus	-0,72	-3,10
Vega	+0,04	+0,50
Rigel	+0,14	-7,1

$\Delta m = 5$  implica un cociente de brillos de 100

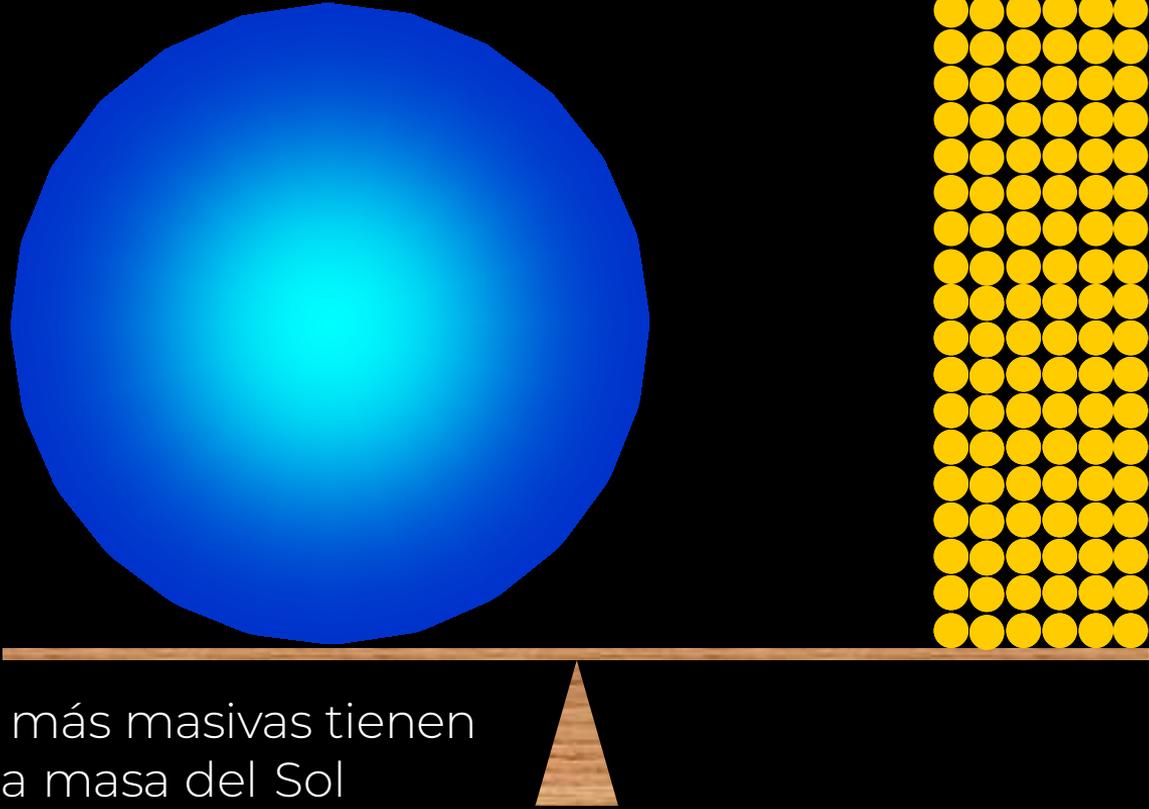
# Brillo absoluto de las estrellas

**Magnitud absoluta (M):** magnitud aparente de una estrella si estuviera situada a una distancia de 10 pc

$$M = m + 5 - 5 \log [d(\text{parsecs})]$$

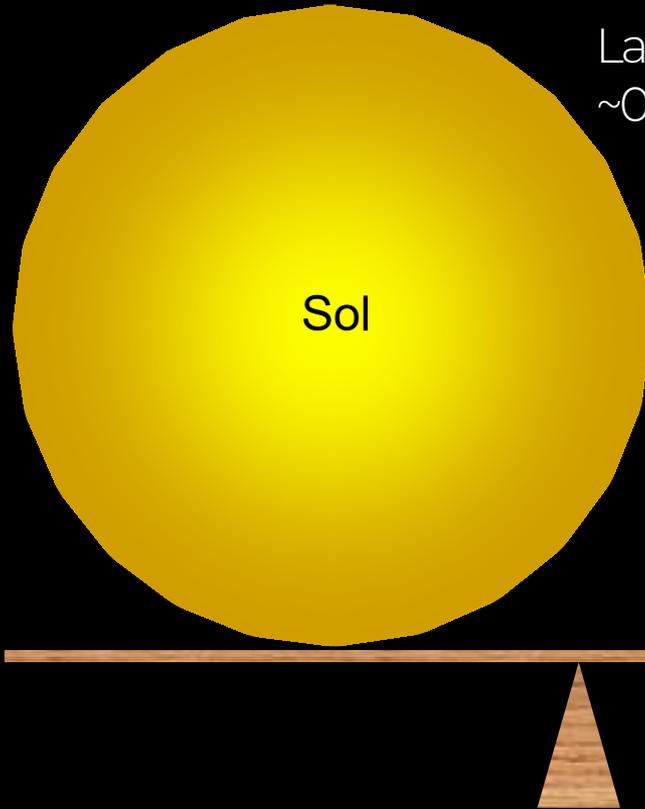
Estrella	Magnitud aparente	Magnitud absoluta
Sol	-26,72	+4,72
Sirio	-1,46	+1,42
Canopus	-0,72	-3,10
Vega	+0,04	+0,50
Rigel	+0,14	-7,1

# Masa de las estrellas



Las estrellas más masivas tienen  
~1 20 veces la masa del Sol

# Masa de las estrellas



Las estrellas menos masivas tienen  
 $\sim 0.08$  veces la masa del Sol



# La composición de las estrellas

La composición química de la mayoría de las estrellas es muy similar a la del Sol. Las abundancias de los elementos más significativos son:

	Masa	Átomos
Hidrógeno (H)	70.9%	91.0%
Helio (He)	27.4%	8.9%
Carbono (C)	0.29%	0.03%
Nitrógeno (N)	0.10%	0.008%
Oxígeno (O)	0.77%	0.07%
Neon (Ne)	0.12%	0.01%
Silicio (Si)	0.07%	0.003%
Azufre (S)	0.04%	0.002%
Hierro (Fe)	0.16%	0.003%

Los elementos químicos que nos componen, y que componen todo lo que nos rodea, ya estaban aquí antes de que formara el Sistema Solar

CALCIO



FÓSFORO



ORO



WOLFRAMIO



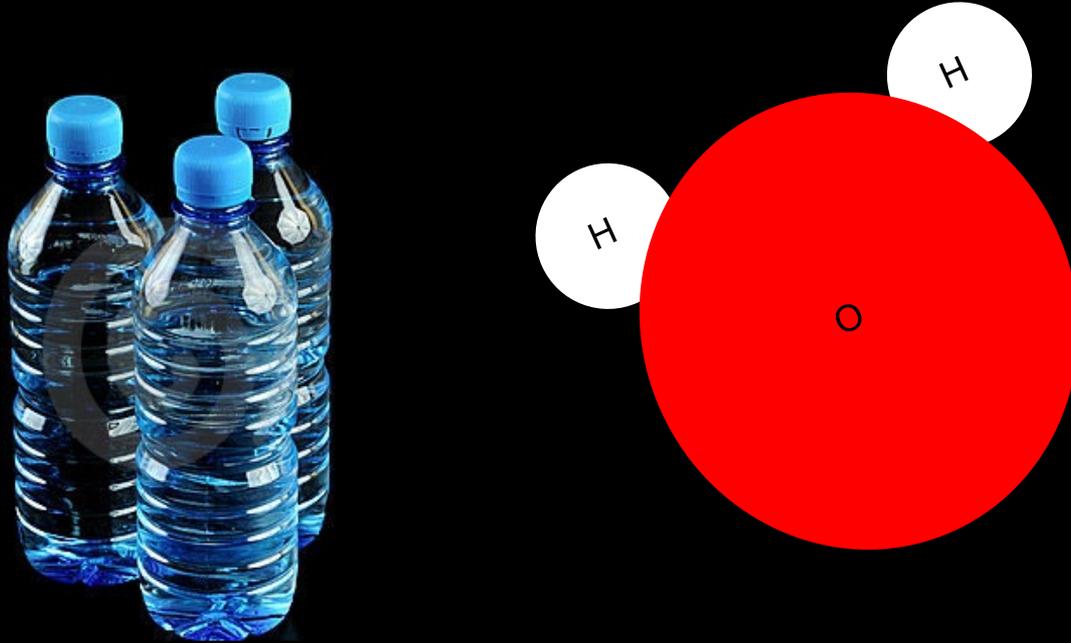
HIERRO



CARBONO, NITRÓGENO,  
OXÍGENO, AZUFRE...



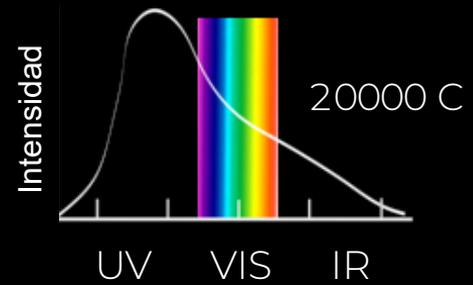
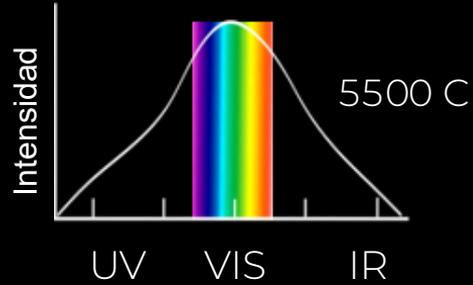
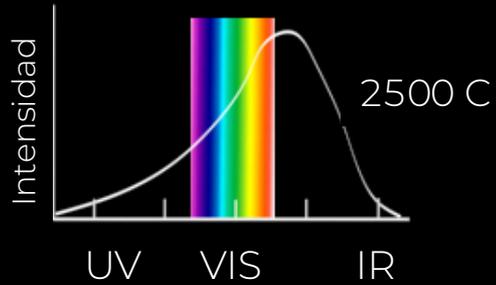
El hidrógeno (H), se creó mucho antes, hace 13.800 millones de años, en el *Big Bang*, la “Gran Explosión” que se cree dio origen al universo



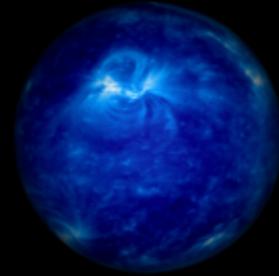
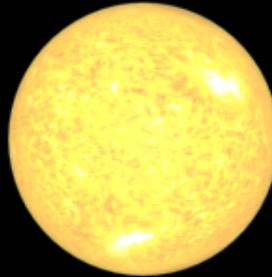
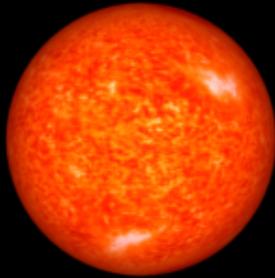
# La tabla periódica actual

1 H	big bang fusion 						cosmic ray fission 						2 He					
3 Li	4 Be	merging neutron stars 					exploding massive stars 					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 					exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu											

# Temperaturas y colores

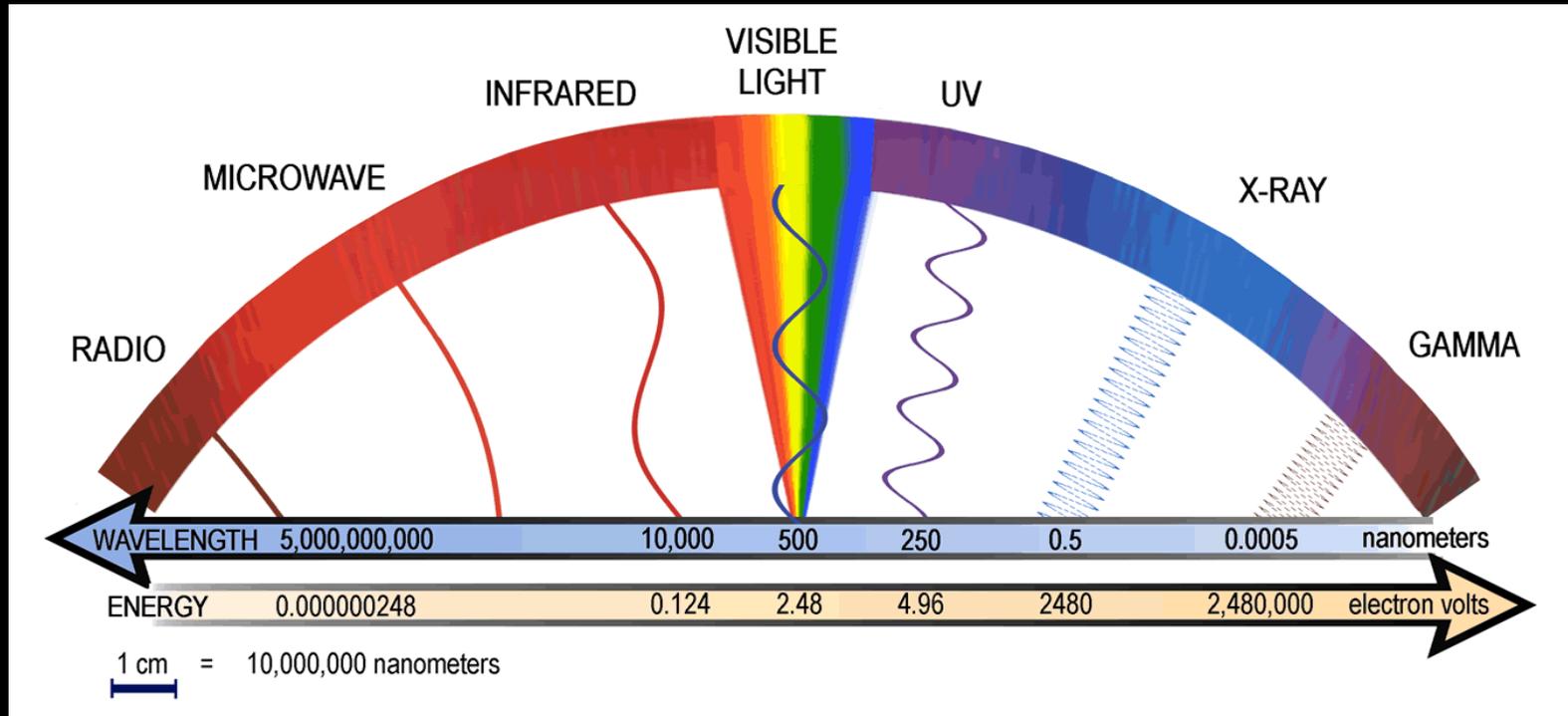


Longitud de onda





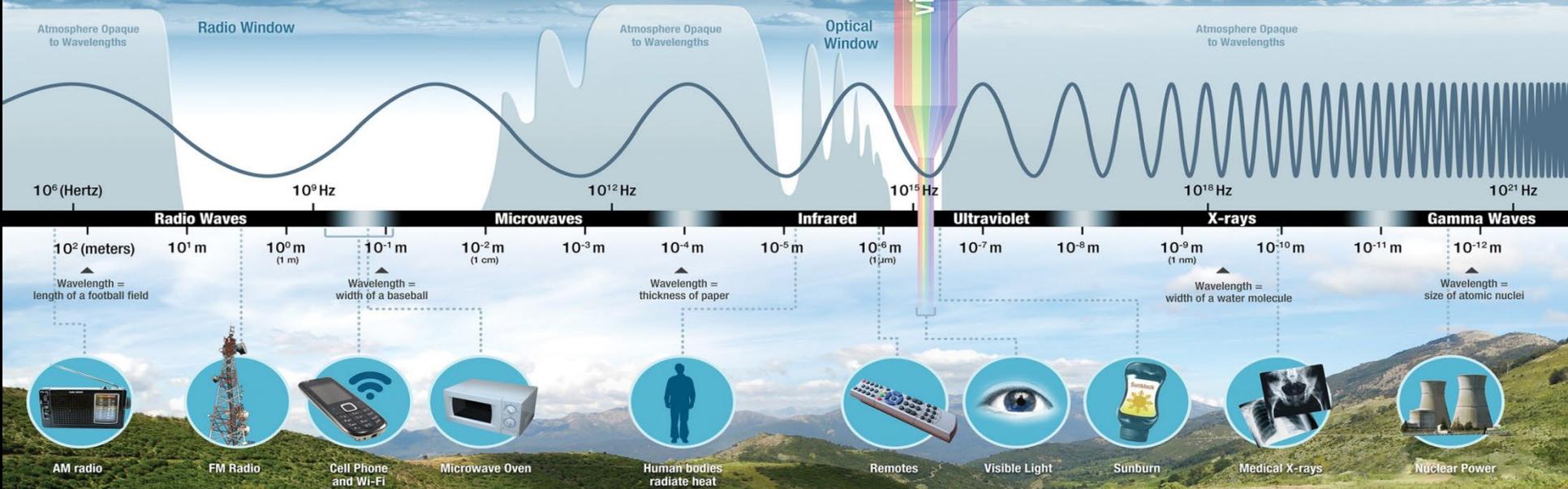
# El espectro electromagnético

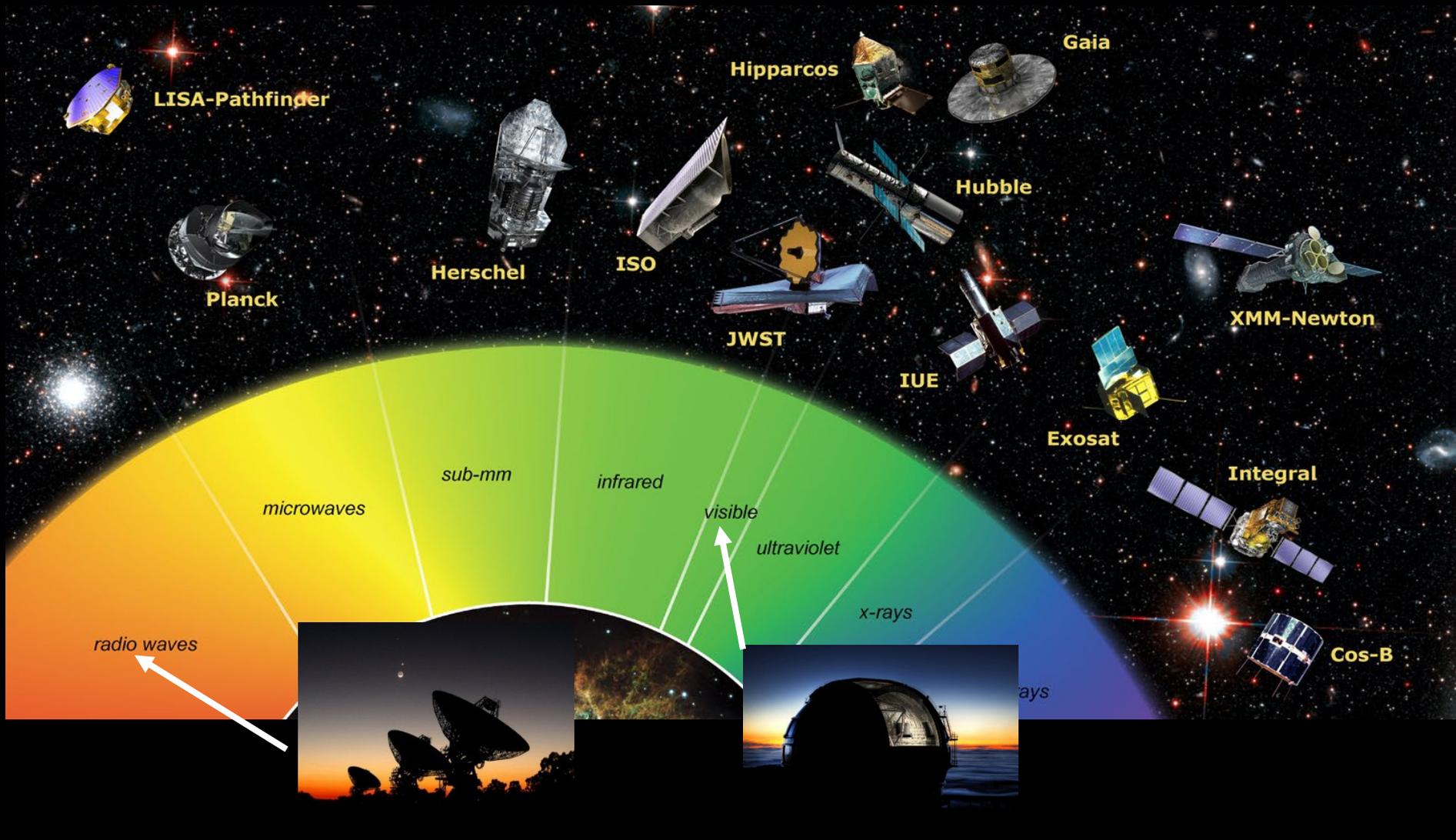


La atmósfera terrestre es opaca a la luz en el infrarrojo, ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

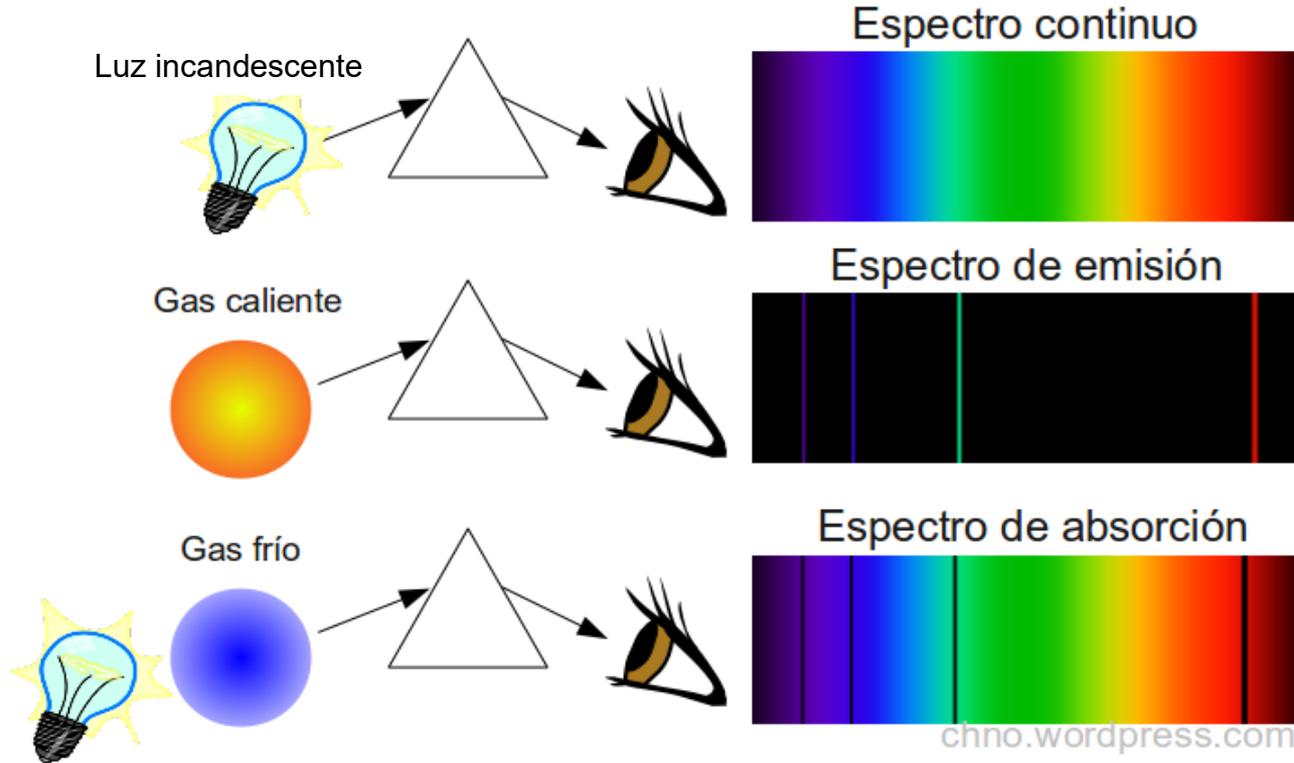


¡Observando solo la luz visible, la imagen del Universo sería INCOMPLETA!

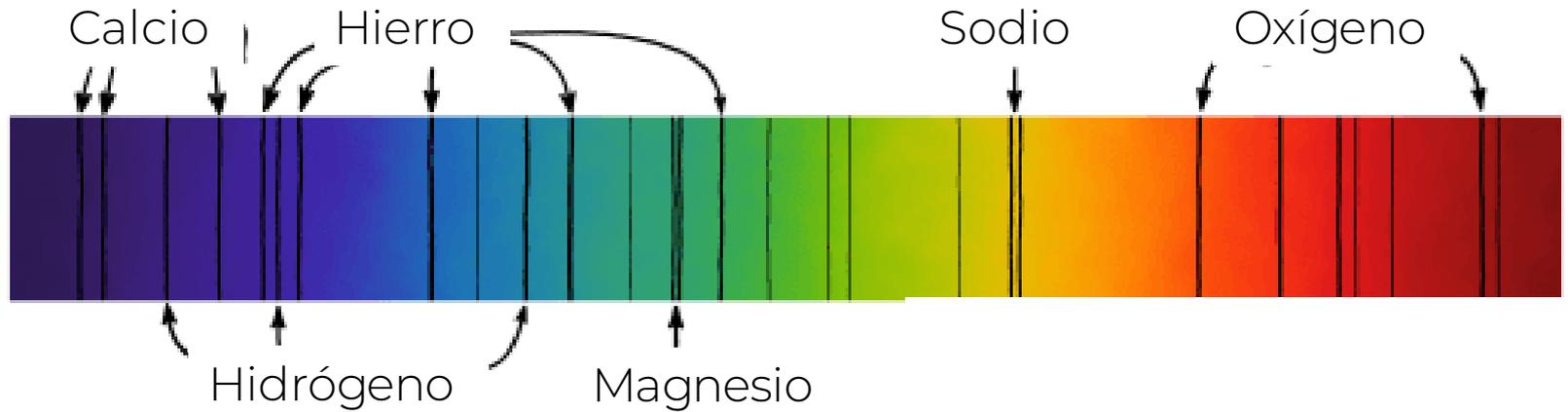




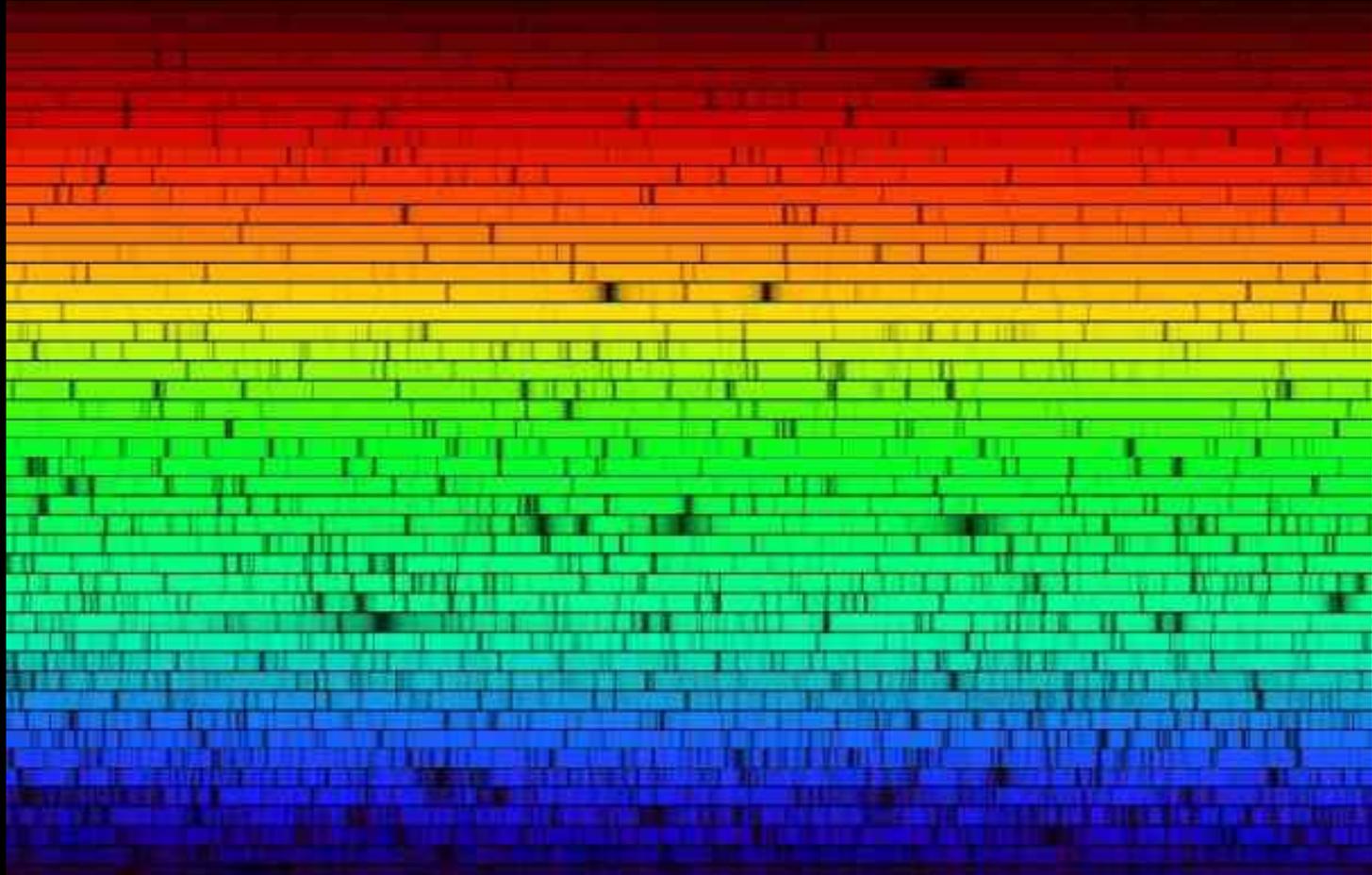
# Una pequeña lección de espectroscopía



# Algunas líneas espectrales del Sol



# El espectro del Sol



# Tipos espectrales (OBAFGKMLTY)

O6.5

B0

B6

A1

A5

F0

F5

G0

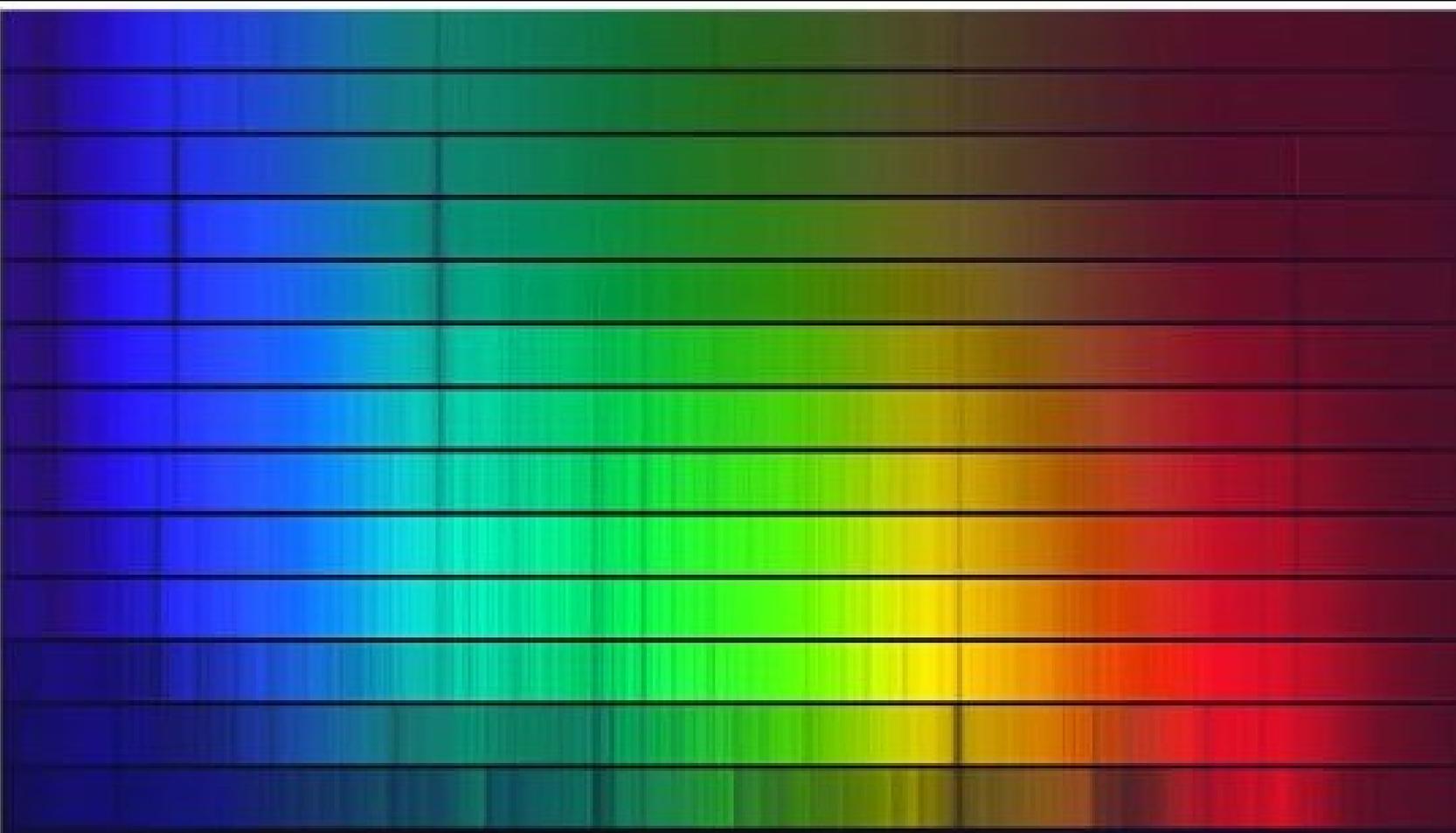
G5

K0

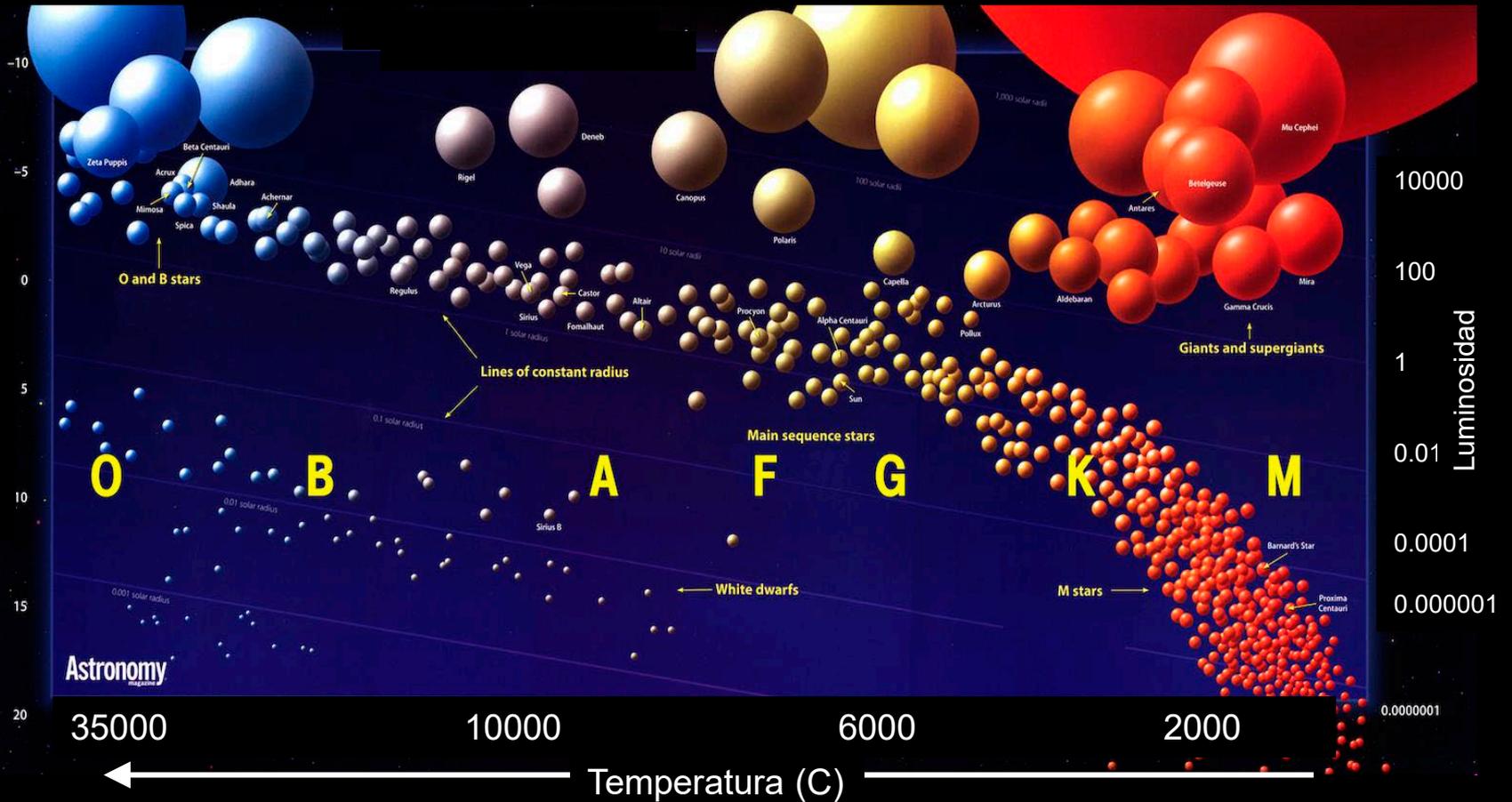
K5

M0

M5



# El diagrama HR (Hertzsprung-Russell)





Las estrellas se forman a partir de nubes de gas llamadas nebulosas

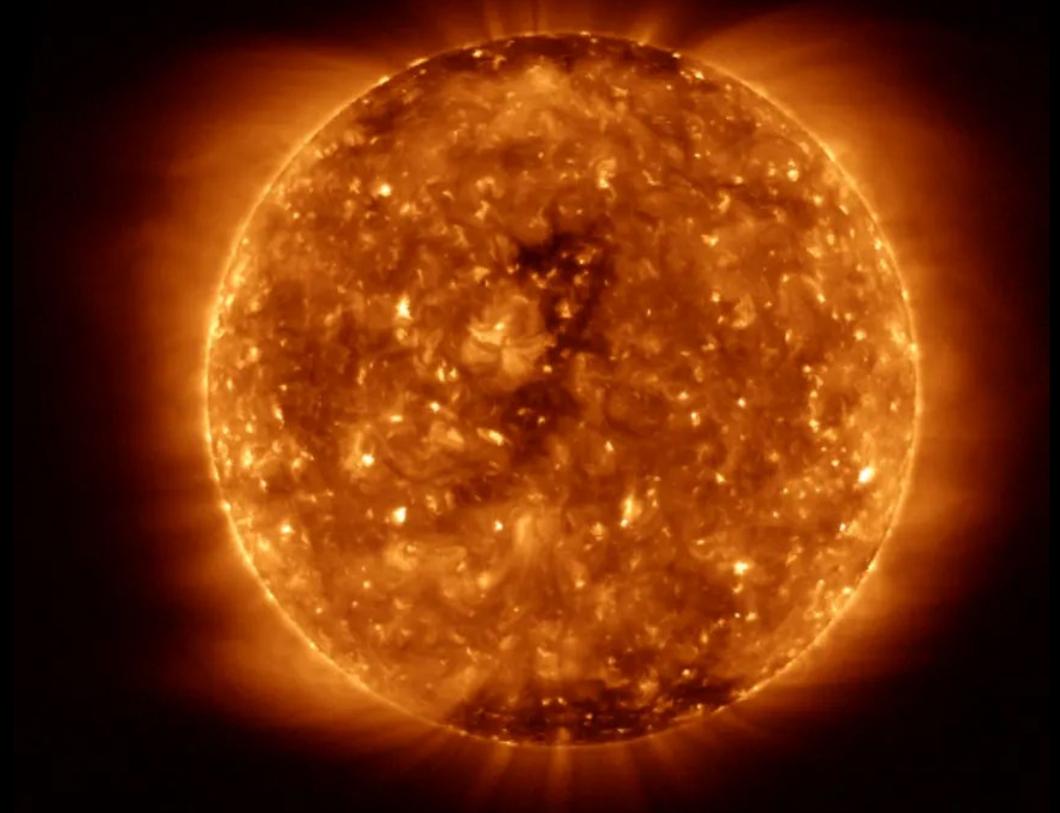
# El Sol actual

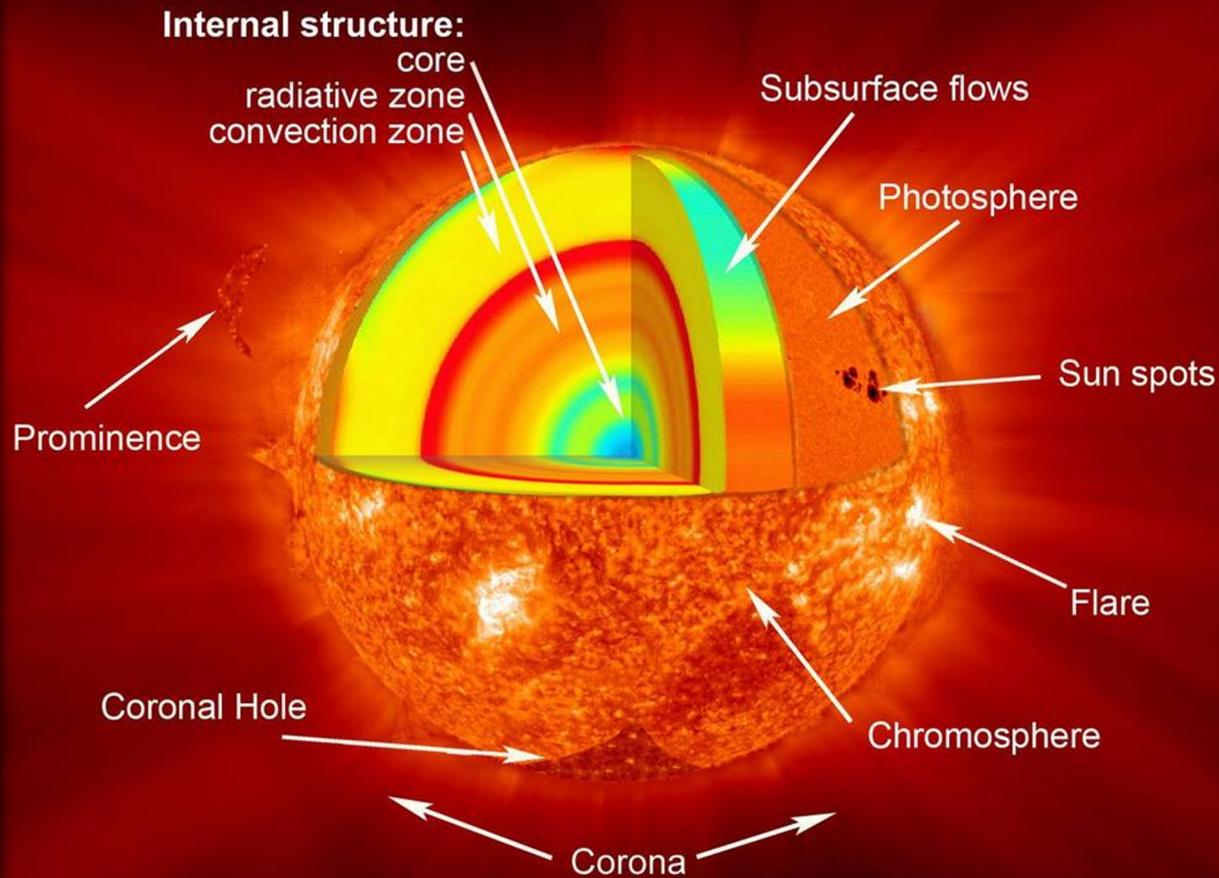
Hidrógeno: 73.4 %

Helio: 24.9 %

$4 \text{ H}^+ \rightarrow \text{He}^{++} + \text{energía}$

$$E = m c^2$$



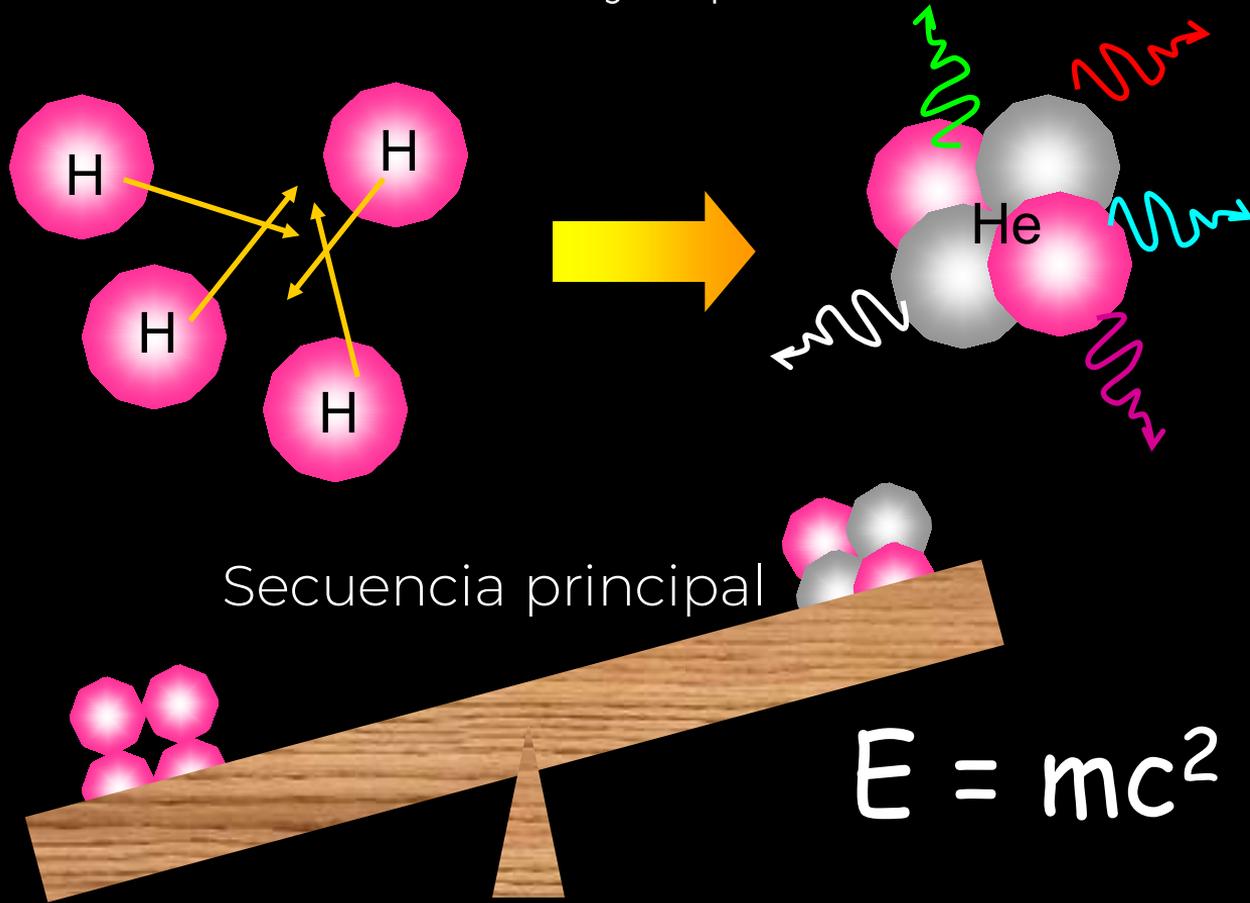


El Sol lleva en esta fase (SECUENCIA PRINCIPAL) unos 5 mil millones de años y le queda otro tanto

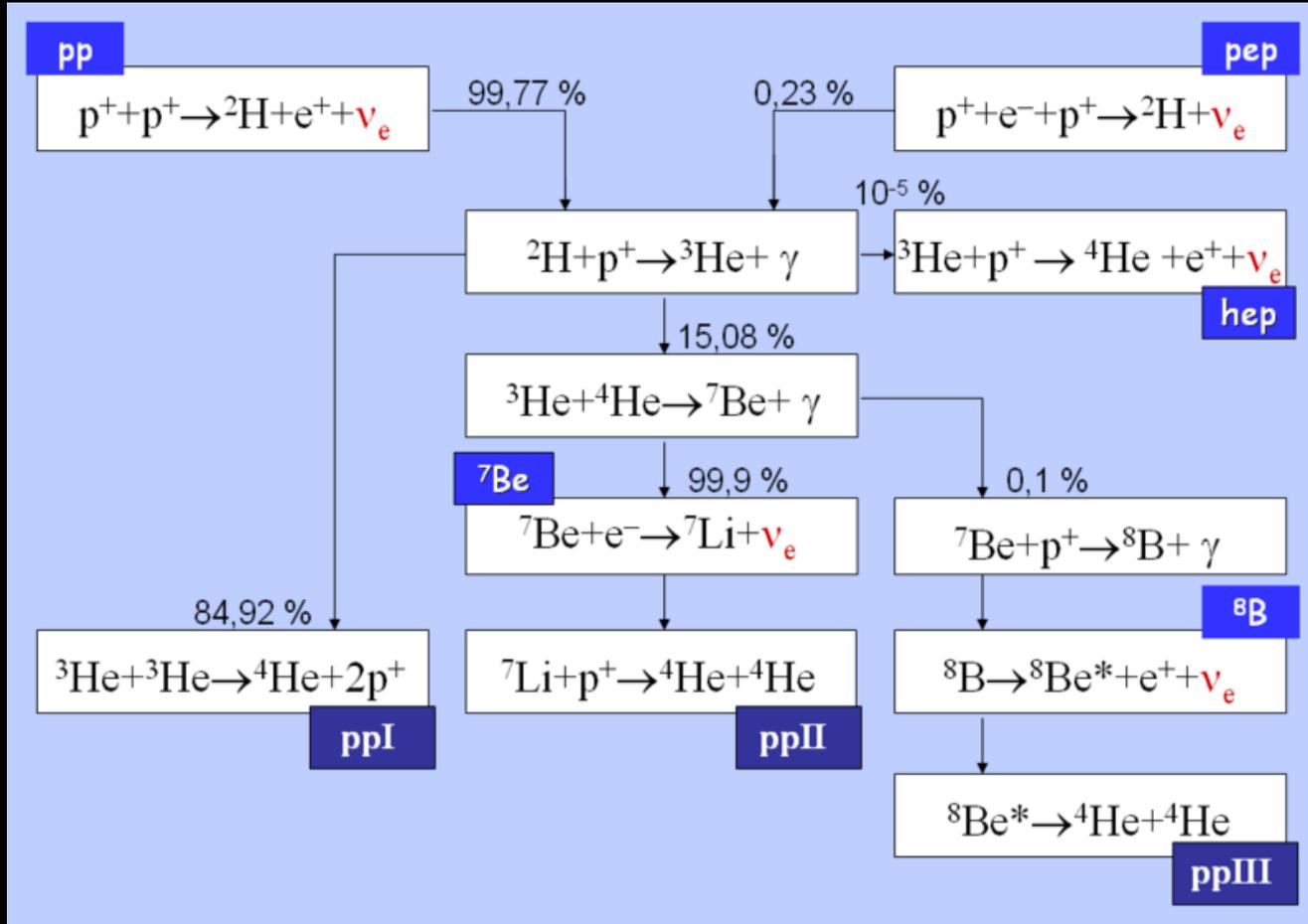
Cada segundo quemamos unos 4 millones de toneladas de hidrógeno

A pesar de ello estando en la secuencia principal sólo perderá el 0.1 % de toda su masa

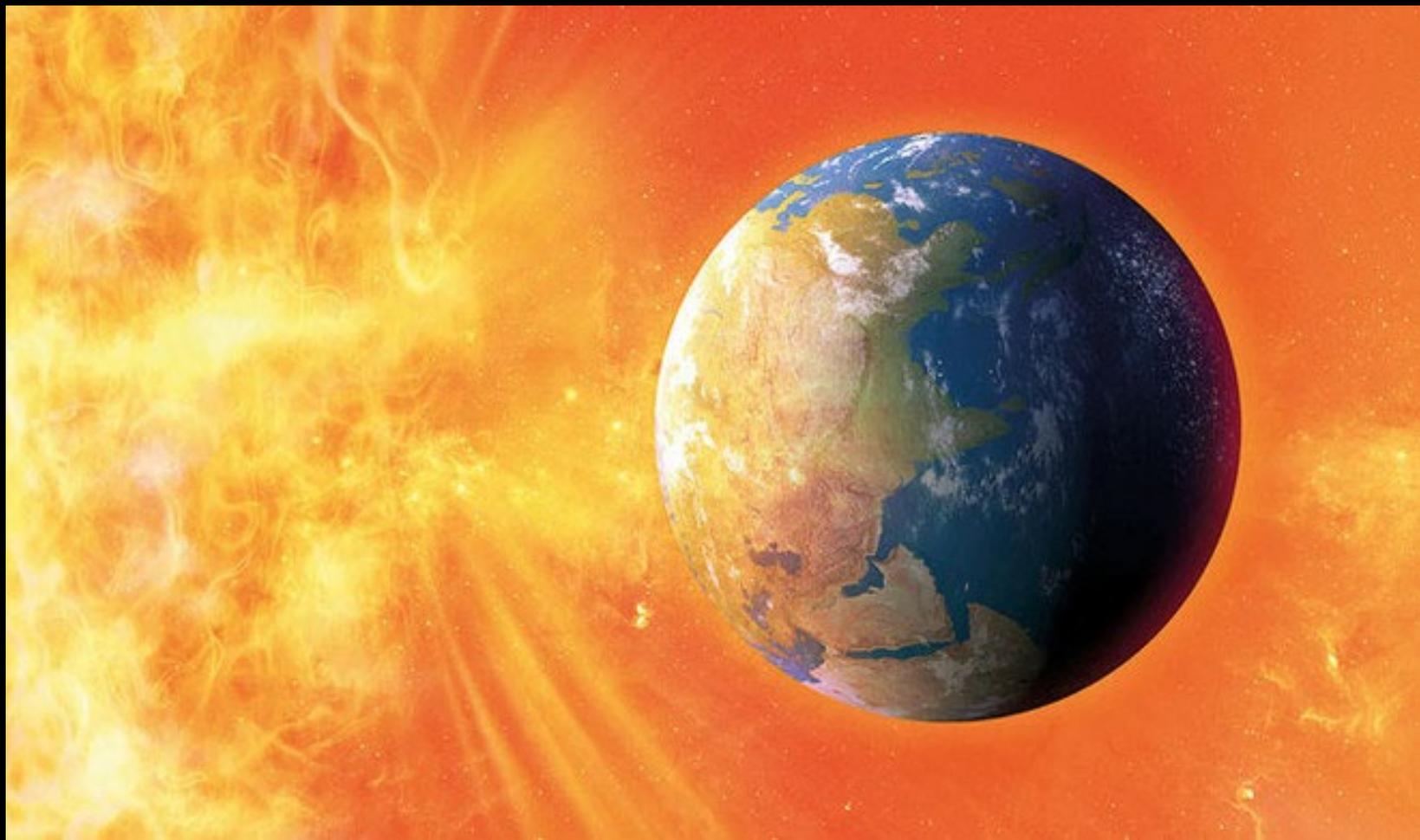
¿Qué sucede en el interior del Sol y de las estrellas durante la mayor parte de su vida?

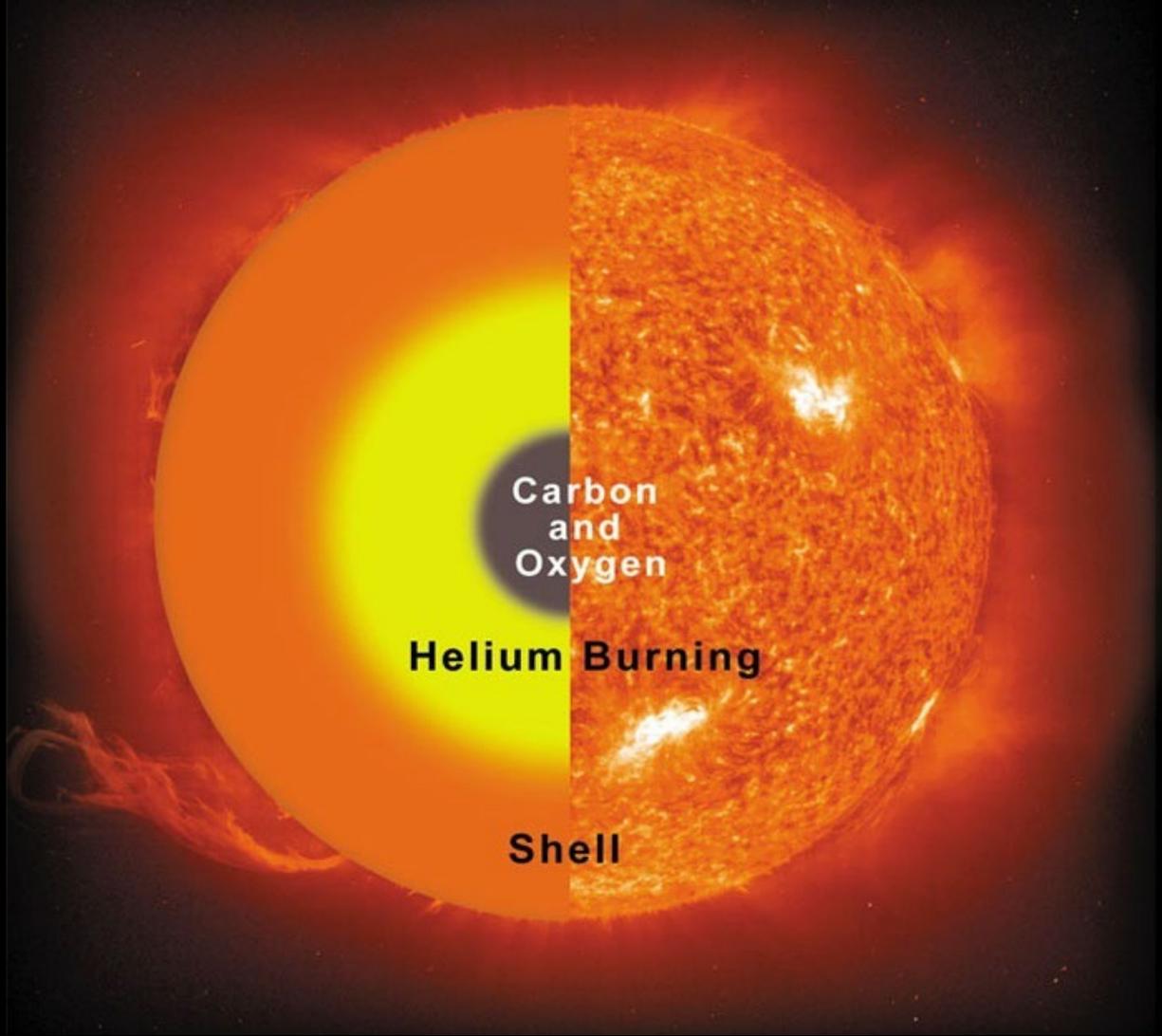


# La realidad es algo más complicada...



# Futuro del Sol





Gigante roja

# Nebulosas planetarias



## Enanas blancas



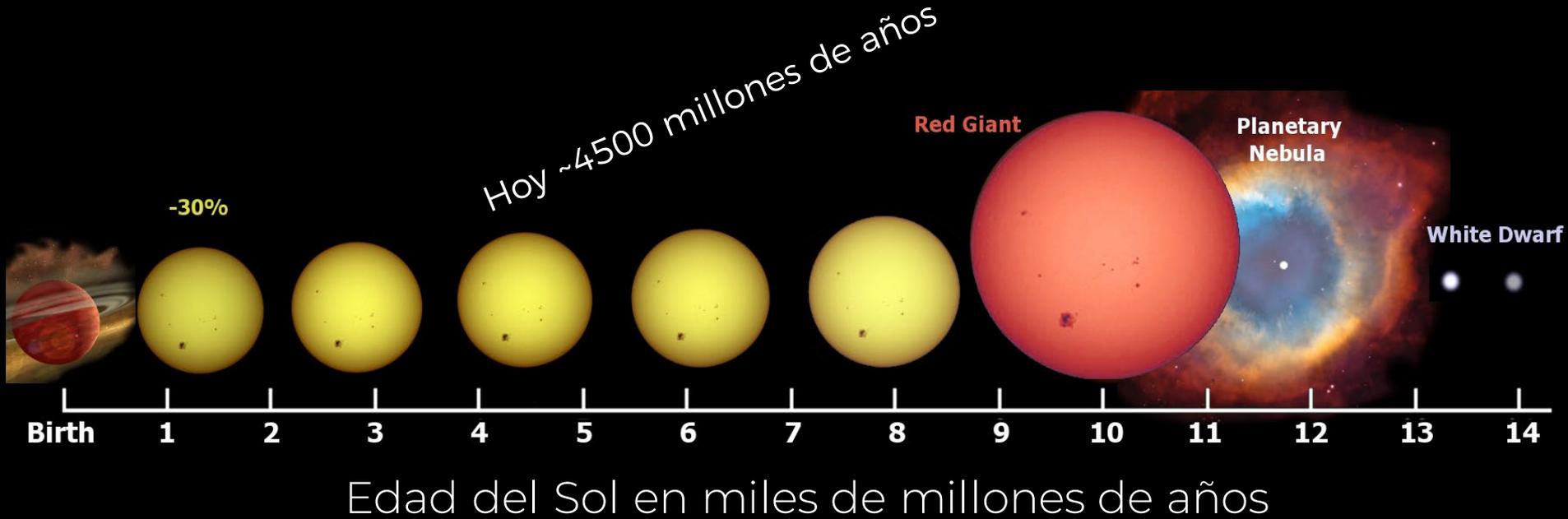
¡1 cucharada pesa  
1 tonelada!

$$M \approx 1.0 M_{\text{sun}}$$

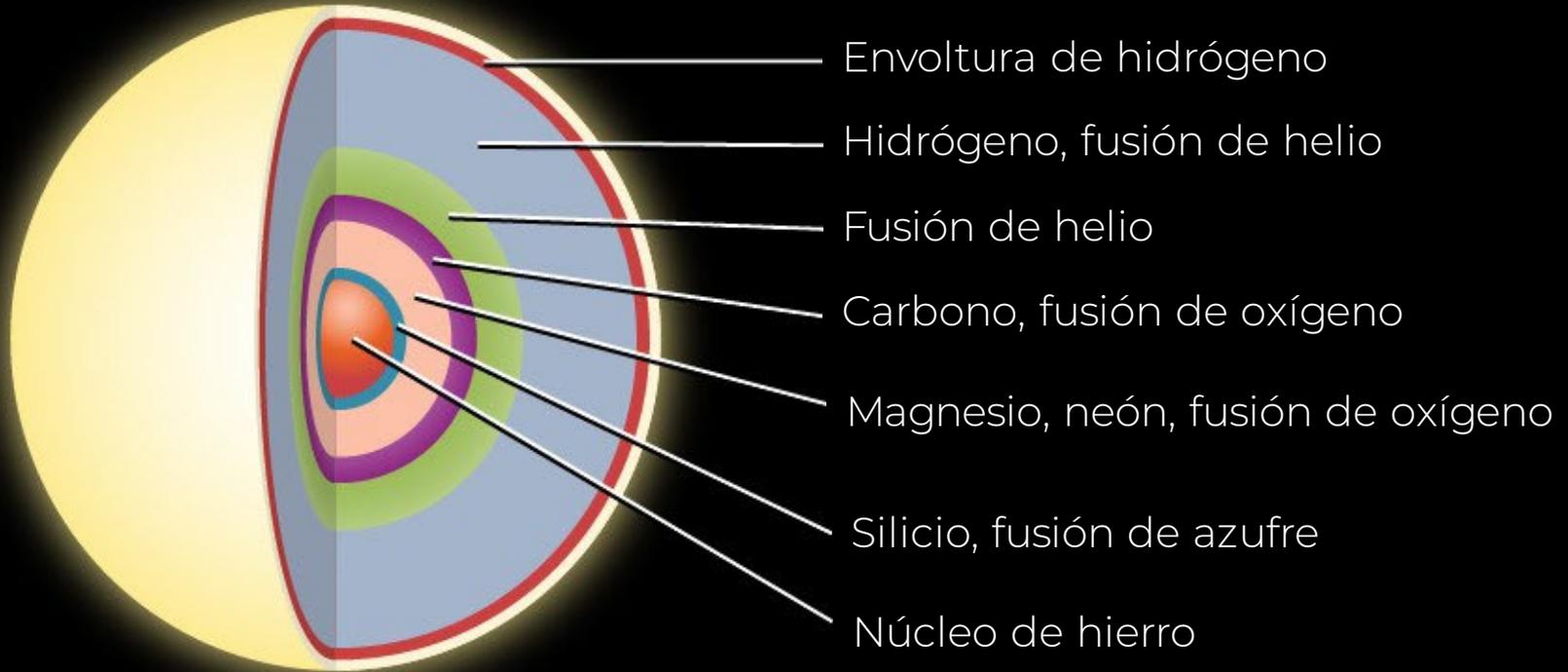
$$R \approx 5800 \text{ km}$$

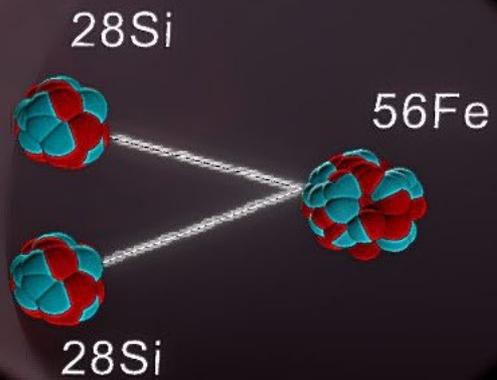
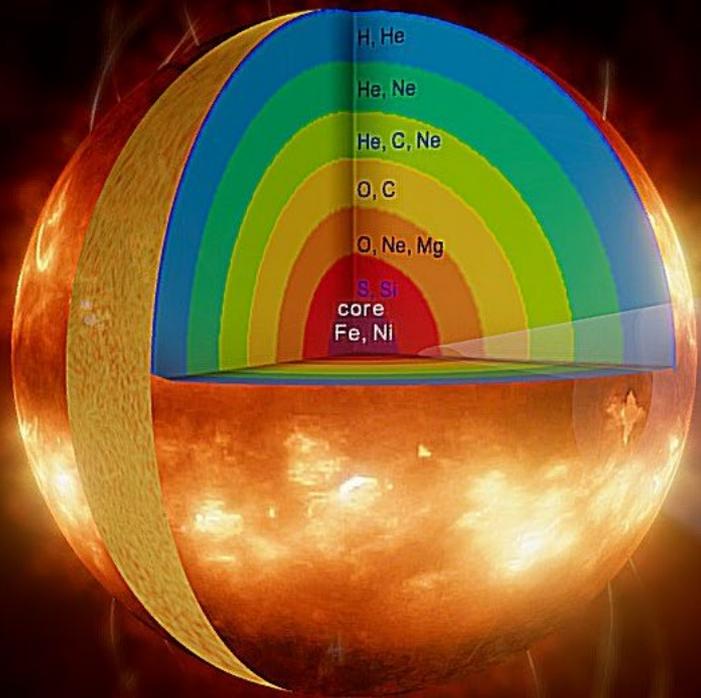
$$V_{\text{esc}} \approx 0.02c$$

# Un vistazo a la evolución del Sol



# Estrellas masivas ( $M > 8 M_{\text{Sol}}$ )

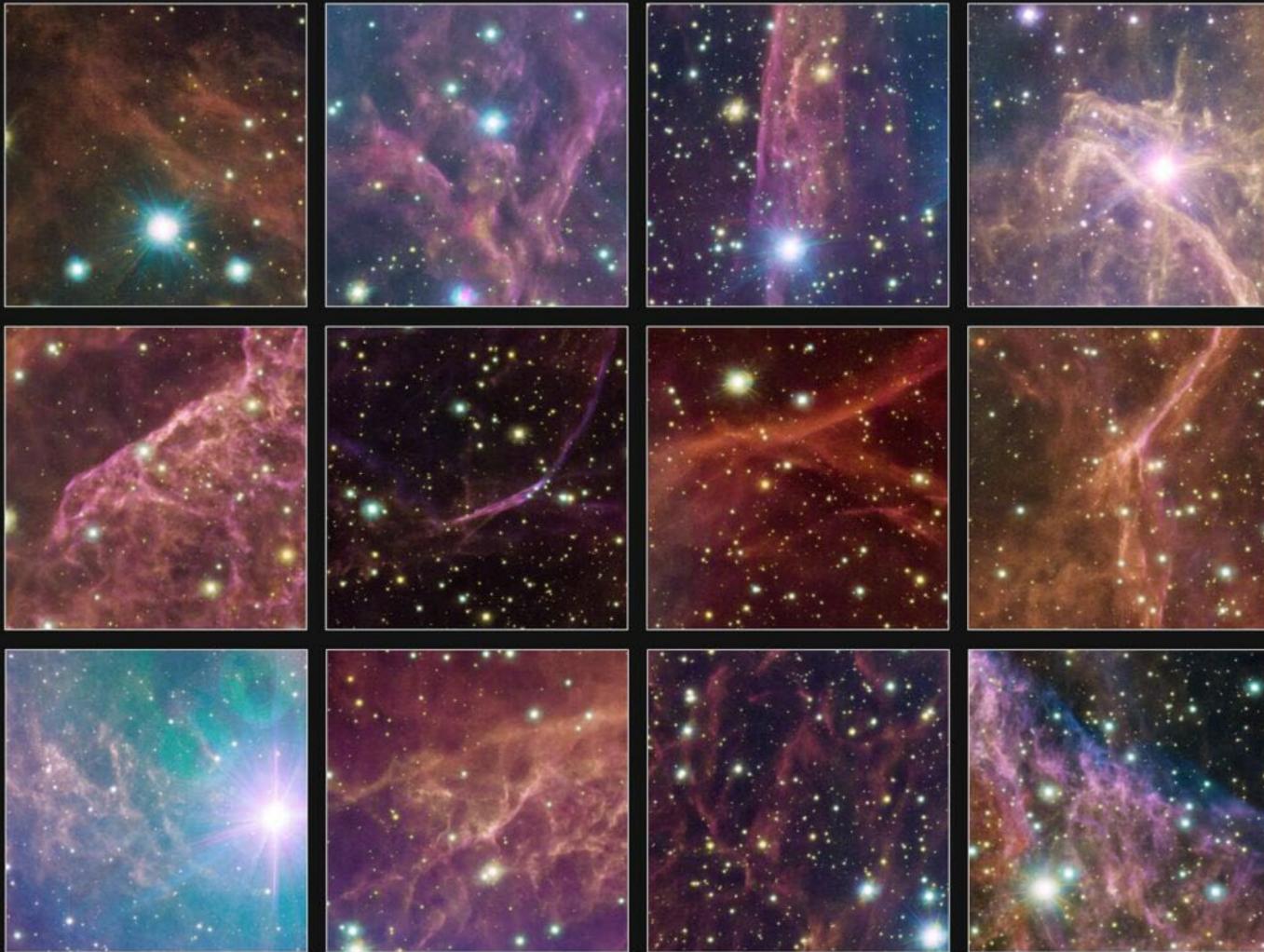




nuclear fusion

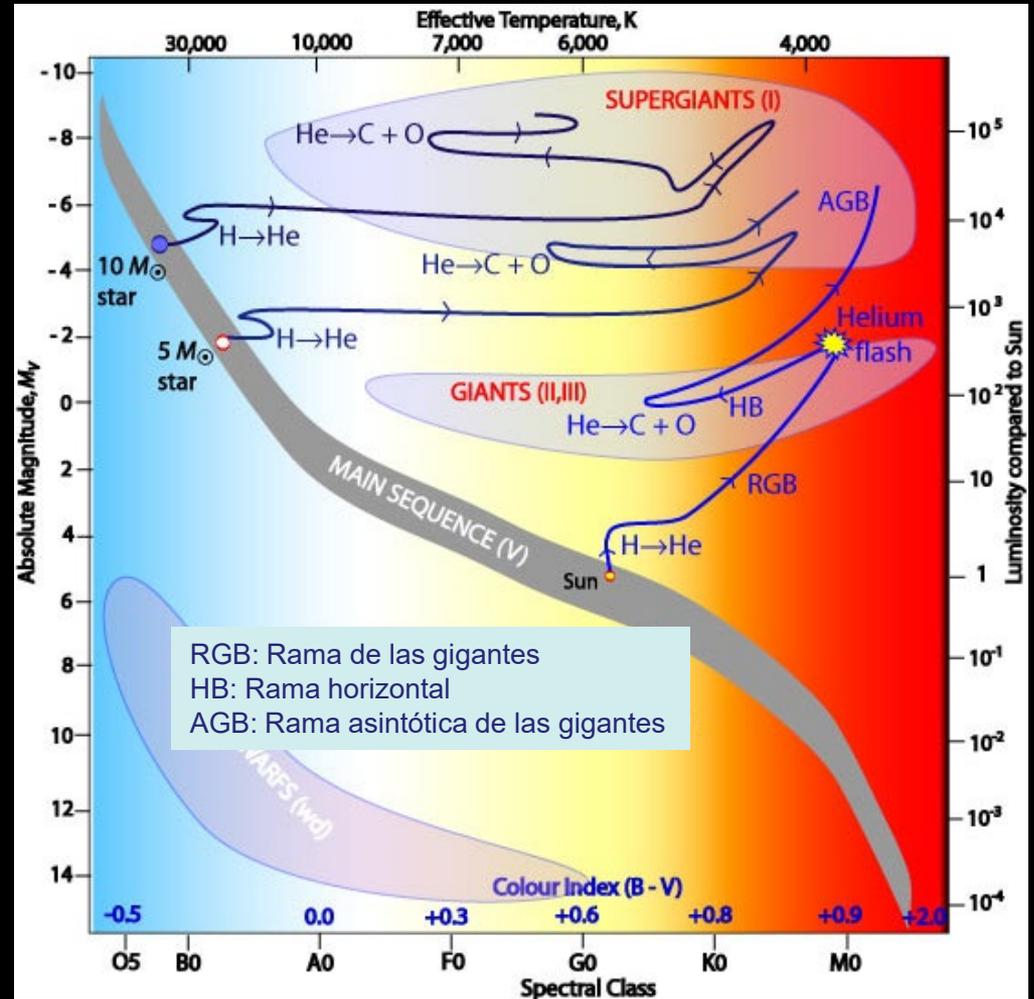


Supergigantes  
hacia supernovas



Restos de  
supernovas

# Evolución post-secuencia principal



Si la estrella inicial tiene una masa entre 8 y 25  $M_{\odot}$ , el resto estelar tendrá una masa  $1.44 M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$ :  
una ESTRELLA DE NEUTRONES

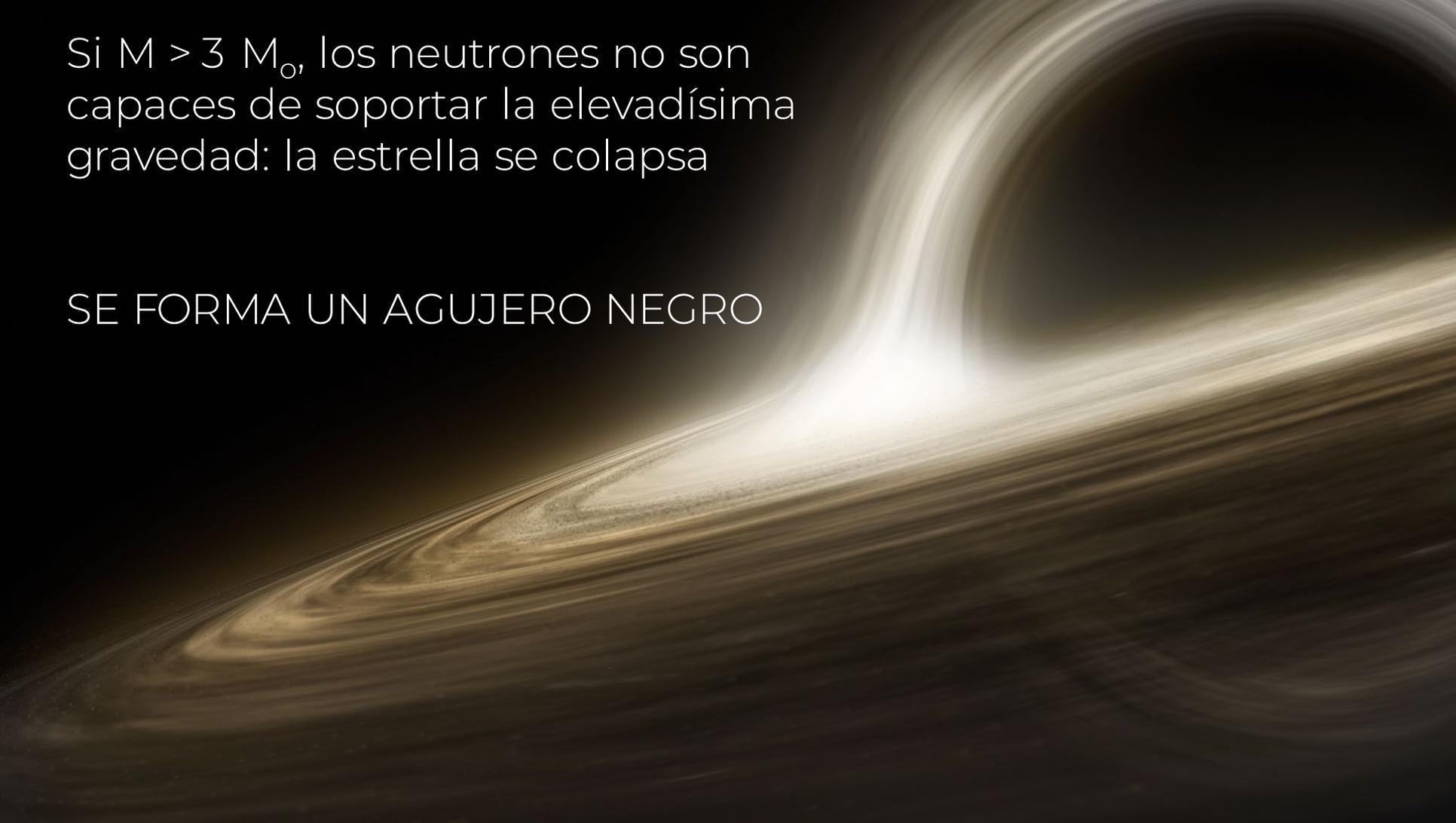
Son objetos con radios entre 10 y 30 km, pero con una densidad de centenas de millones de toneladas por  $\text{cm}^3$

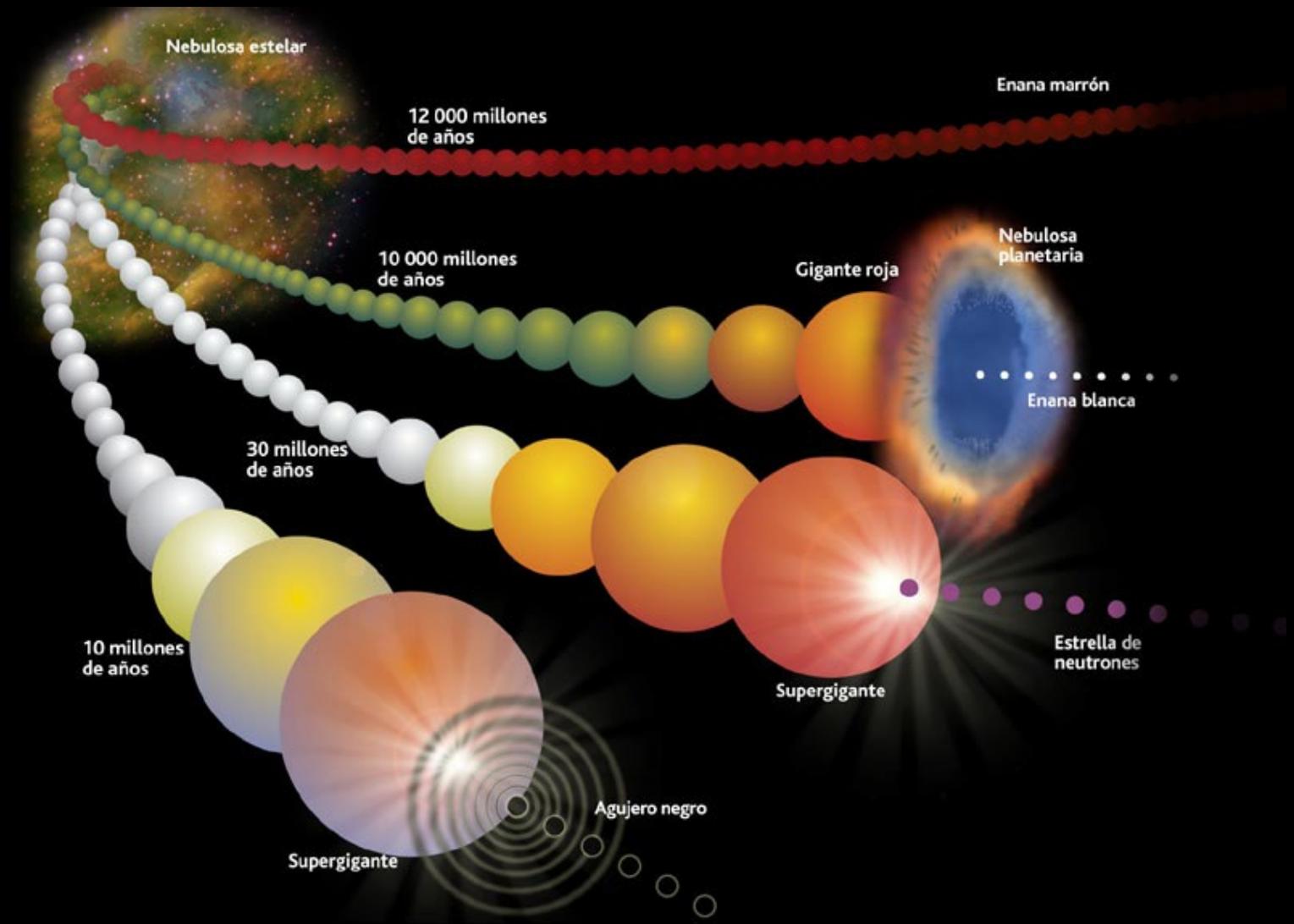
Púlsares

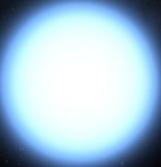


Si  $M > 3 M_{\odot}$ , los neutrones no son capaces de soportar la elevadísima gravedad: la estrella se colapsa

SE FORMA UN AGUJERO NEGRO





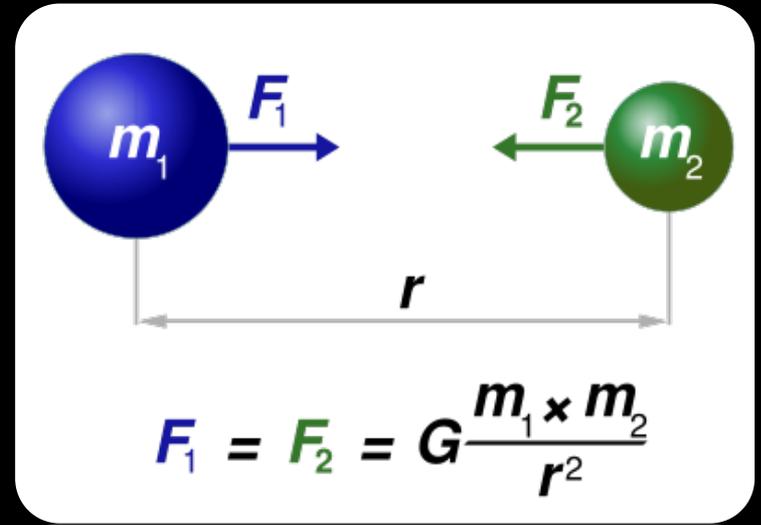
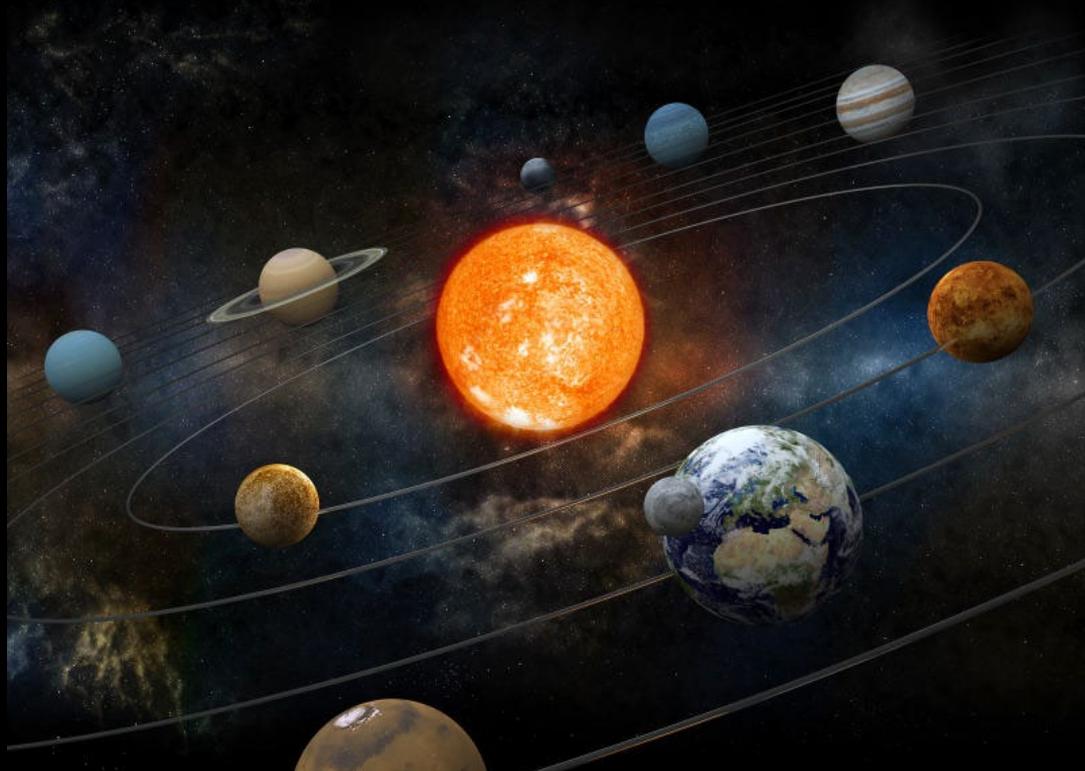
<p><math>&lt; 8 M_{\odot}</math></p>	<p>masa inicial (8-25) <math>M_{\odot}</math></p>	<p><math>&gt; (20-25) M_{\odot}</math></p>
<p><math>&lt; 1.4 M_{\odot}</math></p>	<p>masa final (1.4 – 3) <math>M_{\odot}</math></p>	<p><math>&gt; 3 M_{\odot}</math></p>
<p>enana blanca</p> 	<p>estrella de neutrones</p> 	<p>agujero negro estelar</p> 

Sólo las estrellas muy masivas pueden convertirse en agujeros negros

¿Qué son los agujeros negros?

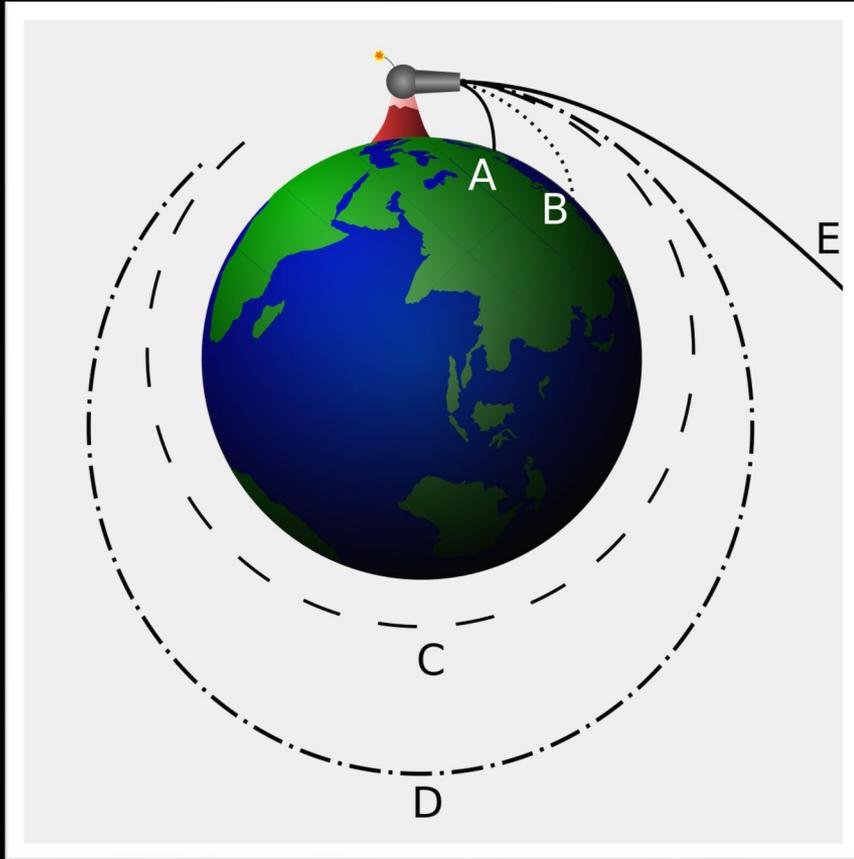


# La Gravitación Universal de Isaac Newton (1643-1727)



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

# Velocidad de escape



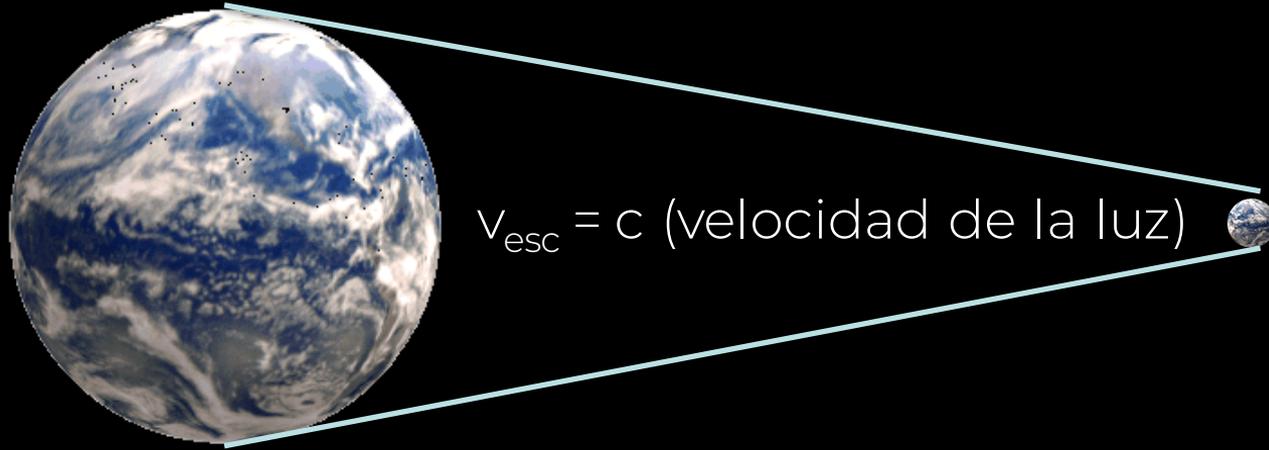
Velocidad mínima con la que debe lanzarse un cuerpo desde la superficie de un astro para que escape de su atracción.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = G\frac{M_E m}{R_E}$$

$$v_1 = \sqrt{2G\frac{M_E}{R_E}}$$

¡¡NO depende de la masa del objeto que pretende escapar!!

Si el radio de la Tierra se reduce a 1 cm con la misma masa



Cualquier objeto cuya velocidad de escape sea igual o superior a la velocidad de la luz

¡es un agujero negro!

# Velocidades de escape típicas



Ceres

0.64 km/s



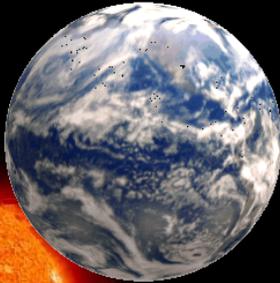
Luna

2.4 km/s



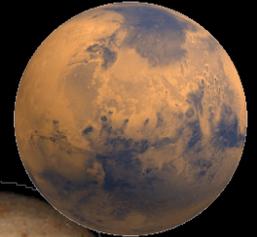
Mercurio

4.3 km/s



Marte

5.0 km/s



Tierra

11.2 km/s

Júpiter

59.5 km/s

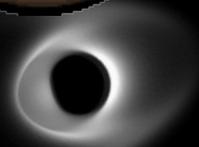


Sol

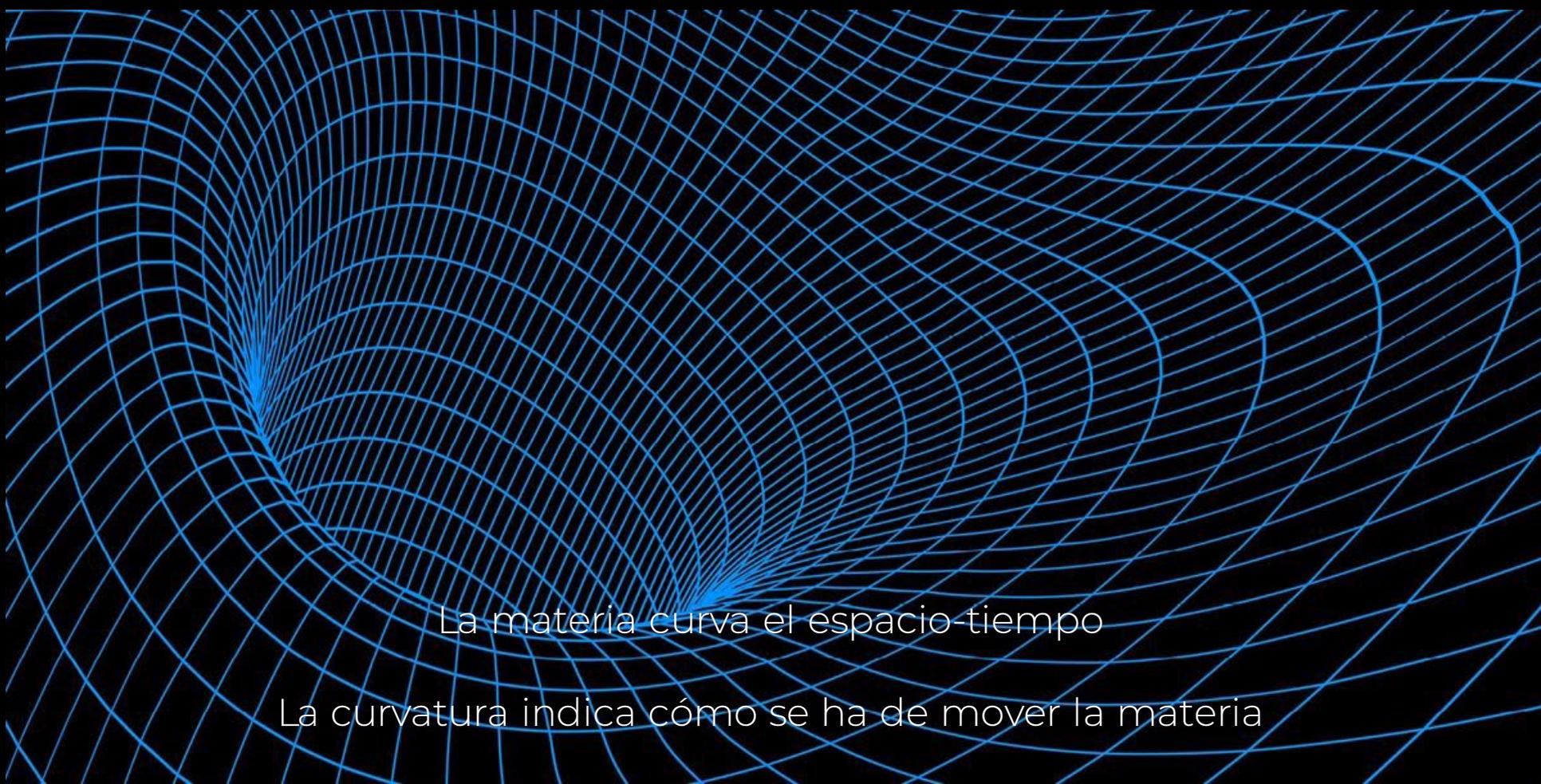
617.7 km/s

Agujero negro

300 000 km/s



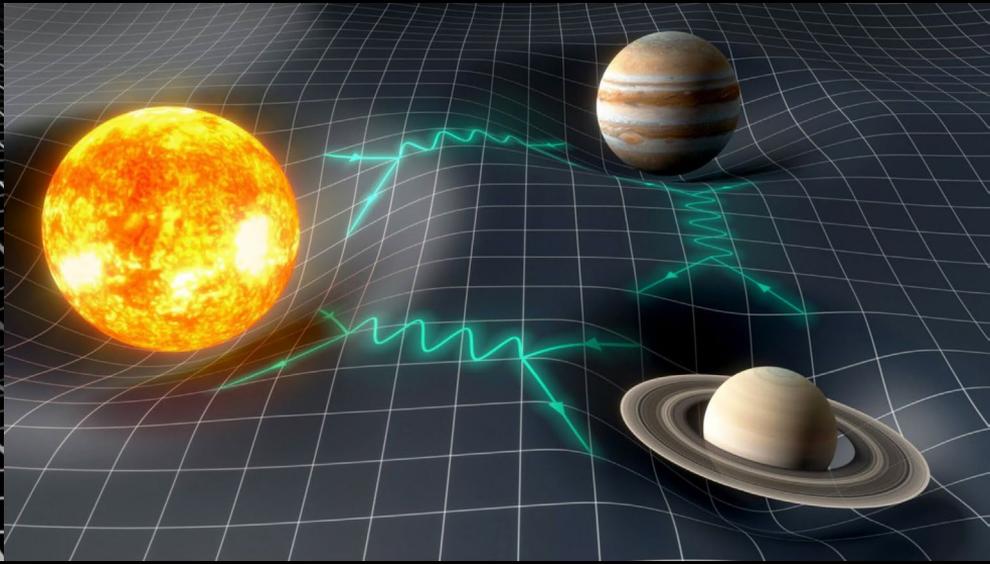
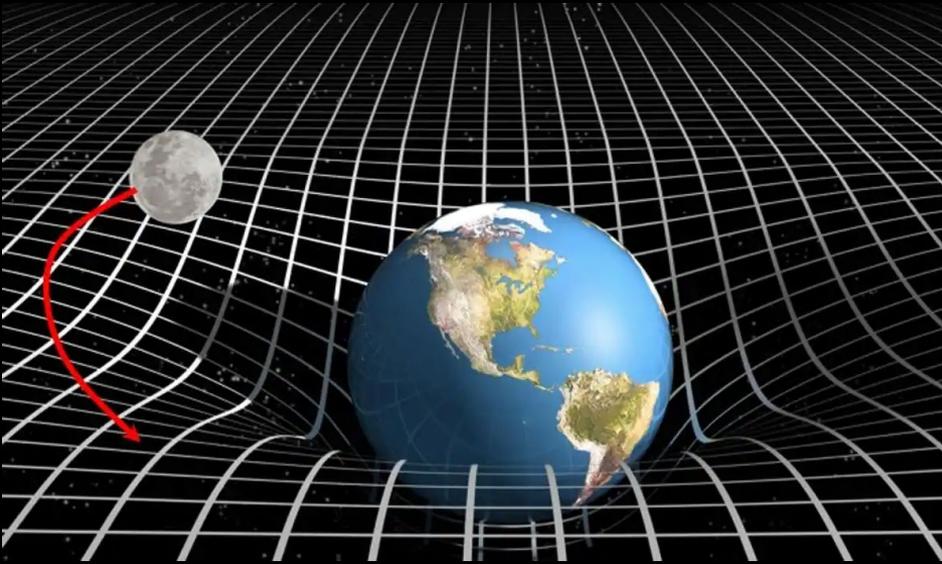
# Teoría de la Relatividad y agujeros negros



La materia curva el espacio-tiempo

La curvatura indica cómo se ha de mover la materia

Los planetas y satélites y, en general, todos los objetos del universo se mueven en un espacio deformado por la presencia de materia



Ley de Gravitación  
Universal de Newton

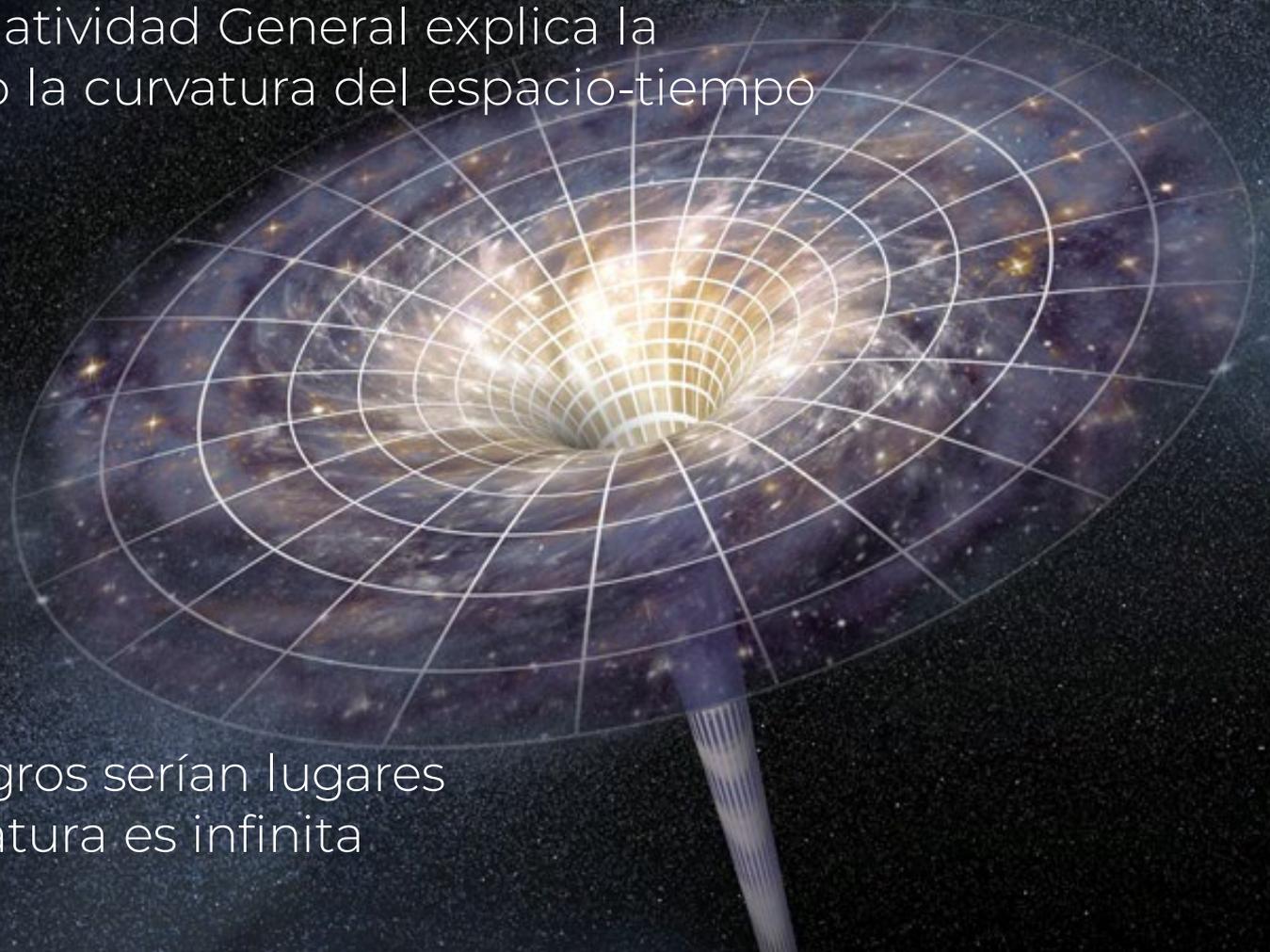
$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

Ecuación de  
campo de Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Curvatura = Densidad de energía

Dado que la Relatividad General explica la gravedad como la curvatura del espacio-tiempo



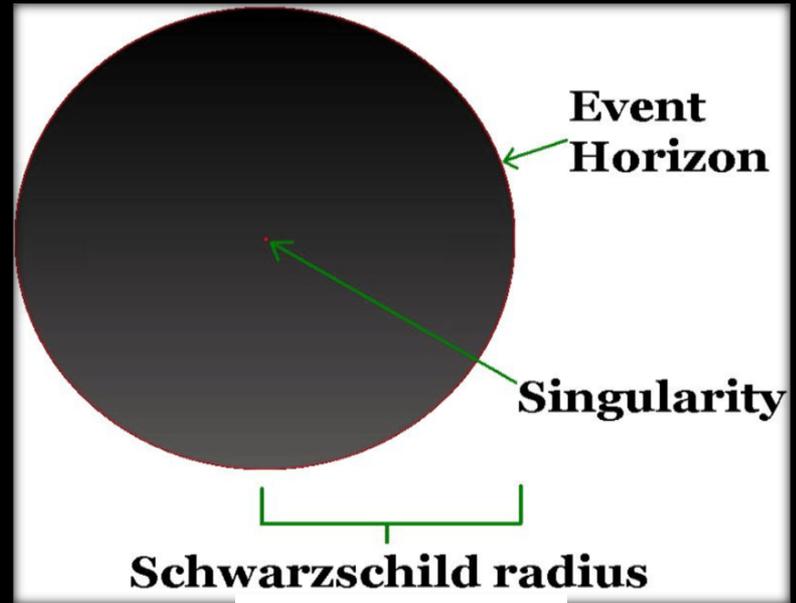
Los agujeros negros serían lugares donde esa curvatura es infinita

¿Qué tamaño tiene un agujero negro?

Todo lo que suceda dentro de una esfera de radio igual al radio de Schwarzschild no puede ser visto por un observador externo: es su horizonte de sucesos.

Cualquier objeto tiene un radio de Schwarzschild asociado. Pero, sólo si su masa está contenida dentro de ese radio, el objeto es un agujero negro.

En otras unidades



$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$R_s = 3 \left( \frac{M}{M_{Sun}} \right) km$$

## Radio de Schwarzschild de algunos objetos astronómicos

Objeto	Masa (masas solares)	Radio (km)	Velocidad de escape (km/seg)	Radio de Schwarzschild
Tierra	0,00000304	6357	11,3	9 mm
Sol	1	696.000	617	2,95 km
Enana blanca	0,8	10.000	5.000	2,4 km
Estrella de neutrones	2	8	250.000	5,9 km
Núcleo de galaxia	50.000.000	?	?	1 47.500.000 km



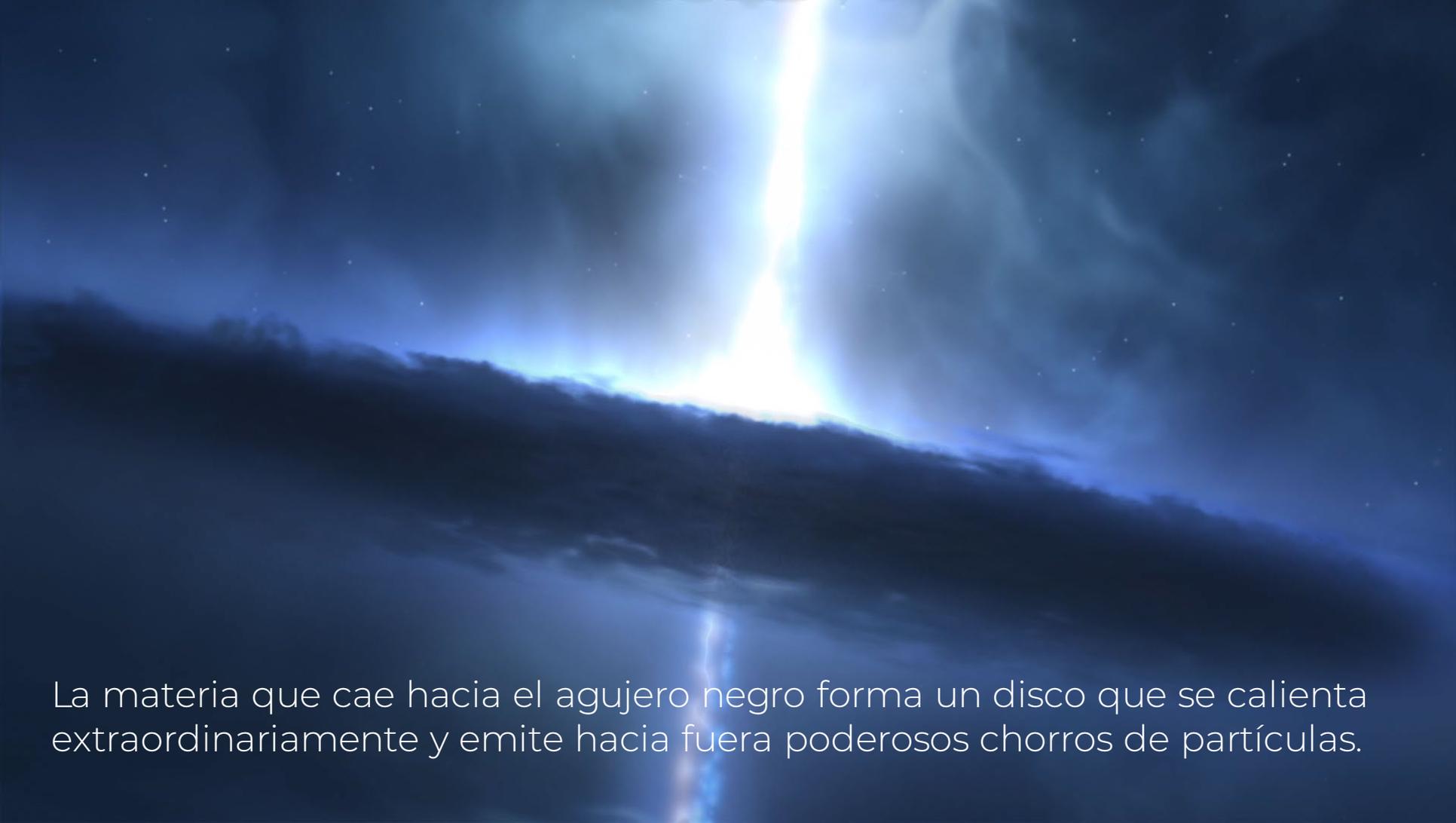
¿Cómo se detectan  
los agujeros negros?

Muchos sistemas binarios de estrellas contienen agujeros negros que son detectados por los rayos X que emiten.

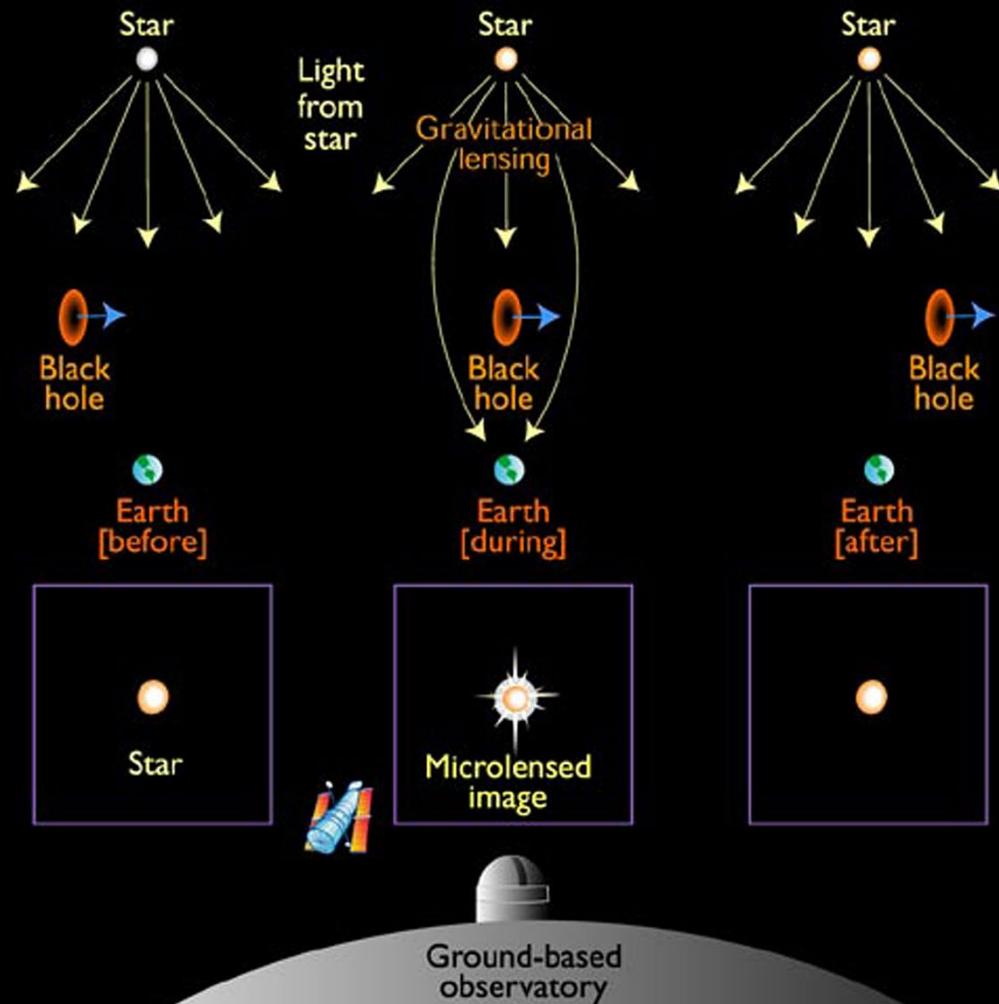
A black hole with a glowing accretion disk. The disk is composed of multiple layers of gas and dust, appearing as a series of concentric, swirling bands of light. The innermost part of the disk is the brightest, glowing white and yellow, while the outer parts are dimmer, appearing in shades of orange and red. The black hole itself is a dark, circular void in the center of the disk. The background is a dark, starry space.

Los agujeros negros capturan el material estelar cercano que se calienta hasta temperaturas de millones de grados y emite rayos X

Cuanto más masivo es el agujero negro, mayor es la fuerza gravitatoria y mayor el efecto sobre la estrella visible.



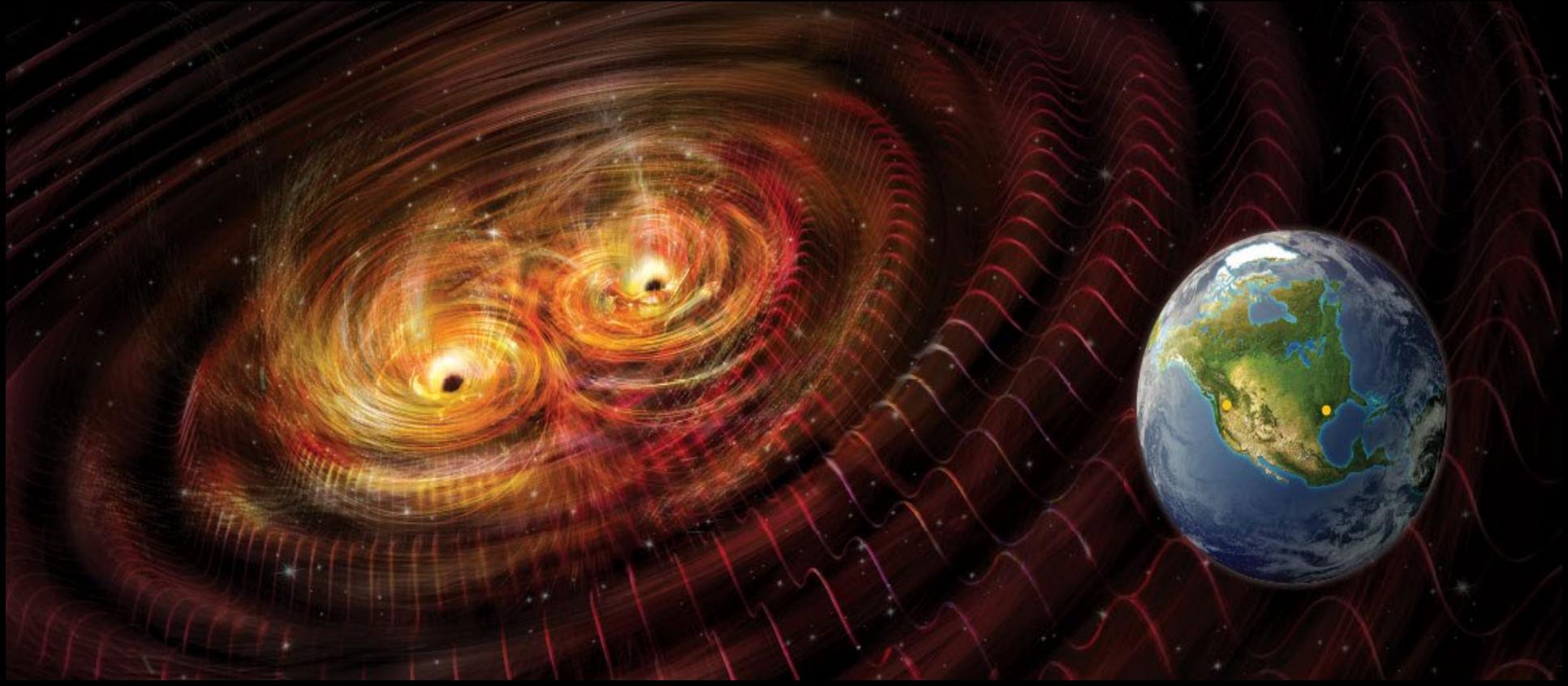
La materia que cae hacia el agujero negro forma un disco que se calienta extraordinariamente y emite hacia fuera poderosos chorros de partículas.

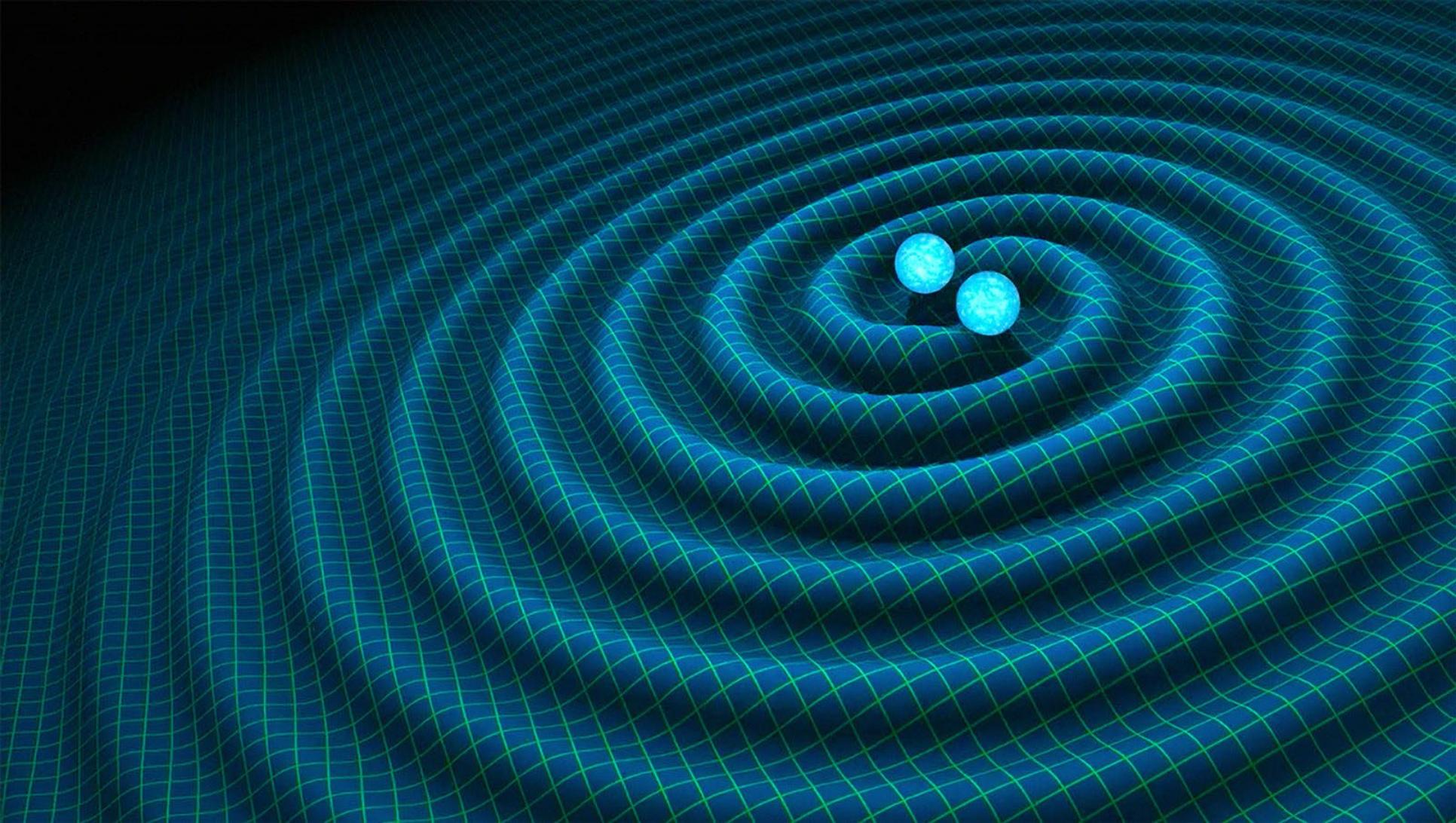


La Relatividad proporciona otras formas de detectar agujeros negros

Por ejemplo, a través de las microlentes gravitatorias

O, a partir de las ONDAS DE GRAVEDAD,  
predichas por Albert Einstein en 1916





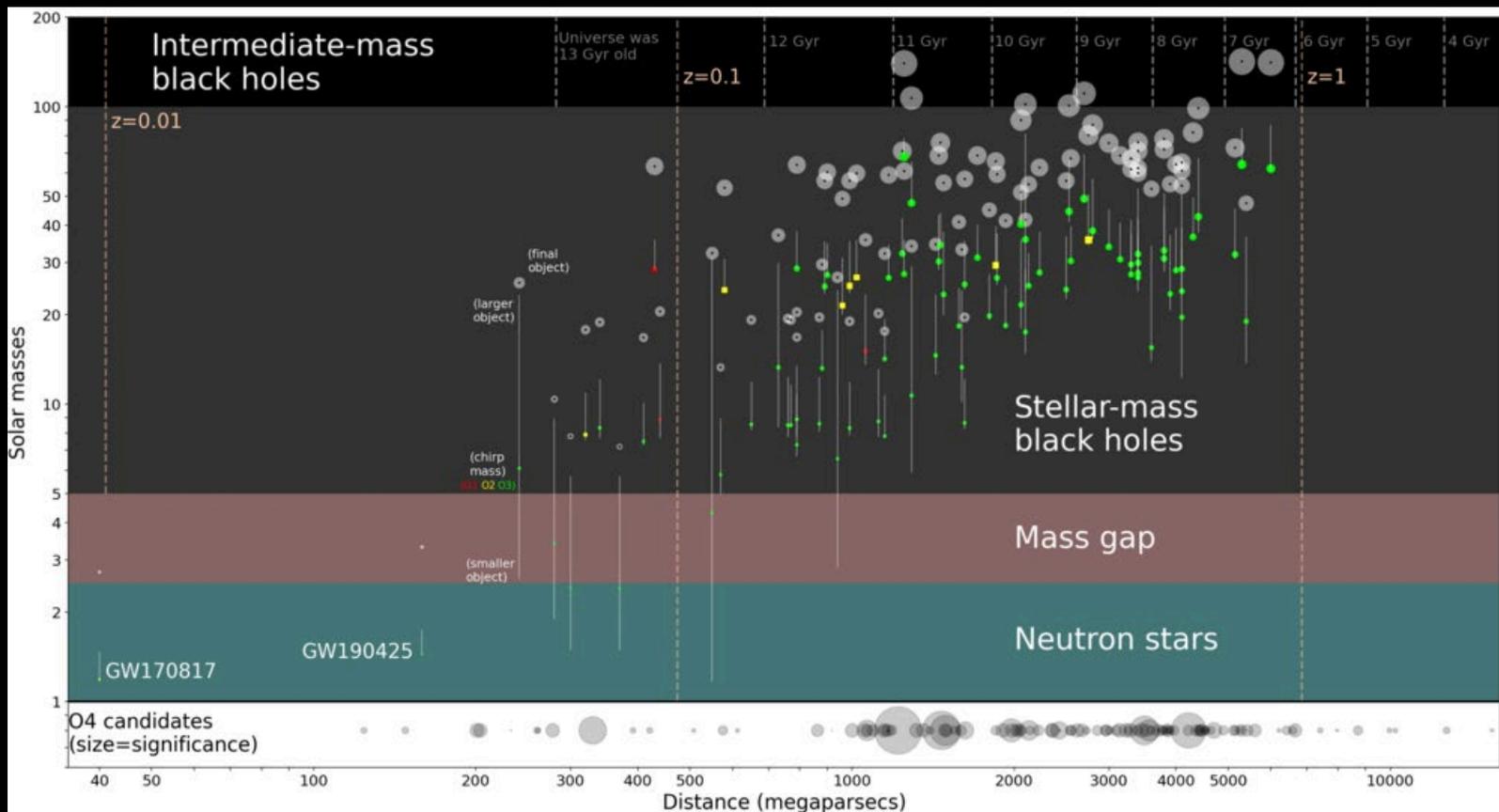
En 2015, a unos 1 300 millones de años luz de nosotros, dos agujeros negros con masas 36 y 29 veces mayores que la de nuestro Sol colisionaron, fundiéndose en uno de 62 masas solares.

La diferencia de masas, unos 3 soles, se convirtió en una titánica oleada de energía y en forma de ONDA GRAVITATORIA

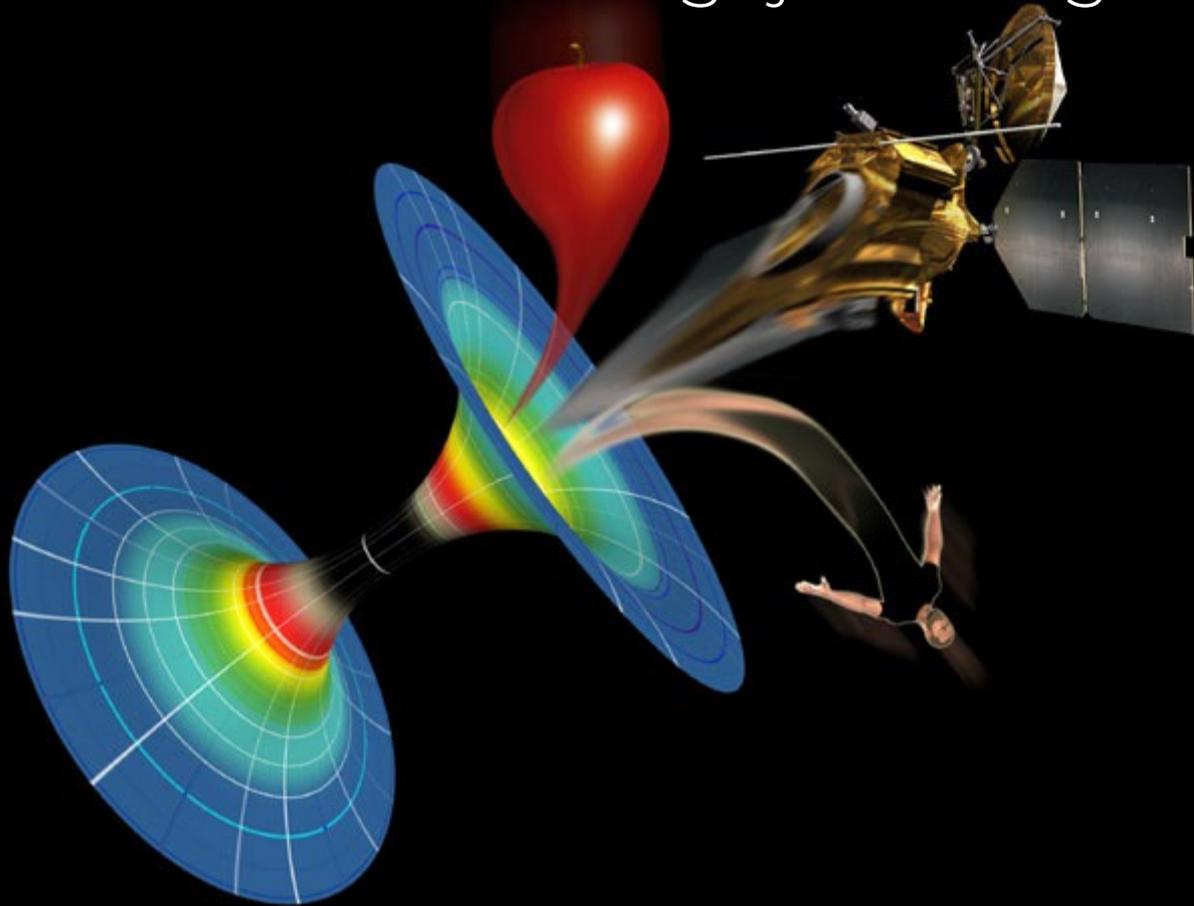
En un brevísimo instante, se emitió más energía que la luz de todas las estrellas del Universo visible.



Se han detectado unos 1 00 fenómenos violentos de este tipo, con ondas gravitatorias de gran intensidad: colisiones de agujeros negros, colisiones de estrellas de neutrones y colisiones mixtas en diferentes rangos de masa.



# Efectos de los agujeros negros



Lejos del agujero negro, un objeto no siente una fuerza gravitatoria especial. Al acercarse al horizonte, comienza a sentir "fuerzas de marea"



Muy cerca del agujero, las "fuerzas de marea" se hacen tan intensas que terminan destrozándolo (efecto spaghetti)

# ¿Qué sentiría un astronauta al caer en un agujero negro?

Lejos del agujero no sentiría ninguna fuerza gravitatoria: carecería de peso.

A medida que se acercase al horizonte, comenzaría a sentir fuerzas gravitacionales "de marea".

El cuerpo del astronauta se estiraría en milisegundos. Las fuerzas "de marea" se harían tan intensas que terminarían destruzándolo (efecto spaghetti).



# ¿Qué vería un observador fuera del agujero negro?



Al acercarse el astronauta al horizonte de sucesos, el observador externo lo vería moverse cada vez más lentamente.

Y nunca lo vería alcanzar el horizonte ya que la luz que emite el astronauta tardaría cada vez más tiempo en llegar al observador.

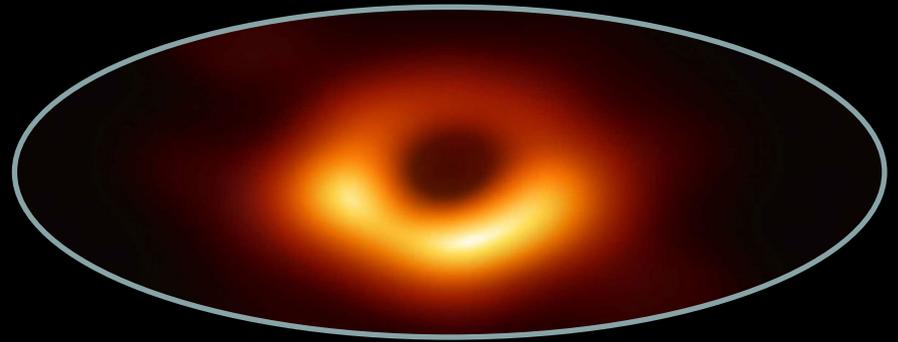
La radiación emitida exactamente al cruzar el horizonte se mantendría allí para siempre, dando la impresión de estar congelada.

2016



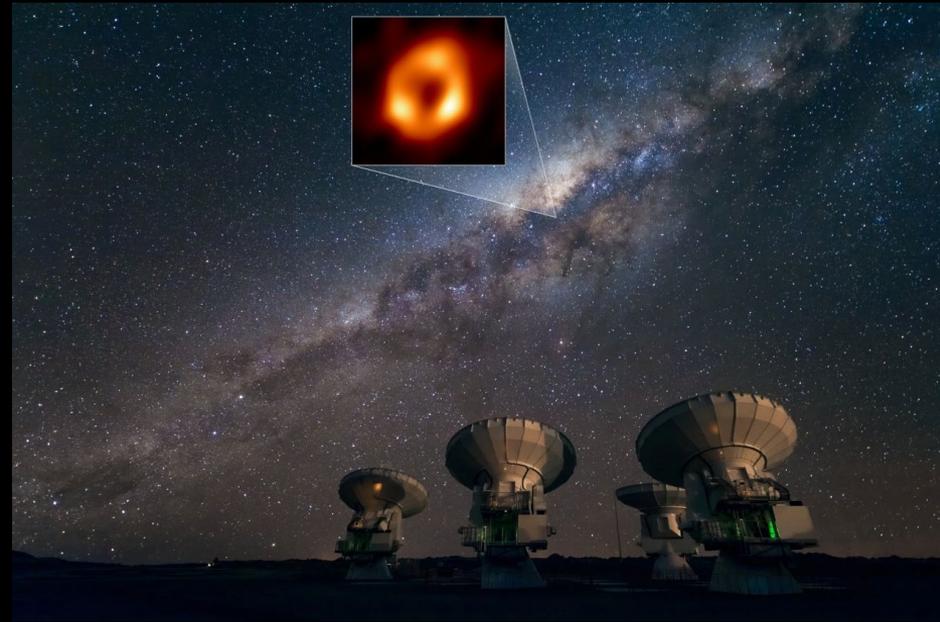
Se detectan ondas gravitatorias provenientes de la fusión de dos agujeros negros, una “verdadera prueba” directa de su existencia.

2019



Se detecta por vez primera la sombra de un agujero negro supermasivo.

2022



Se detecta la sombra del agujero negro del centro de la Vía Láctea

2023



Se descubre el “fondo de ondas gravitatorias”