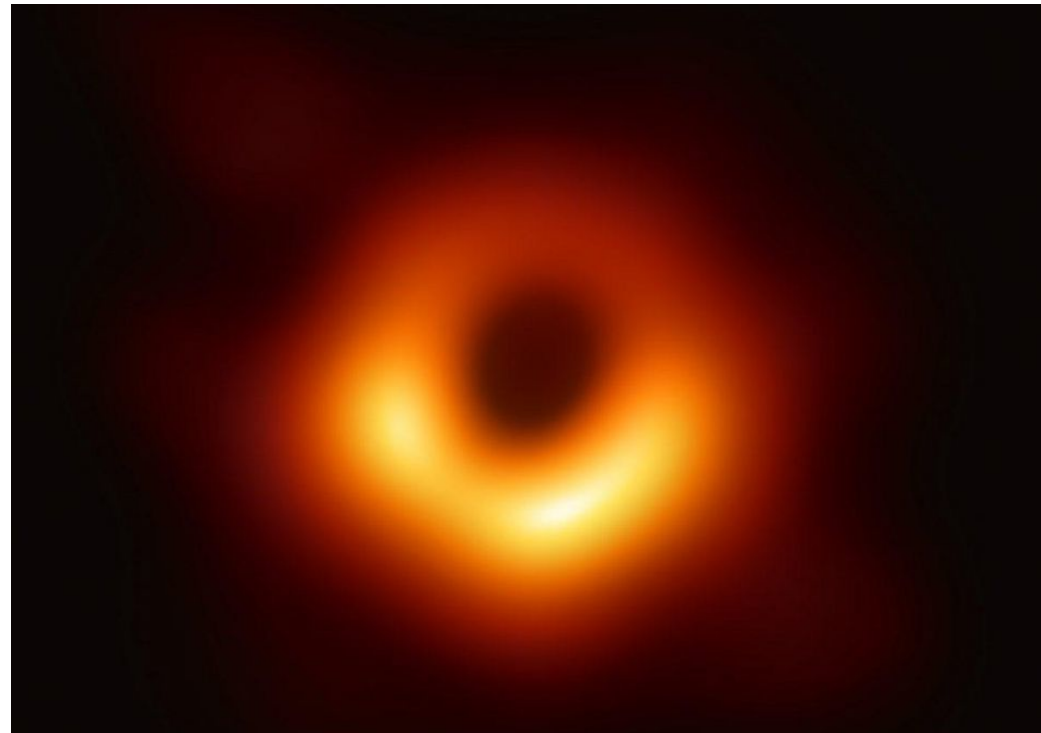




Agujeros negros: vistos por fuera y por dentro



Bert Janssen

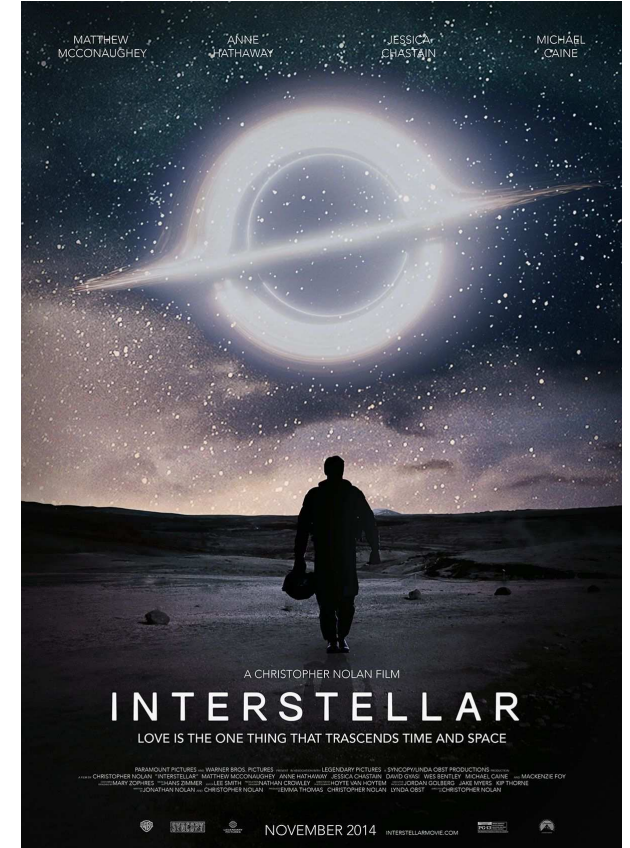
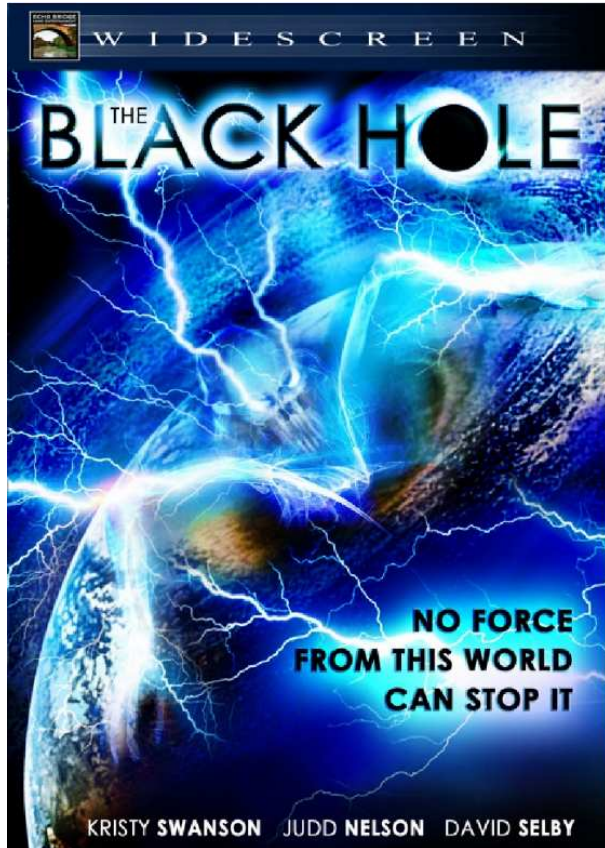
Dpto. de Física Teórica y del Cosmos & CAFPE

Interrumpidme cuando queráis

Las preguntas tontas no existen.
Sólo existen las respuestas tontas.



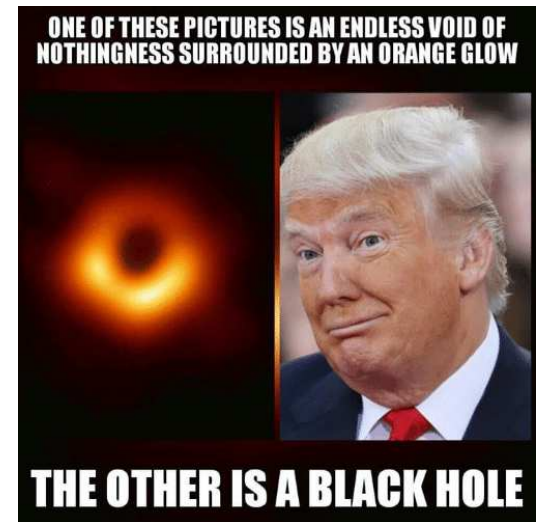
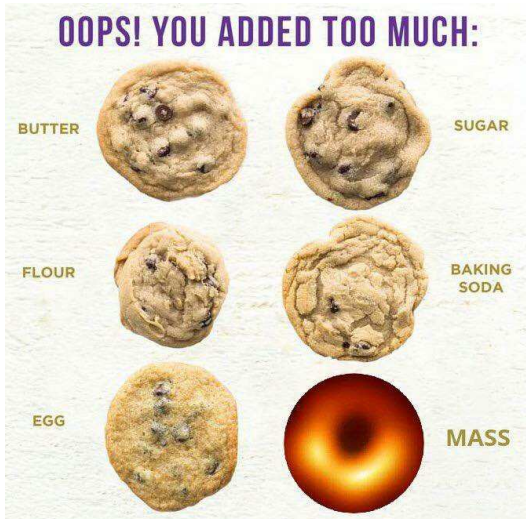
Desde los años '60, los agujeros negros están en todas partes:
en el cine:



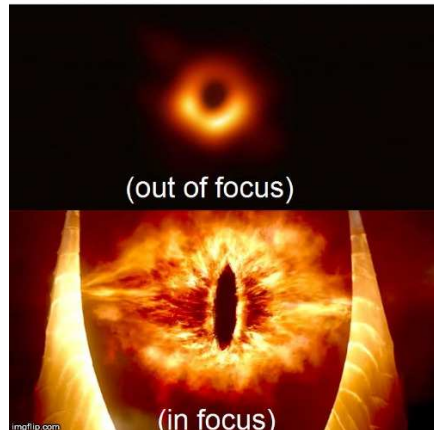
en los tebeos:



En los memes:



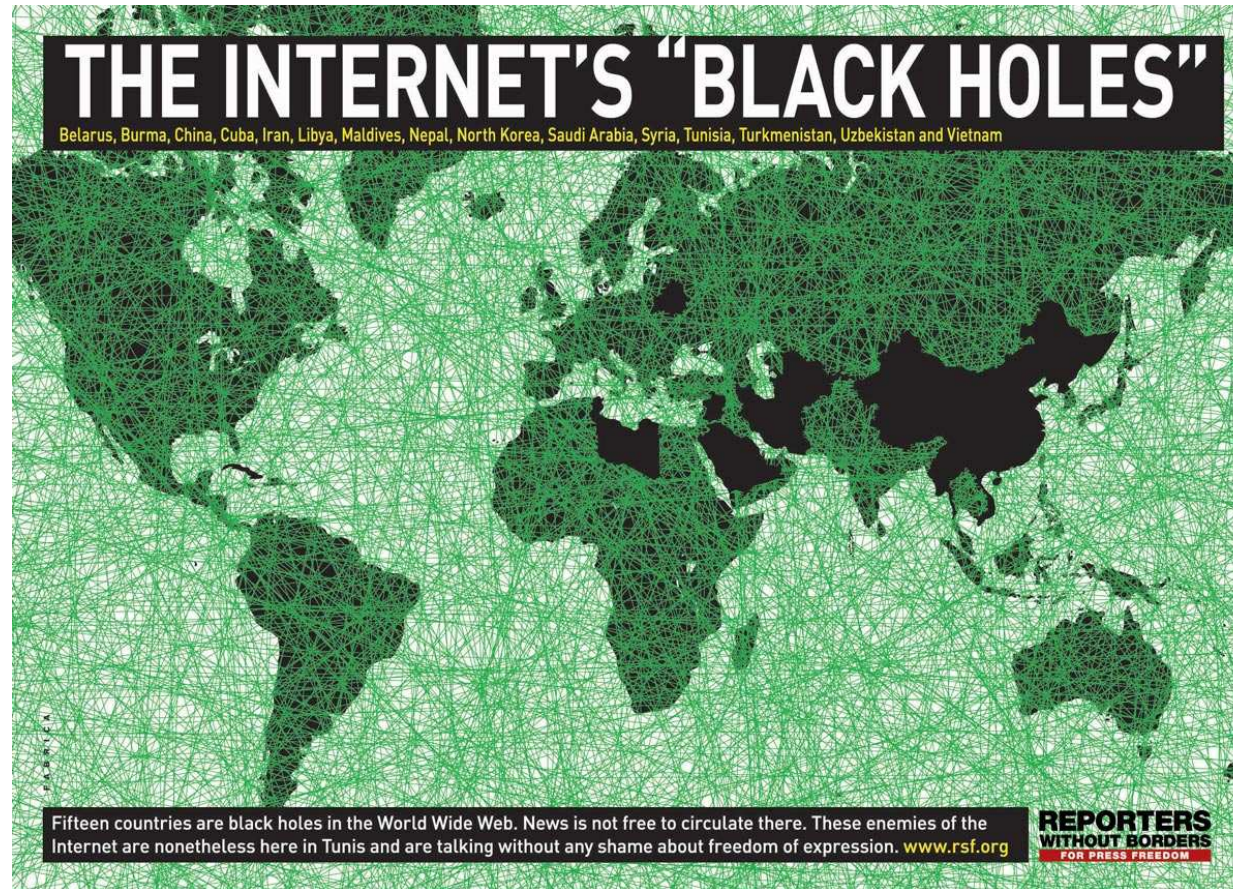
The first photo of a black hole is finally here.



Me: I'm gonna wake up at 7am
My bed:



en internet:



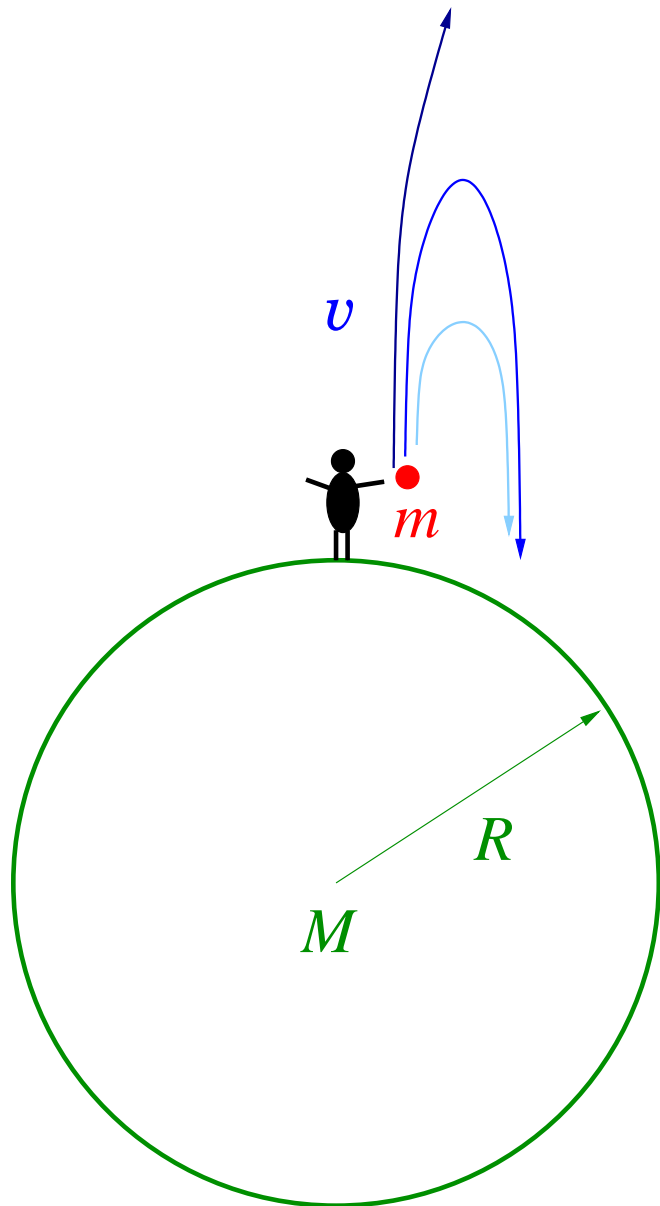
black hole: 869.000.000 entradas

agujero/hoyo negro: 34.600.000 + 7.450.000 entradas

¿Pero qué son realmente?

1. Ideas básicas
2. Agujeros negros en la teoría de la relatividad
 - Relatividad general en 180 segundos
 - Agujeros negros en Relatividad General
3. ¿Cómo se observa un agujero negro?
4. ¿Qué pasa si me acerco a un agujero negro?
5. ...

1. Ideas básicas



Velocidad de escape = velocidad necesario para **una masa m** no vuelva a caer en **la Tierra**

$$v_e = \sqrt{\frac{2G_N M}{R}}$$

Tierra: $v_e = 11,1 \text{ km/s} = 39\,960 \text{ km/h}$

Luna: $v_e = 2,38 \text{ km/s} = 8\,568 \text{ km/h}$

Jupiter: $v_e = 59,5 \text{ km/s} = 214\,200 \text{ km/h}$

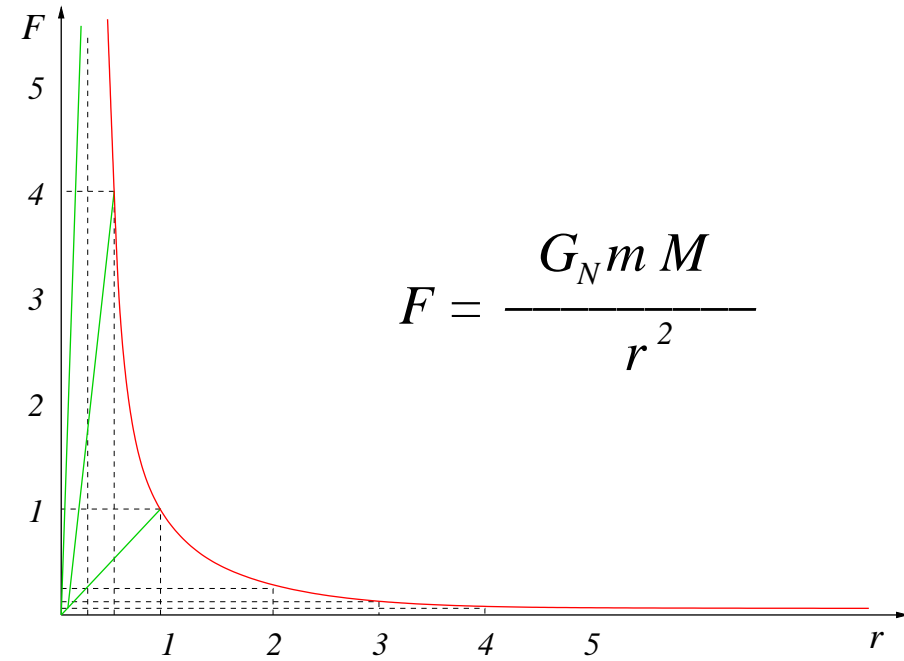
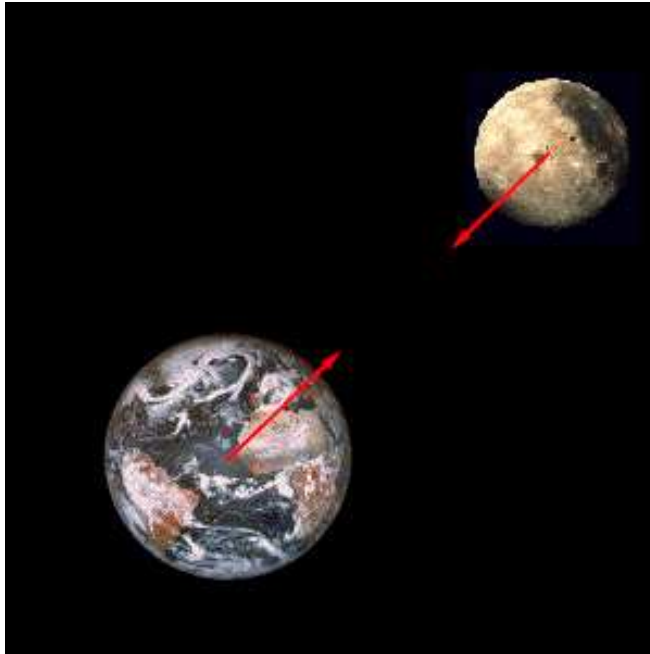
Sol: $v_e = 600 \text{ km/s} = 2\,160\,000 \text{ km/h}$

...

v_e es independiente de **la masa m** del objeto

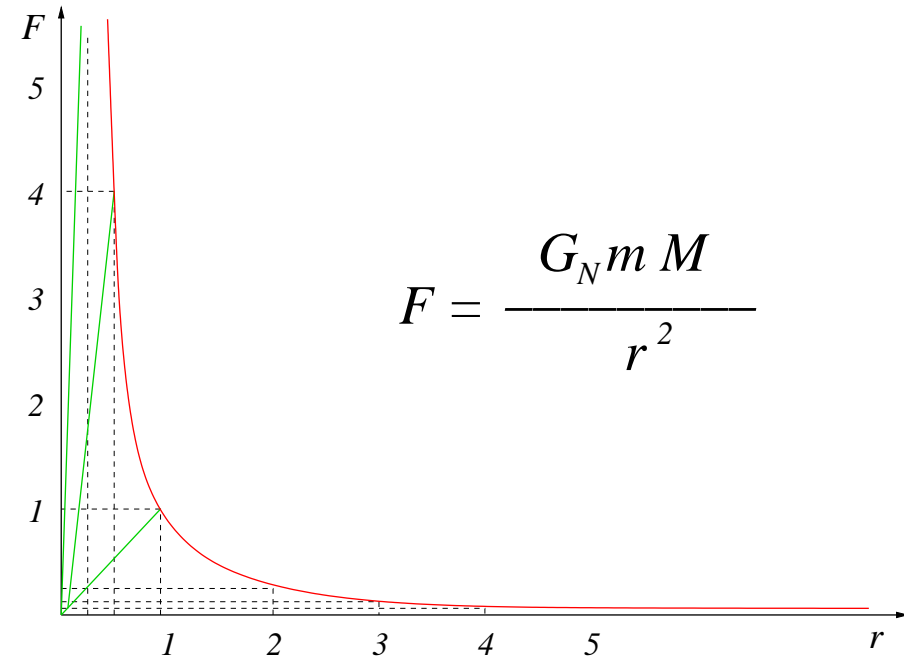
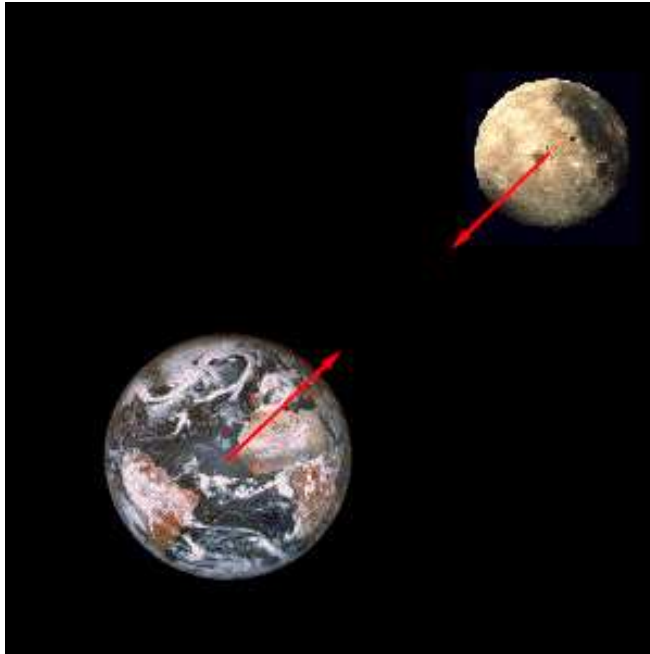
v_e aumenta si **aumenta la masa M** del planeta

v_e aumenta si **disminuye el radio R** del planeta



La gravedad de a distancia r de un objeto:

$$F \sim \frac{M}{r^2}$$



La gravedad de a **distancia** r de un objeto:

$$F \sim \frac{M}{r^2}$$

La gravedad **en la superficie** de un objeto con radio R_0 :

$$F \sim \frac{M}{R_0^2}$$

$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \quad \Leftrightarrow \quad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$

$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \quad \iff \quad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$



Pierre Simon Laplace (1795):

“Una estrella [del mismo material] que la Tierra y [...] 250 veces el tamaño del Sol, no emitiría por su propia gravedad nada de luz hacia nosotros. De esta manera sería posible que los objetos más masivos fueran completamente invisibles.”

→ **Estrella negra!!!**

$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \quad \iff \quad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$



Pierre Simon Laplace (1795):

“Una estrella [del mismo material] que la Tierra y [...] 250 veces el tamaño del Sol, no emitiría por su propia gravedad nada de luz hacia nosotros. De esta manera sería posible que los objetos más masivos fueran completamente invisibles.”

→ Estrella negra!!!



Albert Einstein (1905):

Nada puede moverse más rápido que la luz

→ Agujero negro: Imposible escapar!

Observación importante:

La formación de un agujero negro:

depende de la **proporción** M/R del objeto

NO depende de la **masa**

Radio de Schwarzschild = radio crítico para formar un agujero negro

$$R_S = \frac{2G_N M}{c^2}$$

Objeto	Masa	R_s
Sol	$2 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 1 M_\odot$	3 km
Tierra	$6 \cdot 10^{24} \text{ kg} = 3 \cdot 10^{-6} M_\odot$	9 mm
Ser humano:	$100 \text{ kg} = 5 \cdot 10^{-29} M_\odot$	$1,5 \cdot 10^{-22} \text{ mm}$
Agujero negro supermasivo	$\sim 10^9 M_\odot$	$\sim 20 \text{ UA}$
Agujero negro primordial	$\sim 10^{12} \text{ kg} = 10^{-18} M_\odot$	\sim nucleo de átomo

2. Breve introducción a la Relatividad General

Para entender bien los agujeros negros, hace falta la Relatividad General



A. Einstein

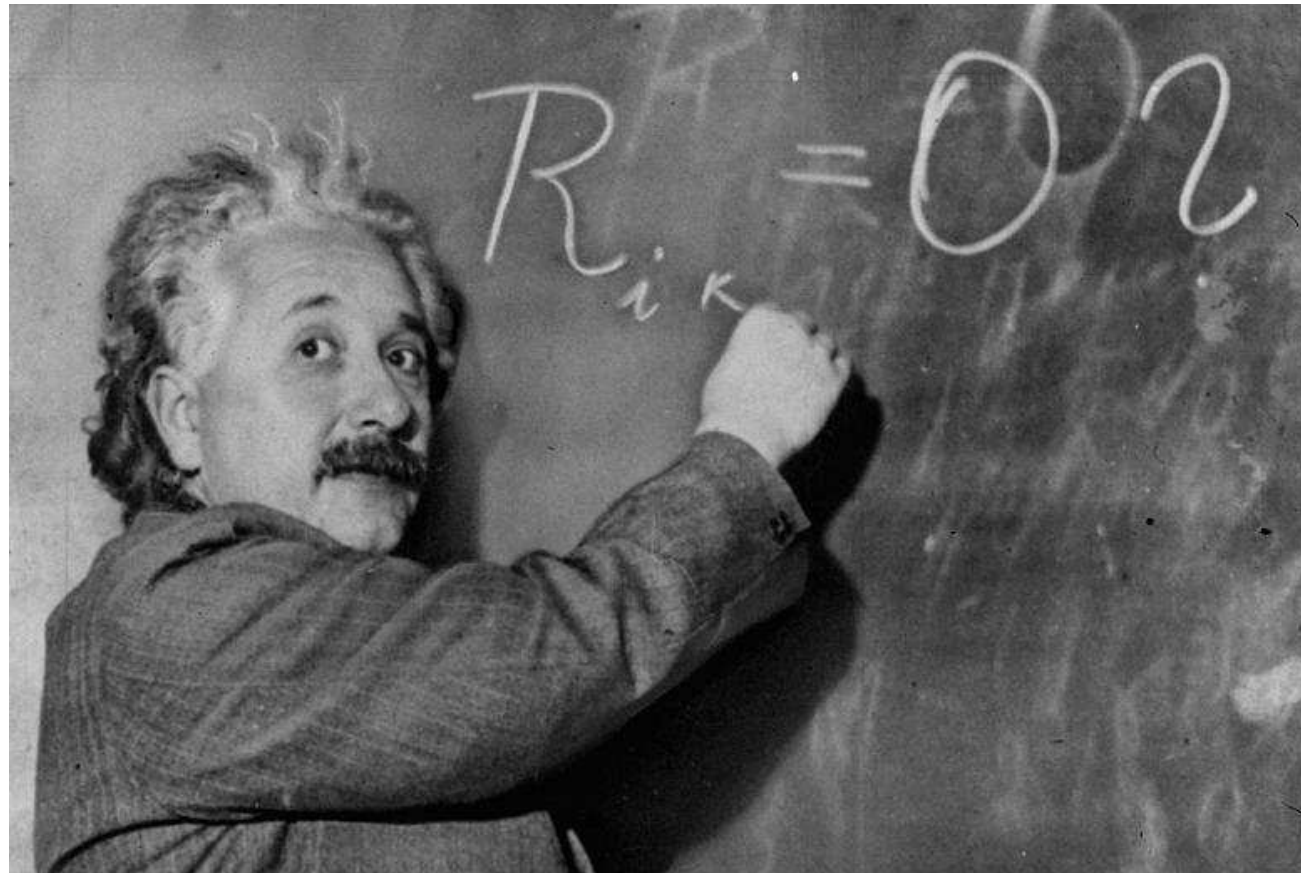


K. Schwarzschild

Relatividad General (1915) es la teoría moderna de la gravedad

Gravedad está descrita por las ecuación de Einstein

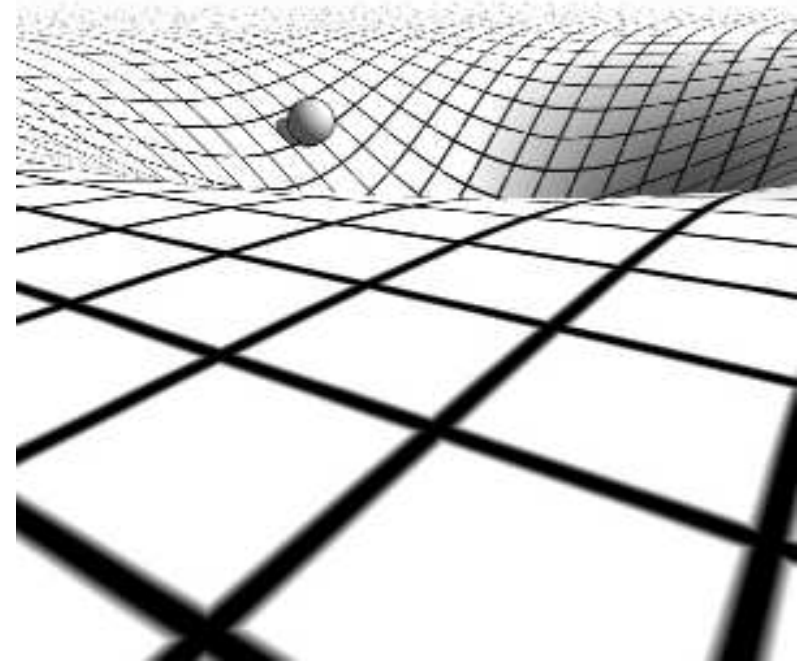
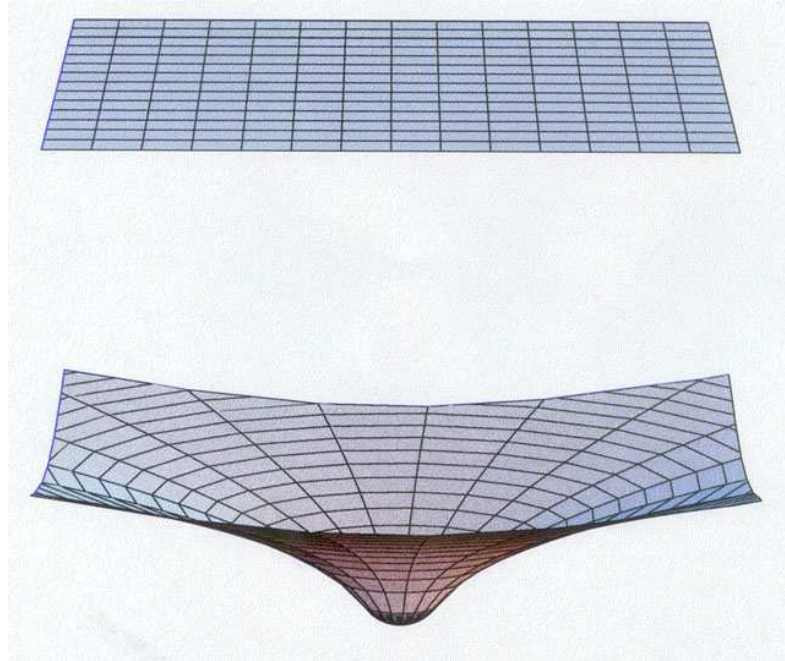
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$



EINSTEIN SIMPLIFIED

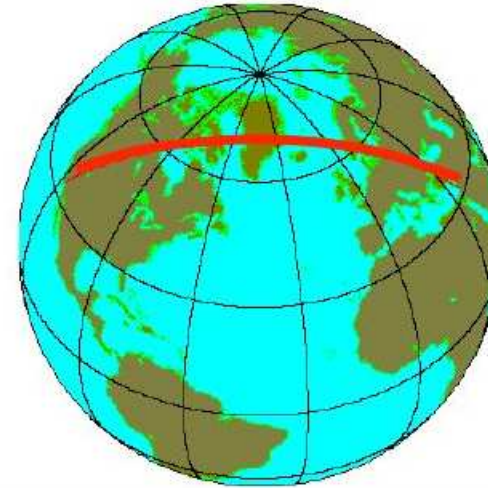
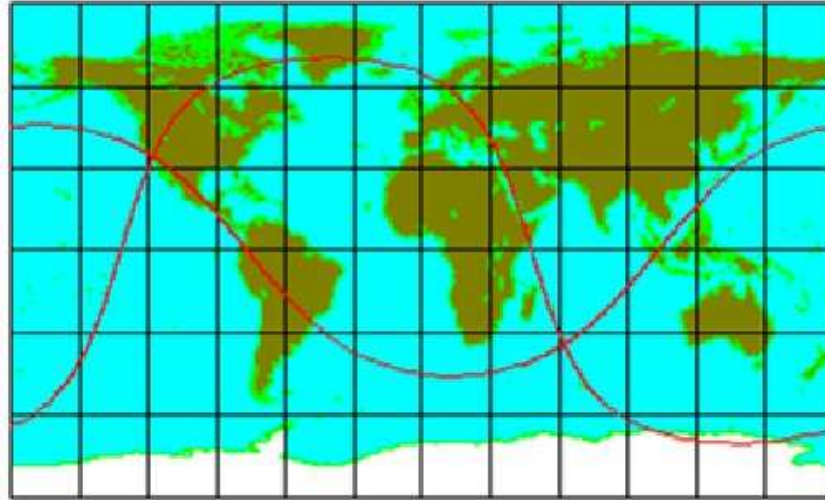


Gravedad = espacio curvo

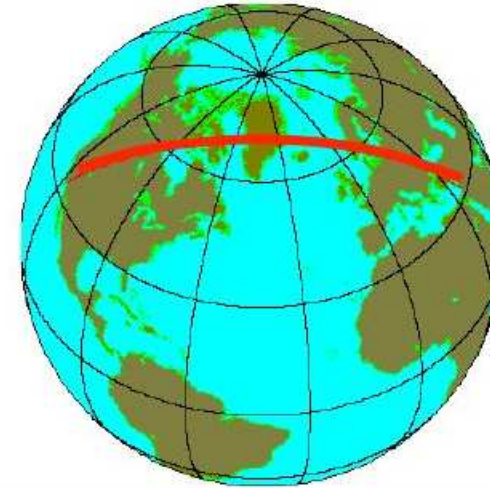
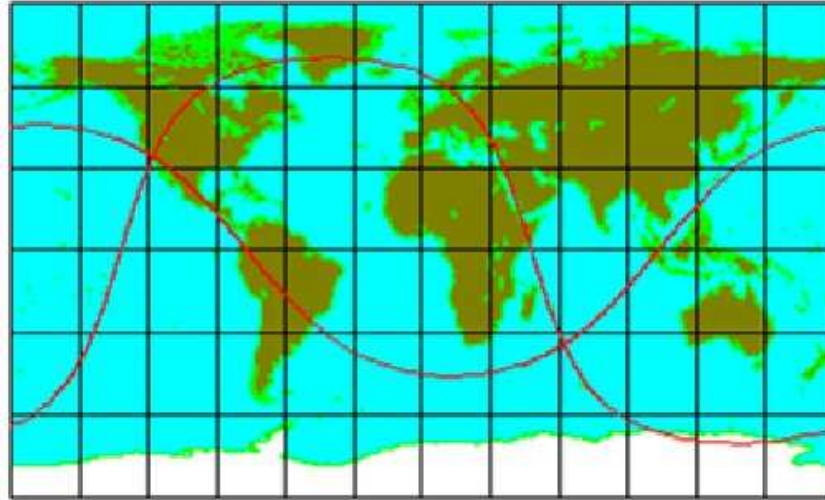


La materia indica cómo se curva el espacio.
El espacio indica cómo se mueve la materia.

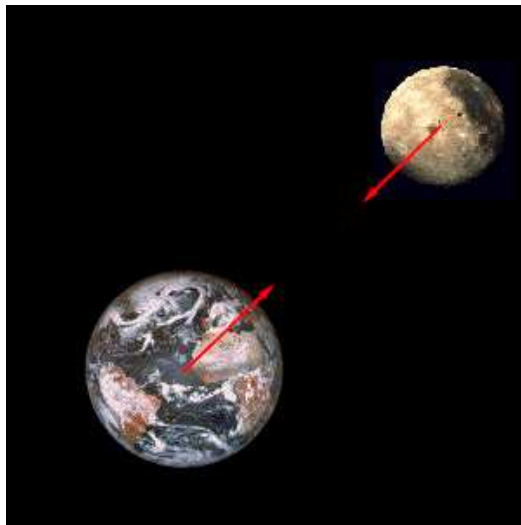
La materia sigue la trayectoria más recta posible



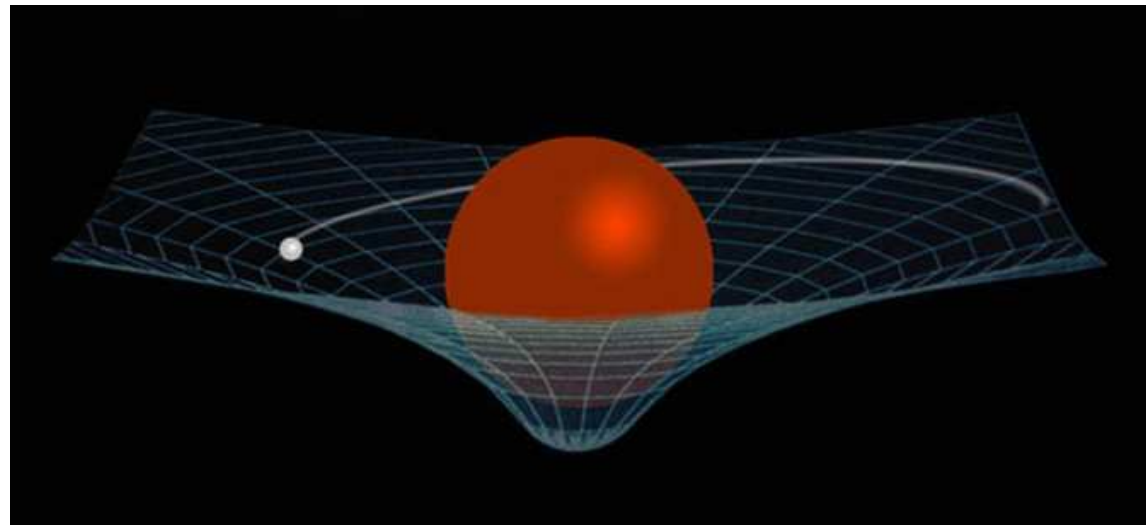
La materia sigue la trayectoria más recta posible



No hay fuerza gravitatoria à la Newton, sino trayectorias en espacio curvo.

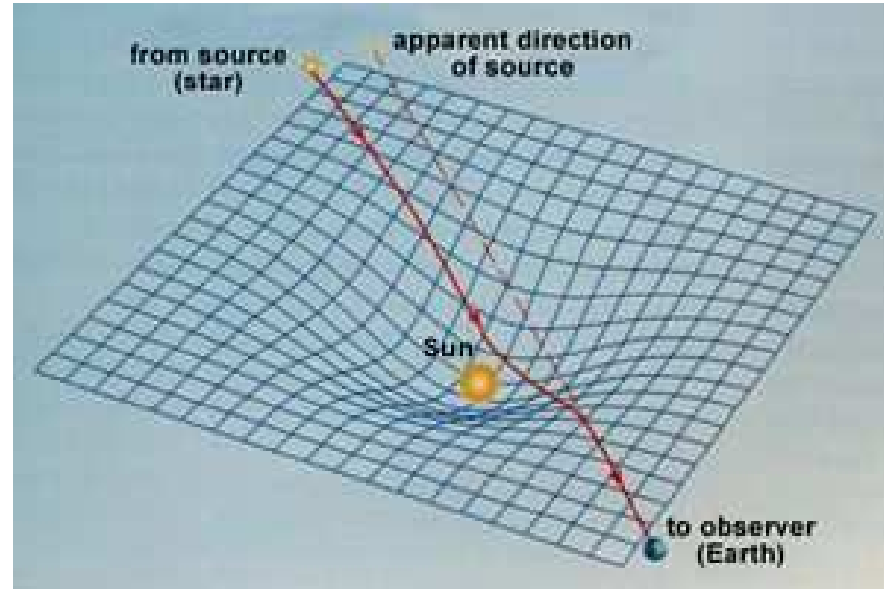


NO

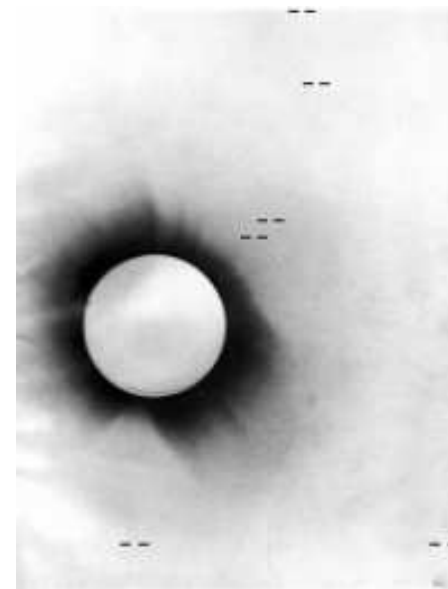


SÍ

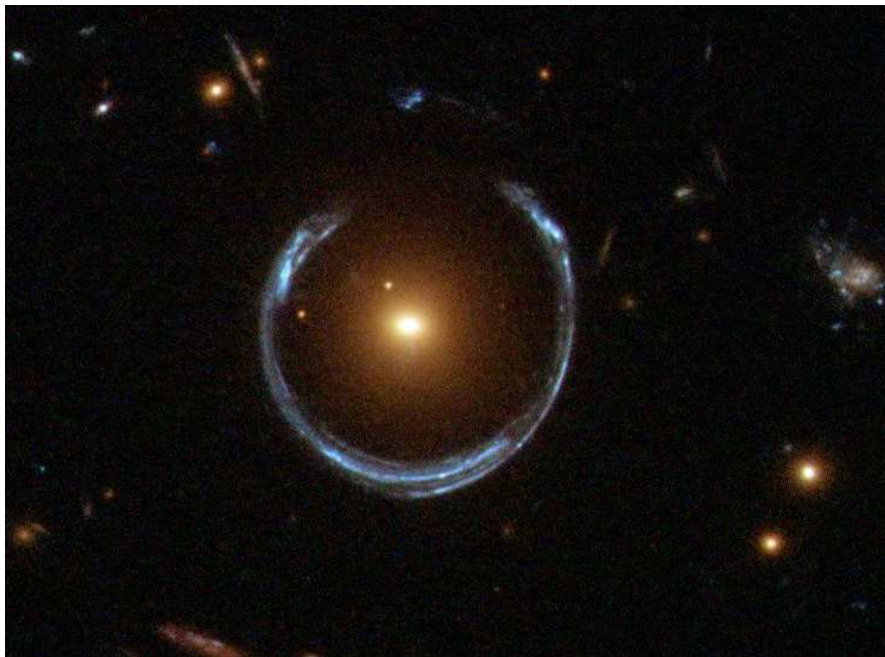
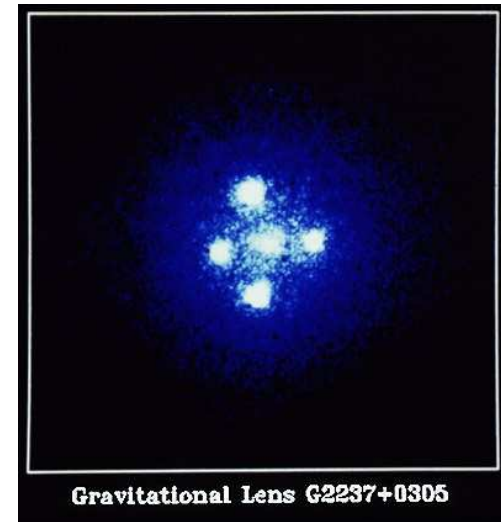
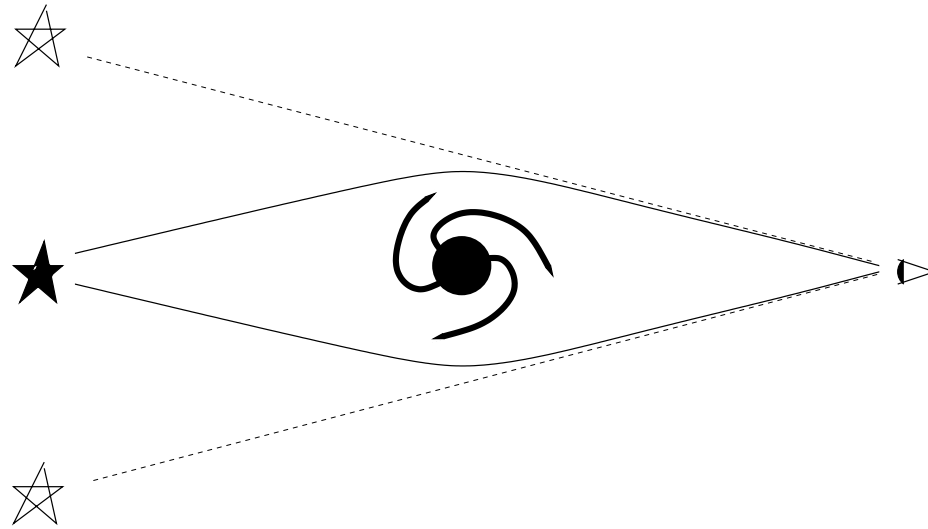
No solo la materia, sino también la luz



Efecto medido por Eddington en el eclipse solar de 1919

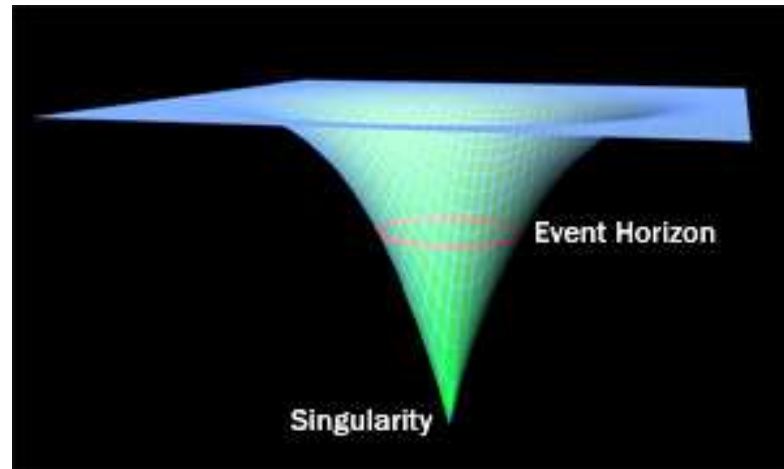
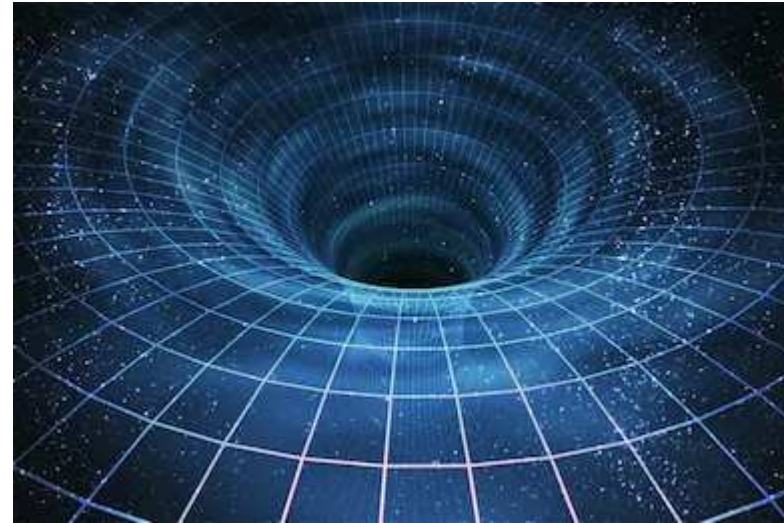
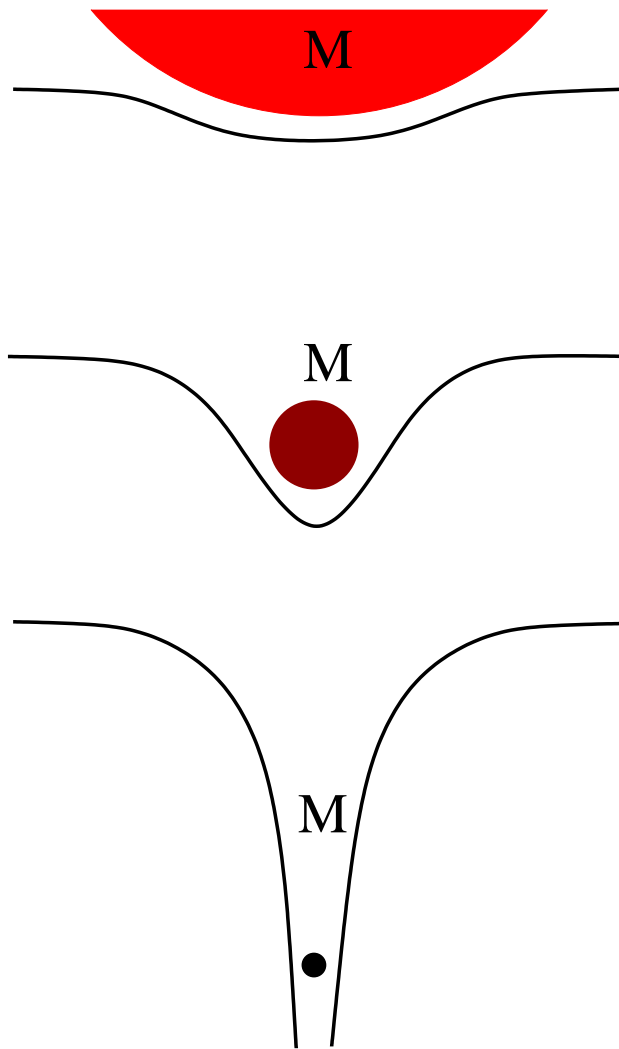


—> Objetos masivos actúan como lentes gravitatorias



3. Agujeros negros en la Relatividad General

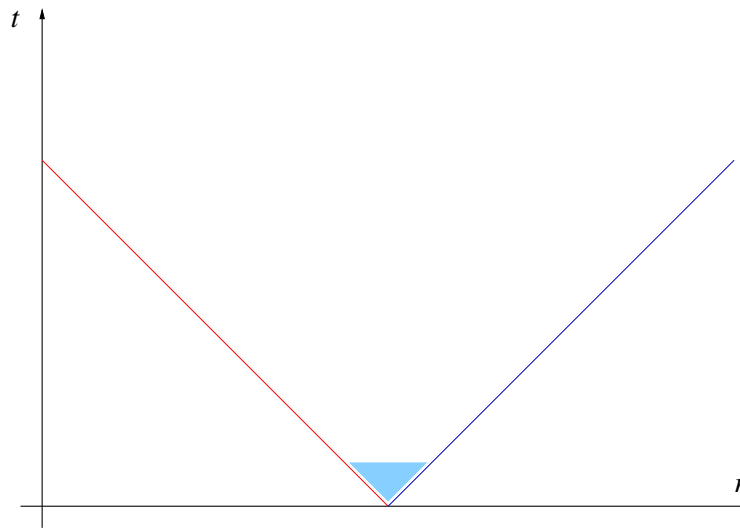
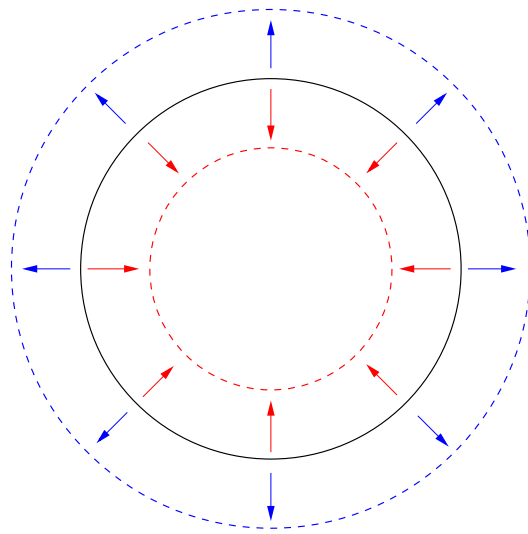
Imagen típica:



... pero no muy correcta

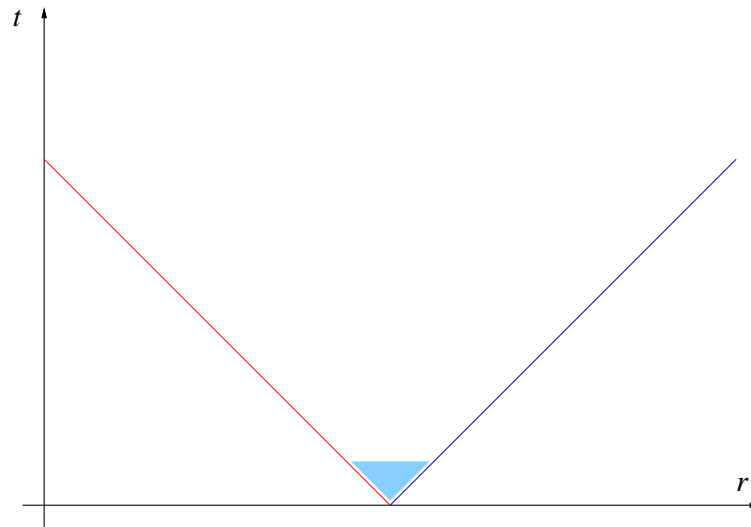
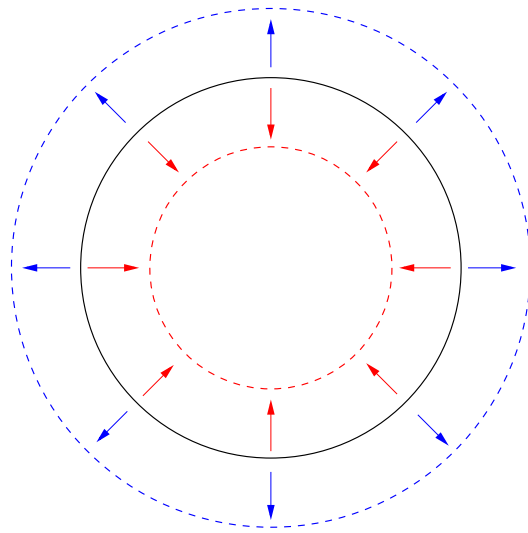
Mejor: superficies atrapados

Rayos entrantes y salientes de una esfera inmaterial

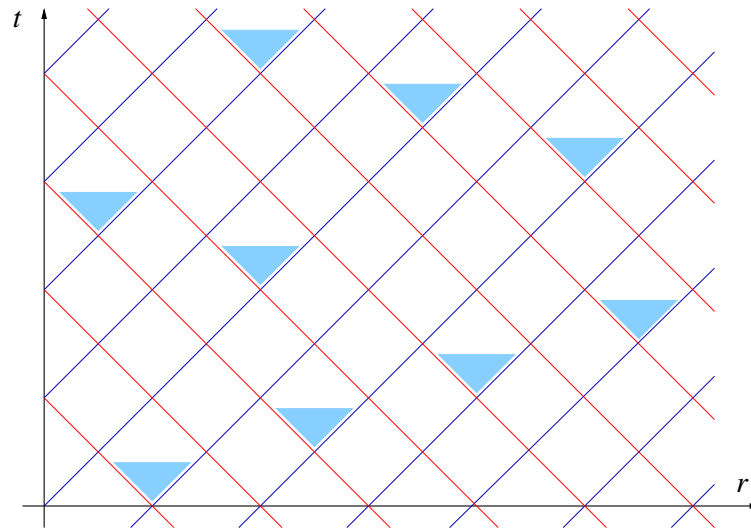
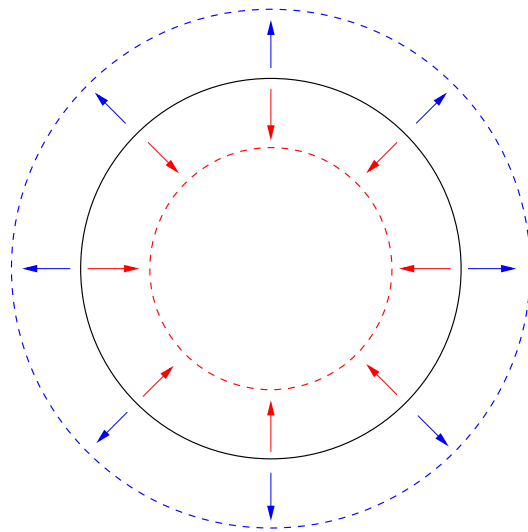


Mejor: superficies atrapados

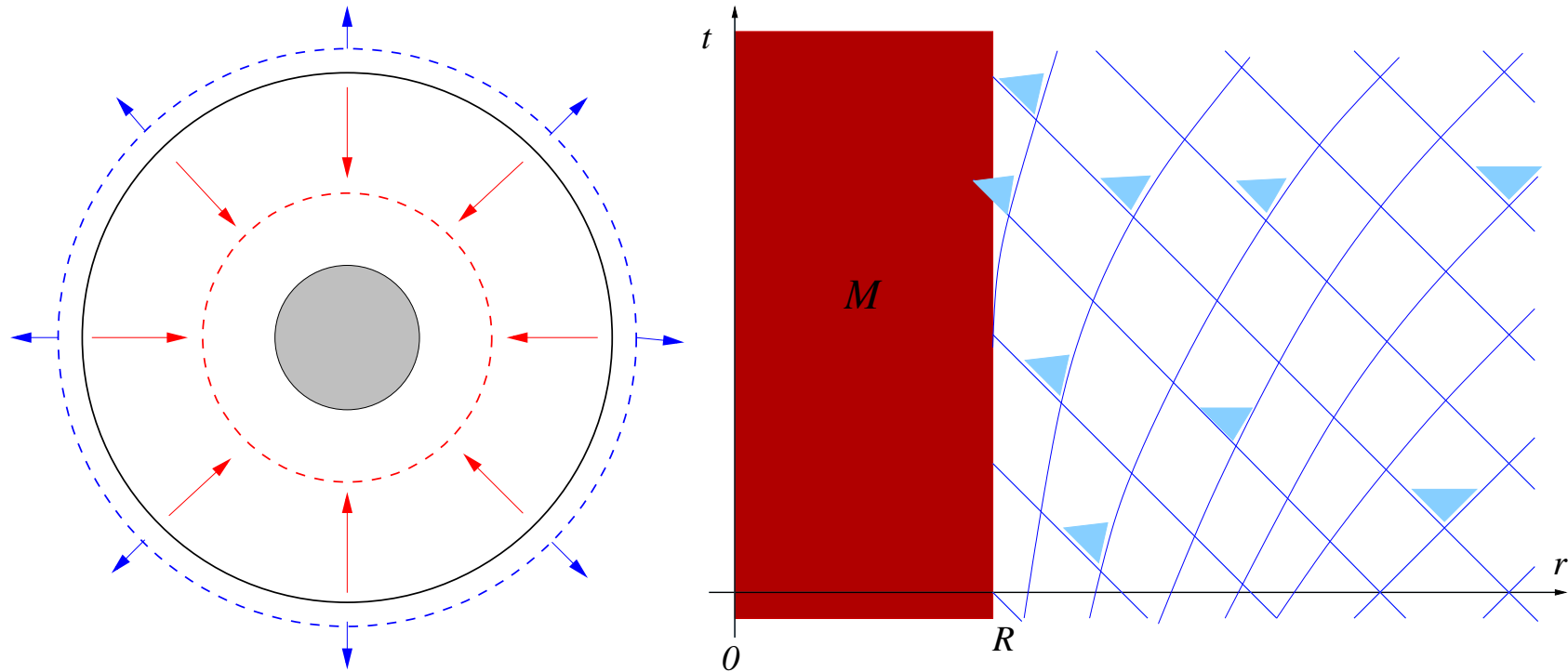
Rayos entrantes y salientes de una esfera inmaterial



Esfera inmaterial en cada punto



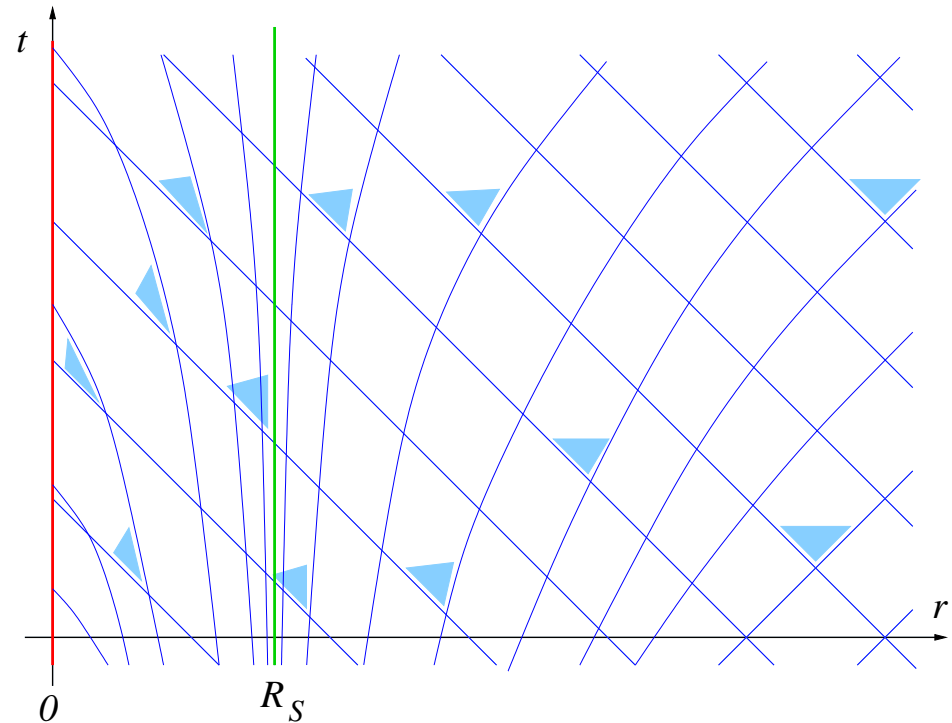
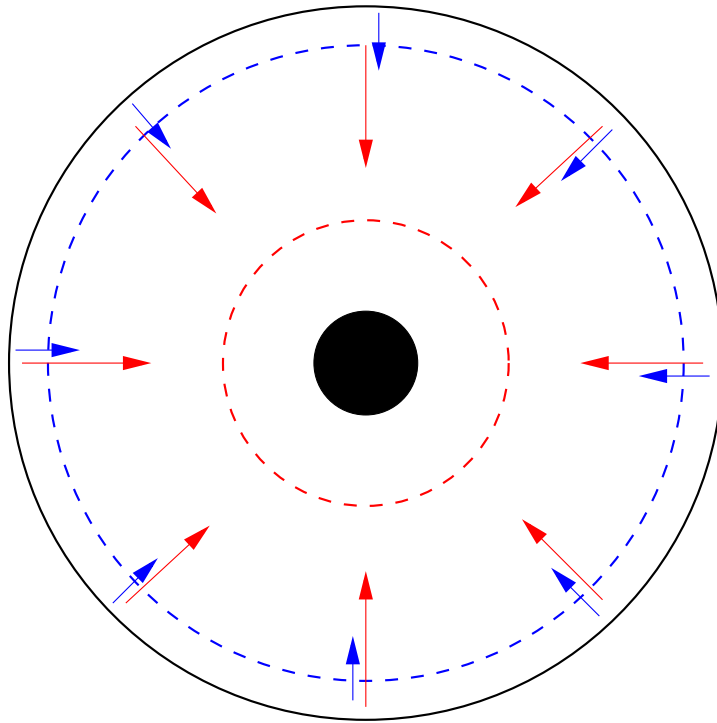
Rayos influenciados por objeto masivo



→ A los rayos salientes les cuesta salir

→ Efecto Doppler gravitatorio, dilatación temporal, ...

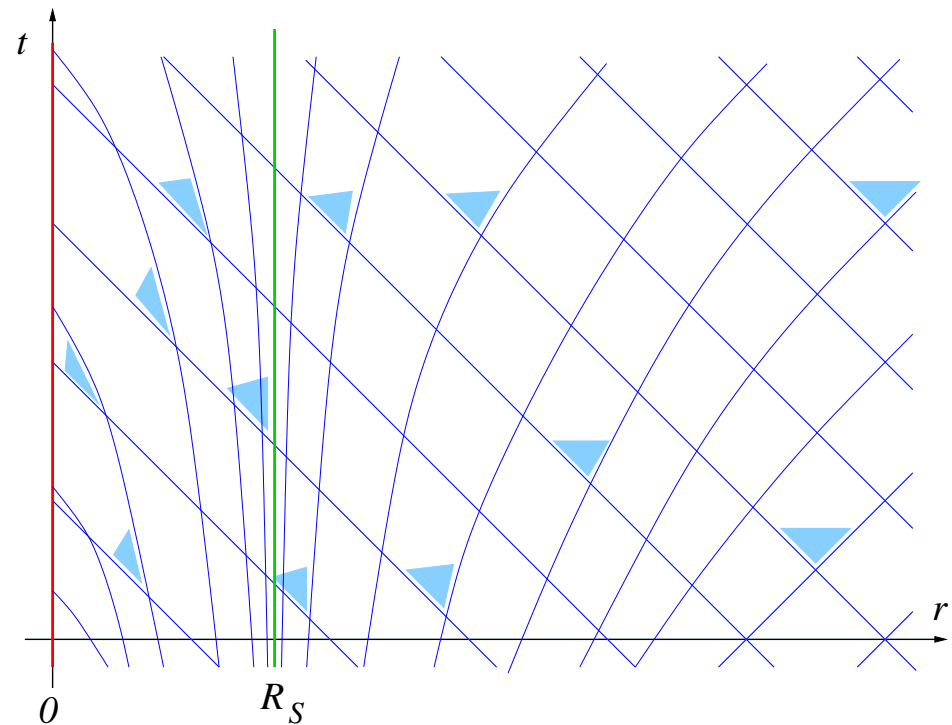
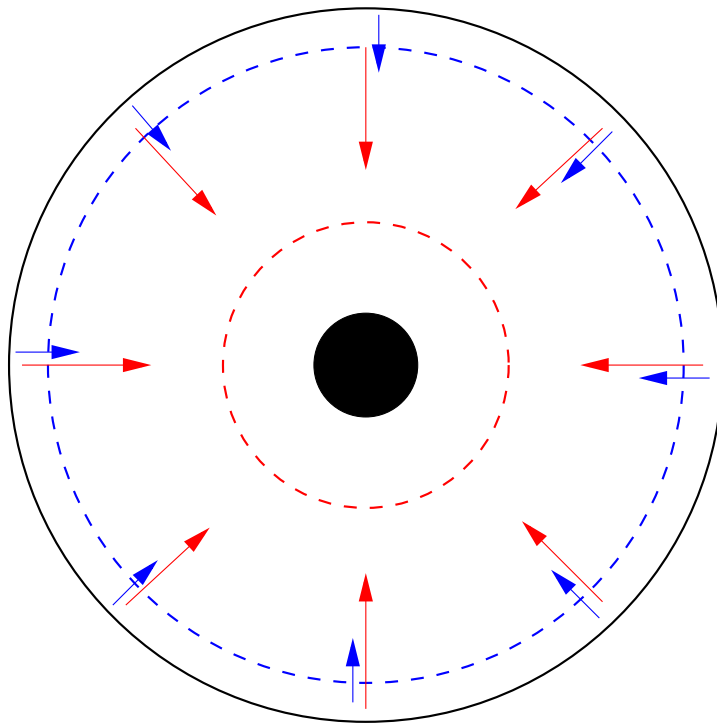
Objetos muy masivo crea superficies atrapadas: **radio crítico**



La luz se **queda atrapada** dentro del radio de Schwarzschild

Se forma un **horizonte**: no salen señales desde el interior

Objetos muy masivo crea superficies atrapadas: **radio crítico**



La luz se **queda atrapada** dentro del radio de Schwarzschild

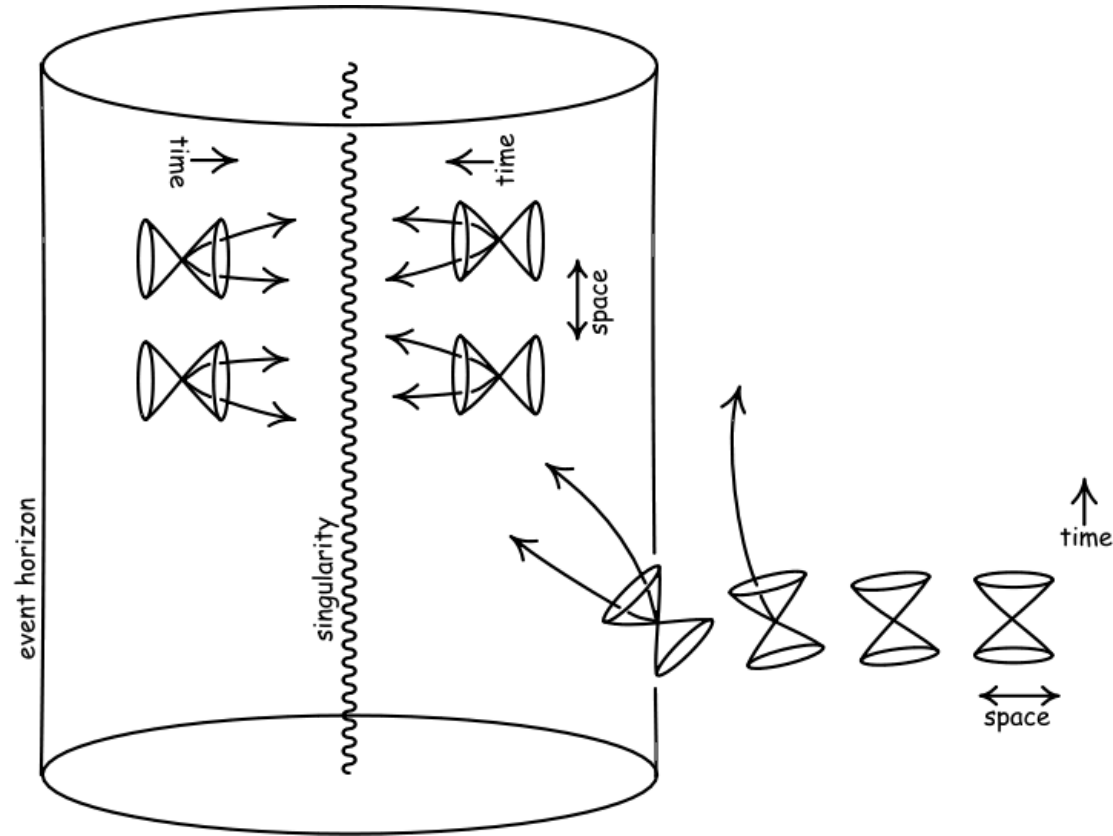
Se forma un **horizonte**: no salen señales desde el interior

Nada puede viajar más rápido que la luz

—> **No puede salir nada** desde dentro del horizonte

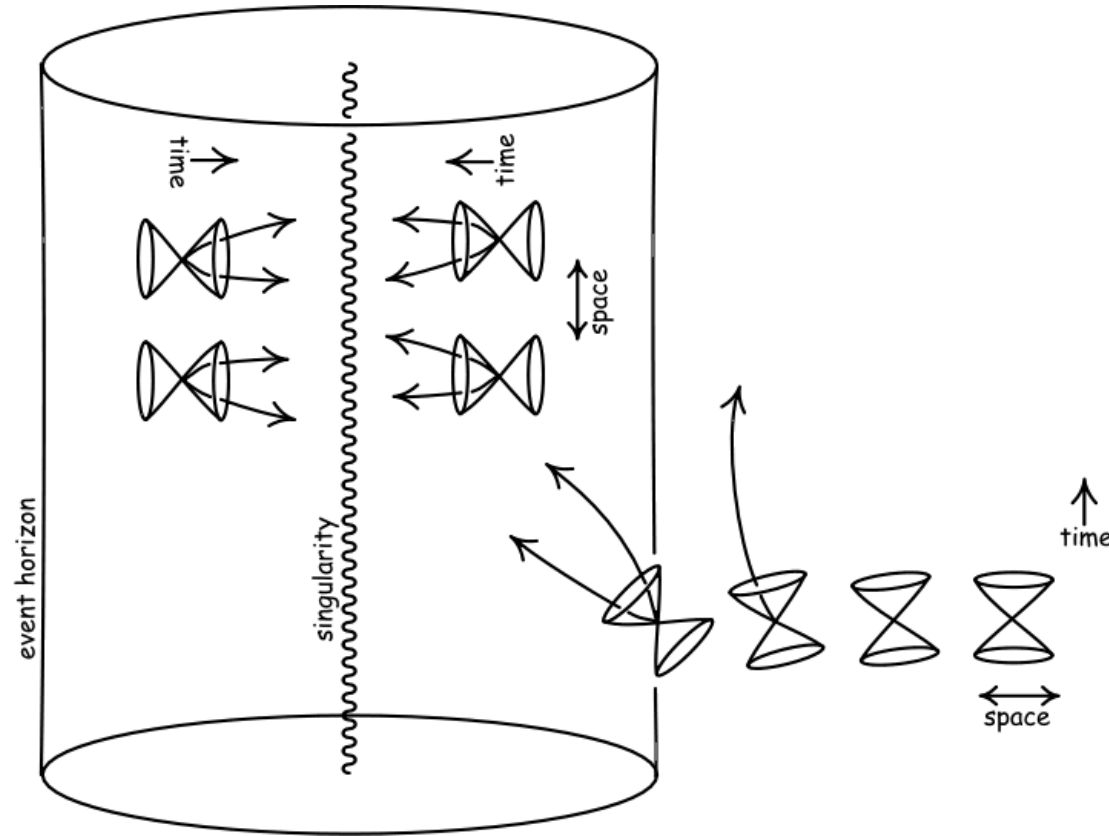
—> **AGUJERO NEGRO!!**

Agujero negro: campo gravitatorio tan fuerte que la luz queda atrapada



- Cono de luz dirigido hacia dentro
- Trayectorias de partículas dirigidas hacia dentro
- Imposible quedarse en reposo dentro del horizonte

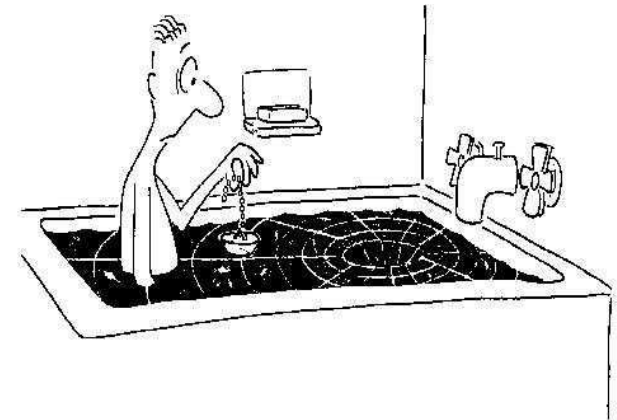
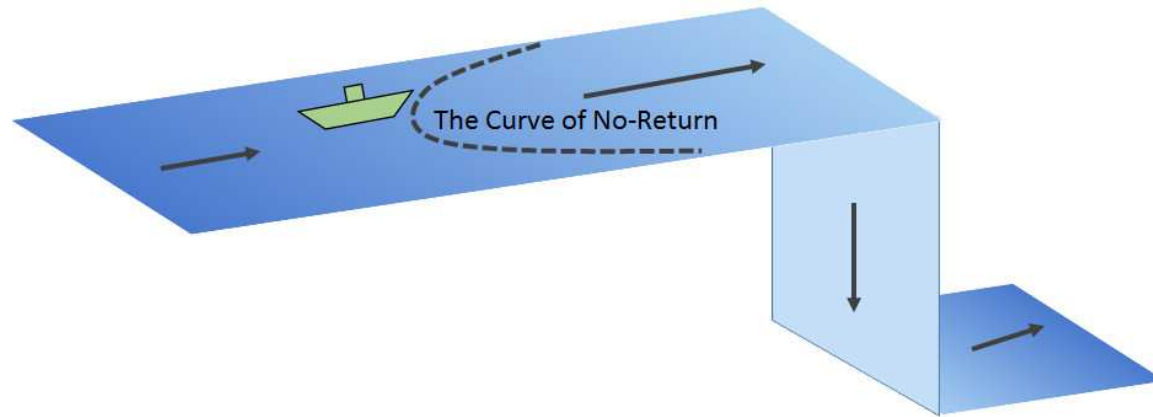
Agujero negro: campo gravitatorio tan fuerte que la luz queda atrapada



- Cono de luz dirigido hacia dentro
- Trayectorias de partículas dirigidas hacia dentro
- Imposible quedarse en reposo dentro del horizonte
- Se forma una singularidad (= punto de curvatura infinita)
- todo acabará inevitablemente en la singularidad

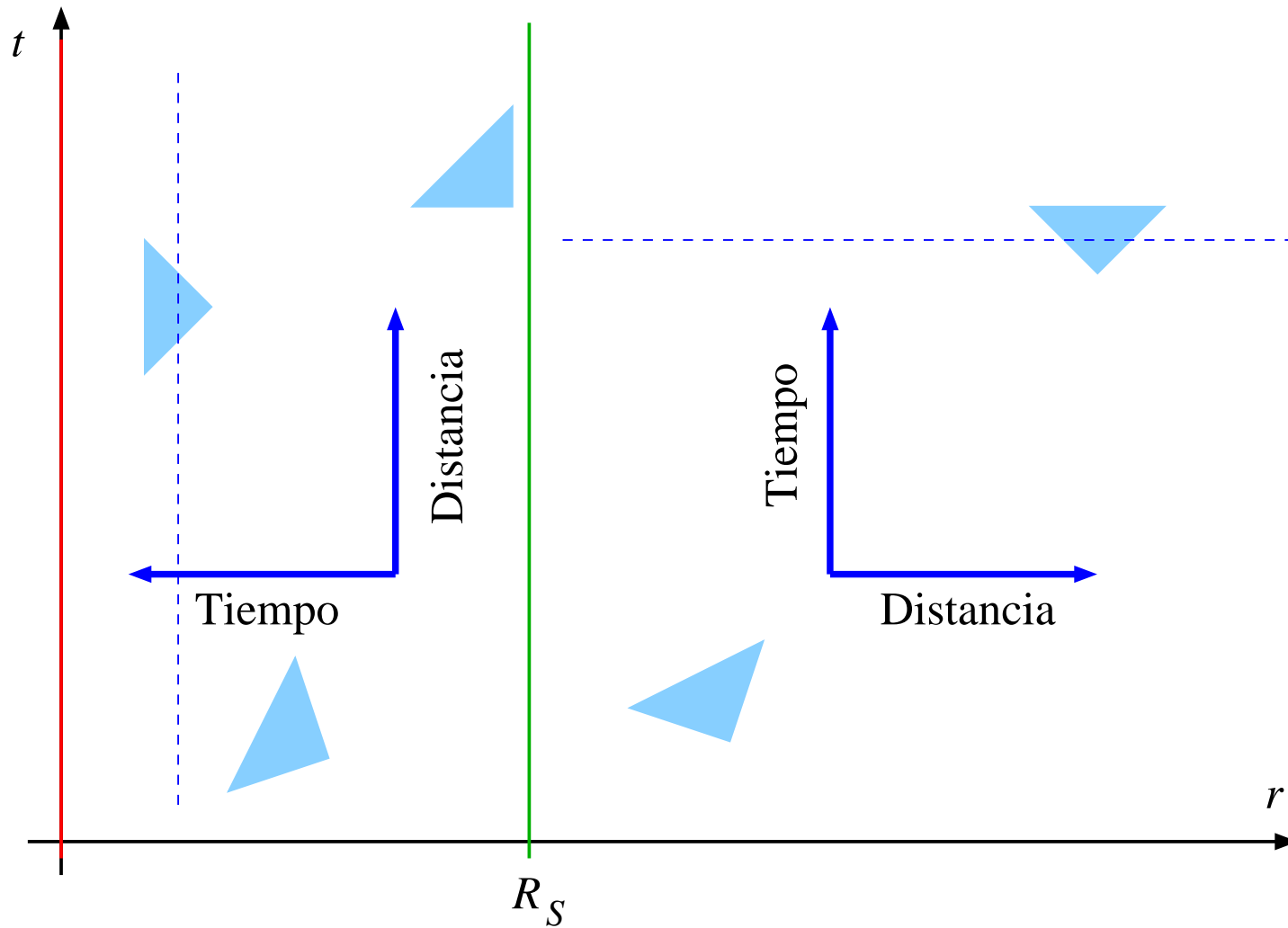
Horizonte = punto de **no retorno**
= **frontera** del agujero negro
= punto perfectamente regular

Singularidad = punto de **curvatura infinita**
= **final** del espaciotiempo
= **final** de la física conocida



→ Agujero negro estacionario **está vacío por dentro!!**

Dentro del agujero negro algo pasa con la dirección del tiempo:



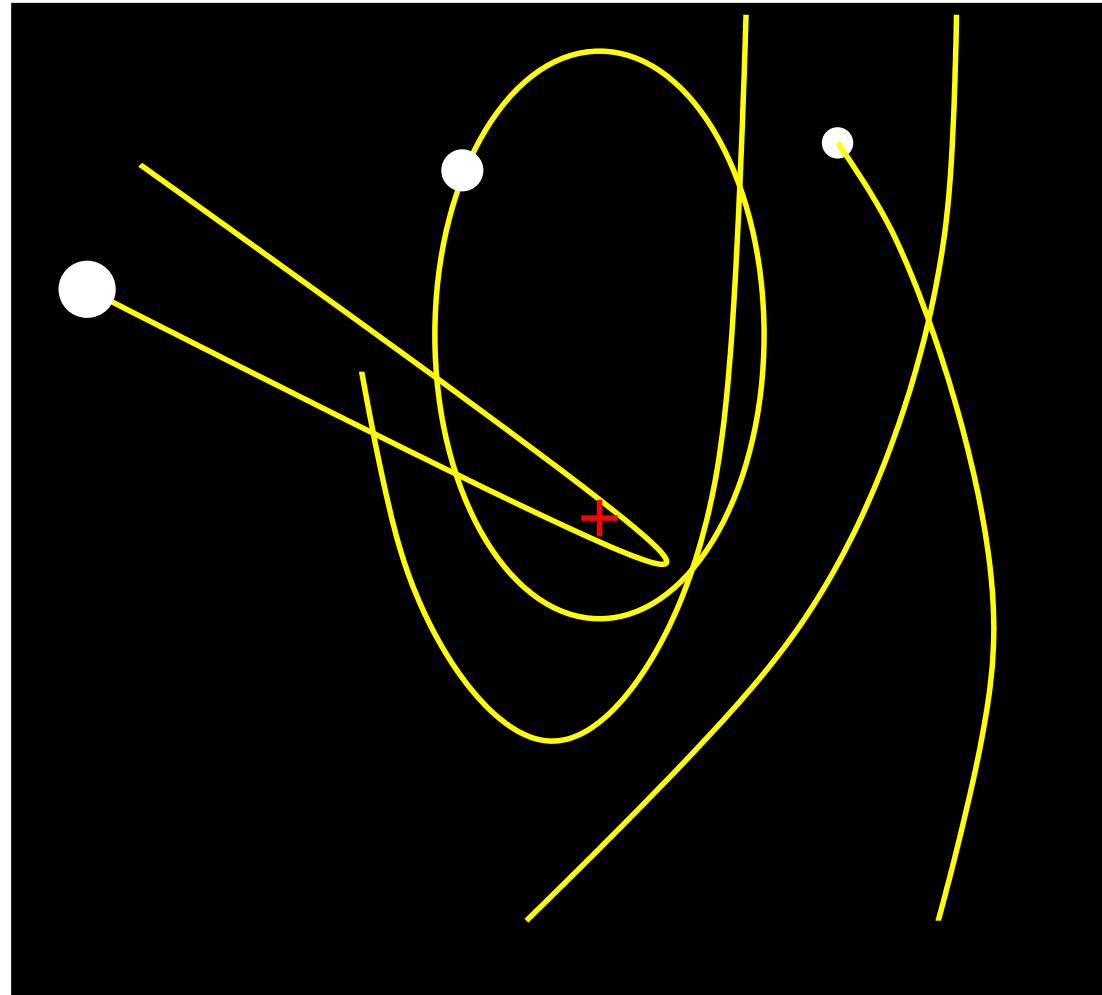
- > imposible quedarte en reposo dentro del horizonte
- > horizonte es inevitable porque **está en el futuro**

4. ¿Cómo se observa un agujero negro ...

... ya que ni se escapa la luz?

4. ¿Cómo se observa un agujero negro ...

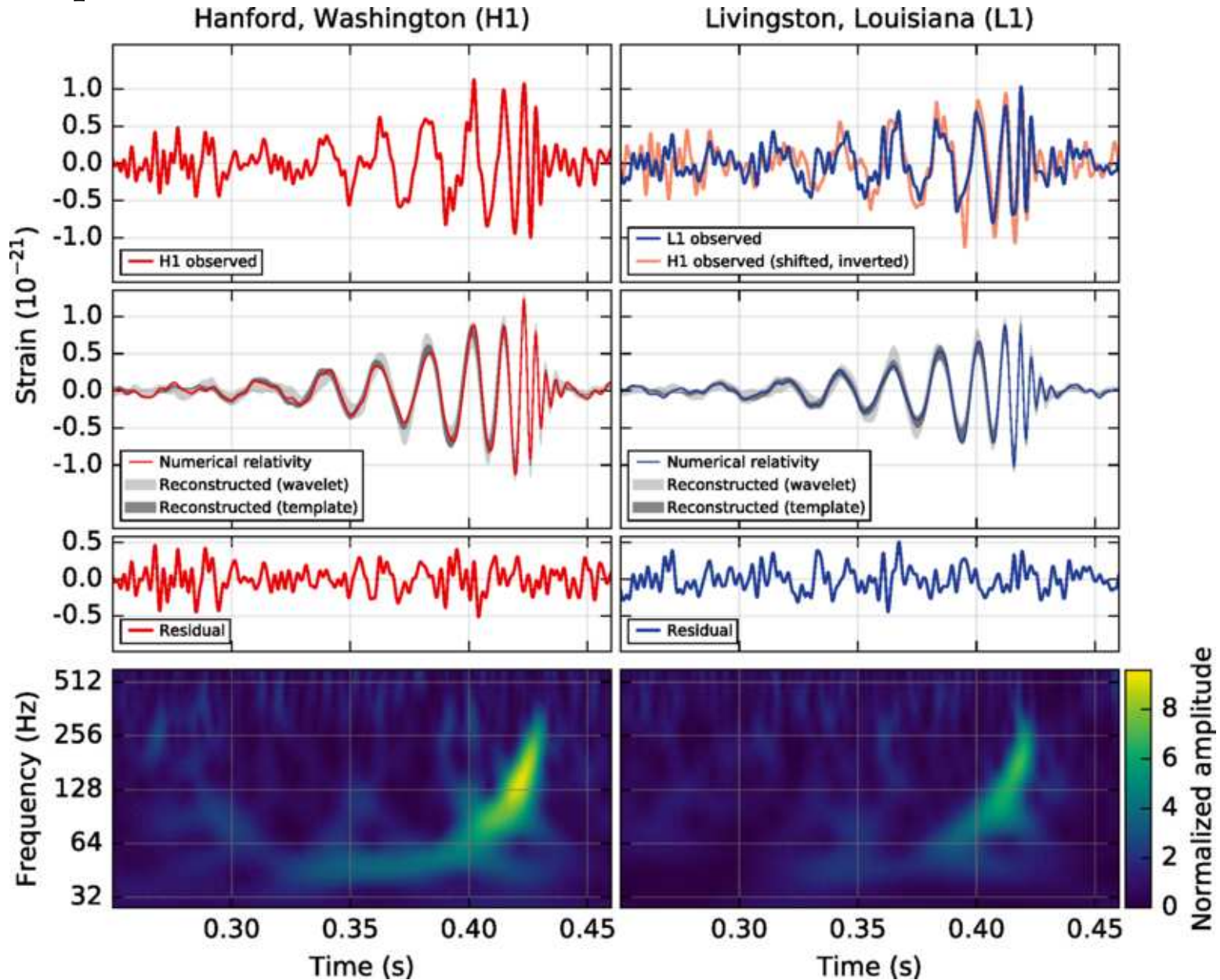
1. Por la atracción de objetos cercanos



Objeto de 3 millones de masas solares en el centro de la galaxia

2. Por las ondas gravitacionales que emiten:

El 14 de septiembre 2015 a las 9:50 UTC: **GW150914**



Probabilidad de falsa alarma $< 2 \cdot 10^{-7} \Leftrightarrow 5,1\sigma$

Señal típica de colisión de dos objetos masivos:

- 6,9 ms de retraso entre las dos señales
- Aumento de frecuencia y amplitud de 35 Hz a 150 Hz en 0,2 s
- Oscilaciones amortiguadas después de máximo

Probabilidad de falsa alarma $< 2 \cdot 10^{-7} \Leftrightarrow 5,1\sigma$

Señal típica de colisión de dos objetos masivos:

- 6,9 ms de retraso entre las dos señales
- Aumento de frecuencia y amplitud de 35 Hz a 150 Hz en 0,2 s
- Oscilaciones amortiguadas después de máximo

Datos indican (90 % confidence level):

- $\mathcal{M} \approx 30M_{\odot} \implies$ dos objetos de $m_1 = (36 \pm 5)M_{\odot}$ y $m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$ separación de $\sim 350 \text{ km}$

Probabilidad de falsa alarma $< 2 \cdot 10^{-7} \Leftrightarrow 5,1\sigma$

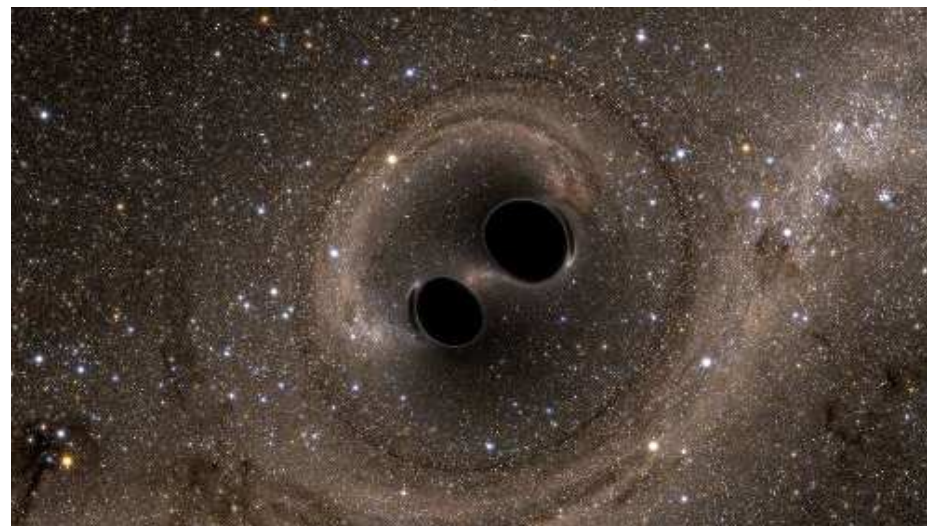
Señal típica de colisión de dos objetos masivos:

- 6,9 ms de retraso entre las dos señales
- Aumento de frecuencia y amplitud de 35 Hz a 150 Hz en 0,2 s
- Oscilaciones amortiguadas después de máximo

Datos indican (90 % confidence level):

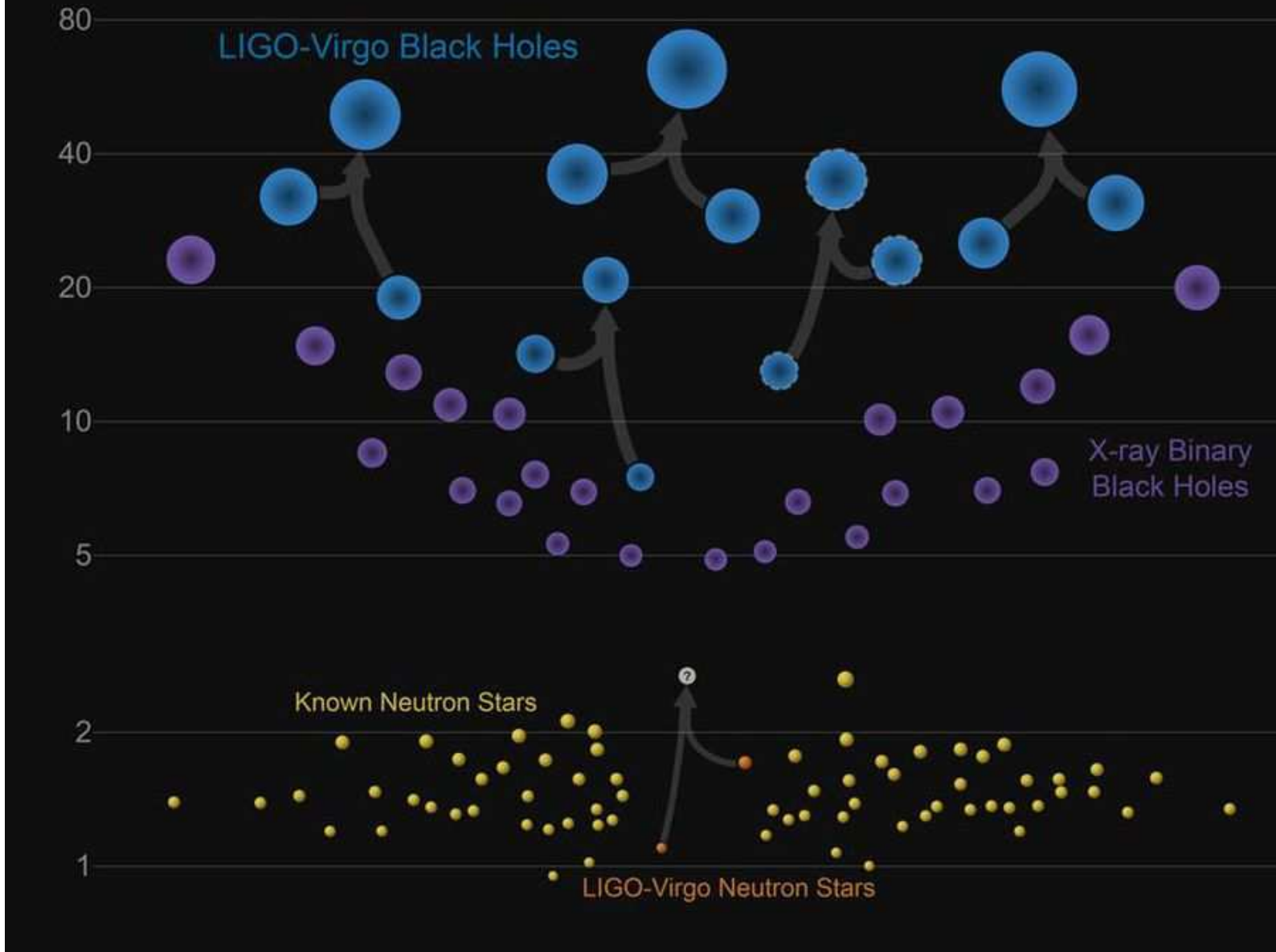
- $\mathcal{M} \approx 30M_{\odot} \Rightarrow$ dos objetos de $m_1 = (36 \pm 5)M_{\odot}$ y $m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \Rightarrow$ separación de $\sim 350 \text{ km}$

Fusión de dos agujeros negros!

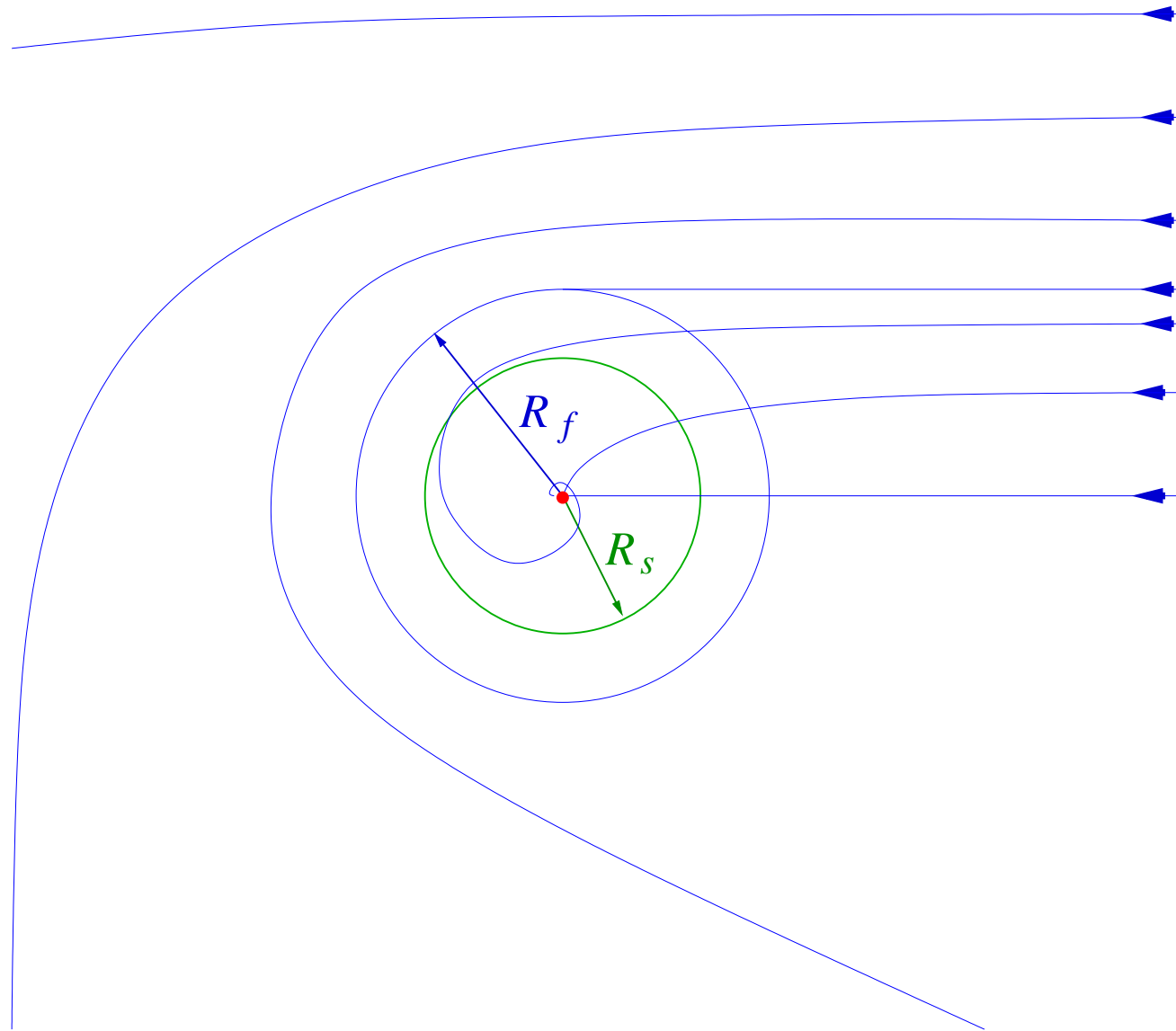


Masses in the Stellar Graveyard

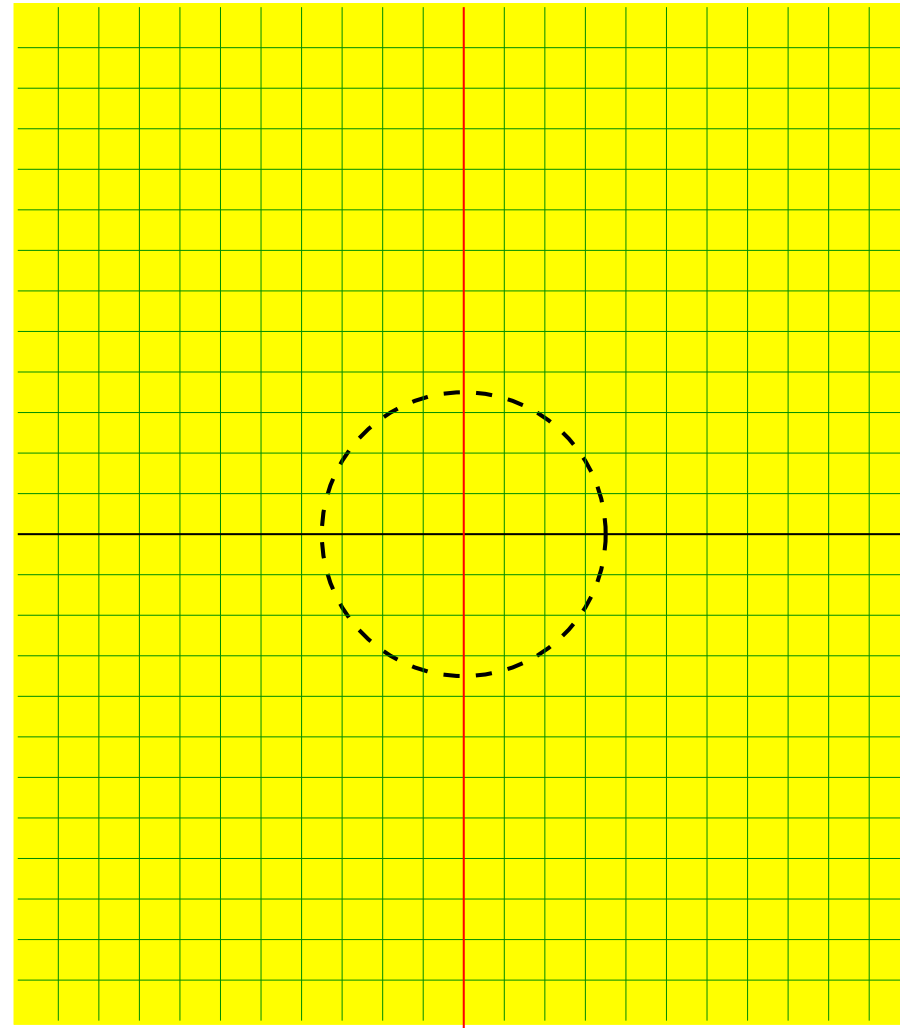
in Solar Masses



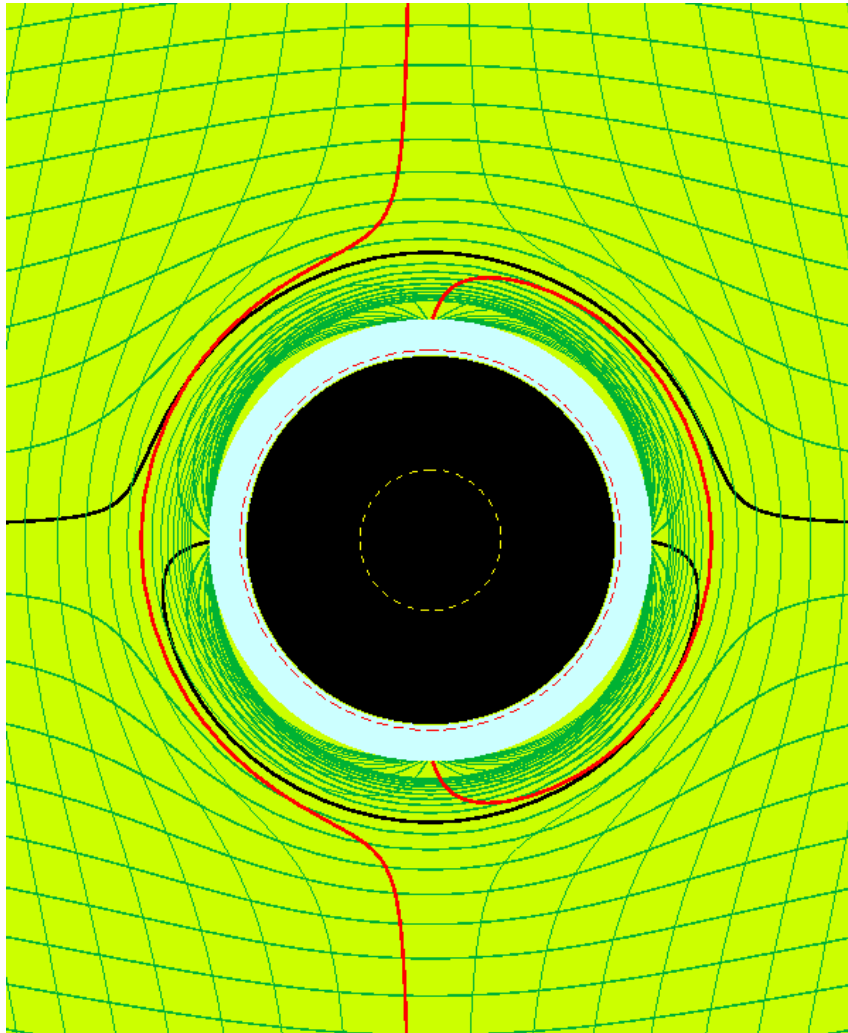
3. Efectos gravitatorios sobre la luz: distorsión de imágenes



Un agujero negro sobre un fondo de coordenadas ...



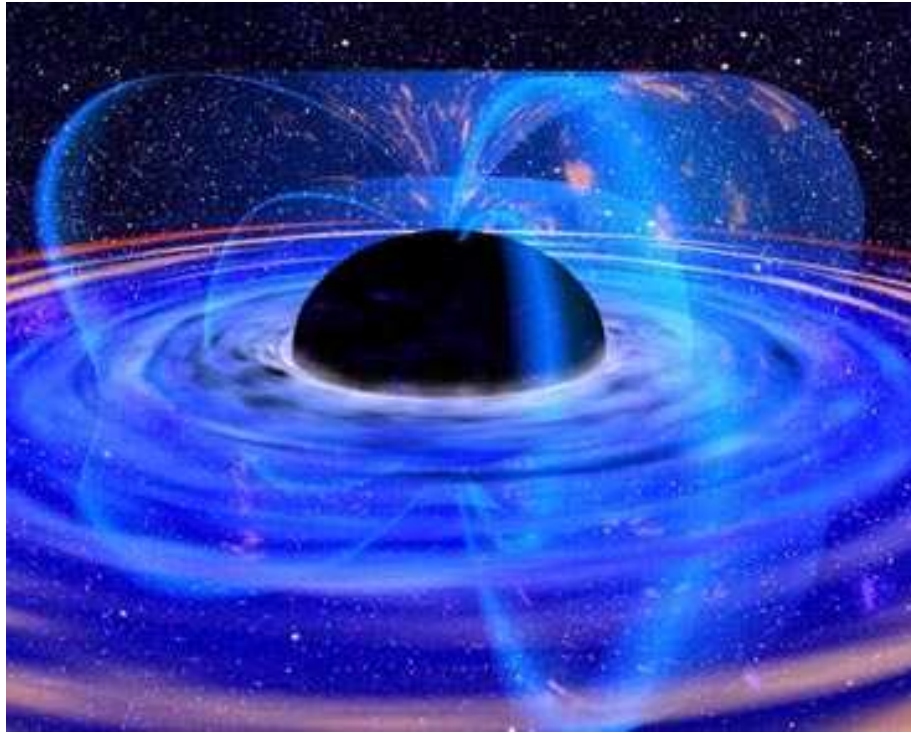
... se vería así:



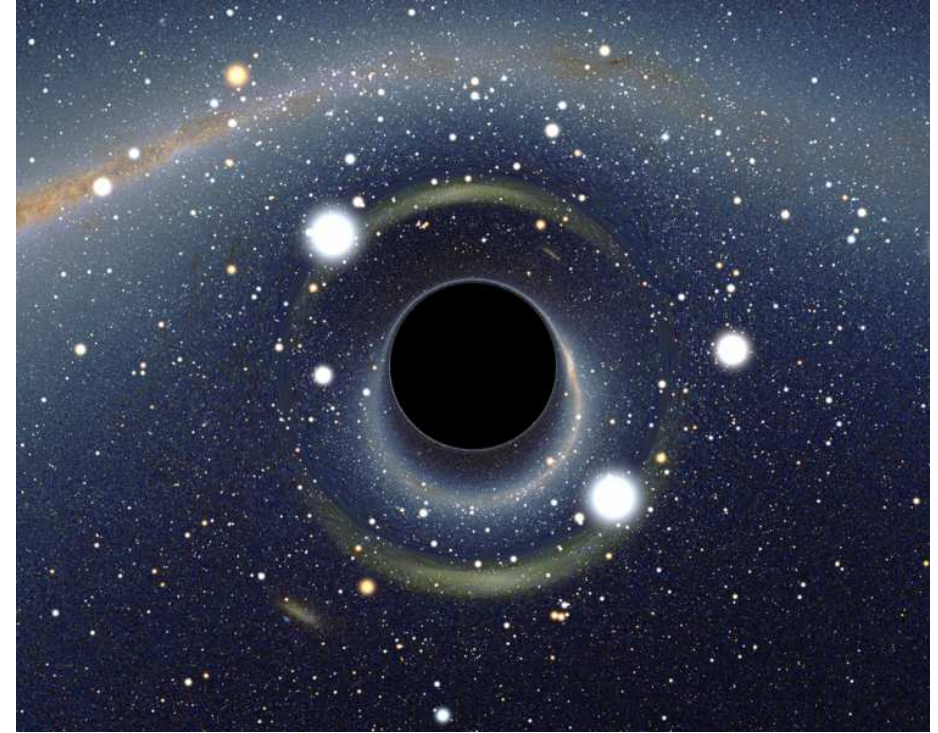
Se observan:

- la distorsión de la imagen del fondo
- los anillos de Einstein
- la parte de atrás del agujero negro
- la sombra del agujero negro

Por lo tanto, cuidado con las imágenes en internet....

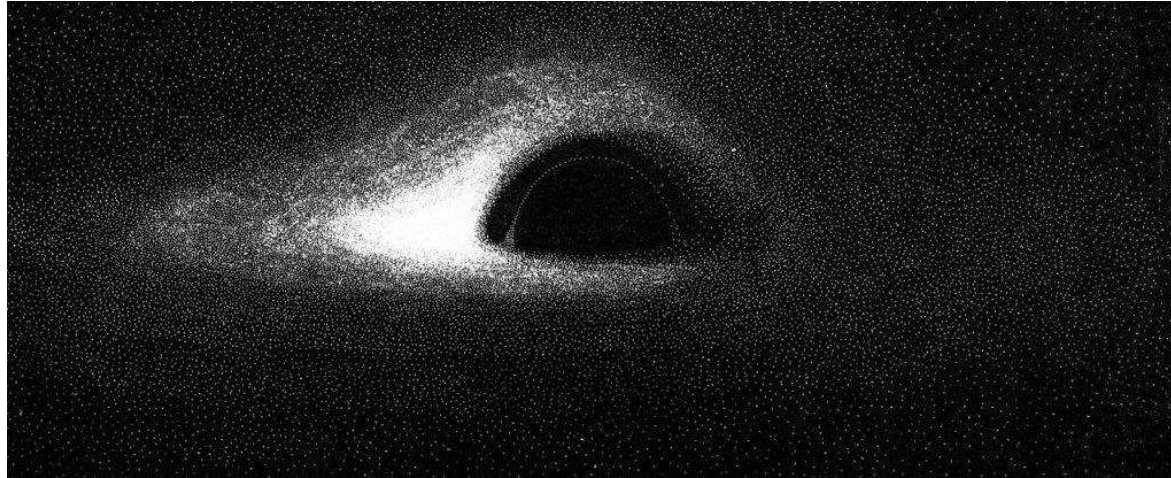


NO



Mejor

Aún mejor:



(Jean-Pierre Luminet, 1978)

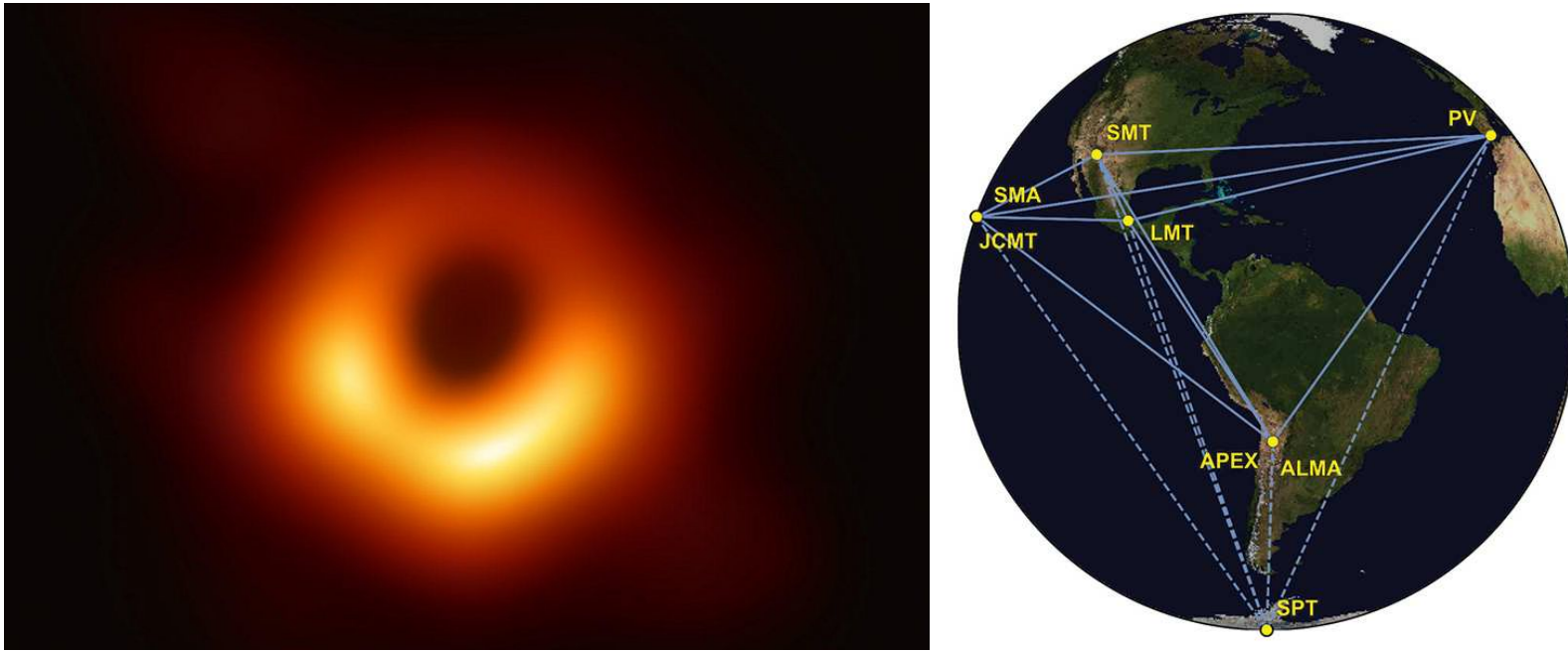


(Kip Thorne, para de *Interstellar*, 2014)

4. Por el comportamiento de la materia cercana: discos de acreción



Event Horizon Telescope (2019): agujero negro supermasivo de M87



- Very-Long-Baseline Interferometry: procesión de datos
- Sombra y disco de acreción de M87*
→ $m \sim 6,7 \cdot 10^9 M_{\odot}$ a $d \sim 53 \cdot 10^6$ años-luz
- Con más telescopios podrán aumentar la resolución
- Imagen de Sagitarius A* en futuro cercano?
→ $m \sim 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ a $d \sim 25000$ años-luz

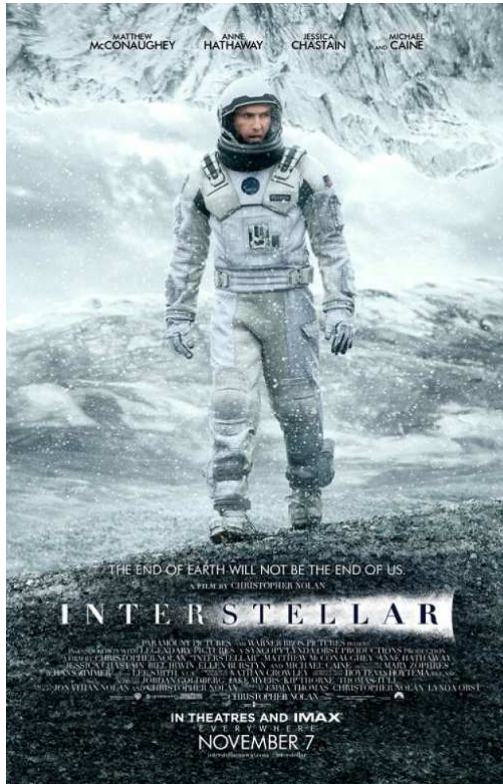
5. ¿Qué pasa si uno se acerca al agujero negro?

Depende ...

- ... de cuánto te acerques:
 - dilatación temporal gravitatorio
- ... desde donde se mire:
 - observador lejano
 - observador cayendo
- ... de lo grande que seas:
 - objeto puntual
 - observador humano
- ... de tu manera de moverte:
 - en caída libre
 - en observador en reposo

... de cuánto de acercques:

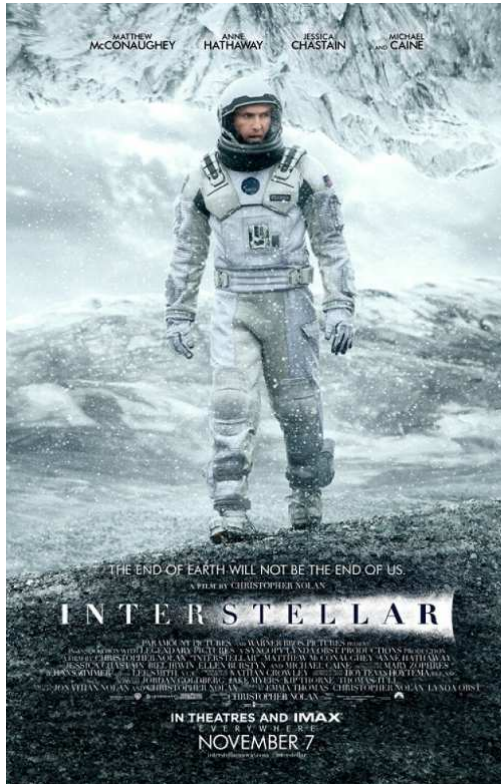
Abajo en un pozo gravitatorio el tiempo corre más lento!



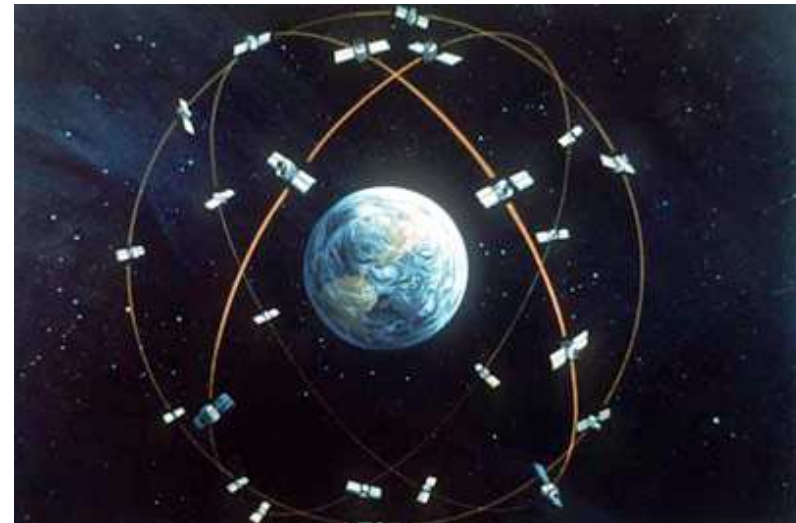
- 1 hora en planeta de agua cerca de Gargantua equivalen a 7 años en la Tierra

... de cuánto de acercques:

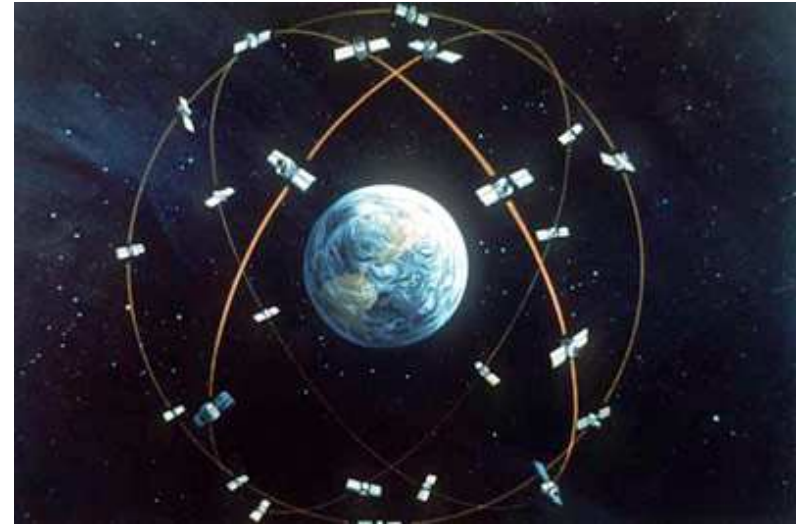
Abajo en un pozo gravitatorio el tiempo corre más lento!



- 1 hora en planeta de agua cerca de Gargantua equivalen a 7 años en la Tierra
- En la vida real: efecto importante en GPS



Contacto con satélites a 20 000 km
Imprecisión permitida: $< 0,03 \mu s/d$

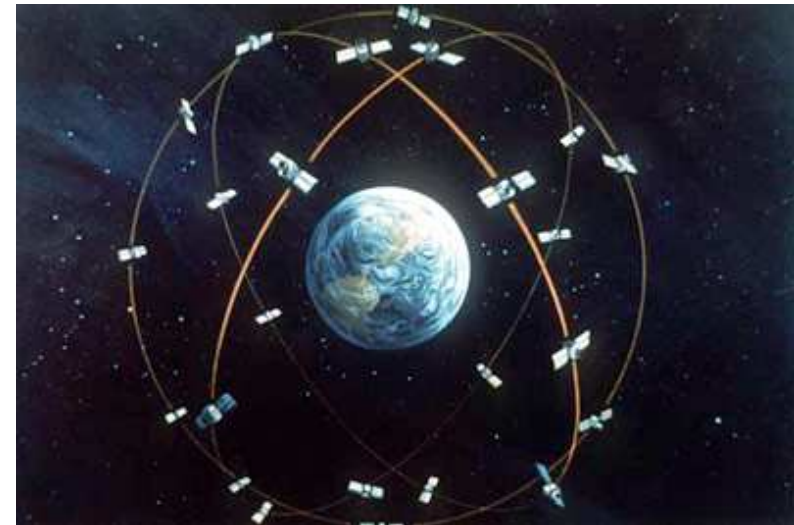


Contacto con satélites a 20 000 km

Imprecisión permitida: $< 0,03 \mu s/d$

Relatividad especial: retraso de $7 \mu s/d$

Relatividad general: adelanto de $45 \mu s/d$



Contacto con satélites a 20 000 km

Imprecisión permitida: $< 0,03 \mu s/d$

Relatividad especial: retraso de $7 \mu s/d$

Relatividad general: adelanto de $45 \mu s/d$

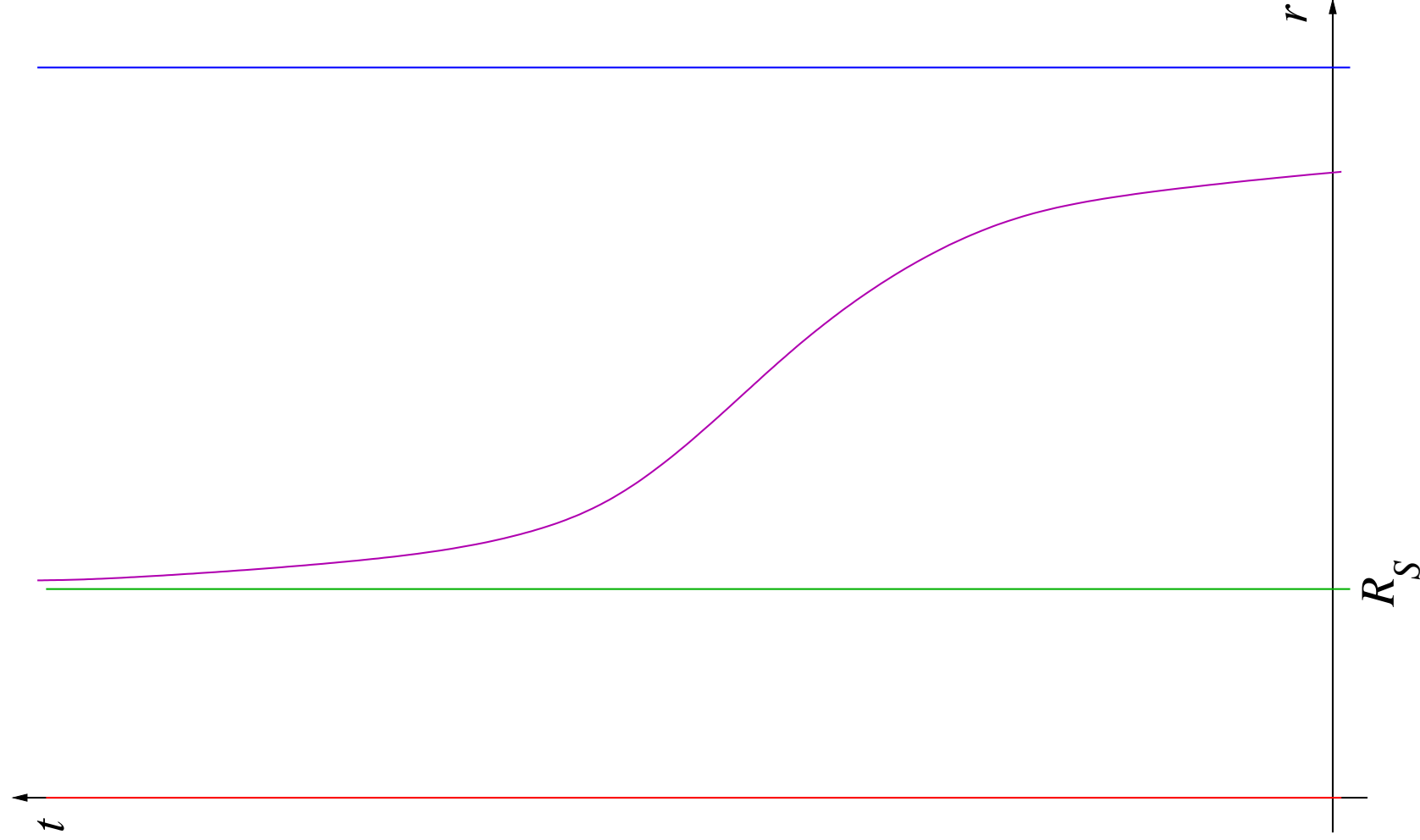
Efecto total: $38 \mu s/d$

—→ error acumulativo de 10 km/d!!!

—→ **Corrección en relojes de satélites**

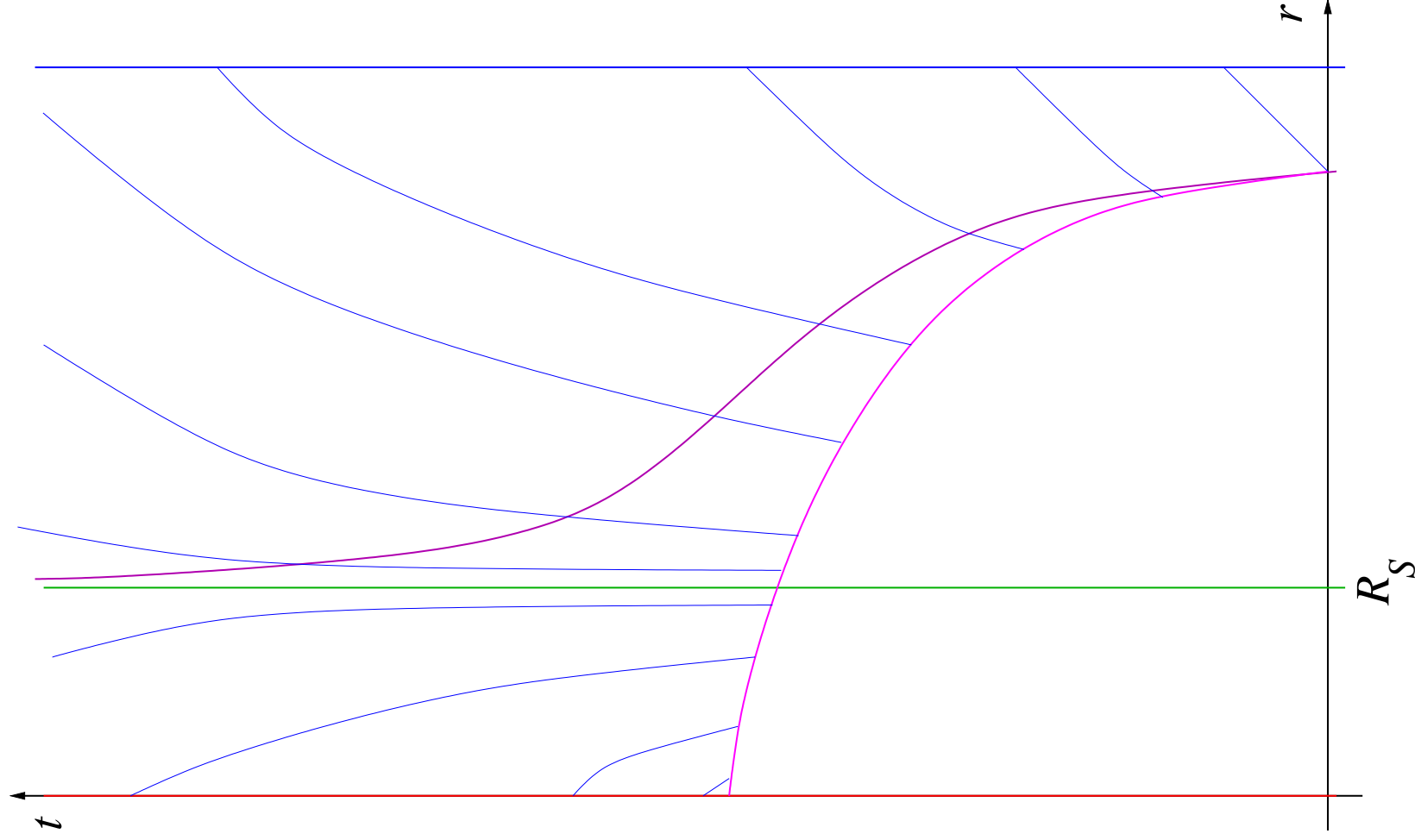
... desde donde se mira:

el observador lejano



...desde donde se mire: el observador lejano

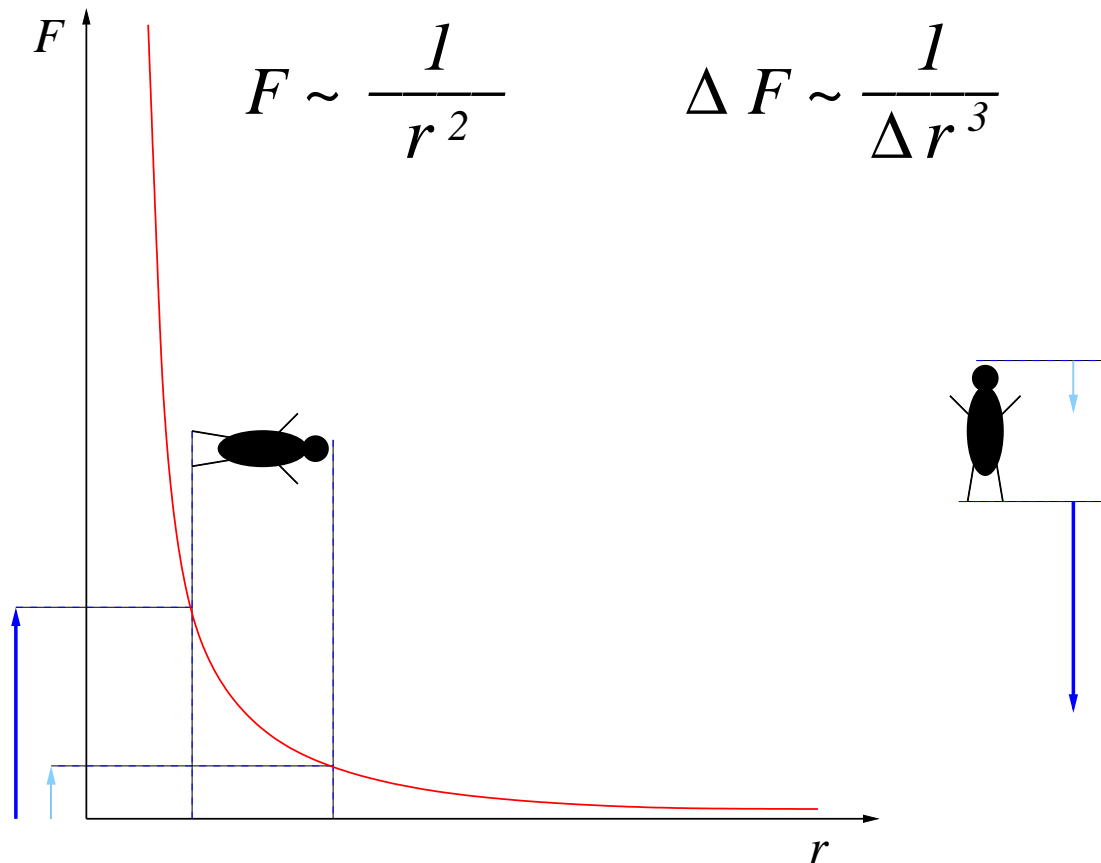
... desde donde se mira:
el observador cayendo

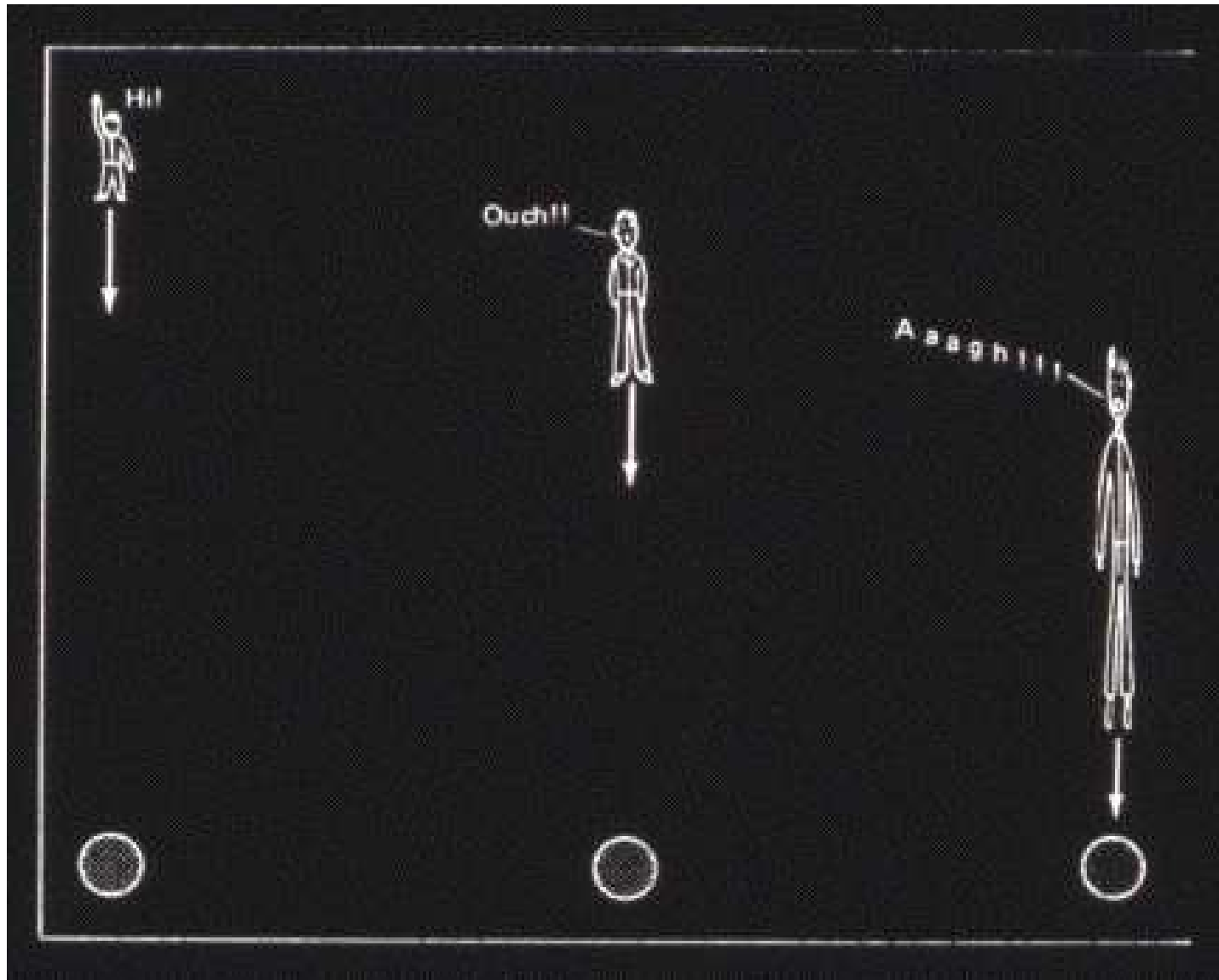


Se llega al horizonte y la singularidad
en un tiempo finito

...de lo grande que seas:

- **observador puntual:** historia anterior
→ no pasa nada al cruzar el horizonte
Principio de Equivalencia: observadores en caída libre se sienten localmente inerciales
- **observador humano:** fuerzas de marea



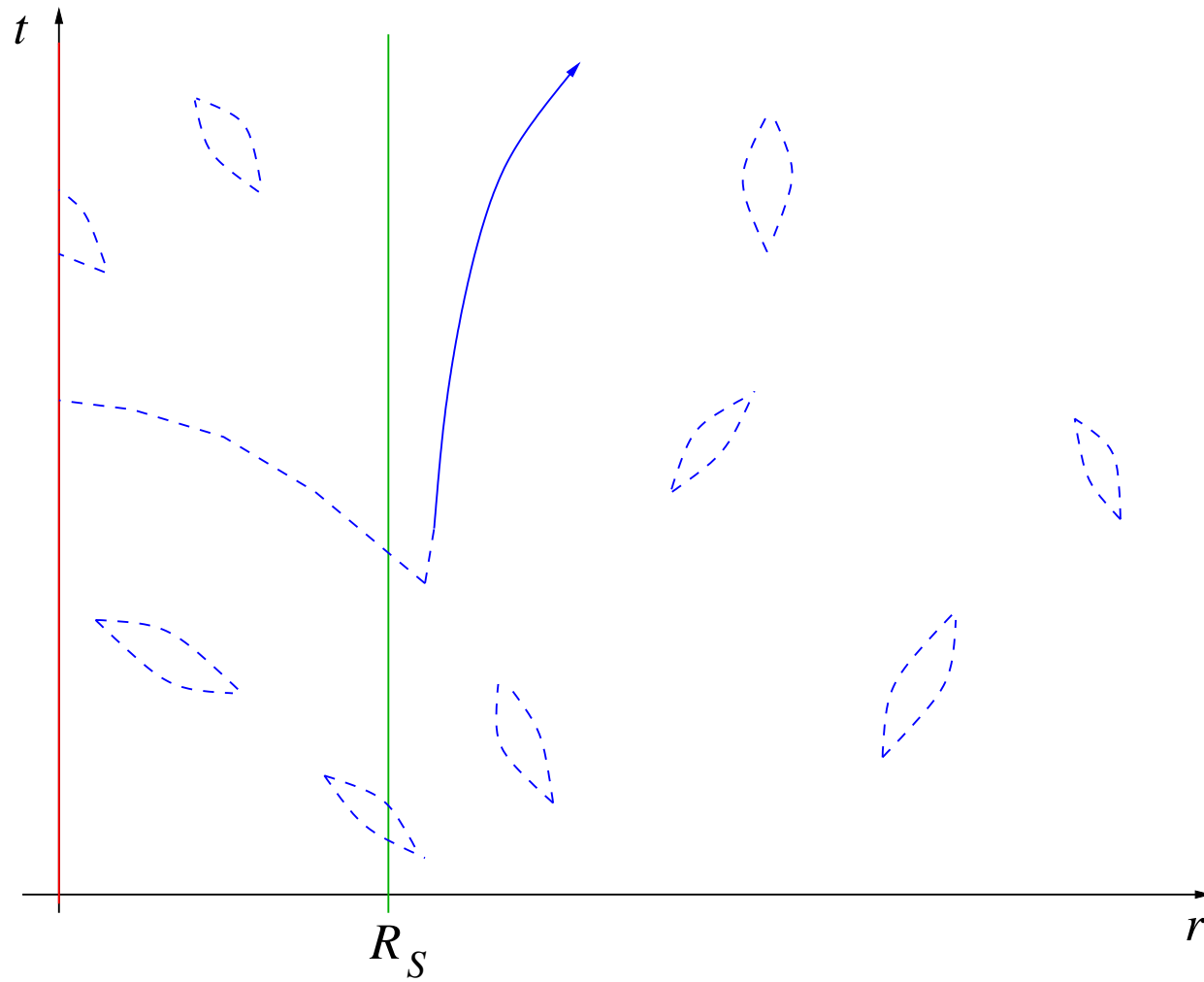


—→ las fuerza de marea actuan como un **potro de tortura cósmico**

...de tu manera de moverte:

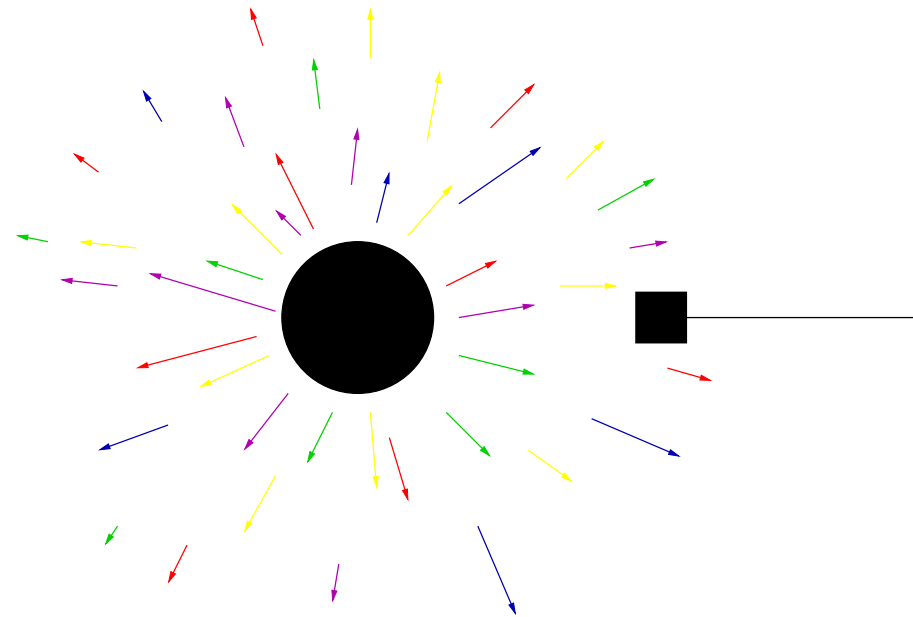
- en caída libre: historia anterior
(Principio de Equivalencia: observadores en caída libre se sienten localmente inerciales)
- en reposo encima del agujero negro: radiación de Hawking

Radiación de Hawking:



...de tu manera de moverte:

- en caída libre: historia anterior
(Principio de Equivalencia: observadores en caída libre se sienten localmente inerciales)
- en reposo encima del agujero negro: radiación de Hawking
→ agujero negro **evapora**



→ radiación térmica:

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM}$$

→ observador cercano en reposo **se achicharra**

Radiación de Hawking es un proceso cuántico

donde se unen la Relatividad General y la Mecánica Cuántica

→ ¡ ¡ Terreno completamente desconocido !!

Radiación de Hawking es un **proceso cuántico**
donde se unen la **Relatividad General** y la **Mecánica Cuántica**
→ **¡ ¡ Terreno completamente desconocido !!**

Preguntas abiertas

- ¿Los agujeros negros se evaporan completamente?
- ¿Qué pasa con la singularidad?
- ¿Qué pasa con la información?
- ¿Qué importancia tienen los efectos cuánticos?
- ...

Epílogo: curiosidades sobre agujeros negros

- Agujero negro más cercano:

V626 Mon, con $m = 11M_{\odot}$, a 3300 años-luz

- Agujero negro supermasivo más cercano:

Sagitario A*, con $m = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$, a 25.000 años-luz

- Agujero negro más masivo:

TON 618, con $m = 66 \cdot 10^9 M_{\odot}$, a $10,5 \cdot 10^9$ años-luz

Epílogo: curiosidades sobre agujeros negros

- Agujero negro más cercano:

V626 Mon, con $m = 11M_{\odot}$, a 3300 años-luz

- Agujero negro supermasivo más cercano:

Sagitario A*, con $m = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$, a 25.000 años-luz

- Agujero negro más masivo:

TON 618, con $m = 66 \cdot 10^9 M_{\odot}$, a $10,5 \cdot 10^9$ años-luz

- Agujeros negros estacionarios (clásicos) están **completamente vacíos!**

Epílogo: curiosidades sobre agujeros negros

- Agujero negro más cercano:

V626 Mon, con $m = 11M_{\odot}$, a 3300 años-luz

- Agujero negro supermasivo más cercano:

Sagitario A*, con $m = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$, a 25.000 años-luz

- Agujero negro más masivo:

TON 618, con $m = 66 \cdot 10^9 M_{\odot}$, a $10,5 \cdot 10^9$ años-luz

- Agujeros negros estacionarios (clásicos) están **completamente vacíos!**
- Si el Sol se convirtiera en agujero negro, **no absorbería a la Tierra!**

Epílogo: curiosidades sobre agujeros negros

- Agujero negro más cercano:

V626 Mon, con $m = 11M_{\odot}$, a 3300 años-luz

- Agujero negro supermasivo más cercano:

Sagitario A*, con $m = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$, a 25.000 años-luz

- Agujero negro más masivo:

TON 618, con $m = 66 \cdot 10^9 M_{\odot}$, a $10,5 \cdot 10^9$ años-luz

- Agujeros negros estacionarios (clásicos) están **completamente vacíos!**

- Si el Sol se convirtiera en agujero negro, **no absorbería a la Tierra!**

- Cuanto más grande el agujero negro, menos denso es:

$$m \sim R, \quad V \sim R^3 \quad \Rightarrow \quad \rho \sim R^{-2} = m^{-2}$$

Epílogo: curiosidades sobre agujeros negros

- Agujero negro más cercano:

V626 Mon, con $m = 11M_{\odot}$, a 3300 años-luz

- Agujero negro supermasivo más cercano:

Sagitario A*, con $m = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$, a 25.000 años-luz

- Agujero negro más masivo:

TON 618, con $m = 66 \cdot 10^9 M_{\odot}$, a $10,5 \cdot 10^9$ años-luz

- Agujeros negros estacionarios (clásicos) están **completamente vacíos!**

- Si el Sol se convirtiera en agujero negro, **no absorbería a la Tierra!**

- Cuanto más grande el agujero negro, menos denso es:

$$m \sim R, \quad V \sim R^3 \quad \Rightarrow \quad \rho \sim R^{-2} = m^{-2}$$

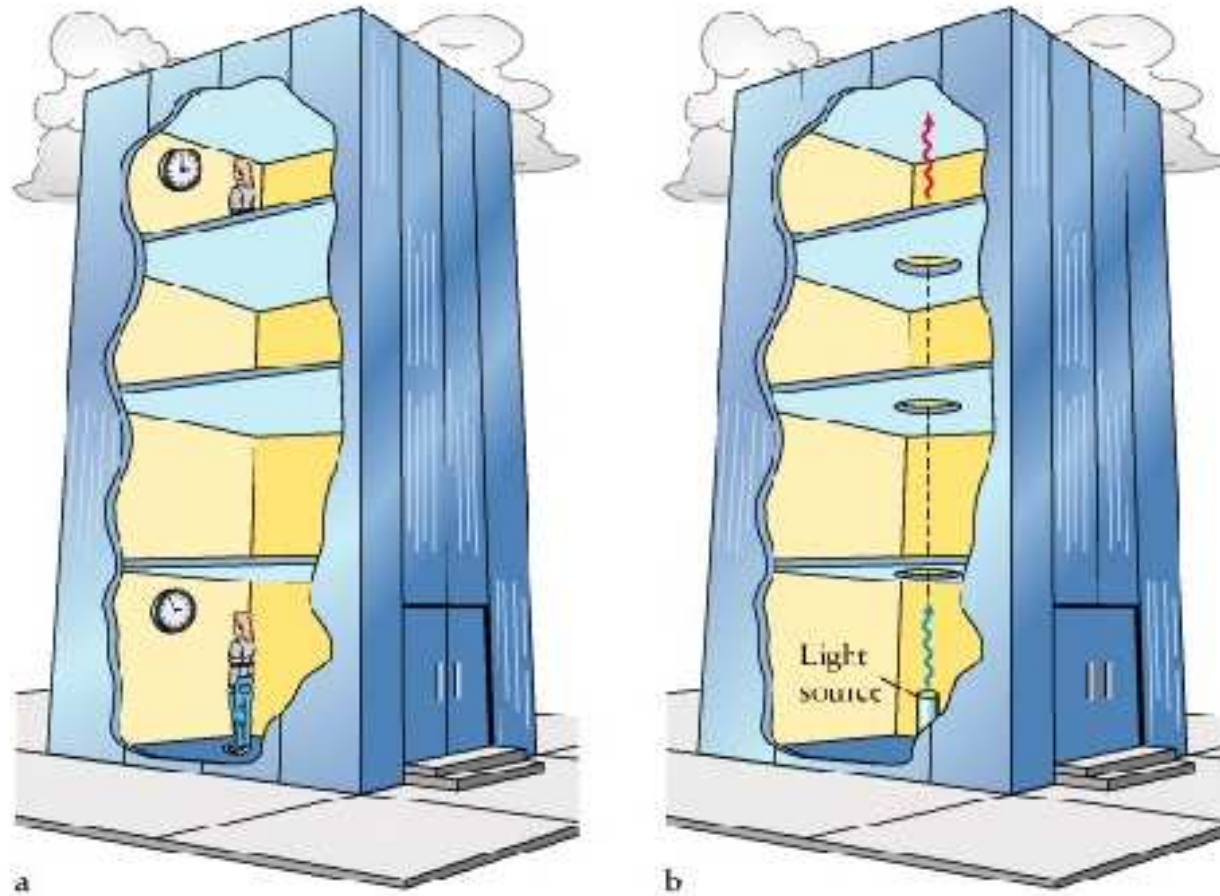
- Cuanto más grande el agujero negro, menos fuerte es la gravedad en el horizonte: $\kappa_H \sim m^{-1}$

¡Gracias por vuestra atención!

A. Dilatación temporal

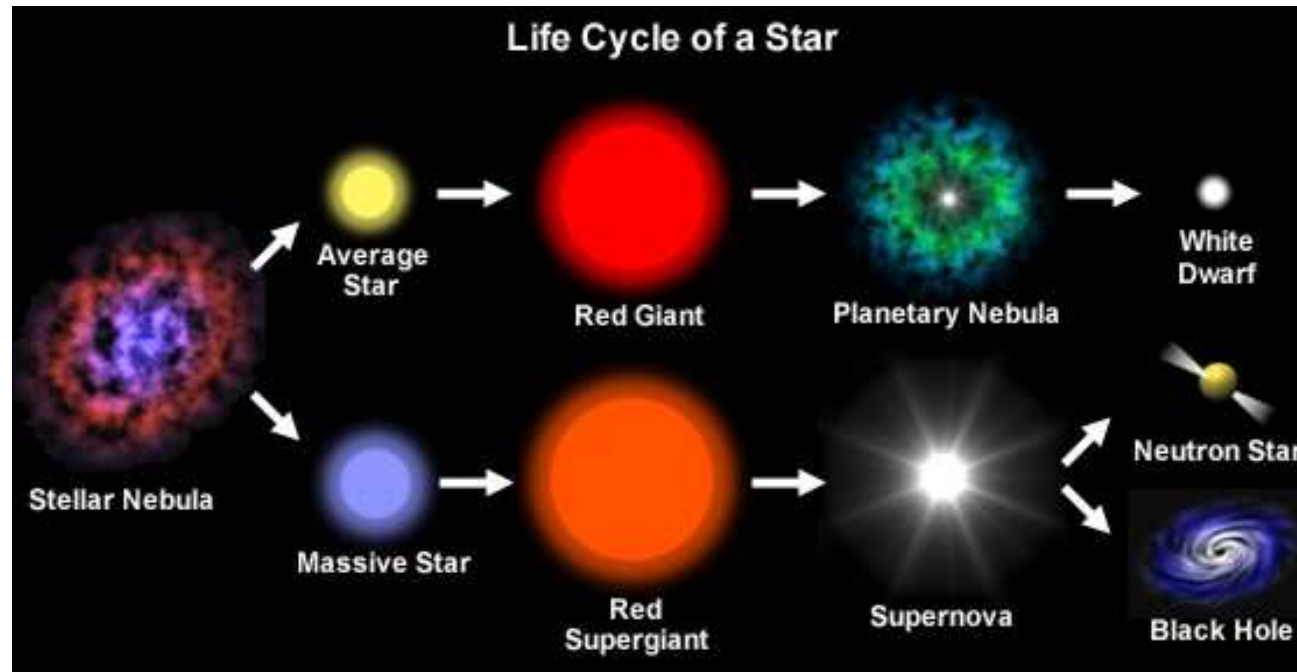
La luz **pierde energía** al salir del pozo potencial

—→ Efecto Doppler gravitacional



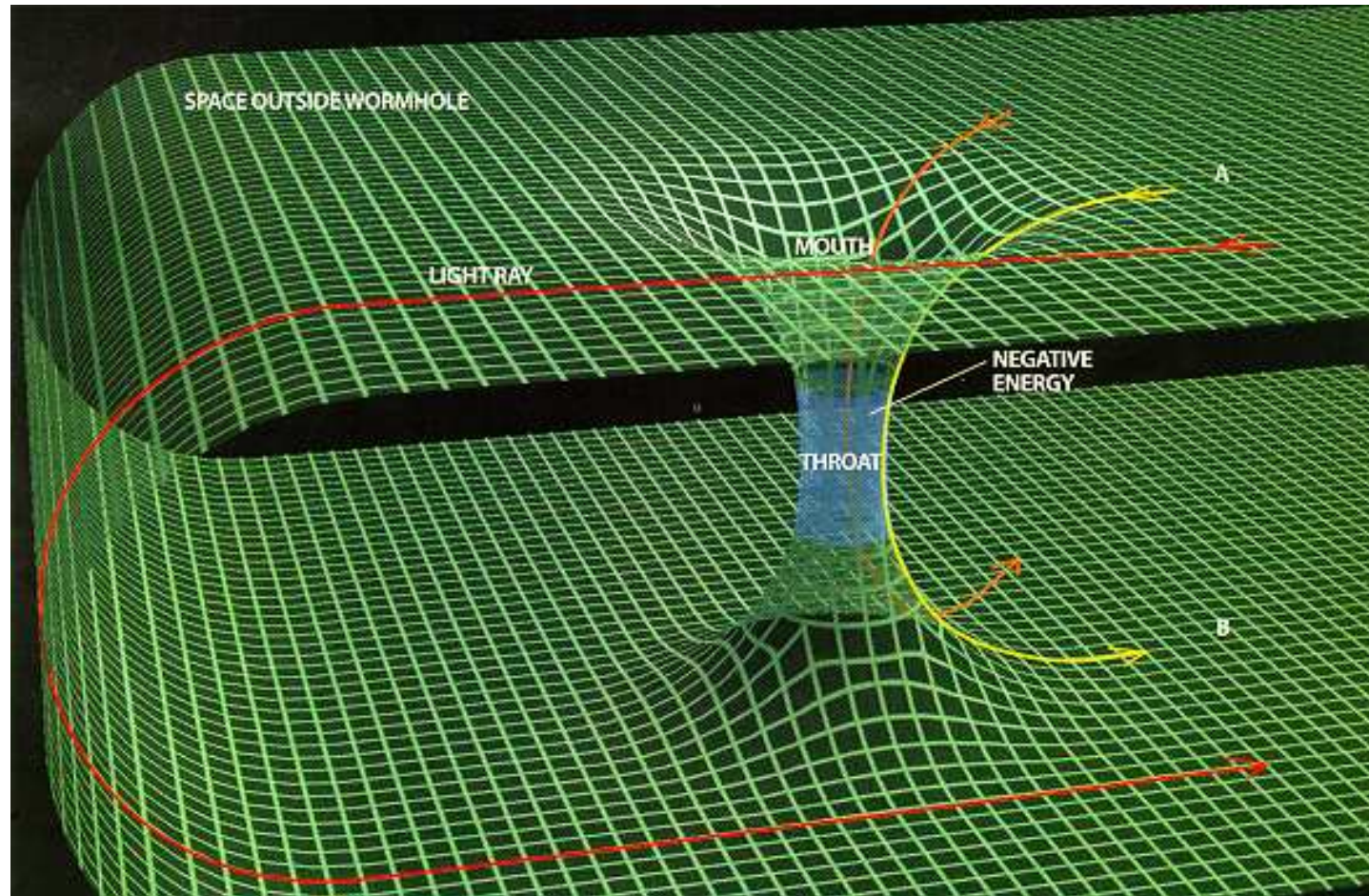
—→ Tiempo corre más lento abajo que arriba!

Formación de agujeros negros

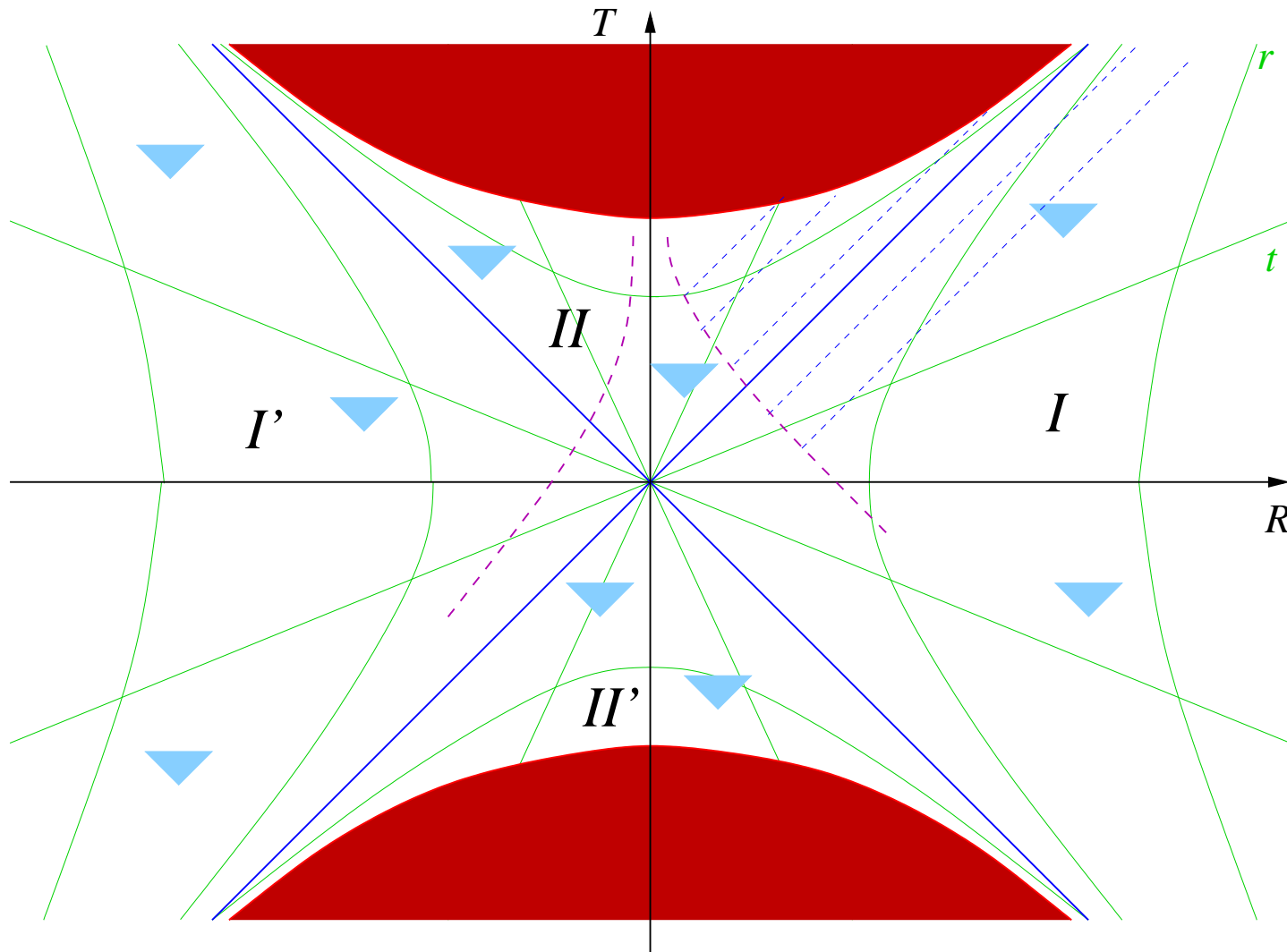


Objeto	Masa	radio
Enano blanco:	$M < 1,4 M_{\odot}$	5000 km
Estrella de neutrones:	$1,4 M_{\odot} < M < 2,3 M_{\odot}$	50 km
Agujero negro:	$M > 2,3 M_{\odot}$	R_S

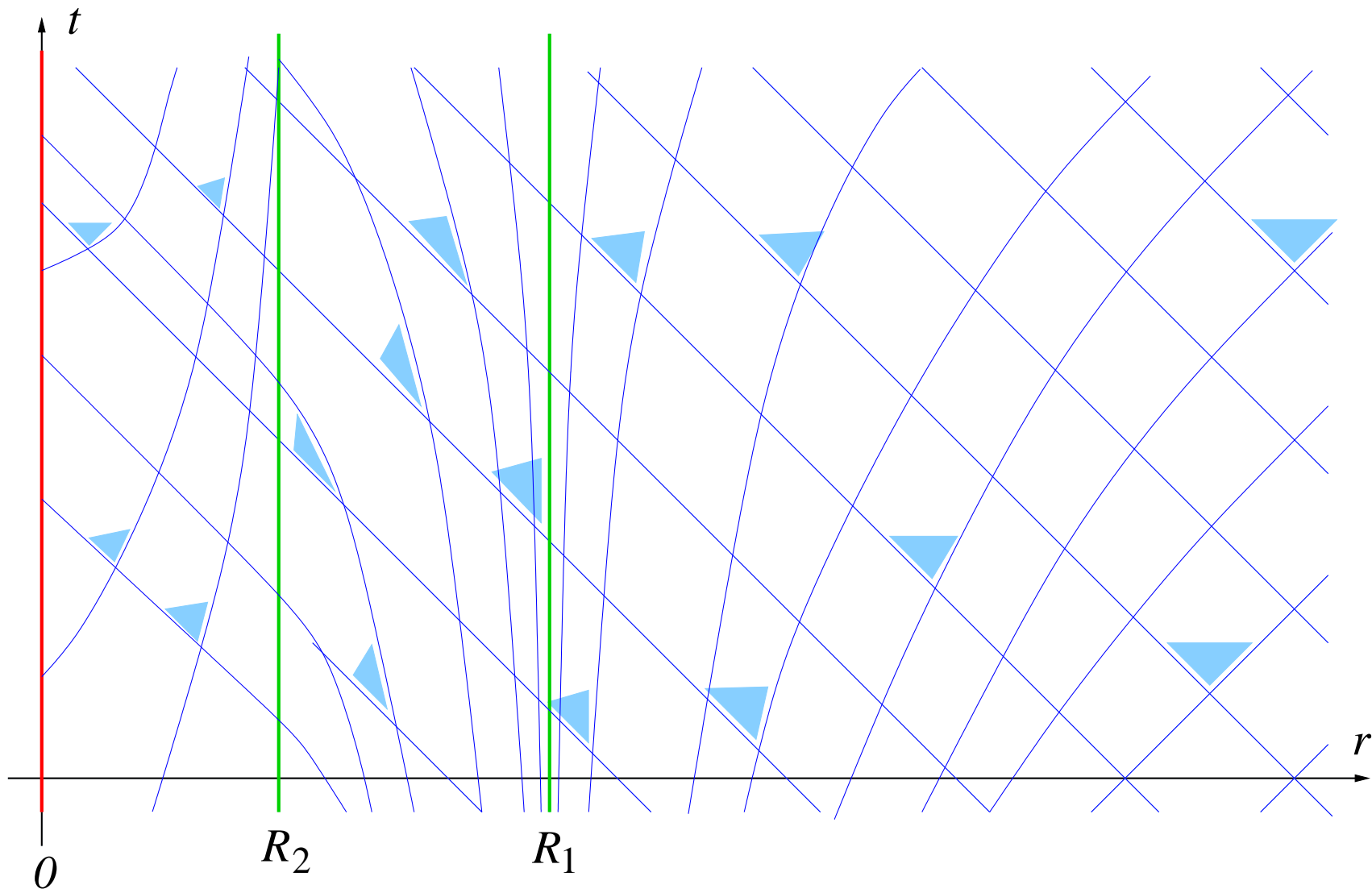
Agujero de gusano



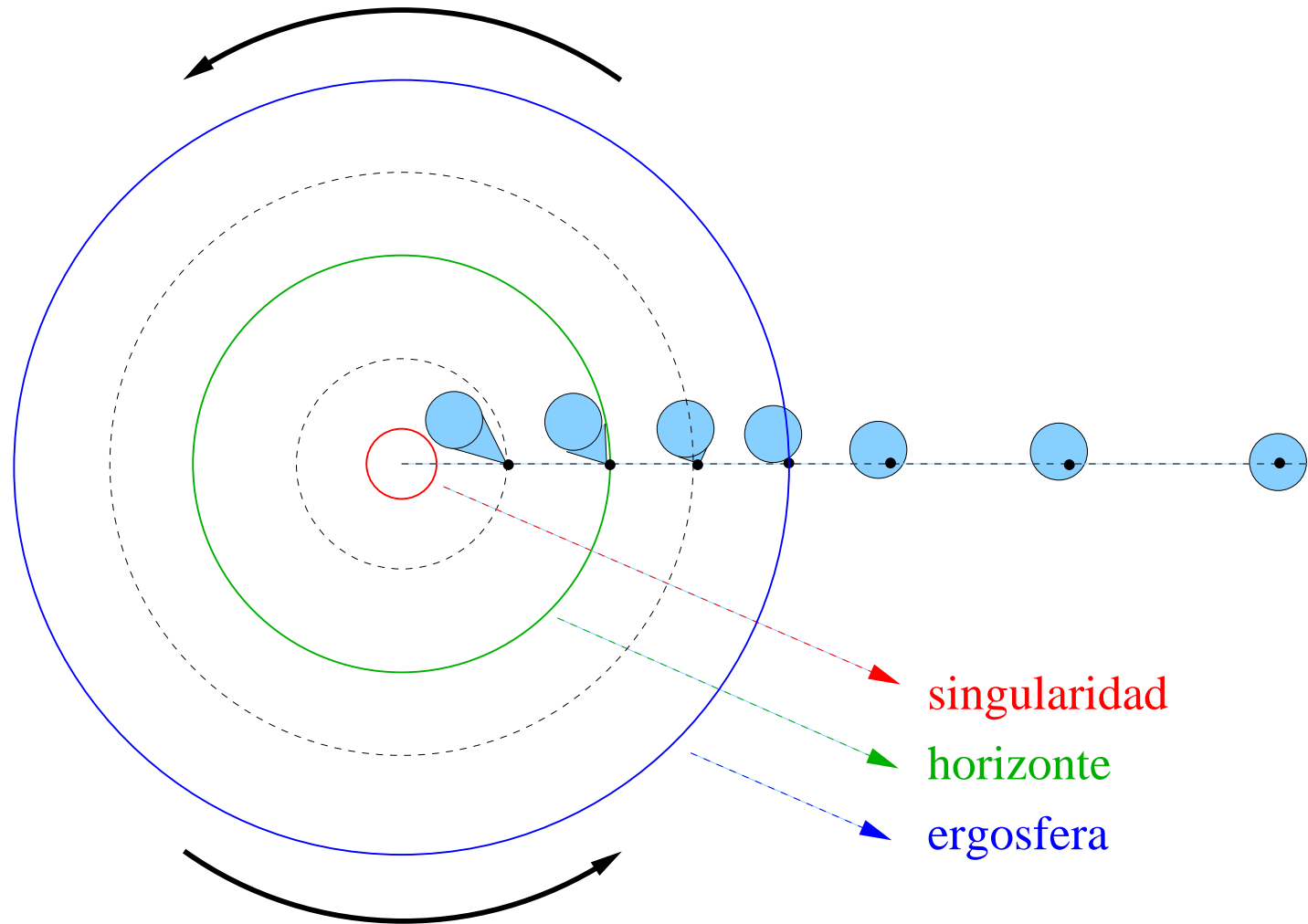
Coordenadas de Kruskal



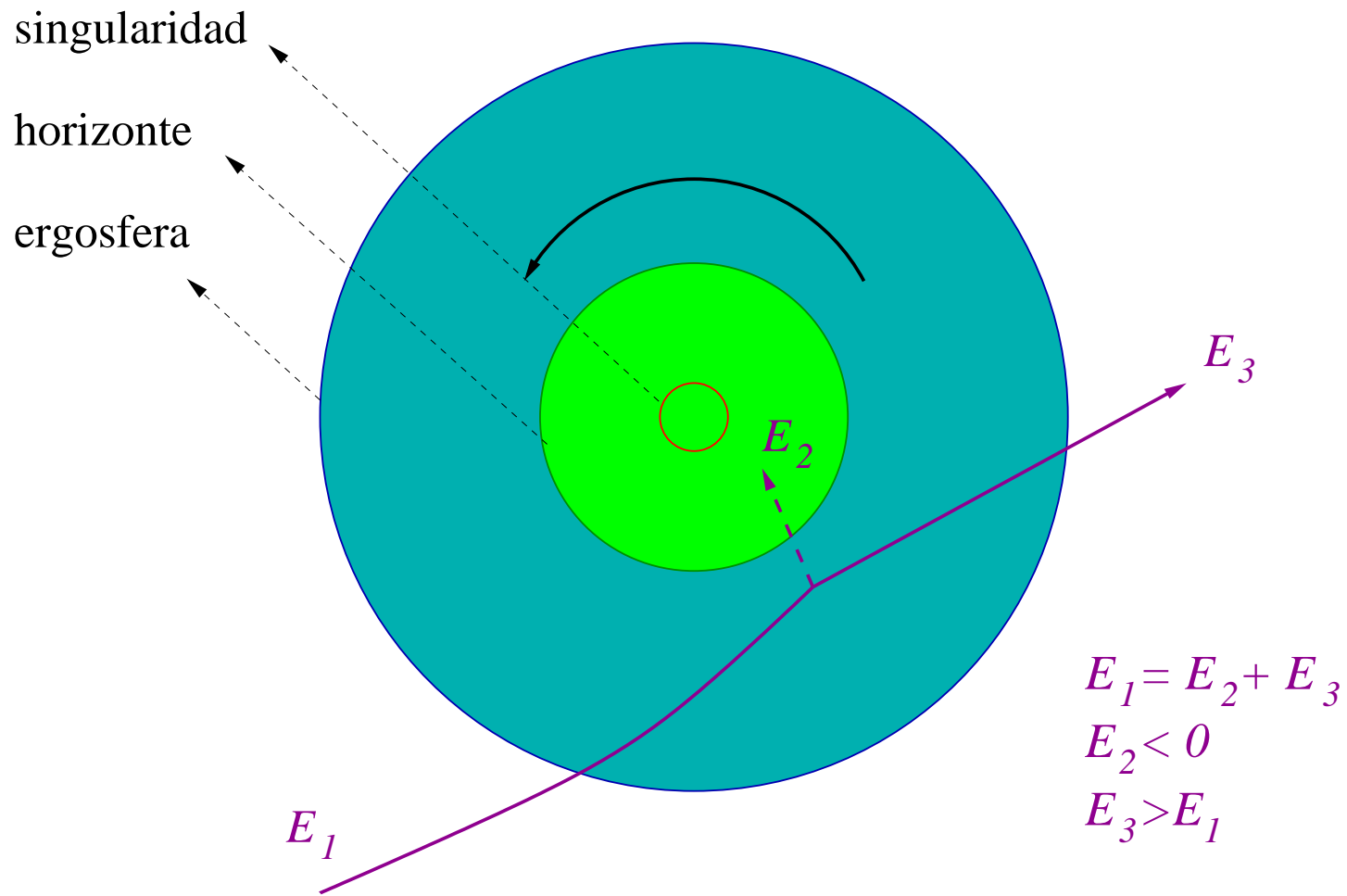
Reissner-Nordström

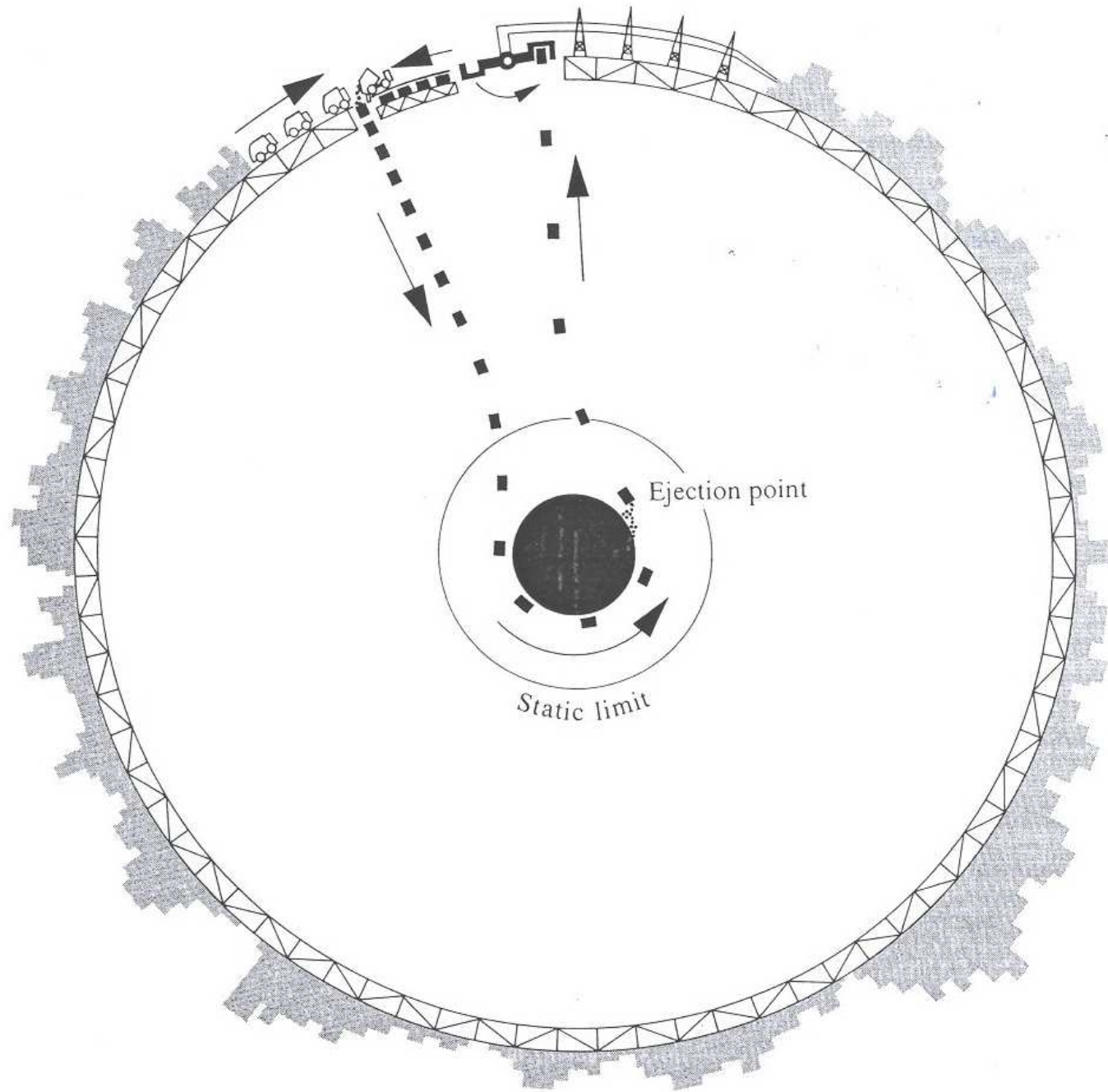


Agujero negro con rotación



Proceso de Penrose

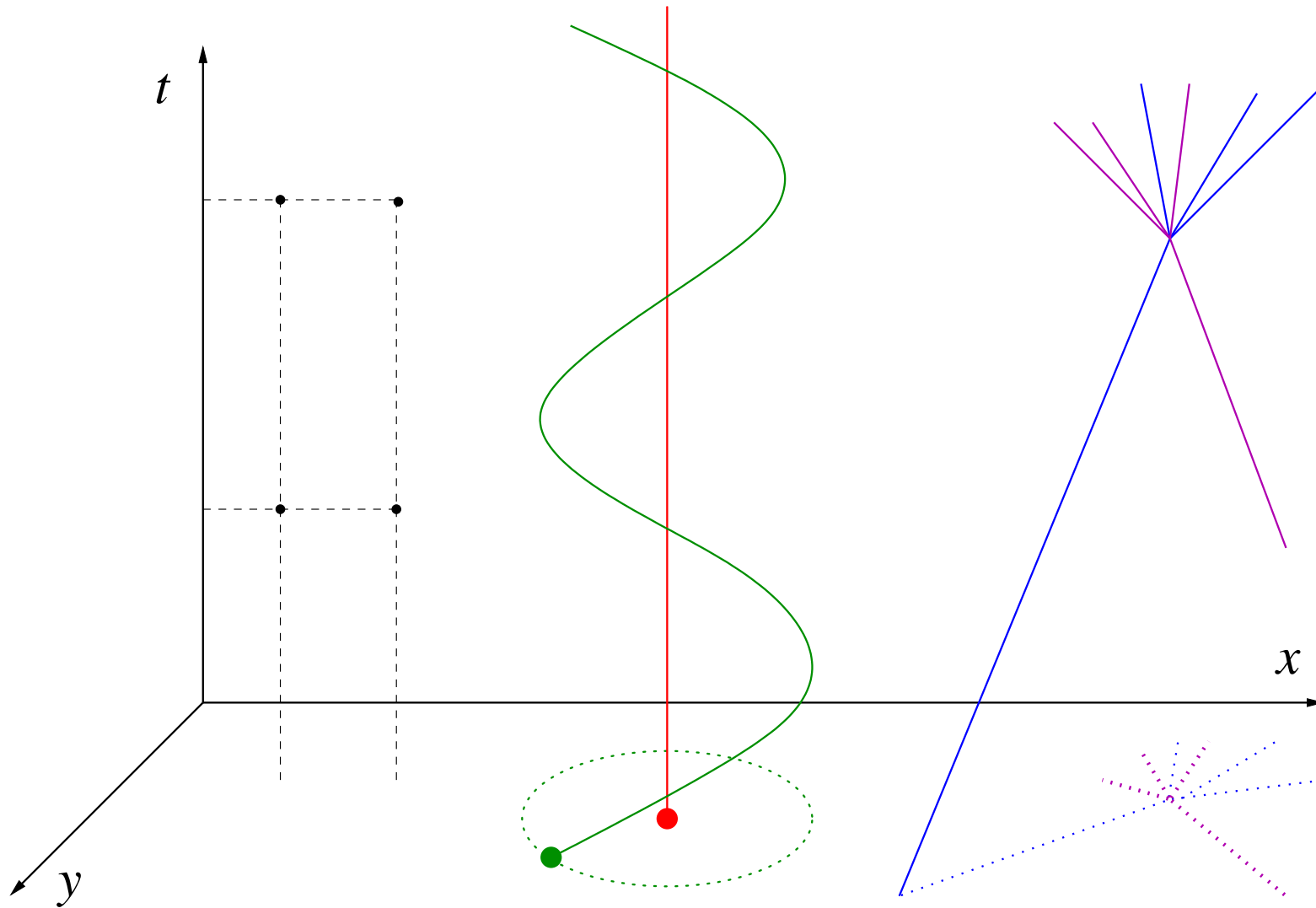




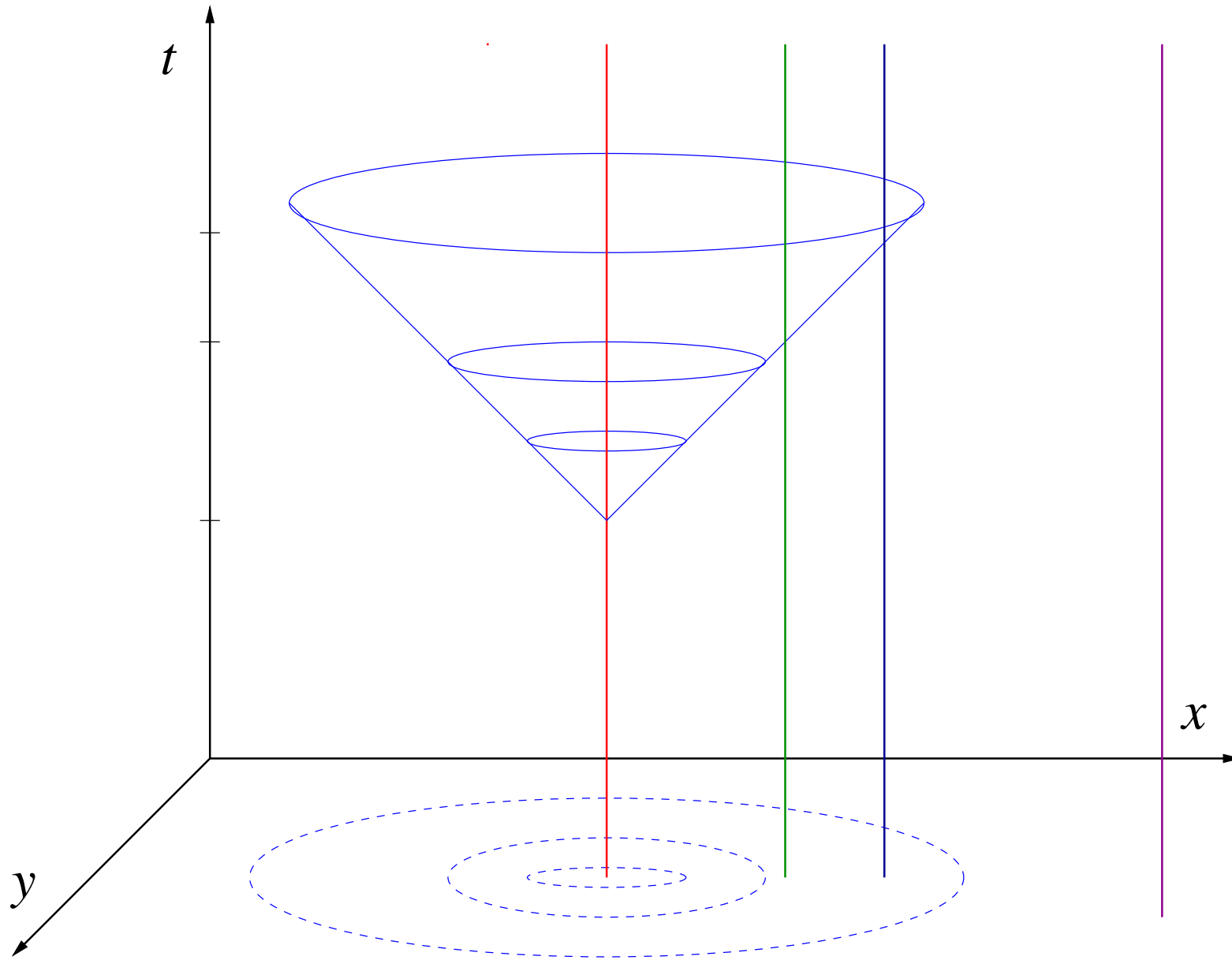
Diagramas de espaciotiempo:

Evento = suceso en **cierto momento** y en **cierto lugar**

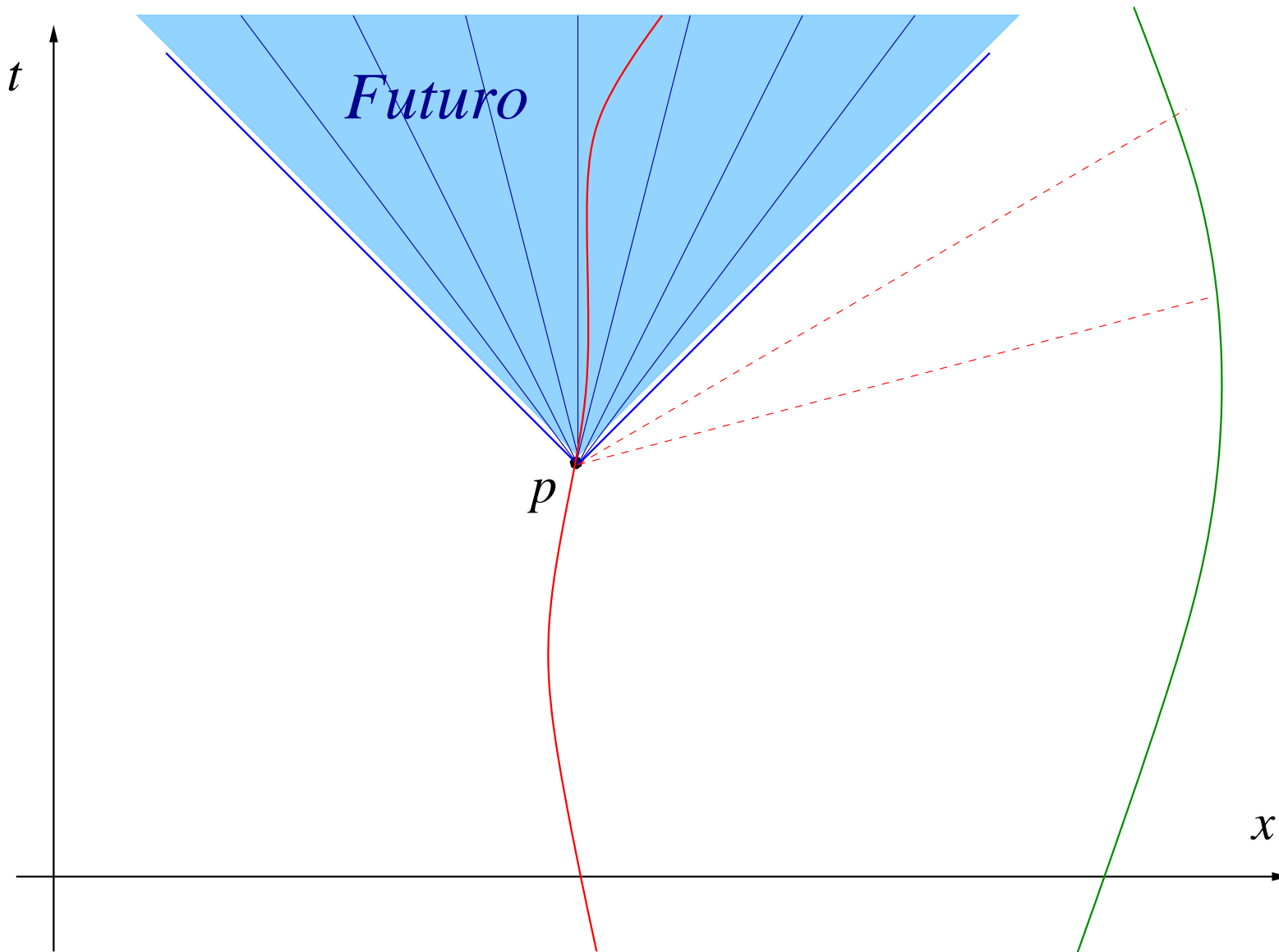
Lineas de universo = película de las **trayectorias** de las partículas



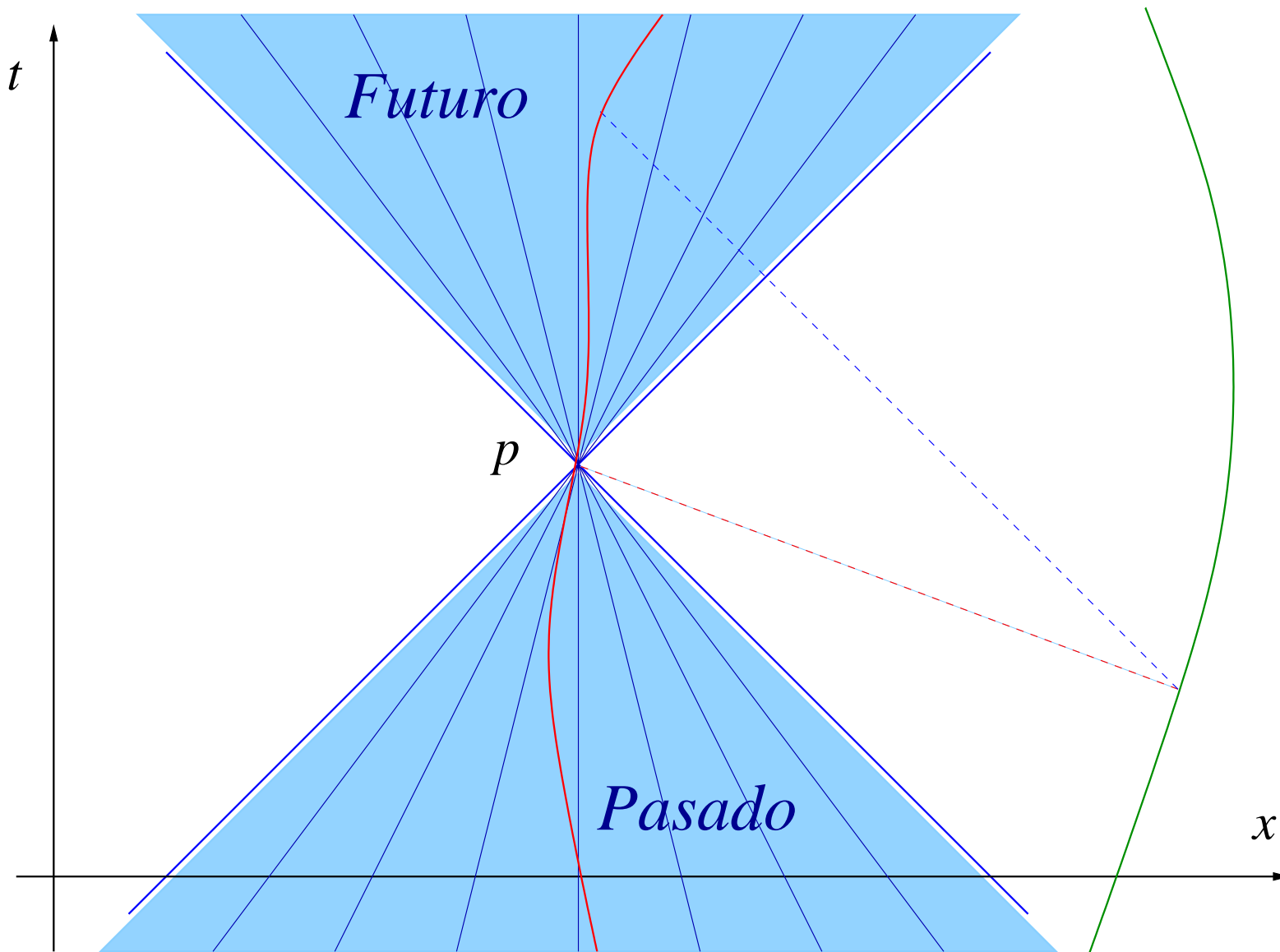
Cono de luz = película de las trayectorias de la luz



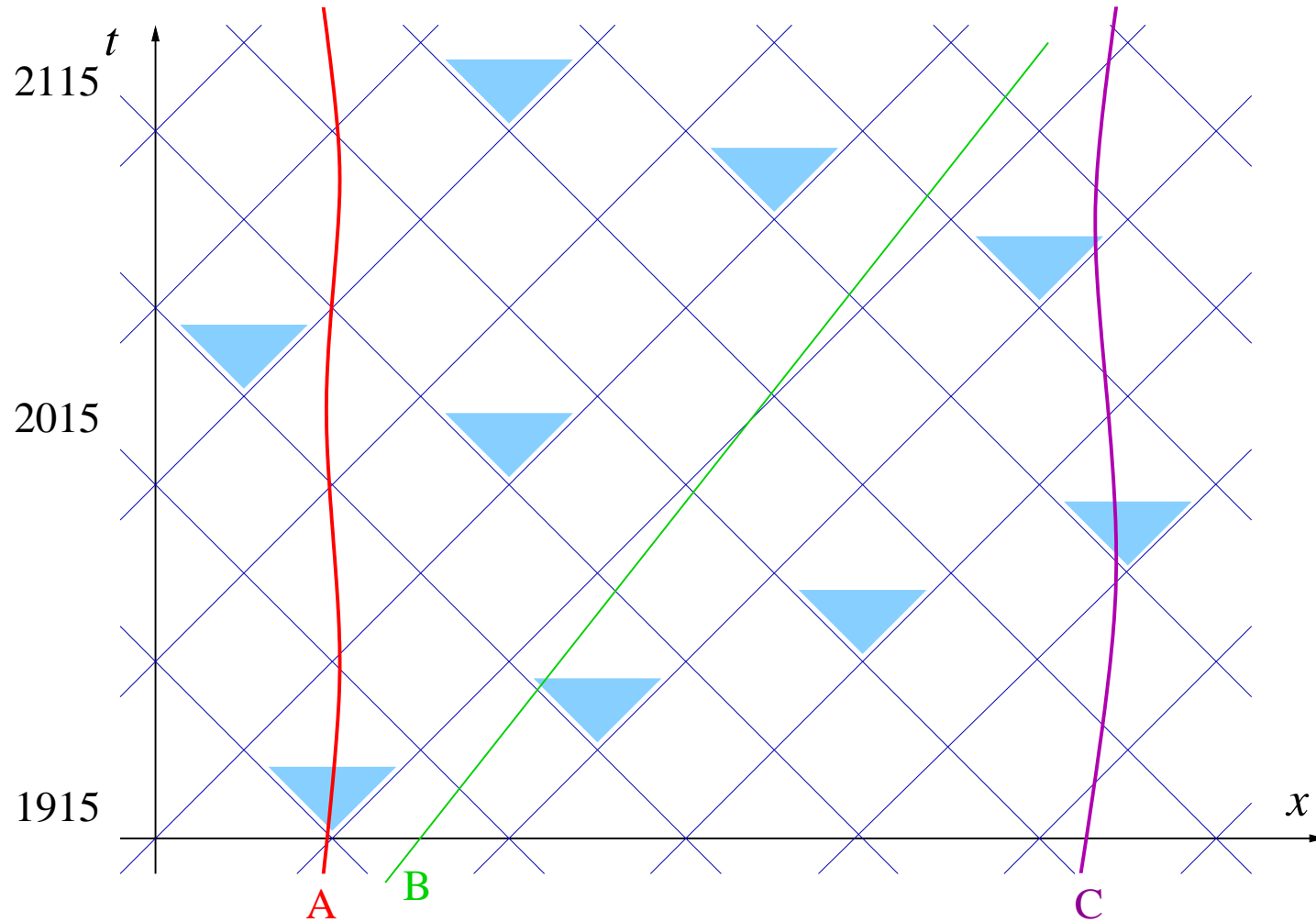
Cono de luz \rightarrow relaciones causales entre eventos



Cono de luz \rightarrow relaciones causales entre eventos



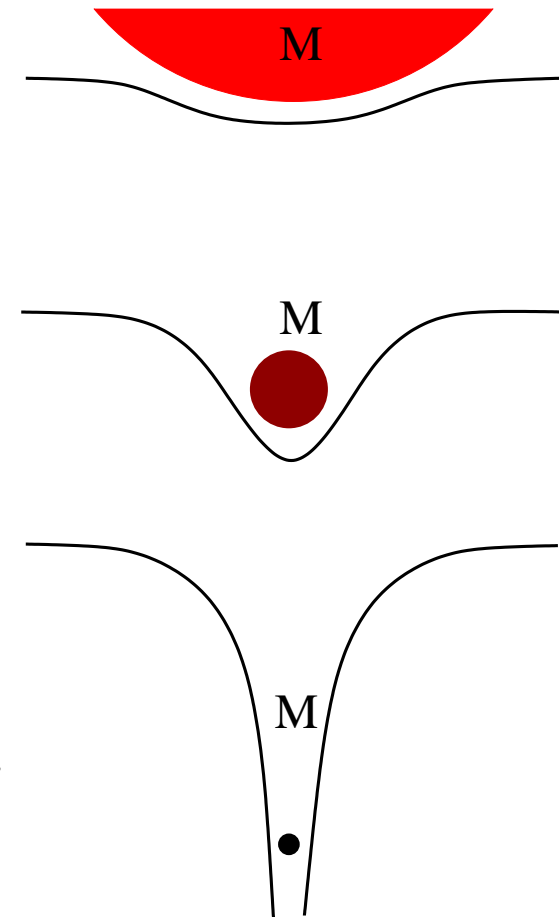
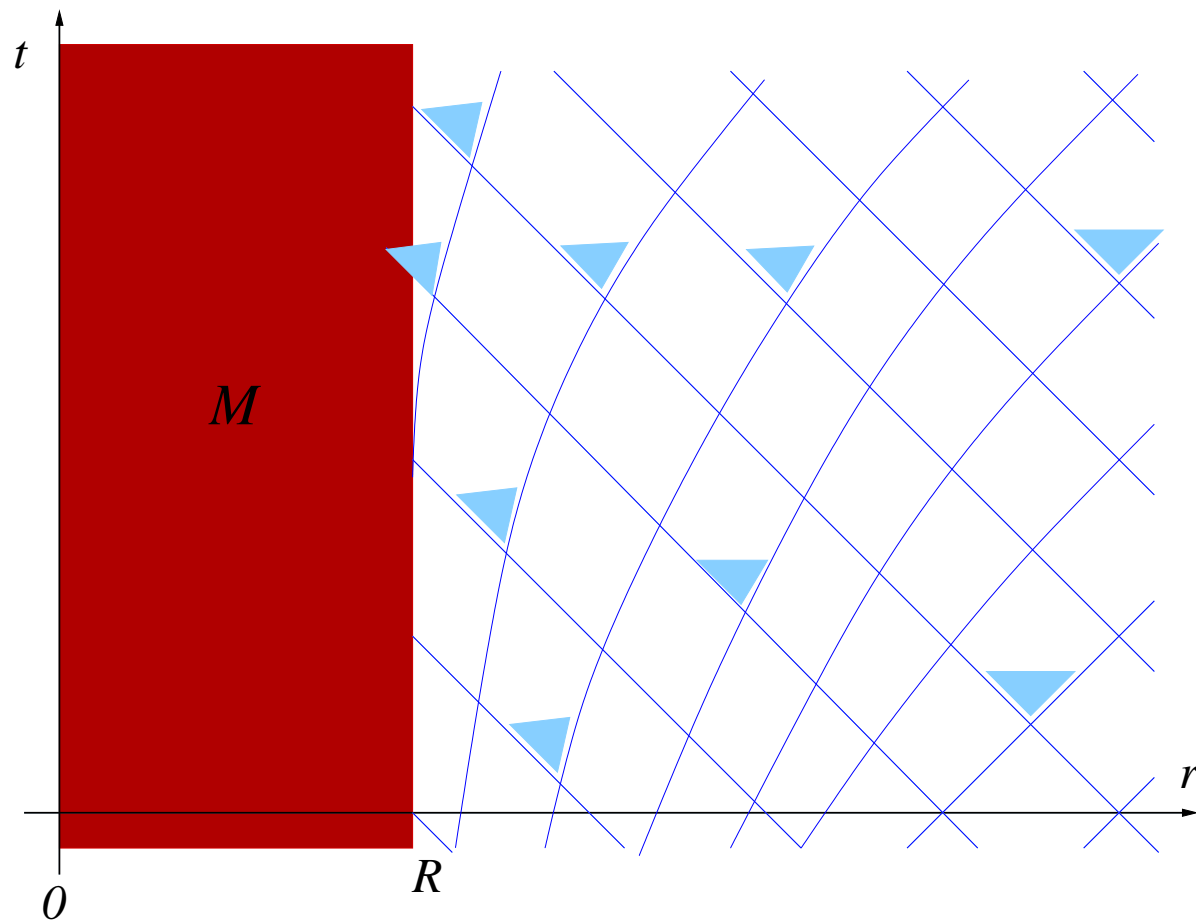
Espacio plano: La luz sigue líneas rectas



→ influencias causales alcanzan el espacio entero (tarde o temprano)

Cerca de objetos masivos: el espacio se curva

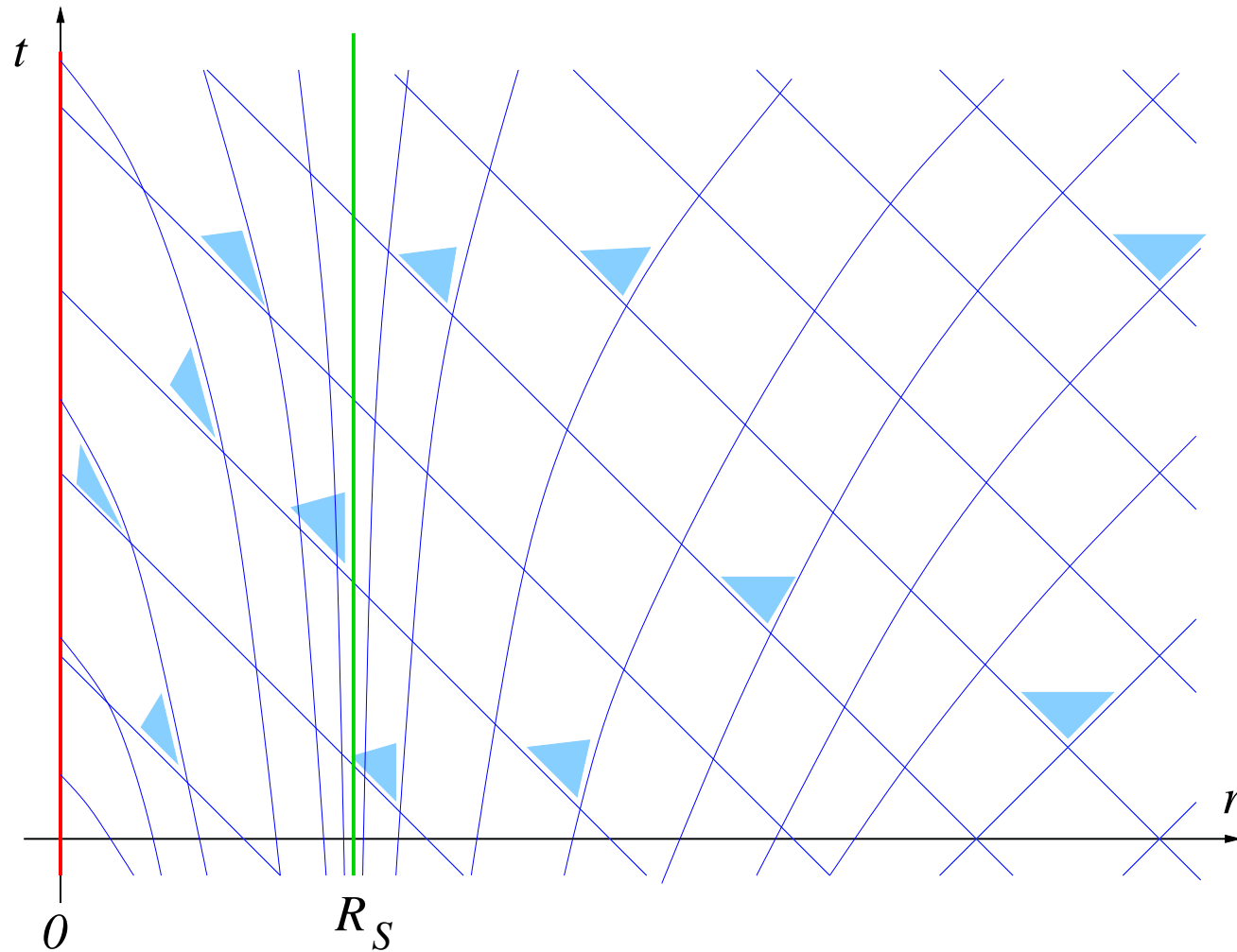
→ La luz sigue **lineas curvas**



→ La luz está “atraída” por el campo gravitatorio

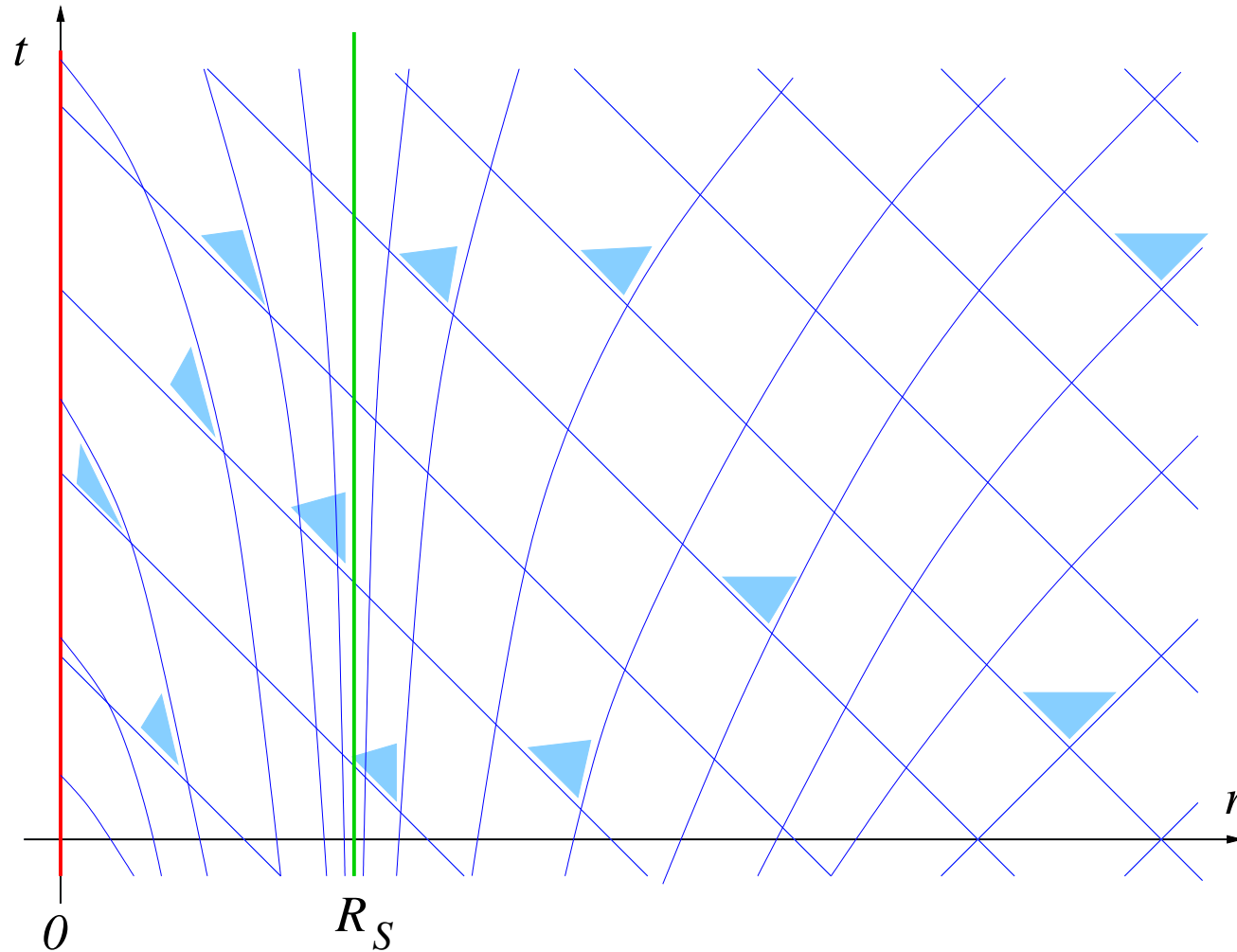
→ Los conos de luz se inclinan hacia el objeto masivo

Objetos muy masivos: se forma un radio crítico = Radio de Schwarzschild



→ la luz se queda atrapada dentro del radio de Schwarzschild

Objetos muy masivos: se forma un radio crítico = Radio de Schwarzschild

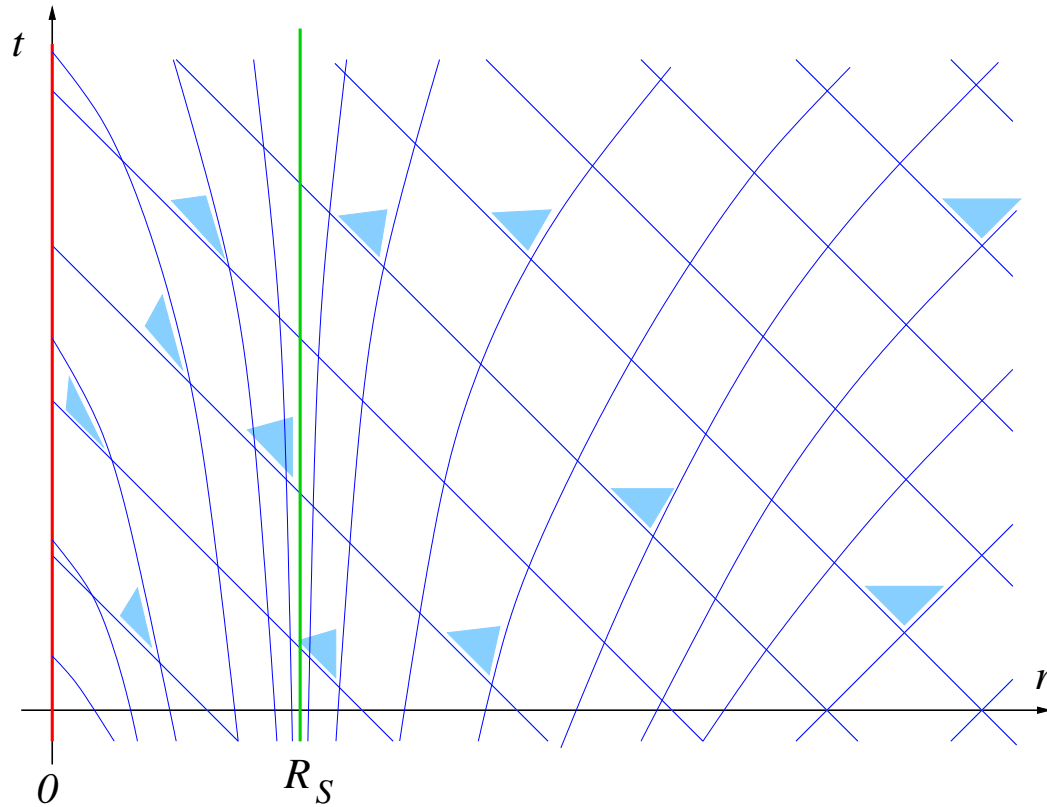


→ la luz se **queda atrapada** dentro del radio de Schwarzschild

→ Se forma un **horizonte**: no salen señales desde el interior

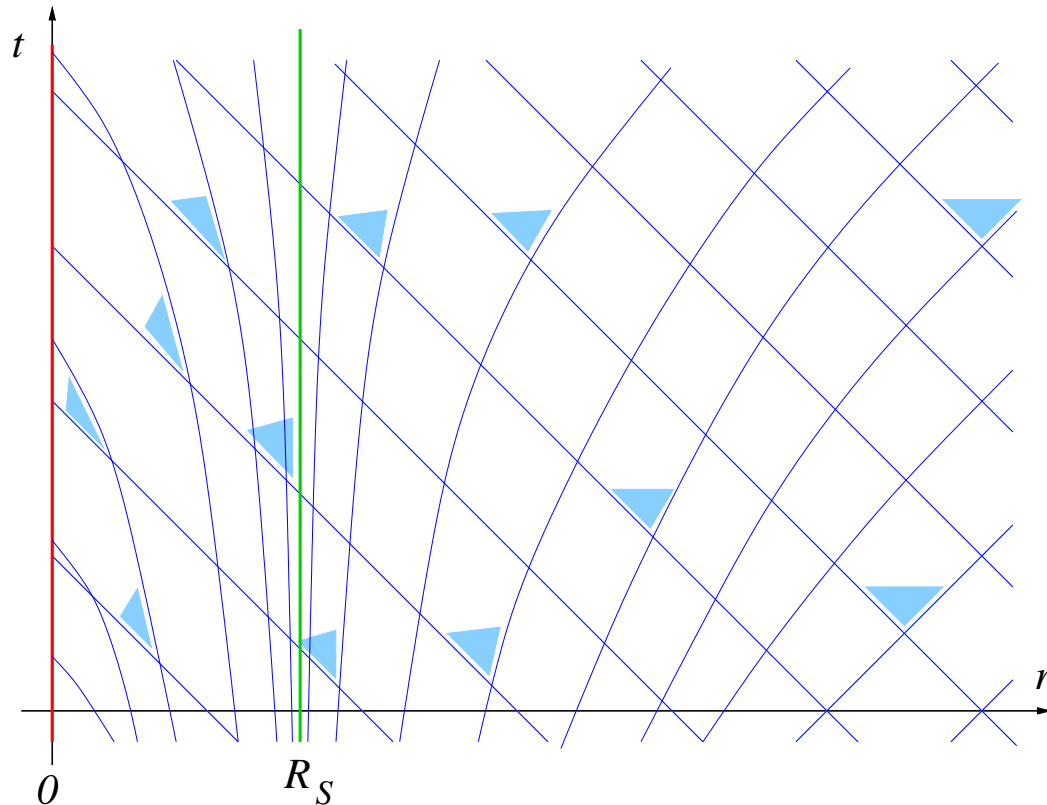
→ **membrana causal unidireccional**

Agujero negro: campo gravitatorio tan fuerte que la luz queda atrapada



- Cono de luz dirigido hacia dentro
- Trayectorias de partículas dirigidas hacia dentro
- Imposible quedarse en reposo dentro del horizonte

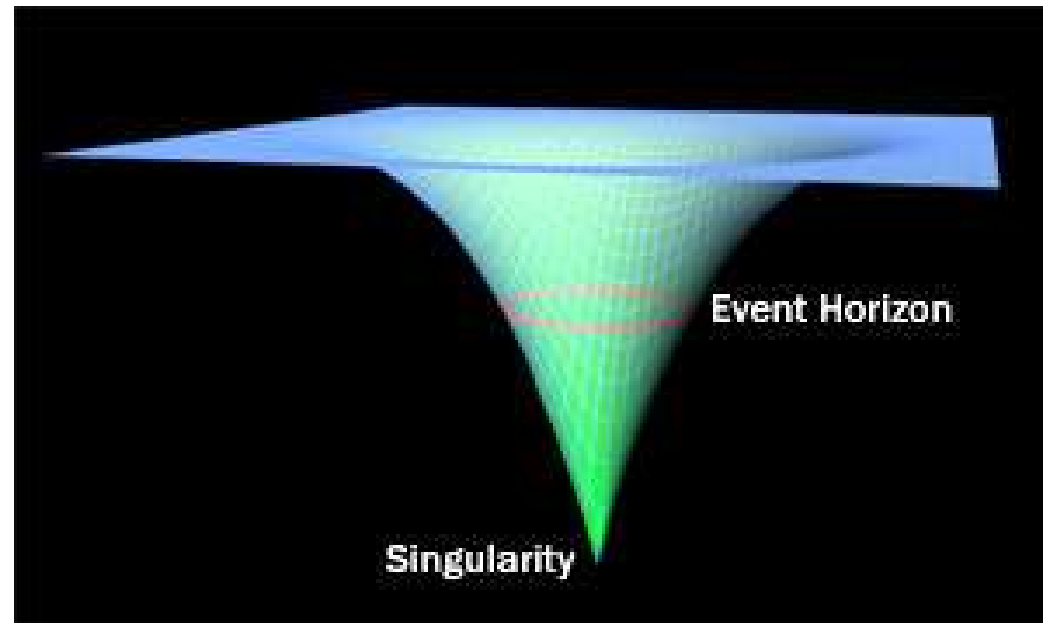
Agujero negro: campo gravitatorio tan fuerte que la luz queda atrapada



- Cono de luz dirigido hacia dentro
- Trayectorias de partículas dirigidas hacia dentro
- Imposible quedarse en reposo dentro del horizonte

- Se forma una singularidad (= punto de curvatura infinita)
- todo acabará inevitablemente en la singularidad

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$



Singularidad = punto de curvatura infinita
= final del espaciotiempo
= final de la física conocida