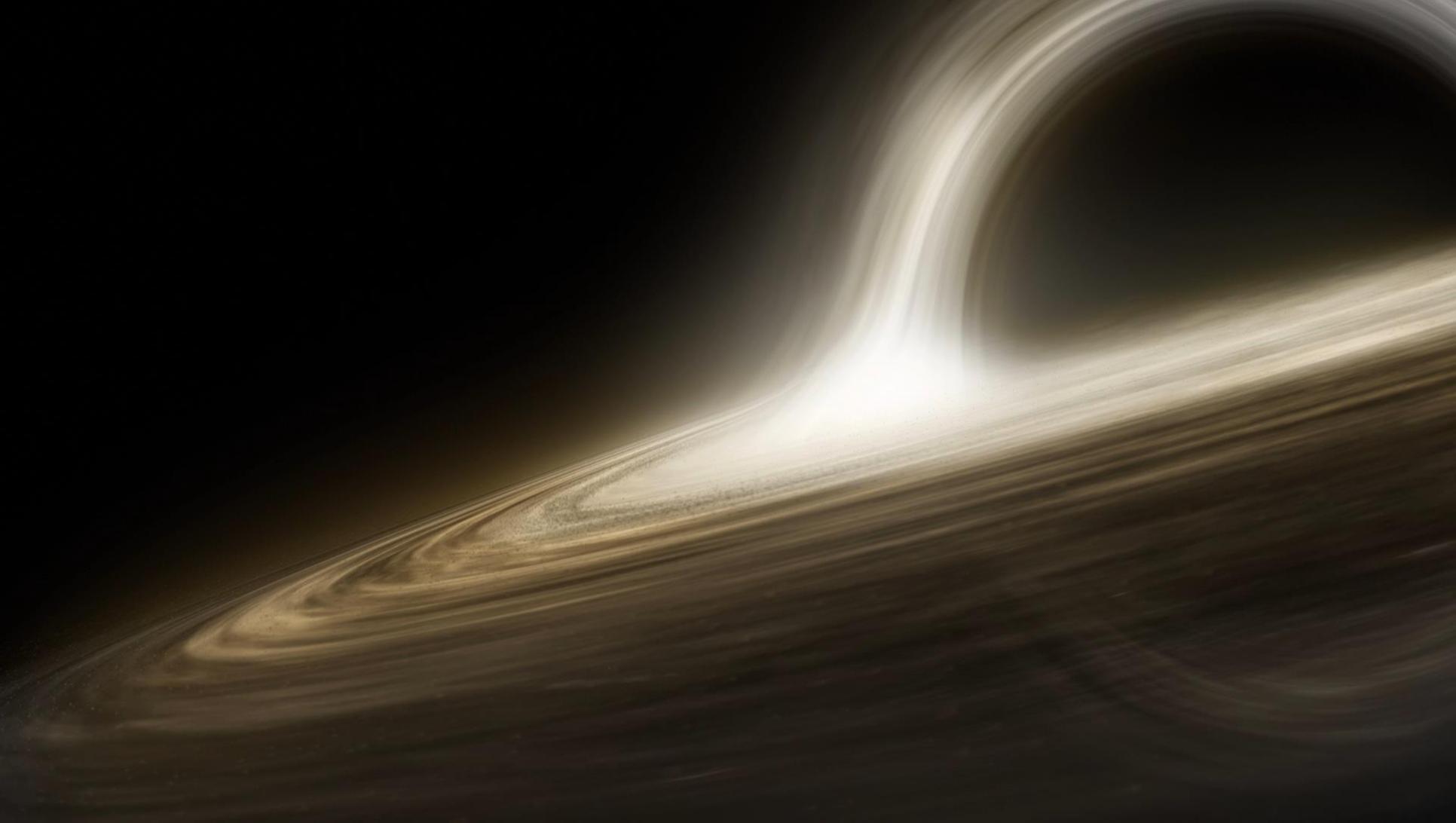
The background is a dark, textured space with two prominent, glowing, elliptical structures on the left and right sides. These structures have a bright, yellowish-white core that fades into a reddish-orange and then a dark blue outer ring. The overall appearance is reminiscent of a gravitational well or a pair of black holes. The text is centered over this background.

AGUJEROS NEGROS, RELATIVIDAD Y ONDAS GRAVITATORIAS





1. El porqué de los agujeros negros
2. Teoría de la Relatividad y AN
3. ¿Cómo se forman?
4. ¿Cómo se detectan?
5. Tipos de agujeros negros
6. Sus efectos...
7. Epílogo

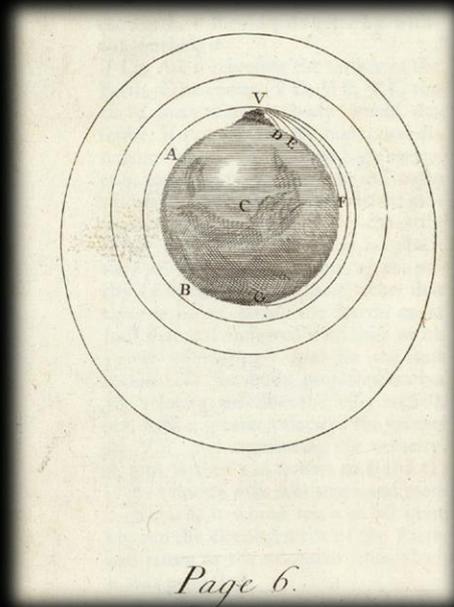
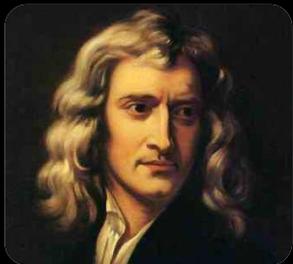
1. El porqué de los agujeros negros



1728

Isaac Newton

“Un Tratado del Sistema del Mundo”



1783

John Michell,
geólogo inglés, predijo:

“Si, como Newton ha propuesto, la luz fuese una corriente de partículas, éstas serían afectadas por la gravitación... la luz no podría escaparse de un cuerpo que tuviese la misma densidad que el Sol, pero con un radio 500 veces mayor.”

1796

Pierre Simon Laplace
hizo una predicción similar:



“En el cielo hay cuerpos oscuros tan grandes y numerosos como las estrellas mismas. Un astro luminoso de la misma densidad de la Tierra, con un diámetro doscientas veces mayor que el del Sol, no dejaría llegar, debido a su atracción, ninguno de sus rayos hasta nosotros. Es posible que los mayores cuerpos luminosos del Universo sean por ello invisibles”.

1915

Albert Einstein publica su *“Teoría General de la Relatividad”*



1916

Karl Schwarzschild encuentra una solución particular de la Relatividad General que conduce a agujeros negros.



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

El radio de Schwarzschild es el radio crítico para el cual un objeto de una cierta masa tiene una velocidad de escape igual a la velocidad de la luz.

1930

Subrahmanyan Chandrasekhar sugiere que una estrella puede llegar a colapsar y convertirse en algo extremadamente denso: una **enana blanca**.



1939

Robert Oppenheimer predice que las estrellas masivas, después de finalizar sus procesos termonucleares, pueden colapsar indefinidamente.

1963

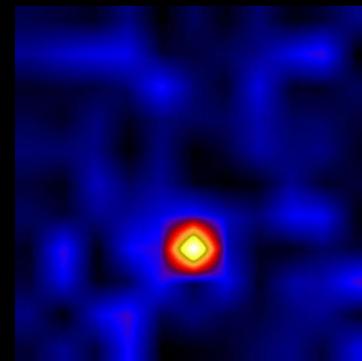


Roy Kerr describe el comportamiento teórico de un agujero negro en rotación.

Predice una rotación constante en velocidad, siendo la forma y el tamaño dependientes de la velocidad de rotación y de la masa del agujero y una relación directa entre la velocidad y el grado de deformación: a mayor velocidad, mayor deformación.

1964

Se descubre el primer “candidato” a agujero negro: **Cygnus X-1**

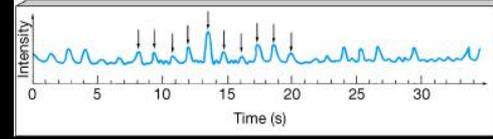


Una estrella supergigante azul brillante en el óptico y débil en rayos X orbita alrededor de un objeto invisible en el óptico, pero muy brillante y variable en rayos X.

1967

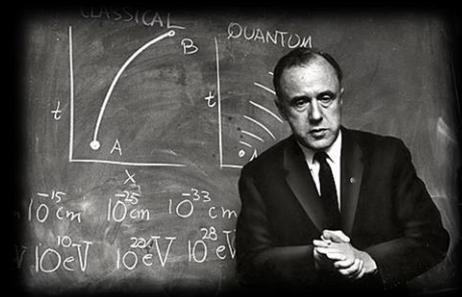
Jocelyn Bell descubre que algunos objetos celestes emiten pulsos de ondas de radio con precisa regularidad. Inicialmente se pensó en señales de alguna civilización extraterrestre ("*Little Green Men*").

Pero, al estudiar en detalle dichas ondas, se propuso que debían ser estrellas de neutrones en rotación y fue la primera evidencia de su existencia. Se les dio el nombre de **púlsares**.



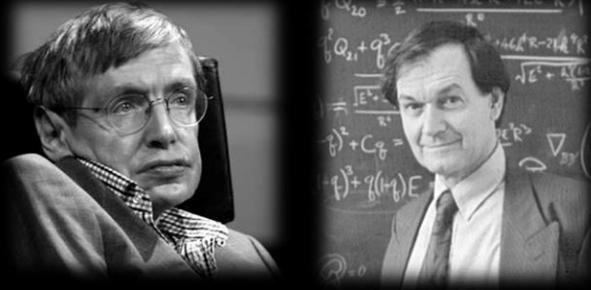
1969

John Wheeler, en una conferencia, acuña el término **agujero negro**.



1965-1970

Stephen Hawking y Roger Penrose demuestran que, dentro de un agujero negro, debe haber una singularidad de densidad y curvatura del espacio-tiempo infinitas.



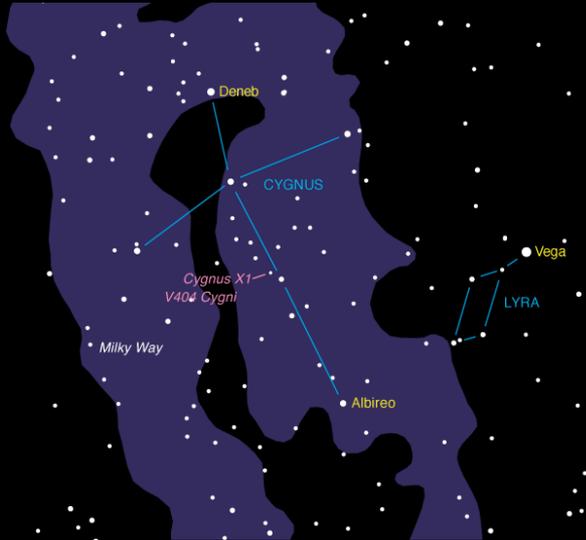
1974

Hawking considera los efectos cuánticos en los agujeros negros. Clásicamente, la luz y otras partículas no pueden escapar, los agujeros negros son negros. Pero, según la mecánica cuántica, los agujeros negros emiten radiación.

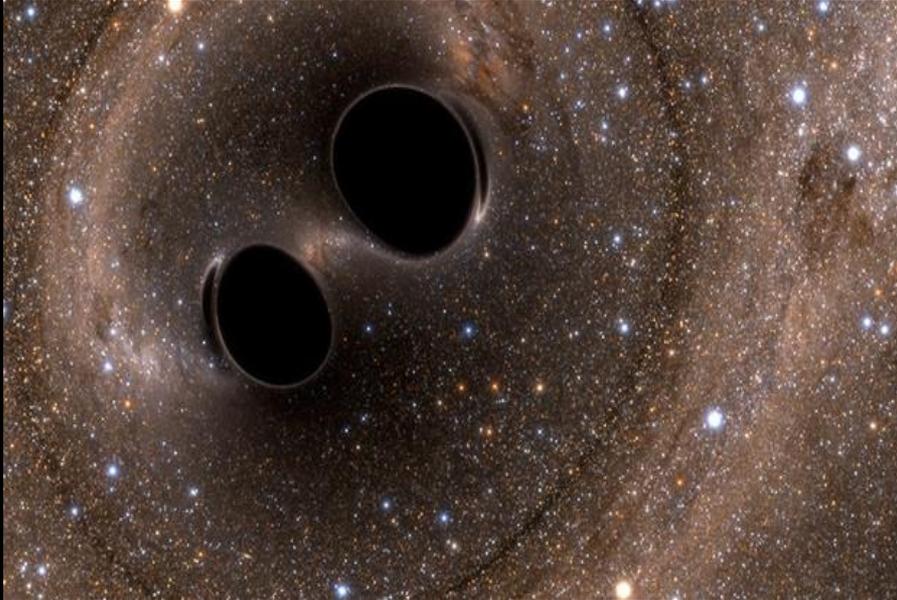
1992

Jorge Casares (Instituto de Astrofísica de Canarias) y sus colaboradores
“detectan” (¿de verdad?) el primer agujero negro:

V404 Cygnus

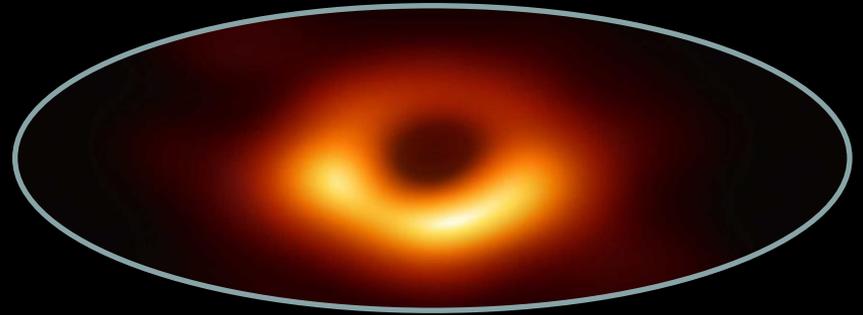


2016



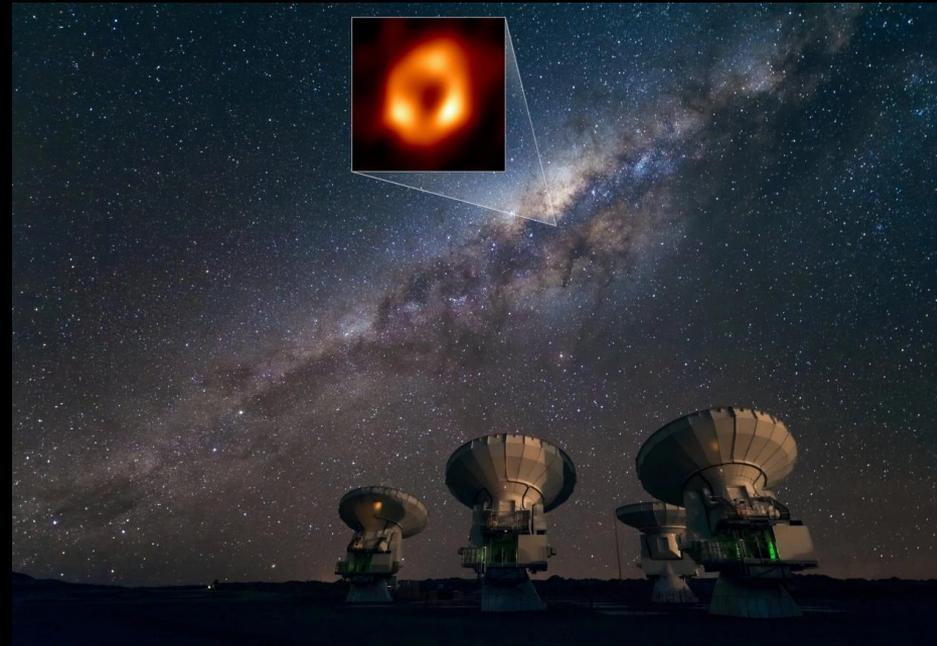
Se detectan ondas gravitatorias provenientes de la fusión de dos agujeros negros, una “verdadera prueba” directa de su existencia.

2019



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

2022



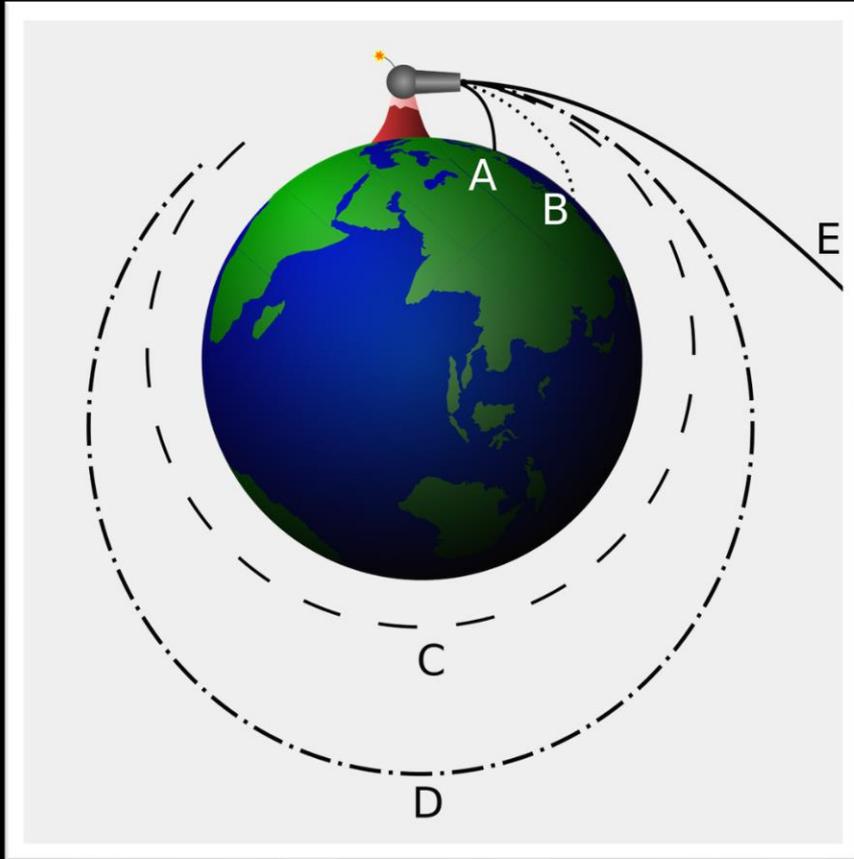
Se detecta la sombra del agujero negro del centro de la Vía Láctea.

2023



Se descubre el “fondo de ondas gravitatorias”

Velocidad de escape



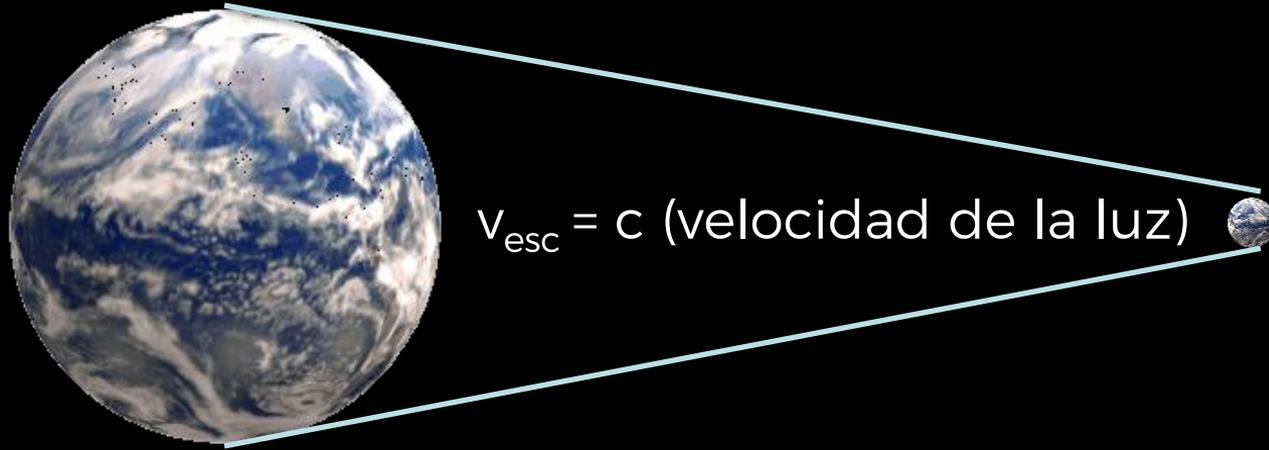
Velocidad mínima con la que debe lanzarse un cuerpo desde la superficie de un astro para que escape de su atracción.

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

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

¡¡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

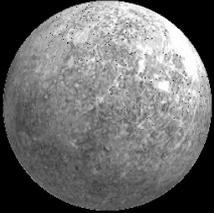
¡es un agujero negro!

Velocidades de escape típicas



Ceres

0.64 km/s



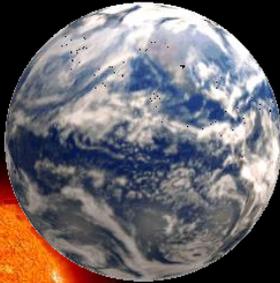
Luna

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

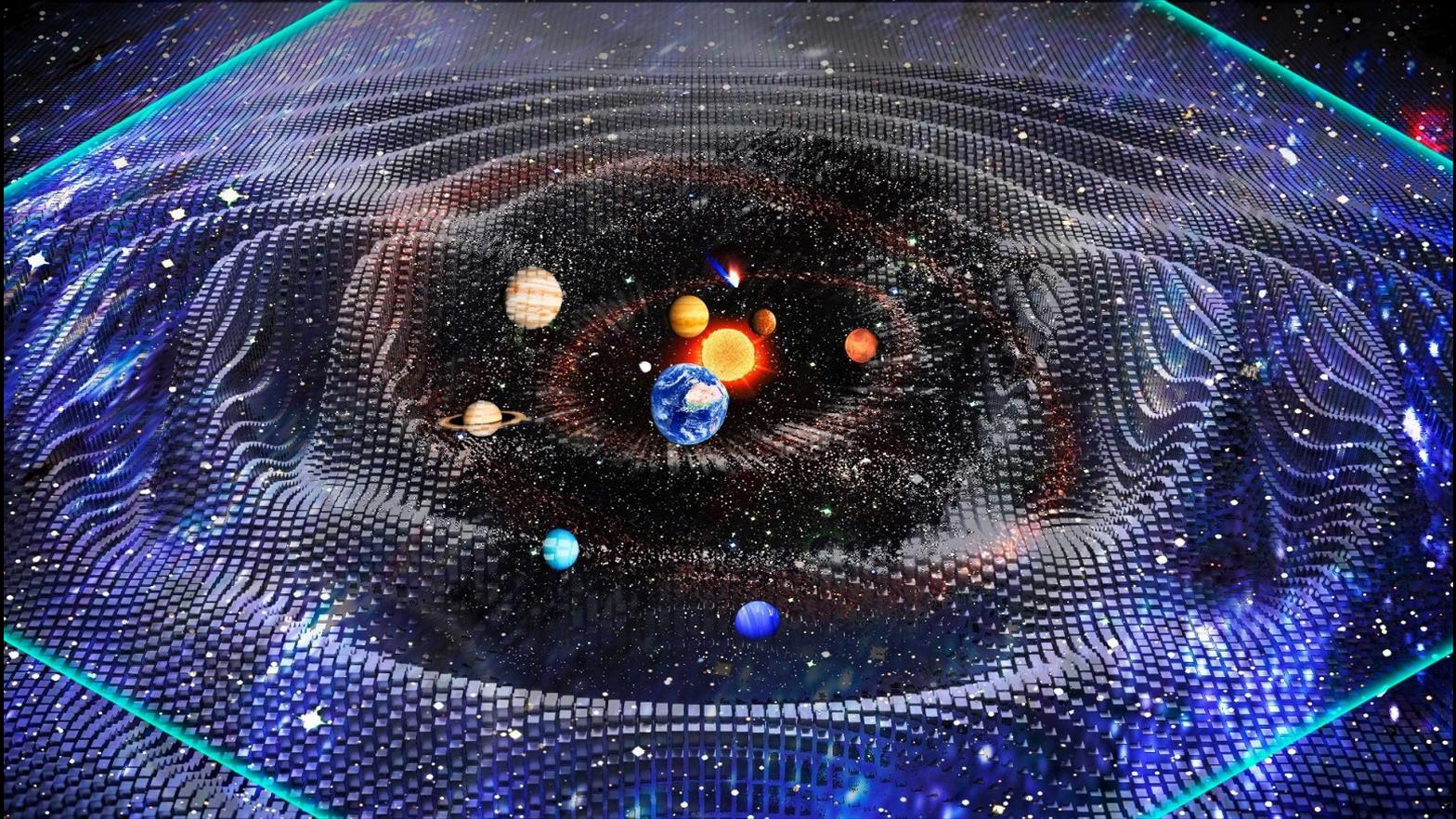
617.7 km/s

Agujero negro

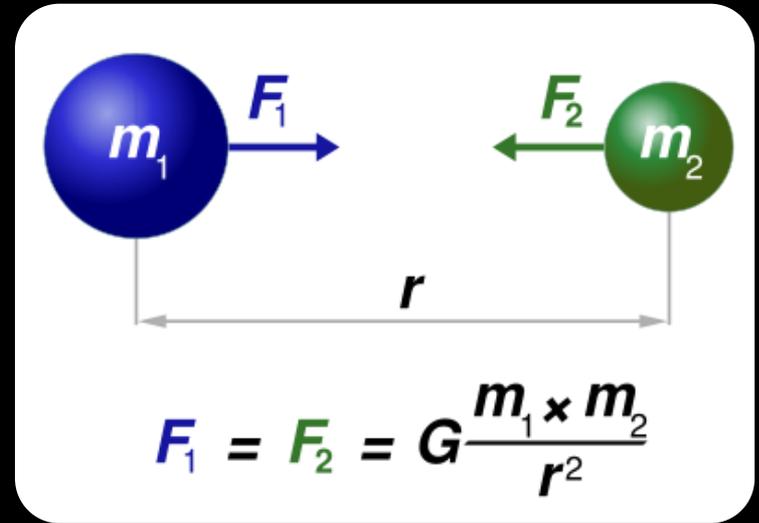
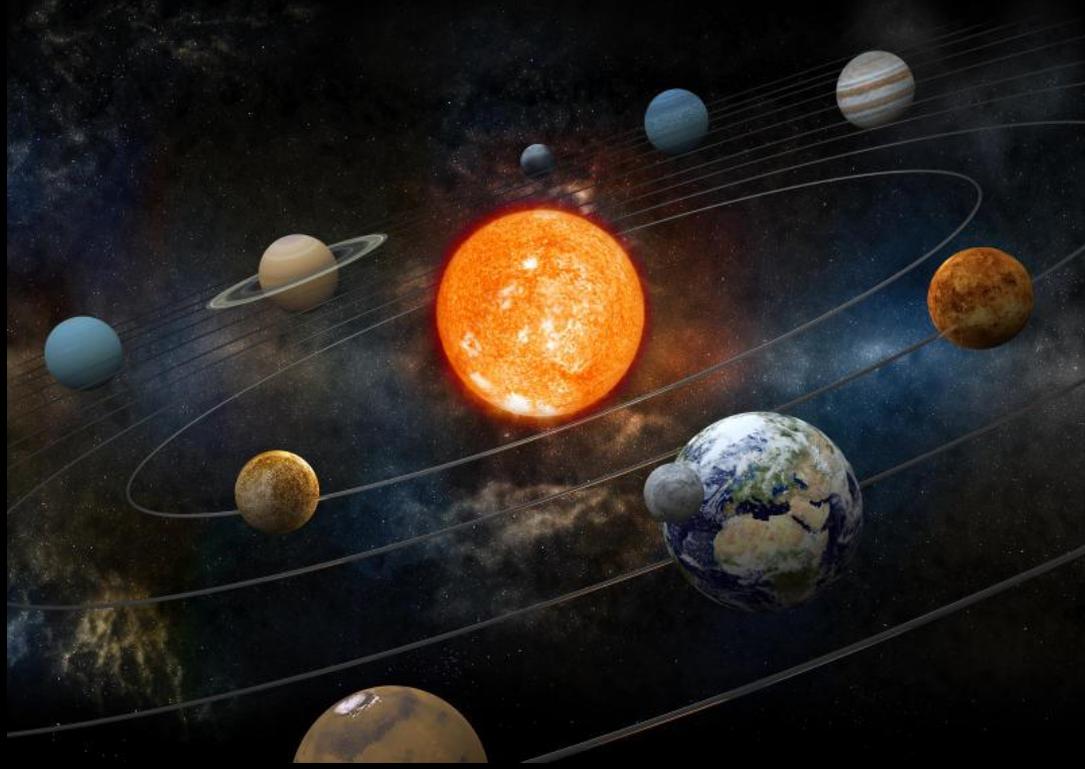
300 000 km/s



2. Teoría de la Relatividad y agujeros negros



La Gravitación Universal de Isaac Newton (1643-1727)

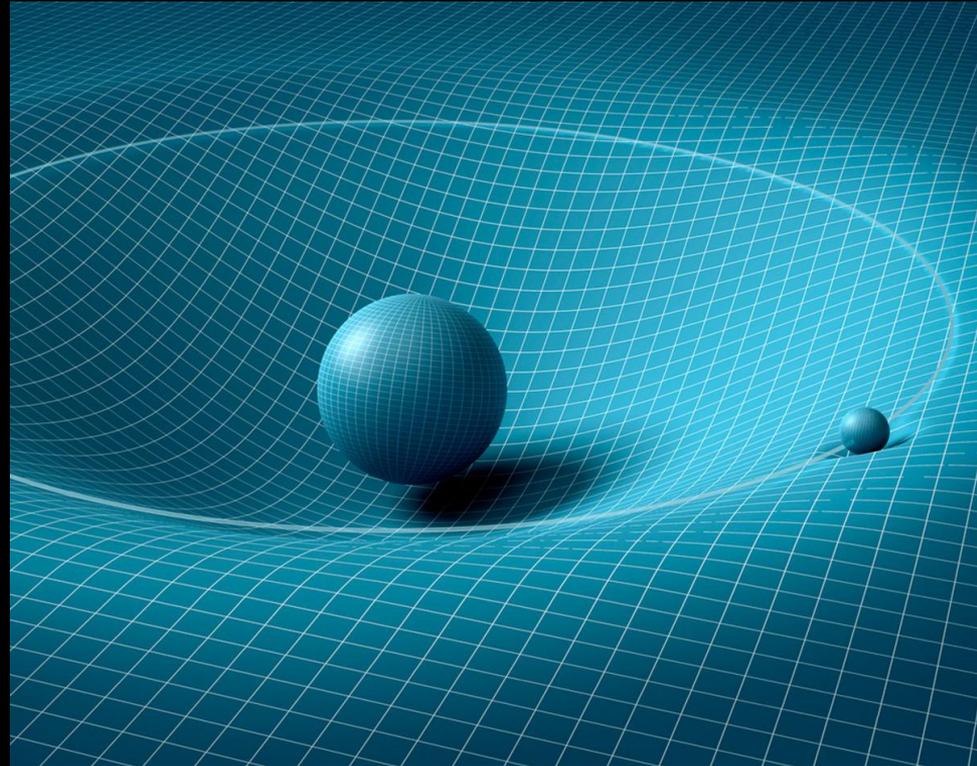


$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

La Relatividad General de Albert Einstein (1915)

La materia curva el espacio-tiempo

La curvatura indica cómo se ha de mover la materia



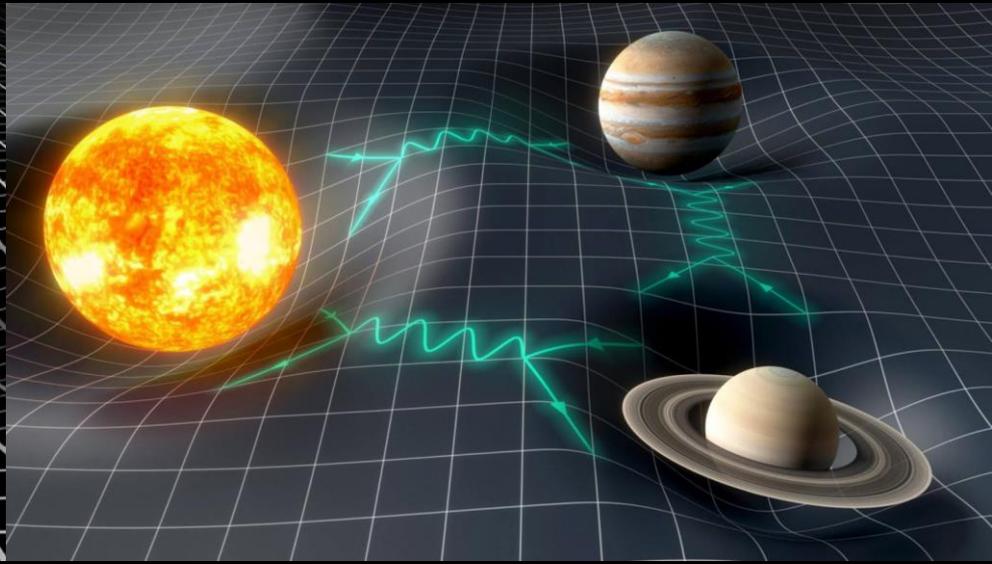
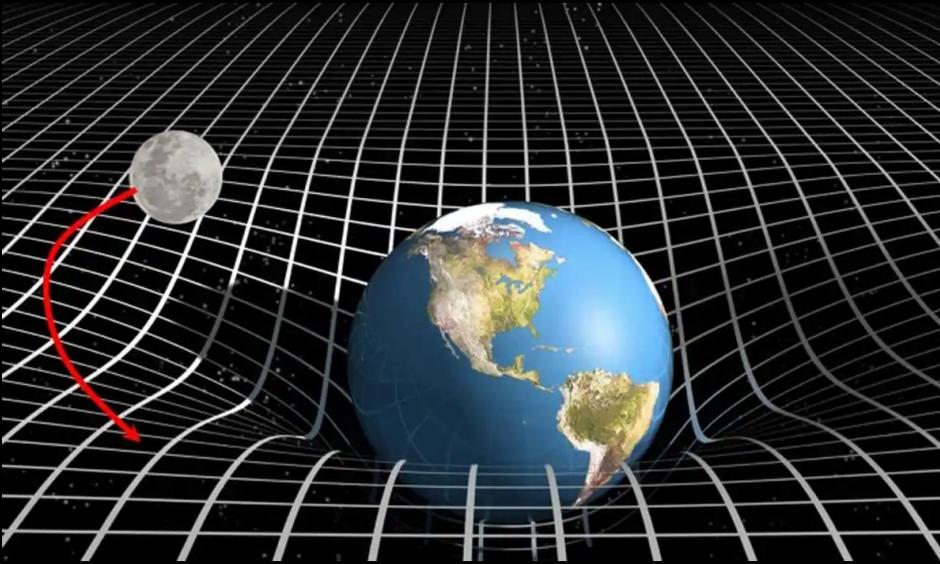
Para Newton espacio, tiempo y materia son absolutos
(no dependen del punto de vista del observador)



Para Einstein espacio, tiempo y materia-energía son
relativos (dependen del sistema de referencia)

El tiempo aparece como cuarta dimensión

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

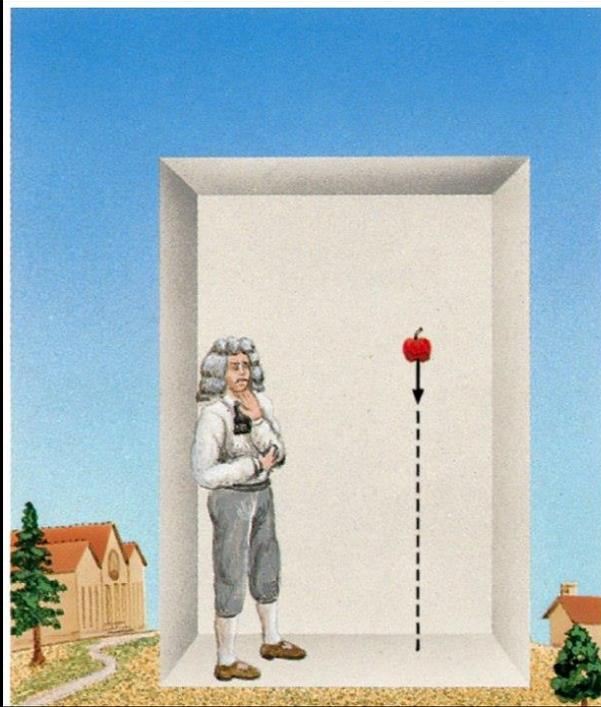


Einstein vió que la gravitación newtoniana debía ser modificada.
En 1912 se le ocurrió, '*la idea más feliz de su vida*':

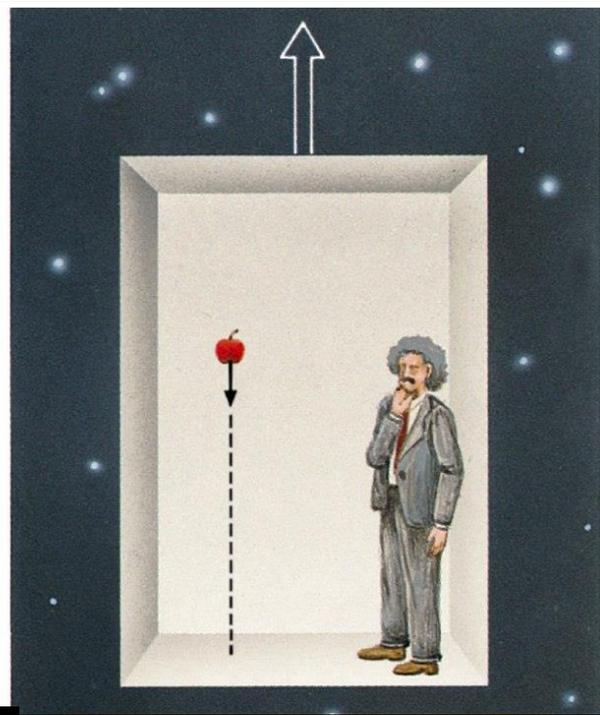
“Un objeto en caída libre NO experimenta la acción de la gravedad”.

Principio de equivalencia aceleración-gravedad:

“Los efectos físicos de una aceleración y de un campo gravitatorio son equivalentes e indistinguibles”



En un compartimento en reposo en el campo gravitatorio terrestre, la manzana llega al suelo porque la gravedad de la Tierra acelera hacia abajo a la manzana.



Si el compartimento se mueve con una aceleración en un espacio sin gravedad, la manzana llega al suelo porque el compartimento se mueve aceleradamente hacia arriba.

Ley de gravitación
universal de Newton

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

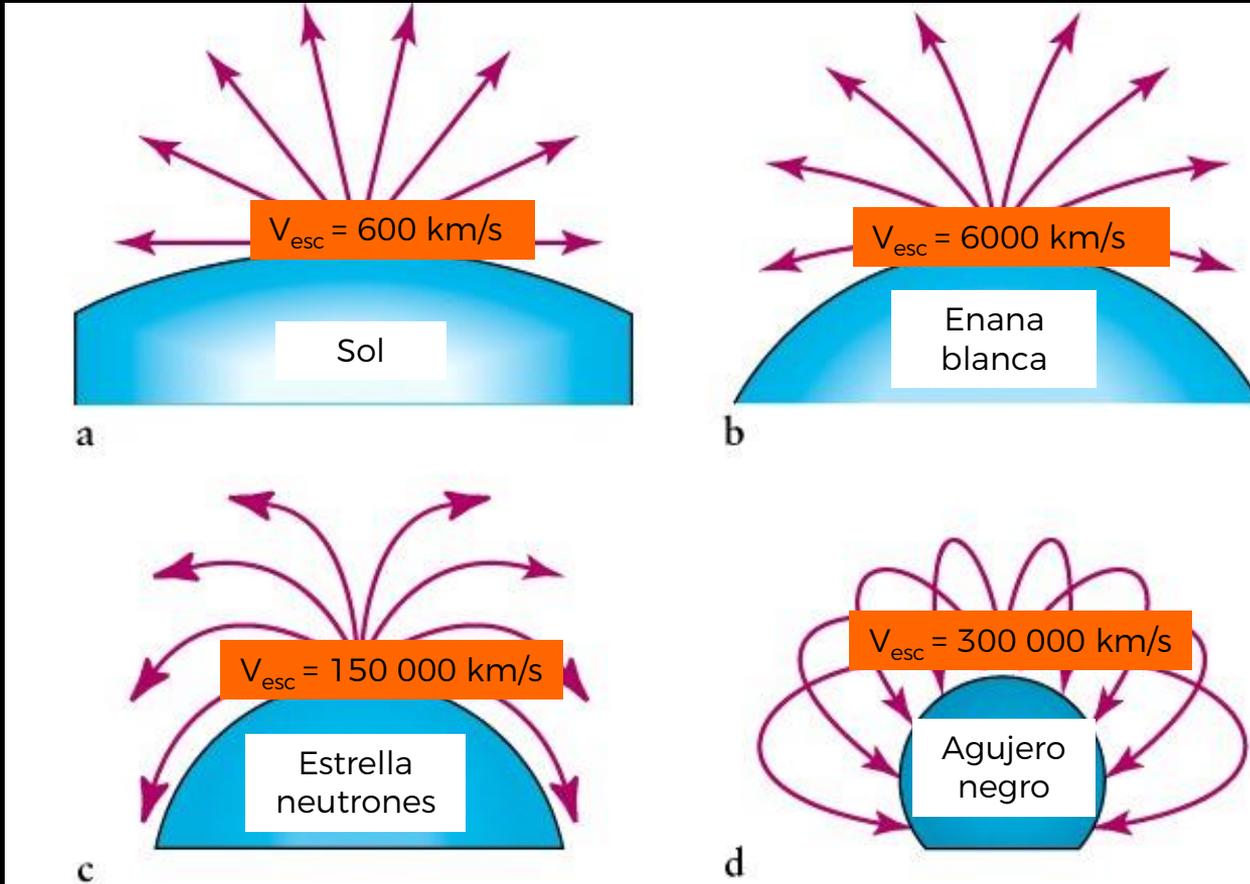
La Relatividad General explica la gravedad
como la curvatura del espacio-tiempo

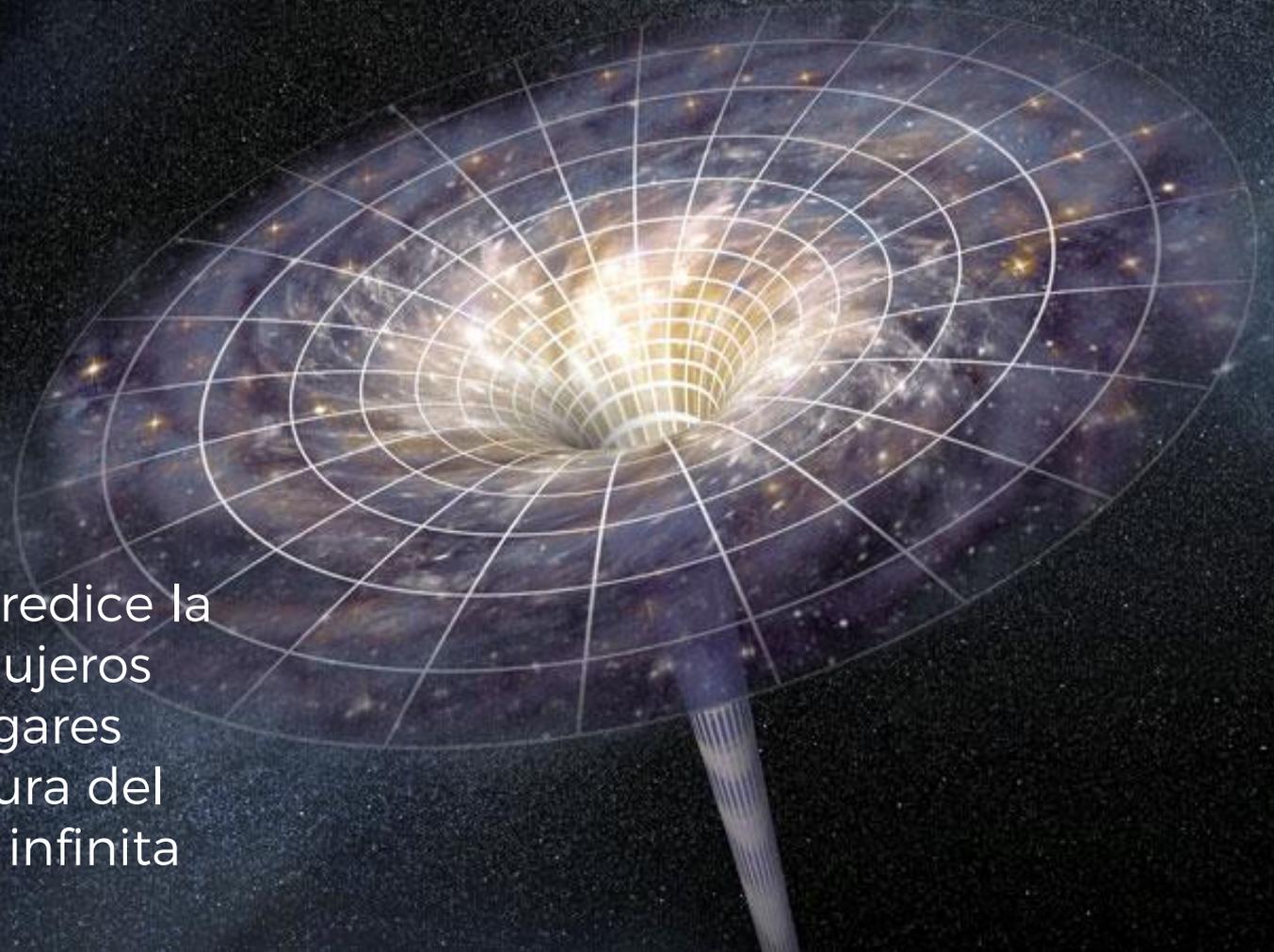
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Curvatura = Densidad
de energía

Ecuación de
campo de Einstein

Una misma masa comprimida en un volumen cada vez menor, llega un momento en que ni siquiera la luz curva por la fuerte gravedad, puede escapar.





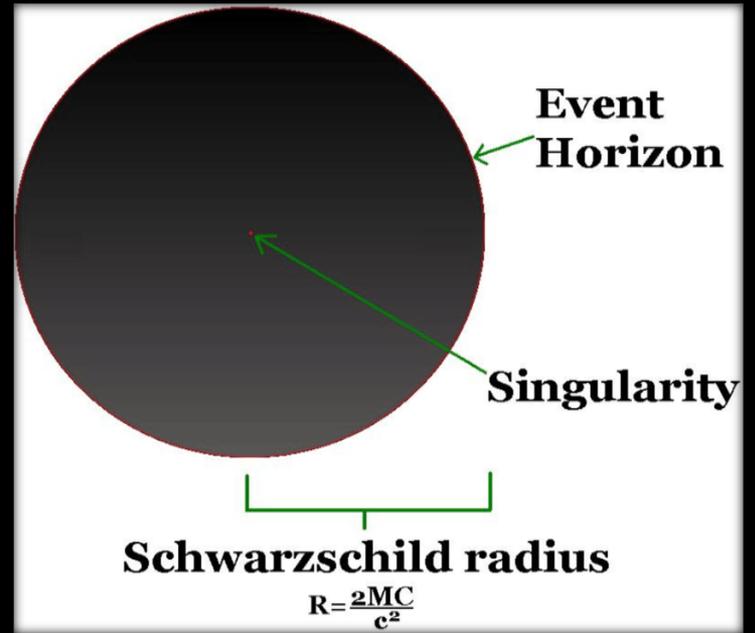
La Relatividad predice la existencia de agujeros negros como lugares donde la curvatura del espacio se hace infinita

¿Qué tamaño tiene un agujero negro?

Todo lo que suceda dentro de una esfera de radio igual al radio de Schwarzschild no puede ser vista 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

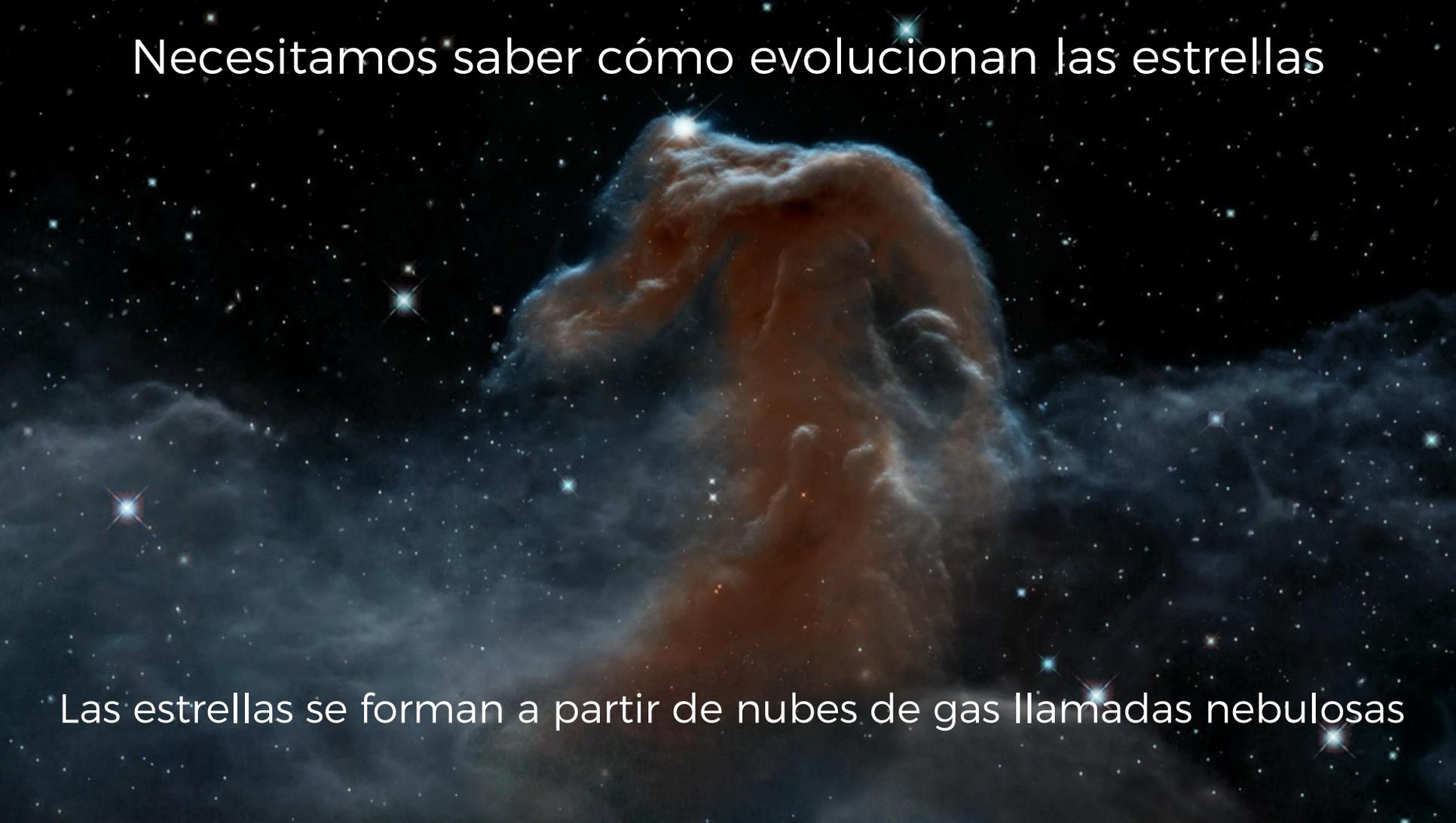
Objeto	Masa (masas solares)	Radio (km)	Velocidad de escape (km/seg)	Radio de Schwarzschild
Tierra	0,00000304	6357	11,3	9 mm
Sol	1	696.000	617	2,95 km
Enana blanca	0,8	10.000	5.000	2,4 km
Estrella de neutrones	2	8	250.000	5,9 km
Núcleo de galaxia	50.000.000	?	?	147.500.000 km

3. ¿Cómo se forman?



Necesitamos saber cómo evolucionan las estrellas

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

A large, glowing orange and red nebula in space, surrounded by numerous stars. The nebula has a complex, irregular shape with various filaments and clumps. The background is a dark, deep blue space filled with many small, bright stars of varying colors and sizes. The overall scene is a beautiful representation of a star-forming region.

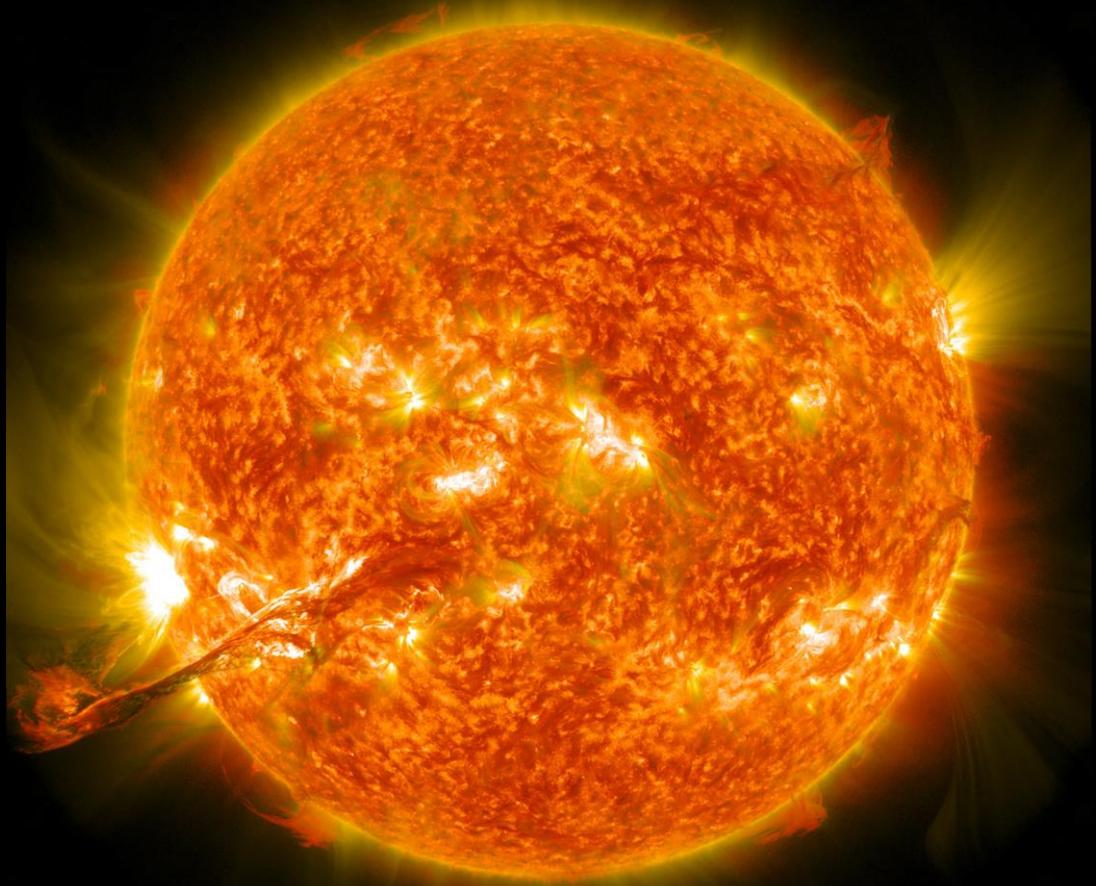
El Sol actual

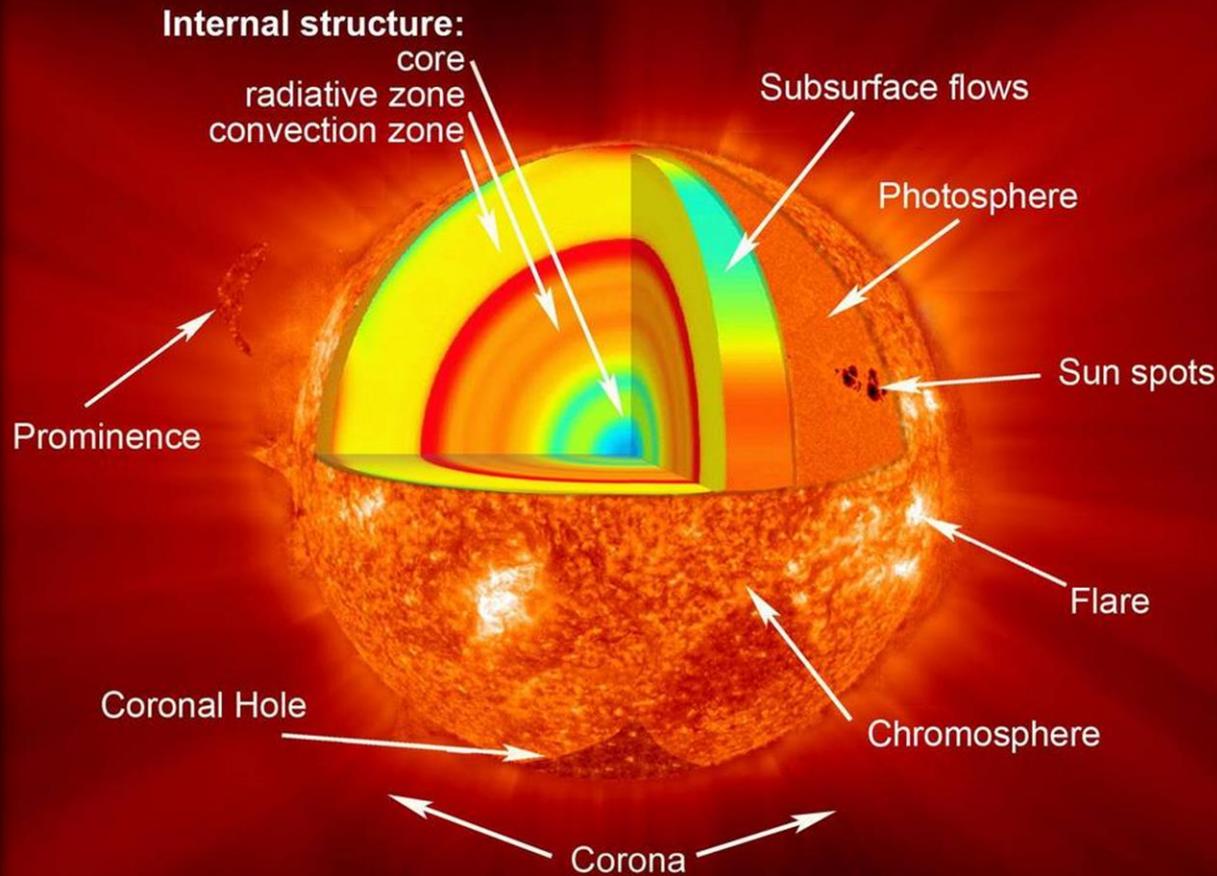
Hidrógeno: 73.4 %

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

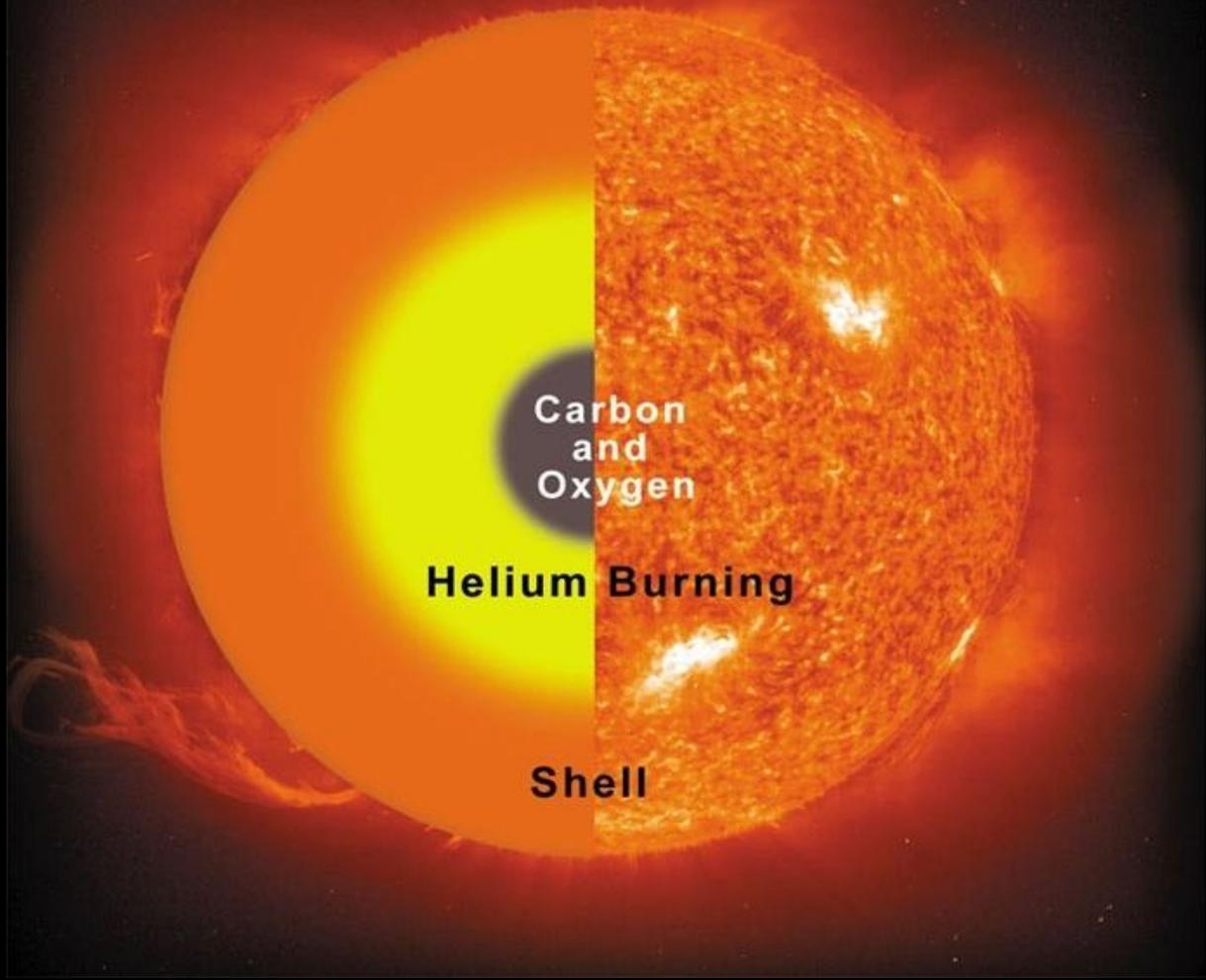
Cada segunda quema unos 4 millones de toneladas de hidrógeno

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



Futuro del Sol

Gigante roja



Enanas blancas



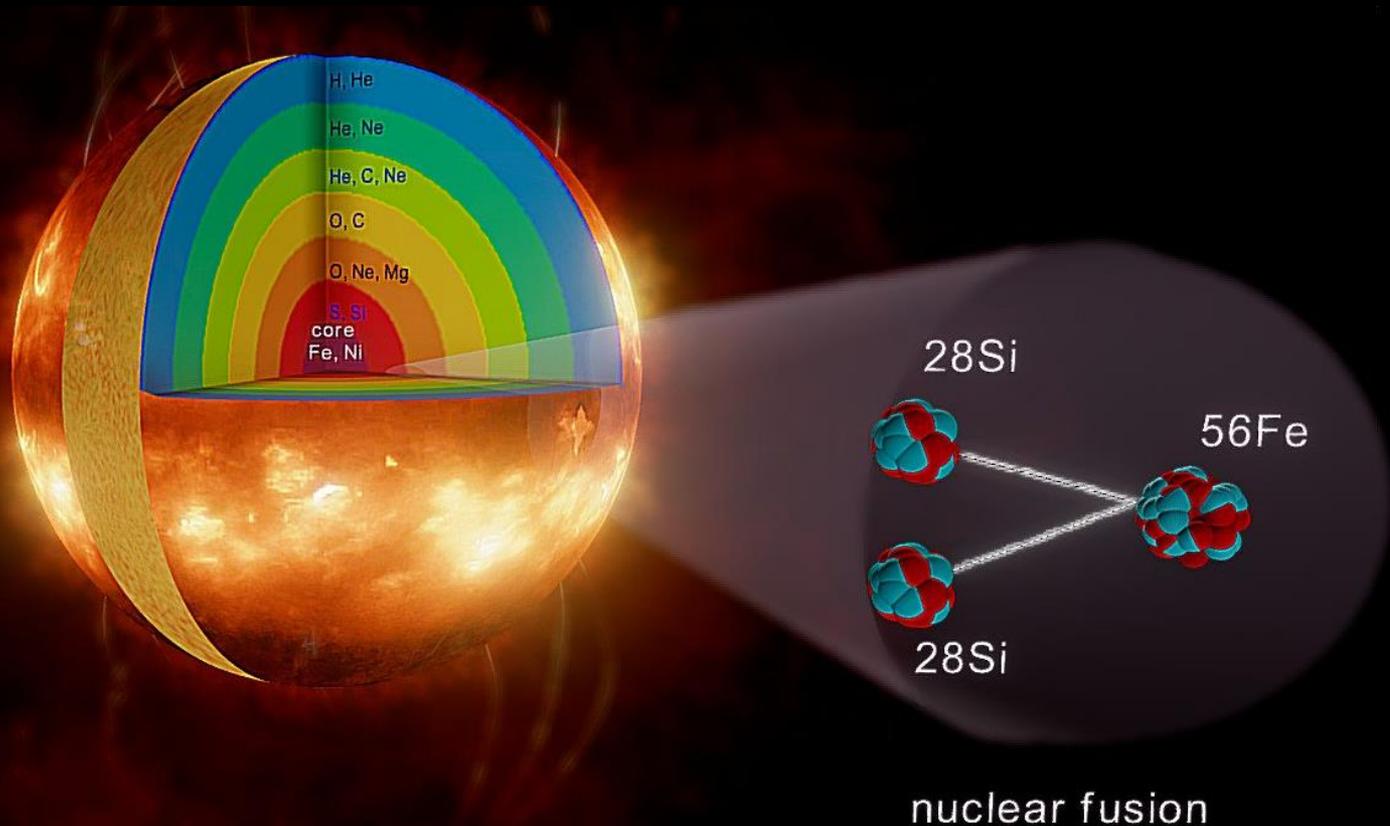
¡1 cucharada pesa
1 tonelada!

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

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

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

¿Qué sucede con las estrellas más masivas?



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 20 km, pero con una densidad de decenas de millones de toneladas por cm^3

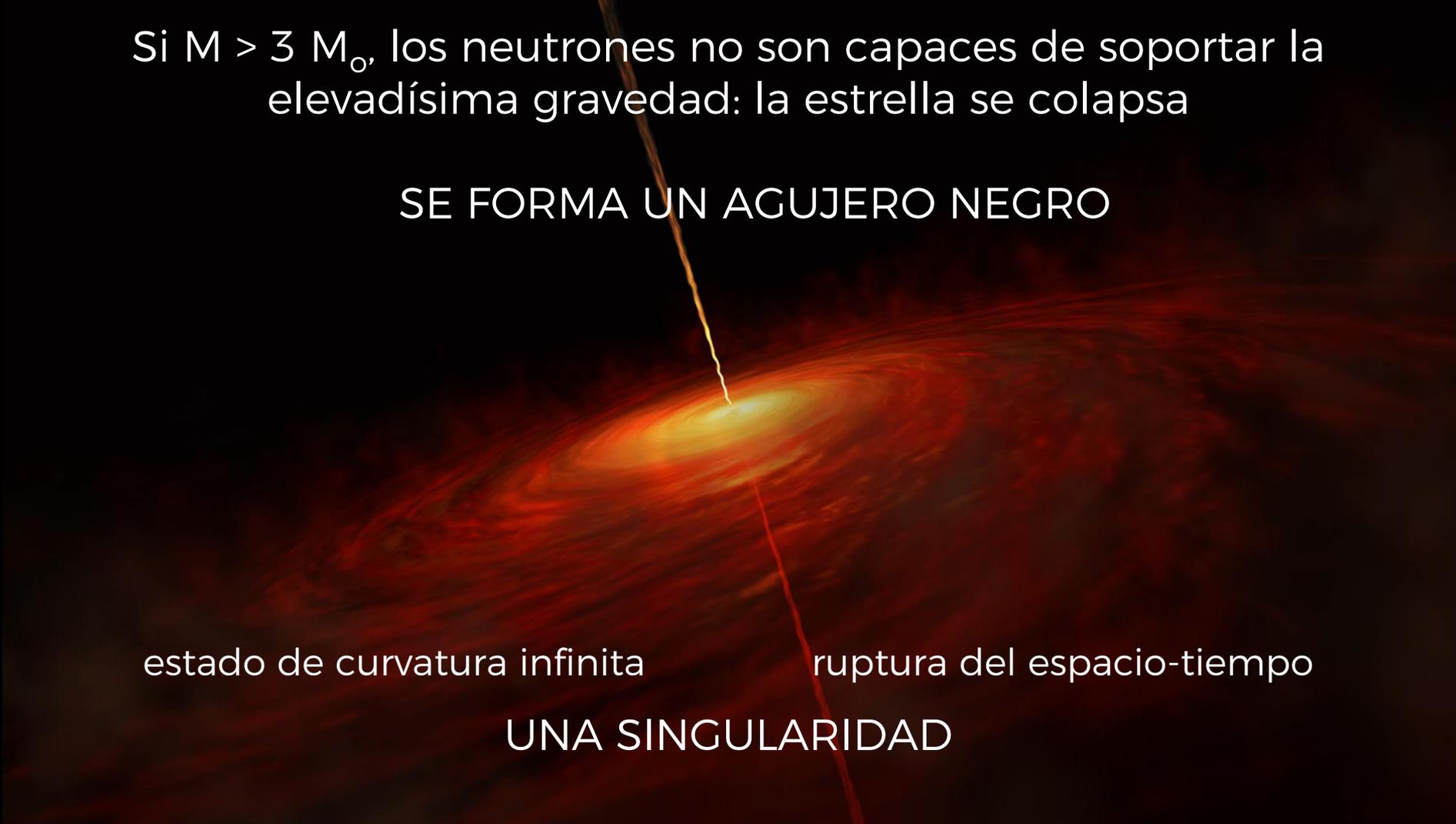
Si $M > 3 M_{\odot}$, los neutrones no son capaces de soportar la elevadísima gravedad: la estrella se colapsa

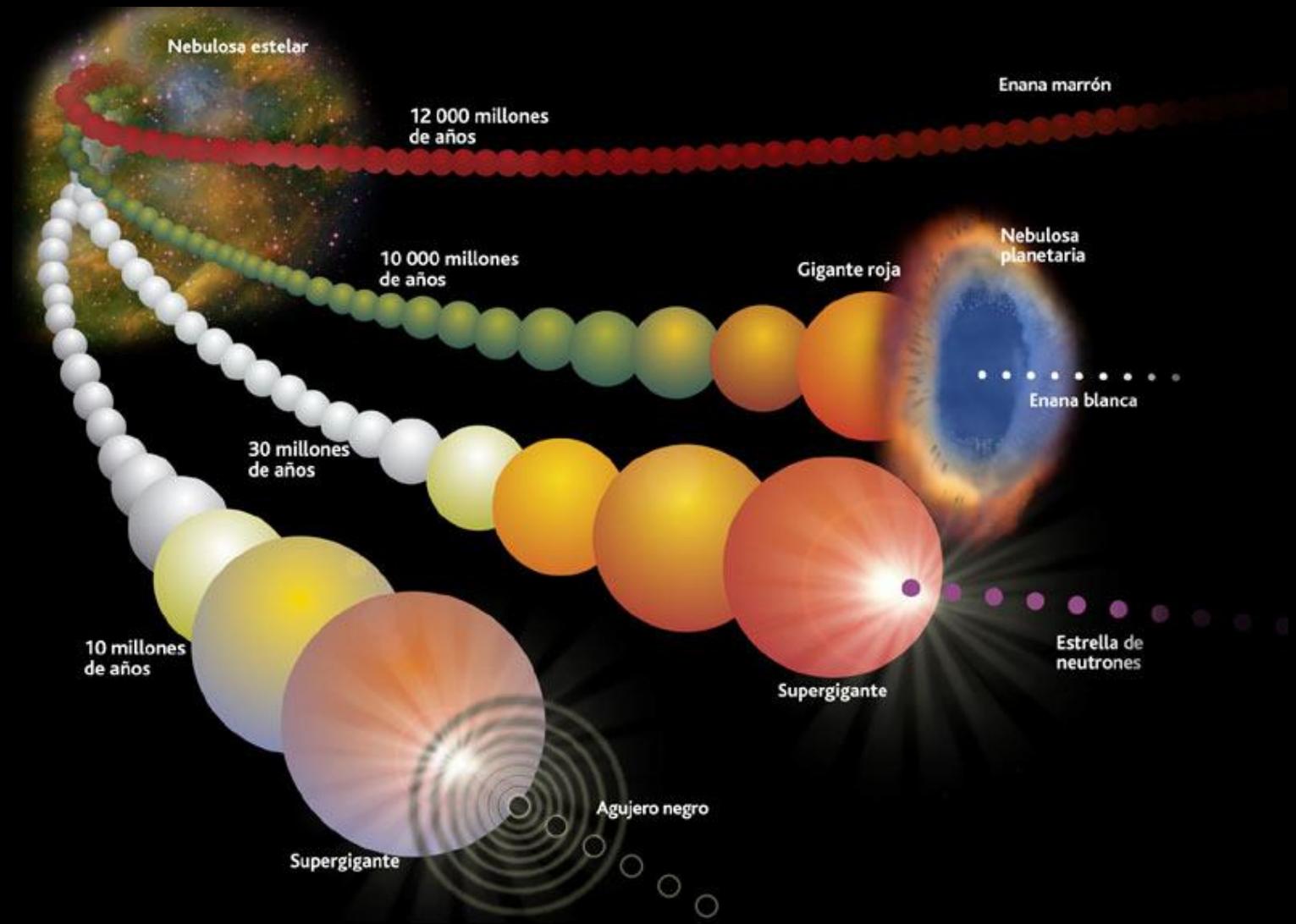
SE FORMA UN AGUJERO NEGRO

estado de curvatura infinita

ruptura del espacio-tiempo

UNA SINGULARIDAD



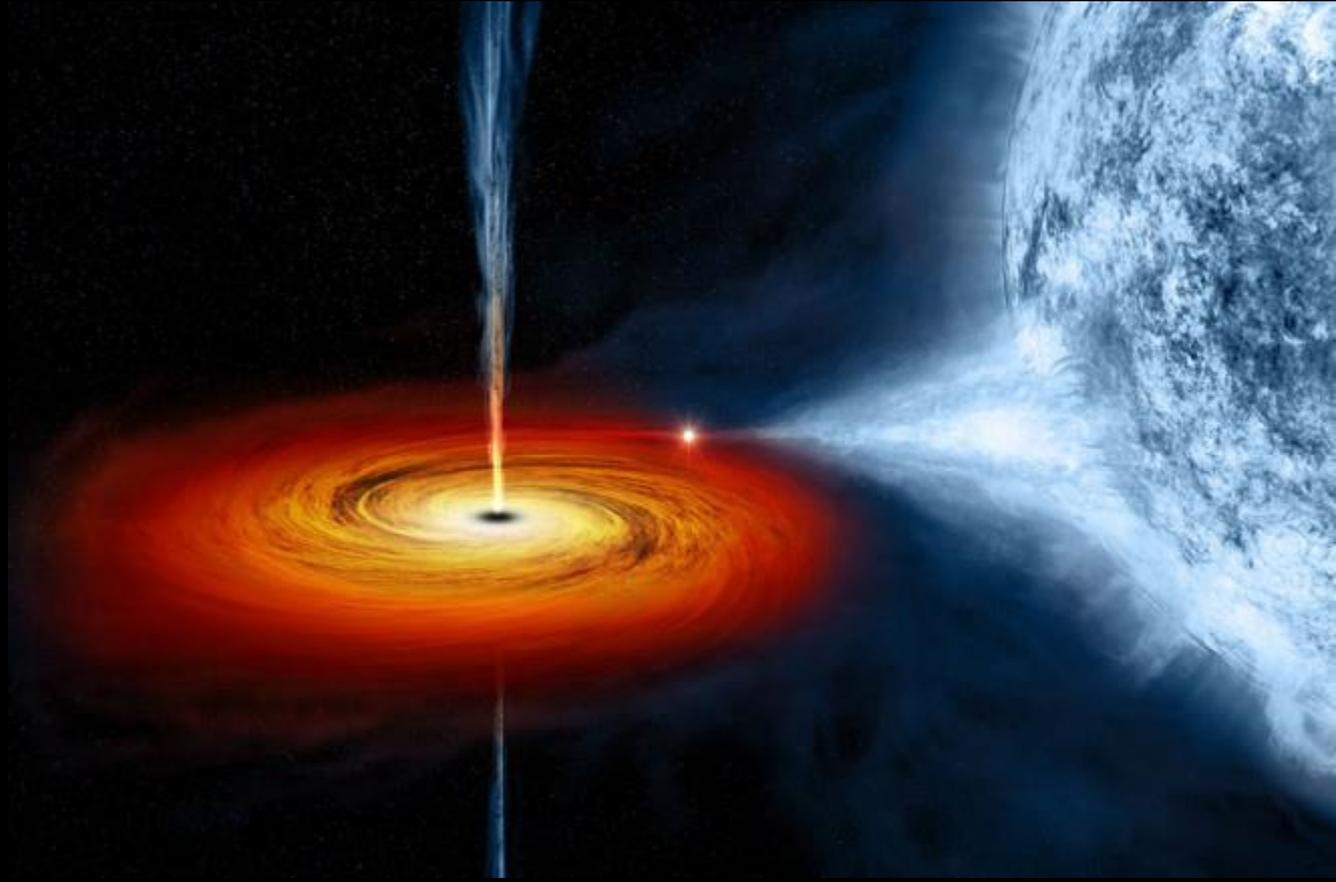


$< 8 M_{\odot}$	masa inicial (8-25) M_{\odot}	$> (20-25) M_{\odot}$
$< 1.4 M_{\odot}$	masa final (1.4 - 3) M_{\odot}	$> 3 M_{\odot}$
enana blanca	estrella de neutrones	agujero negro estelar
		

Sólo las estrellas muy masivas pueden convertirse en agujeros negros

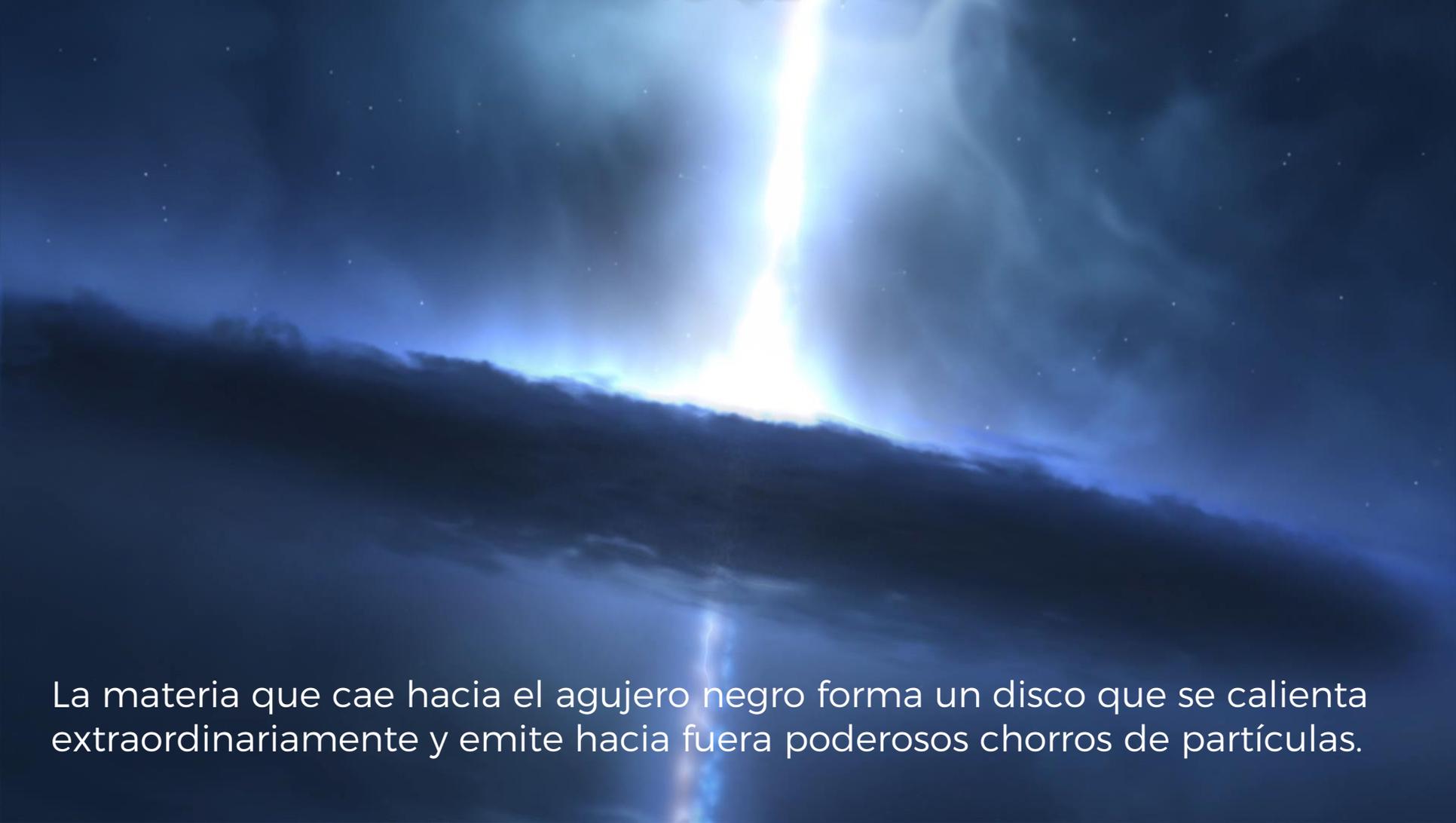
4. ¿Cómo se detectan?

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

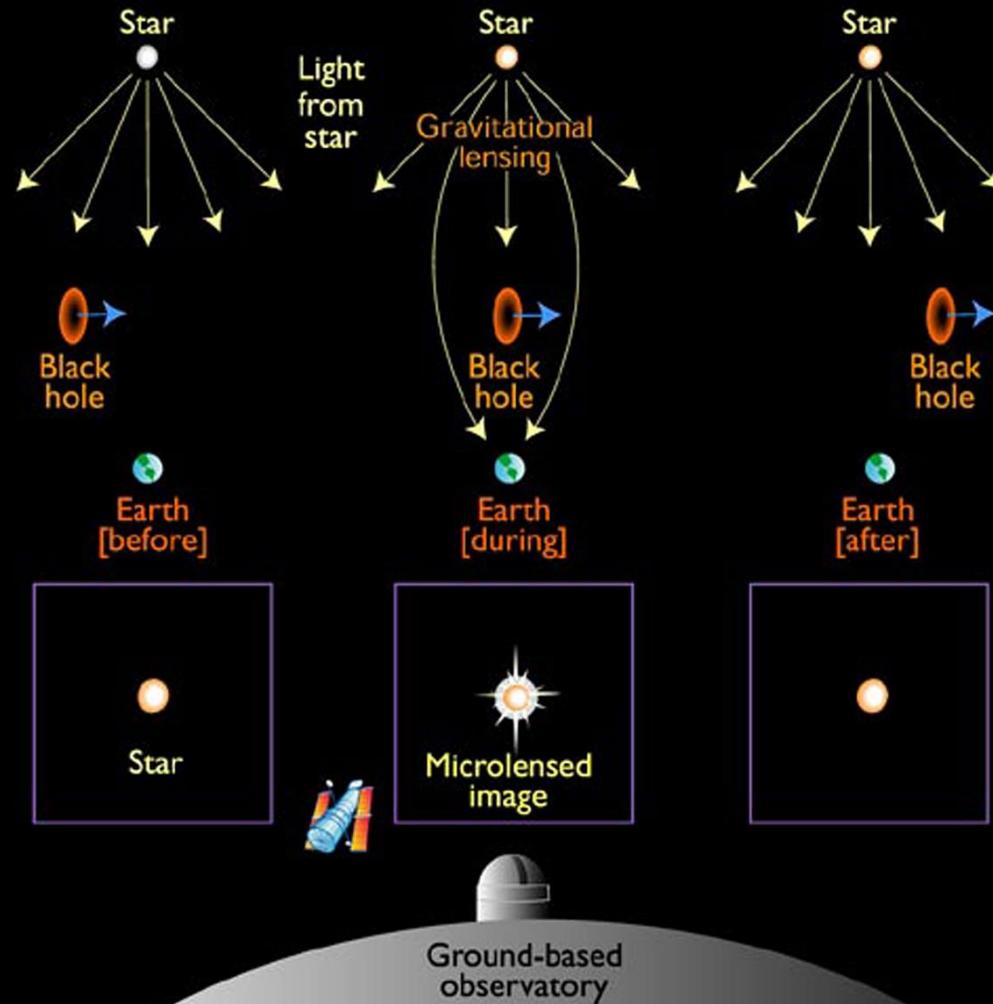


Los agujeros negros capturan el material estelar cercano que se calienta hasta temperaturas de millones de grados y emite rayos X

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



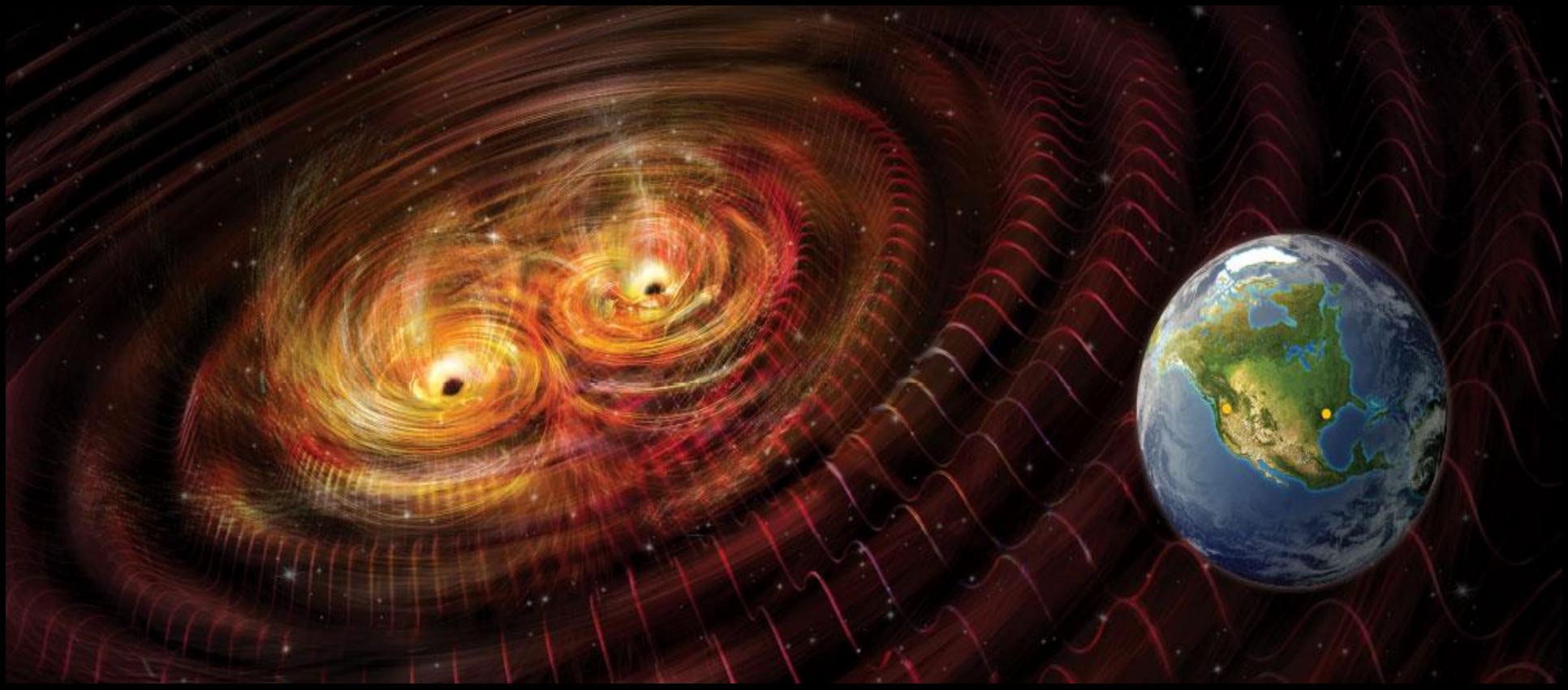
La materia que cae hacia el agujero negro forma un disco que se calienta extraordinariamente y emite hacia fuera poderosos chorros de partículas.



La Relatividad proporciona otras formas de detectar agujeros negros

La primera es a través de las microlentes gravitatorias

La segunda es a partir de las ONDAS DE GRAVEDAD predichas por el propio Einstein en 1916.



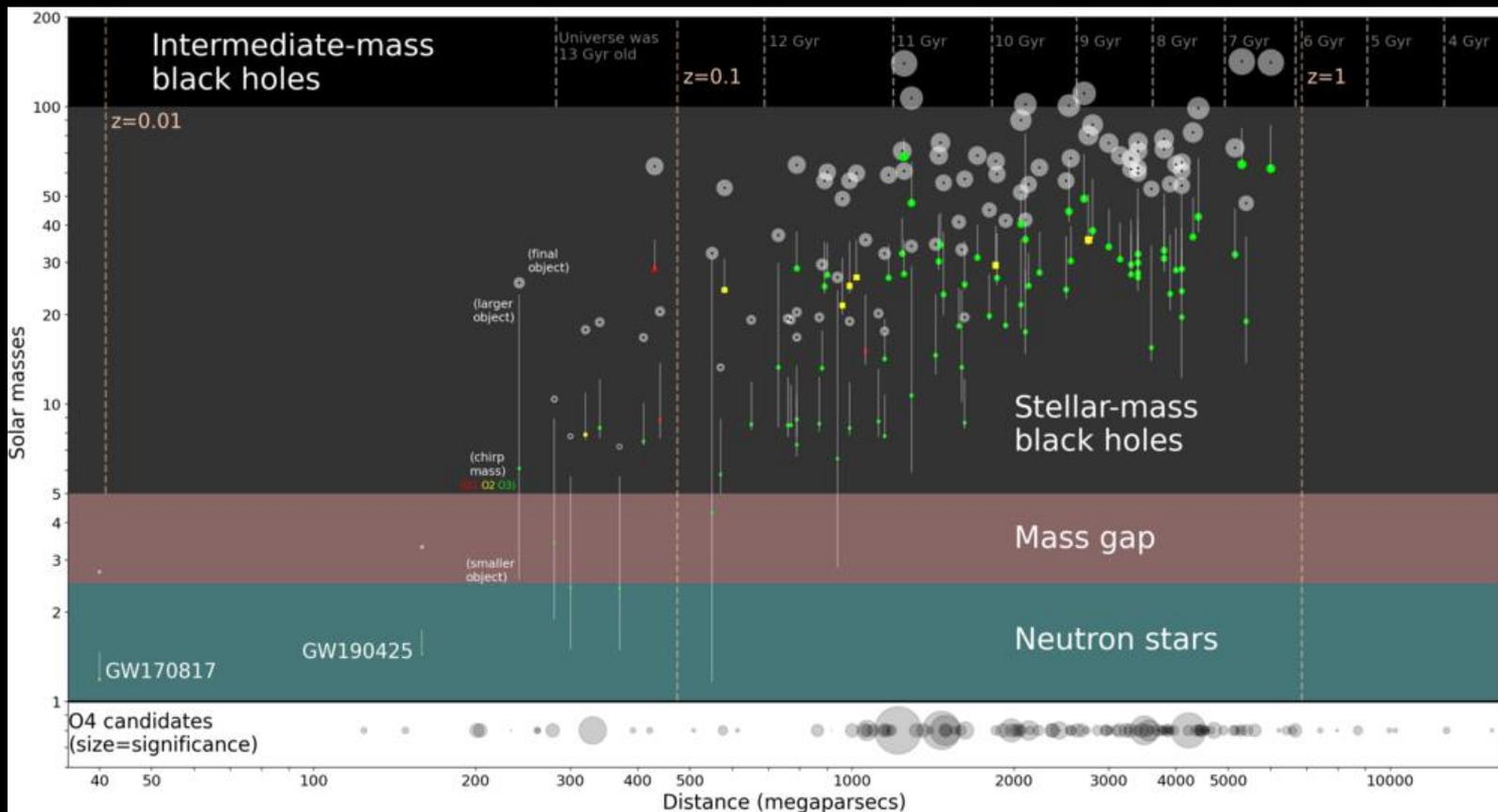
En 2015, a unos 1300 millones de años luz de nosotros, se observó cómo dos agujeros negros con masas 36 y 29 veces mayores que la de nuestro Sol colisionaron, fundiéndose en uno solo de 62 masas solares.

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

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



Se han detectado más de 100 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.



5. Tipos de agujeros negros



Hasta ahora hemos hablado de agujeros negros estelares. Pero hay otros tipos...



Miniature

Also called micro black holes are hypothetical tiny black holes



Stellar

They have masses ranging from about 5 to several tens of solar masses.



Intermediate

They have masses ranging from 10^2 to 10^5 solar masses

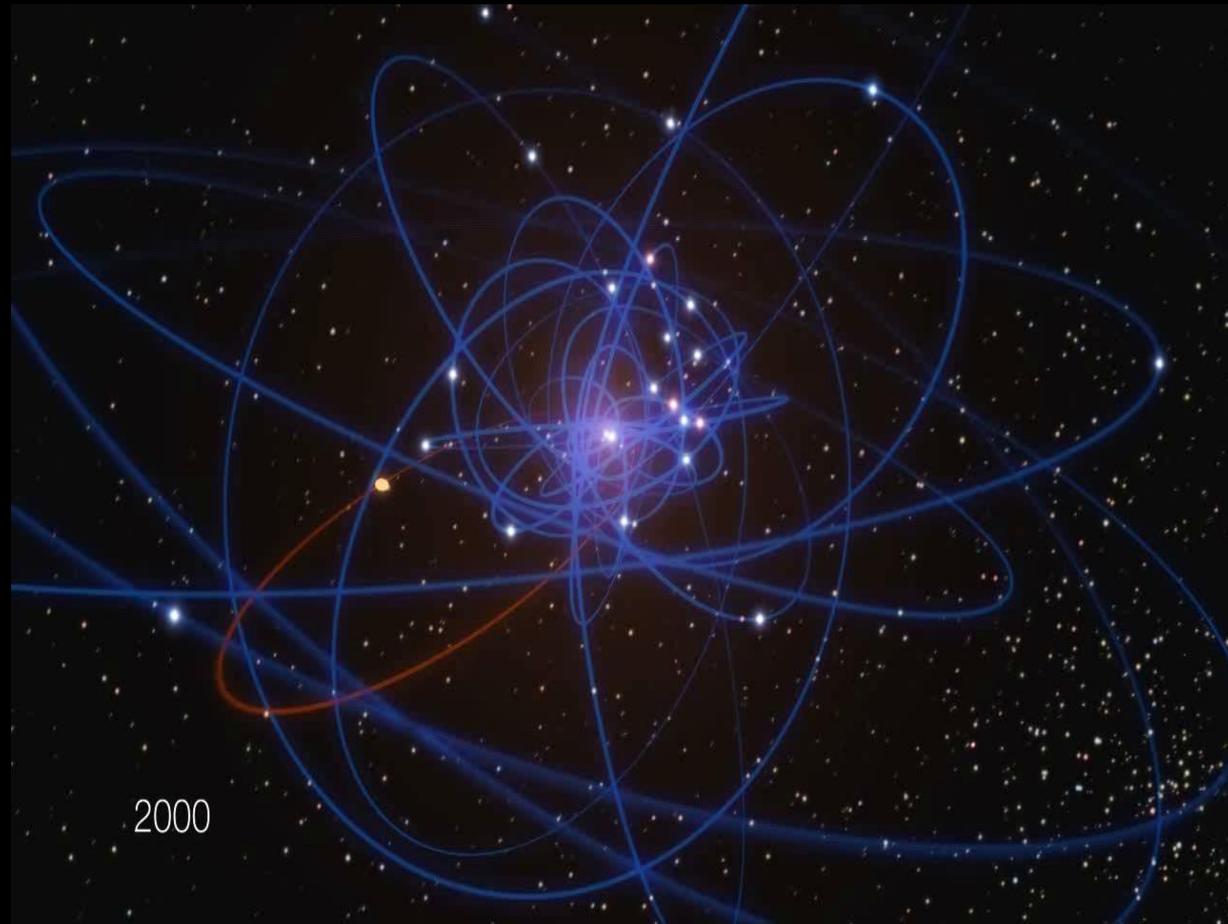


Supermassive

These are the largest of black holes, being millions to billions times more massive than the Sun.

En luz visible el centro galáctico está fuertemente oscurecido por nubes de polvo y gas (una extinción de 30 magnitudes)

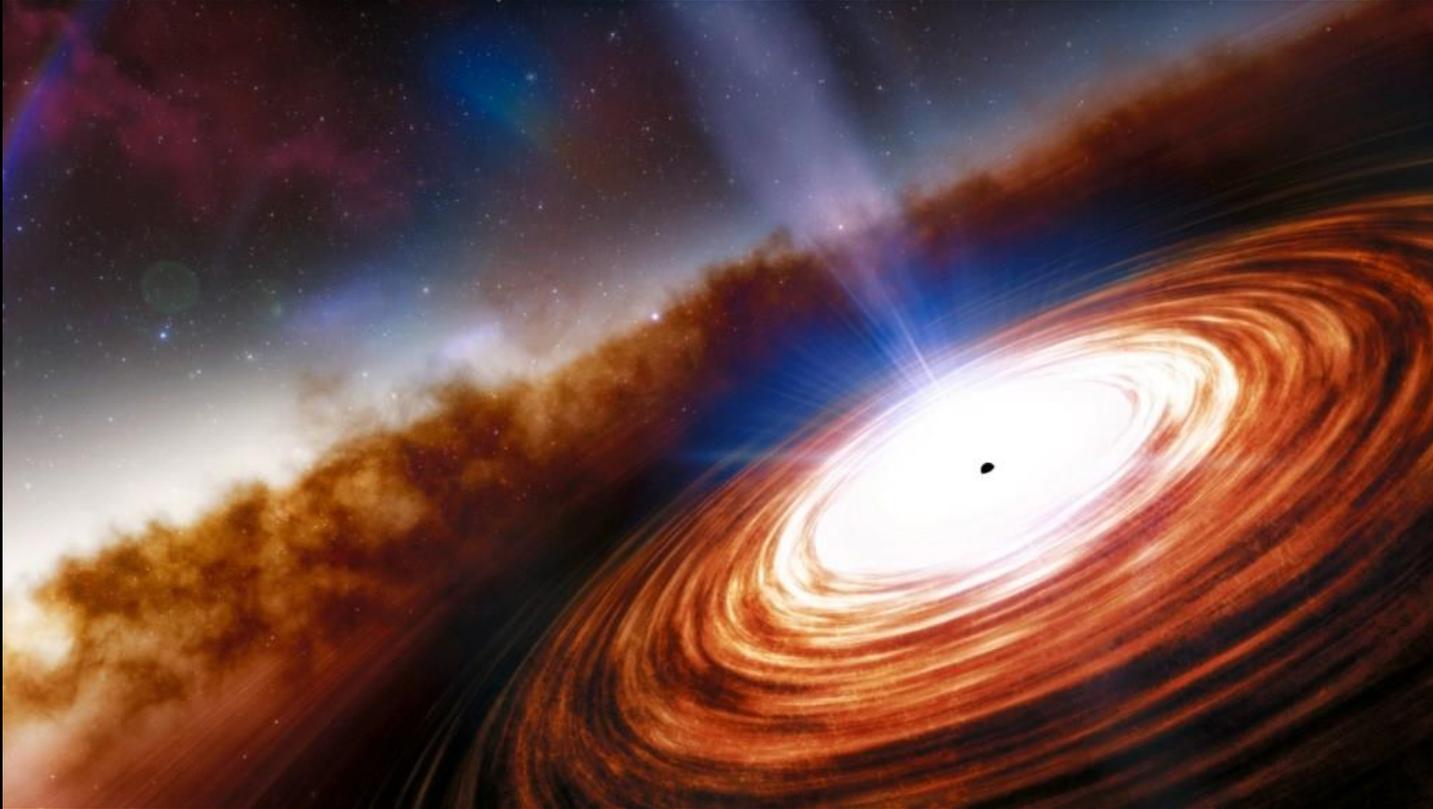
Sólo llega a la Tierra 1 de cada 10^{12} fotones en el óptico



En el núcleo de la Vía Láctea, a 27.000 años luz del sistema solar, hay una fuente de radio muy potente

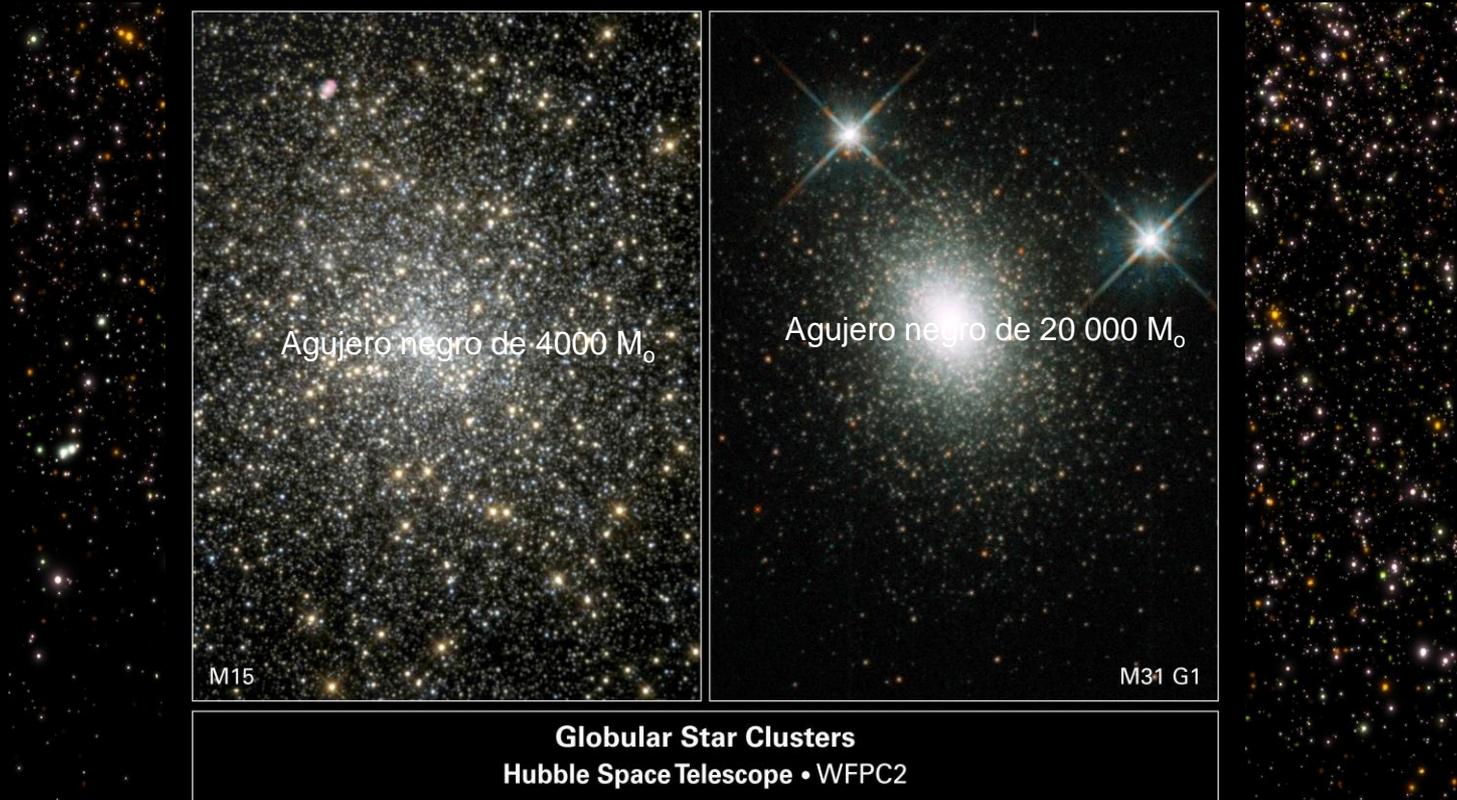
Un objeto con una masa de 4 millones de veces la masa solar en un radio de 45 UA: un AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO

La mayor parte de las galaxias albergan en sus núcleos gigantes agujeros negros supermasivos...



...de cuyos discos salen chorros de materia a velocidades próximas a la de la luz.

También hay agujeros negros de masa intermedia, por ejemplo, en el centro de algunos cúmulos globulares



Hay un cuarto tipo de agujeros negros, todavía teóricos

Los micro agujeros negros



A principios de los 70 se pensaba que los agujeros negros eran realmente negros. Pero, en 1974 Stephen Hawking demostró que los agujeros negros tienen temperatura, entropía y, al igual que cualquier otro cuerpo termodinámico,

...los agujeros negros emiten radiación

$$kT = \frac{c^3 \hbar}{8\pi GM}$$

Según Hawking, en el Big Bang debieron existir las condiciones físicas para que se formaran muchísimos agujeros negros primordiales.

Principio de incertidumbre de Heisenberg

No se puede medir simultáneamente y con absoluta precisión la posición y la velocidad de una partícula, o el tiempo y la energía.

Debido a este principio, en Física se define una **partícula virtual** como una partícula elemental que existe en un periodo de tiempo tan corto, que no es posible medir sus propiedades de forma exacta.

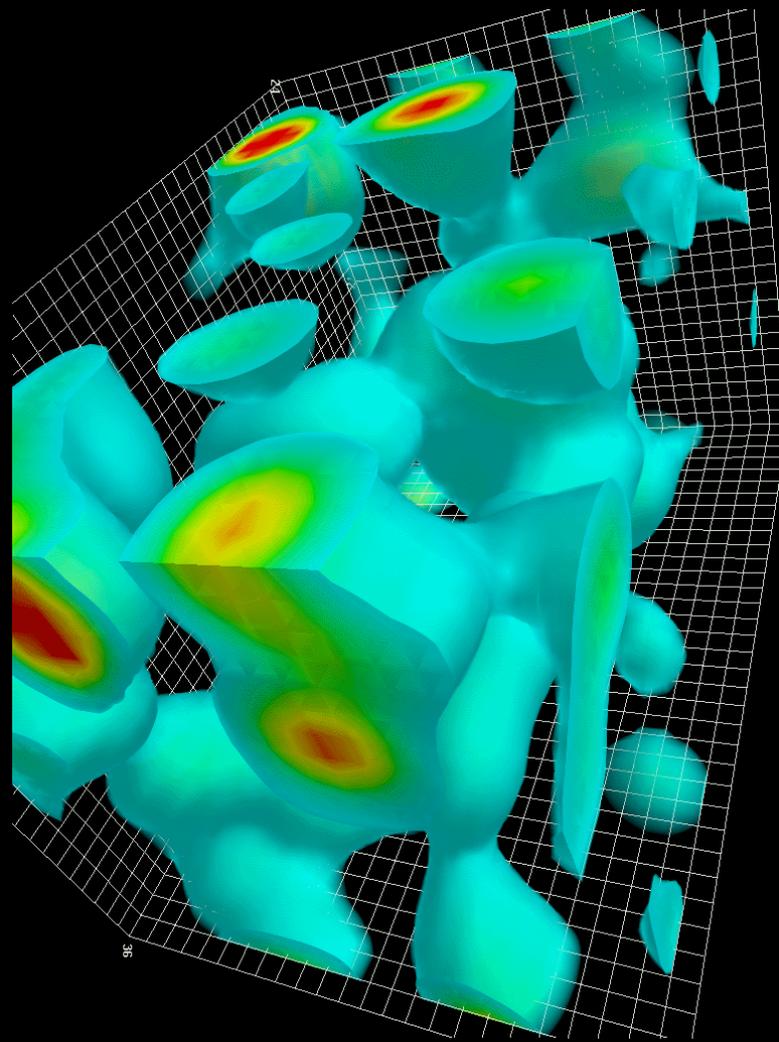
$$\Delta p \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar$$

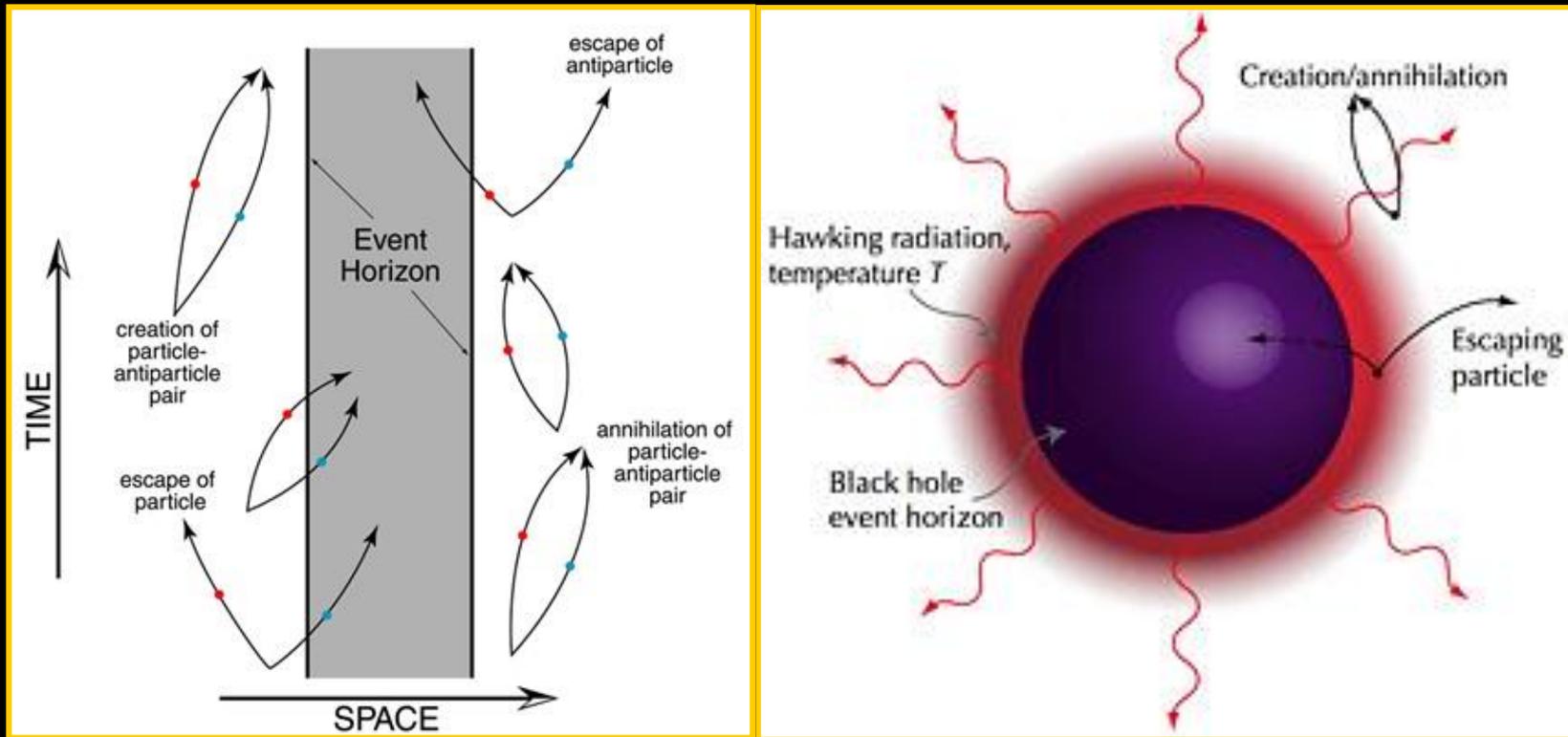
En la física clásica, en el vacío no existe nada. Sin embargo, en la mecánica cuántica, el vacío es, en realidad, un mar de partículas virtuales y existe un concepto que es el de las fluctuaciones del vacío.

Aunque la energía media del espacio vacío es cero, las fluctuaciones locales de energía están permitidas por el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Las fluctuaciones de energía crean pares partículas-antipartículas virtuales que pueden existir momentáneamente y se aniquilan rápidamente.



Al provenir del agujero negro la energía gravitatoria necesaria para crear las partículas, éste pierde masa y se contrae; y con el tiempo llega a evaporarse completamente, emitiendo la famosa radiación de Hawking.



Cuanto menos masivo es el agujero negro, mayor temperatura tiene y, por tanto, mayor radiación de Hawking emite.

$$T_{bh} = 10^{-7} \left(\frac{M_{sun}}{M_{bh}} \right)$$

La temperatura en los agujeros negros primordiales es extremadamente alta.

Aunque todos los agujeros negros tienden a evaporarse, cuanto más masa tienen, más tiempo tardan en hacerlo.

$$t_{evap} = 10^{10} \left(\frac{M}{10^{12} \text{ kg}} \right)^3 \text{ años}$$

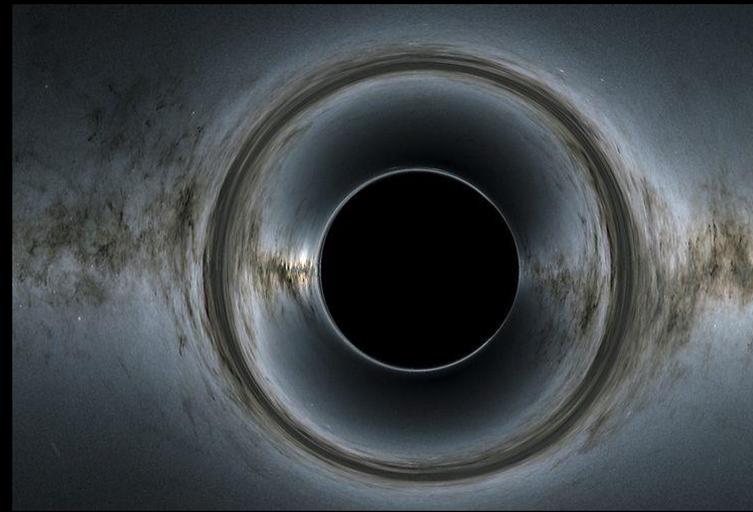
Agujeros negros estelares

$M \sim \text{varias } M_{\odot}$

Temperatura = 10^{-7} K

$t_{\text{evap}} = 10^{67}$ años

La radiación de Hawking en ellos es irrelevante.



Mini agujeros negros

$M = \text{masa del monte Everest}$

Tamaño = 10^{-18} m

$T = 10^{16}$ K

$t_{\text{evap}} = 10^{-27}$ s

Su radiación de Hawking es importante.

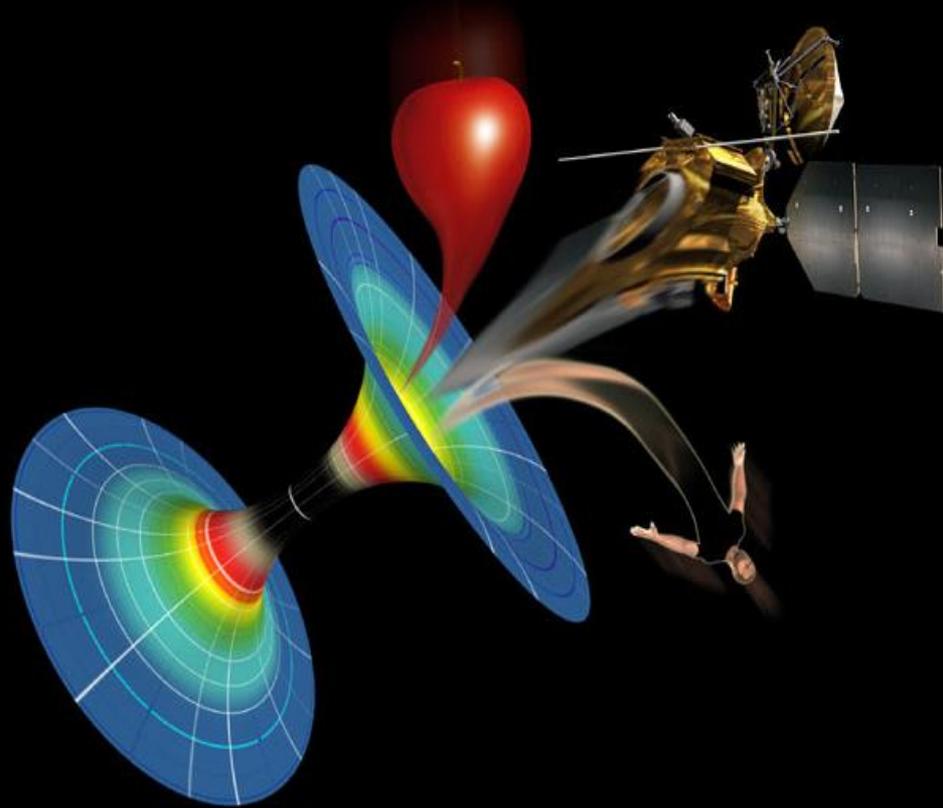


Tiempos de evaporación típicos de agujeros negros

(edad del Universo = 10^{10} años)

MASA	tiempo evaporación
Mini AN	10^{-27} años
Hombre	10^{-12} sg
Edificio	4 sg
Tierra	10^{49} años
Sol	10^{66} años
Galaxia	10^{99} años

6. Sus efectos...



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?

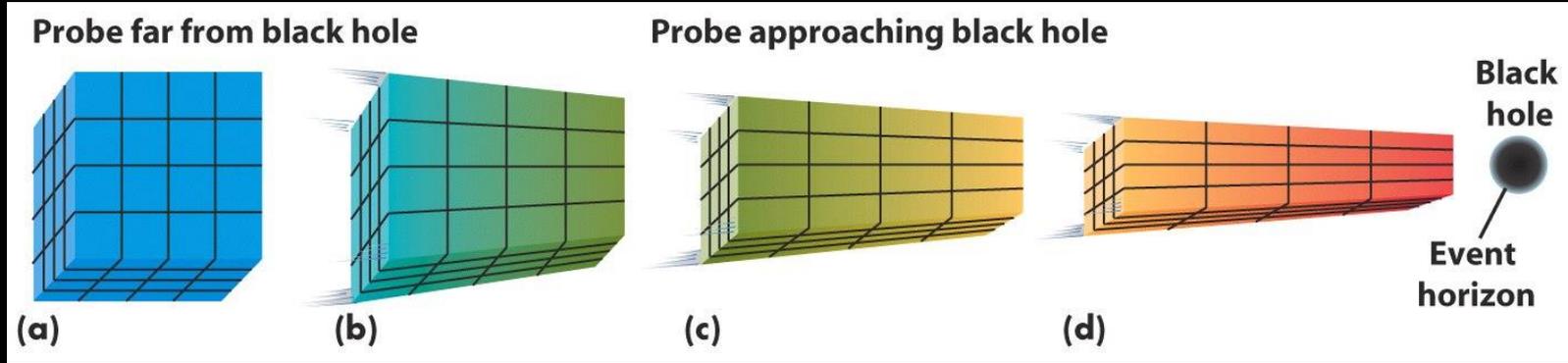


Al acercarse el astronauta al horizonte de sucesos, el observador externo lo vería moverse cada vez más lentamente.

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.

Caída a un agujero negro: un viaje infinito

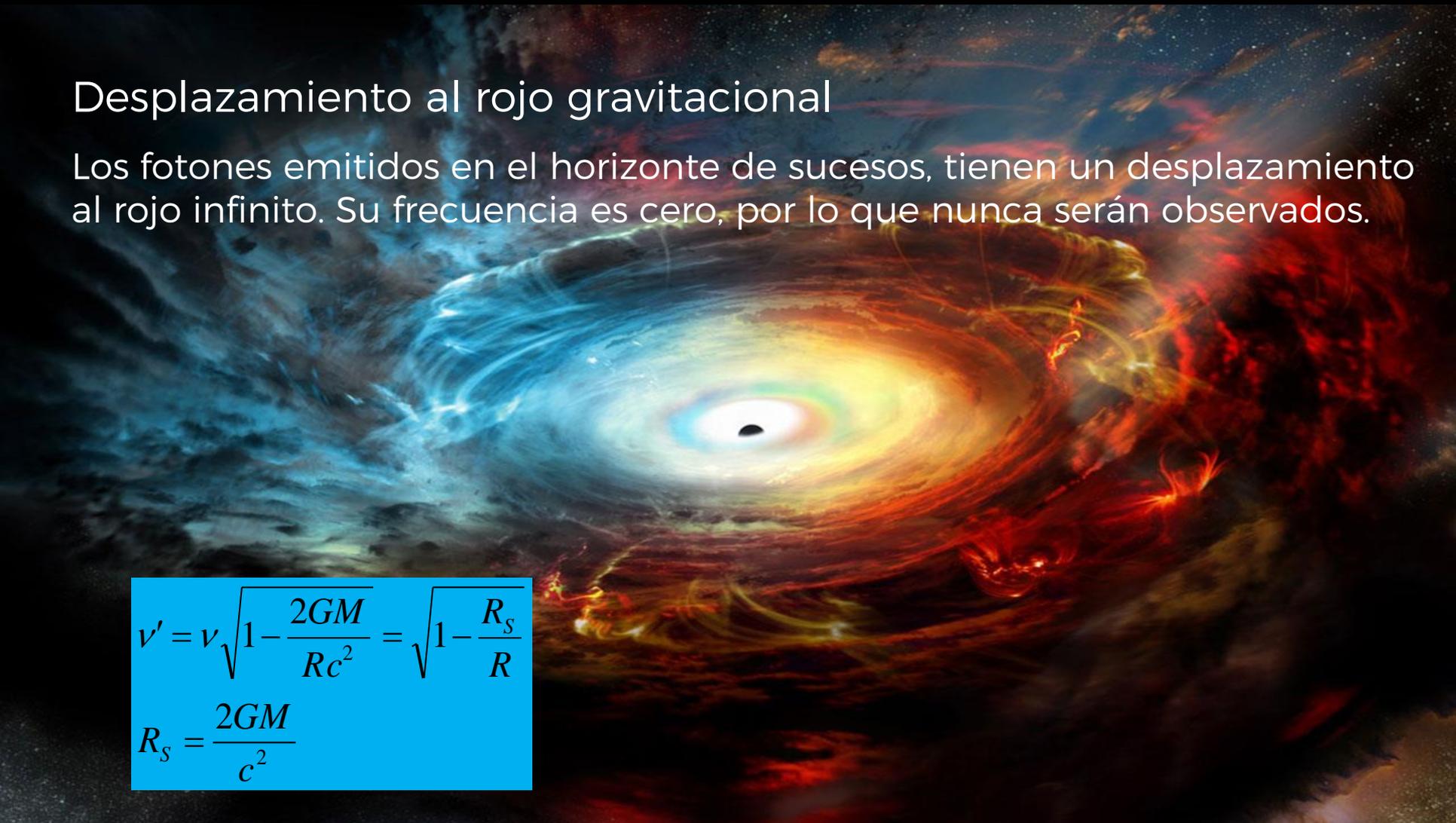


Cerca del radio de Schwarzschild, la nave se alarga y estrecha por la diferencia entre las fuerzas gravitatorias a las que se ven sometidos ambos lados. La nave cambia de color a medida que sus fotones experimentan el corrimiento al rojo gravitatorio.

Desplazamiento al rojo gravitacional

Los fotones emitidos en el horizonte de sucesos, tienen un desplazamiento al rojo infinito. Su frecuencia es cero, por lo que nunca serán observados.

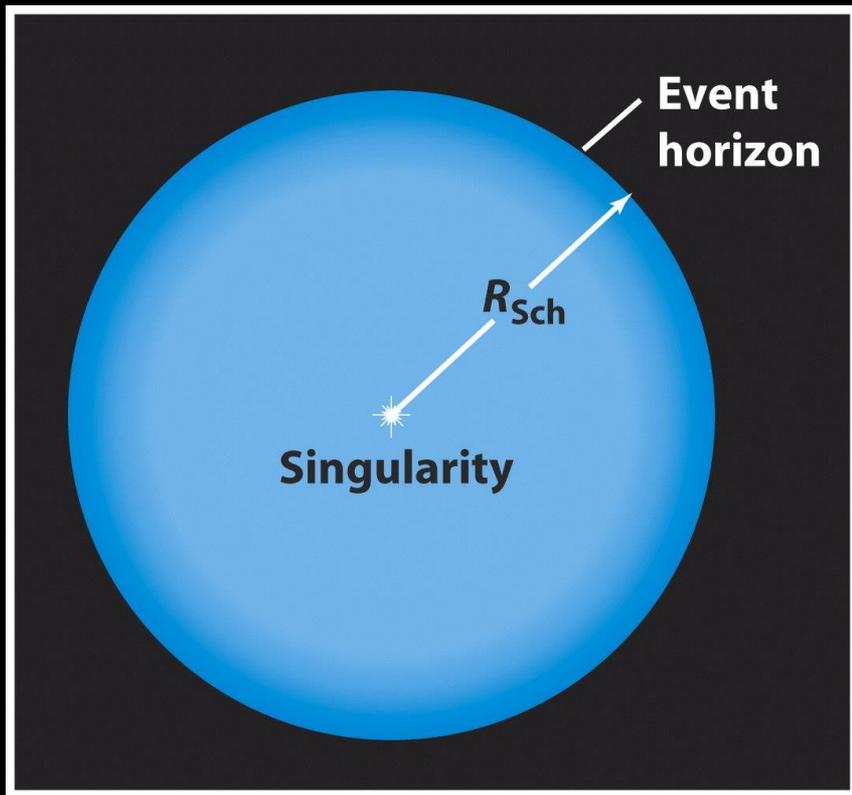
$$v' = v \sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}} = \sqrt{1 - \frac{R_s}{R}}$$
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$



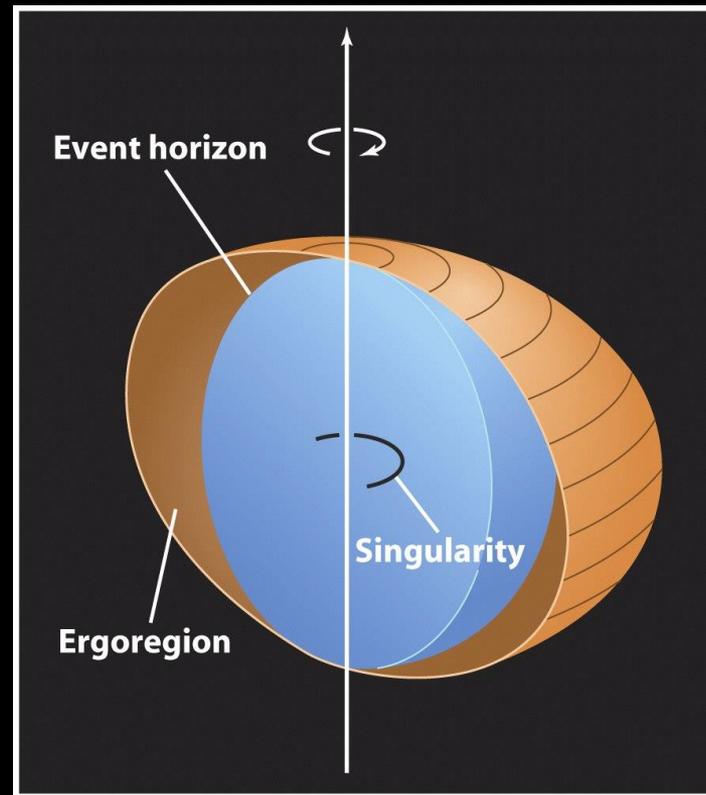
Agujeros negros en rotación

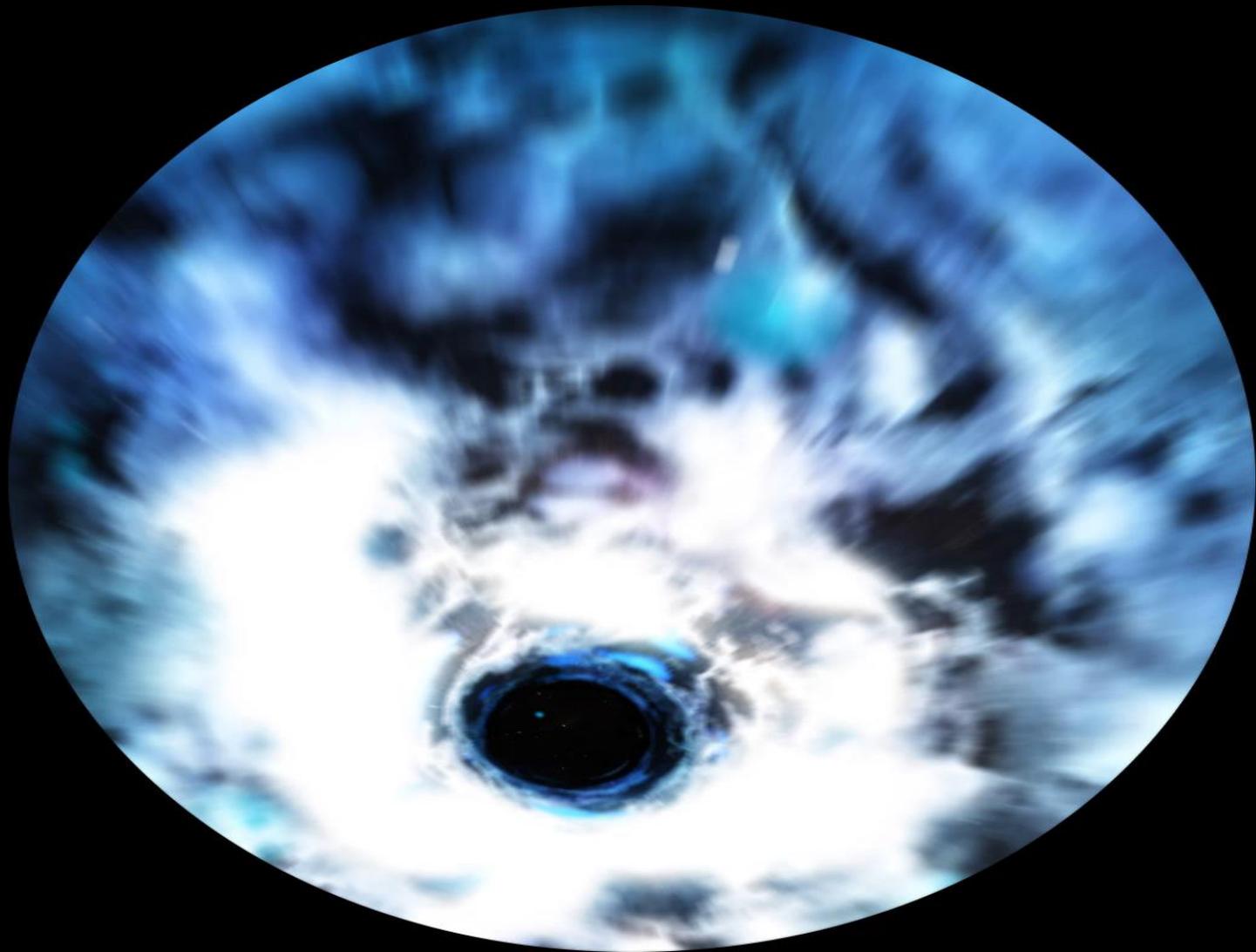


Agujero negro de Schwarzschild
(sin rotación)



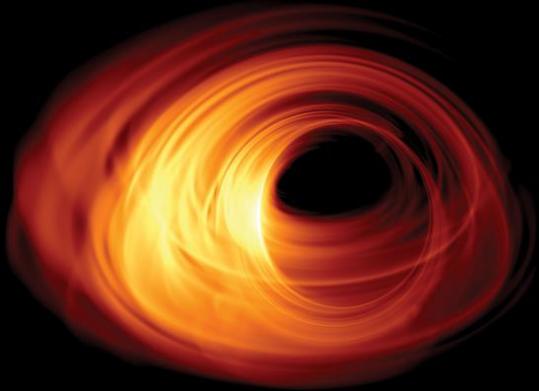
Agujero negro de Kerr
(con rotación)



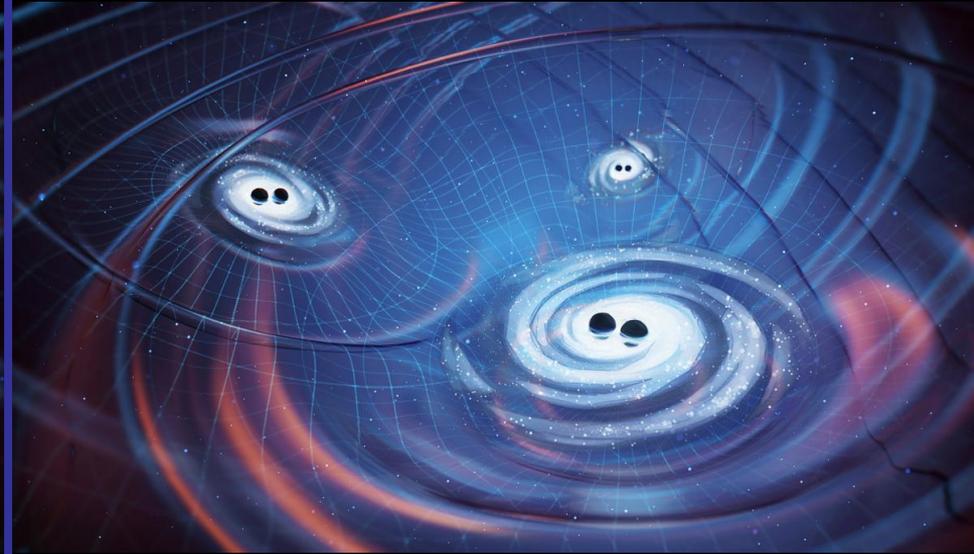


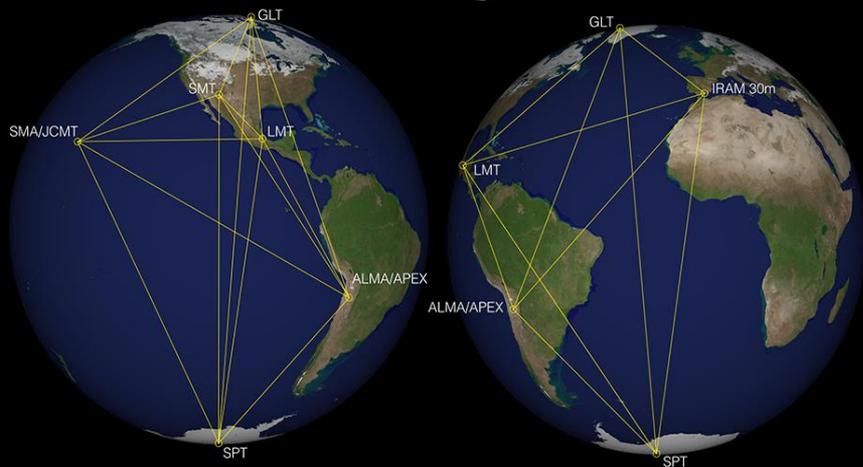
7. Epílogo

Sombras de agujeros negros

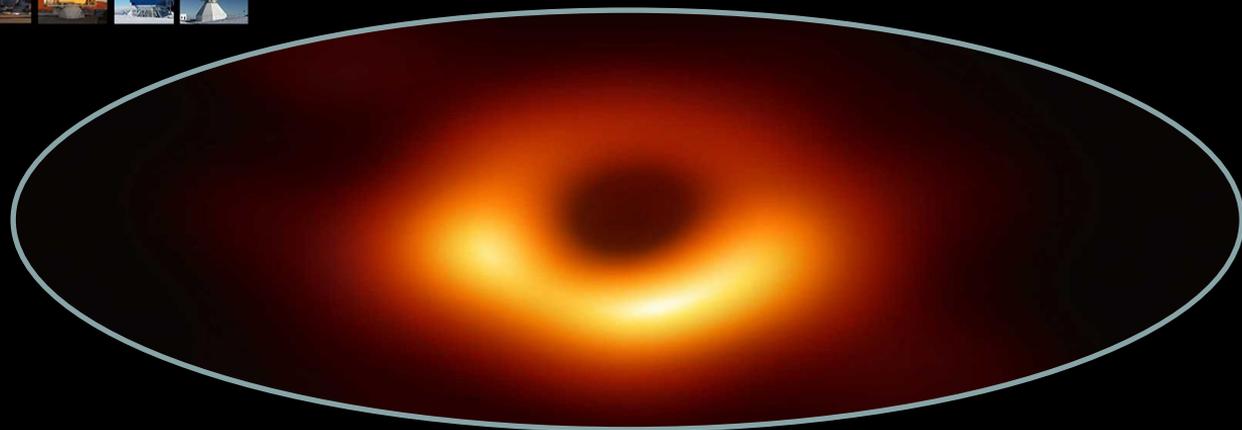


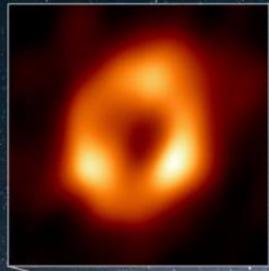
Fondo de ondas gravitatorias





En 2019, se obtuvo la primera imagen de un agujero negro supermasivo (6500 millones de masas solares) en el núcleo de la galaxia M87, a 55 millones de años-luz





En 2022 se “fotografió” el agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea (4 millones de masas solares)



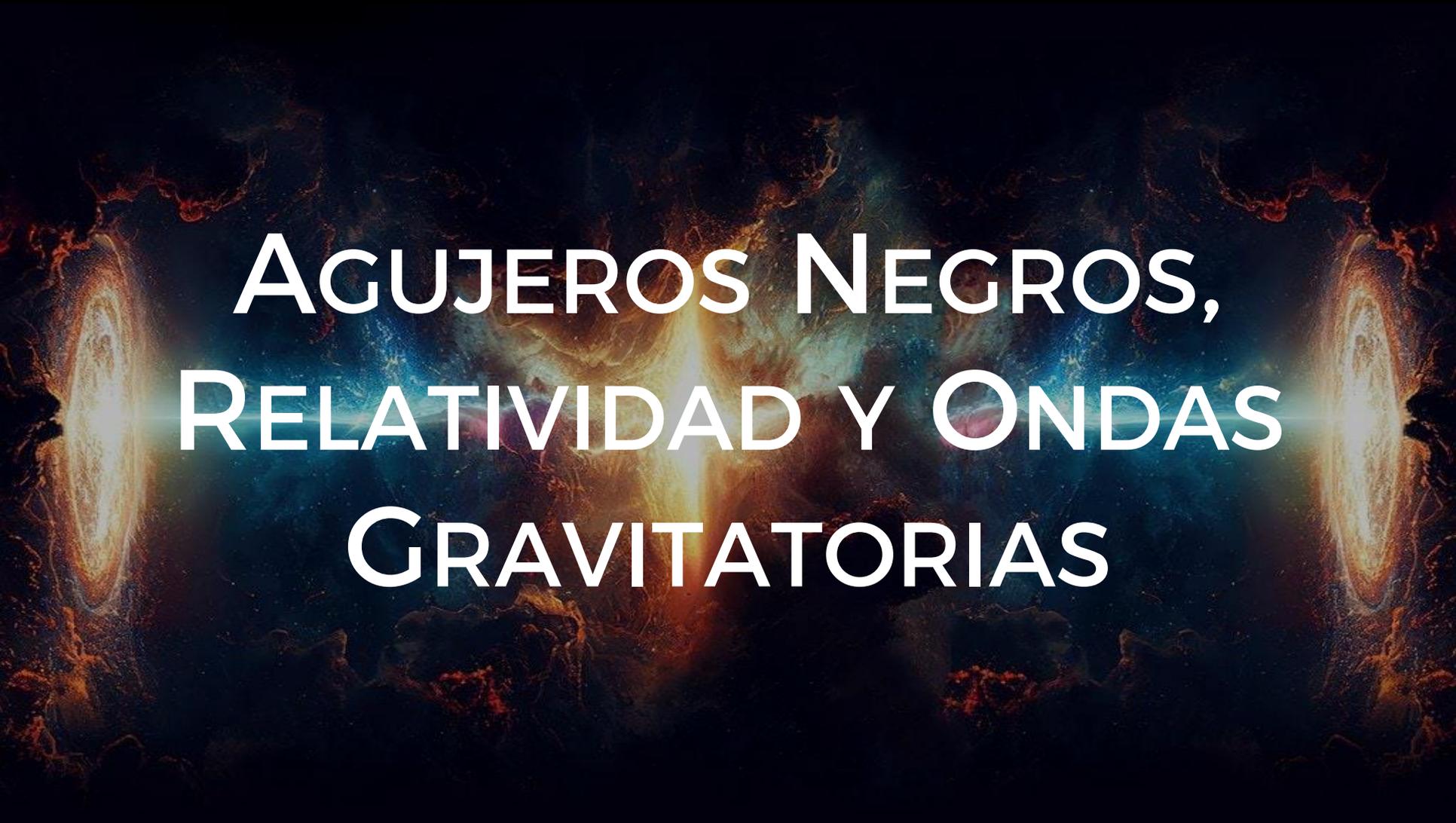


En 2023 se descubre el “fondo estocástico de ondas gravitatorias”



¿Hay alguna relación entre los agujeros negros
y el origen y destino del cosmos?



The background is a dark, textured space with two glowing, circular portals on the left and right sides. The portals have a bright, orange-yellow center that fades into a blue and purple glow. The overall appearance is that of a cosmic or interdimensional space.

AGUJEROS NEGROS, RELATIVIDAD Y ONDAS GRAVITATORIAS