



Universidad Nacional de Río Negro

Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2021

- **Unidad** 03-Astrofísica, galaxias y Universo
- **Clase** UO3 C03 - 13/16
- **Fecha** 27 Oct 2021
- **Cont** Objetos Compactos
- **Cátedra** Asorey





U3: Astrofísica, escalas grandes

4 encuentros, del 06/Oct al 27/Oct

- Relatividad General.
 - Introducción y conceptos básicos.
 - Solución de Schwarzschild.
 - Objetos compactos: enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros.
- Formación de estructuras
 - Galaxias: Modelos y formación. GalaxyZoo.
 - Galaxias de Núcleos activos. Clasificación.
 - Formación de estructuras. Corrimiento al rojo y el universo en expansión.
- Trabajo unidad → fecha máxima de entrega 12/Nov

Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio

HOW DID OUR UNIVERSE BEGIN?

In the first second of the universe's life, it grew exponentially larger than it had in all previous time since the Big Bang. This period of rapid expansion, called inflation, occurred about 10⁻³⁴ seconds after the Big Bang. It stretched the fabric of space-time by a factor of at least 10²⁶, creating the tiny fluctuations that eventually became galaxies and clusters of galaxies.

COSMIC QUESTIONS

In the 20th century the universe became a story—a scientific one. It had always been seen as static and eternal. Then astronomers observed other galaxies flying away from ours, and Einstein's general relativity theory implied space itself was expanding—which meant the universe had once been denser. What had seemed eternal now had a beginning and an end. But what beginning? What end? Those questions are still open.

WHAT IS OUR UNIVERSE MADE OF?

Stars, dust and gas—the stuff we can discern—make up less than 5 percent of the universe. Their gravity can't account for how galaxies hold together. Scientists figure about 24 percent of the universe is a mysterious dark matter—perhaps exotic particles formed right after inflation. The rest is dark energy, an unknown energy field or property of space that counters gravity, providing an explanation for observations that the expansion of space is accelerating.

**Unidad 3
Astrofísica,
escalas grandes**

Early building blocks
The universe expands, cools. Quarks clump into protons and neutrons; then atoms form, filling blocks of atomic nuclei. Perhaps dark matter forms.
Age: 10⁻² milliseconds
Size: Infinitesimal to golf ball

First nuclei
As the universe continues to cool, the light of hydrogen atoms arise. A thick block of particles forms.
Age: .01 milliseconds
Size: 1-billionth present size

First atoms, first light
Hydrogen atoms form. Light is as far back as our instruments can see.
Age: .0009 years
Size: .0009 present size

The "dark ages"
Dense gas clouds collapse under their own gravity. Clumps of dark matter form galaxies and stars. Fusion lights up the stars.
Age: 380,000 to 300 million years
Size: 300 million years

Gravity wins: first stars
Galaxies glow brightest.
Age: 300 million years
Size: 0.1 present size

Antigravity wins
After being slowed for billions of years, cosmic expansion accelerates again. The culprit: dark energy. Its nature: unclear.
Age: 10 billion years
Size: .77 present size

Today
The universe continues to expand, becoming ever less dense. As a result, fewer new stars and galaxies are forming.
Age: 13.8 billion years
Size: Present size

Dark energy acts

HOW WILL IT END?

Which will win in the end, gravity or antigravity? Is the density of matter enough for gravity to halt or even reverse cosmic expansion, leading to a big crunch? It seems unlikely—especially given the power of dark energy, a kind of antigravity. Perhaps the acceleration in expansion caused by dark energy will trigger a big rip that shreds everything, from galaxies to atoms. If not, the universe may expand for hundreds of billions of years, long after all stars have died.

**Unidad 1
Partículas,
lo más pequeño**

**Unidad 2
Astrofísica,
escalas medias**

DO WE LIVE IN A MULTIVERSE?

What came before the big bang? Maybe other big bangs. The uncertainty principle holds that even the vacuum of space has淡淡地波动. Inflationary inflation theory says our universe exploded from such a fluctuation—a random event that, odds are, had happened many times before. Our cosmos may be one in a sea of others just like ours—or nothing like ours. These other cosmos will very likely remain forever inaccessible to observation, their possibilities limited only by our imagination.

Galaxies ripped apart by rapid expansion



Quasar emisión ~ 1 galaxia en un objeto muy pequeño

- Objeto puntual pero que presenta corrimientos al rojo muy grandes ($z > 1$)

- Si $z = 1 \rightarrow d \sim 4000 \text{ Mpc}$.
- $L \sim 10^{38} - 10^{41} \text{ W} \rightarrow 1 < L/L_{\text{VL}} < 1000$

- Pero son puntuales \rightarrow pequeños $\rightarrow r \sim 10^{-3} \text{ pc}$

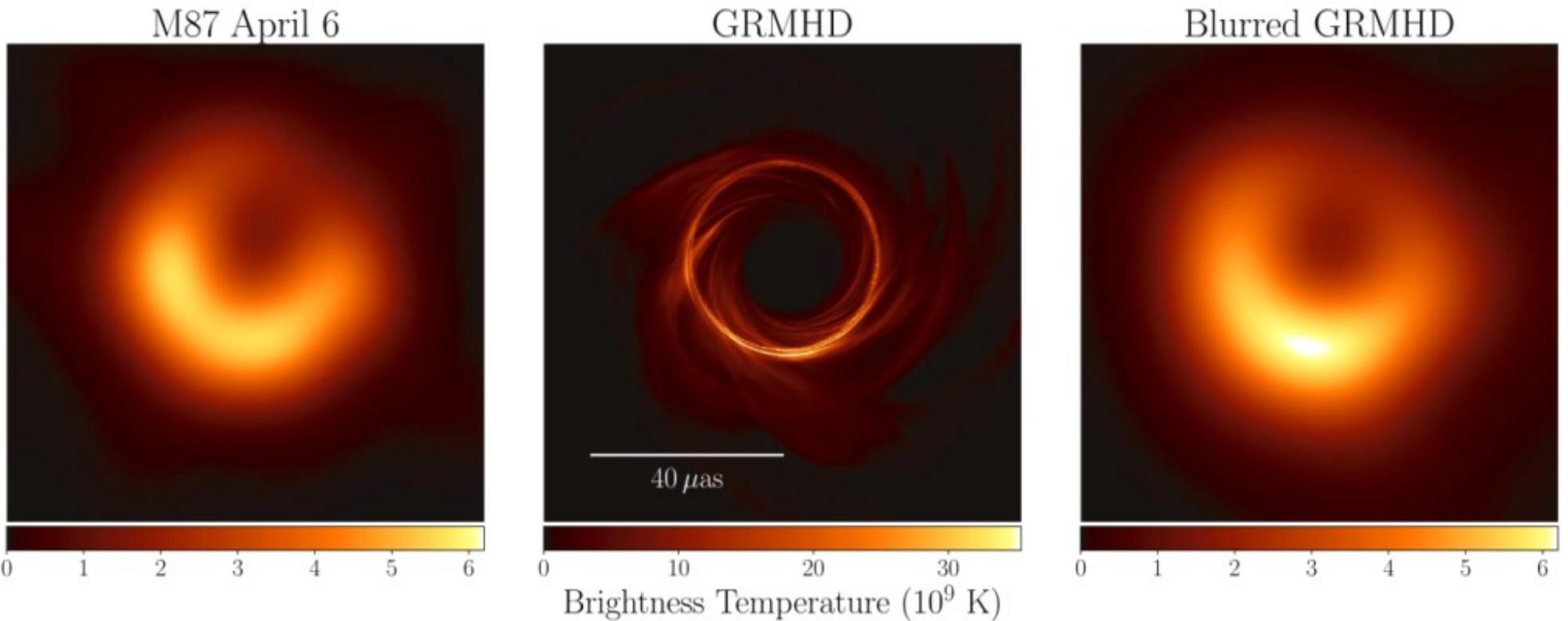
- Luego $GM \simeq \frac{L}{4\pi c} \rightarrow M \simeq \frac{L}{4\pi c G} \rightarrow 10^8 < M/M_{\odot} < 10^{10}$

- Radio de Schwarzschild

$$R_{\text{SCH}} = \frac{2GM}{c^2} \rightarrow 3 \times 10^{11} \text{ m} < R_{\text{SCH}} < 3 \times 10^{13} \text{ m} \rightarrow 2 \text{ UA} < R_{\text{SCH}} < 200 \text{ UA}$$

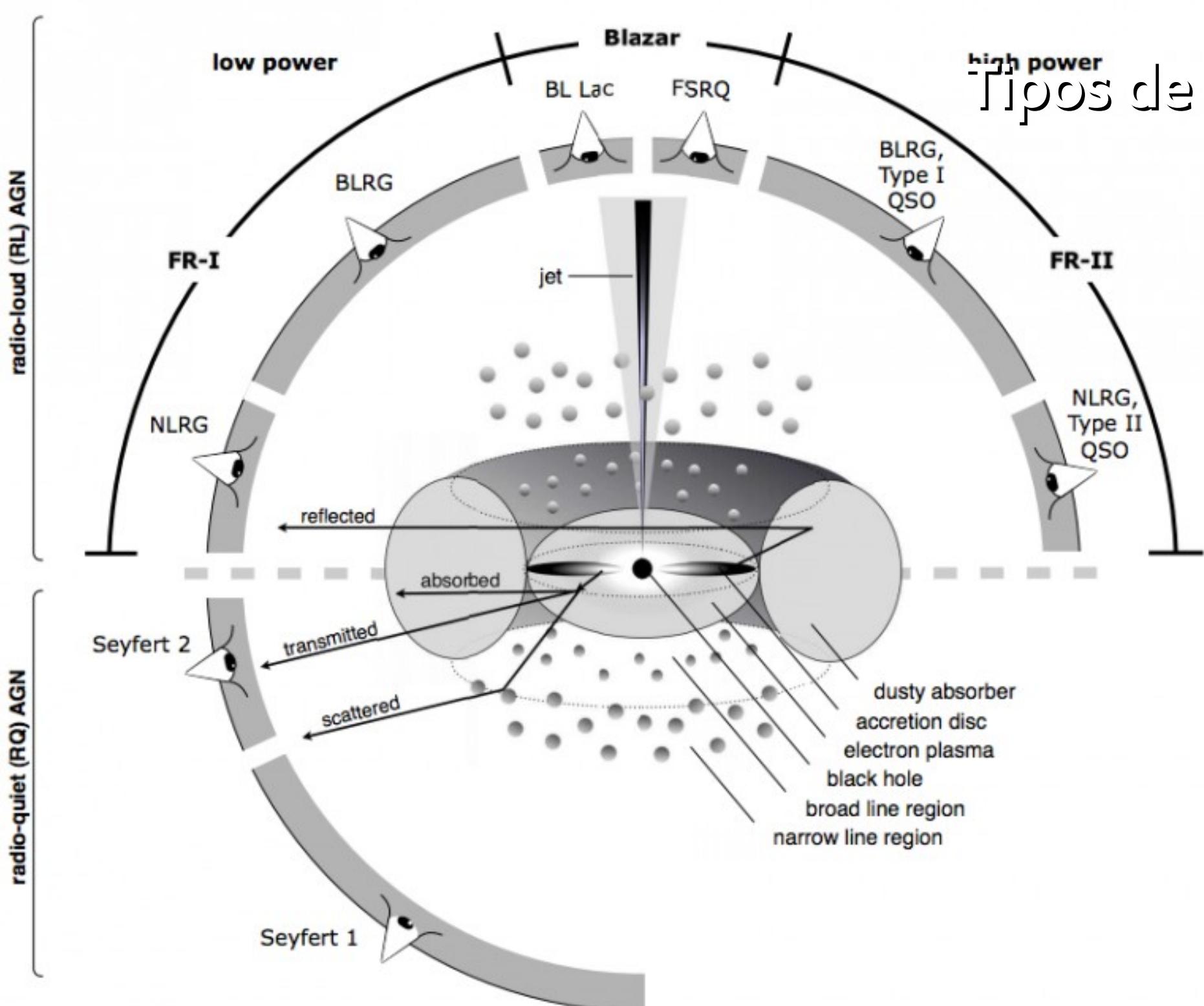
El agujero negro en central en M87 → M87*

Agujero negro supermasivo → $M \sim 7 \times 10^9 M_\odot$

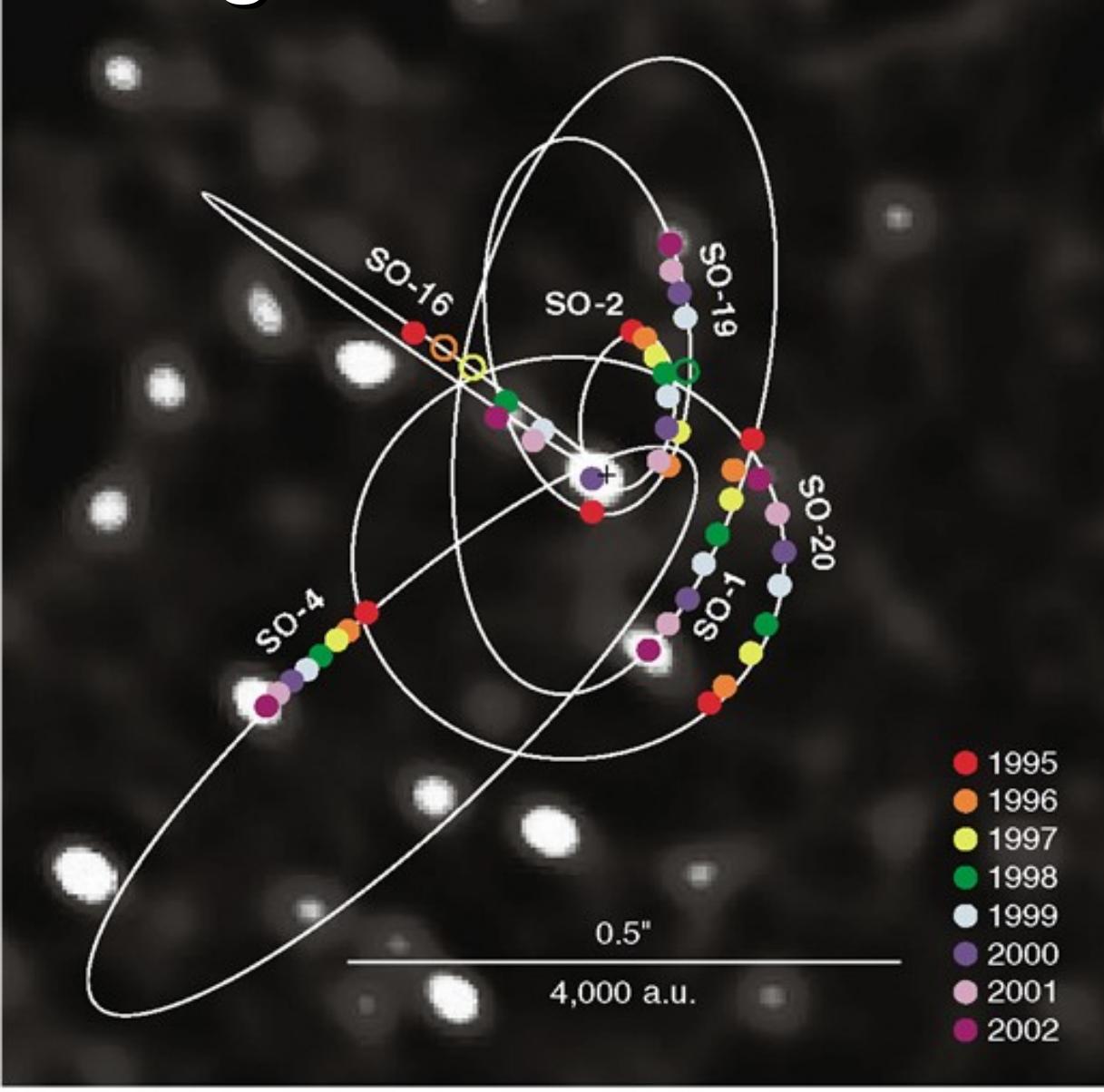
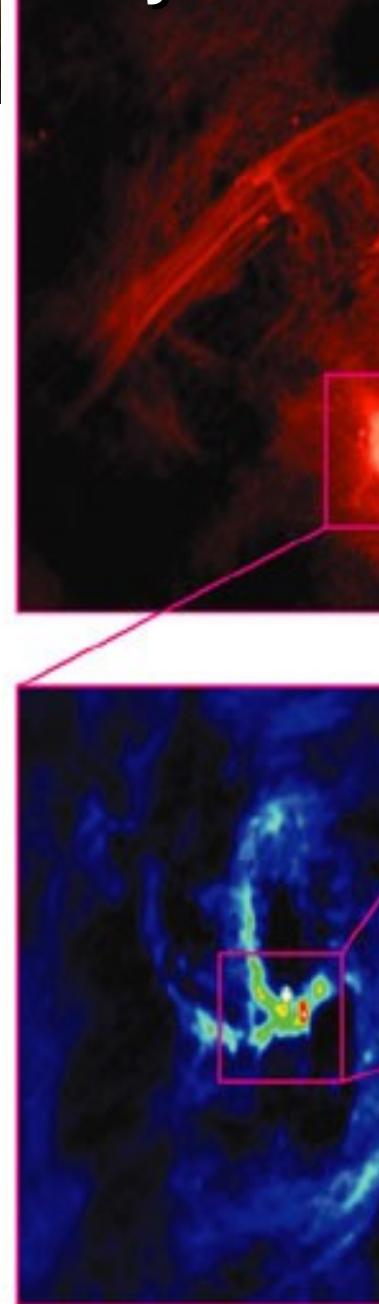




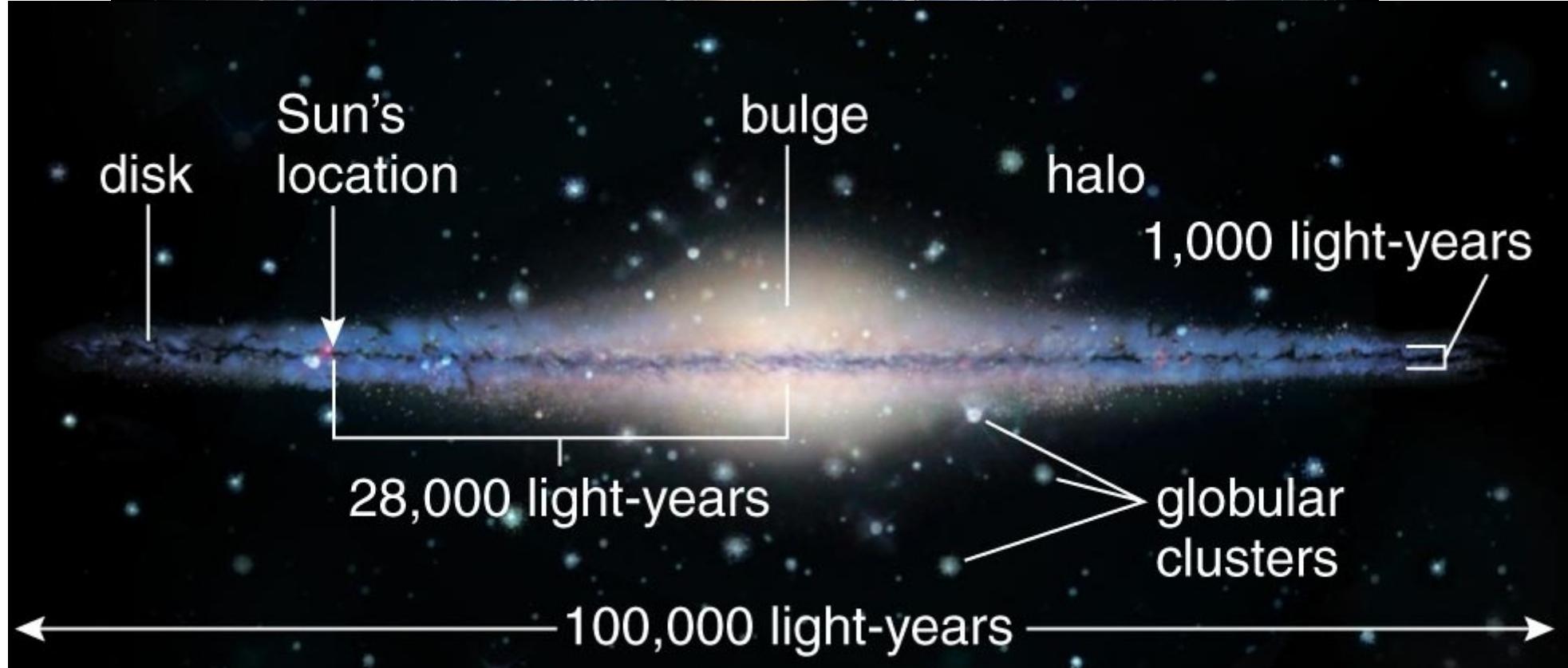
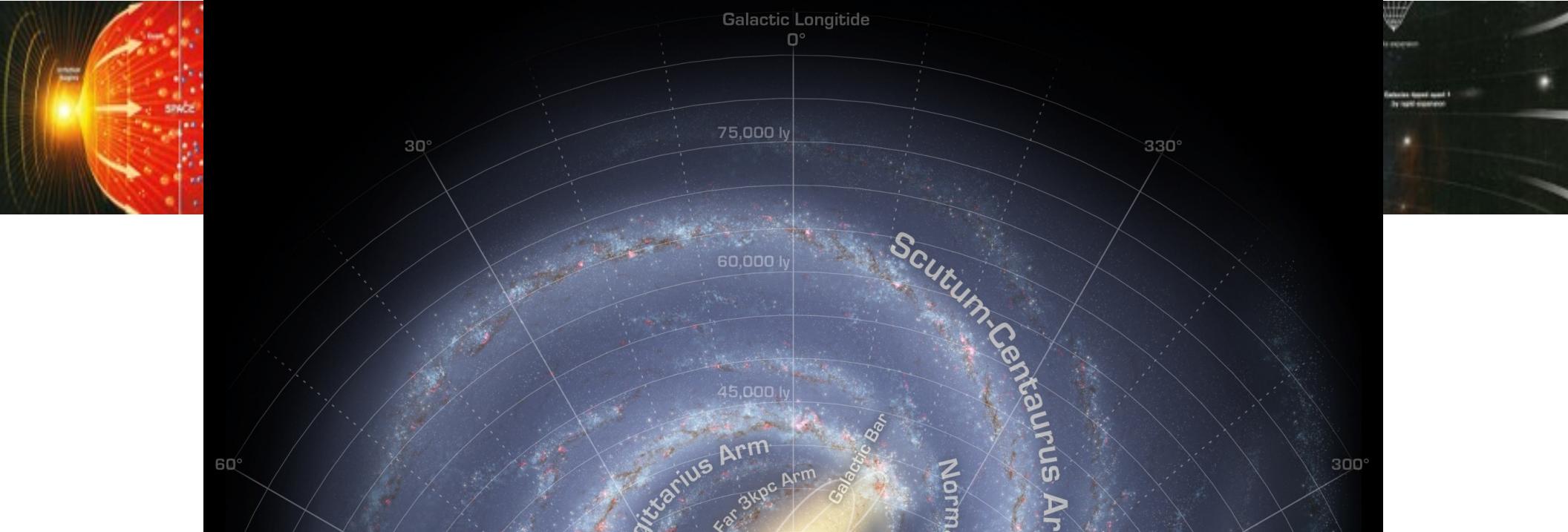
Tipos de AGN



Viaje al centro galáctico

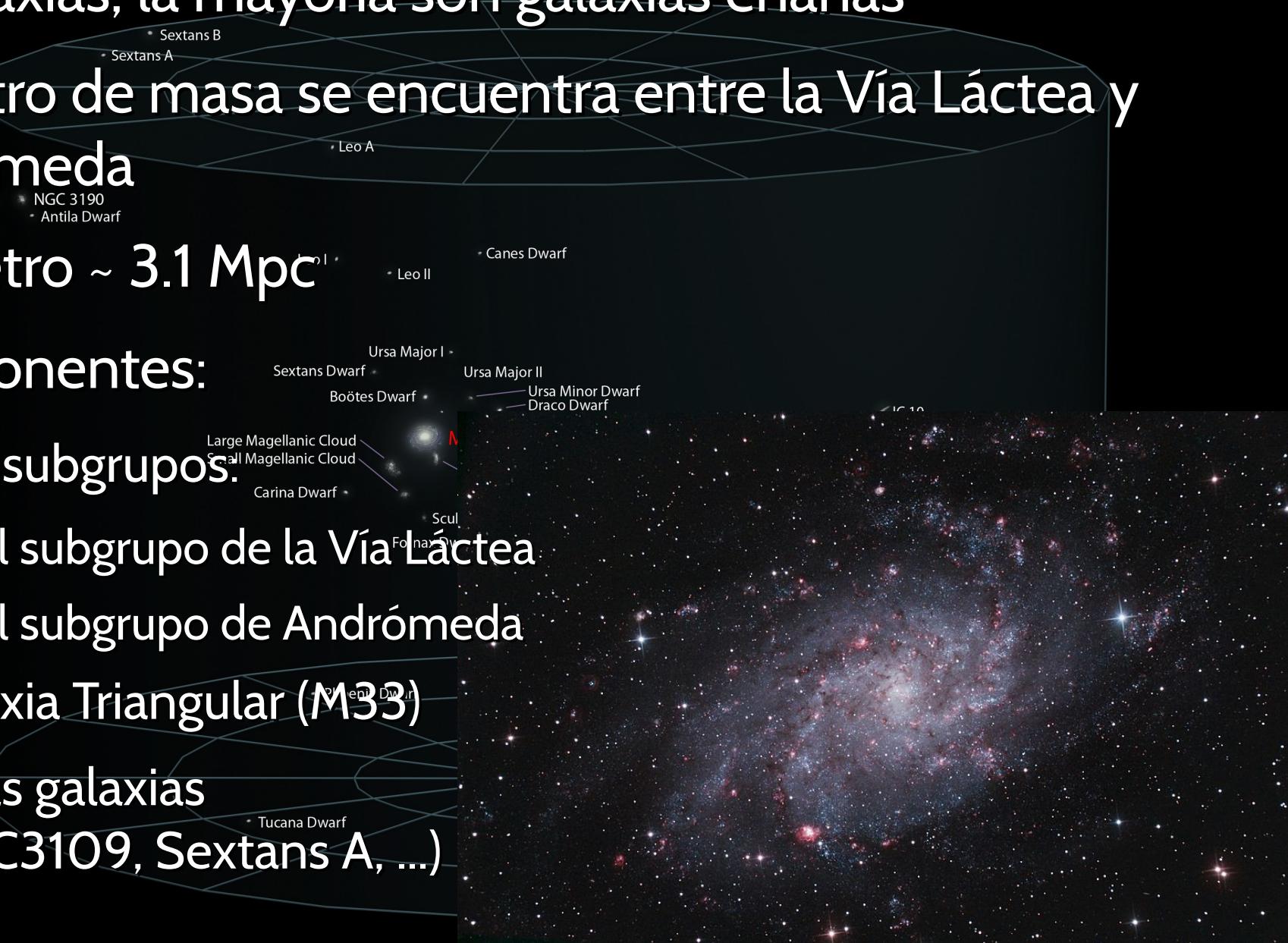


<https://www.youtube.com/watch?v=duoHtJpo4GY>



Grupo Local

- 54 galaxias, la mayoría son galaxias enanas
- El centro de masa se encuentra entre la Vía Láctea y Andrómeda
- Diámetro ~ 3.1 Mpc
- Componentes:
 - Dos subgrupos:
 - El subgrupo de la Vía Láctea
 - El subgrupo de Andrómeda
 - Galaxia Triangular (M33)
 - Otras galaxias (NGC3109, Sextans A, ...)



Supercúmulo de Virgo

Virgo Cluster

M66

- Concentración de galaxias que incluyen al Cúmulo de Virgo y al Grupo Local

35,000,000 ly

Leo I

- Hay millones de supercúmulos como este en el Universo

- 100 grupos de galaxias en 33 Mpc

Local Group

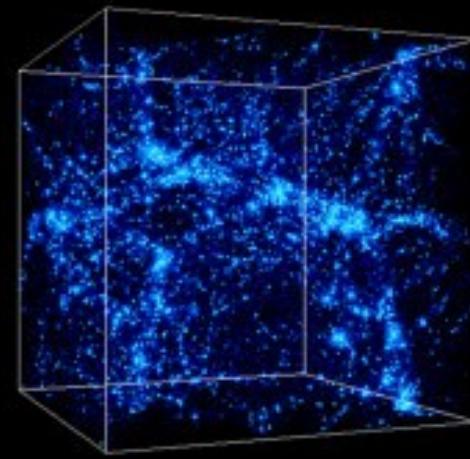
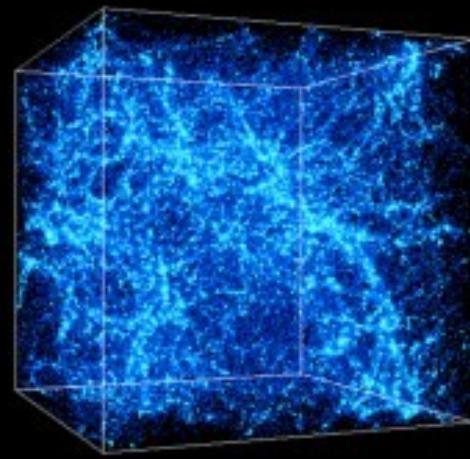
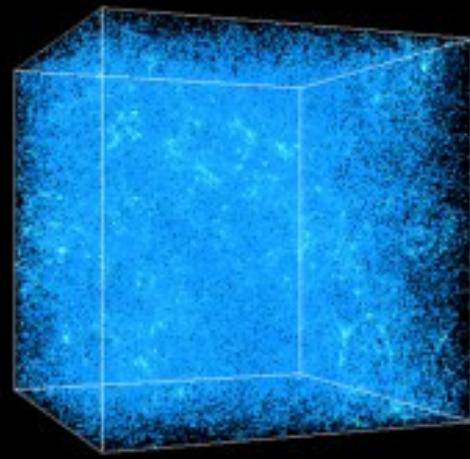
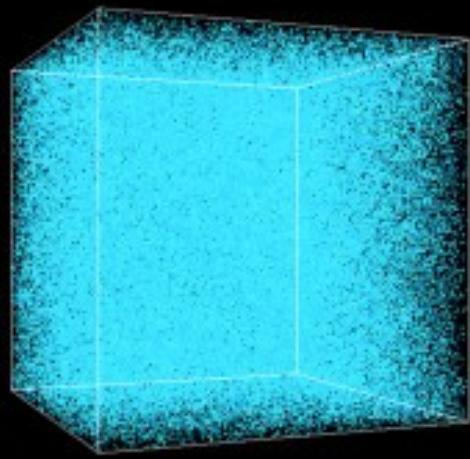
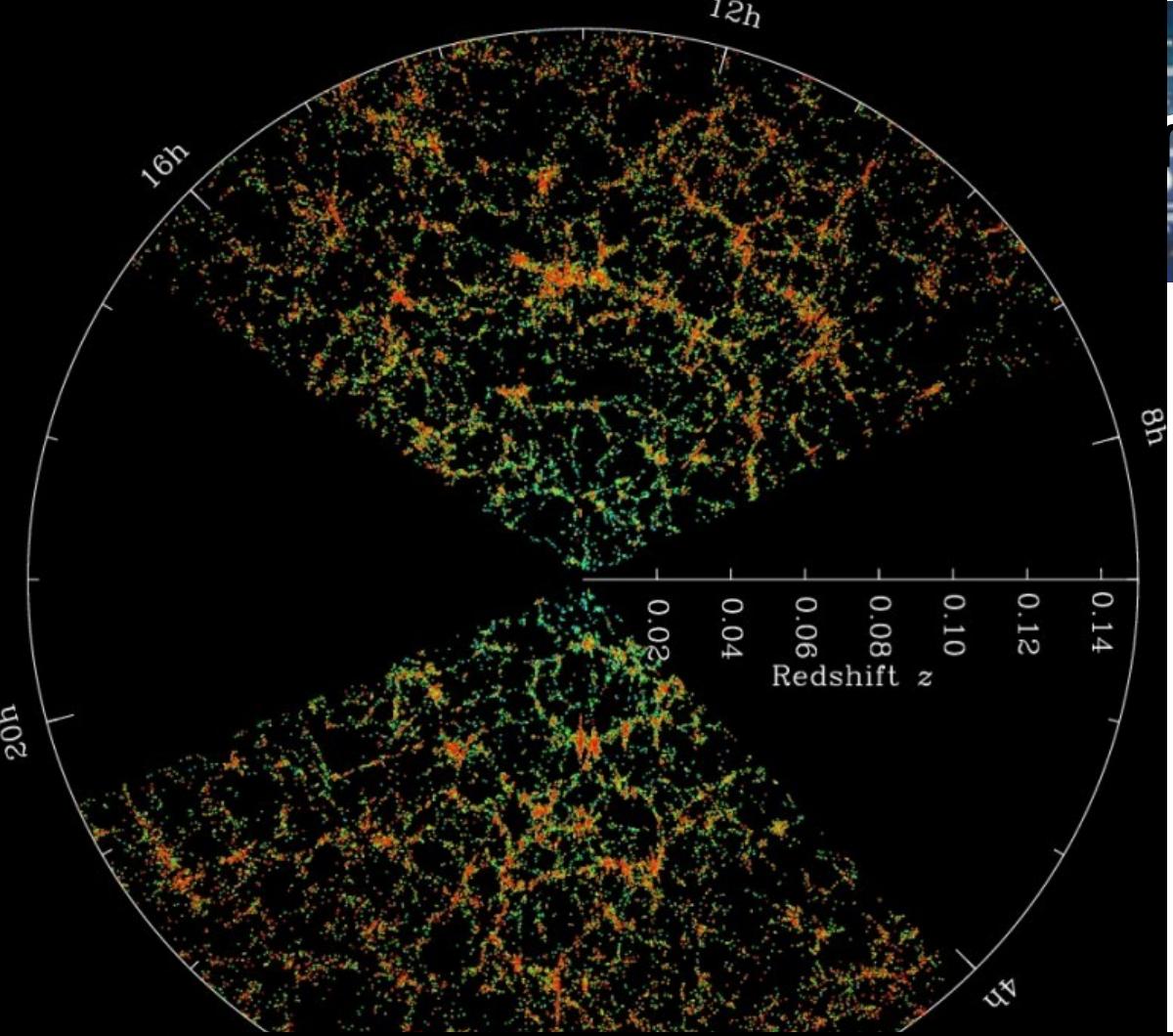
- $\sim 10^{15} M_s$ y $\sim 3 \times 10^{12} L_s$. Se desplaza a ~ 600 km/s hacia el Cúmulo de Norma (Abel3627 → Gran Atractor)

40,000,000 ly

Draco Group

Supercúmulo de Laniakea (2014)

- Entre 300 y 500 cúmulos de galaxias
- 100000 galaxias en 160 Mpc
- $\sim 10^{17} M_s$ y $\sim 5 \times 10^{14} L$.
 - Supercúmulo de Virgo
 - Supercúmulo Hydra-Centauro (incluye el Gran Atractor)
 - Supercúmulo Pavo-Indus
 - Supercúmulos vecinos:
 - Shapley, Hercules, Coma, Perso-Piscis 



Simulación Milenium





Alto, ¿Qué significa “observable”?

- **Universo observable** → $r \sim 46.5$ mil millones años luz
 - Es una esfera centrada en la Tierra que contiene a todos los objetos que pueden ser vistos desde la Tierra ahora.
 - La luz emitida por estos objetos ha tenido tiempo suficiente para alcanzar a la Tierra
 - Edad del Universo: 1.37×10^{10} años → El Universo observable NO tiene 13.7×10^9 a.l. → universo en expansión (volveremos)
- **Radio de Hubble** → es la distancia que viaja la luz en un tiempo igual al tiempo de Hubble

$$r_{H_0} = ct_{H_0} = \frac{c}{H_0} \simeq 1.37 \times 10^{10} \text{ años luz}$$



La gravedad tiene dos propiedades únicas:

- Hay un sólo tipo de carga gravitatoria → masa → m_g
 - Carga gravitatoria m_g es la misma que la masa inercial m_i
- $m_g \equiv m_i$ **Principio de equivalencia**
 - Como veremos, esto tiene profundas implicaciones
- **La gravedad siempre es atractiva**
 - Las otras fuerzas se compensan
 - La gravedad es débil, pero al final termina imponiéndose
 - → **Colapso gravitatorio**: compresión debida a la gravedad



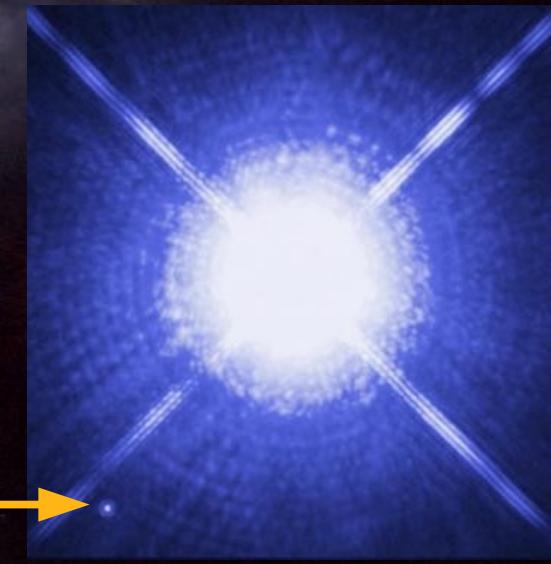
Recordemos

- Una estrella como el Sol, puede quemar Helio, y no mucho más
- El flash de Helio libera mucha energía → gigante roja
- Al reducirse la tasa de reacciones en el núcleo, la estrella colapsa por su propia gravedad
 - Momento angular bajo → colapso hacia el centro
 - Las capas externas continúan expándiéndose en el espacio interestelar formando una **nebulosa planetaria**

Enana blanca

NGC2440 + HD62166
(en Pupis)

Sirio B





Materia totalmente degenerada

- Luego los efectos de la degeneración son totales si:

$$\sqrt[3]{\frac{1}{n_e}} \ll \frac{h}{\sqrt{2\pi k T m_e}}$$

Comparamos la distancia entre electrones con longitud de onda de De Broglie

donde n_e es la densidad volumétrica de electrones.

- Casi no hay H ni He , y los metales ($Z>2$) están totalmente ionizados → electrones libres
- Si aplicamos las ecuaciones para una estrella vemos que:
 - No hay fusión → no hay liberación de energía → no hay P_{rad} .
 - La temperatura media es muy baja (sólo vemos una capa externa no degenerada) → $T \sim 0 \rightarrow L \sim 0$.

Ecuación de estado

- Ya fue mucho usar Gas Ideal en una estrella. Aquí...

- Recordando cinética $P = n_e \left(\frac{1}{2} m_e v_e^2 \right) = \frac{n_e}{2} m_e \left(\frac{p_e}{m_e} \right)^2 = \frac{n_e p_e^2}{2 m_e}$
- Según Heisember →

$$\Delta x \Delta p \approx \hbar \rightarrow n_e^{-1/3} \Delta p \approx \hbar \rightarrow \Delta p \approx \hbar n_e^{1/3}$$

- Entonces, combinando

$$P = \frac{n_e \hbar^2 n_e^{2/3}}{2 m_e} \rightarrow P = \frac{\hbar^2}{2 m_e} n_e^{5/3}$$

- Densidad: 1 electrón 1 protón →

$$\rho = n_e m_p \rightarrow n_e = \frac{\rho}{m_p}$$



Ecuaciones para una enana blanca

- Combinando, obtenemos la Ecuación de estado:

$$P = K \rho_e^{5/3} \rightarrow P_r = K \rho_{e,r}^{5/3}$$

$$K = \frac{h^2}{m_e m_p^{5/3}} \frac{1}{5} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} 2^{-5/3} = 3,1 \times 10^{12} \frac{\text{cm}^4}{\text{g}^{2/3} \text{s}^2} = 3,1 \times 10^6 \frac{\text{m}^4}{\text{kg}^{2/3} \text{s}^2}$$

- Y además (usando resultados de la Unidad 02):

$$M = \frac{\pi}{2} \rho_0 R^3$$

$$P_o = \frac{\rho_0 G M}{R}$$

$$P_o = K \rho_0^{5/3}$$



Despejando y considerando al Sol ($M=M_\odot$):

$$R = \left[\left(\frac{2}{\pi} \right)^{2/3} \left(\frac{K}{G} \right) \right] M^{-1/3} \rightarrow R_{M_\odot} \approx 3000 \text{ km}$$

$$\rho_0 = \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{G}{K} \right)^3 \right] M^2 \rightarrow \rho_{M_\odot} \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$$

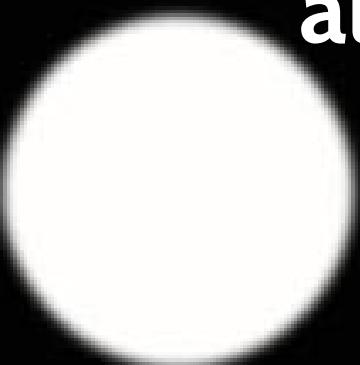
$$P_0 = \left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^{5/3} \frac{G^5}{K^4} \right] M^{10/3} \rightarrow P_{M_\odot} \approx 10^{24} \text{ Pa}$$

El Sol aplastado al tamaño planetario

Earth



Sirius B



Procyon B



Van Maanen's Star



$$R_{M_\odot} \approx 3000 \text{ km}$$

$$R_{M_\odot} \approx \frac{1}{250} R_\odot$$

$$\rho_{0,M_\odot} \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$$

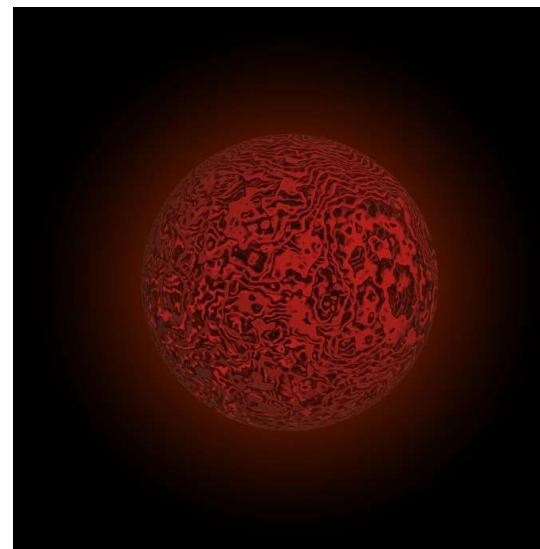
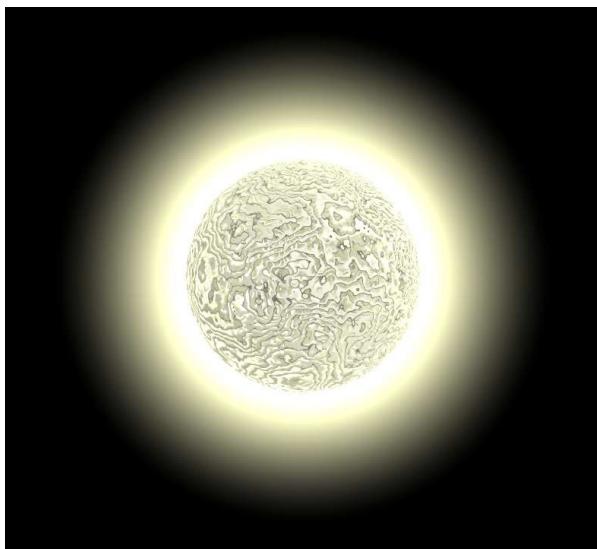
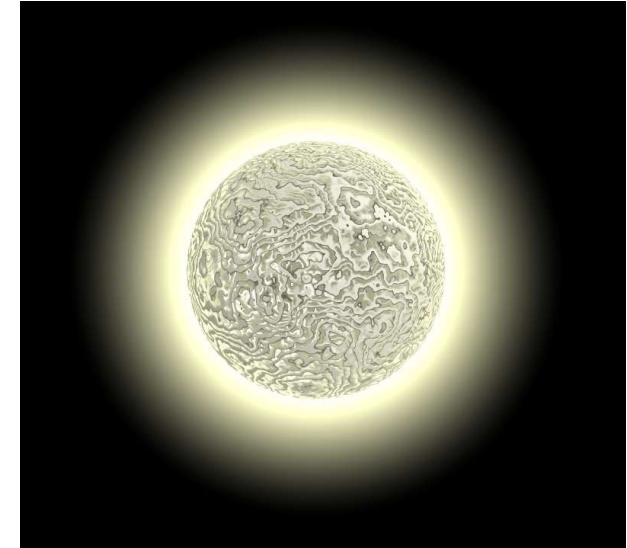
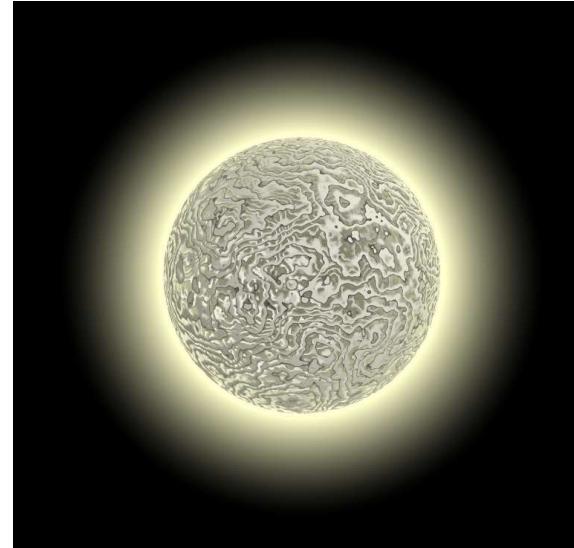
$$\rho_{0,M_\odot} \approx 65000 \rho_\odot$$

$$P_{0,M_\odot} \approx 10^{24} \text{ Pa}$$

$$P_{0,M_\odot} \approx 35 \text{ MP}_\odot$$

Enana Blanca: $10000,000 \text{ kg/cm}^3$
Osmio: $0,022 \text{ kg/cm}^3$ 2/84

Enfriado: Evolución de la enana blanca → negra





¿Qué pasa si agregamos masa?

- De estas ecuaciones (P es la presión y p es cant mov):

$$P_0 = \left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^{5/3} \frac{G^5}{K^4} \right] M^{10/3} \approx M^{3.3}$$
$$P = \frac{n_e p_e^2}{2m_e} \rightarrow p_e \approx \sqrt{P}$$

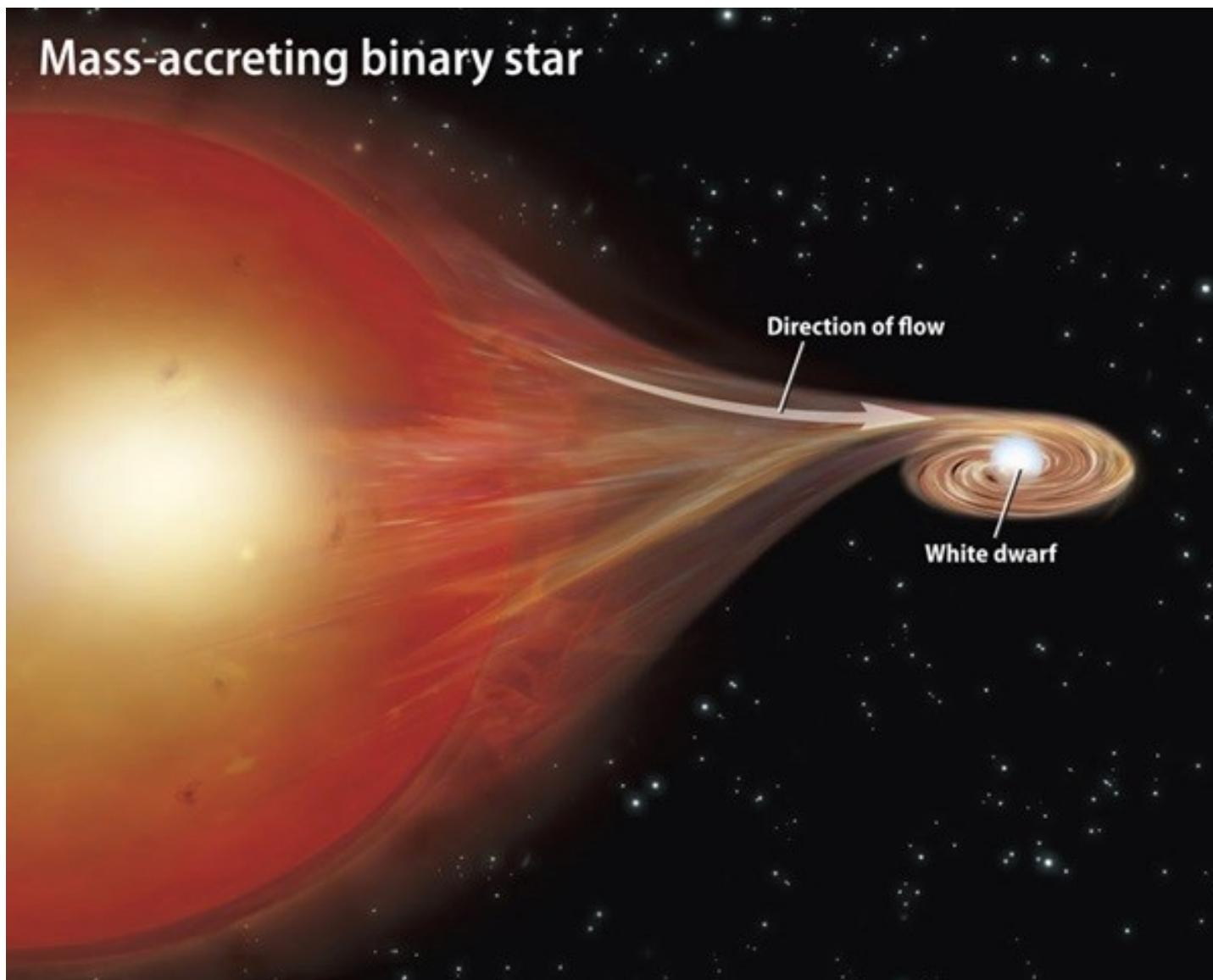
- Vemos que el momento de las partículas: $p_e \approx M^{1.65}$
- Si agregamos masa la velocidad media de las partículas comienza a aumentar y entonces la aproximación clásica $v^2 \sim p^2/m$ ya no es válida

→ correcciones relativistas!

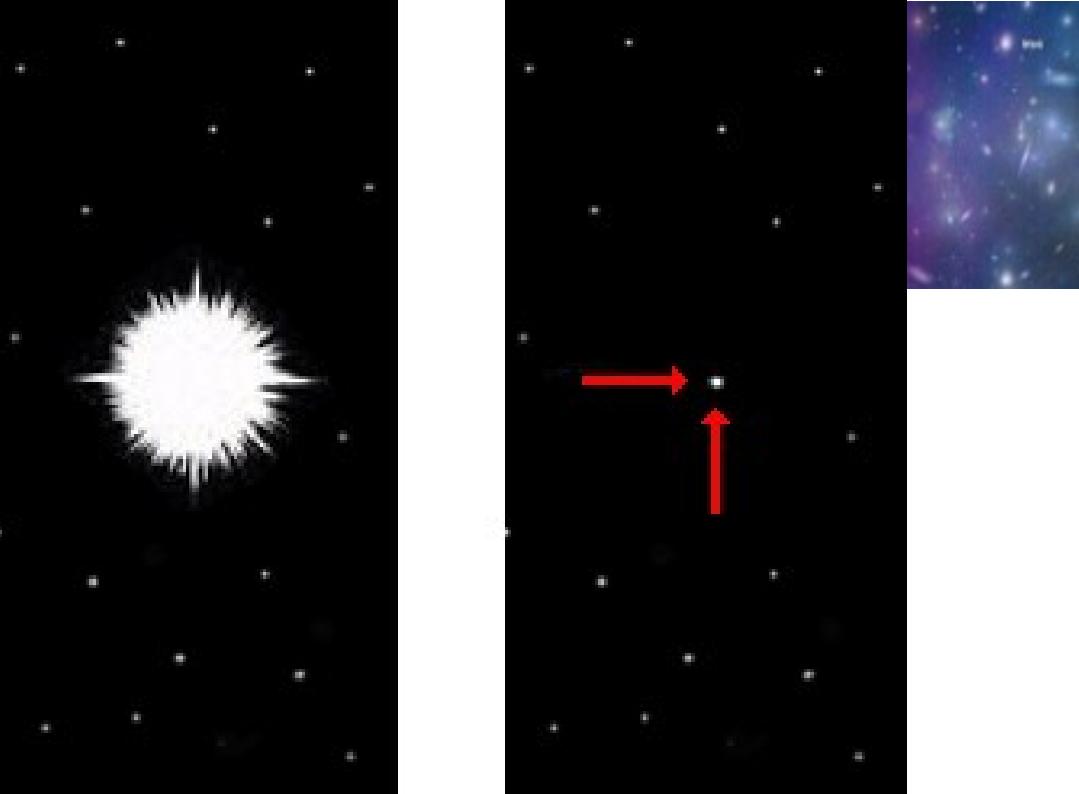
Binaria de contacto

Érase una vez un sistema binario donde una de las estrellas se convirtió en enana blanca. Tiempo después la otra entró su fase de gigante roja

La acreción puede durar millones de años



Novas



- La acreción de material “fresco” produce un calentamiento
- Ignición del hidrógeno en la superficie
- Expulsión del material o parte de él
- A veces, reinicio del ciclo →
 - **novas recurrentes**
RS Ophiuchi 1898, 1933,
1958, 1967, 1985, and 2006).

Aproximación relativista

- Recordando cinética relativista:

$$E_k = (\gamma - 1)mc^2 \rightarrow E \approx pc \text{ si } \gamma \gg 1$$

- El resto sigue igual... $\Delta x \Delta p \approx \hbar \rightarrow n_e^{-1/3} \Delta p \approx \hbar \rightarrow \Delta p \approx \hbar n_e^{1/3}$
- Entonces, combinando

$$P = n_e pc \rightarrow P = \hbar c n_e^{4/3}$$

- Densidad: 1 electrón 1 protón \rightarrow

$$\rho = n_e m_p \rightarrow n_e = \frac{\rho}{m_p}$$

$$\rightarrow P = \frac{\hbar c}{m_p^{4/3}} \rho^{4/3} \rightarrow P = K_R \rho^{4/3}$$



Entonces, igual que antes...

- Partimos de las ecuaciones estelares

$$M = \frac{\pi}{2} \rho_0 R^3, \quad P_o = \frac{GM}{R} \rho_0, \quad P_o = K_R \rho_0^{4/3}$$

- Trabajamos y despejamos y obtenemos:

$$M_R = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{K_R}{G} \right)^{3/2}$$

¡¡¡La masa de la Enana Blanca Relativista no depende del radio y tiende a un valor constante!!!

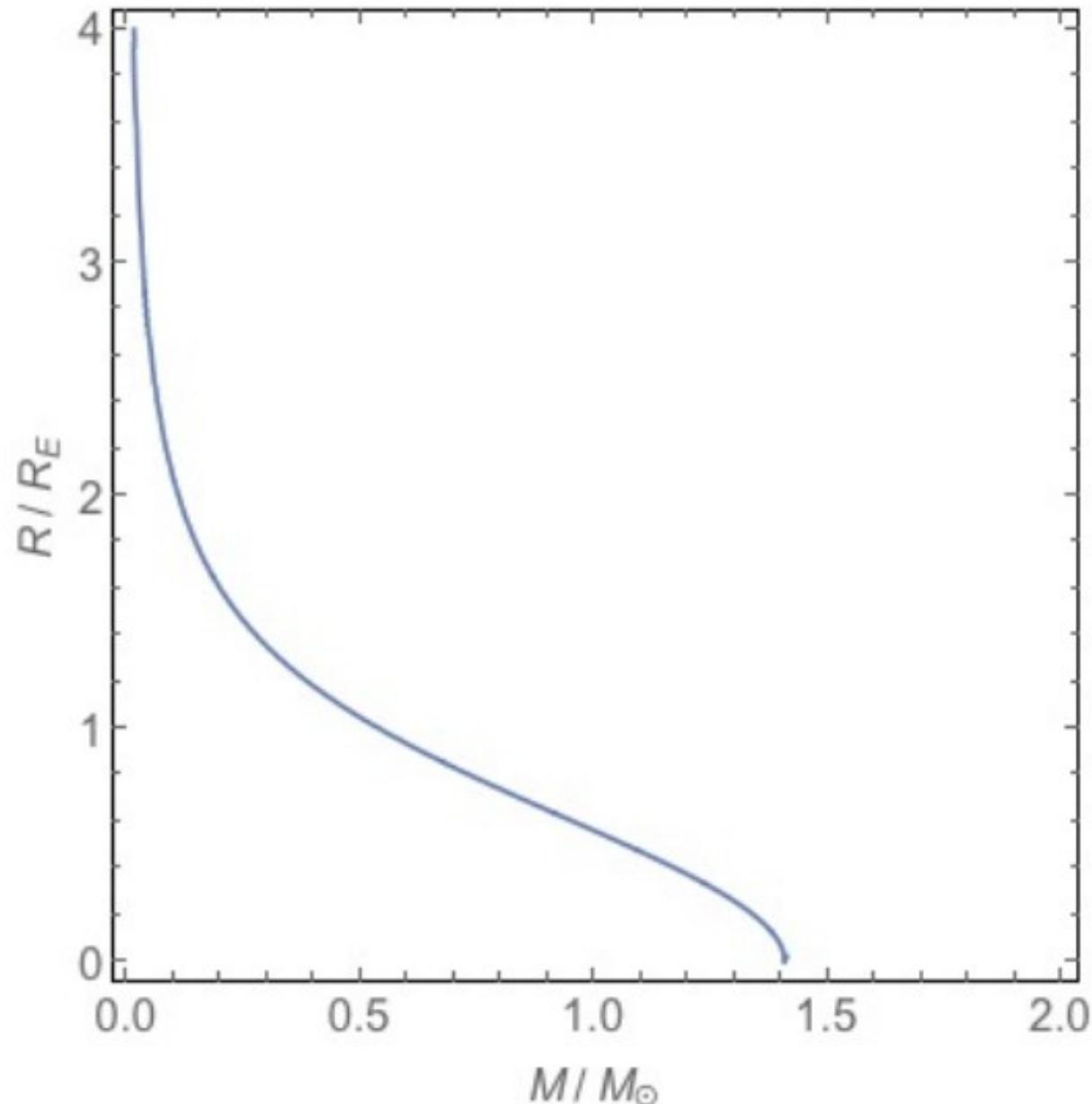
- Límite de Chandrasekhar (con los valores exactos)

Límite de
Chandrasekhar

$$M_R \approx 3 \times 10^{30} \text{ kg} \equiv M_{CH} \approx 1,44 M_{\odot}$$

Límite de Chandrasekhar

No existen enanas blancas con $M > M_{\text{CH}} \sim 1.4 M_{\odot}$

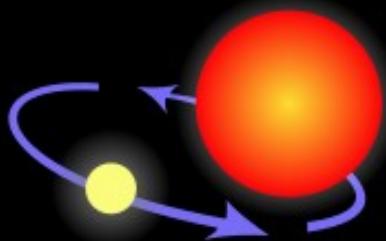


The progenitor of a Type Ia supernova

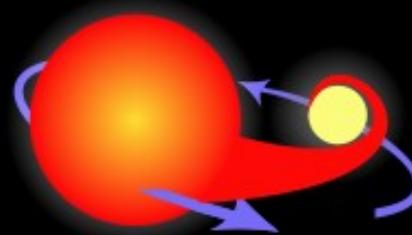
Supernova Tipo IA



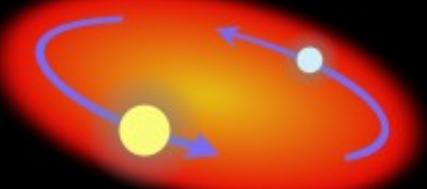
Two normal stars are in a binary pair.



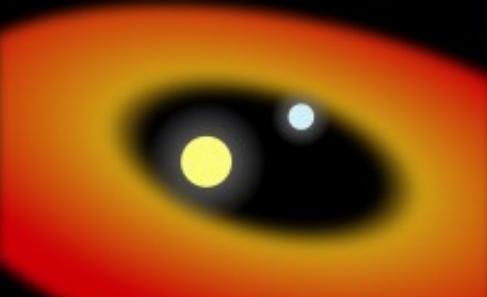
The more massive star becomes a giant...



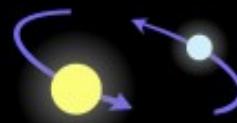
...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



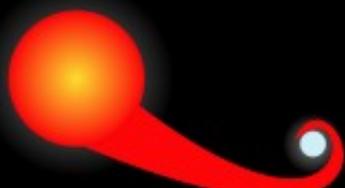
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral toward within a common envelope.



The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



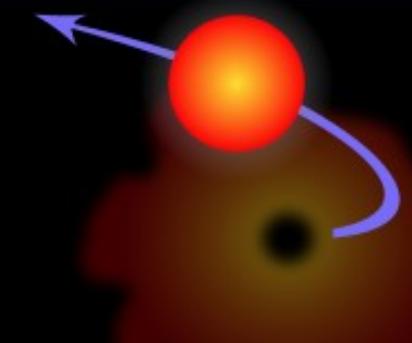
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...



...causing the companion star to be ejected away.



Supernova 1a

White Dwarf Deflagration

Resolution: 6 km

Initial Bubble Radius: 18 km

Ignition Offset: 42 km

Variable 1: Density [1.5e+07 - 2.0e+07]

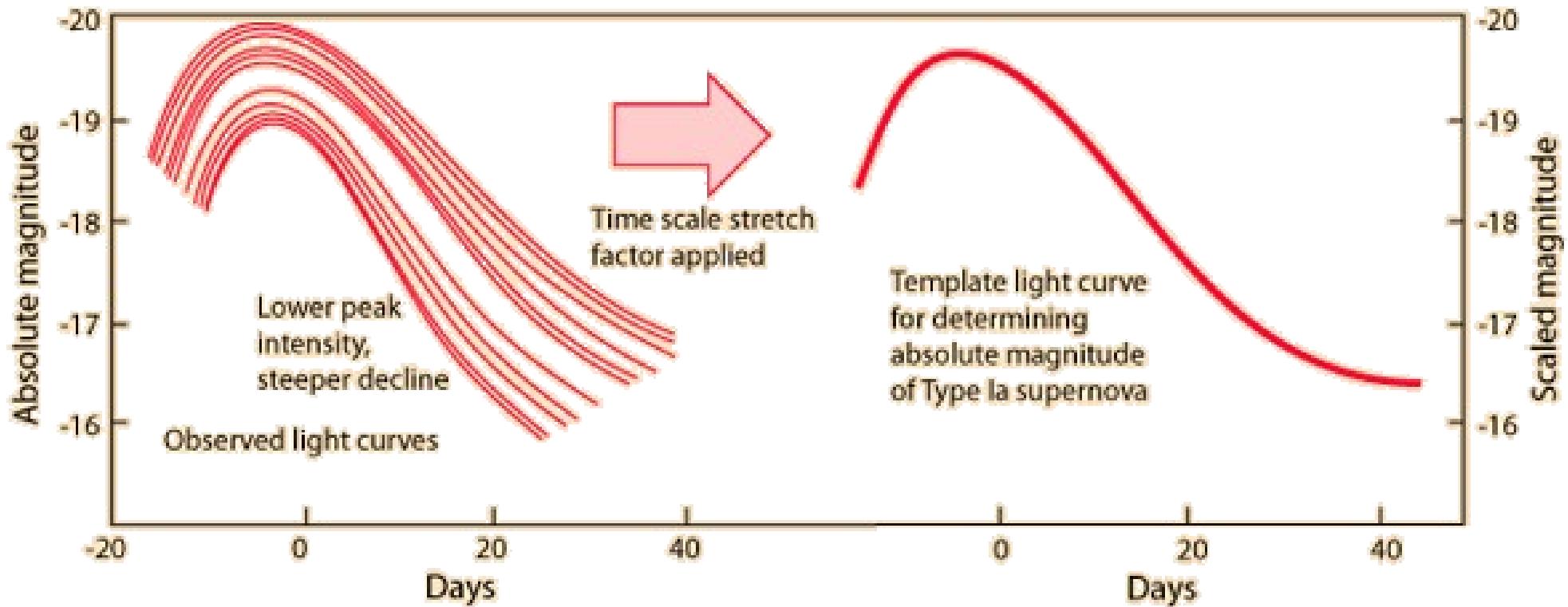
Variable 2: Temperature: [1.5e+09 - 4.0e+09]



Remanente Supernova 1a

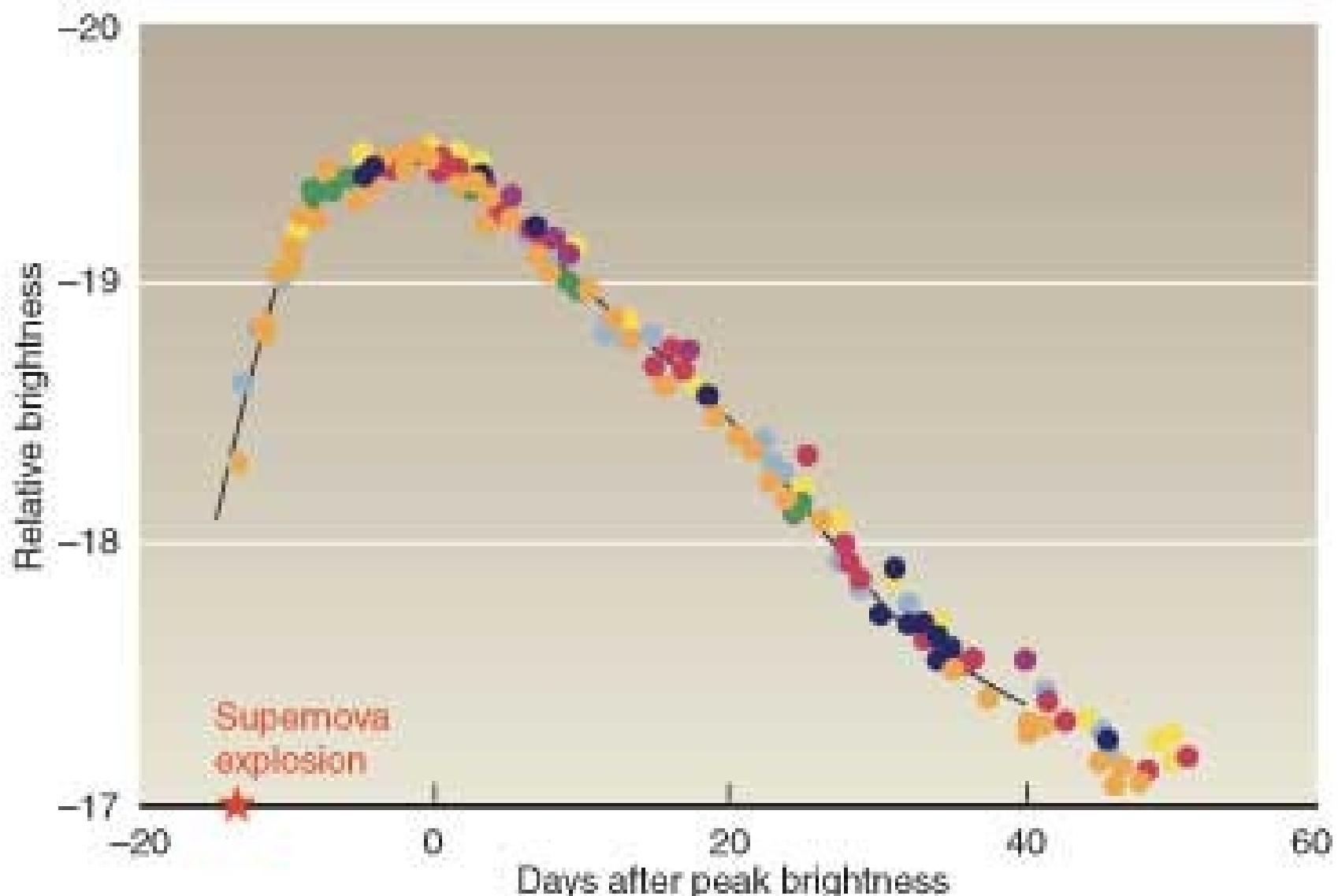


Curvas de luz → velas estándares

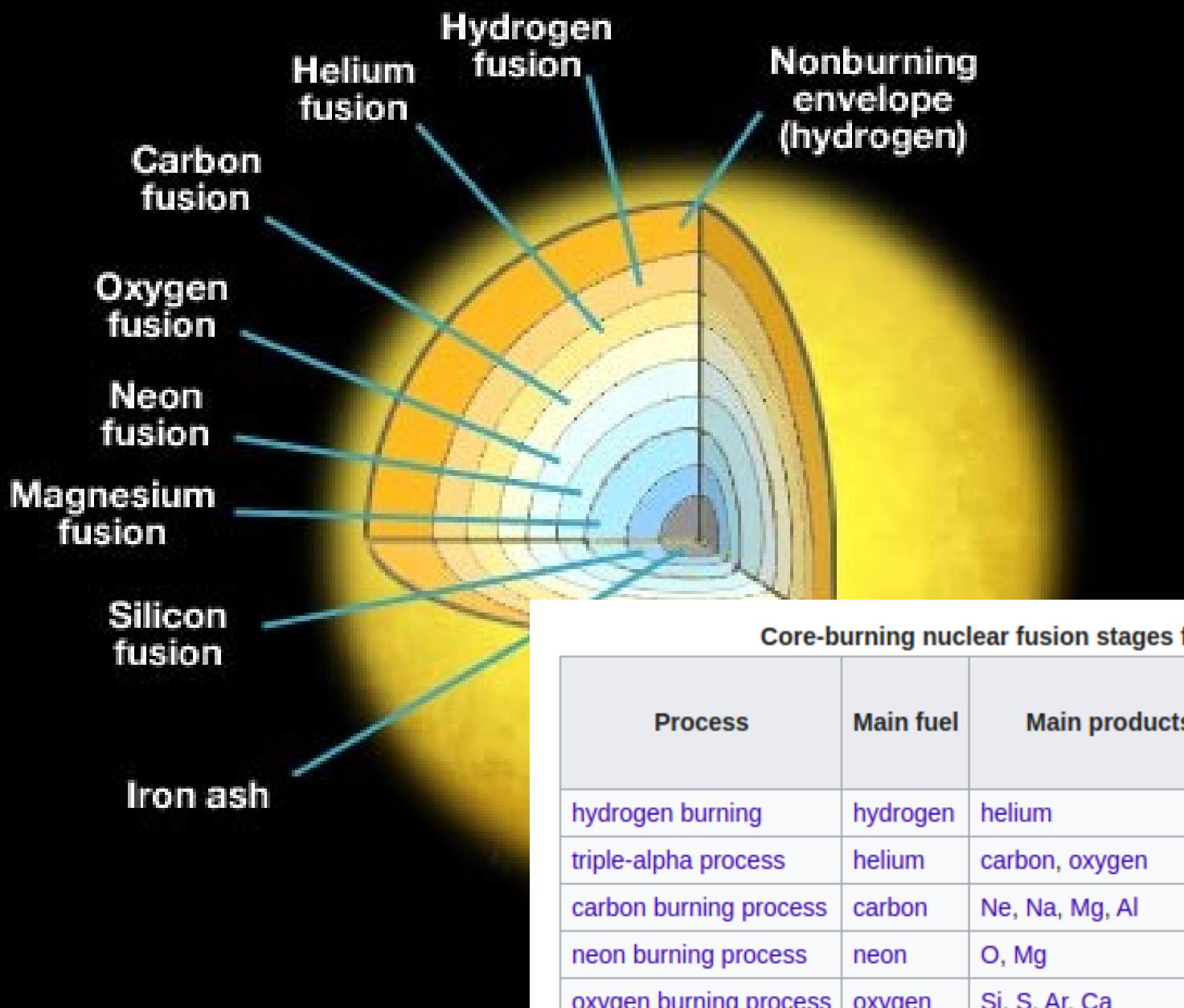


Velas estándares → si conocemos la magnitud absoluta, podemos determinar la distancia en escalas cosmológicas

Curvas de luz estándares



Estrella moribunda de masa $M \gg M_{\text{CH}}$



Core-burning nuclear fusion stages for a 25-solar mass star

Process	Main fuel	Main products	25 M_{\odot} star ^[5]		
			Temperature (K)	Density (g/cm ³)	Duration
hydrogen burning	hydrogen	helium	7×10^7	10	10^7 years
triple-alpha process	helium	carbon, oxygen	2×10^8	2000	10^6 years
carbon burning process	carbon	Ne, Na, Mg, Al	8×10^8	10^6	1000 years
neon burning process	neon	O, Mg	1.6×10^9	10^7	3 years
oxygen burning process	oxygen	Si, S, Ar, Ca	1.8×10^9	10^7	0.3 years
silicon burning process	silicon	nickel (decays into iron)	2.5×10^9	10^8	5 days



Estrellas de neutrones

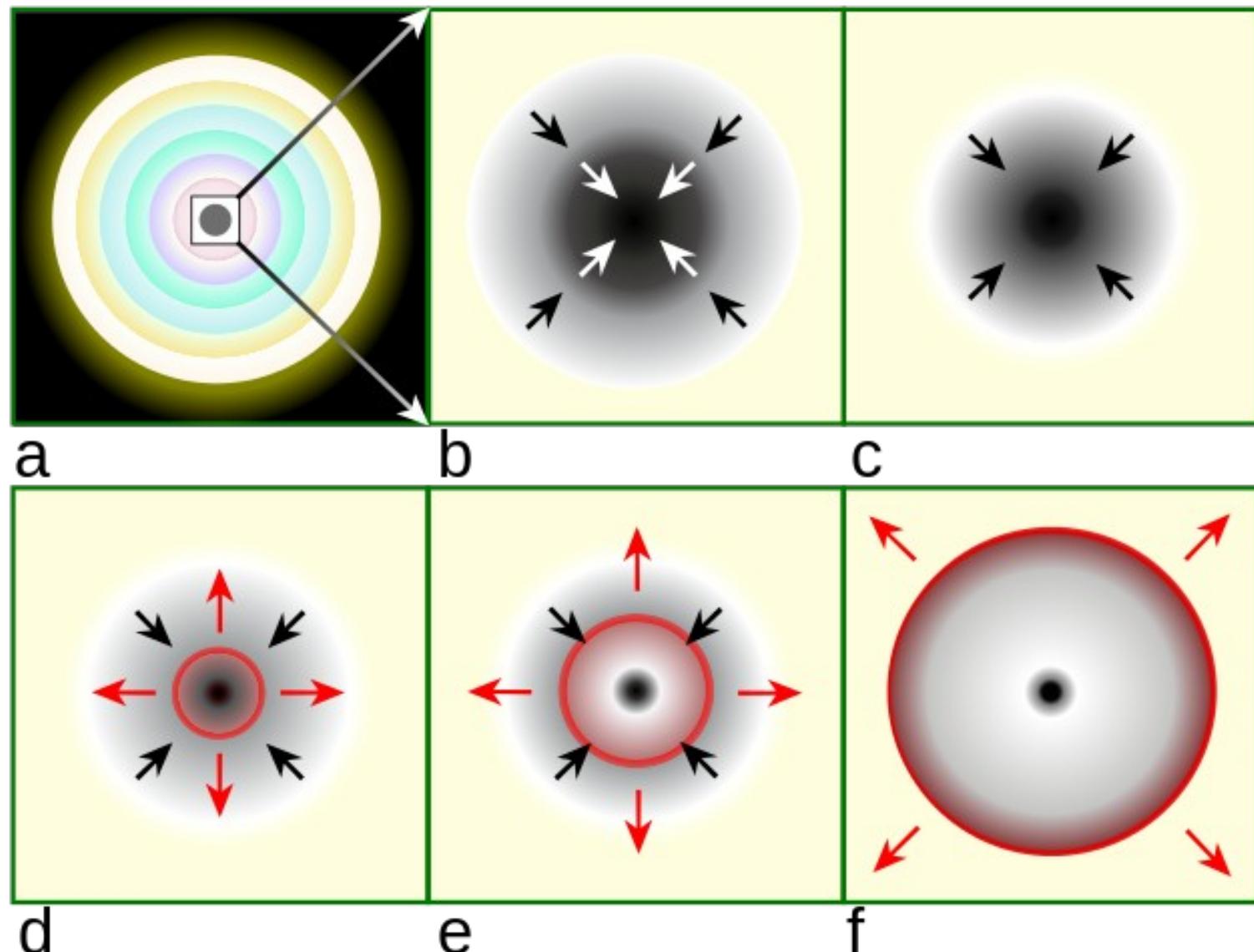
- Si la masa es mayor que M_{CH} , la degeneración de Fermi de los electrones no soporta la gravedad → colapso
- El aumento de presión lleva a un aumento de la temperatura, $T \sim 5 \times 10^9 \text{ K}$ → fotodesintegración



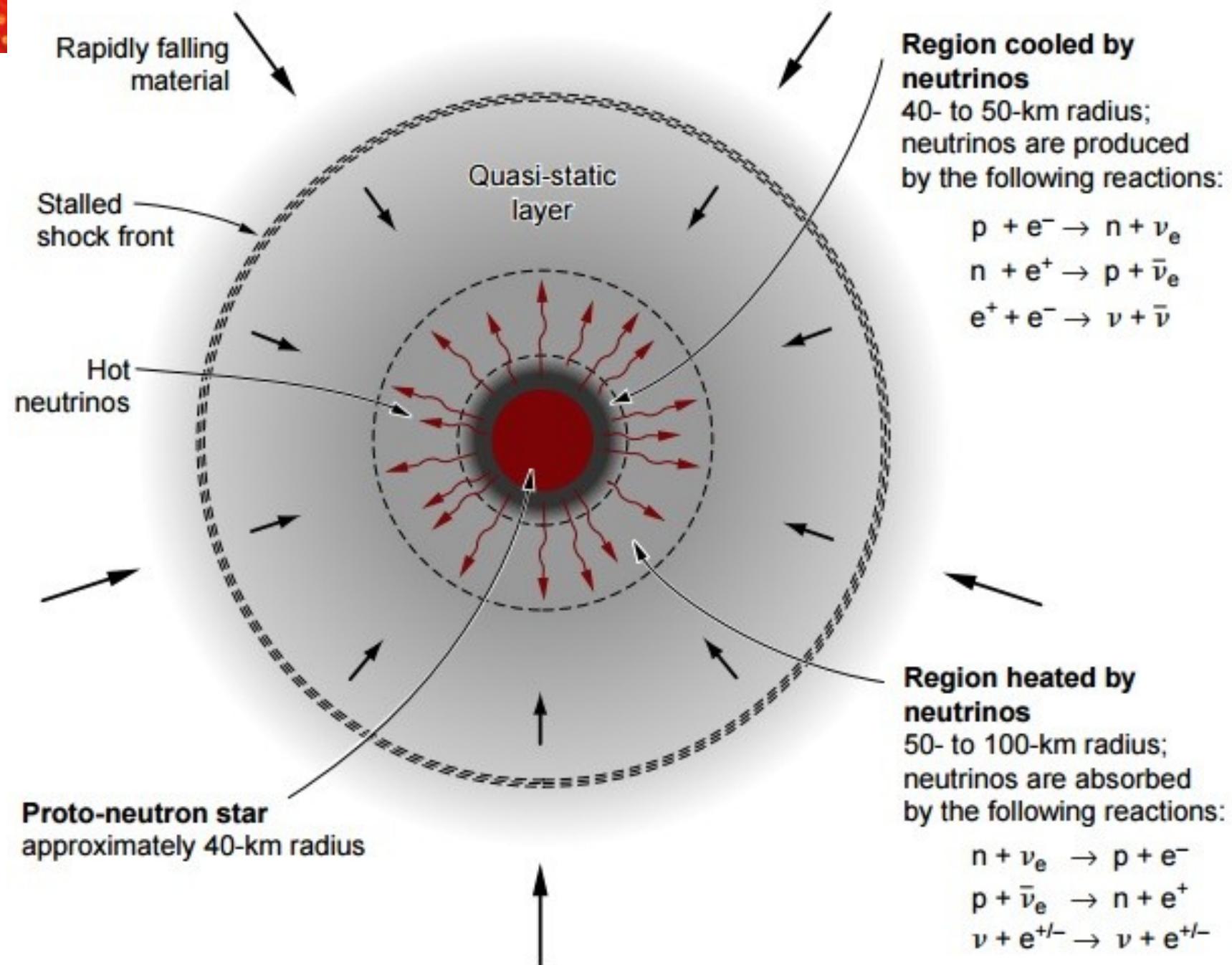
- Al final
$$\gamma + ^{56}\text{Fe} \rightarrow 13 \, ^4\text{He} + 4 \, n$$
$$\gamma + ^4\text{He} \rightarrow 2 \, p^+ + 2 \, n$$
- Continúa la compresión hasta que:



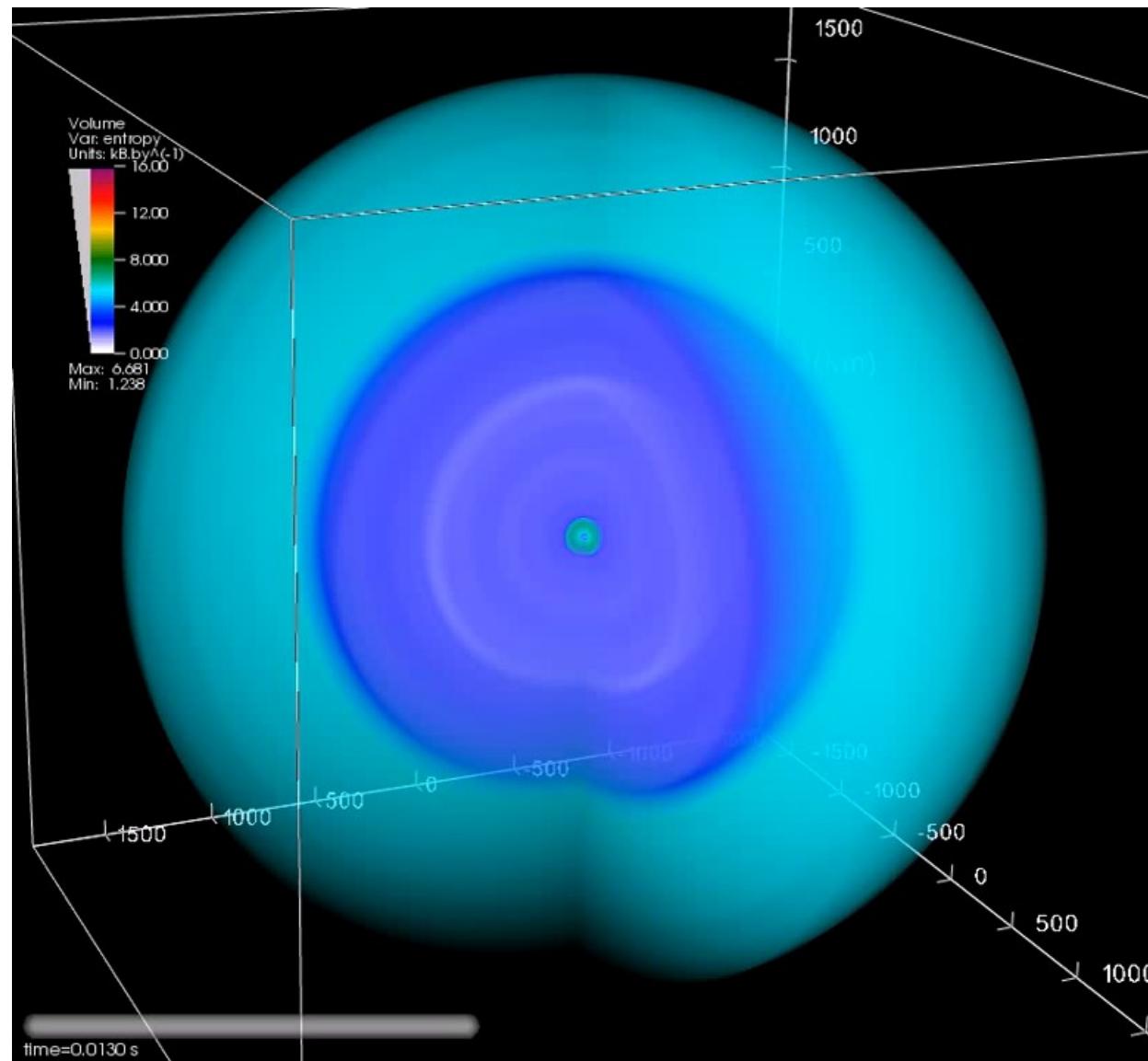
Si el nucleo tiene $M > M_{CH}$...



Supernova Tipo II



Supernova Tipo II





Supernova Types

Type I

No H in spectra

Ia

Si Absorption line
@ 615nm

Found everywhere in the
universe

Always same luminosity?

Ib

No Si

Ic

No Si,
No He

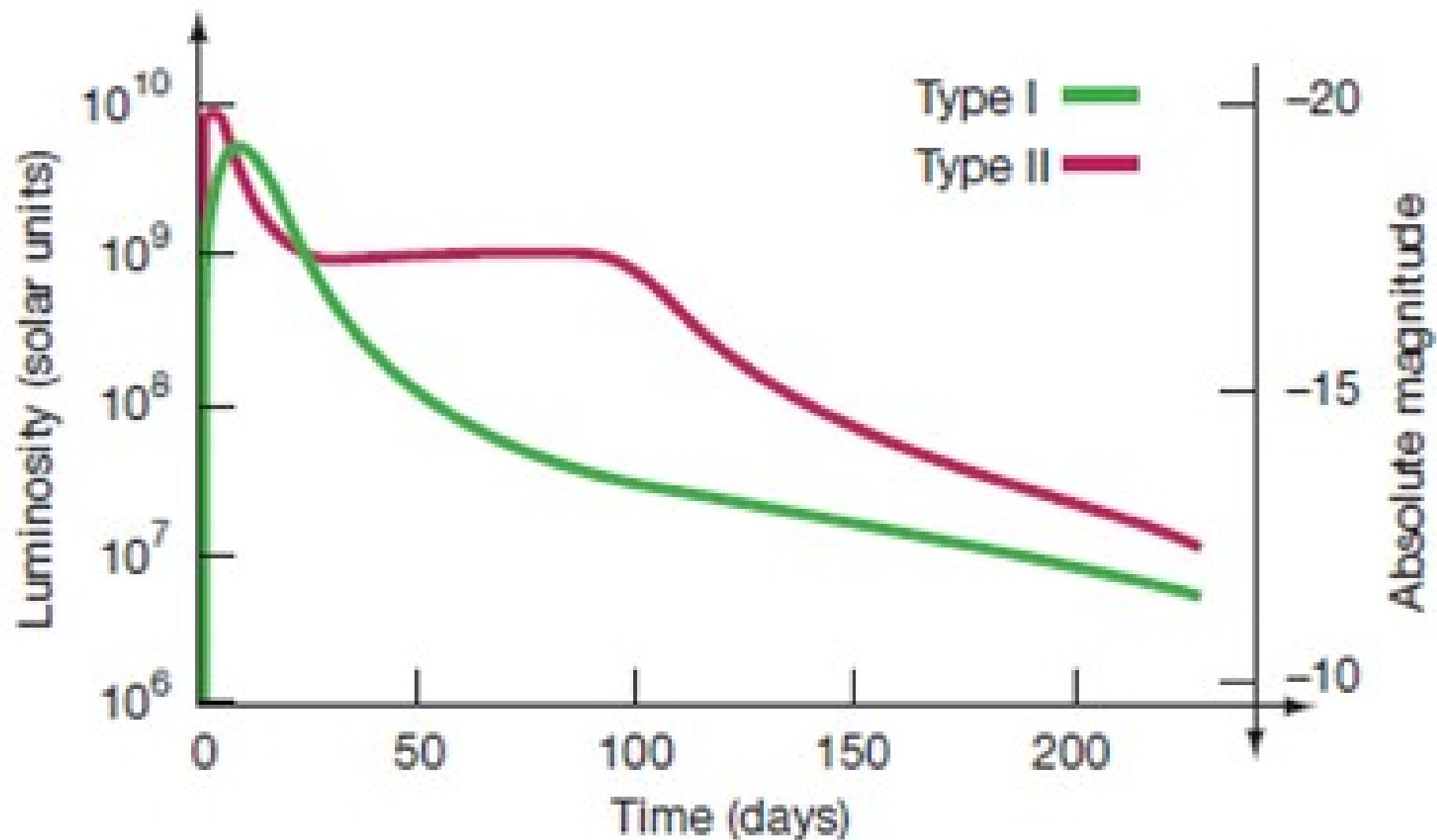
Type II

H in spectra

May be further
subdivided based
on light curves

Found only in new star regions

Curvas de Luz



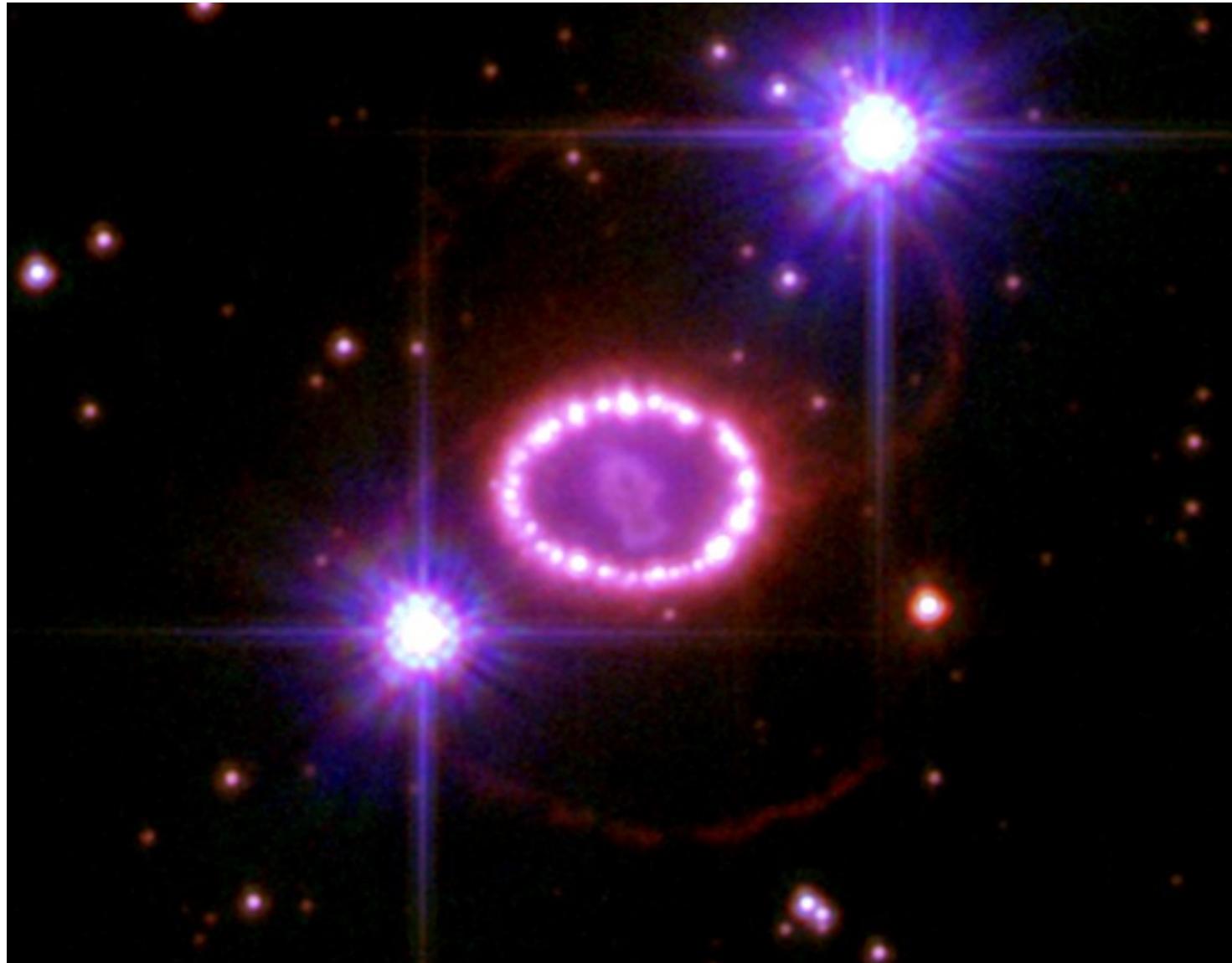


SN1987A





20 años después





Mientras tanto en el núcleo

- La degeneración de neutrones detine la compresión
- Recordando $P_{EB} \sim 1/m_e \rightarrow P_{EN} \sim 1/m_n \rightarrow P_{EN} \sim m_n/m_e P_{EB}$

$$R_{EN} \approx 20 \text{ km} \quad \rho_{EN} \approx 10^{16} \text{ g/cm}^3$$

- Límite superior: TOV (Tolman-Oppenheimer-Volkoff)

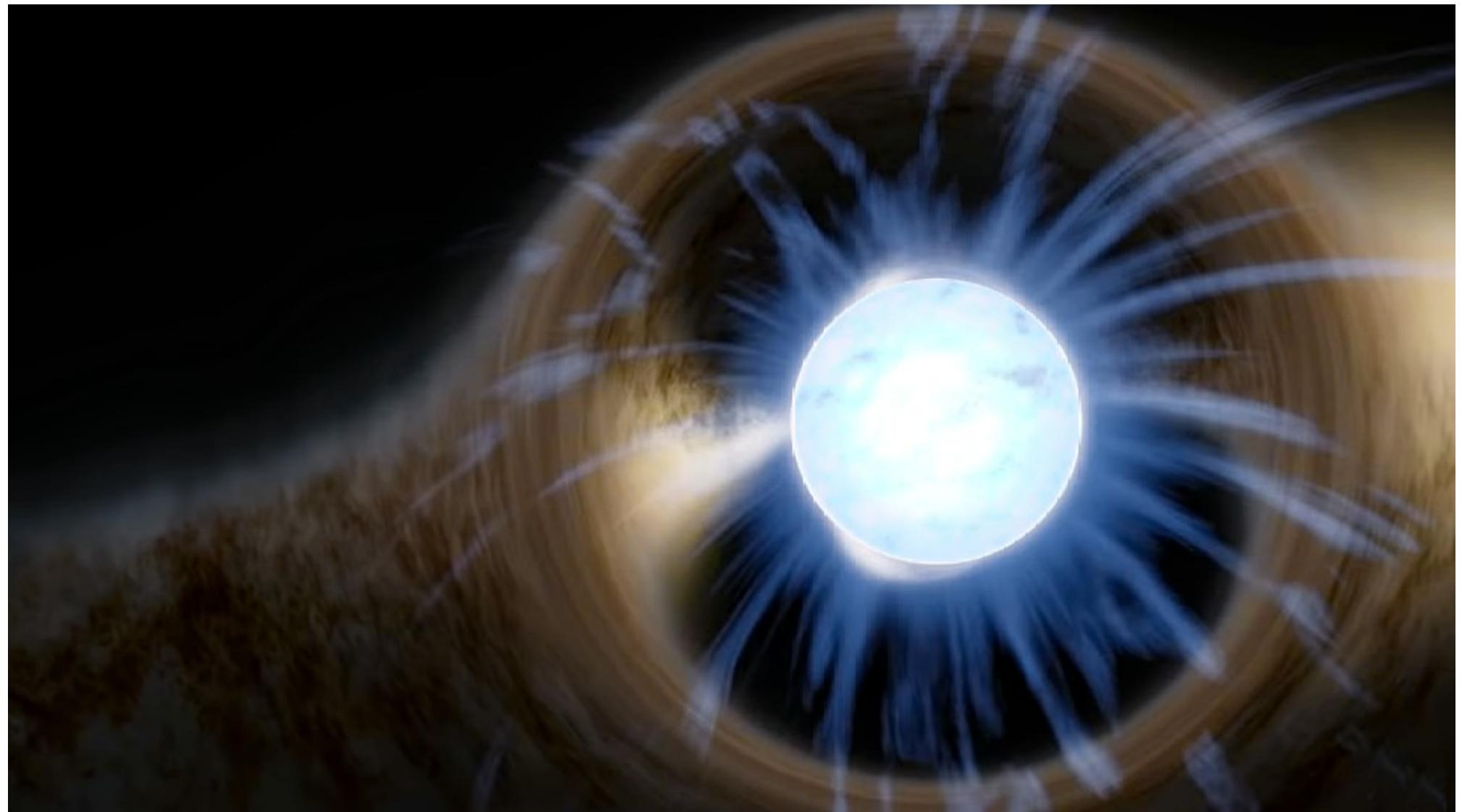
$$M_{EN} < 2,16 M_\odot \equiv M_{TOV}$$

- Si $M > M_{TOV} \rightarrow$ la degeneración de neutrones no logra detener el colapso \rightarrow Agujero negro. Pero:

$$M_{BH} > \approx 5 M_\odot$$

- Estrellas de quarks?

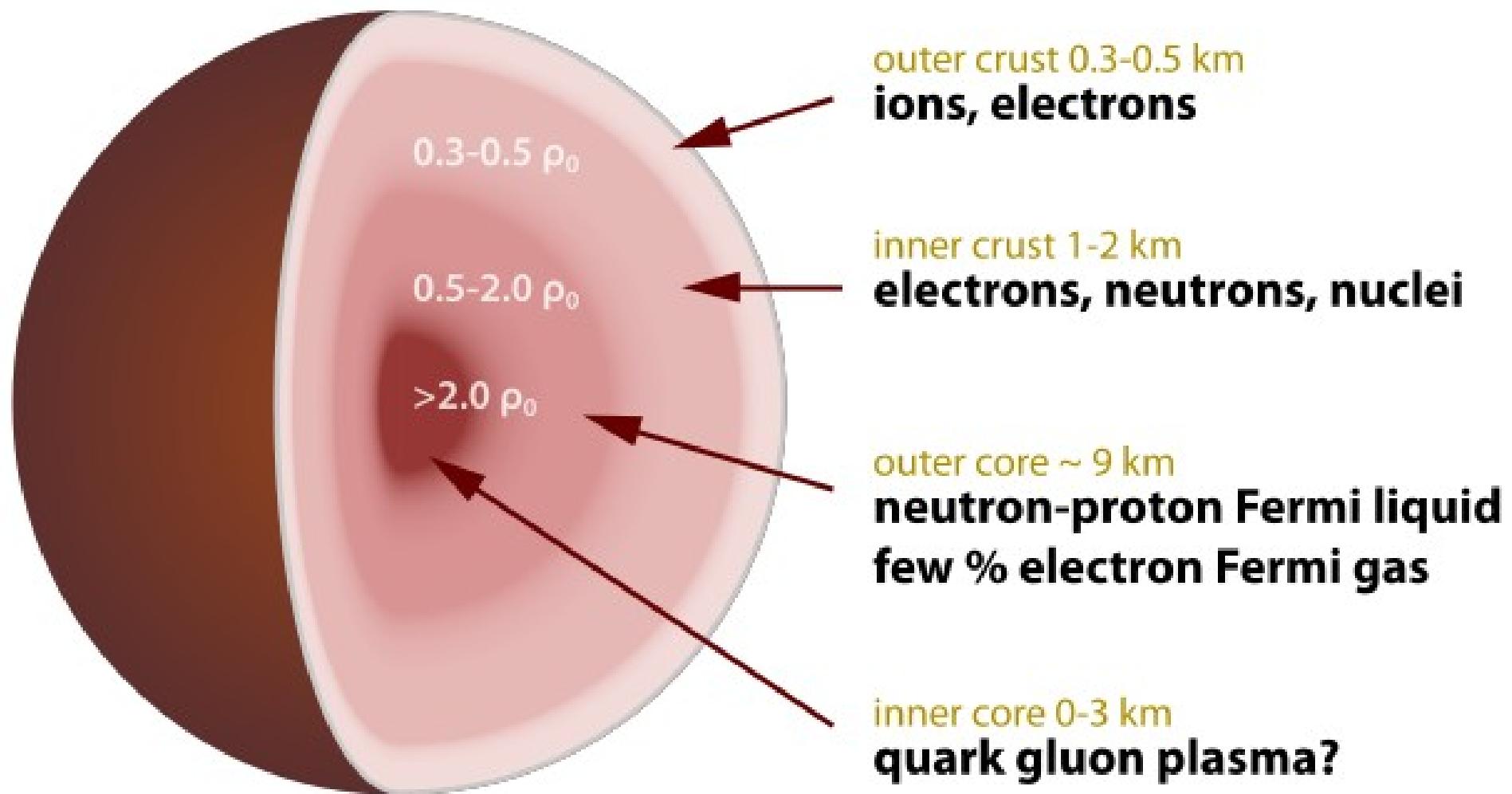
Estrella de neutrones



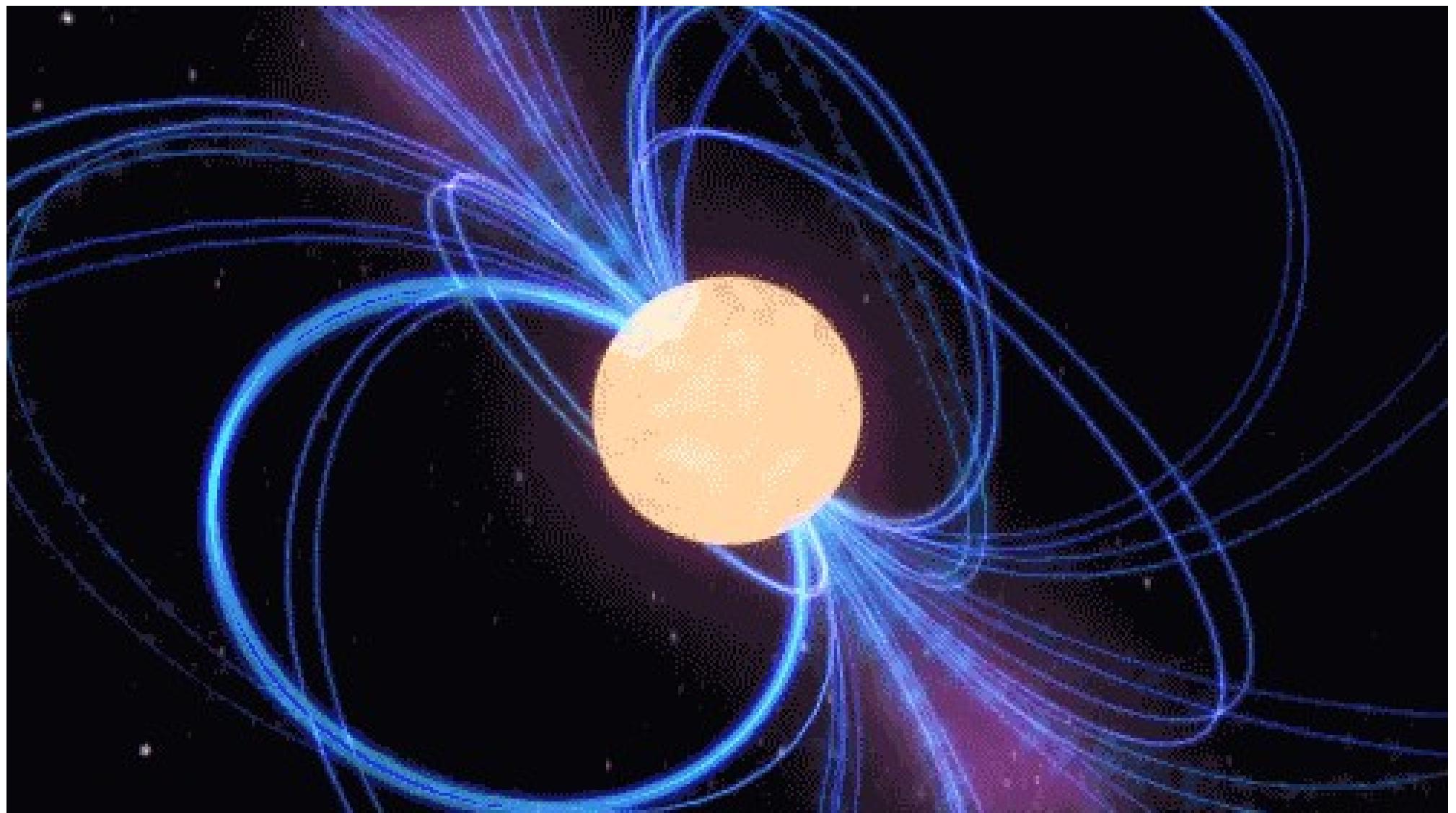
Tamaño de una estrella de neutrones



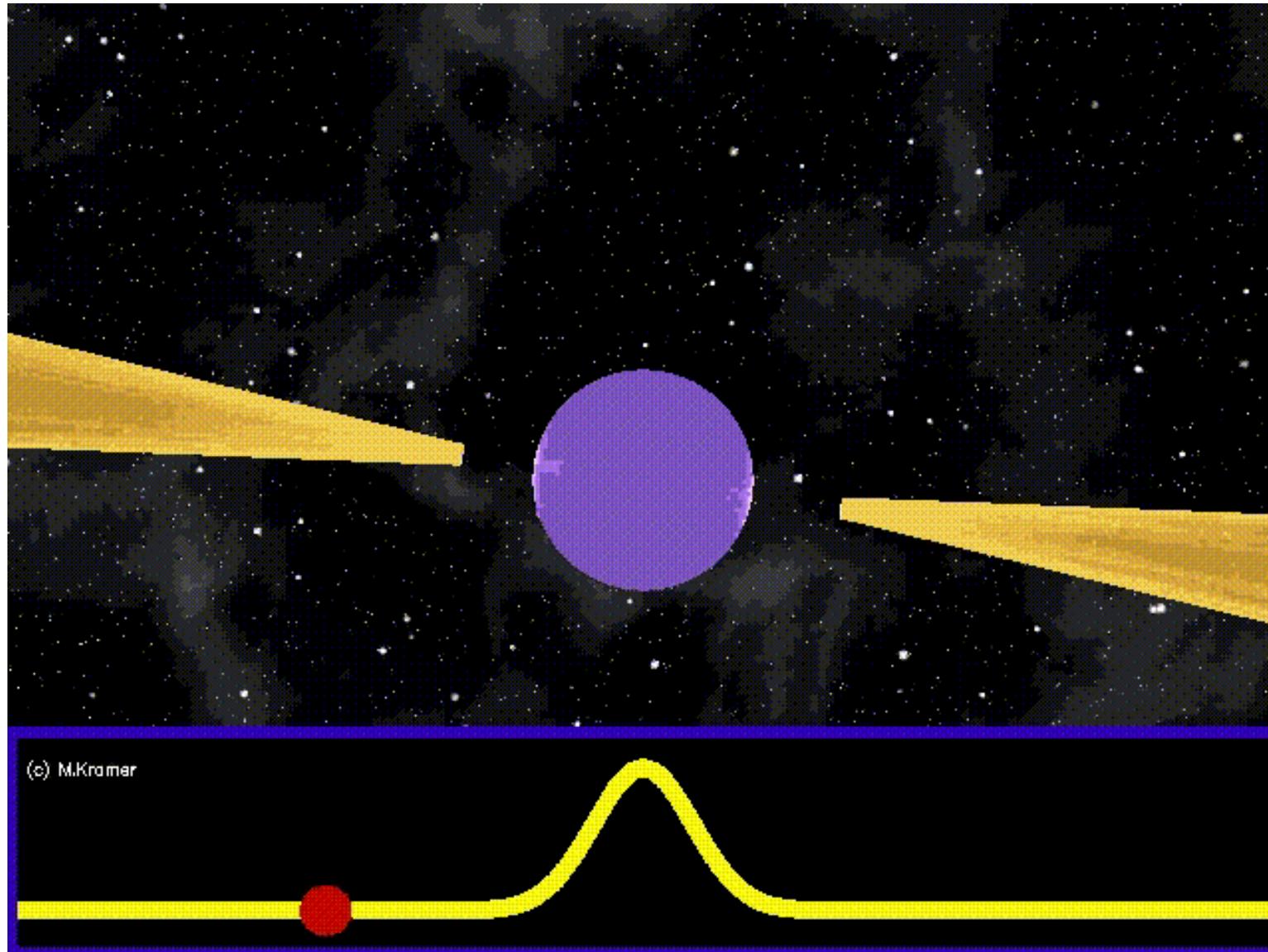
Estructura de una Estrella de Neutrones



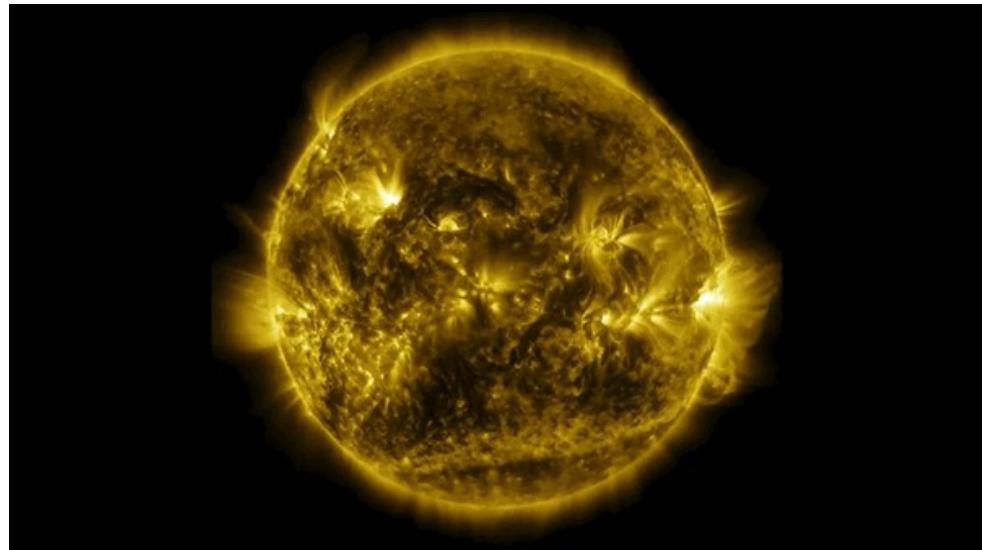
Pulsares



Pulsares



Para el sol



- Periodo de rotación medio: 25 días

$$m\omega_1 R_1 = m\omega_2 R_2$$

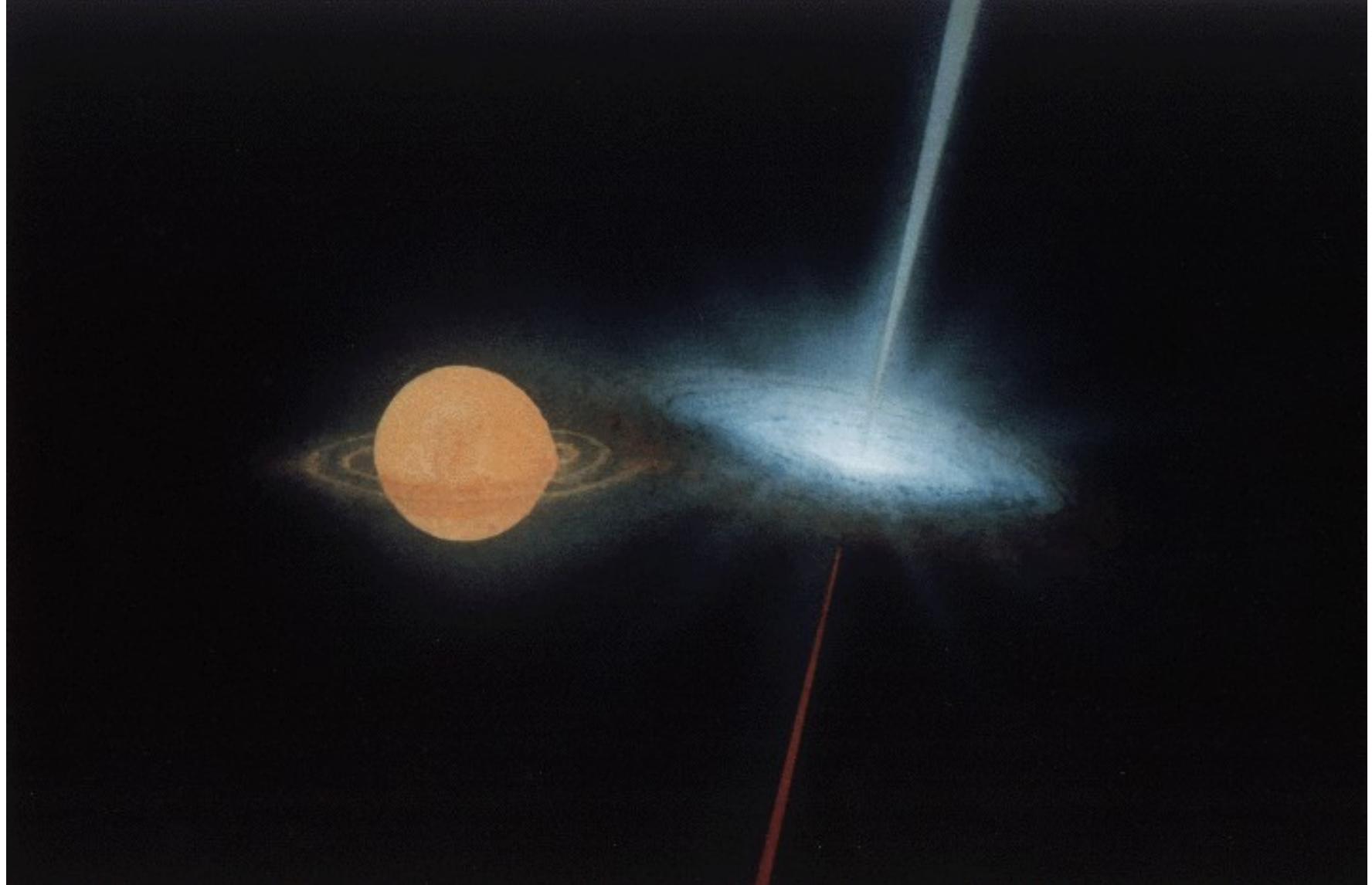
$$\omega_2 = \frac{R_1}{R_2} \omega_1$$

$$\omega_2 = \frac{700\,000 \text{ km}}{10 \text{ km}} \frac{1}{25 \text{ días}}$$

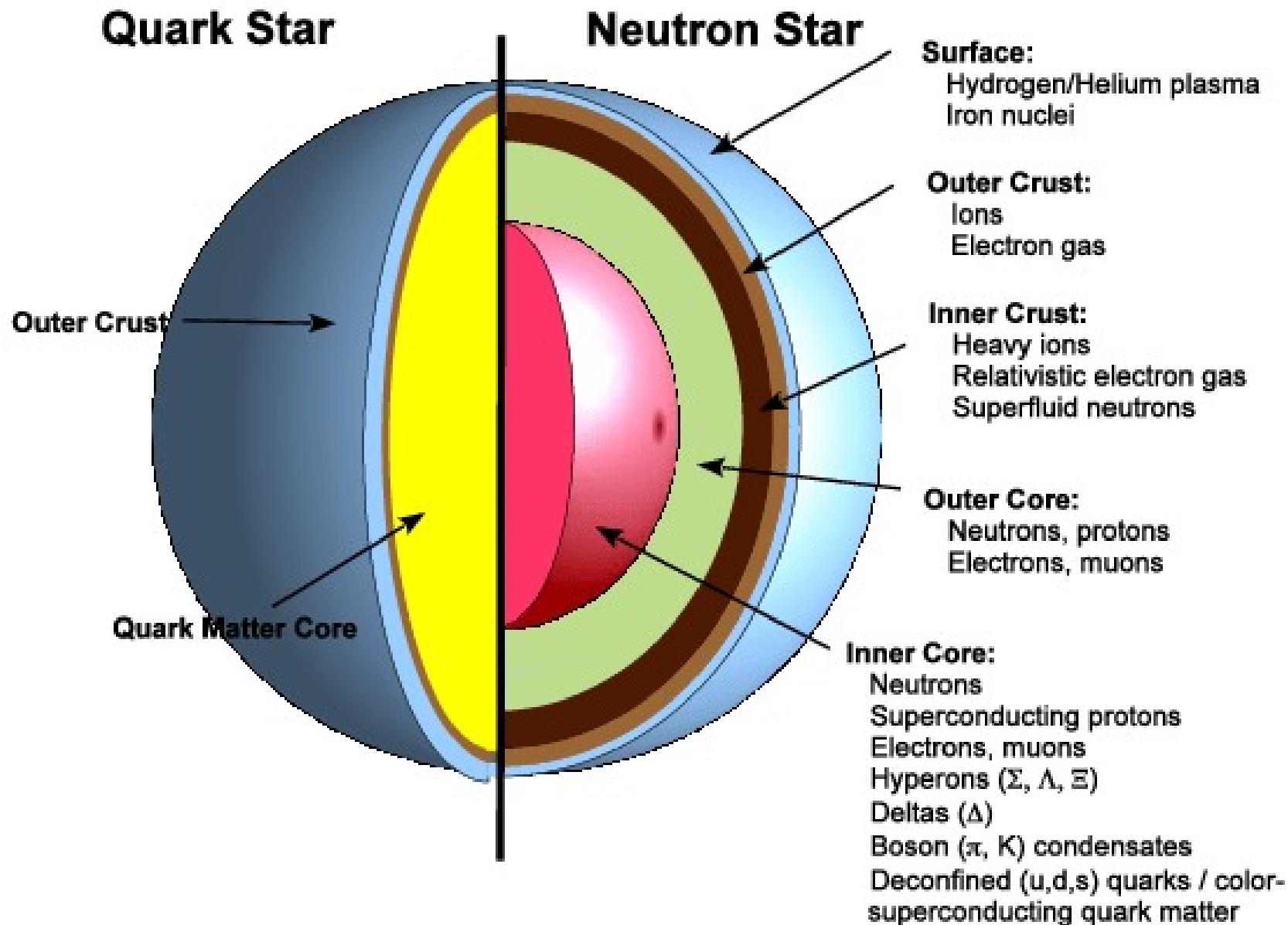
$$\omega_2 = 0,032 \text{ s}^{-1} \simeq \frac{1}{30 \text{ s}}$$

- 2 vueltas por minuto

Sistema SS 433 (V1343 Aquilae)



Estrellas de Quarks





Estrellas de Quarks





Muerte estelar → objetos compactos

- Y como siempre, **todo depende de la masa** ...
- Enana blanca no relativista

$$M < \approx 1,1 M_{\odot}$$

- Enana blanca relativista → Chandrasekhar

$$\approx 1,2 M_{\odot} < M < 1,44 M_{\odot}$$

- Estrella de neutrones → Tolman-Oppenheimer-Volkoff

$$1,44 M_{\odot} < M < 2,2 M_{\odot}$$

- Estrella de quarks → sin teoría pero observational

$$2,2 M_{\odot} < M < \approx 5 M_{\odot}$$



Y después?

- Si la masa es mayor que $\sim 5M_{\odot}$ sd ya ni siquiera la degeneración de neutrones ni la interacción fuerte pueden contener a la gravedad
- El colapso continúa y ya nada puede escapar:
- velocidad de escape en un cuerpo de masa M y radio R

$$\frac{1}{2}mv_e^2 = \frac{GMm}{R} \rightarrow R = \frac{2GM}{v_e^2}$$

- En algún momento $v_e \rightarrow c$

$$R_{SCH} = \frac{2G}{c^2} M$$

Radio de Schwarzschild

$$R_{\text{SCH}} = \left(\frac{2G}{c^2} \right) M$$

Notar que no depende de la masa, es una relación entre el tamaño y la masa → densidad

- Sol, $R_{\text{SCH}} \sim 3$ km. Tierra, $R_{\text{SCH}} \sim 9$ mm. Agujero negro central, $R_{\text{SCH}} \sim 0,1$ UA. AGN ~ 50 UA ~ 1 mpc
- El radio de Schwarzschild divide al Universo en dos regiones
 - → nada puede escapar → **Horizonte de Sucesos**

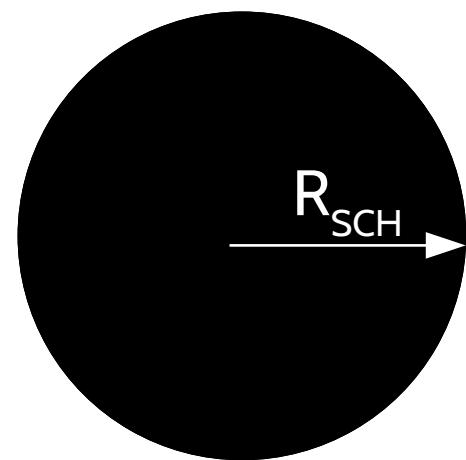
Con ustedes, un agujero negro

Con ustedes, un agujero negro

$$\xrightarrow{R_{SCH}}$$

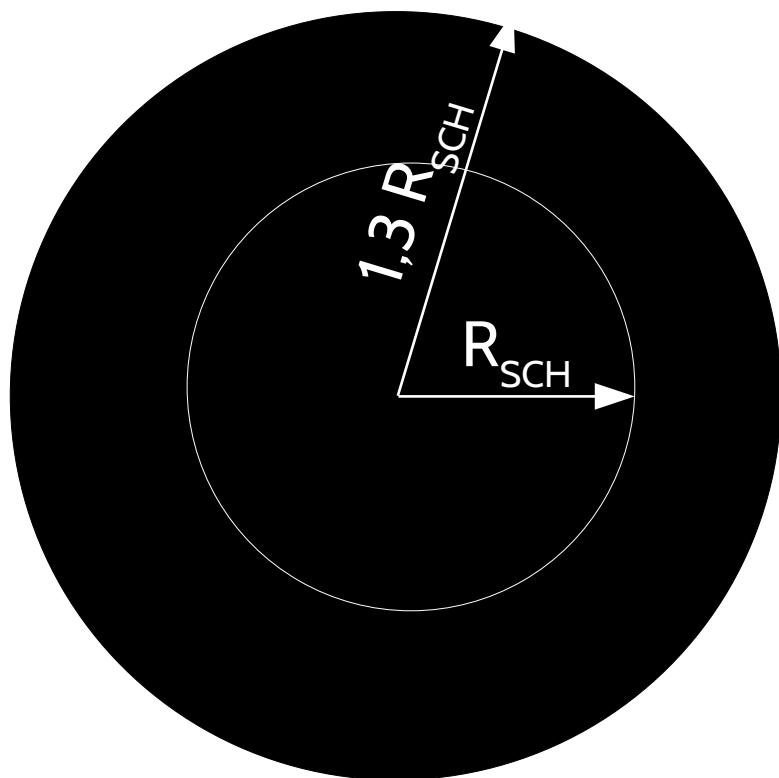


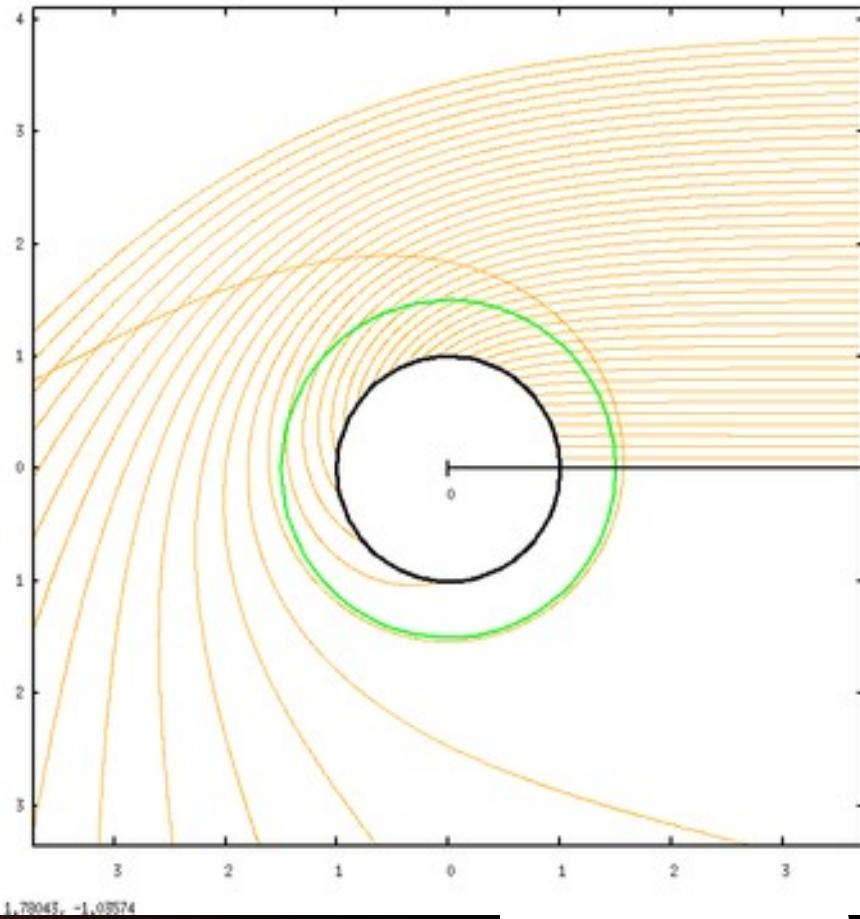
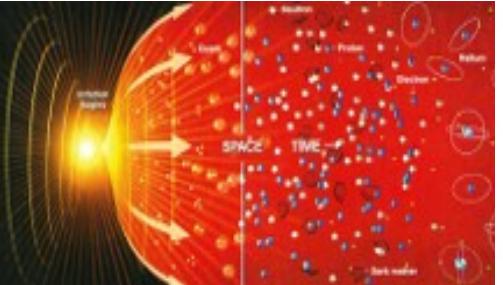
Para que se vea mejor



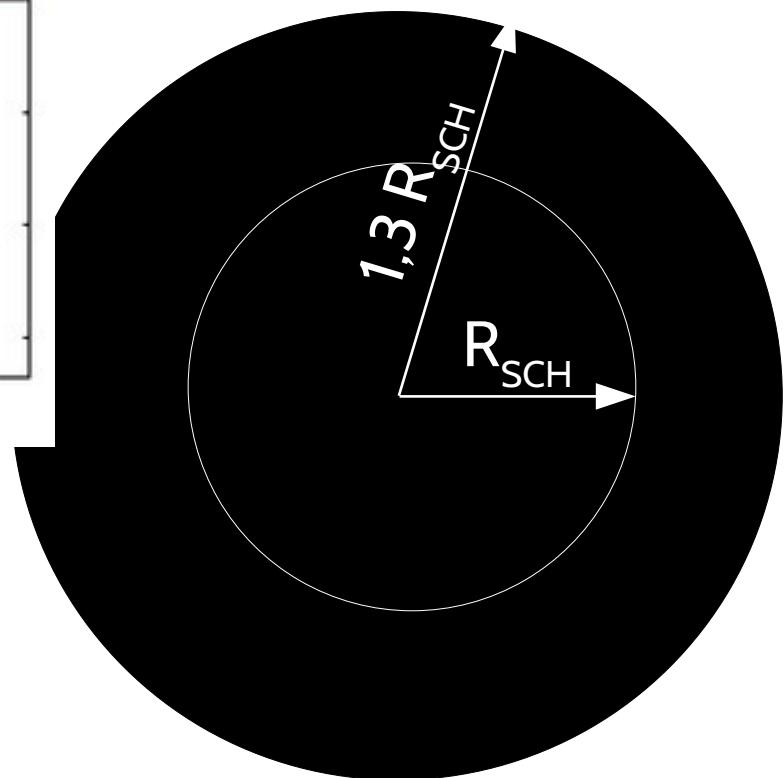
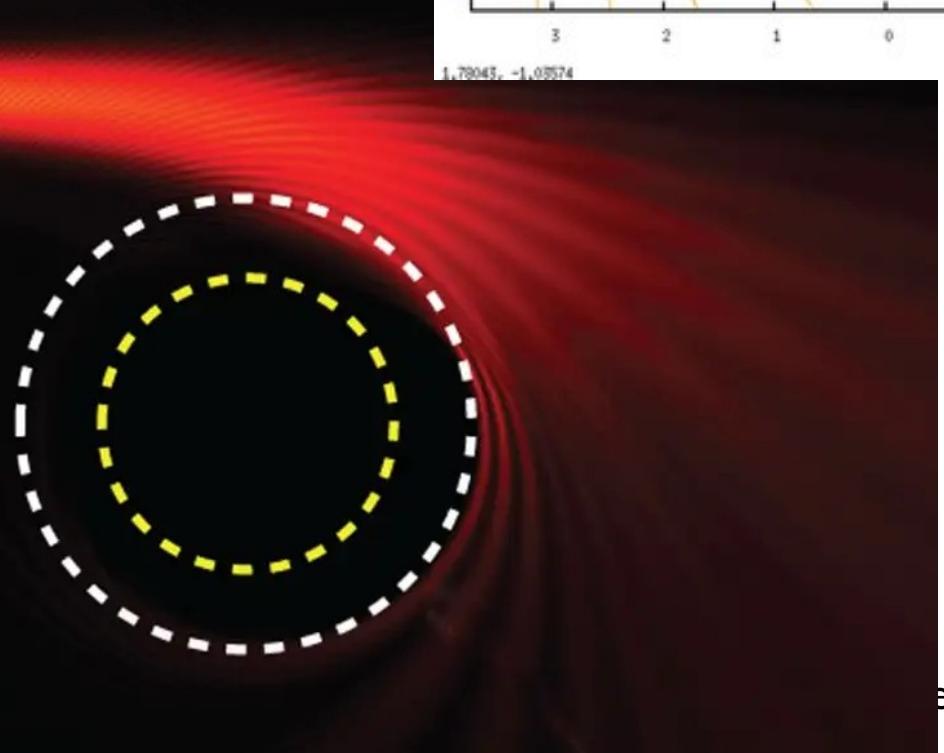


Pero en realidad no se ve así....

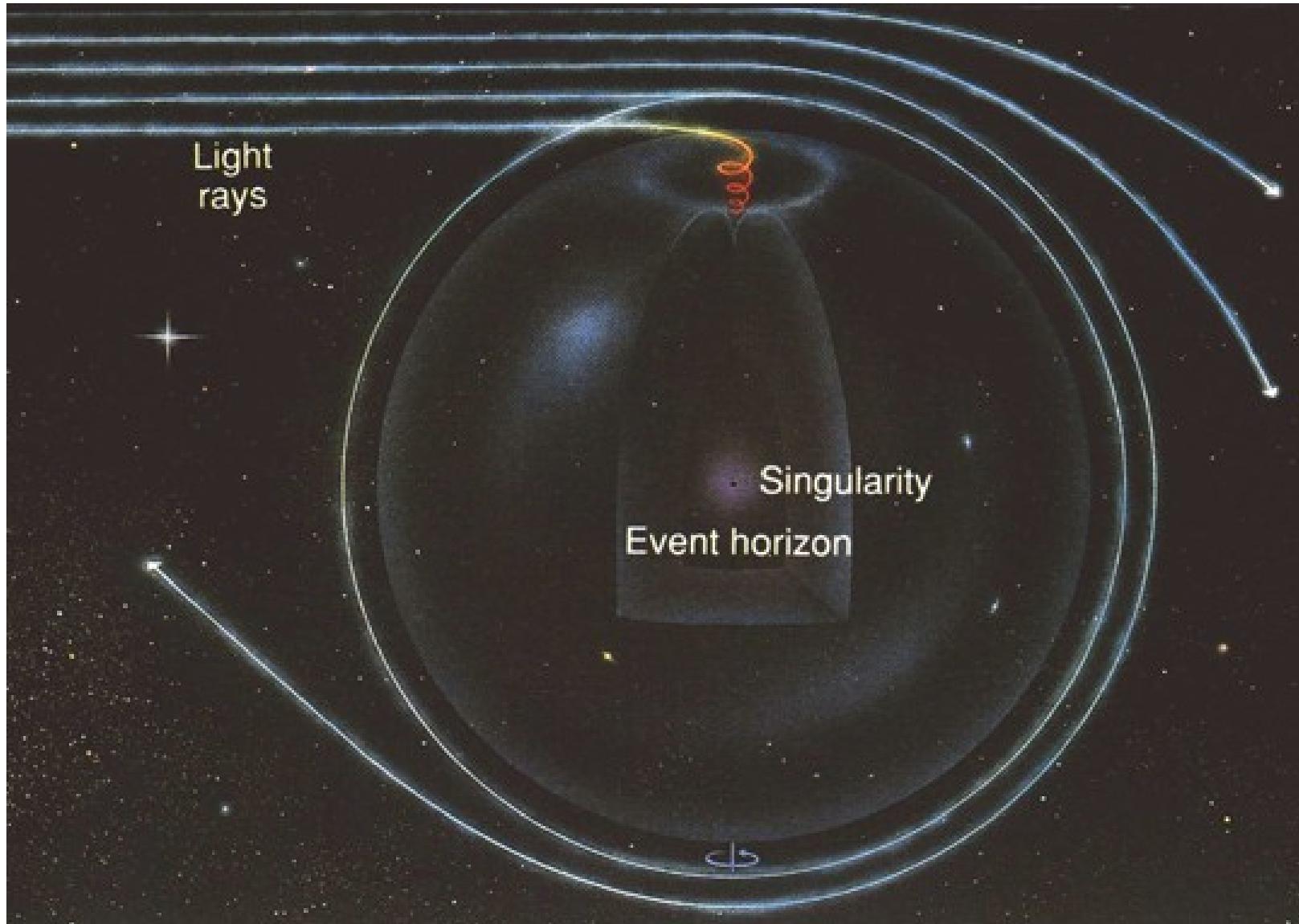




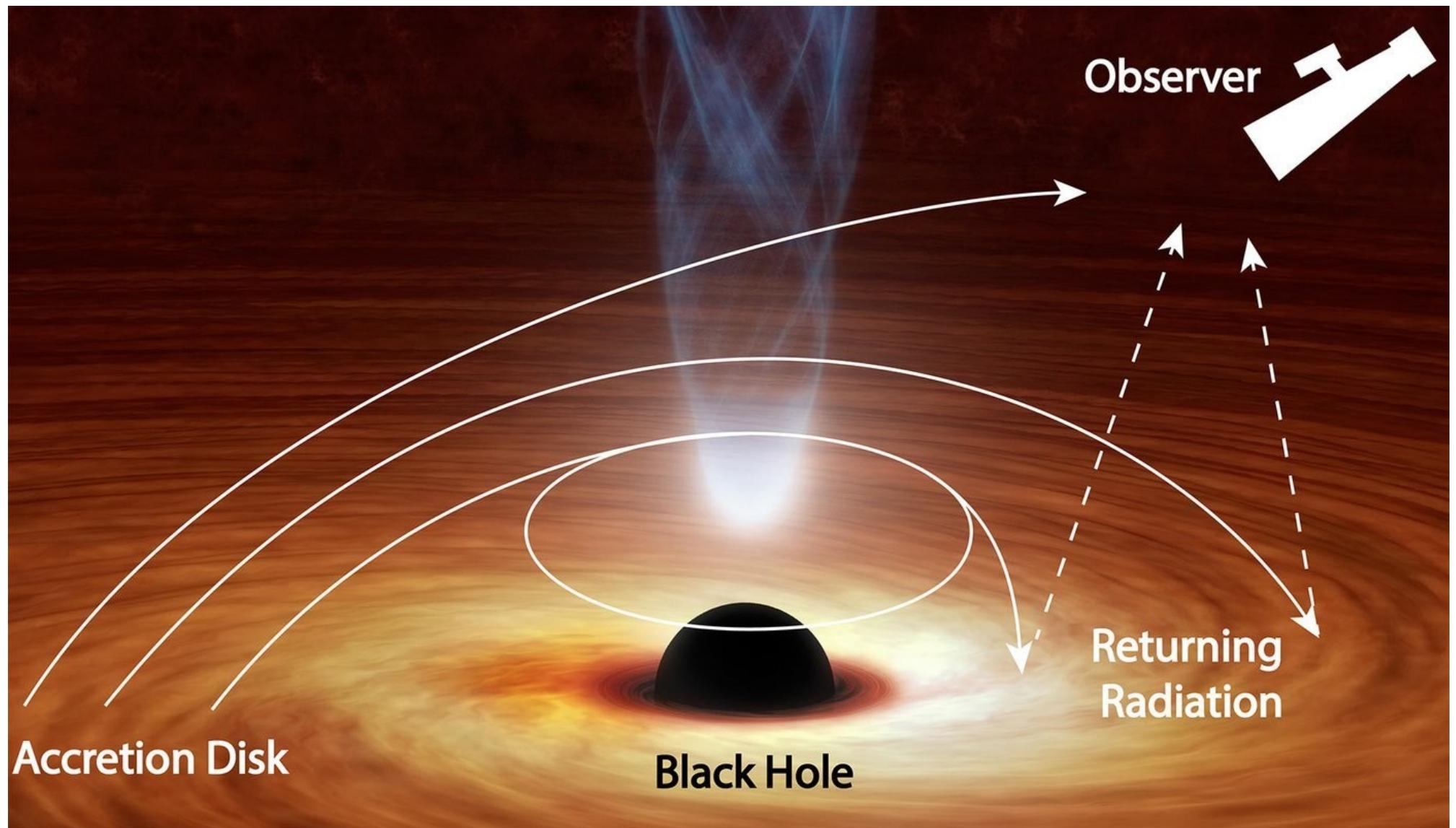
ad no se ve asi....



La curvatura de la luz hace que parezca mayor



Entonces...



Accretion Disk

Black Hole

Returning
Radiation

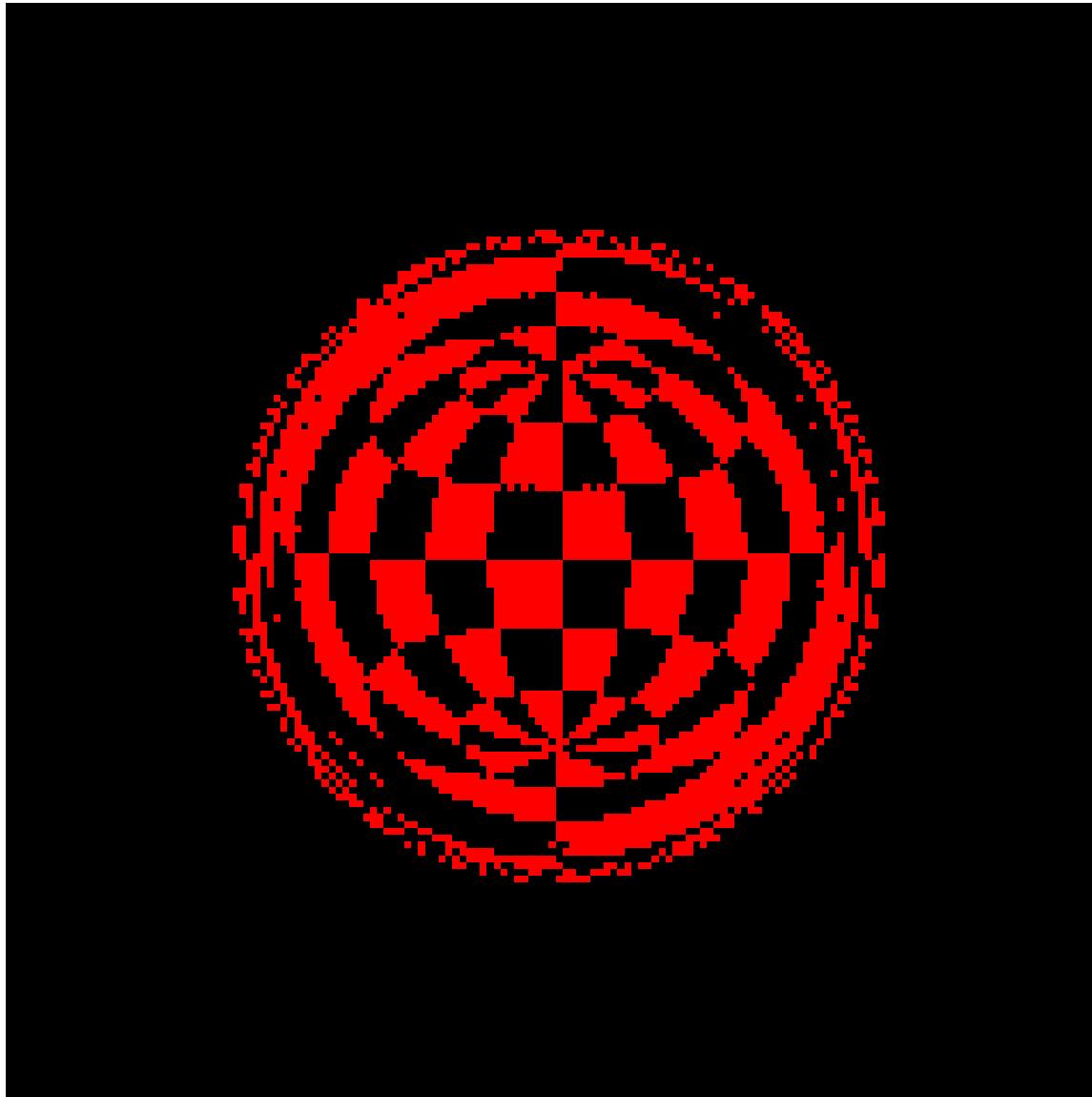


Vemos la parte de atrás...



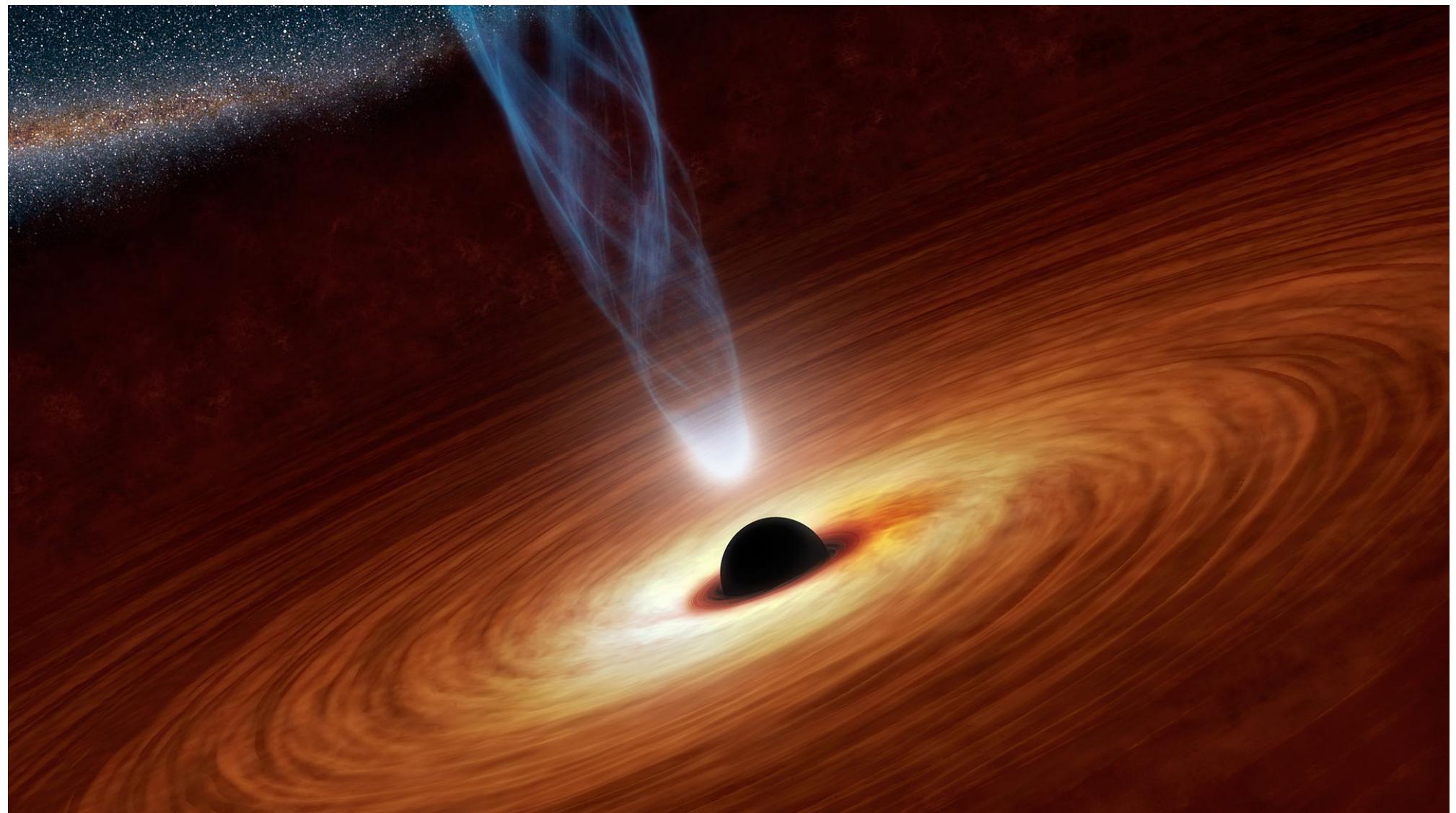


Vemos la parte de atrás





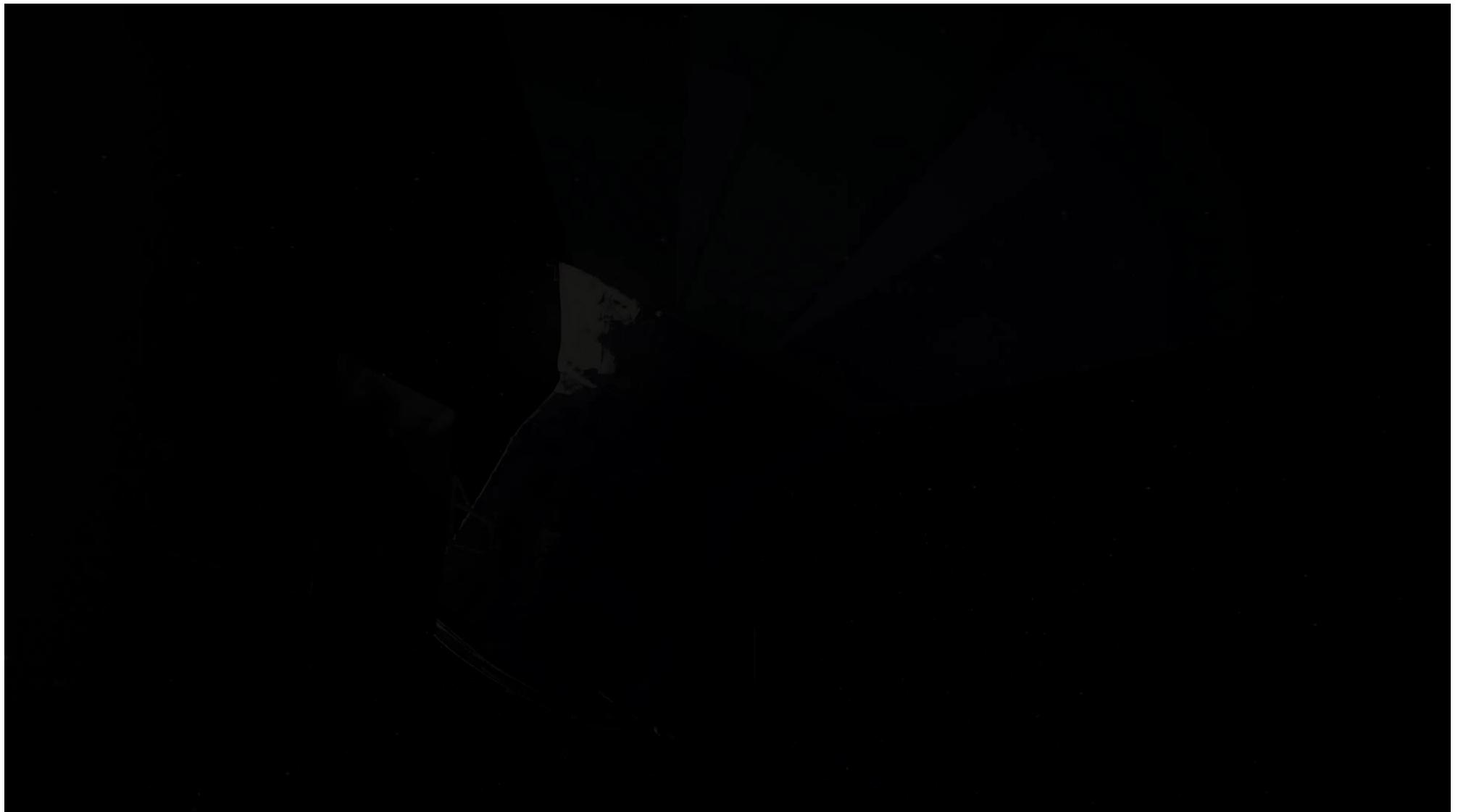
Disco de acreción



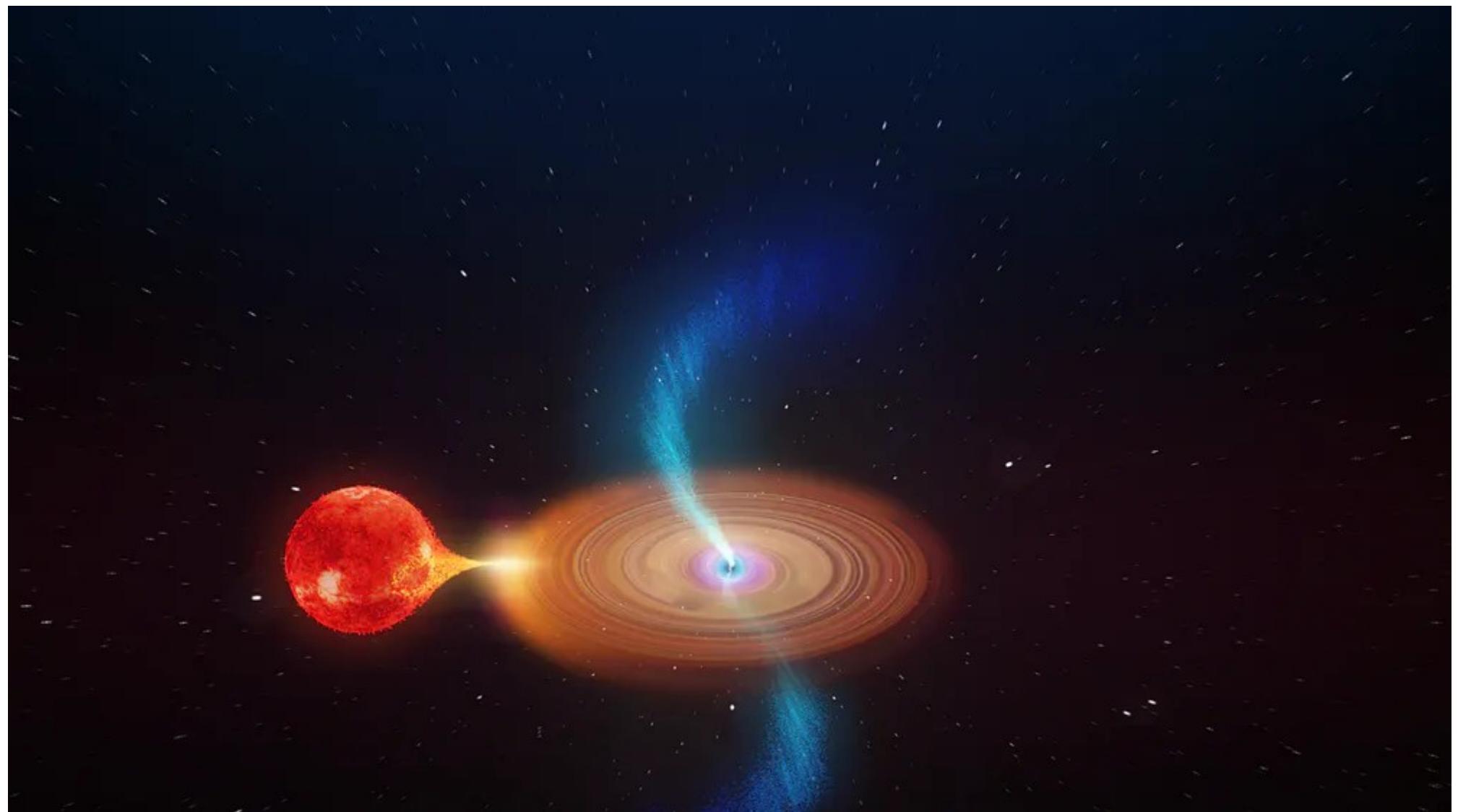


- A medida que la materia cae se calienta y por conservación de la cantidad de movimiento angular se acelera
 - Calentamiento por fricción → mayor velocidad de rotación
 - Calentamiento por fricción → energía cinética por caída
- Al calentarse la materia emite radiación electromagnética → brilla

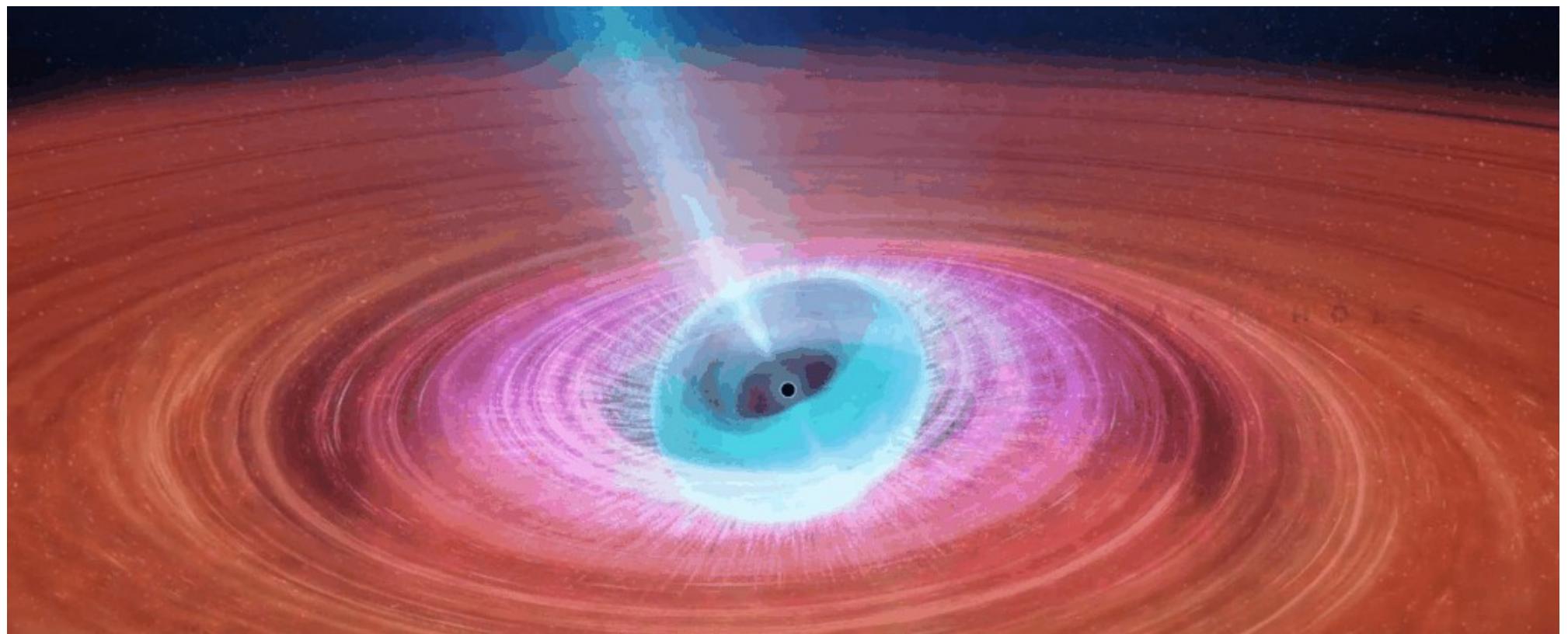
Acreción de masa



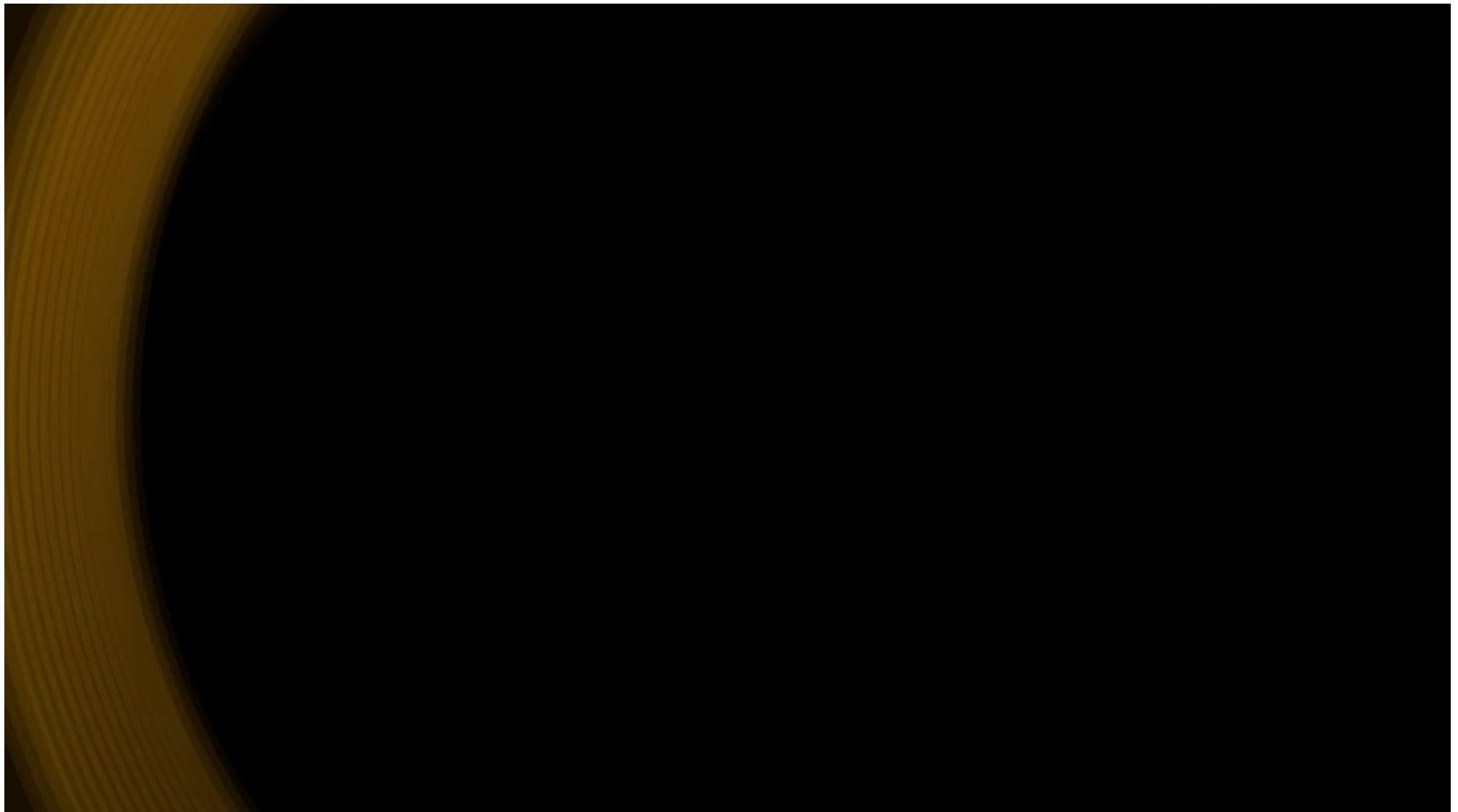
V404 Cygni



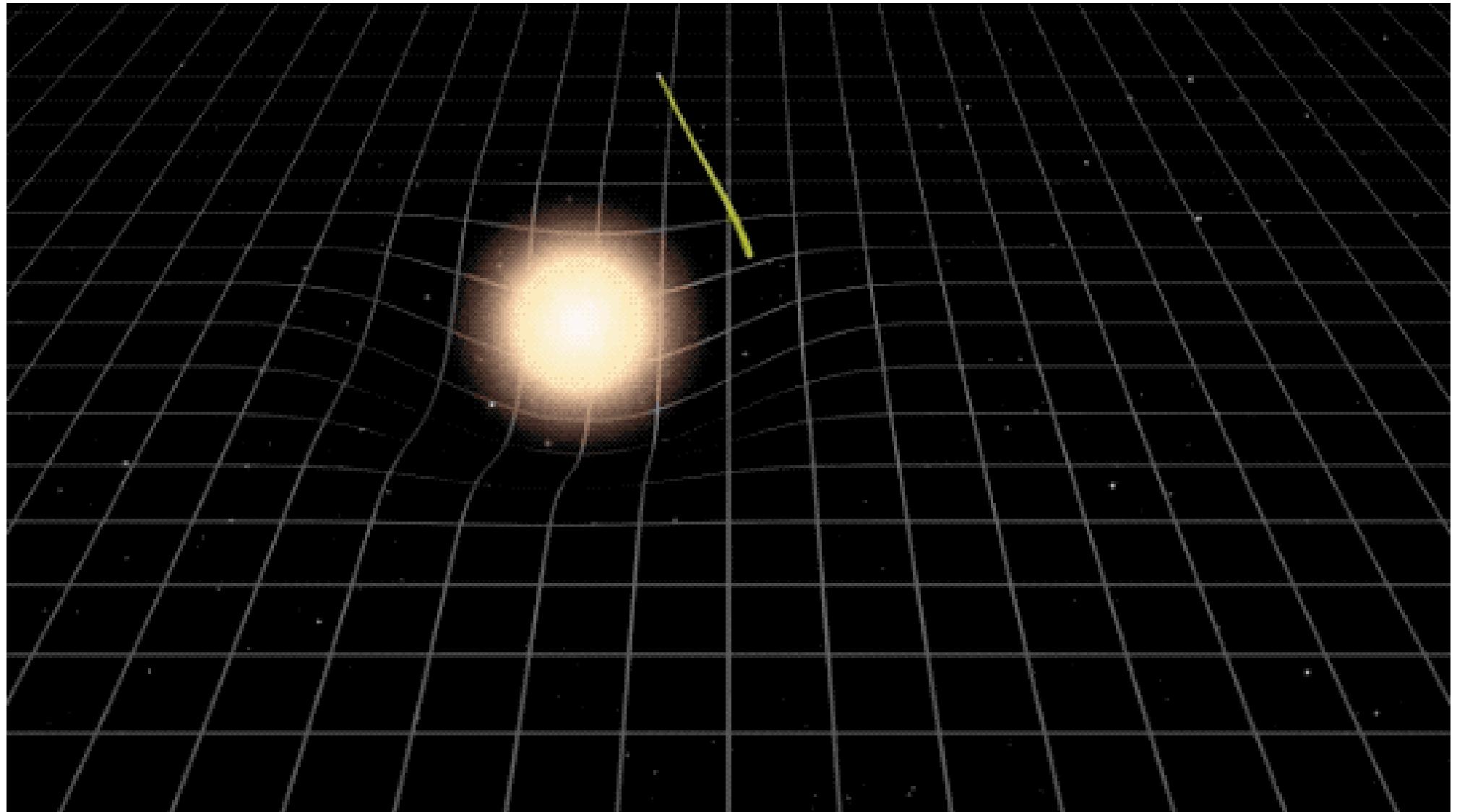
Arrastre del espacio tiempo



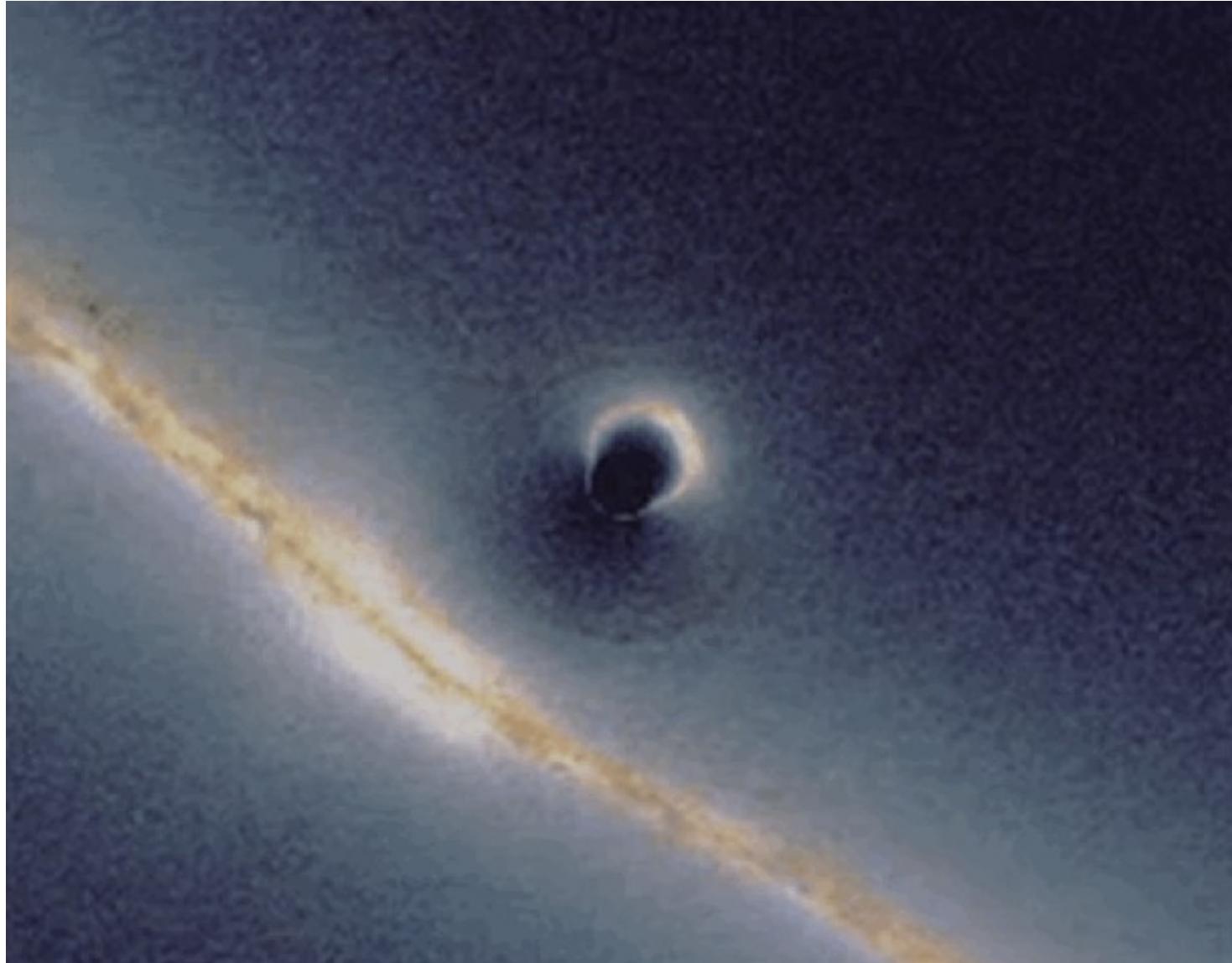
V404 Cygni



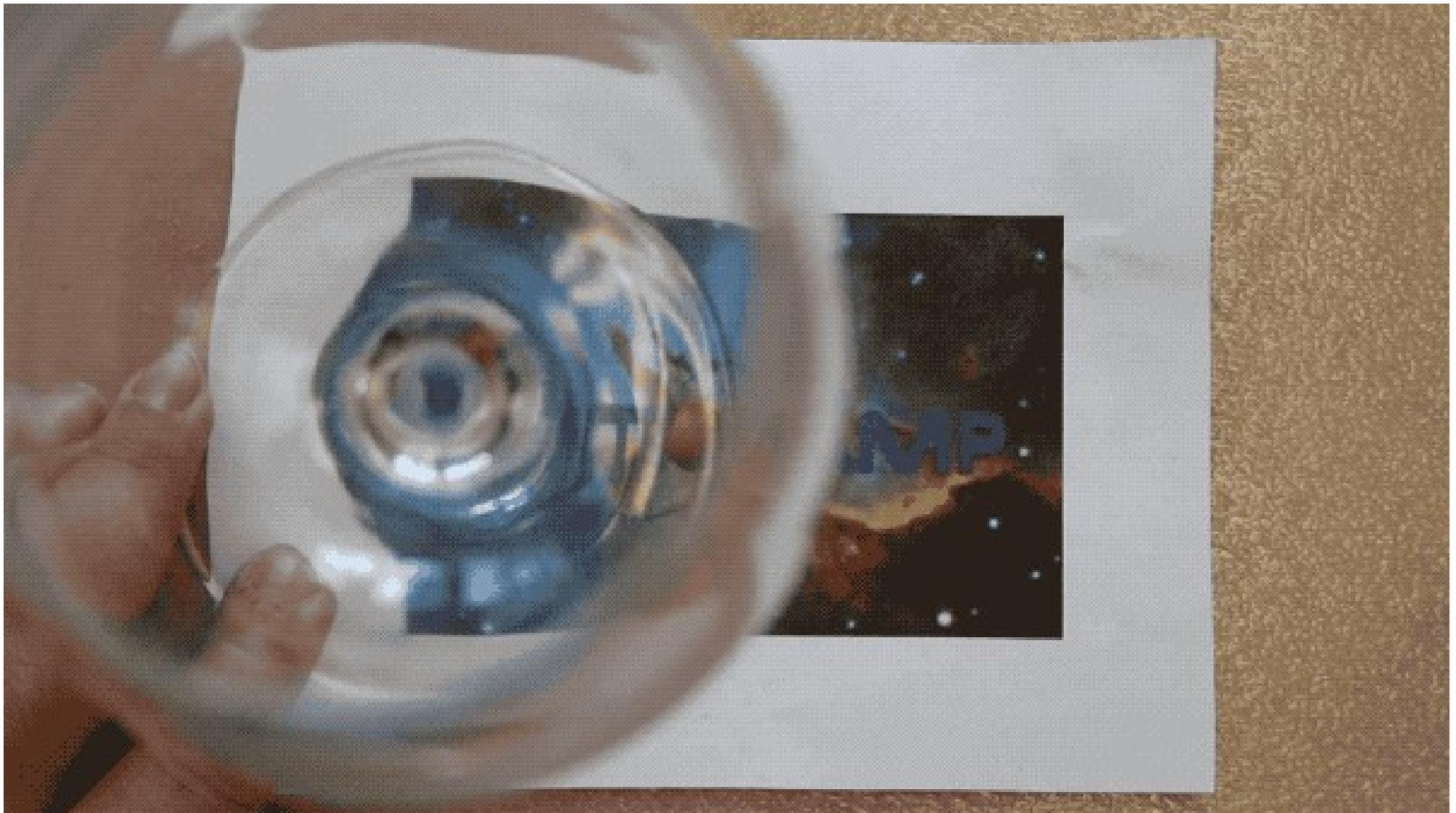
Lente gravitacional: la luz se mueve en líneas rectas en un espacio tiempo curvo (geodésica)



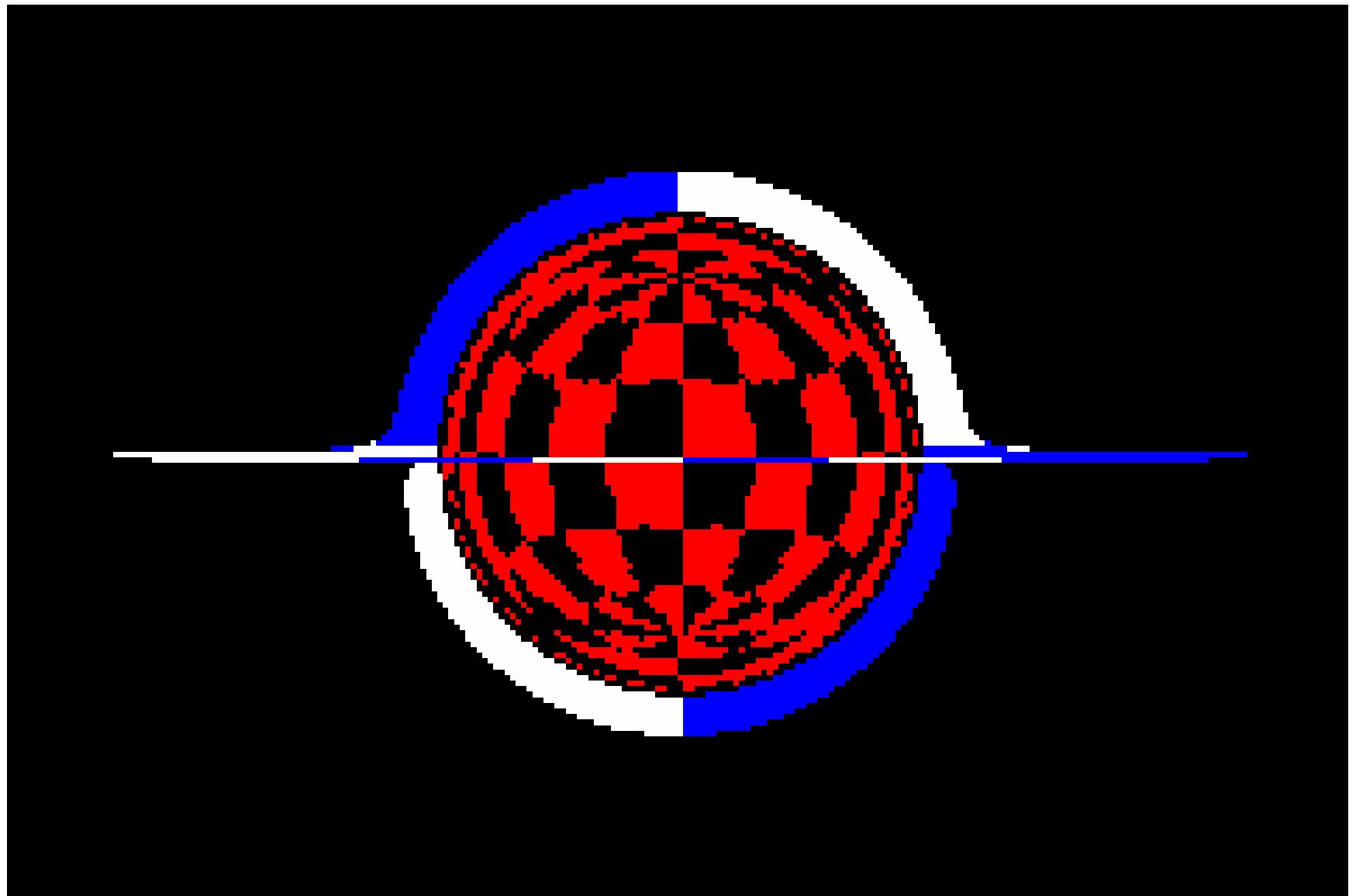
Lente gravitacional (MACHOs) Masive compact halo objects



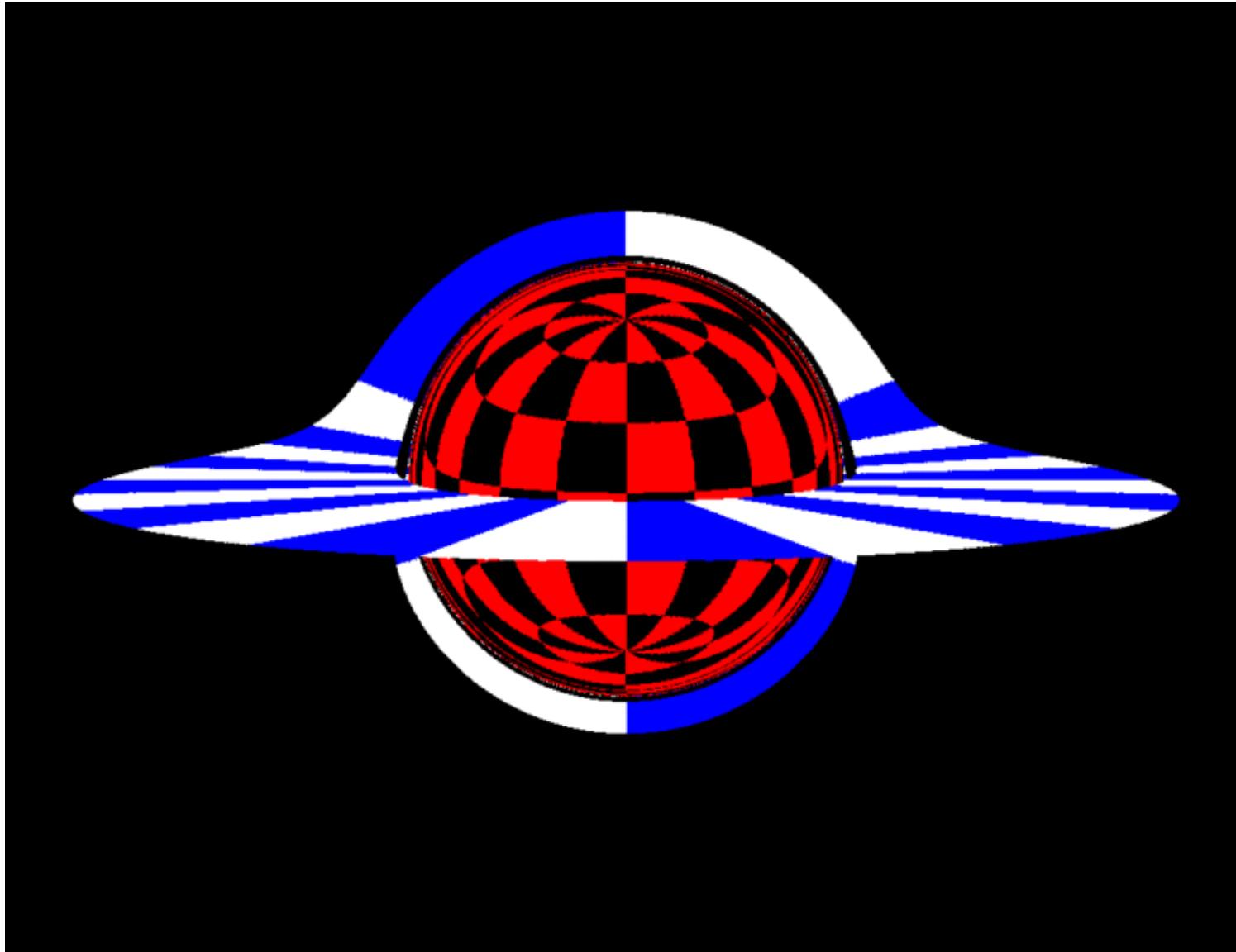
Lente gravitacional



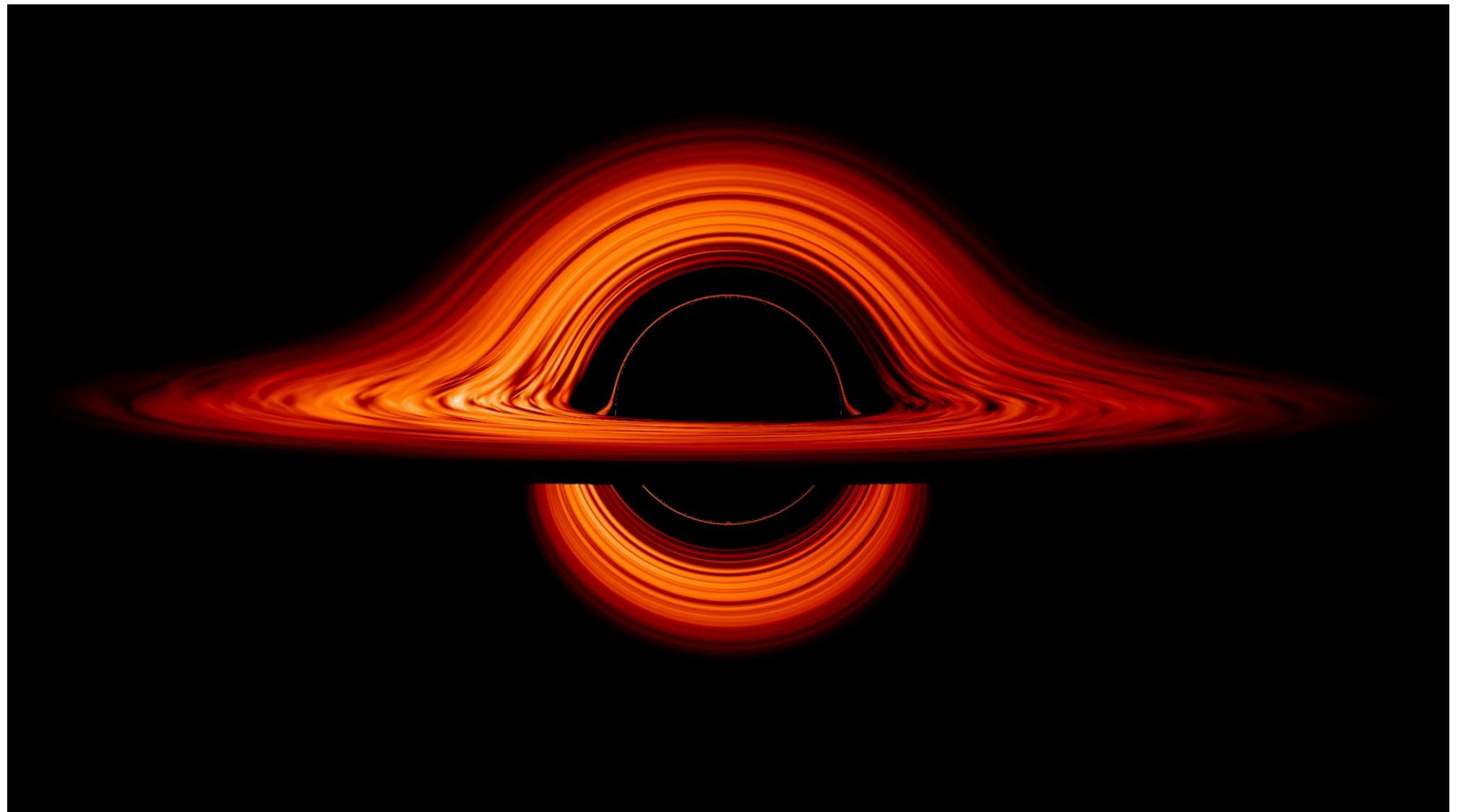
Entonces...



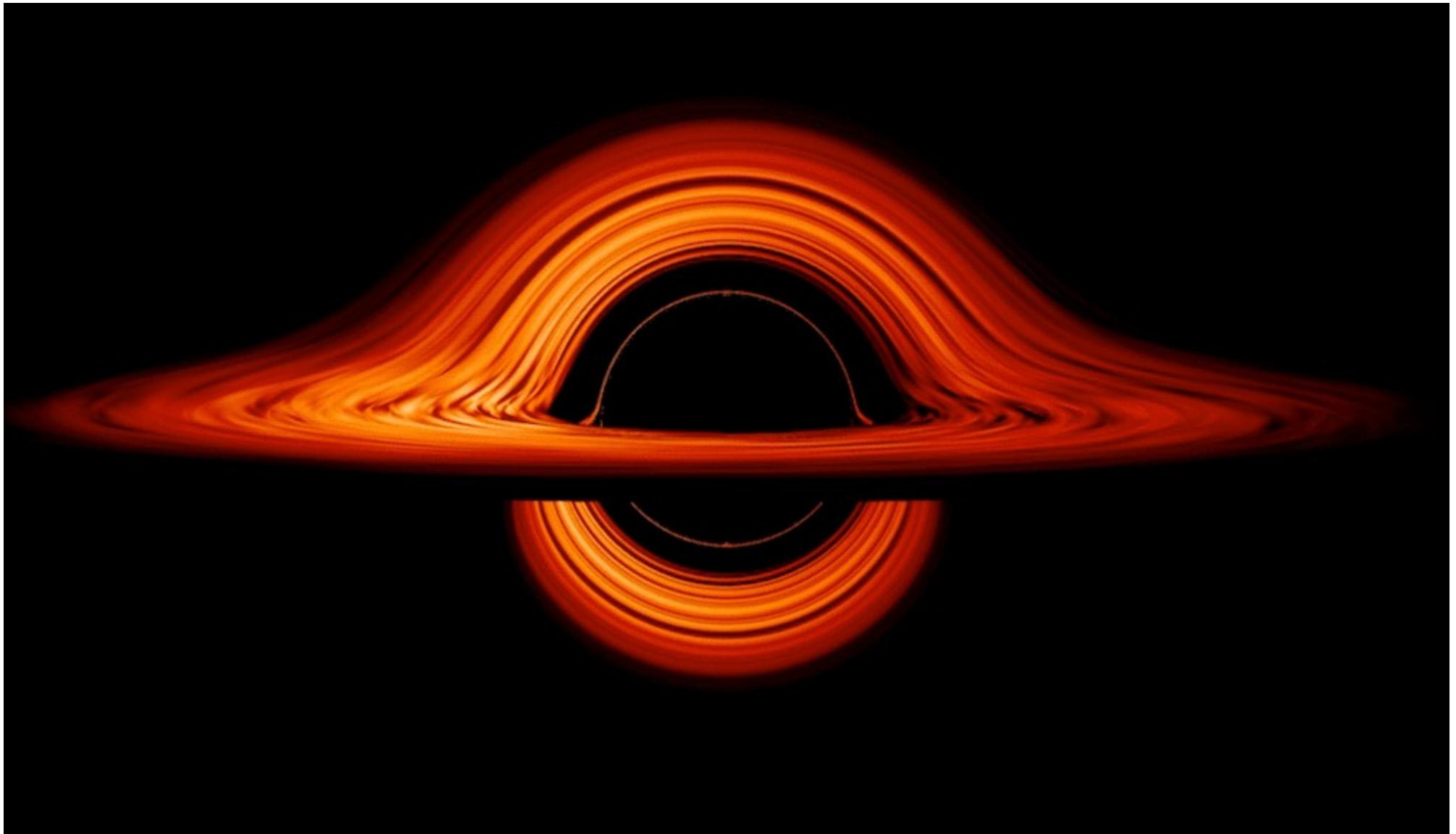
Y el efecto sobre el horizonte de sucesos



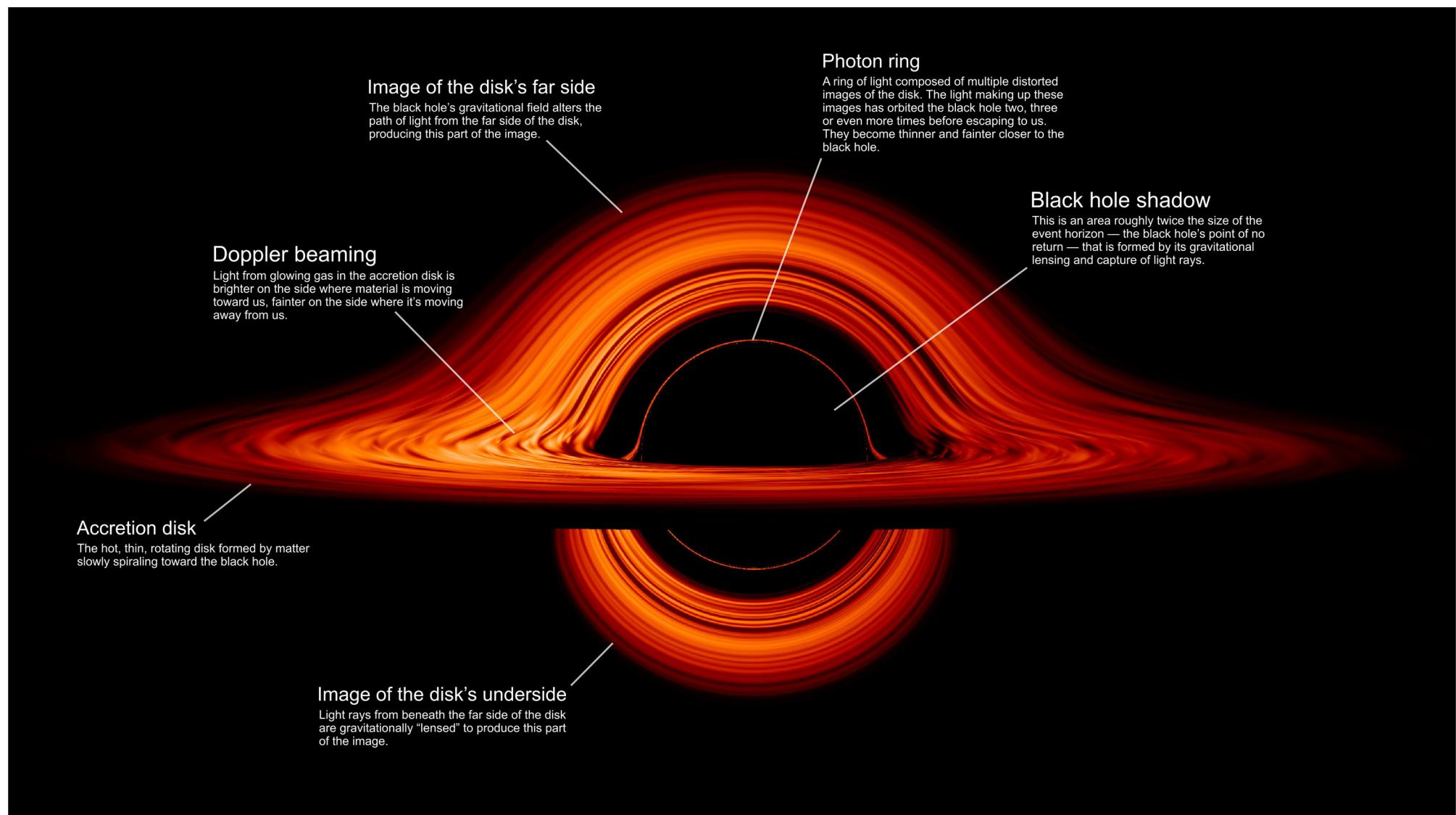
Así se ve un agujero negro

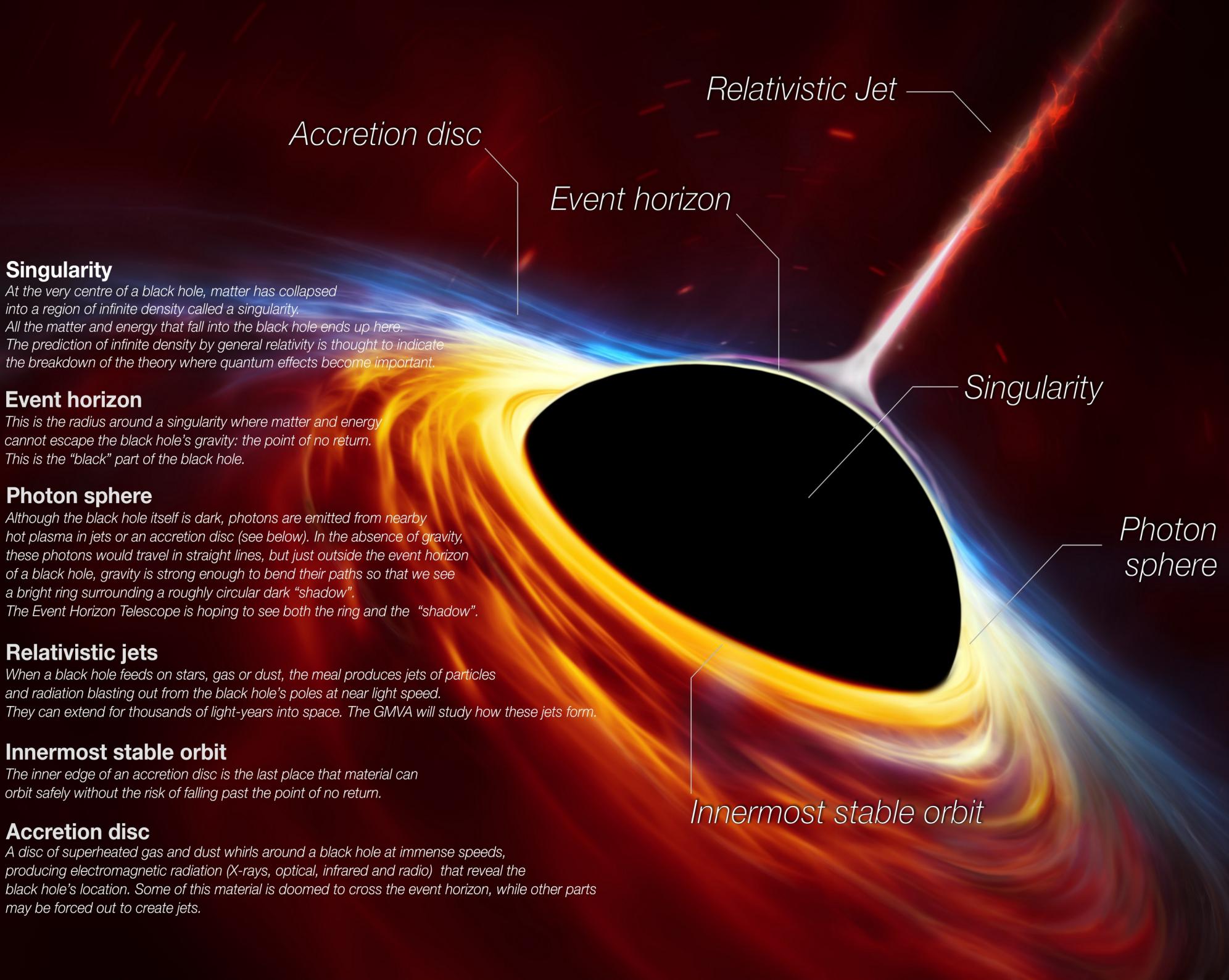


Un agujero negro realista



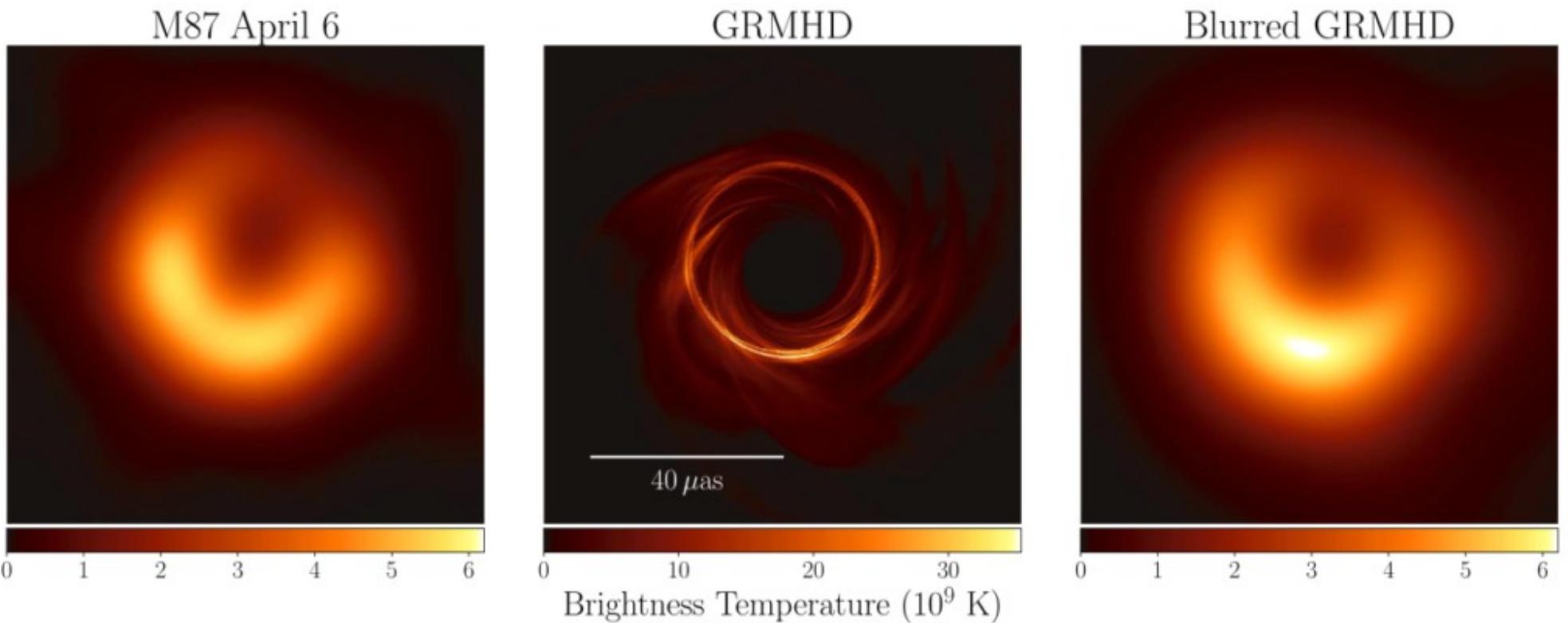
Detalles



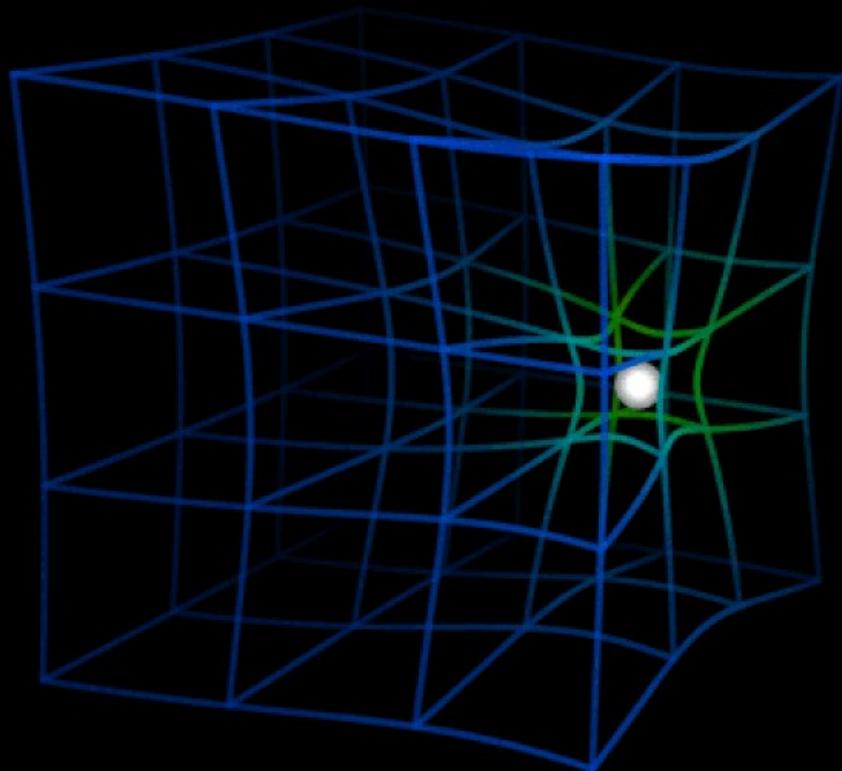


El agujero negro en central en M87 → M87*

Agujero negro supermasivo → $M \sim 7 \times 10^9 M_\odot$



Tensor de Einstein



lucasvb.tumblr.com

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

H. Asorey - Física IV B

84/84