

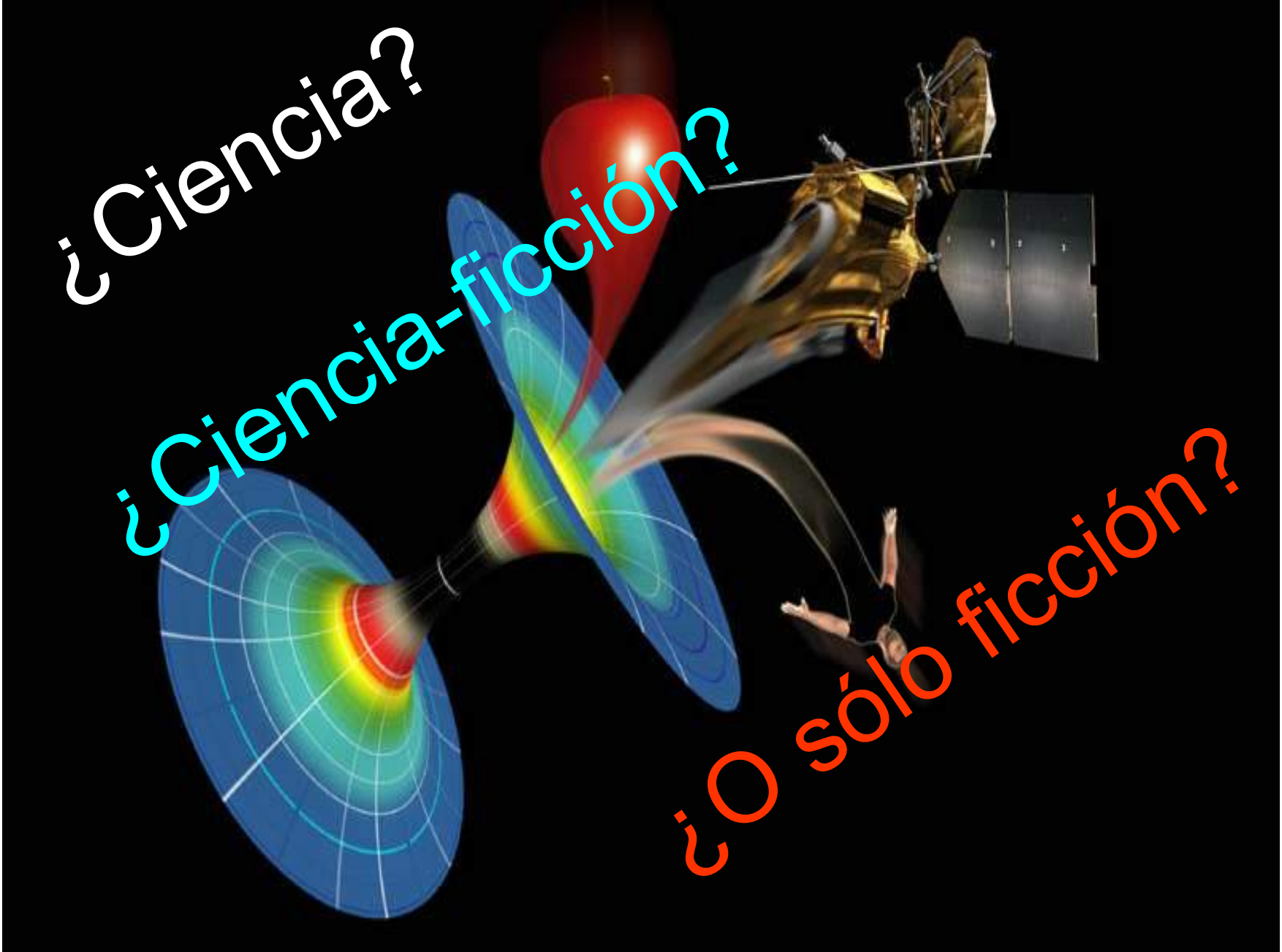
A black hole is depicted as a dark, circular void in the center of the image. It is surrounded by a ring of glowing, bright white and yellow stars, which appear to be orbiting the black hole. The background is a deep blue space filled with numerous smaller, distant stars and a faint, glowing orange and yellow galaxy or nebula. The overall scene is a dramatic representation of a black hole in a starry universe.

# LA FÍSICA DE LOS AGUJEROS NEGROS

¿Ciencia?

¿Ciencia-ficción?

¿O sólo ficción?



---

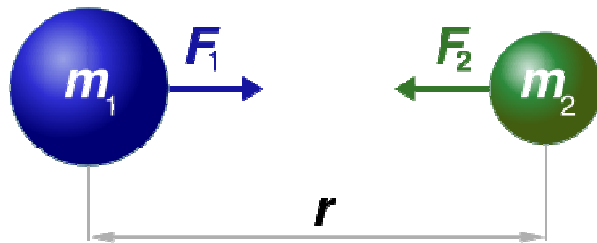
# SECCIÓN 1. Un poco de historia



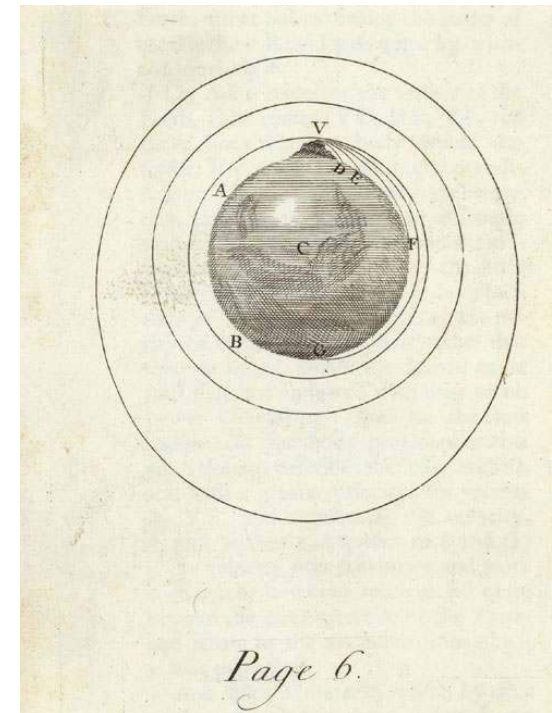


1728

Isaac Newton (1642-1727)

*“Un Tratado del Sistema del Mundo”*

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



Velocidad de escape

$$v_{\text{esc}} = (2GM/r)^{1/2}$$

**1783**

Predicción teórica del geólogo inglés  
**John Michell** (1724-1793).

*“Deben existir en la naturaleza cuerpos cuya densidad no es inferior a la del Sol, y cuyos diámetros son más de 500 veces el diámetro del Sol... su luz nunca llegará a nosotros.”*



**1796**

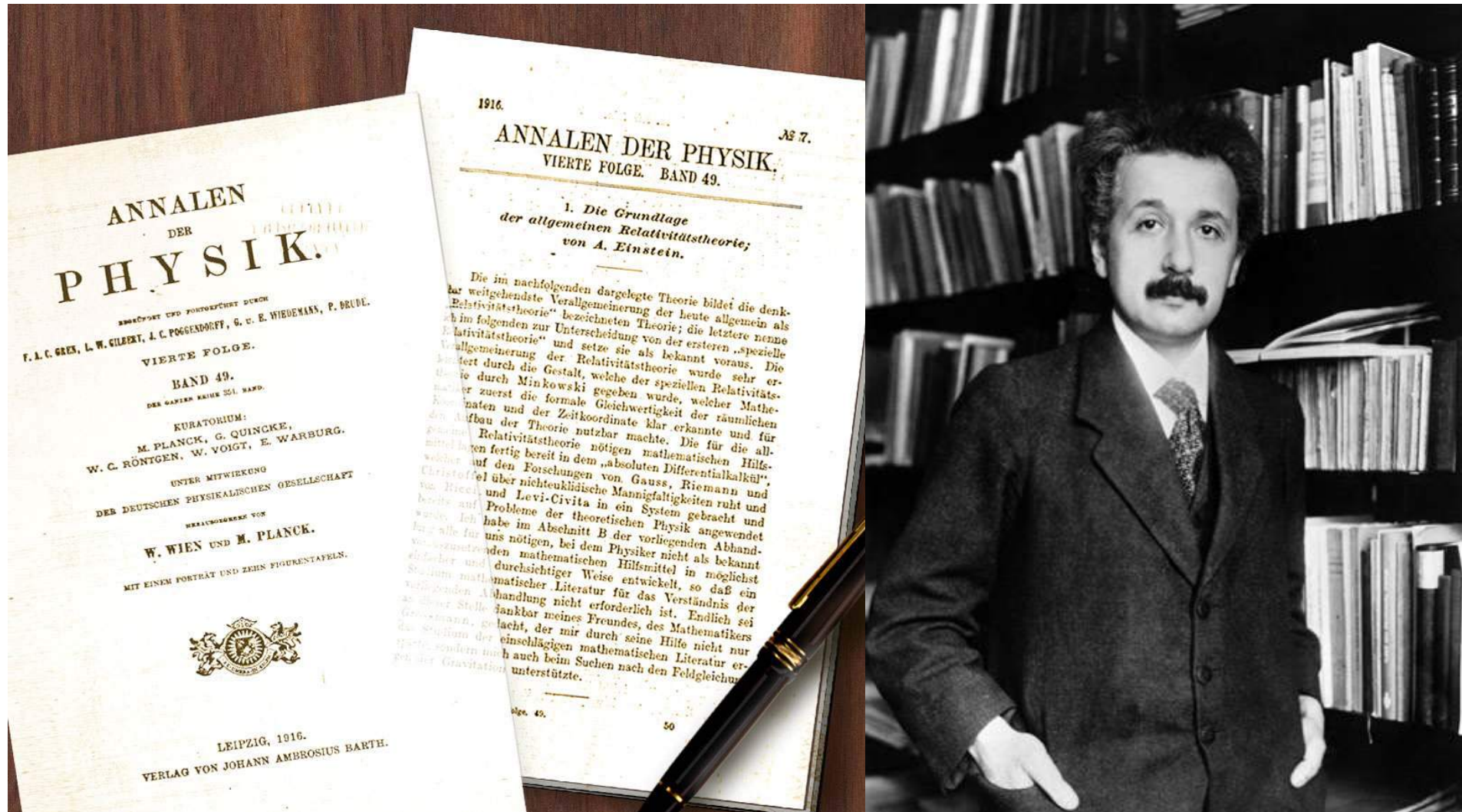
Predicción similar del matemático francés  
**Pierre Simon Laplace** (1749-1827).

*“En el cielo hay cuerpos oscuros quizá tan grandes y numerosos como las estrellas mismas”.*



1915

## Albert Einstein publica su *Teoría General de la Relatividad*



# 1915

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

Se define el **radio de Schwarzschild** como el radio del horizonte de sucesos en el que la masa de un cuerpo puede llegar a ser comprimida para formar un agujero negro.

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



La masa de un cuerpo y su radio de Schwarzschild son directamente proporcionales: si un agujero negro tiene una masa diez veces mayor que otro, su radio es también diez veces mayor.



---

**1930**

**Subrahmanyan Chandrasekhar** (1910-1995) sugiere que una estrella muy masiva puede llegar a colapsar y llegar a convertirse en algo extremadamente denso: una **enana blanca**.

**1939**

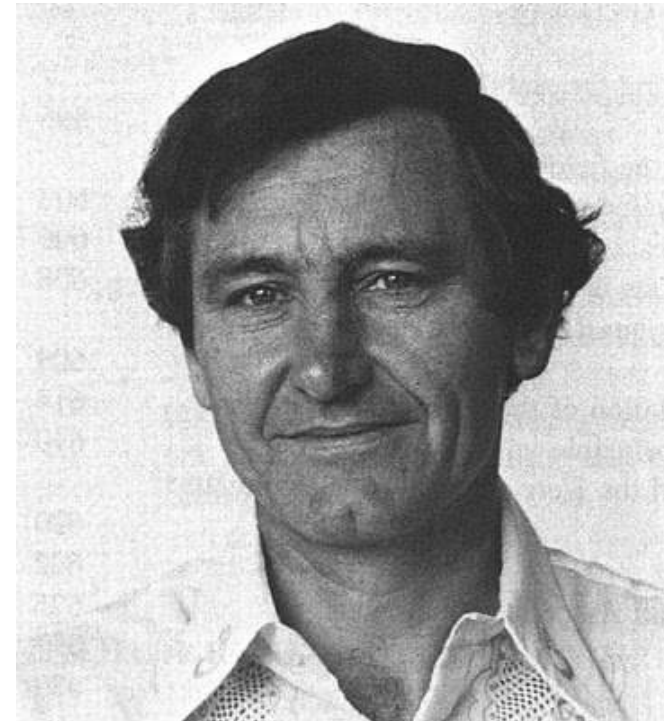
**Robert Oppenheimer** (1904-1967) predice que las estrellas masivas, después de finalizar sus procesos termonucleares pueden colapsar indefinidamente.



# 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).



## 1967

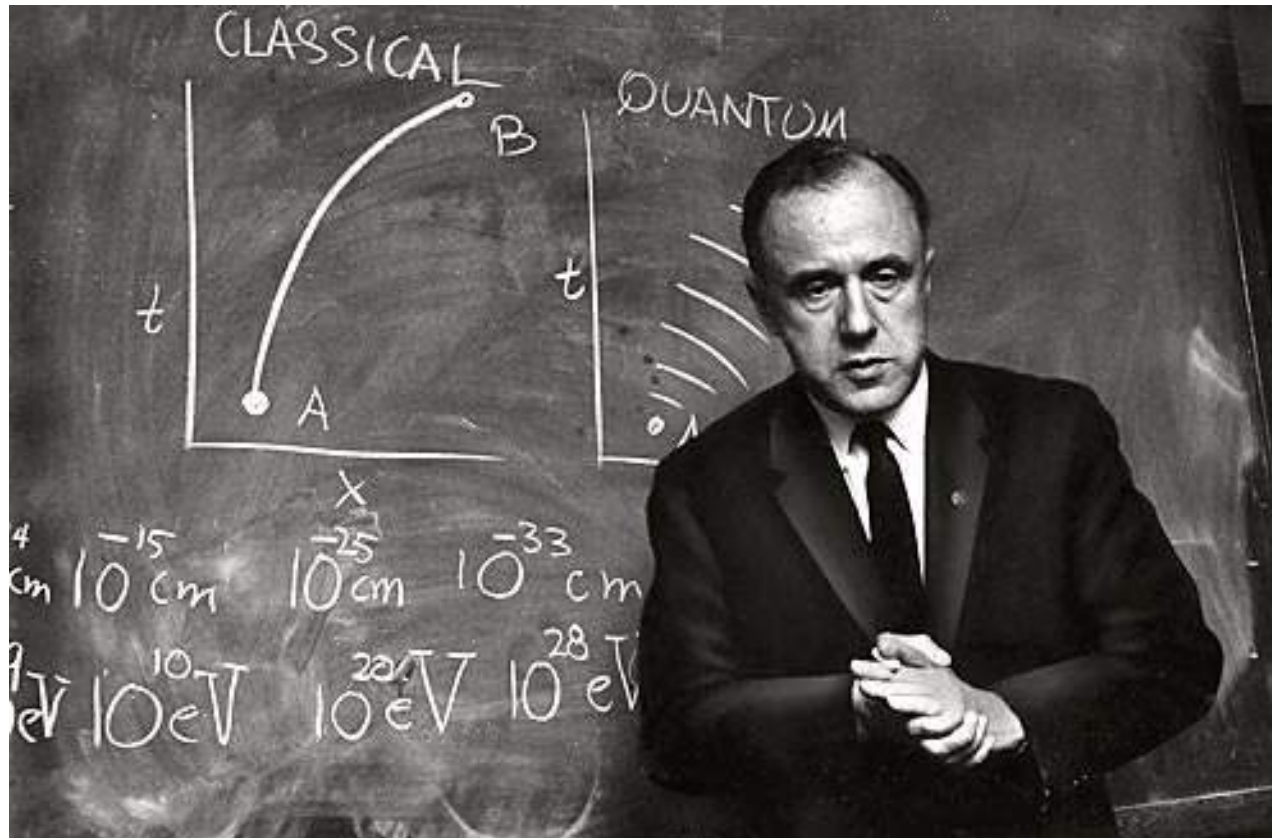
**Jocelyn Bell** descubre que algunos objetos celestes emiten pulsos de ondas de radio con precisa regularidad. Inicialmente se pensó en señales de alguna civilización extraterrestre (*“Little Green Men”*).

Pero al estudiar en detalle dichas ondas se les dió el nombre de **púlsar** y se propuso que debían ser estrellas de neutrones en rotación. Fue la primera evidencia de que las estrellas de neutrones existían.



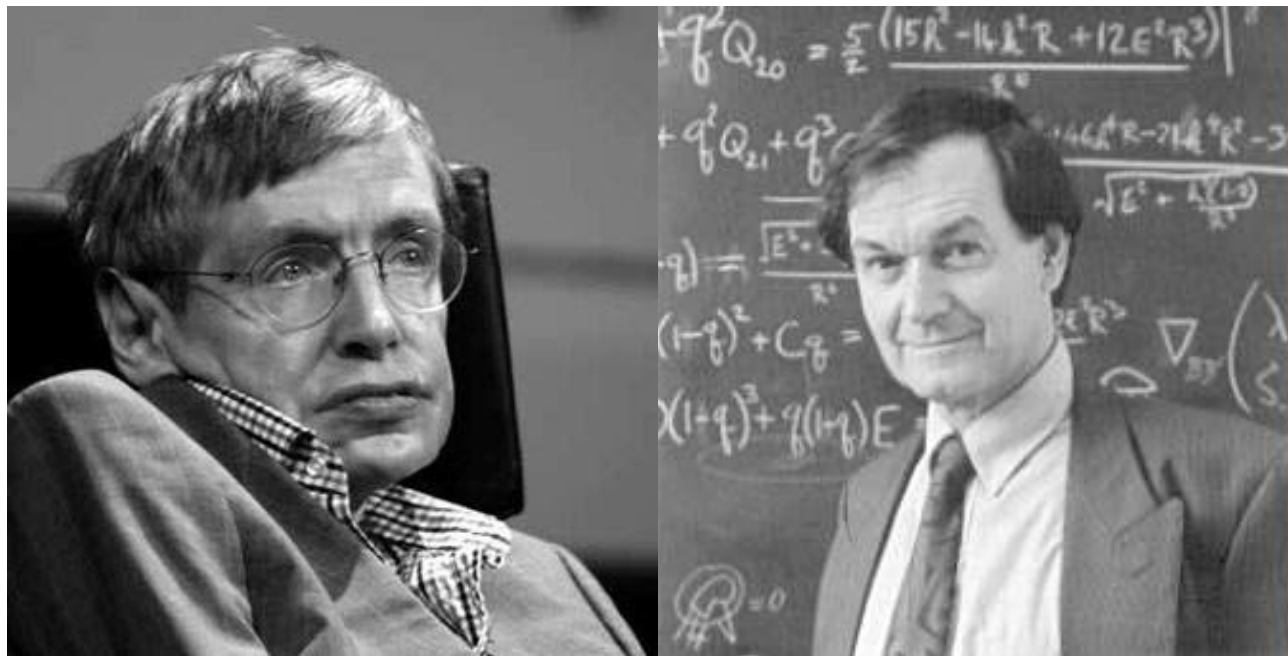
# 1967

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



## 1965-1970

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



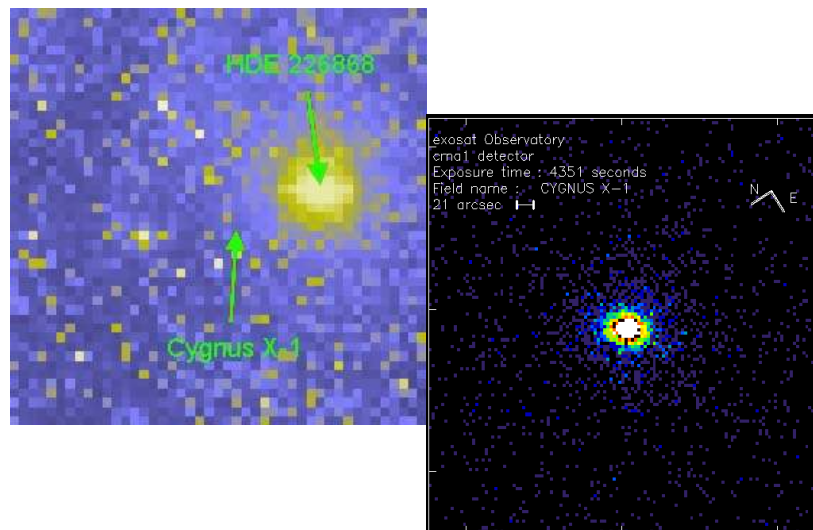


# 1972

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.



# 1974

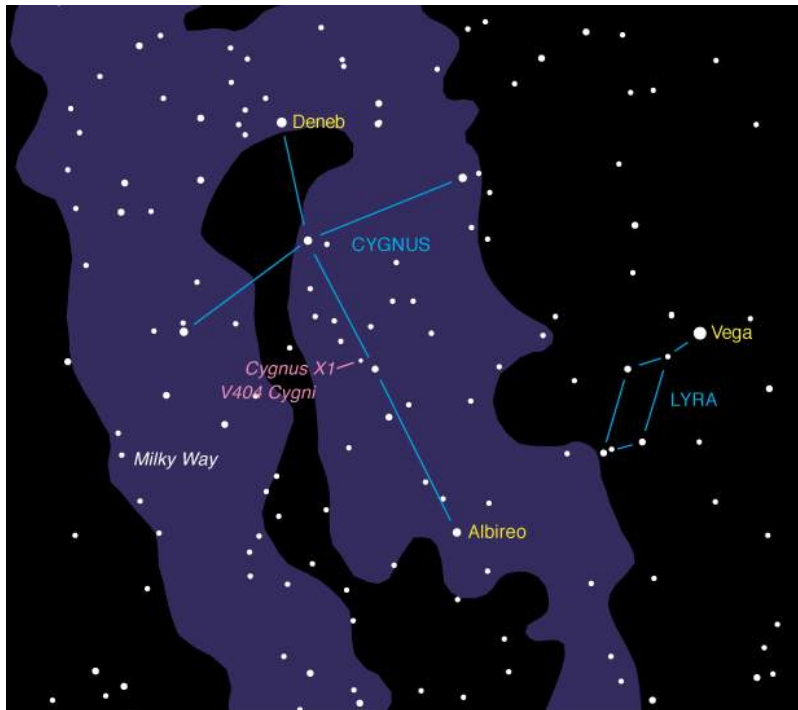
**Stephen Hawking** considera los efectos cuánticos: los agujeros negros cuánticos son diferentes de los agujeros negros clásicos. Clásicamente, la luz y otras partículas no escapan, los agujeros negros son negros. Pero, según la mecánica cuántica, los agujeros negros emiten luz.



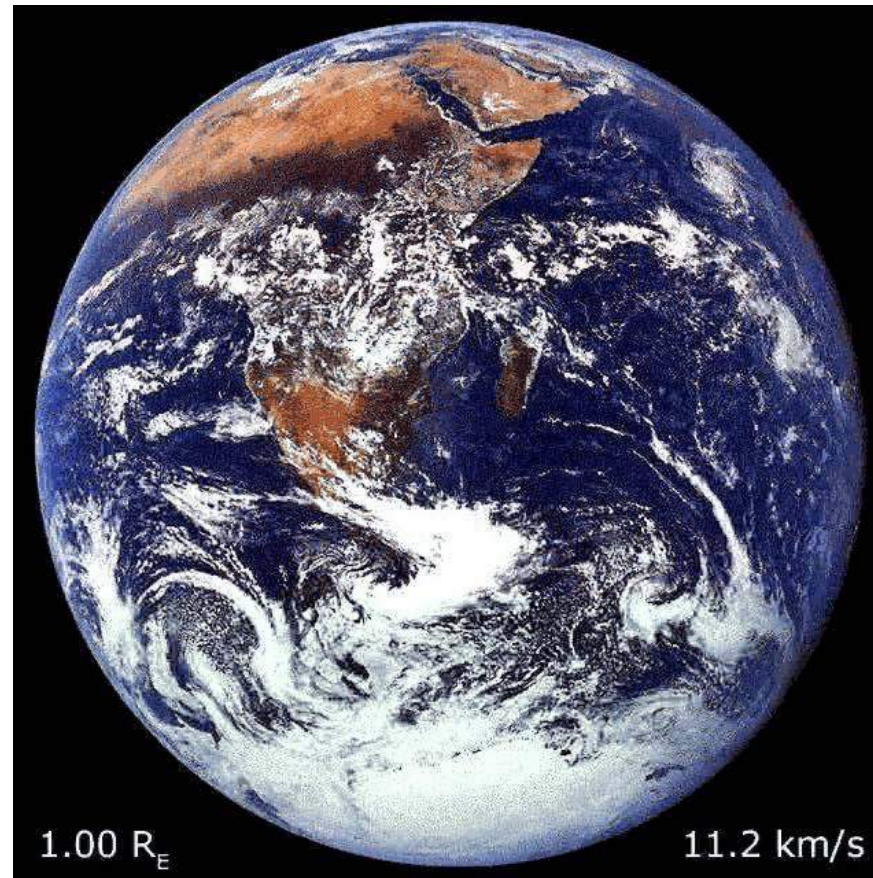
# 1992

**Jorge Casares**, (astrofísico español del Instituto de Astrofísica de Canarias) y otros colaboradores detectan el primer agujero negro “de verdad”

## V404 Cygnus



## SECCIÓN 2. Velocidad de escape de un astro



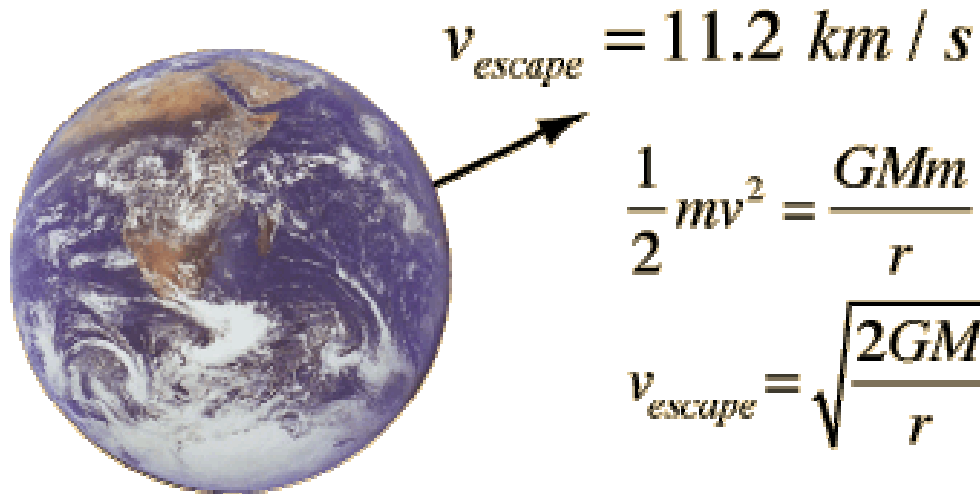


## ¿Qué es la velocidad de escape?



Velocidad mínima con la que debe lanzarse un cuerpo para que escape de la atracción gravitatoria de la Tierra o de cualquier otro astro de forma que, al escapar de su influjo, la velocidad del cuerpo sea finalmente 0.

Esto significa que el cuerpo no volverá a caer sobre la Tierra o astro de partida, quedando en reposo a una distancia suficientemente grande (en principio, infinita) de la Tierra o del astro.

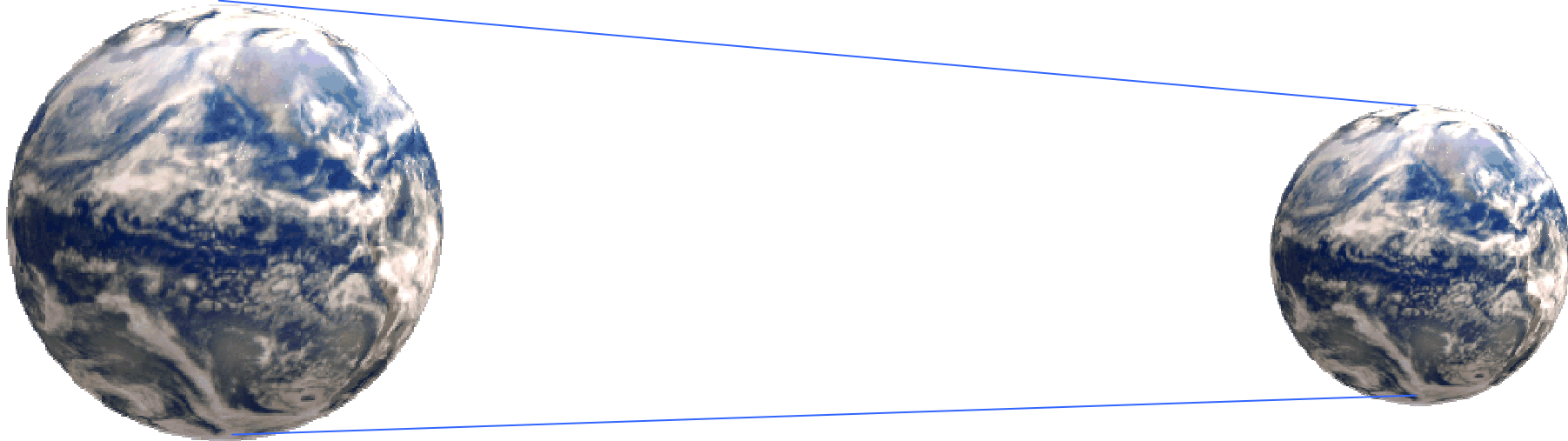


Energía cinética = Energía potencial

M: Masa del objeto del que se quiere escapar

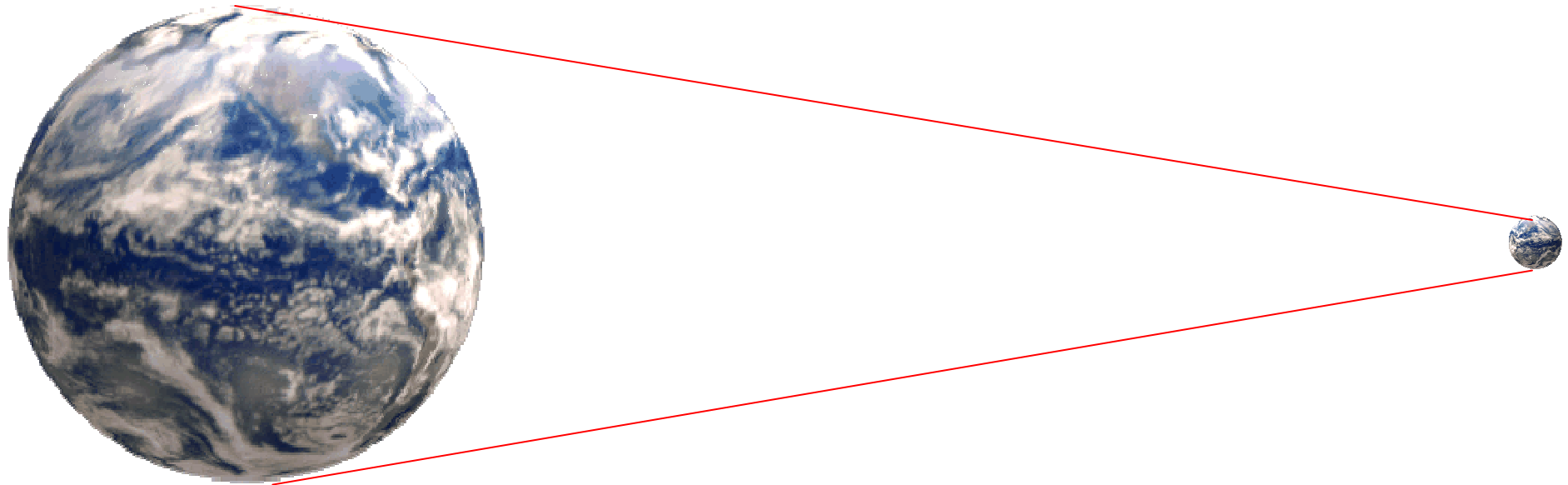
r: Radio del objeto del que se quiere escapar

**¡¡La velocidad de escape no depende de la masa del objeto que pretende escapar!!**



- Si la Tierra disminuye su radio 100 veces, manteniendo la misma masa.  
¡¡La velocidad de escape aumentaría 10 veces!!

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$
$$V_{esc} \propto \sqrt{\frac{1}{R}}$$



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

$$v_{\text{esc}} = c \text{ (velocidad de la luz)}$$

Bajo la teoría de Relatividad en la que los fotones son afectados por la gravedad, si la velocidad de escape es igual o superior a la velocidad de la luz, el objeto no puede ser observado.

**¡Es un agujero negro!**

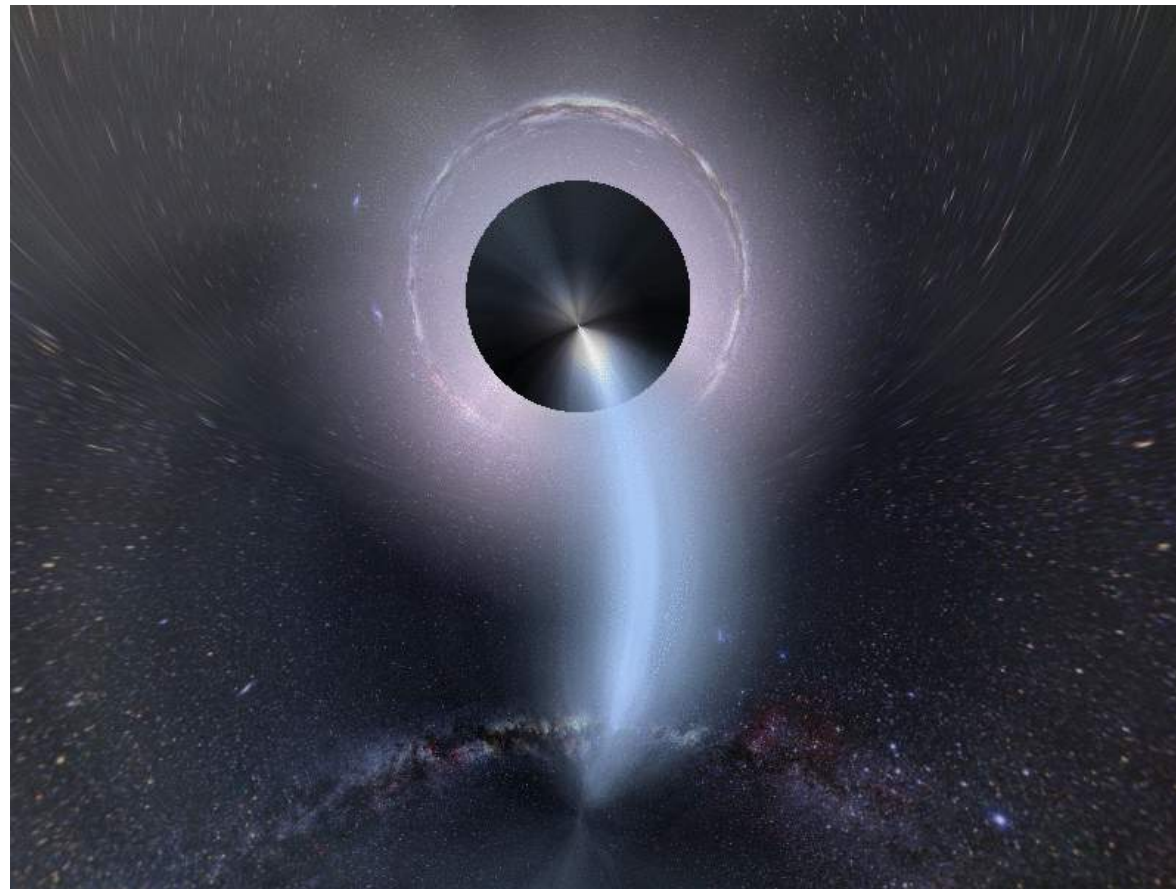


# VELOCIDADES DE ESCAPE TÍPICAS

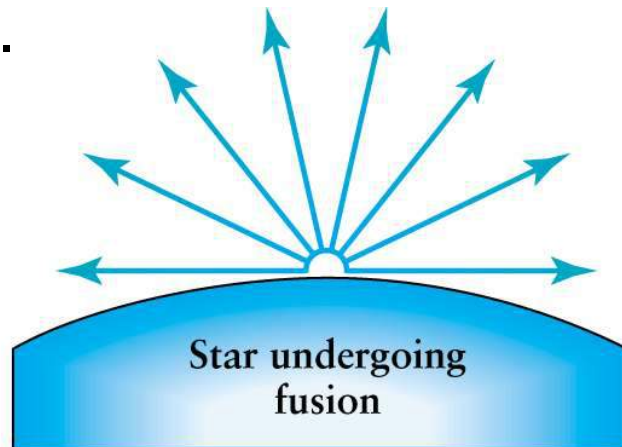


Ceres (el mayor asteroide)	0.64 km/s
Mercurio	4.3 km/s
Luna	2.4 km/s
Tierra	11.2 km/s
Marte	5.0 km/s
Júpiter	59.5 km/s
Sol	617.7 km/s

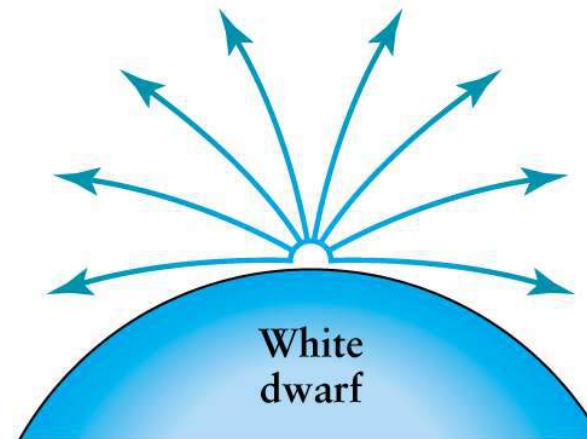
# SECCIÓN 3: Estructura y formación de agujeros negros



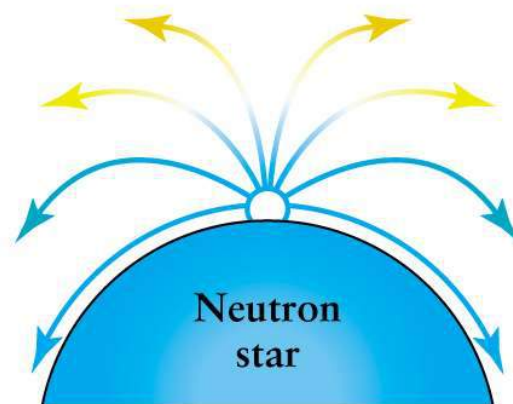
Si pudiéramos comprimir la masa de una estrella en un volumen cada vez menor, llegaría un momento en que ni siquiera la luz, que es curvada por la fuerte gravedad, podría escapar.



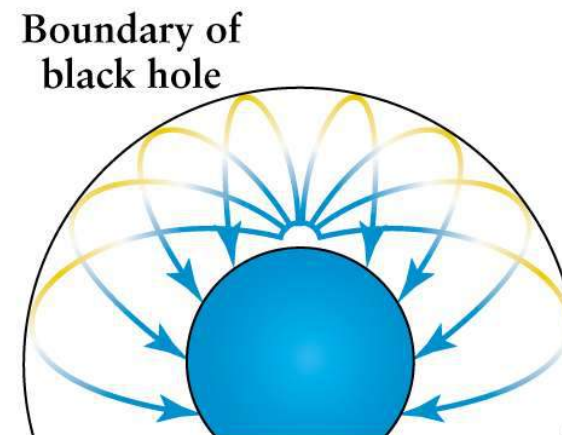
a



b



c



d

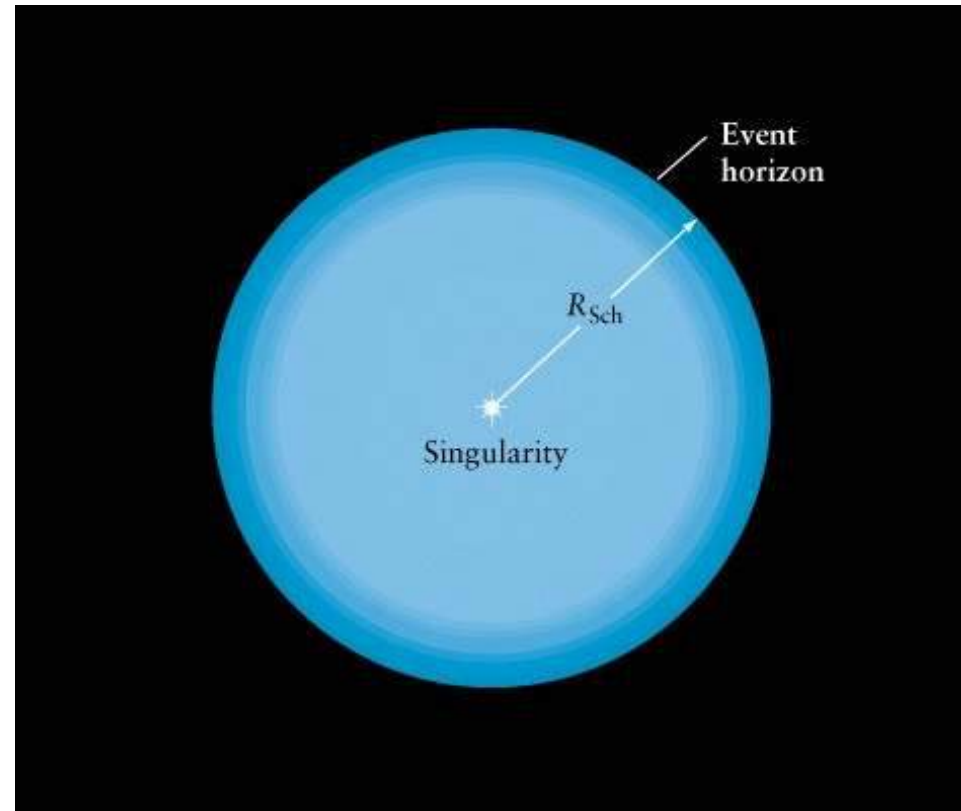
## ¿Qué tamaño tiene un agujero negro?

Cualquier cosa que suceda dentro de una esfera de radio igual al radio de Schwarzschild no puede ser vista por un observador externo: esa esfera es su **horizonte de sucesos**.

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

En otras unidades:

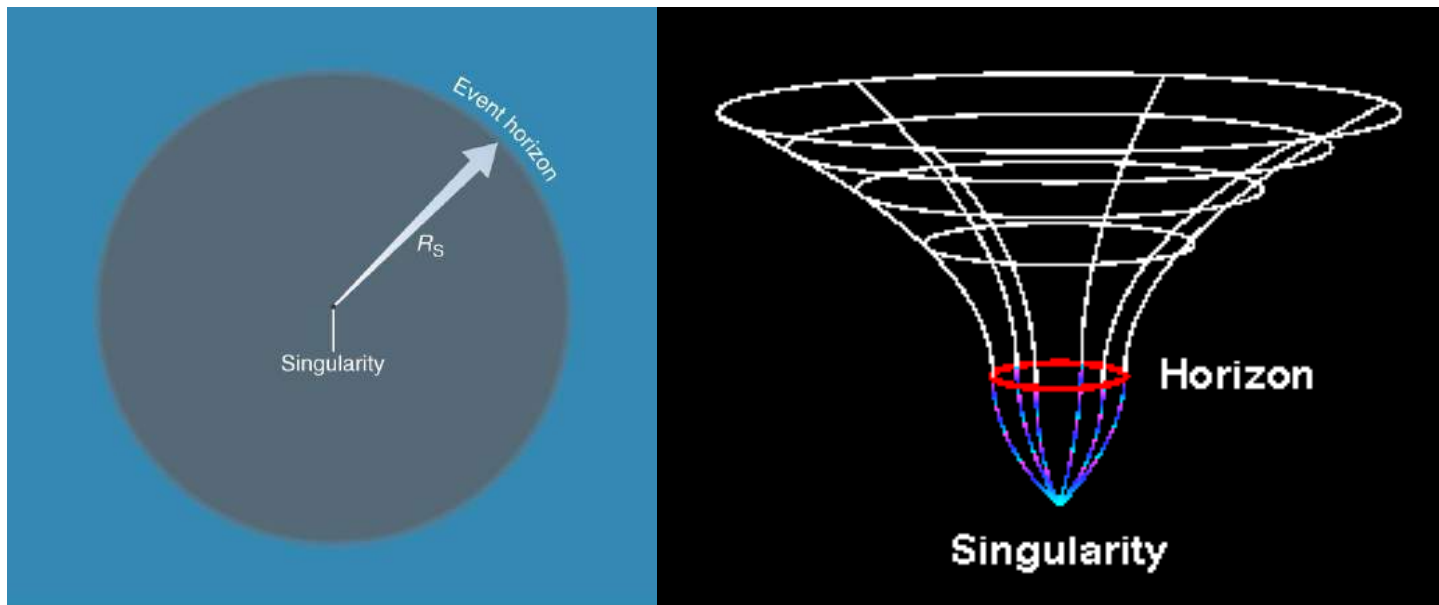
$$R_s = 3 \left( \frac{M}{M_{\text{Sun}}} \right) \text{ km}$$



## Radios de Schwarzschild de algunos objetos astronómicos

Objeto	Masa (masas solares)	Radio (Km)	Velocidad de escape (Km/seg)	Radio de Schwarzschild
Tierra	0,00000304	6.357	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





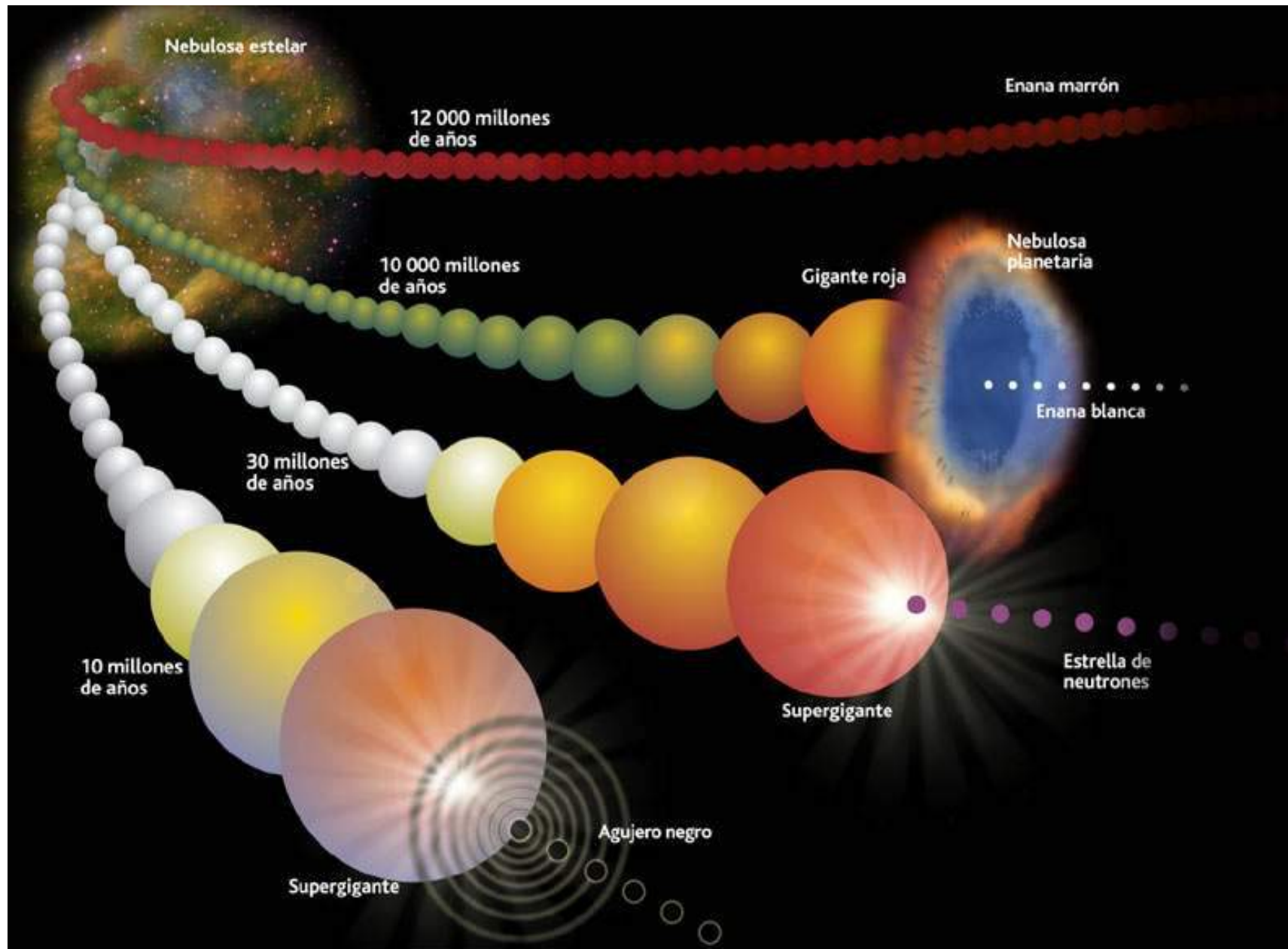
© 2004 Thomson/Brooks Cole

Cualquier objeto en el Universo tiene un *radio de Schwarzschild*. Pero sólo si toda su masa está contenida dentro de ese radio el objeto es un agujero negro.

No obstante, no todos los objetos del Universo pueden convertirse en agujeros negros. Es MUY DIFÍCIL comprimir un objeto hasta el tamaño de su *radio de Schwarzschild*.

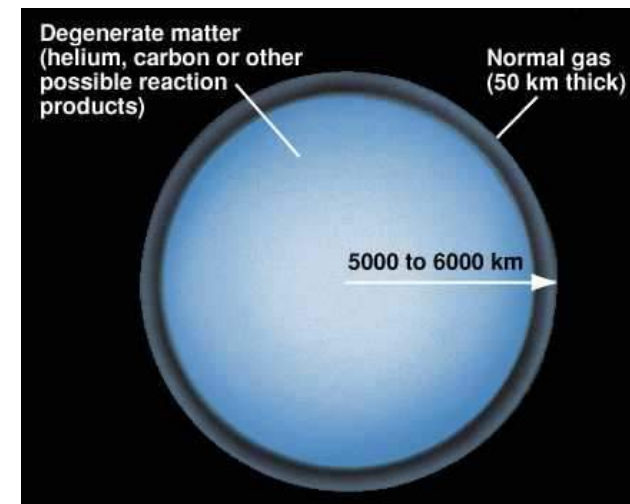
## Formación de agujeros negros estelares



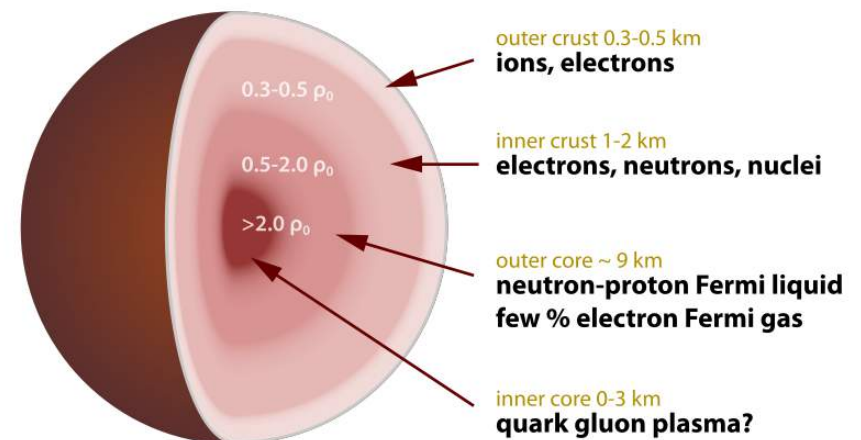


Para que una estrella sea capaz de soportar su propia gravedad, antes de que se acabe su combustible, tiene que tener como mínimo 1,44 veces la masa del Sol (**límite de Chandrasekhar**). Por debajo de este límite, se encuentran las enanas blancas.

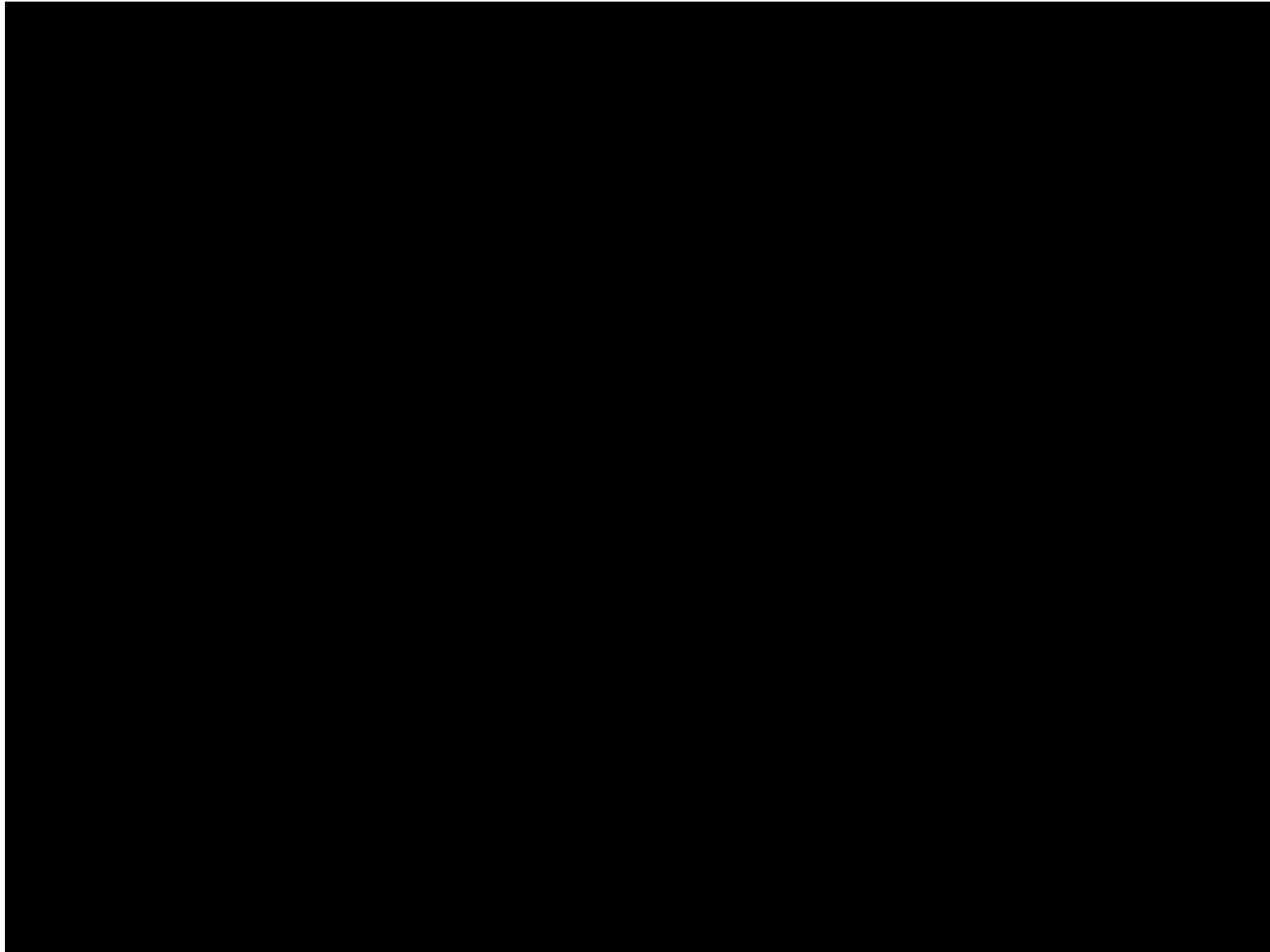
- Las **enanas blancas** tienen radios entre 0.008 y 0.02  $R_{\text{solar}}$  ( $R_{\text{solar}} = 7 \times 10^{10} \text{ cm}$ ) y una altísima densidad de varias toneladas por  $\text{cm}^3$ . Se mantienen por la repulsión de los electrones.



- Las **estrellas de neutrones** son mucho más pequeñas que las enanas blancas. (radios 10-20 km). Su densidad es de decenas de millones de toneladas por  $\text{cm}^3$ . Los **púlsares** son estrellas de neutrones en rotación.

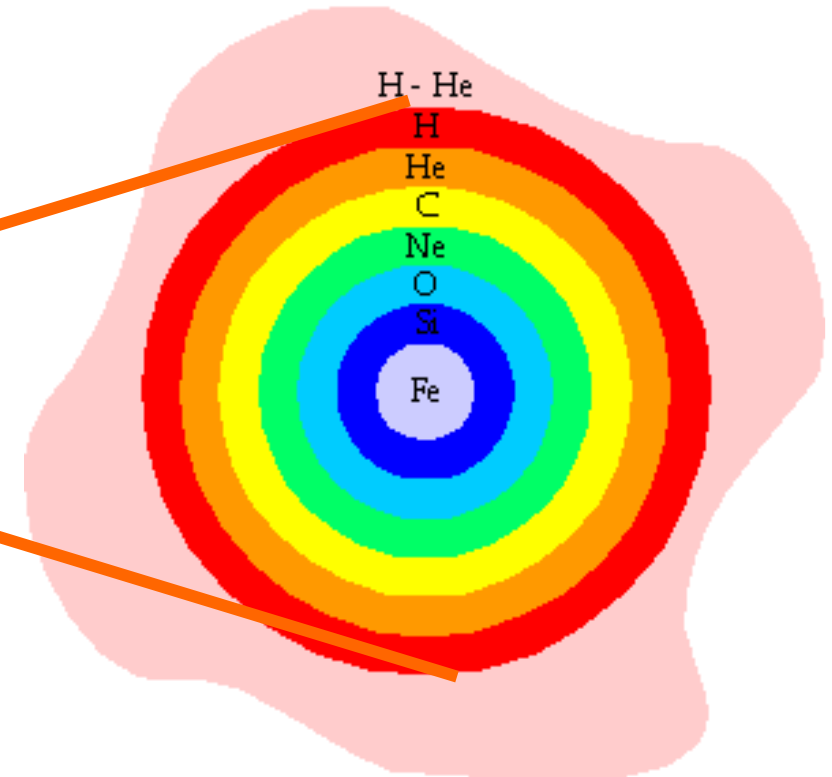
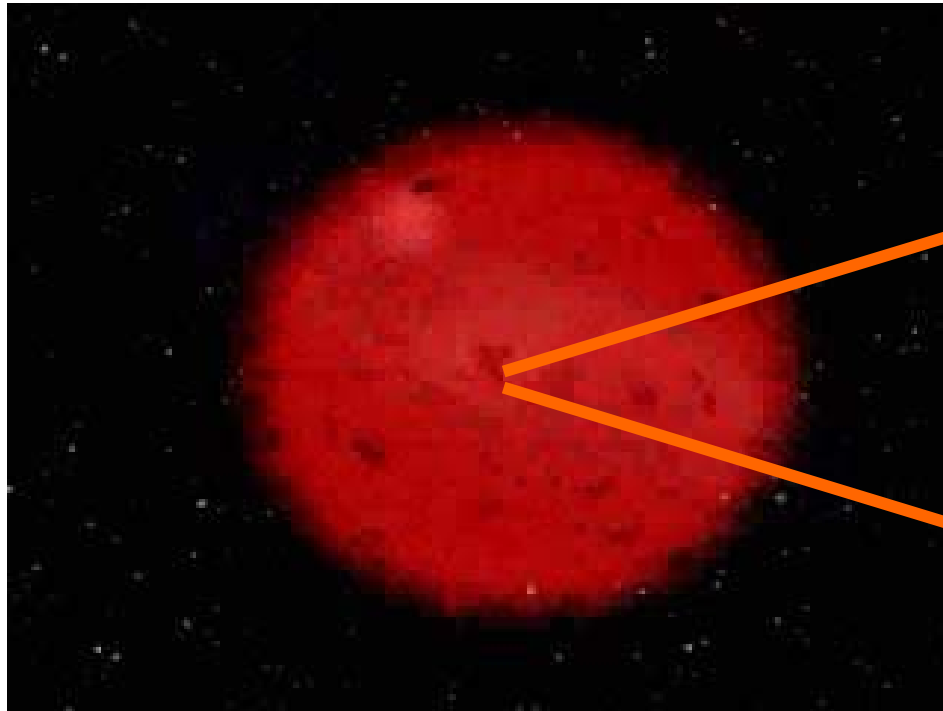


## El ciclo de las estrellas masivas





## Colapso gravitacional de un núcleo de hierro



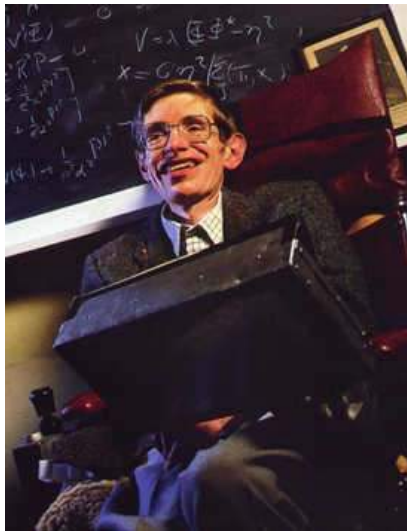
Explosión de supernova

## Fases finales de la vida de las estrellas

Masa inicial	Masa terminal	
$< 8 M_{\odot}$	$< 1.4 M_{\odot}$	Enana blanca
$(8 - 25) M_{\odot}$	$(1.4 - 3) M_{\odot}$	Estrella de neutrones
$> (20 - 25) M_{\odot}$	$> 3 M_{\odot}$	Agujero negro estelar

Es decir, sólo las estrellas muy masivas pueden evolucionar hacia agujeros negros.

# SECCIÓN 4. El primer agujero negro detectado: Cygnus X-1



Stephen Hawking

Whereas Stephen Hawking has such a large investment in General Relativity and Black Holes and desires an insurance policy, and whereas Kip Thorne likes to live dangerously without an insurance policy,

Therefore be it resolved that Stephen Hawking bets 1 year's subscription to "Penthouse" as against Kip Thorne's wager of a 4-year subscription to "Private Eye", that Cygnus X-1 does not contain a black hole of mass above the Chandrasekhar limit.

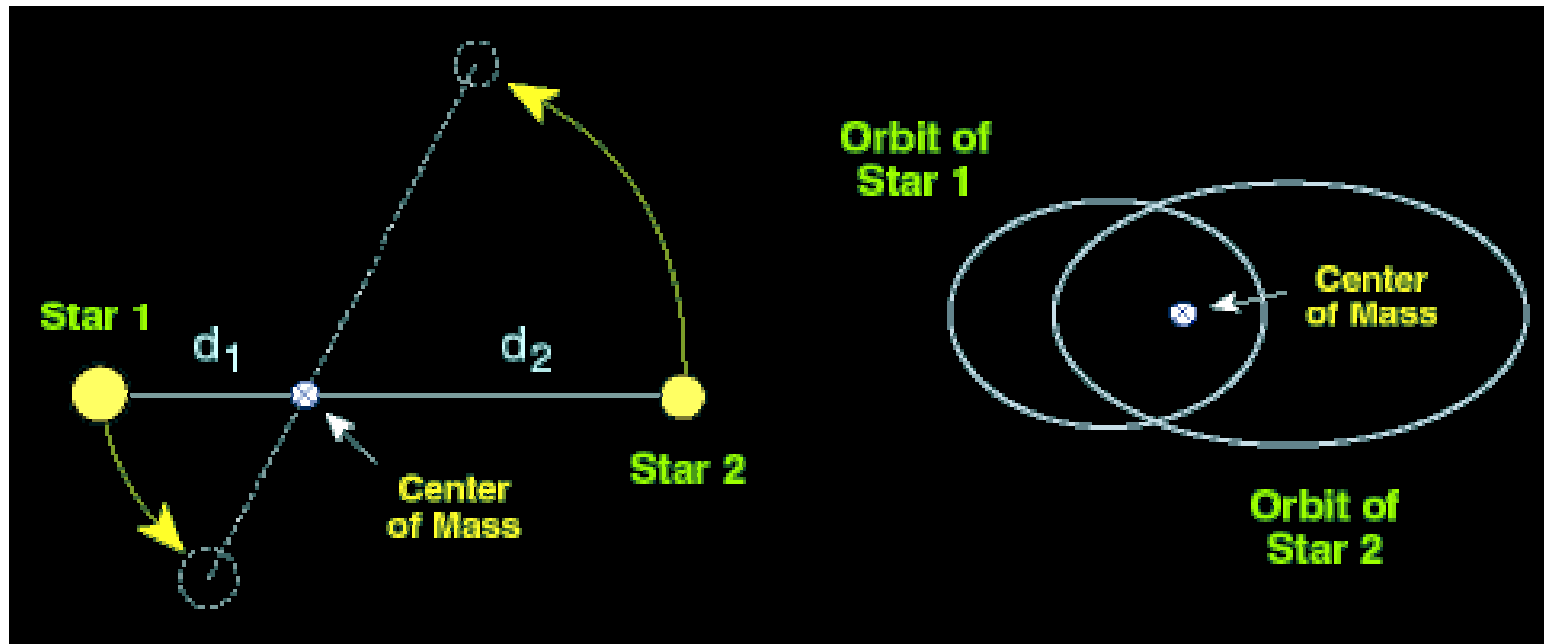
*Stephen Hawking*      *Kip S. Thorne*

Witnessed their trusts  
day of December 1974  
Aronson Anna Zylens Werner J.



Kip S. Thorne

## Sistemas binarios



Si se calcula masa total del sistema y la masa de la estrella normal de forma independiente, se puede saber la masa del objeto invisible.

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{P^2} ;$$

$a$  (UA)

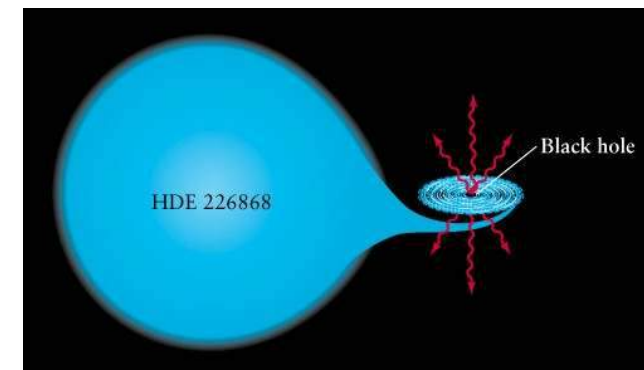
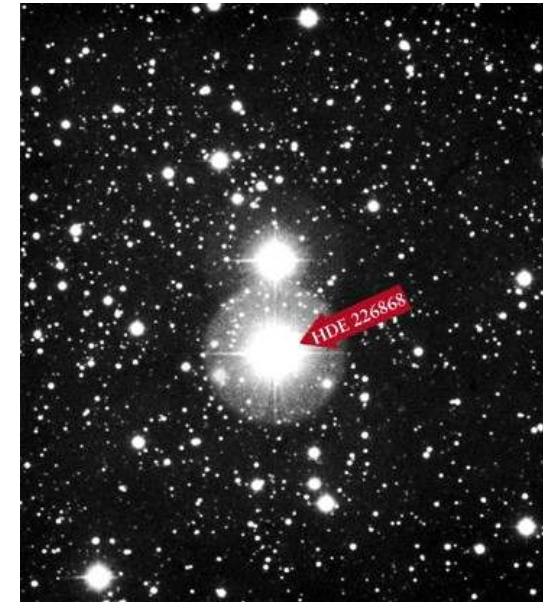
$P$  (años)

$M_1 + M_2$  (masas solares)

A partir de la variación de la radiación X observada podemos calcular el radio  $R$  del objeto invisible que acreta la materia.

Podemos saber si  $R < R_s$

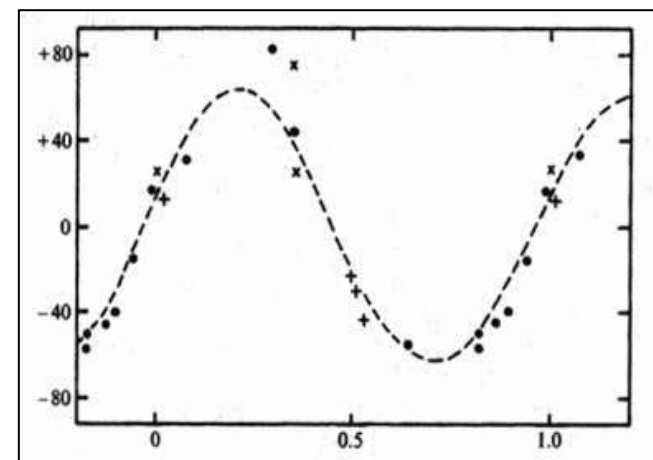
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$





## Proceso de detección del agujero negro Cygnus X-1

- Se observa una fuente brillante en rayos X.
- En la parte visual del espectro se ve una estrella de 30 masas solares con una velocidad radial espectroscópica que sugiere un periodo de 5.6 días.
- El objeto, que es sólo detectable en rayos X, tiene una masa entre 5 y 10 masas solares.

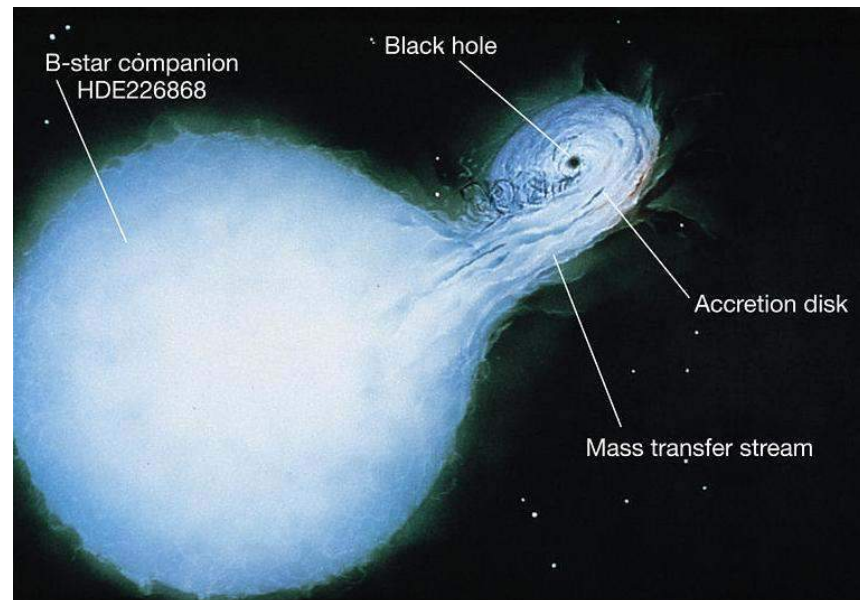


## ¿De qué se trata?

- 1) Si fuera una gigante roja se vería en el óptico.
- 2) Lo mismo ocurriría si fuera una estrella de la secuencia principal.
- 3) No puede ser una enana blanca ya que  $M > 1.4M_{\odot}$ .
- 4) Tampoco una estrella de neutrones al ser  $M > 3M_{\odot}$ .

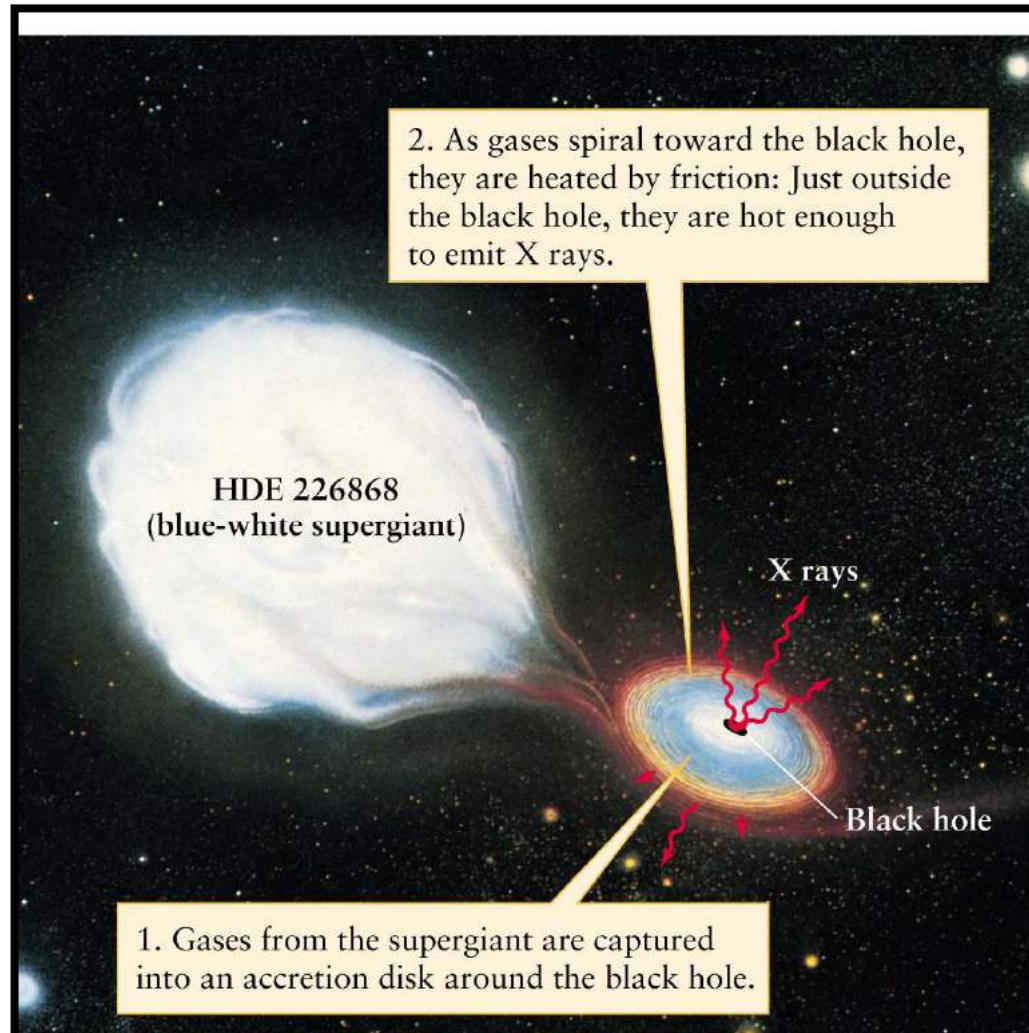


- 5) Además, una enana blanca que acreta materia emitiría radiación UV, que no se observa.
- 6) Si fuera una estrella de neutrones se detectarían rayos X blandos. Pero en Cyg X-1 vemos rayos X duros que interpretamos como acreción de materia que cae en una fuente de alto potencial gravitatorio.



Por eliminación, debe ser un AGUJERO NEGRO.

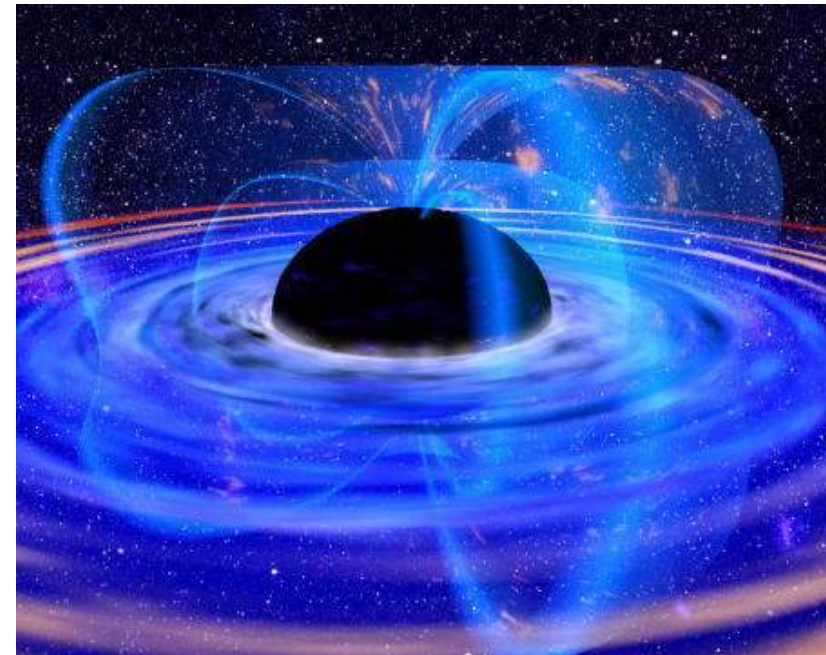
## ¿El agujero negro en Cygnus X-1 está devorando a la supergigante azul?



Menos de un milésima parte de la masa de la supergigante azul caerá al agujero negro antes de que ella también muera, más o menos dentro de un millón de años.

## ¿Por qué se observan rayos X de un agujero negro?

- Los agujeros negros capturan el material estelar cercano.
- Como el gas se mantiene cerca del agujero negro, lo calienta hasta temperaturas de millones de grados.
- El gas a esas temperaturas emite tremendas cantidades de energía en forma de rayos X.
- Cuanto más masivo es el agujero negro, mayor es el empuje gravitacional y mayor el efecto sobre la estrella visible.



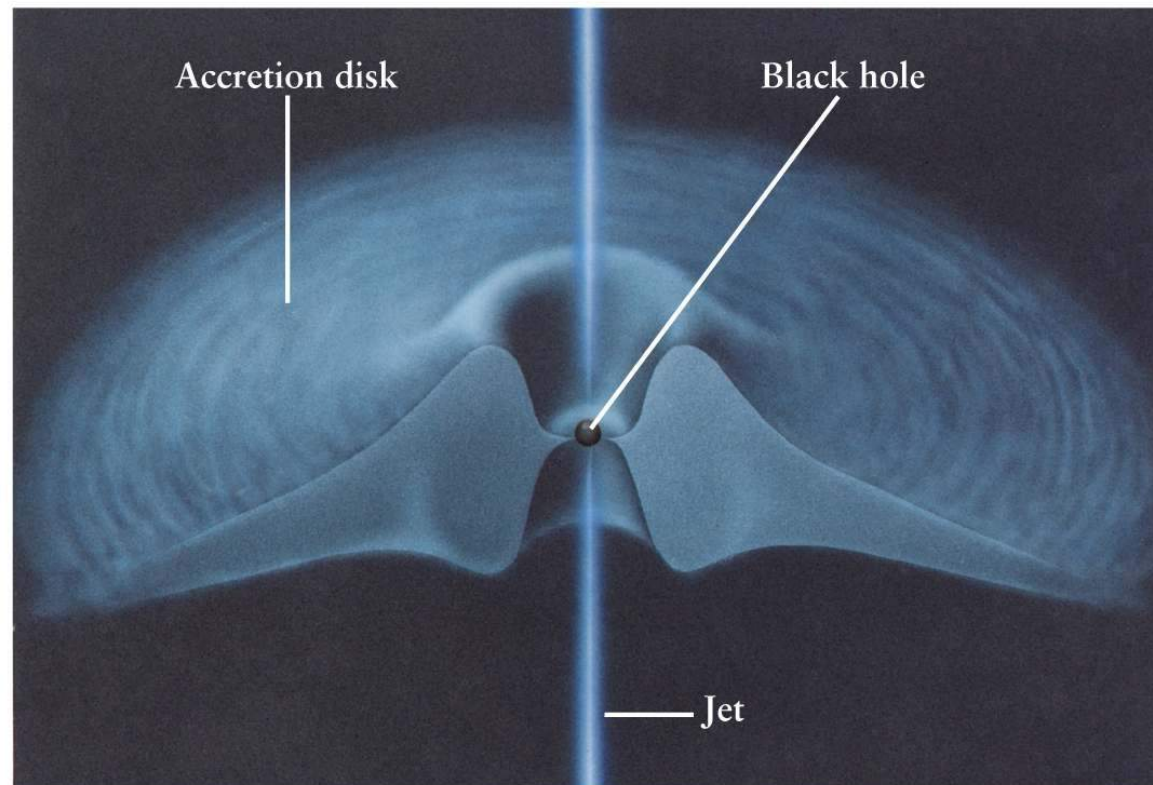


## Formación de un disco de acreción



La materia que cae hacia el agujero negro lo hace en una espiral. El momento angular del gas y polvo que cae, causa que se forme un disco de acreción alrededor del agujero.

## Chorros de materia creados por un agujero negro en un sistema binario



Parte de la materia que cae en espiral en el disco alrededor del agujero se calienta extraordinariamente y es redirigida hacia fuera. Esto produce dos poderosos chorros de partículas que se mueven a velocidades próximas a la de la luz.

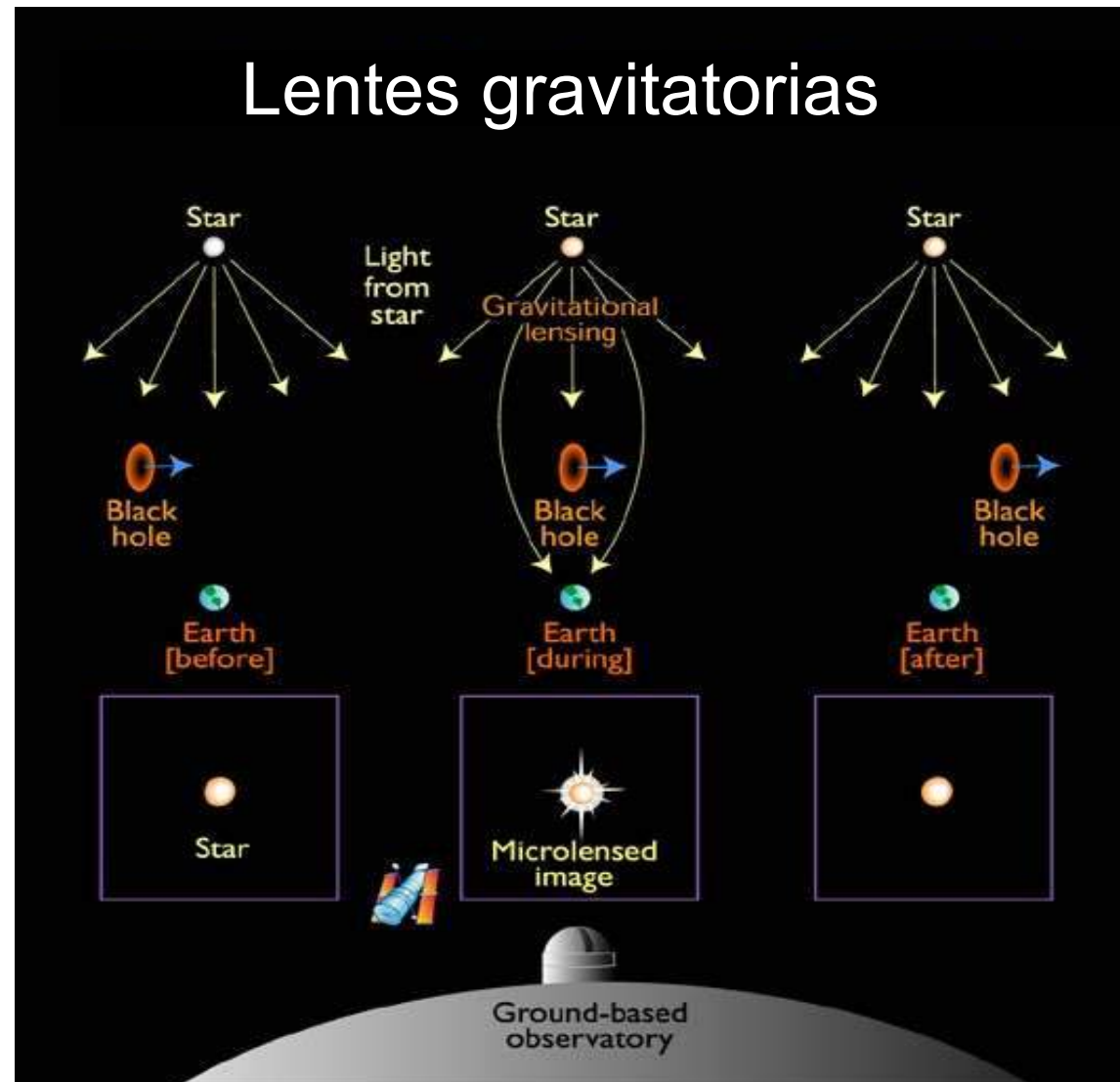
## Algunos candidatos a agujeros negros

**TABLE 11-2**

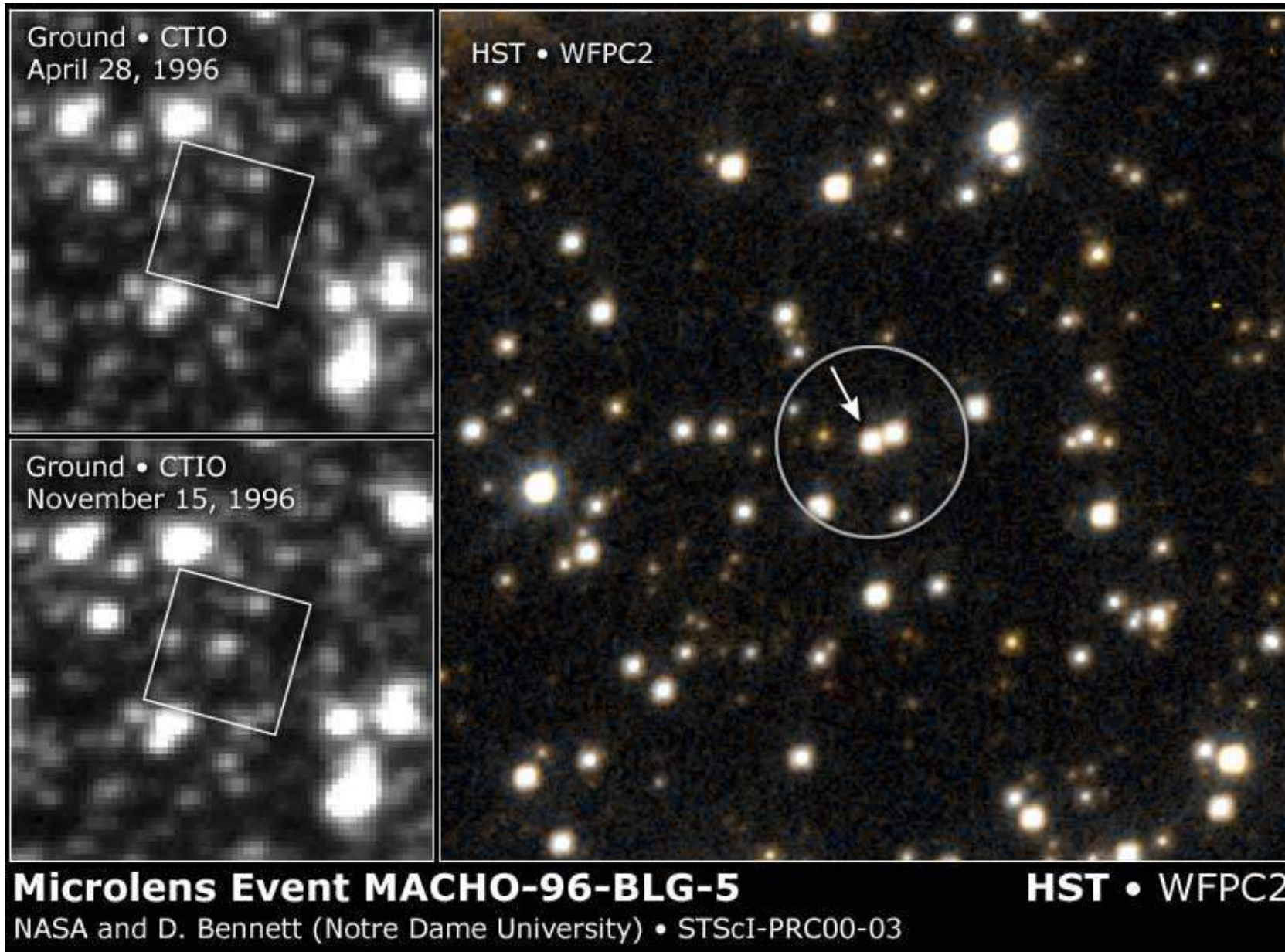
Nine Black Hole Candidates

Object	Location	Companion Star	Orbital Period	Mass of Compact Object
Cygnus X-1	Cygnus	O supergiant	5.6 days	$>3.8 M_{\odot}$
LMC X-3	Dorado	B3 main-sequence	1.7 days	$\sim 10 M_{\odot}$
V616 Mon	Monocerotis	K main-sequence	7.75 hours	$10 \pm 5 M_{\odot}$
V404 Cygni	Cygnus	K main-sequence	6.47 days	$12 \pm 2 M_{\odot}$
J1655-40	Scorpius	F-G main-sequence	2.61 days	$6.9 \pm 1 M_{\odot}$
QZ Vul	Vulpecula	K main-sequence	8 hours	$10 \pm 4 M_{\odot}$
4U 1543-47	Lupus	A main-sequence	1.123 days	$2.7-7.5 M_{\odot}$
V4641 Sgr	Sagittarius	B supergiant	2.81678 days	$8.7-11.7 M_{\odot}$
XTEJ1118+480	Ursa Major	K main-sequence	0.170113 days	$>6 M_{\odot}$

## Otra forma de detectar agujeros negros











(a) Looking directly toward the black hole from a distance of 1000 Schwarzschild radii: Note positions of stars 1, 2, and 3.



(b) Looking directly toward the black hole from a distance of 10 Schwarzschild radii: Light bending causes multiple images.



Albert Einstein

La Relatividad General fue desarrollada por Einstein entre 1907 y 1915 en estrecha colaboración con los matemáticos Grossmann, Hilbert, Levi-Civita.

## SECCIÓN 5. Relatividad y Agujeros Negros.



Marcel Grossmann



David Hilbert



Tullio Levi-Civita

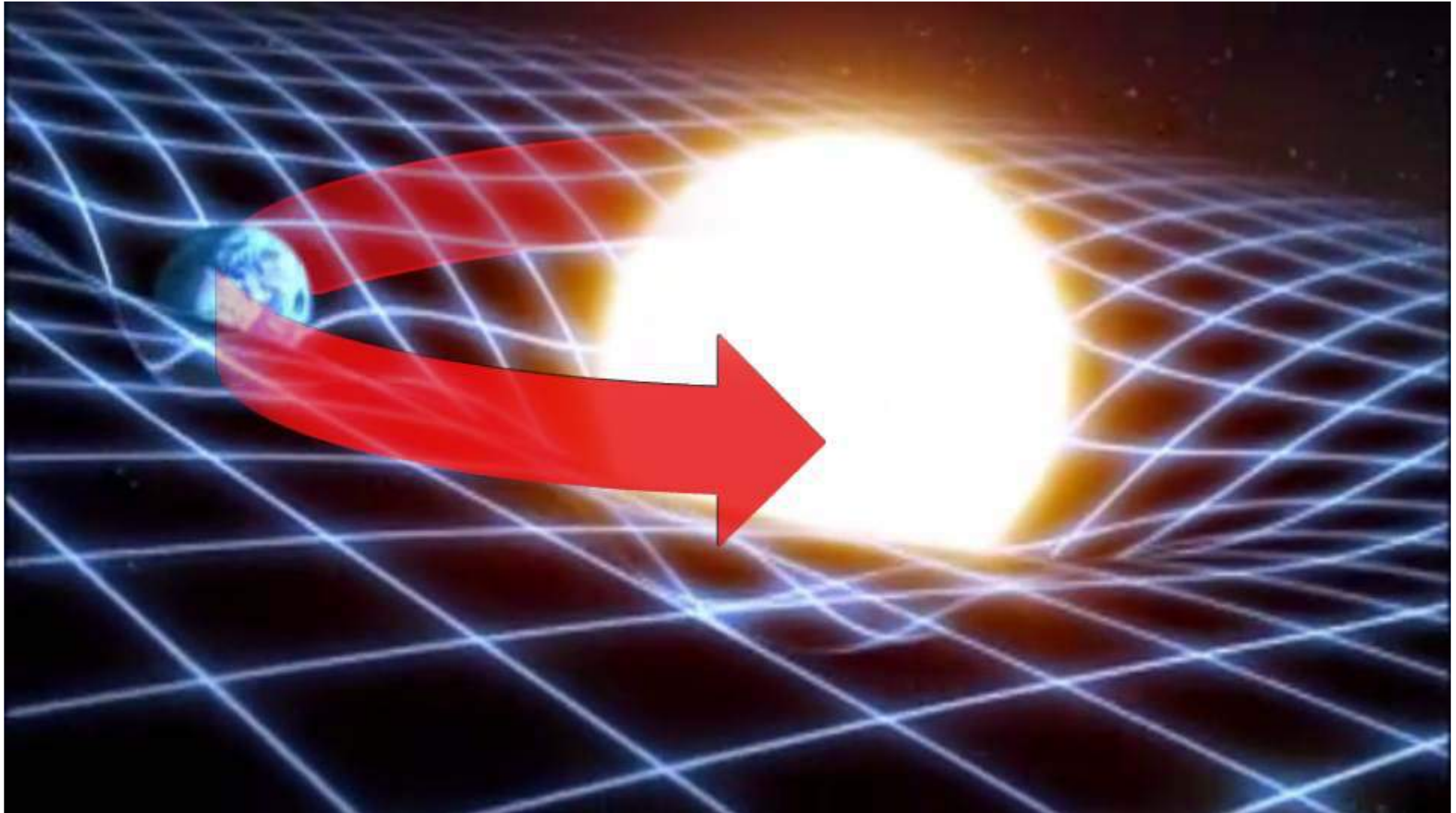
## Principio de Equivalencia

En 1907, Einstein estaba preparando una revisión de la Relatividad Especial cuando se dio cuenta de que gravitación newtoniana debía ser modificada para que fuera coherente con la Relatividad Especial. En este punto se le ocurrió, según sus propias palabras *la idea más profunda de su vida*: un observador que cae desde un tejado de una casa no experimenta la acción de la gravedad.

Se trata de su **Principio de Equivalencia aceleración-gravedad**:

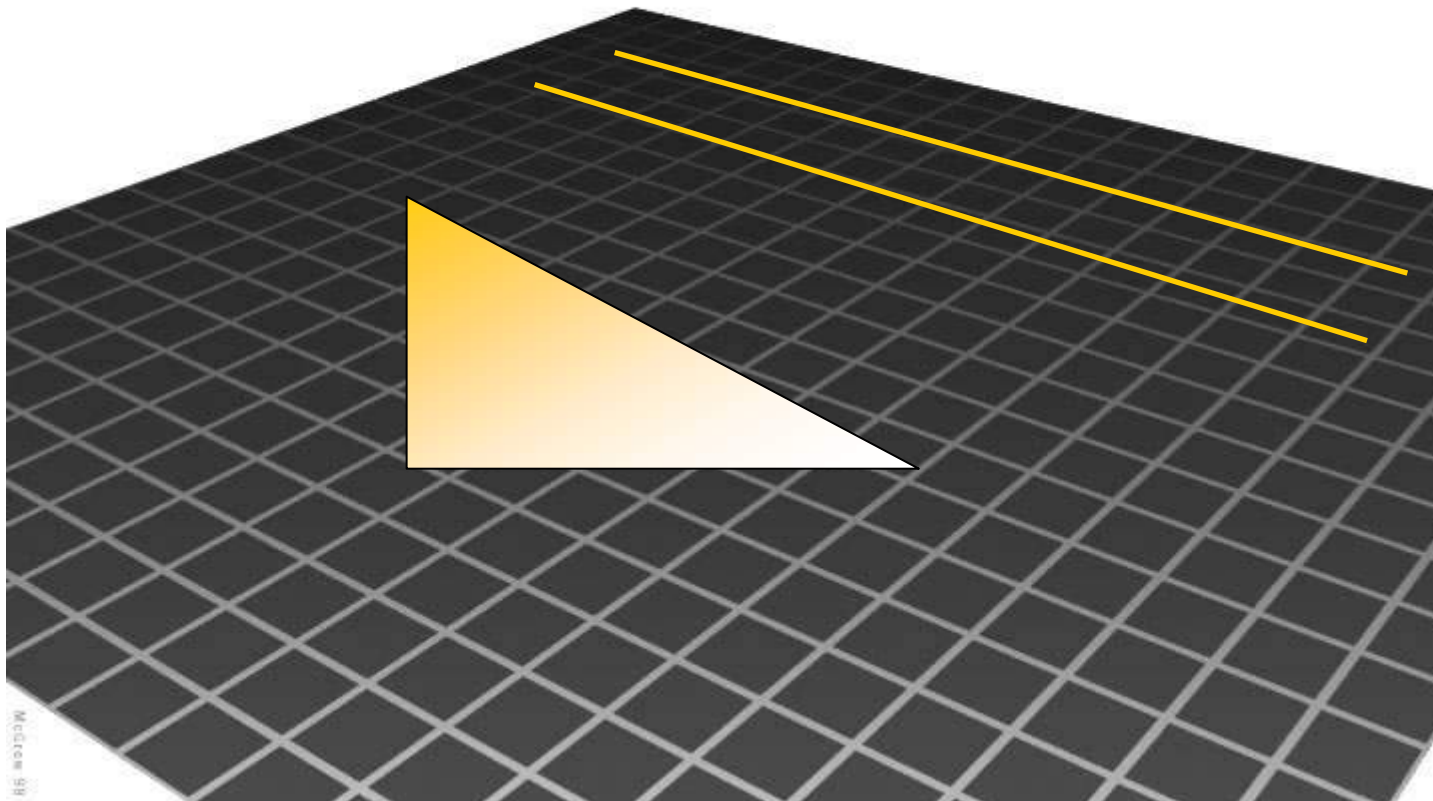
*Existe una completa equivalencia física entre un campo gravitatorio y la correspondiente aceleración del sistema de referencia.*

## La materia distorsiona el espacio-tiempo



## El espacio-tiempo es un “tejido”...

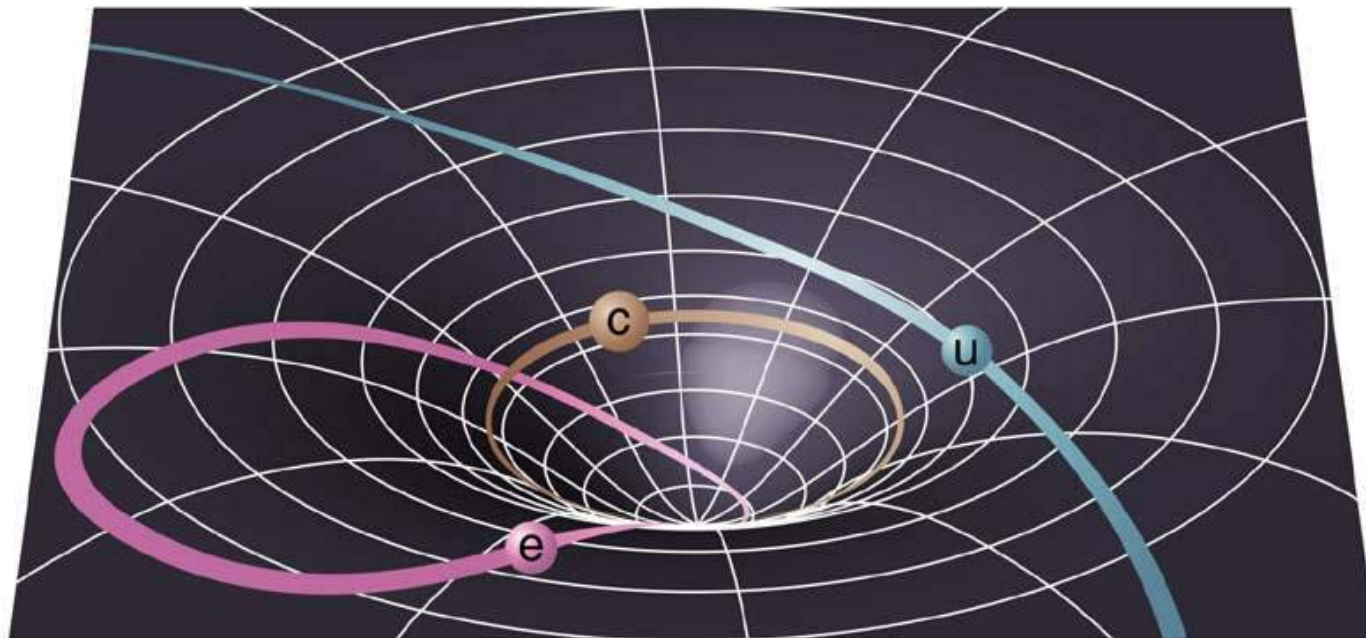
En ausencia de materia, el espacio-tiempo es plano: la suma de los ángulos de un triángulo es  $180^\circ$  y las líneas paralelas nunca se cortan.



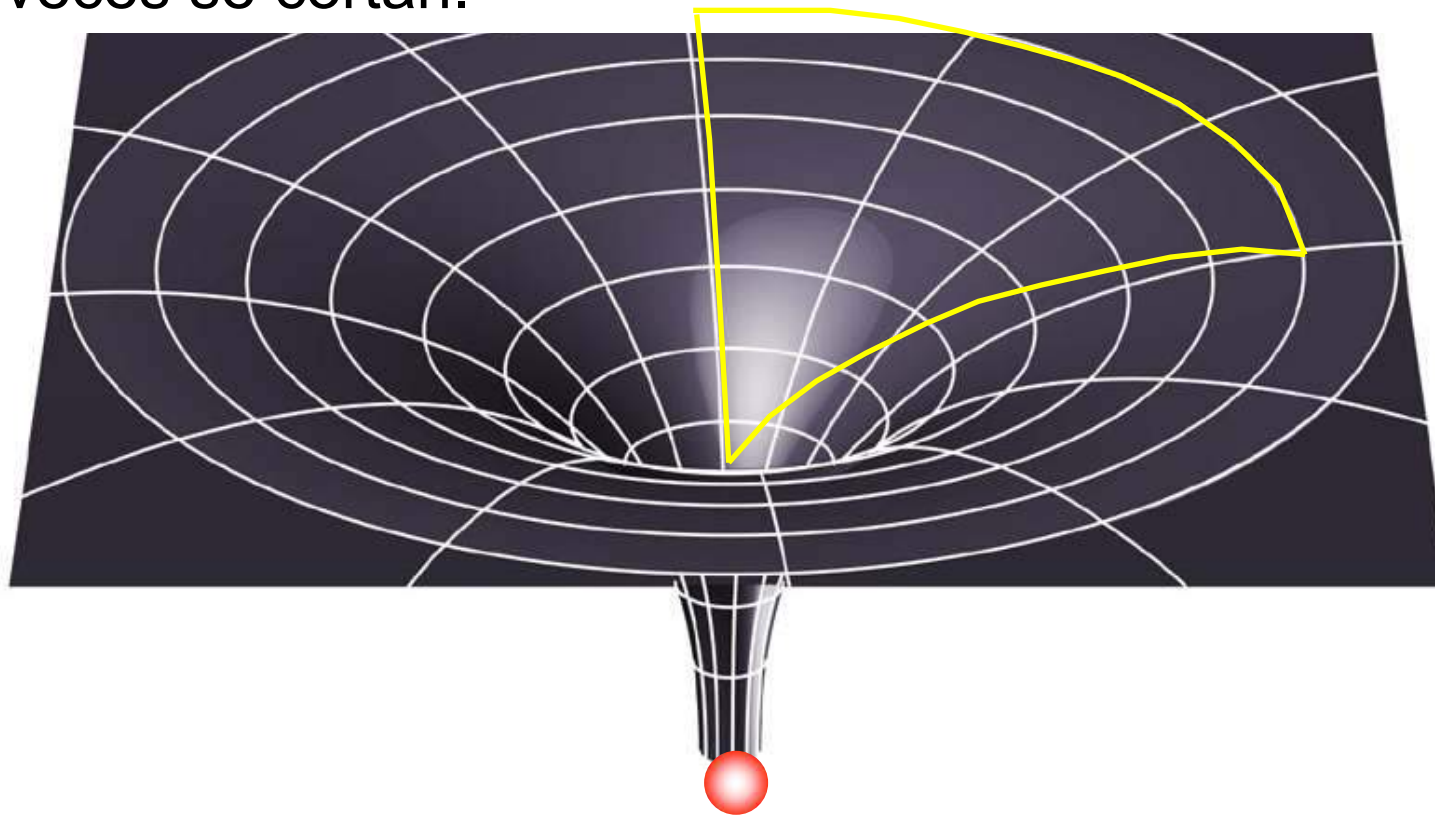


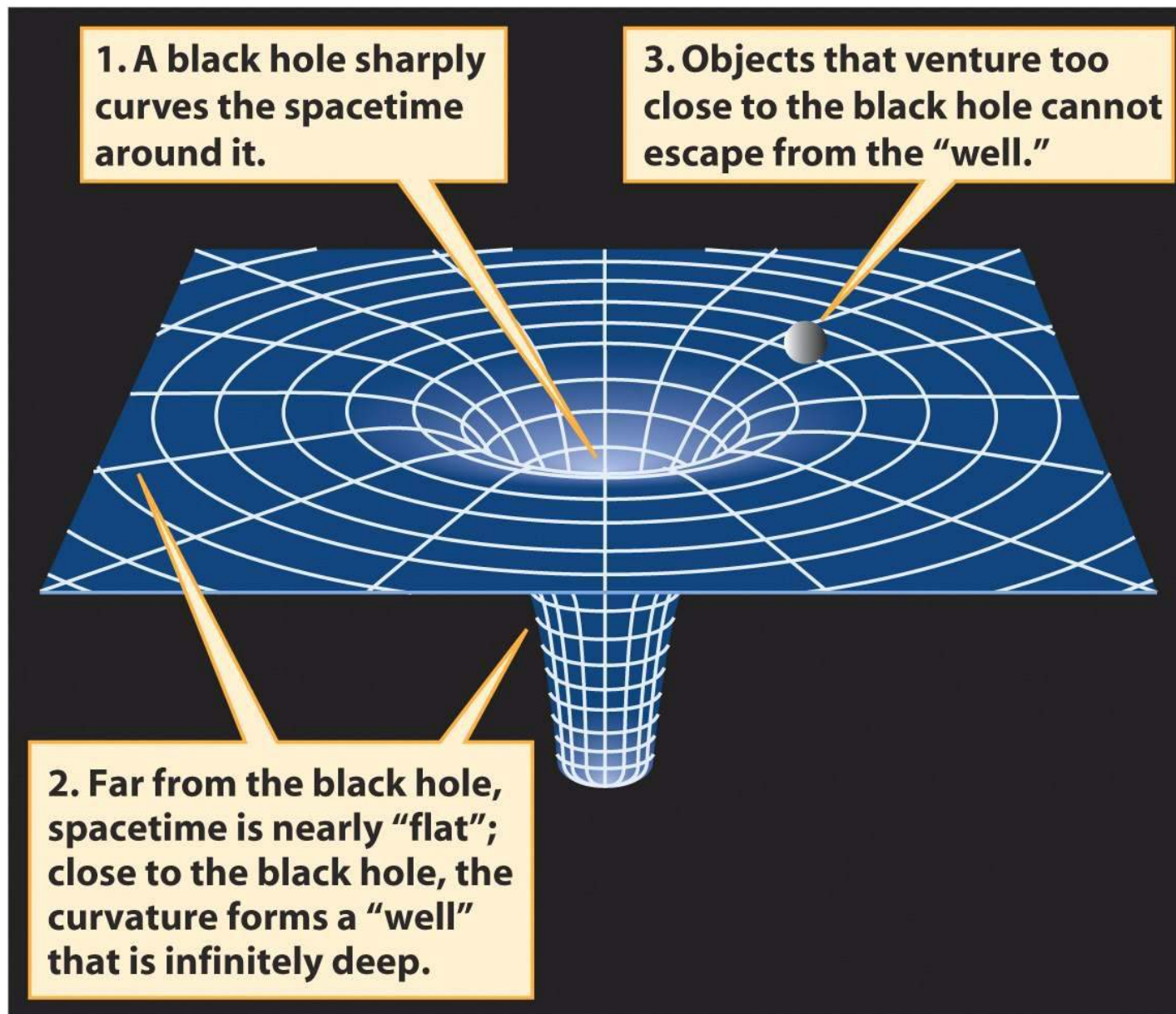
# La gravedad se explica como la curvatura del espacio-tiempo

- c órbita circular
- e órbita elíptica
- u órbita abierta

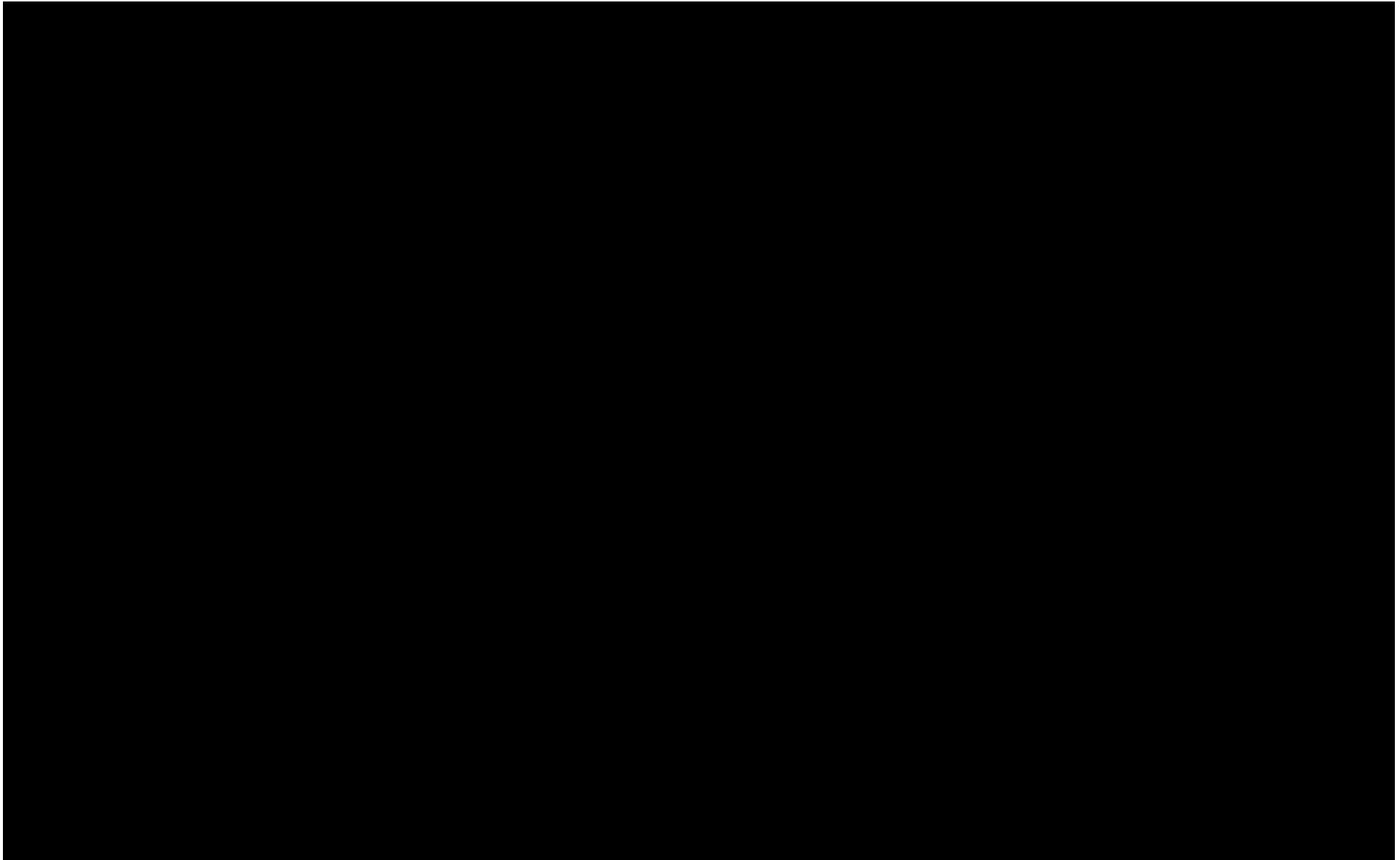


En presencia de objetos masivos, el espacio-tiempo se curva: la suma de los ángulos de un triángulo ya no es  $180^\circ$  y las líneas paralelas a veces se cortan.





## Los agujeros negros: un caso de curvatura extrema

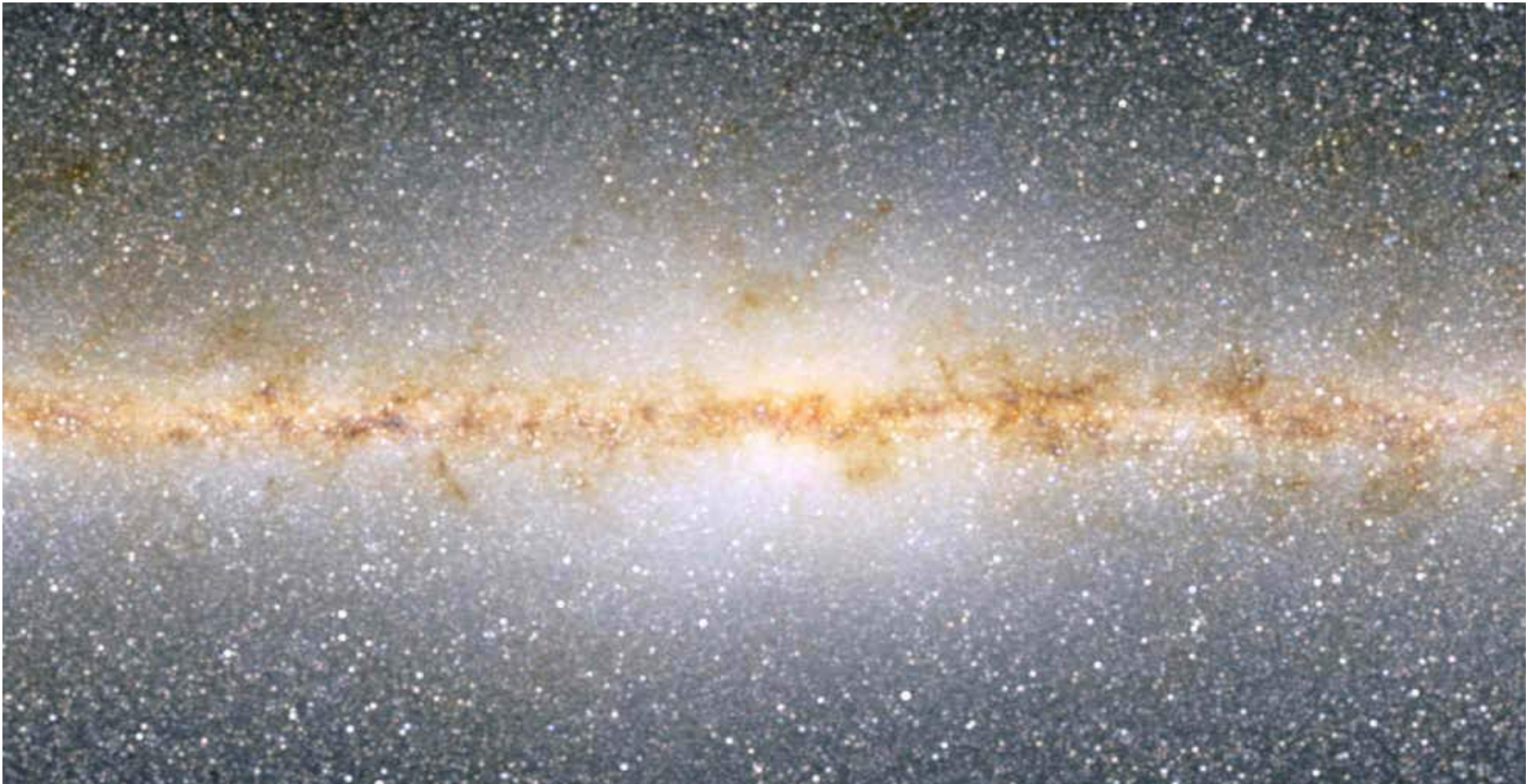


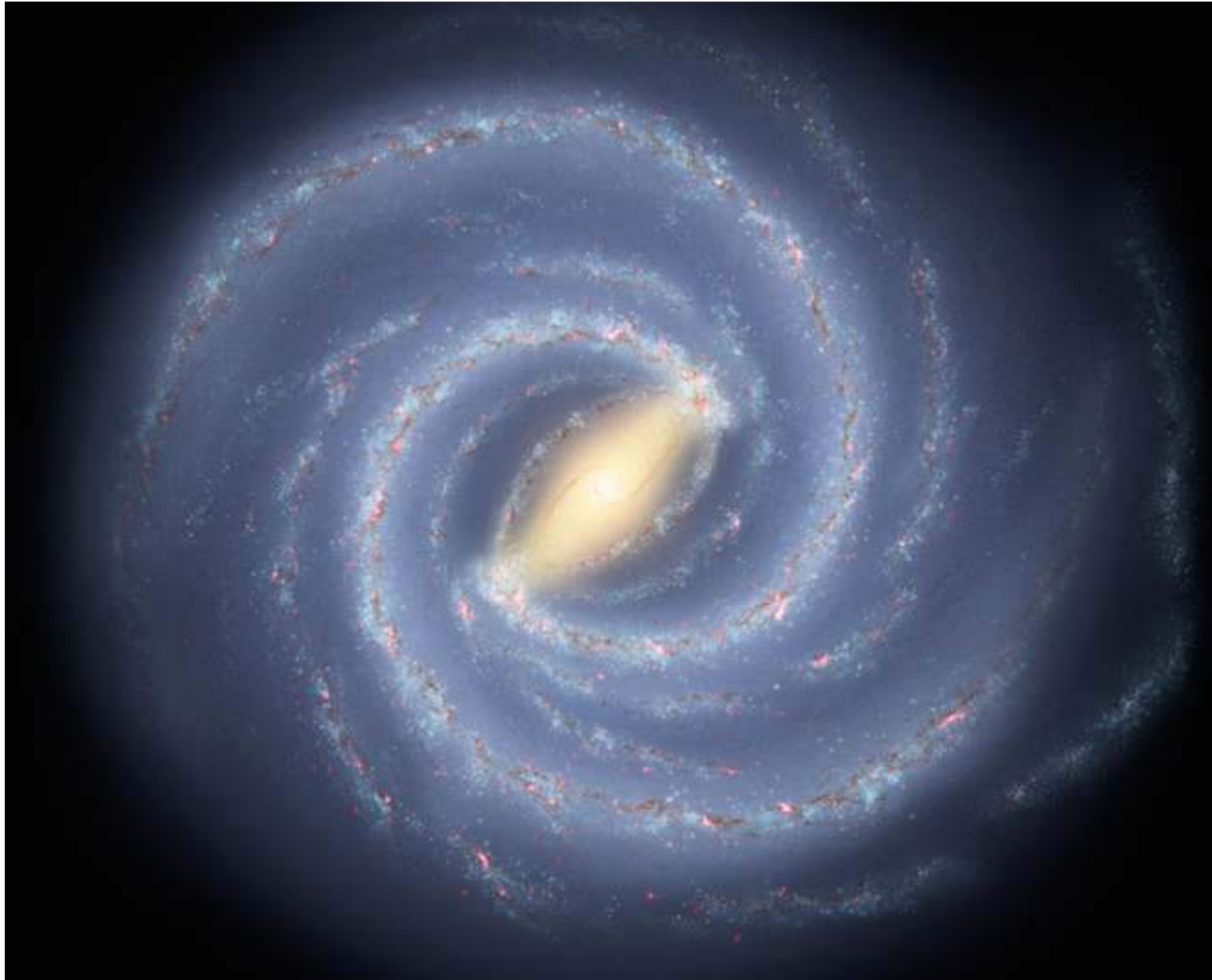


INTERMEDIO



## SECCIÓN 6. El centro de la Vía Láctea

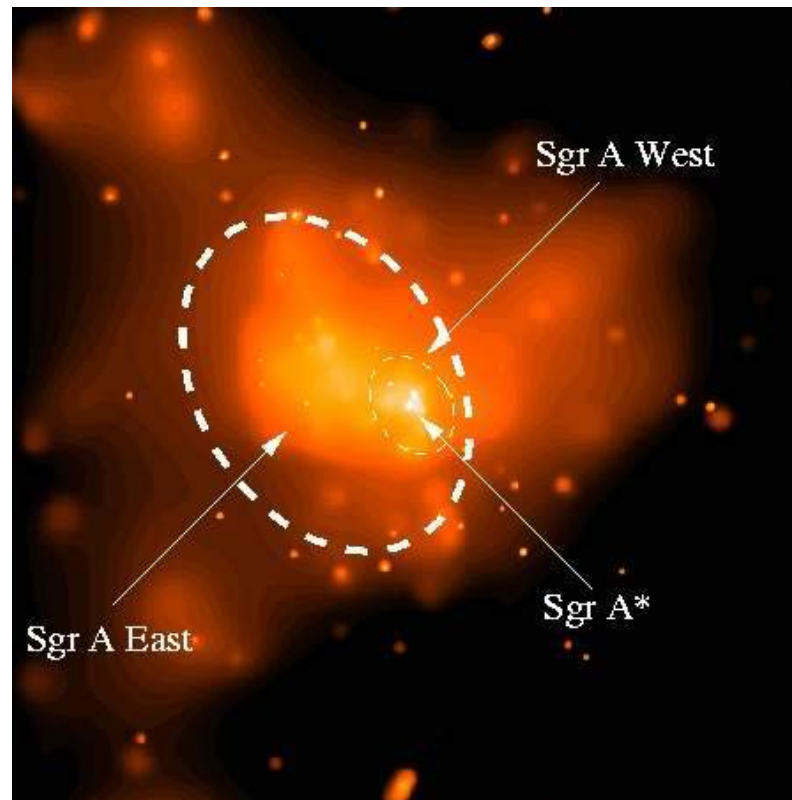






En luz visible el centro galáctico está fuertemente oscurecido por nubes de polvo y gas (una extinción de 30 magnitudes)

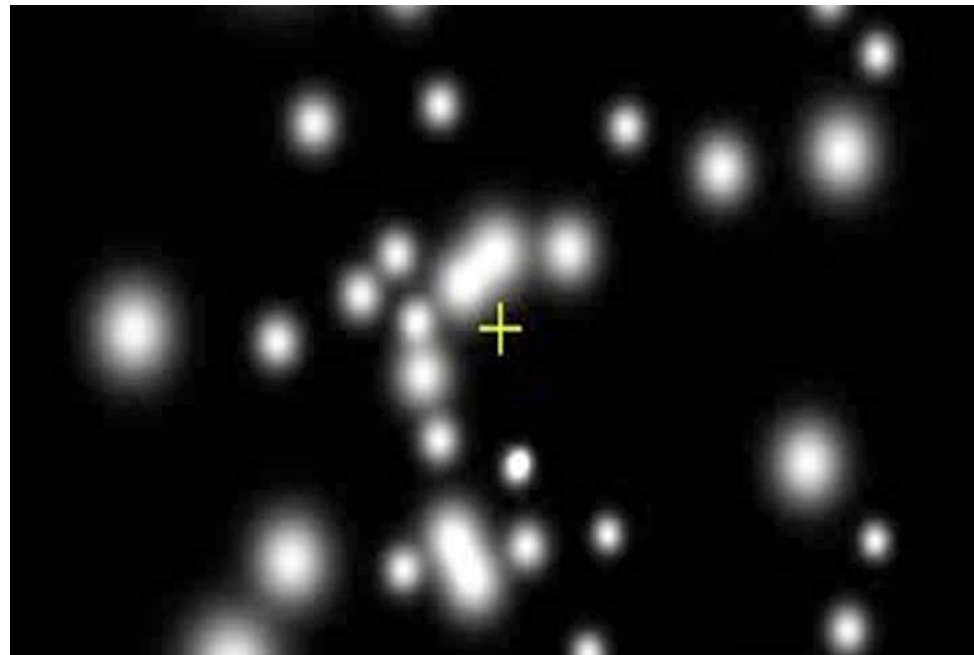




En el centro galáctico hay una compleja estructura radioemisora llamada Sagitario A con tres componentes:

- Un resto de supernova, Sagitario A Este.
- Una estructura espiral, Sagitario A Oeste.
- Una fuente de radio muy brillante en el centro de la espiral, Sagitario A\*.

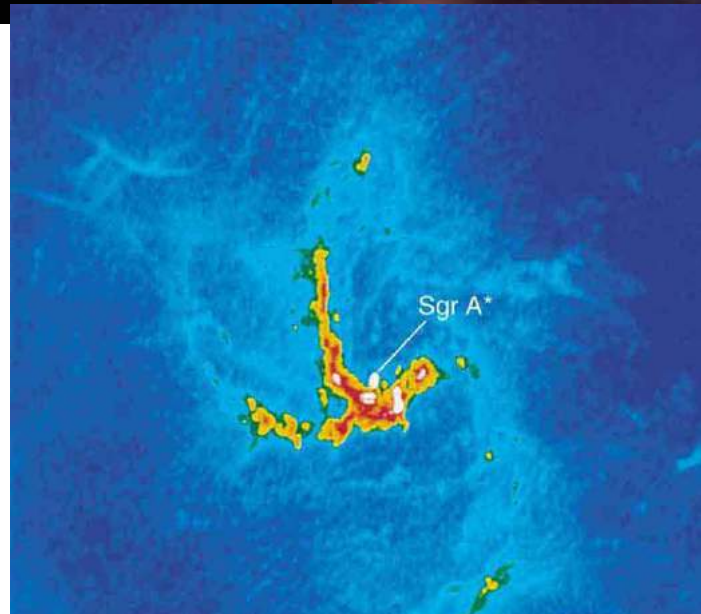
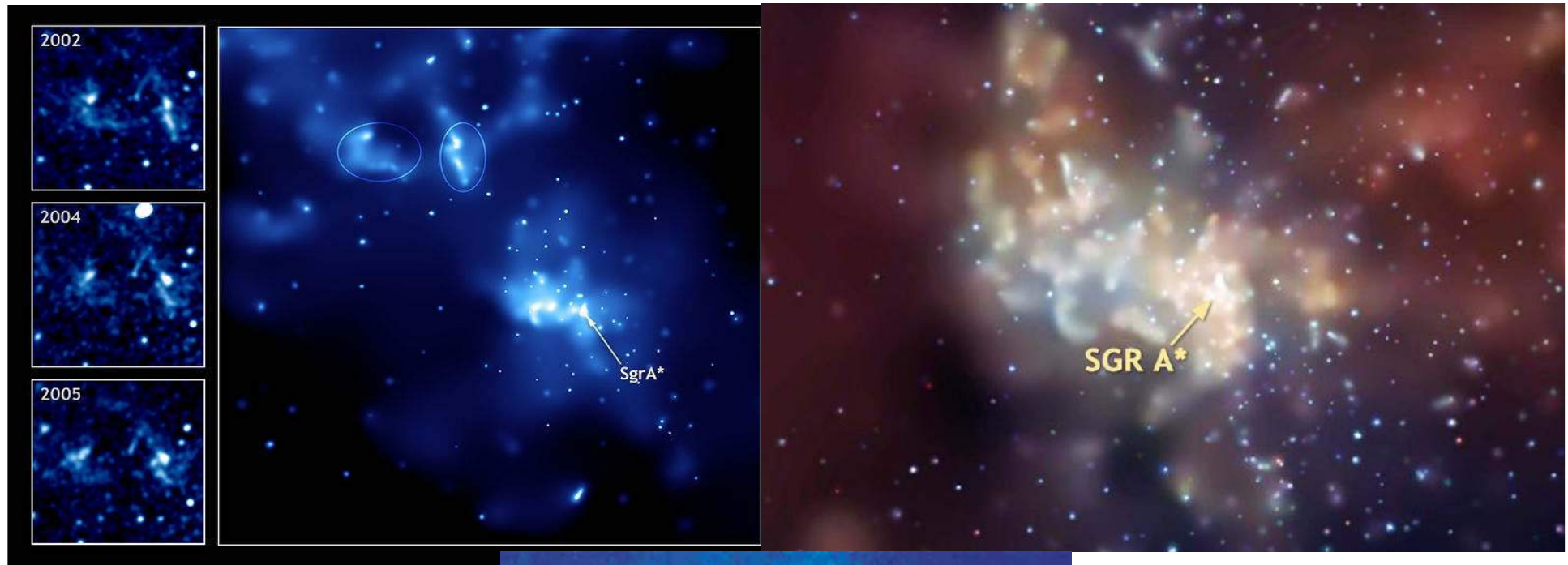
Si se mira con grandes telescopios o cámaras en el IR cercano sólo se ven estrellas que se mueven muy rápido (hasta 5000 kilómetros por segundo), localizándose las más rápidas en el centro (en la cruz), donde se encuentra la potente fuente de radio Sagittarius A\*.



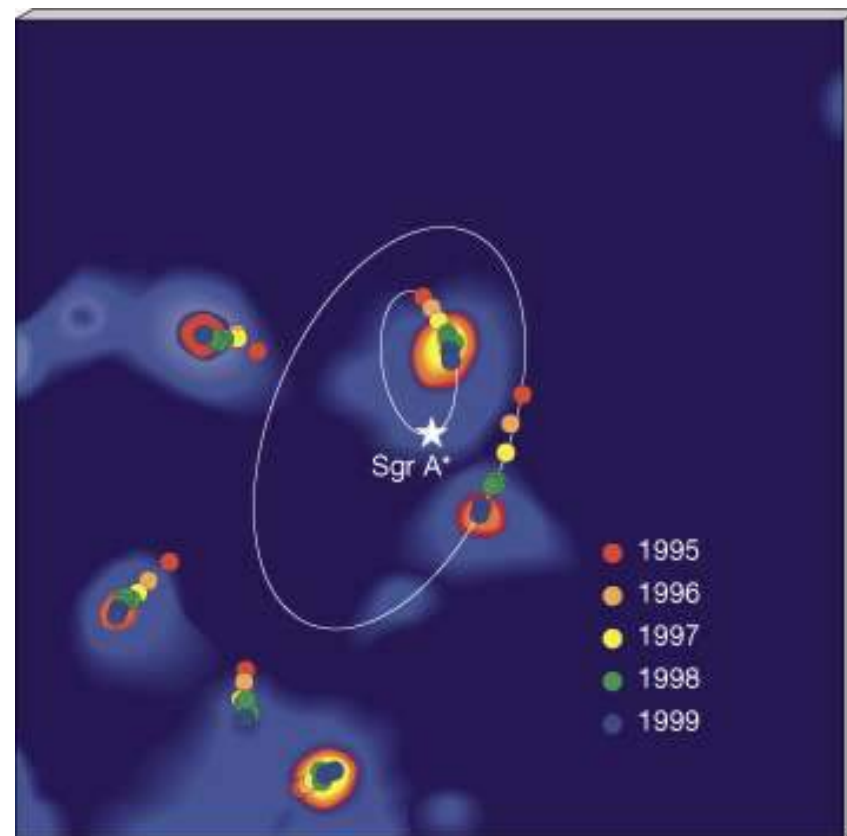
Distancia entre estrellas  $< 0.01$  pc.

Las estrellas están tan cerca unas de otras que, si nuestro Sistema Solar estuviese situado allí, habría estrellas incluso entre los planetas.



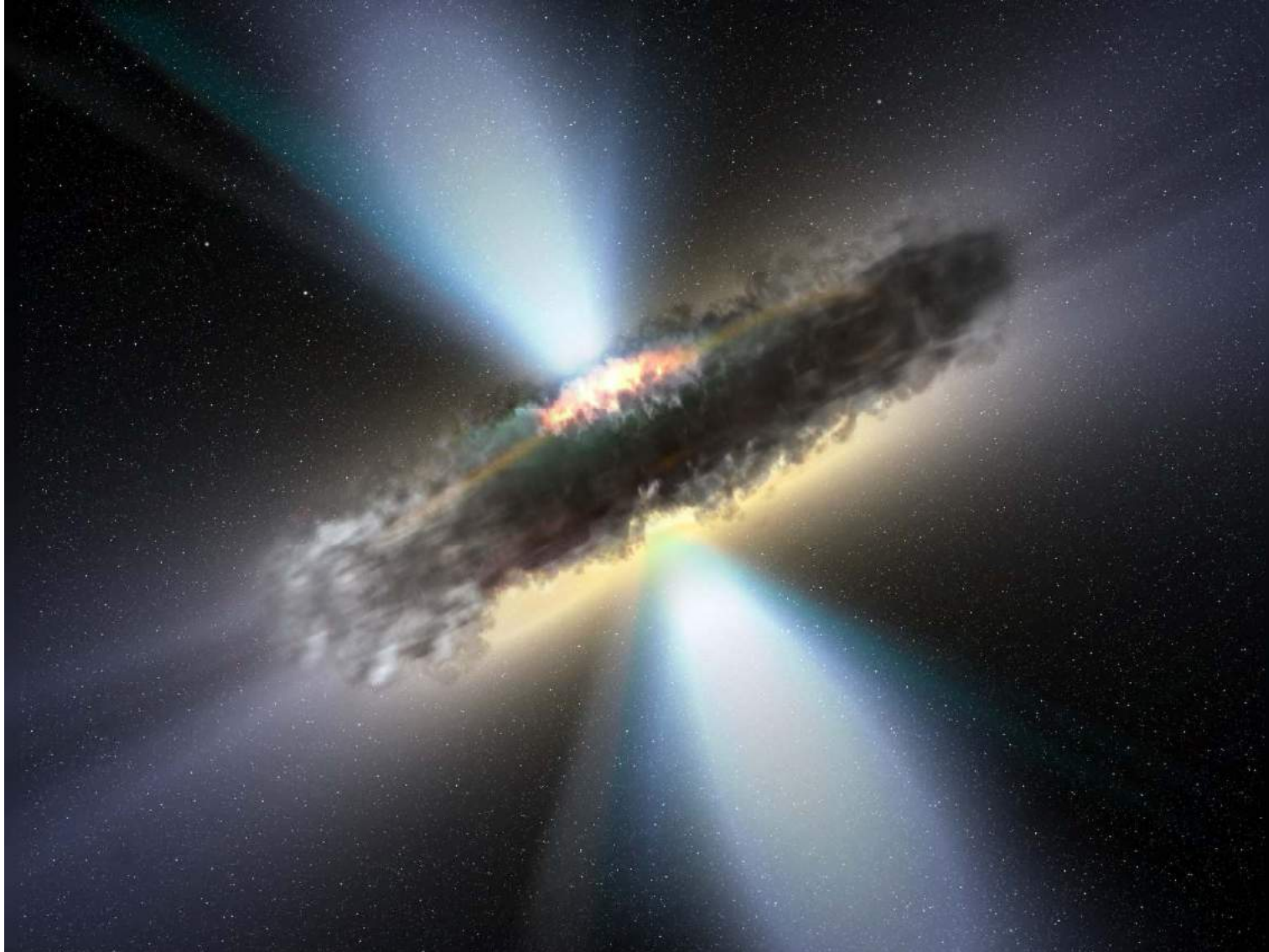


Las observaciones de las órbitas de las estrellas alrededor de Sagitario A\*, permiten calcular que hay un objeto a unos 27.000 años-luz con una masa del orden de 4 millones de veces la masa solar en un radio no mayor de 45 UA (la distancia media Sol-Plutón es 39,5 UA).



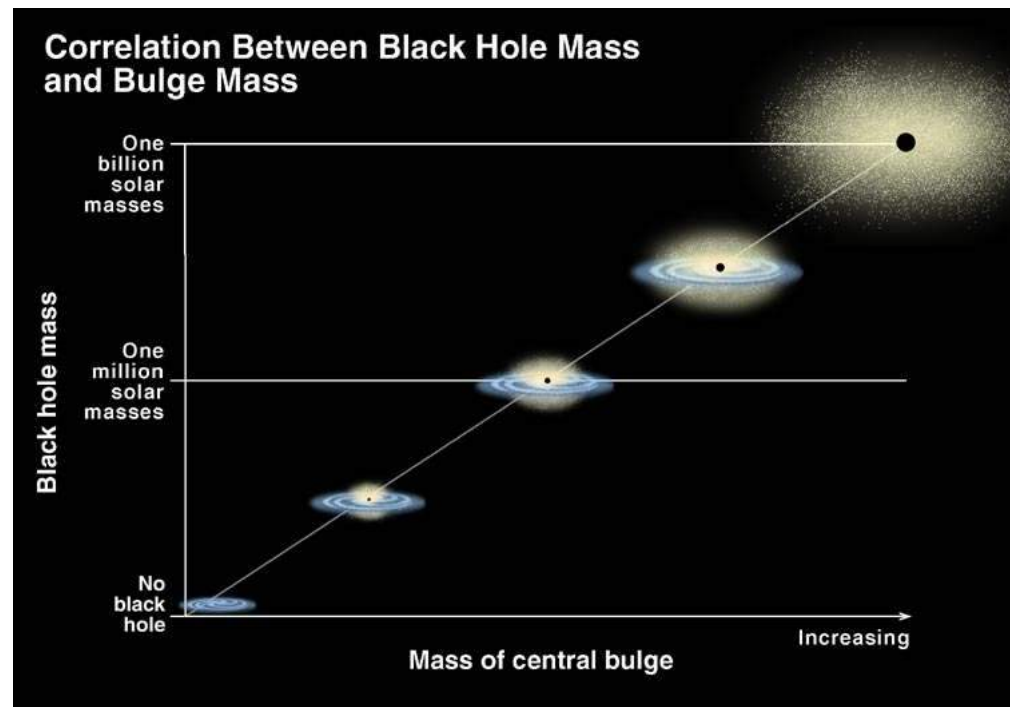
**ES UN AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO**

# SECCIÓN 7. Agujeros negros supermasivos



## ¿Cómo se detectan AN en los núcleos galácticos?

- Se puede medir con precisión la velocidad del gas y de las estrellas que se encuentran alrededor de un agujero negro.

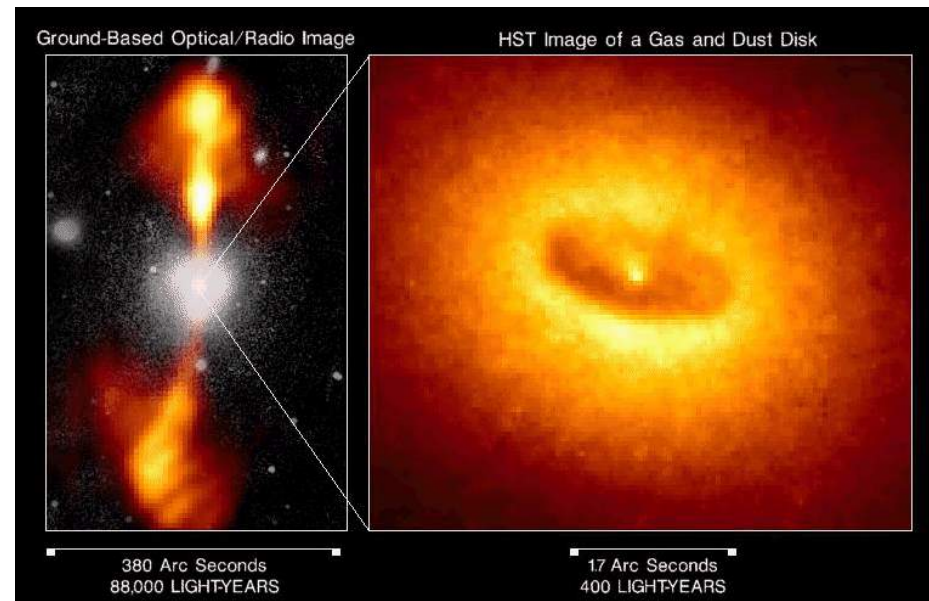


- Se ha descubierto una correlación entre la masa de un agujero negro y el aumento de velocidad de las estrellas en el bulbo central de una galaxia. Cuanto más rápidamente se muevan las estrellas, más masa tendrá el agujero negro.



Los núcleos de muchas galaxias tienen objetos muy compactos y discos de acreción con posibles agujeros negros

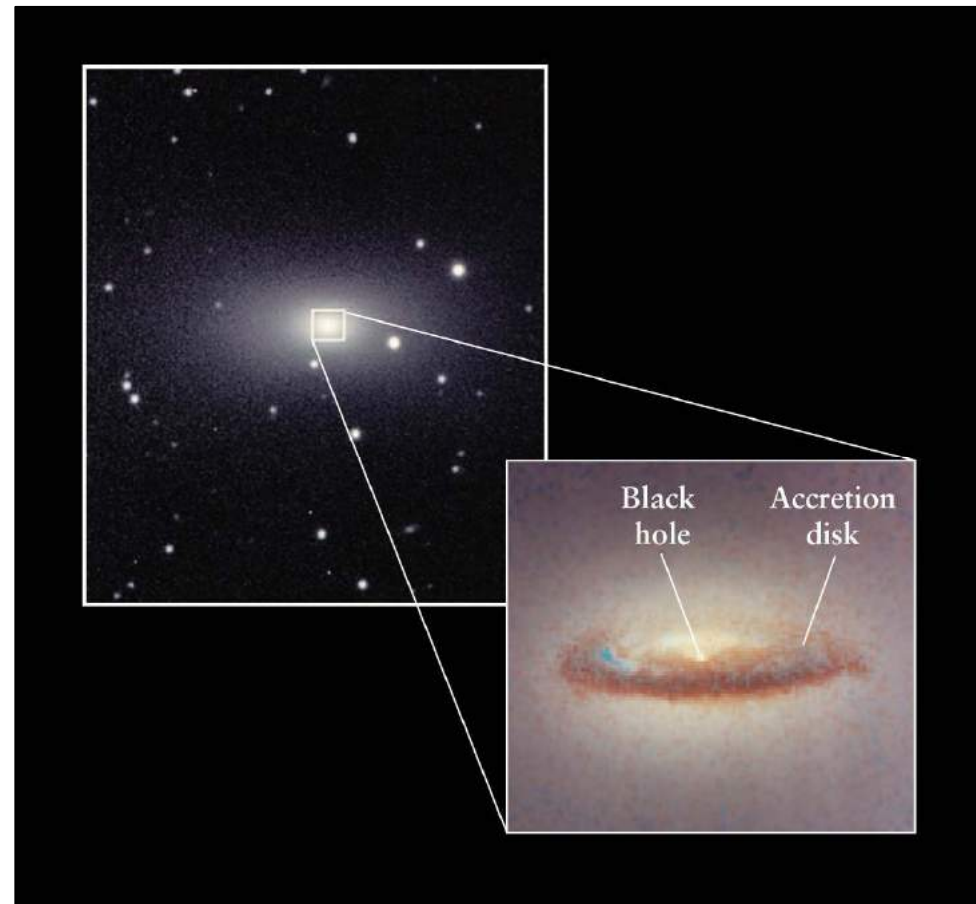
Un ejemplo:  
NGC 4261, galaxia elíptica gigante en Virgo



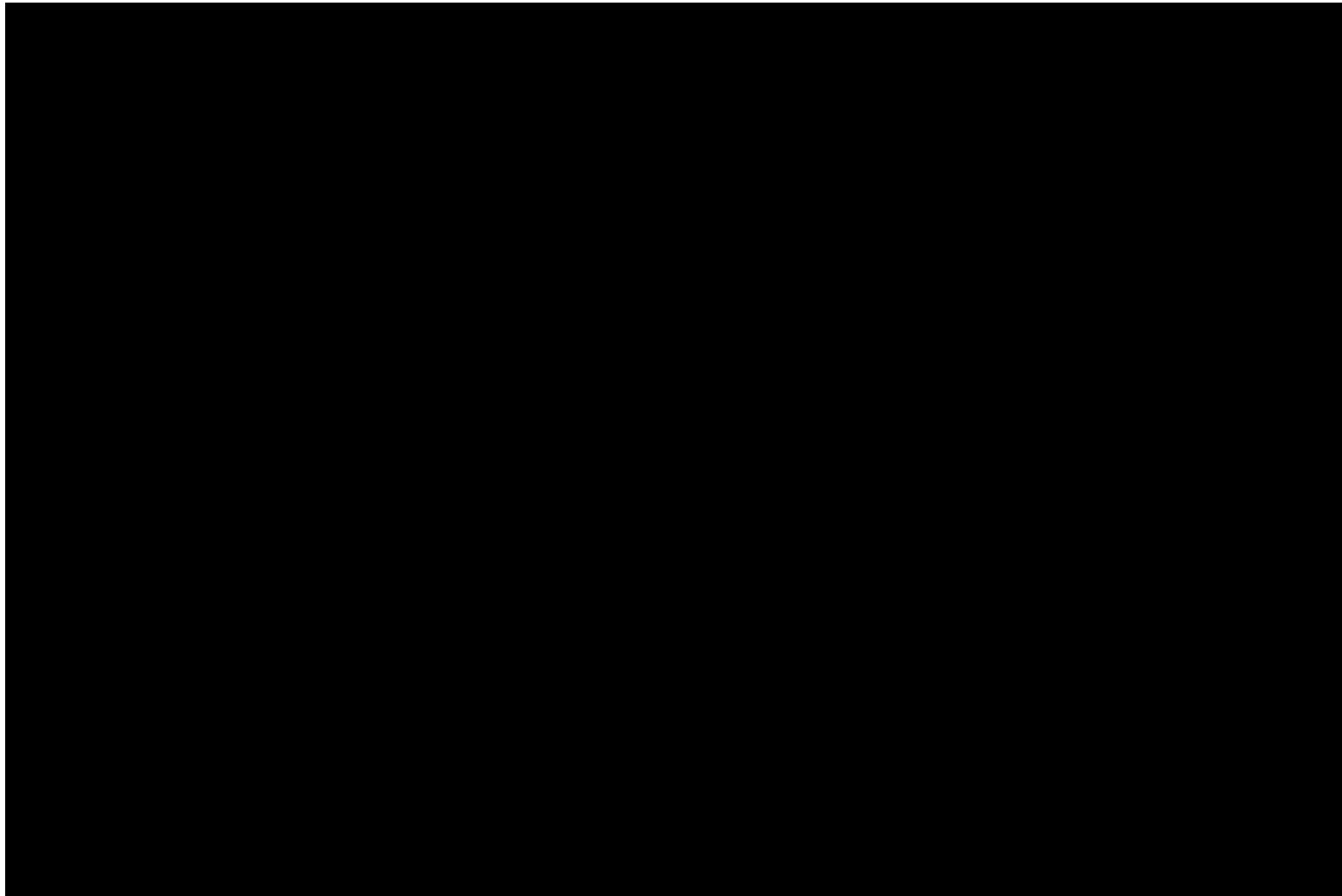
- Distancia: 100 millones de años-luz.
- Tamaño de la galaxia: 60.000 años-luz
- Agujero negro de 500 millones de  $M_{\odot}$  en una región del tamaño del Sistema Solar.
- Masa del disco: es 100,000  $M_{\odot}$ .
- Tamaño del disco: 800 años-luz.



Otro ejemplo:  
la galaxia NGC 7052



En su centro hay un agujero negro de  
300 millones de masas solares.



De los discos alrededor de los agujeros negros en los centros de galaxias salen chorros de materia a velocidades relativistas. La emisión se produce justo fuera del horizonte de sucesos.



Aunque su poder gravitatorio es descomunal, un agujero negro de 100 millones de masas solares y un tamaño comparable al del Sistema Solar tendría una densidad aproximada a la del agua,.

## SECCIÓN 8. Micro agujeros negros



S. Harris

"It's black, and it looks like a hole.  
I'd say it's a black hole."

## 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.

Este límite no está relacionado con nuestros instrumentos, sino que es una **característica inherente del Universo**. El espacio no está realmente vacío, sino lleno de pares partículas-antipartículas virtuales que continuamente se crean y se aniquilan.

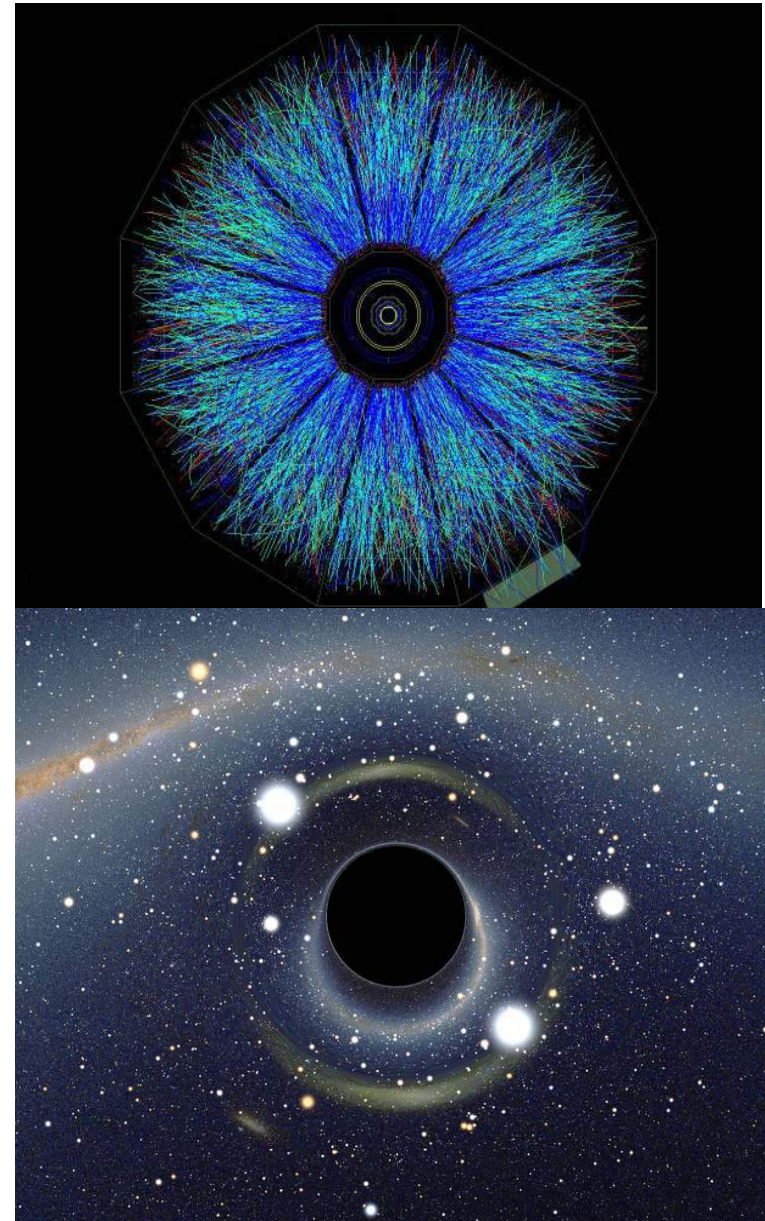
$$\Delta p \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar$$

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





- Explorando la frontera entre el agujero negro y el vacío del espacio interestelar ,Stephen Hawking comprobó la intensa gravedad a la que estarían sometidas las partículas que llegaran allí, reales o virtuales.

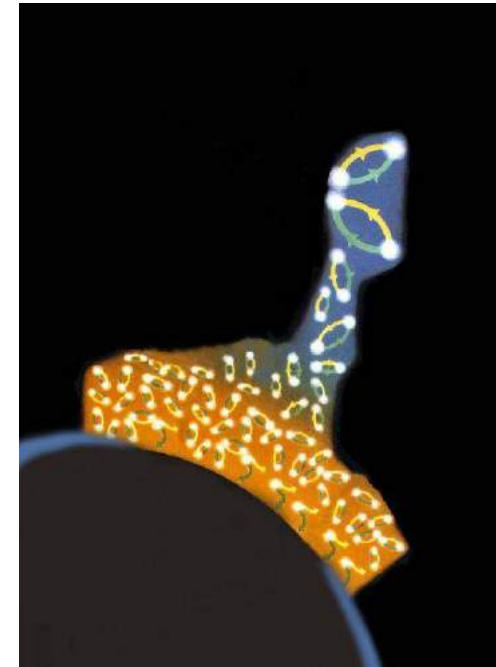


## Los agujeros negros emiten radiación

A principios de los 70 se pensaba que los agujeros negros eran realmente negros, y deberían poseer entropía, la medida del desorden de un sistema, que siempre aumenta en un proceso físico.

Stephen Hawking utilizando teoría cuántica de campos (Relatividad General y Física cuántica) mostró que los agujeros negros tienen temperatura, entropía y producen radiación al igual que cualquier otro cuerpo termodinámico.

También propuso que en el Big Bang existieron esas enormes presiones externas y se formaron muchísimos **agujeros negros primordiales**.



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

## La radiación de Hawking es irrelevante para los agujeros negros estelares

### Agujeros negros estelares

Temperatura =  $10^{-7}$  K

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

$t = 10^{67}$  años

(edad del Universo =  $10^{10}$  años)



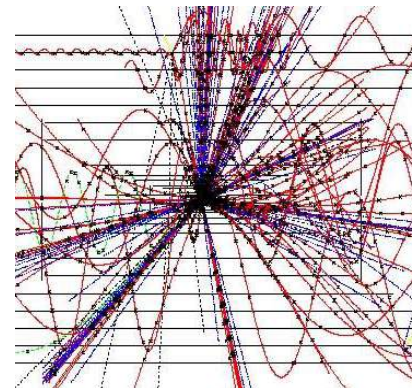
### Mini agujeros negros

$M$  = la masa del monte Everest

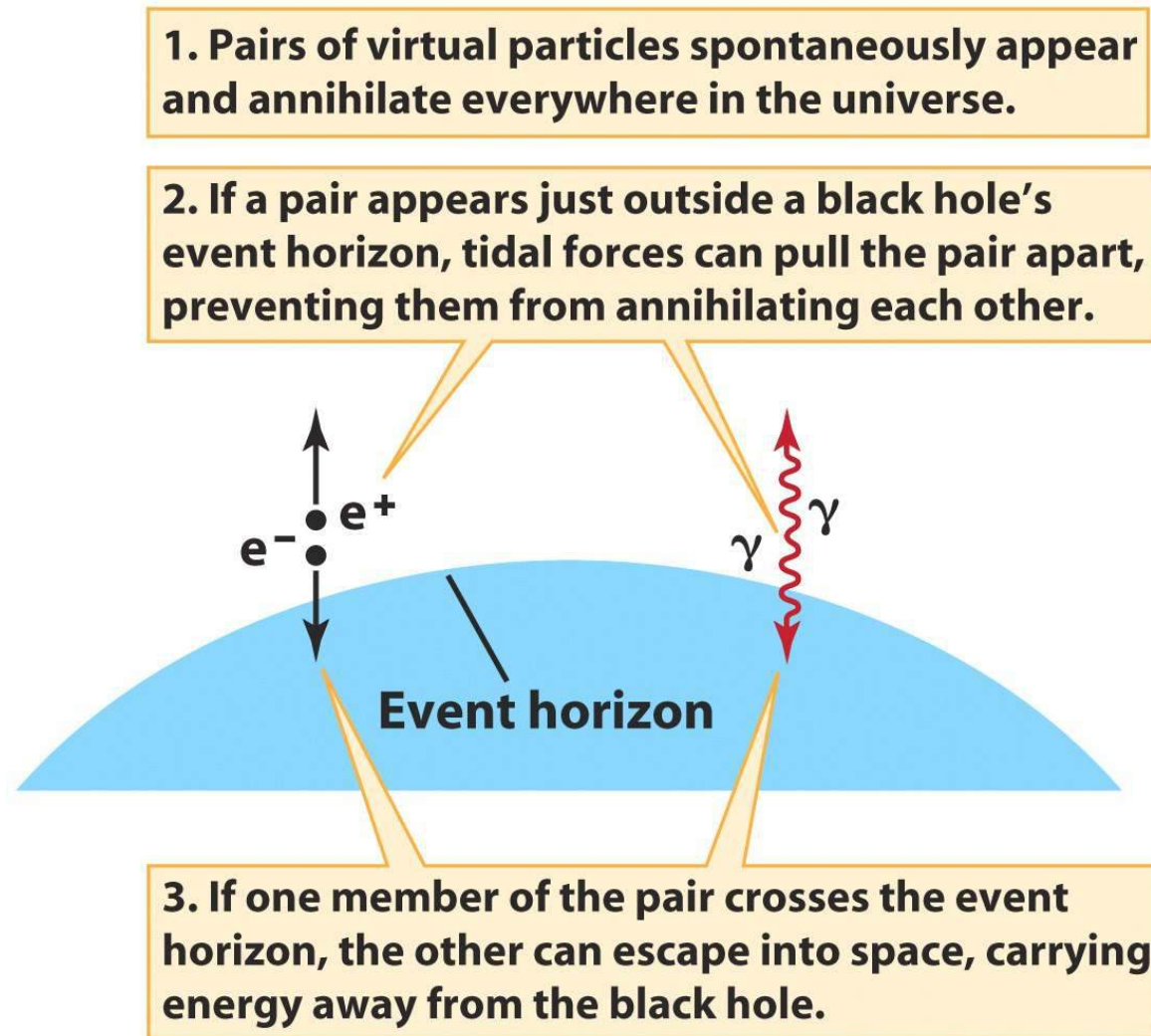
Tamaño =  $10^{-18}$  m

$T = 10^{16}$  K

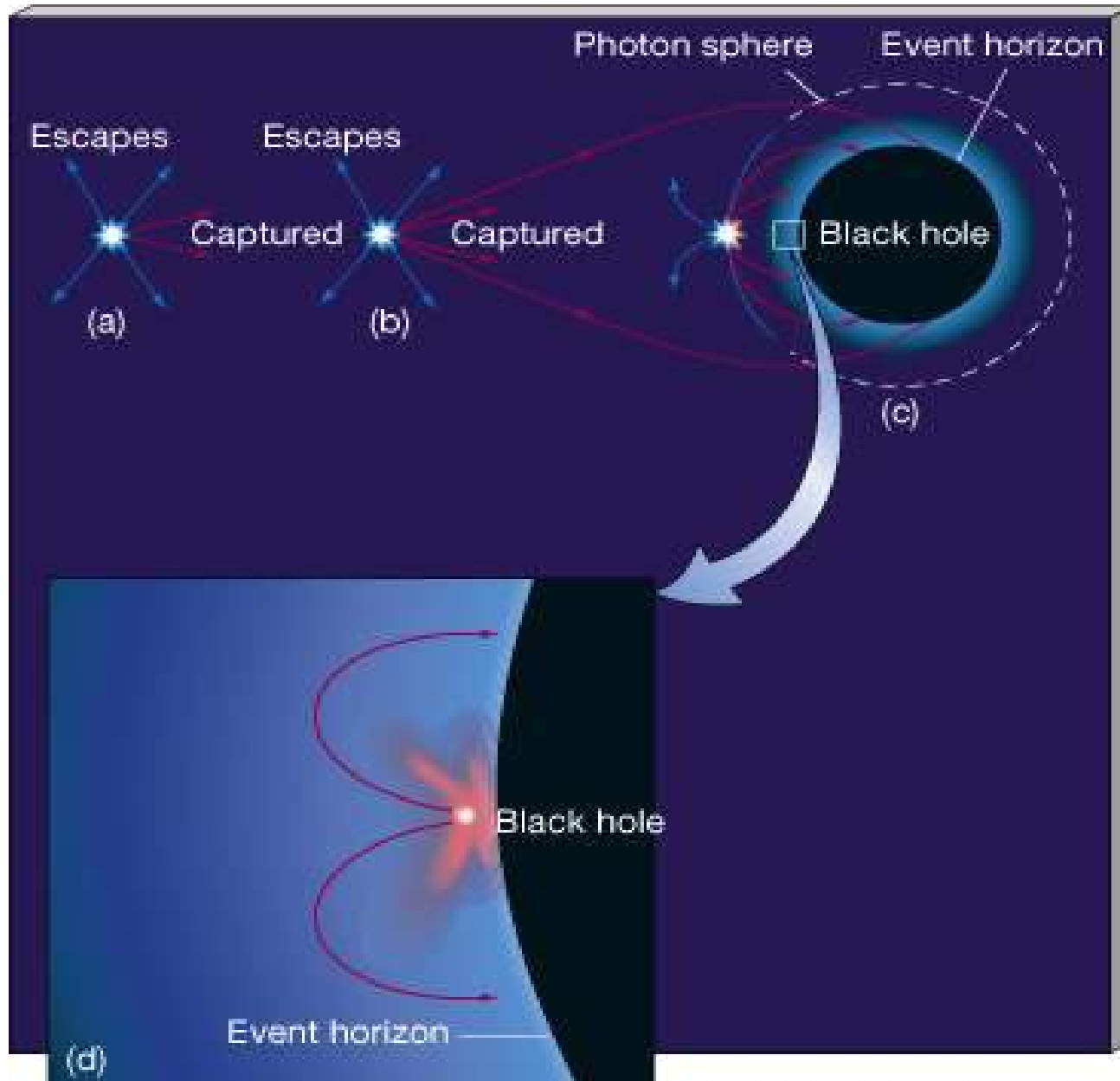
$t = 10^{-27}$  s



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

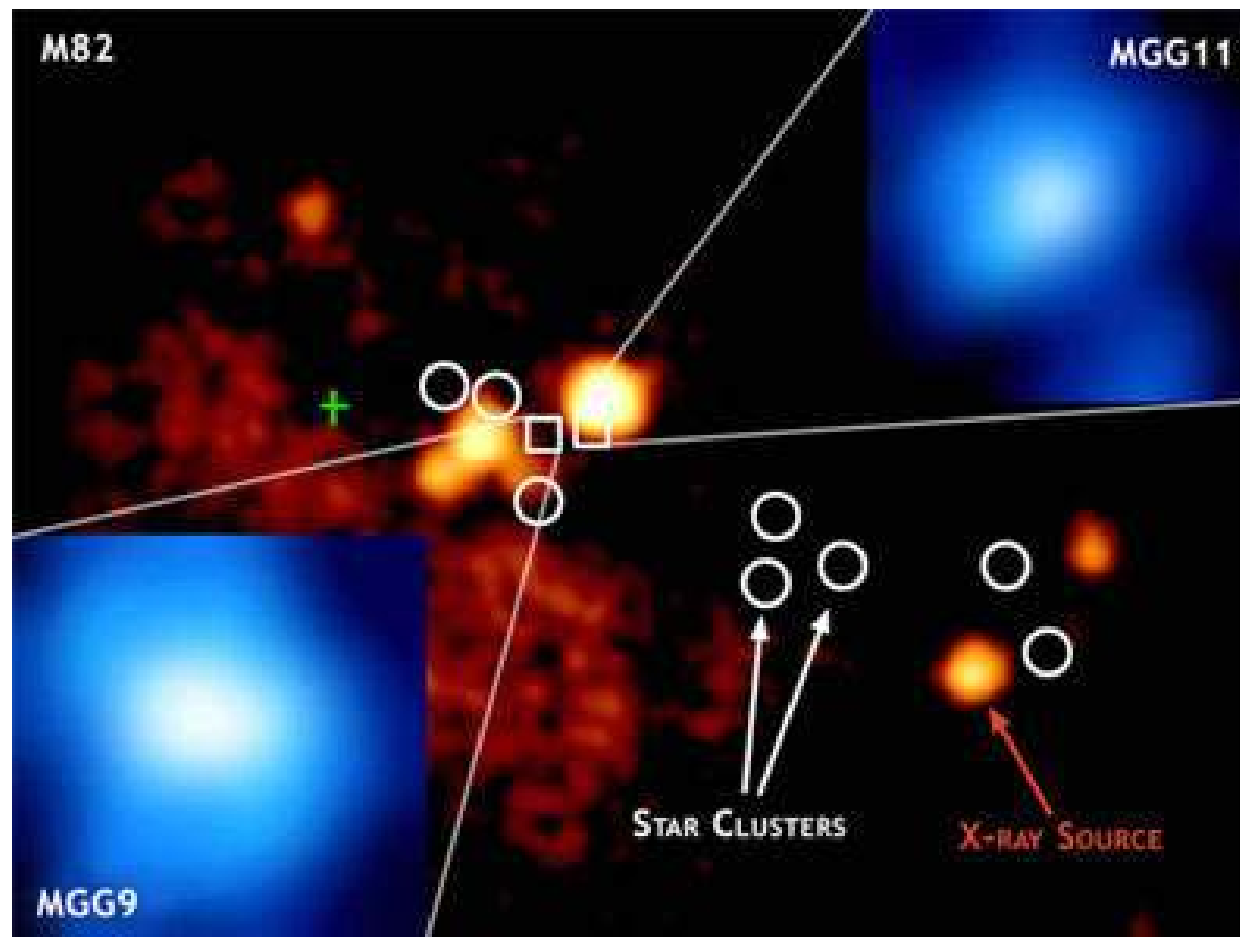


Al provenir la energía gravitatoria necesaria para crear las partículas del agujero negro, éste pierde masa y se contrae; y con el tiempo llega a evaporarse completamente.



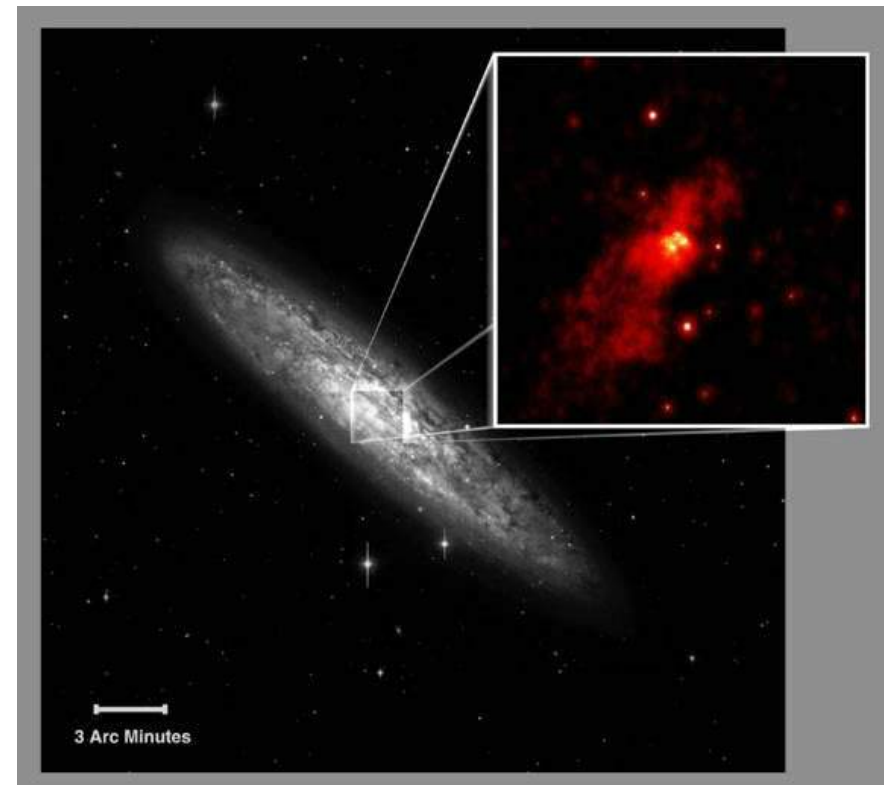


## SECCIÓN 9. Agujeros negros de masas intermedias

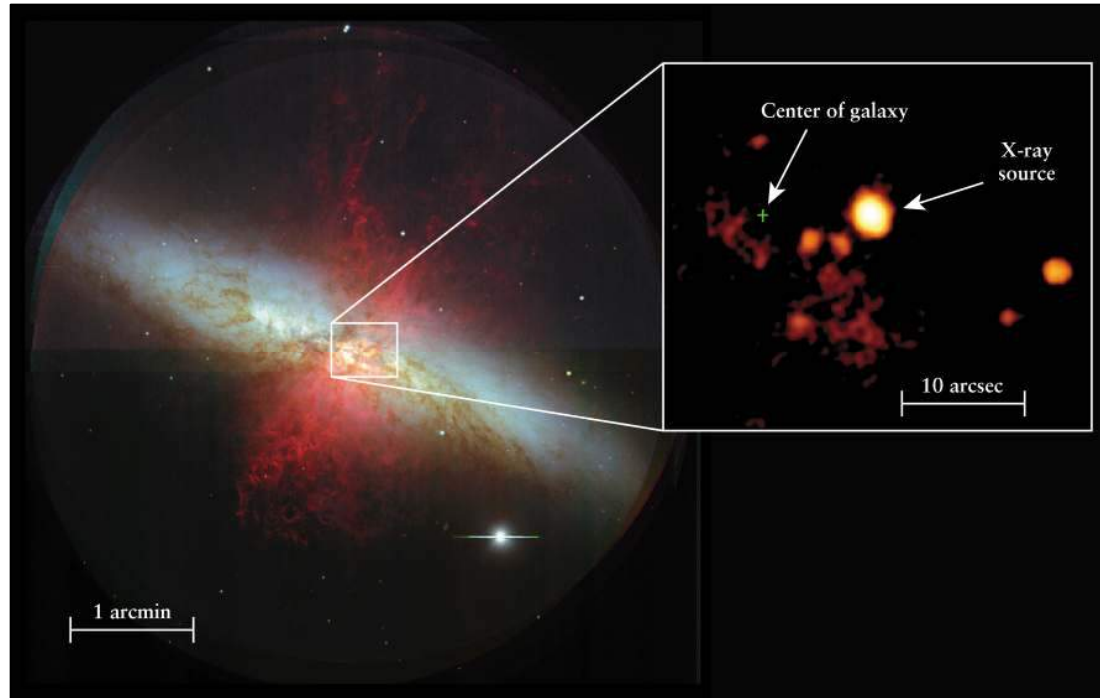


## Agujeros negros de masa intermedia

- Se han encontrado agujeros negros con masas de unos cientos a unos miles de veces la masa del Sol fuera de las regiones centrales de un buen número de galaxias jóvenes.
- Podrían ser precursores de galaxias activas.



Imágenes óptica y en rayos X de NGC 253



Región central de M82  
datos del Observatorio  
Chandra de rayos X

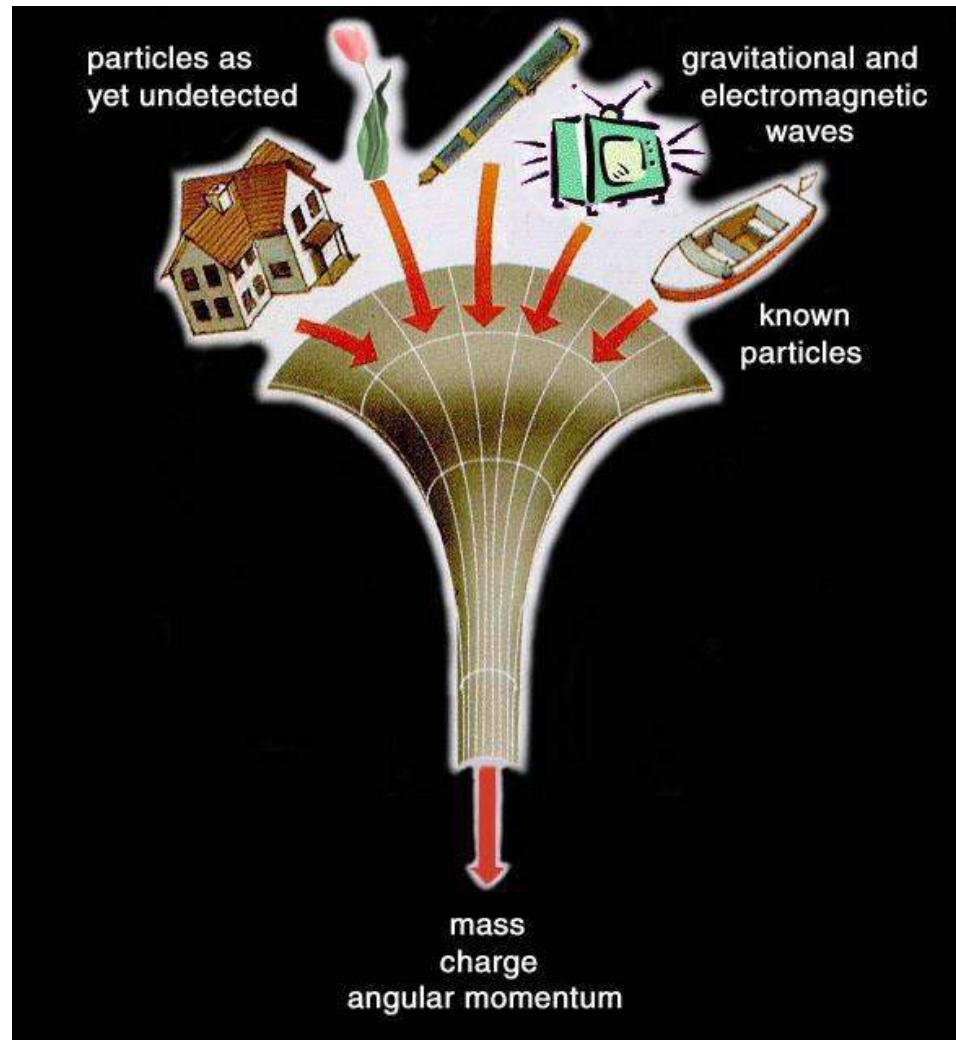
Un agujero negro de masa intermedia es significativamente más masivo que los agujeros negros estelares (cuyas masas son de decenas de veces la masa del Sol), pero mucho menos masivos que los agujeros negros supermasivos (entre 1 millón y varios millones de veces la masa del Sol).

Se han encontrado en menor abundancia que los otros dos tipos de agujeros negros. Sus mecanismos de formación son todavía desconocidos.

## Rangos de masas de los agujeros negros

- **Primordiales:** desde unos pocos gramos a la masa de un planeta.
- **De masas estelares:** al menos 3 masas solares ( $\sim 10^34$  g).
- **De masas intermedias:** desde cientos a unas pocas decenas de miles de veces la masa del Sol; formados posiblemente por la aglomeración of AN estelares.
- **Supermasivos:** de millones a miles de millones de masas solares, localizados en los centros de las galaxias.

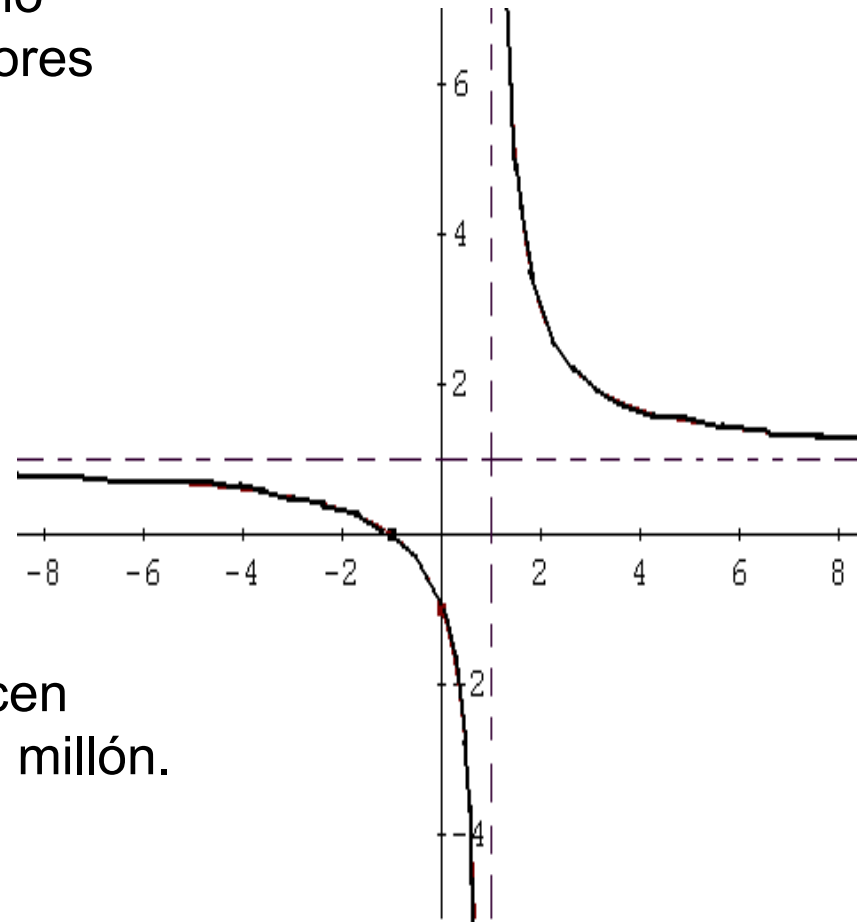
# SECCIÓN 10. Agujeros negros. Cuestiones teóricas





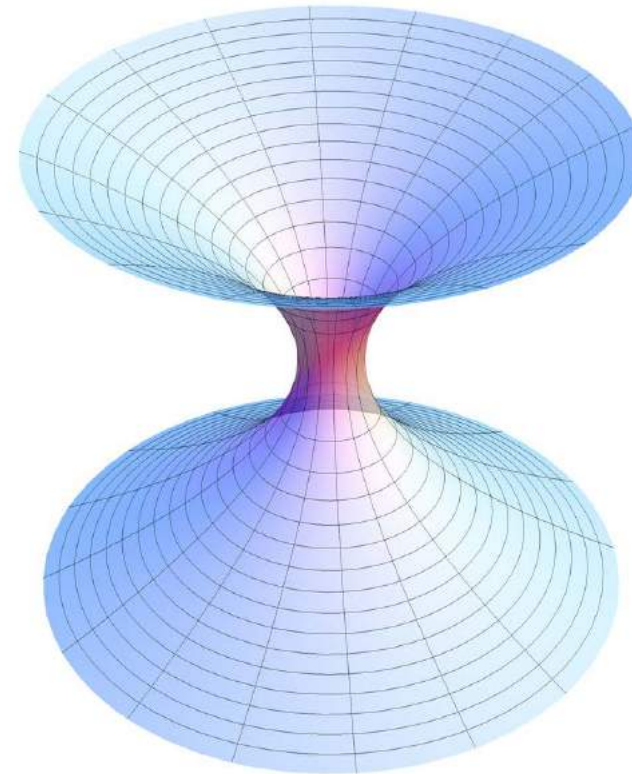
## ¿Qué es una singularidad matemática?

- Un punto en el cual una función no puede ser definida, diverge a valores infinitos.
- La función  $y = 1/x$  tiene en  $x = 0$  un punto de singularidad.
- Pequeños cambios en  $x$  desde  $+0.0000001$  a  $-0.0000001$  producen cambios en  $y$  entre  $+1$  millón y  $-1$  millón.



## Una singularidad física

En Relatividad General una singularidad es una región del espacio-tiempo en la cual la curvatura se hace tan grande que las leyes de la Física Relativista se rompen y se deben aplicar las leyes de la Relatividad Cuántica.

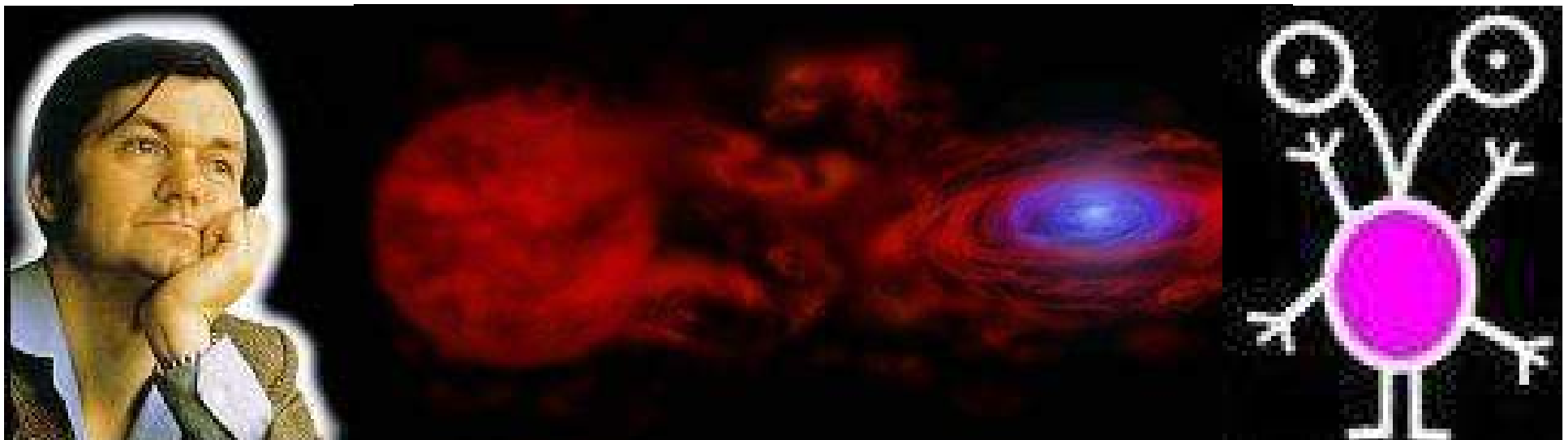


## Teorema de la singularidad

Las singularidades son puntos de densidad infinita que se cree existen en los centros de los agujeros negros. No hay manera de saber de saber qué pasa en la vecindad de una singularidad, ya que en esencia las ecuaciones se dividen por cero en ese punto.

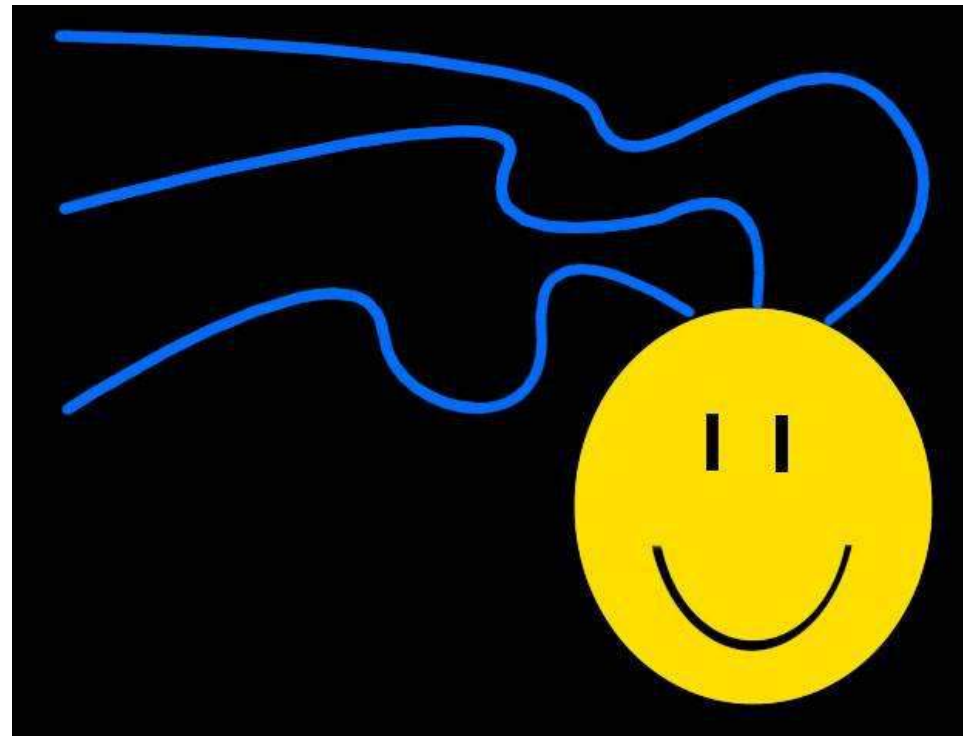
## Hipótesis del censor cósmico

- Todas las singularidades en el Universo están contenidas dentro de horizontes de sucesos y por tanto ,en principio, no son observables, al no poder atravesar el horizonte de suces ninguna información sobre la singularidad hacia el mundo exterior.
- Sin embargo esta hipótesis incluye la idea no probada de que pueden existir un tipo de singularidades llamadas **singularidades desnudas**, no rodeadas por un horizonte de sucesos.



La estructura de un agujero negro se puede describir completamente con sólo tres números:

- Masa
- Carga eléctrica
- Momento angular



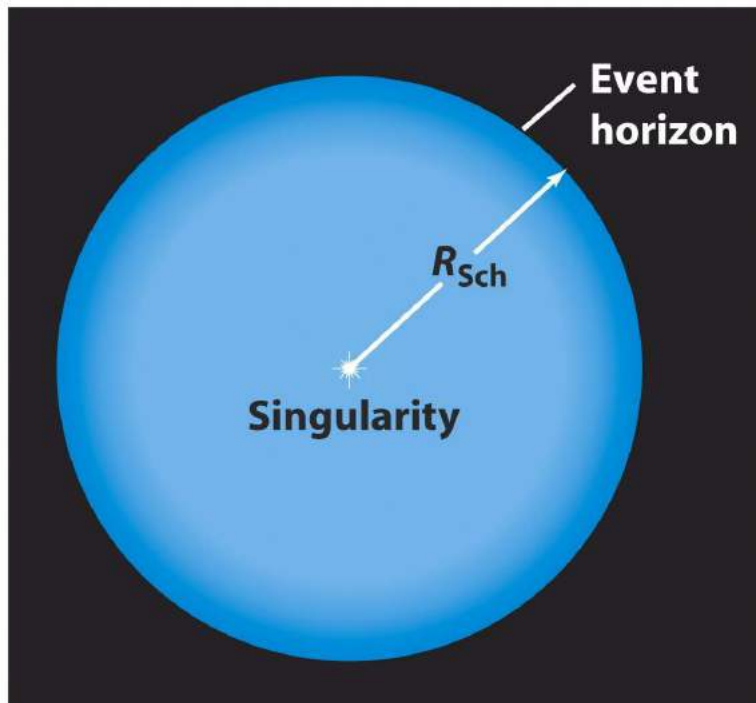
Los agujeros negros no tienen pelo (Teorema No-pelo)

## Tipos de agujeros negros.

- Schwarzschild (1916)
  - masa
- Reissner-Nordström (1916, 1918)
  - masa, carga eléctrica
- Kerr (1963)
  - masa, momento angular
- Kerr-Newman (1965)
  - masa, momento, carga eléctrica



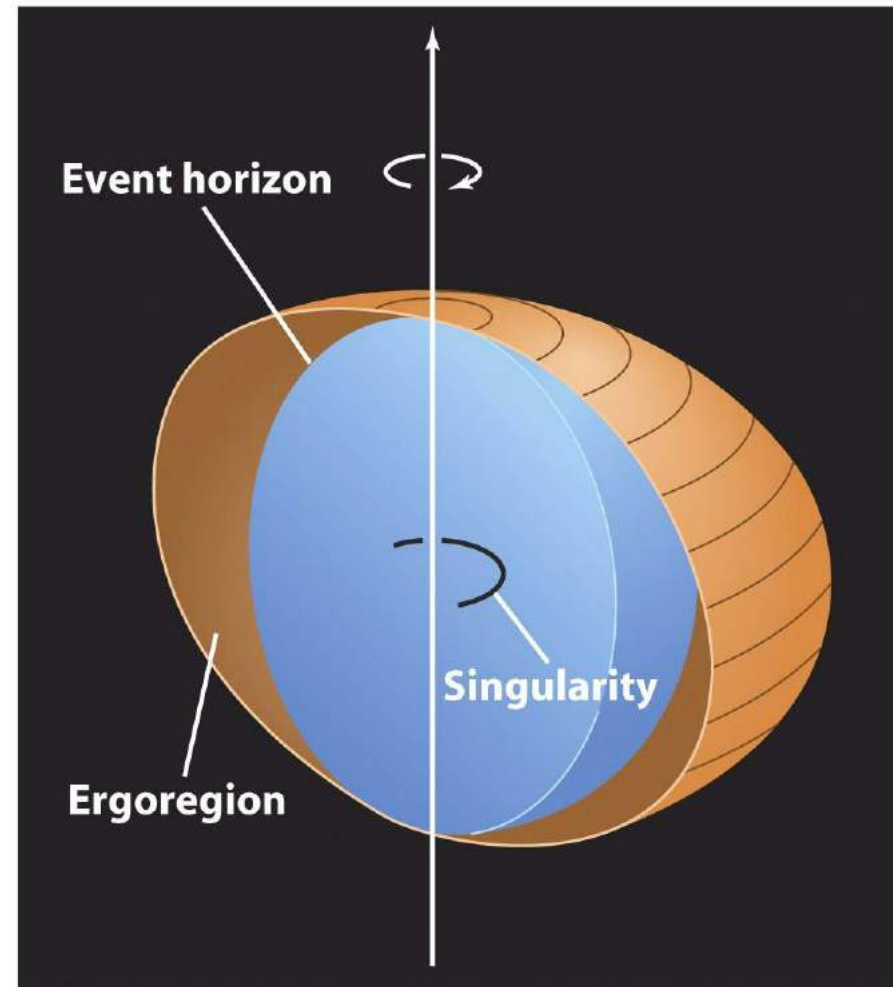
## Agujero negro de Schwarzschild (sin rotación)



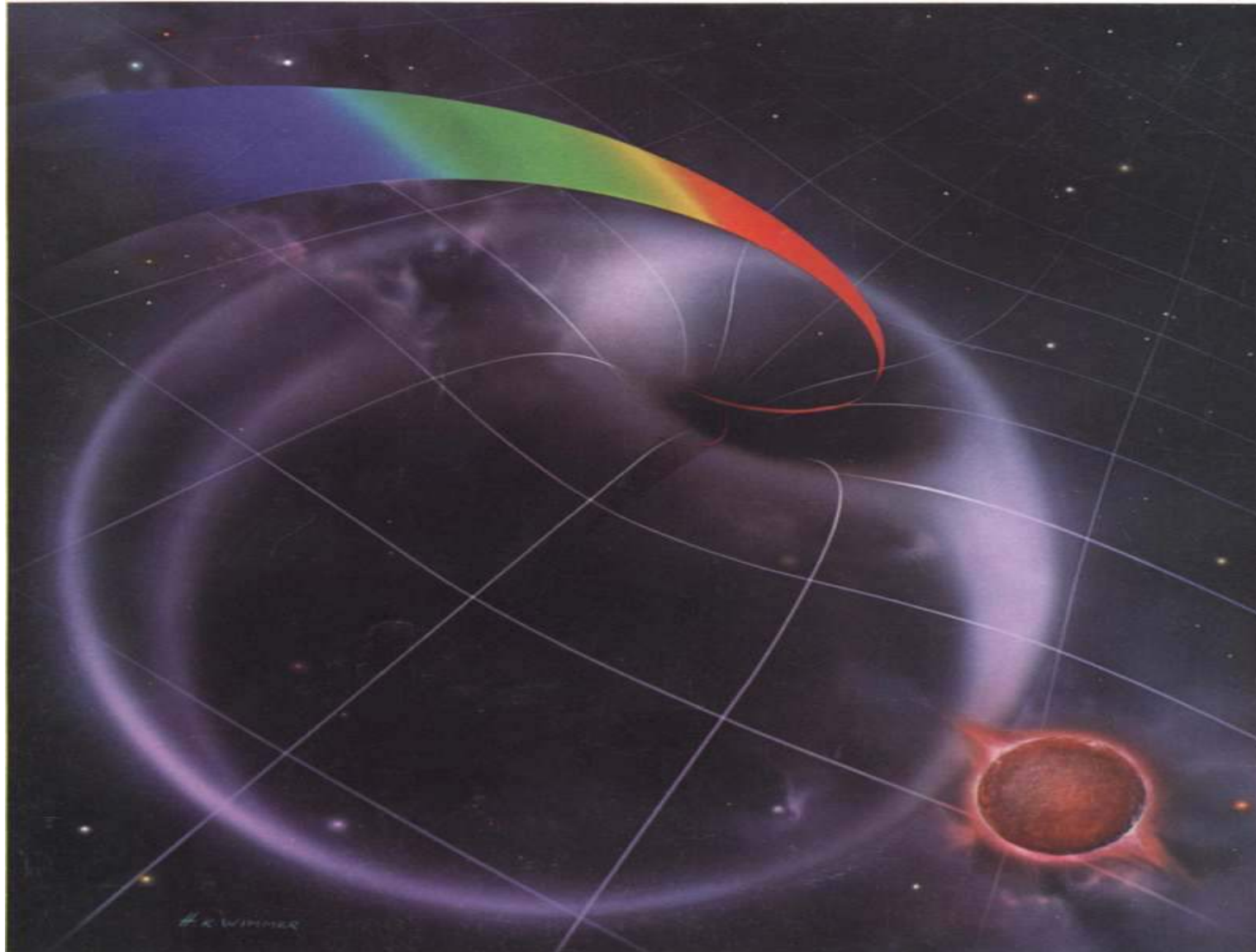
- Sólo tiene un “centro” y una “superficie”.
- Su masa está concentrada en una singularidad infinitamente densa.
- La singularidad está rodeada por una superficie llamada **horizonte de sucesos**, donde la velocidad de escape es igual a la velocidad de la luz.
- La distancia entre el centro y el horizonte de sucesos se conoce con el nombre de **radio de Schwarzschild**.
- Nada—ni siquiera la luz- puede escapar desde el interior del horizonte de sucesos.

## Agujero negro de Kerr (con rotación)

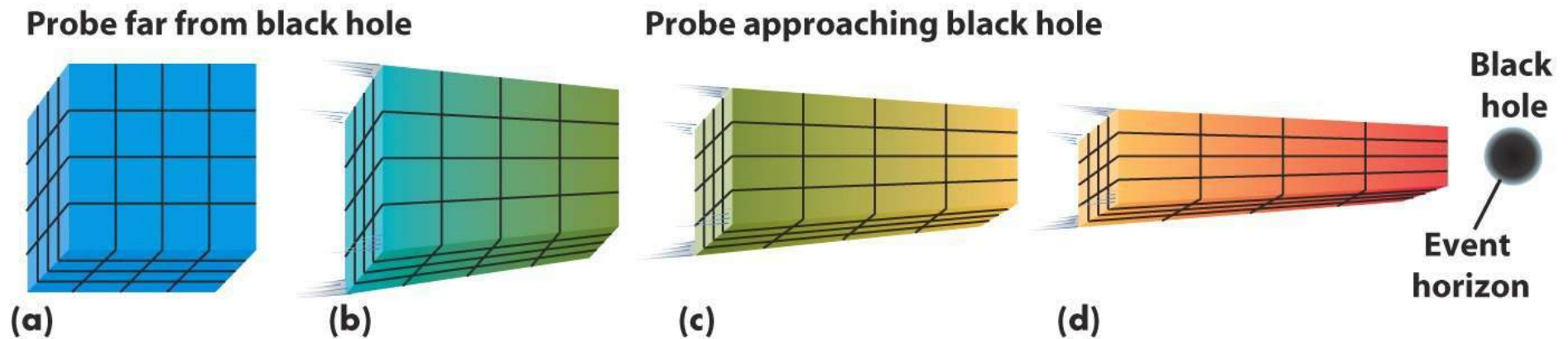
- La singularidad de un agujero negro de Kerr está localizada en un fino anillo alrededor del centro del agujero.
- El horizonte de sucesos es una superficie esférica.
- La región en forma de donut alrededor de la parte exterior del horizonte de sucesos se llama **ergosfera**.
- El espacio y el tiempo en la ergosfera son curvados o estirados por la rotación del agujero negro.



# SECCIÓN 11. Efectos de los agujeros negros



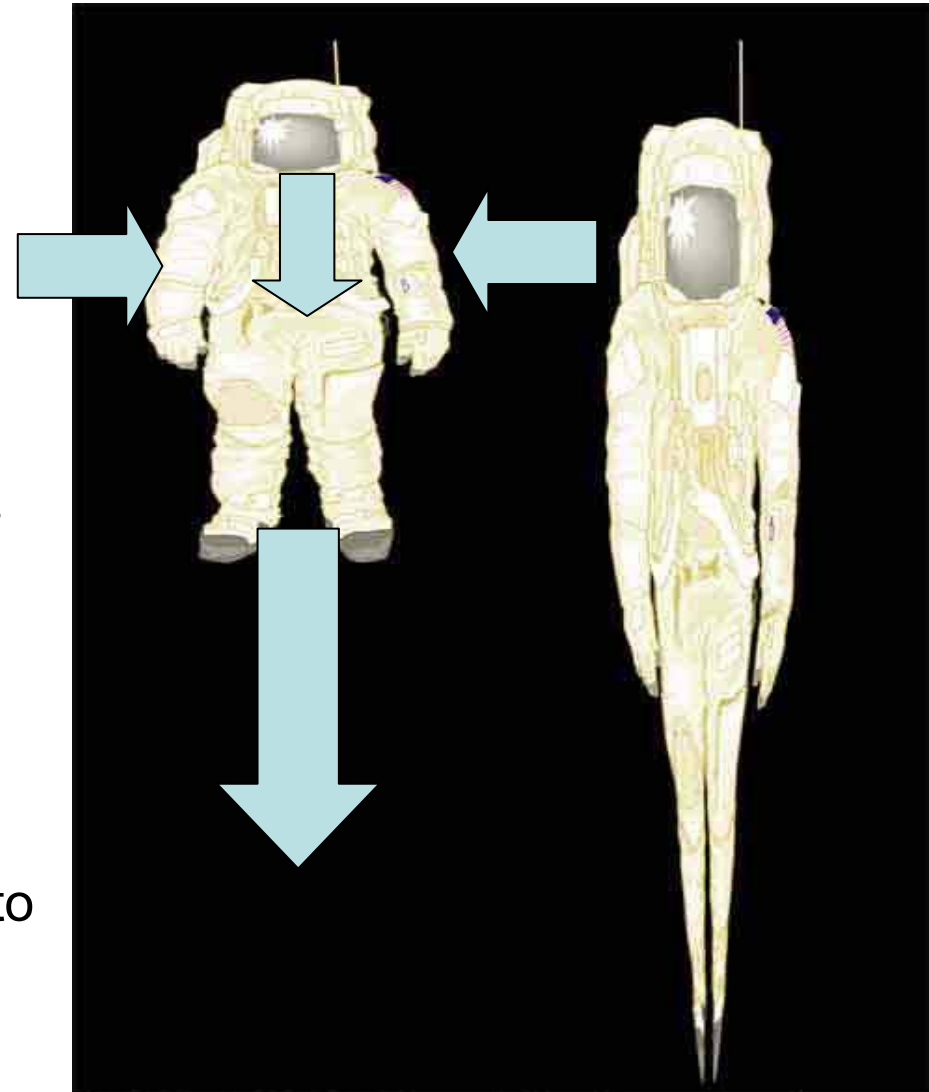
## Cayendo en un agujero negro: un viaje infinito



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.

## ¿Y si un astronauta cae en un agujero negro?

- Al principio, no sentiría ninguna fuerza gravitacional y carecería de peso.
- A medida que se acerque al centro del agujero comenzará a sentir fuerzas gravitacionales "de marea".
- Al estar los pies del astronauta más cerca del agujero que la cabeza, los pies sentirán una atracción mayor que la cabeza.
- El astronauta se estirará en milisegundos hasta que las fuerzas "de marea" se hagan tan intensas que terminarán destrozándolo (efecto spaghetti).



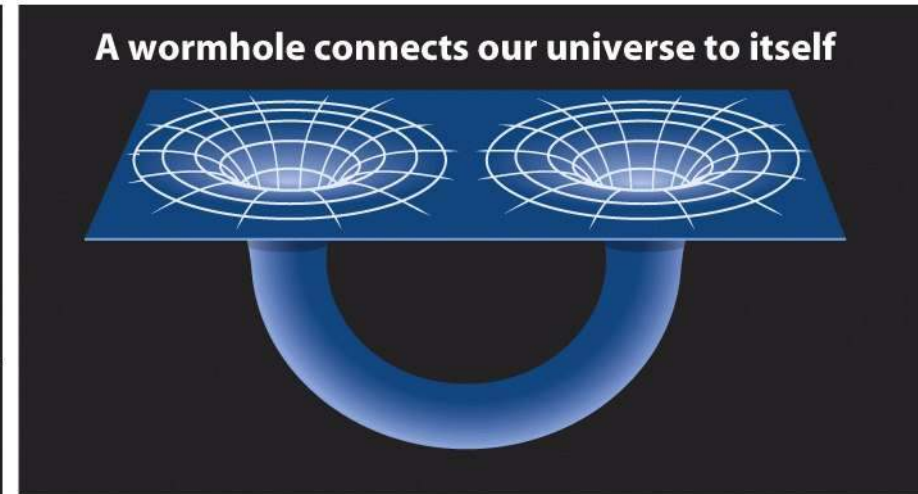
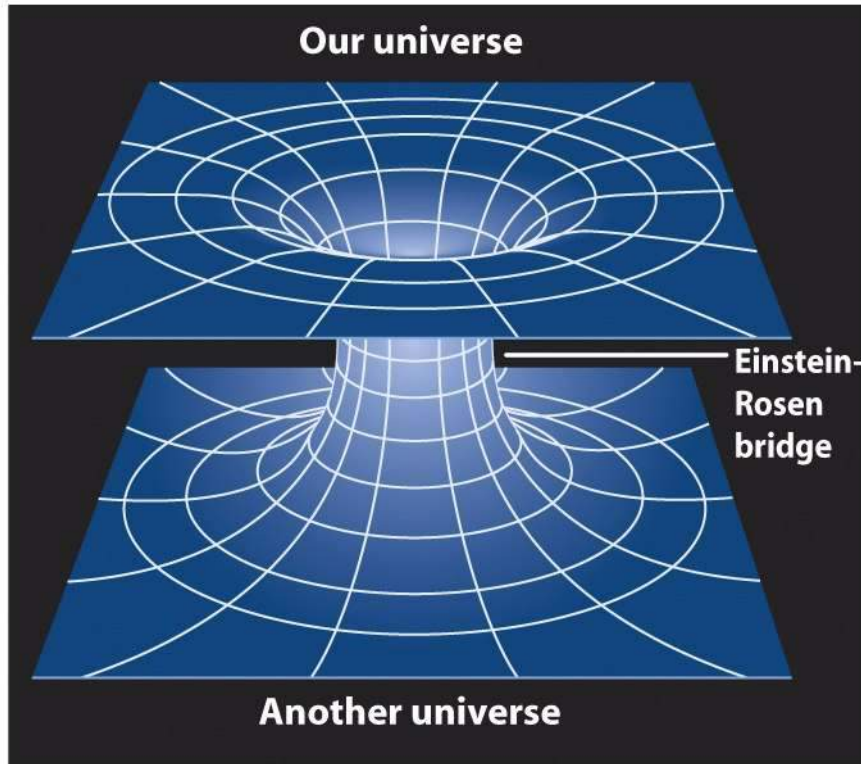


## ¿Qué vería un observador fuera del agujero negro?

- A medida que el astronauta se va acercando al horizonte, el compañero lo ve moverse cada vez más lentamente.
- Y nunca lo verá alcanzar el horizonte ya que mientras se va acercando al horizonte, la luz que emite el astronauta tarda cada vez más tiempo en llegar al compañero.
- De hecho, la radiación emitida exactamente cuando se cruza el horizonte se mantendrá allí para siempre, dando la impresión de estar congelada.



## Agujeros de gusano



- ¿Podría un agujero negro estar conectado de alguna manera con otra parte del espacio-tiempo, o incluso a algún otro universo?
- La Relatividad General predice que tales posibles conexiones, los AGUJEROS DE GUSANO, podrían existir en los agujeros negros en rotación.

