

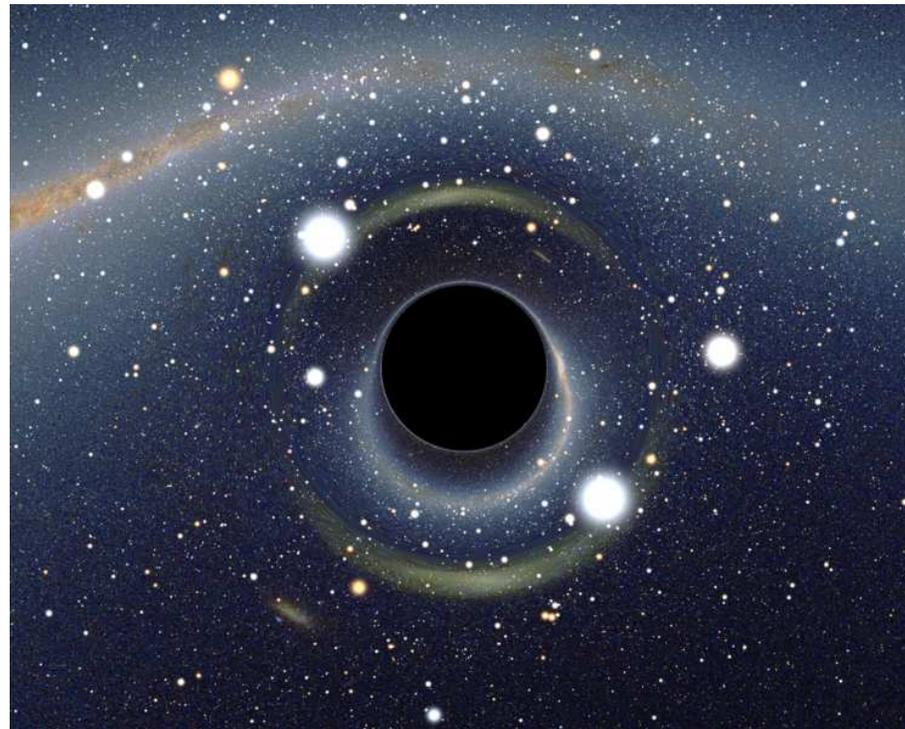


Agujeros negros: visto por fuera y por dentro

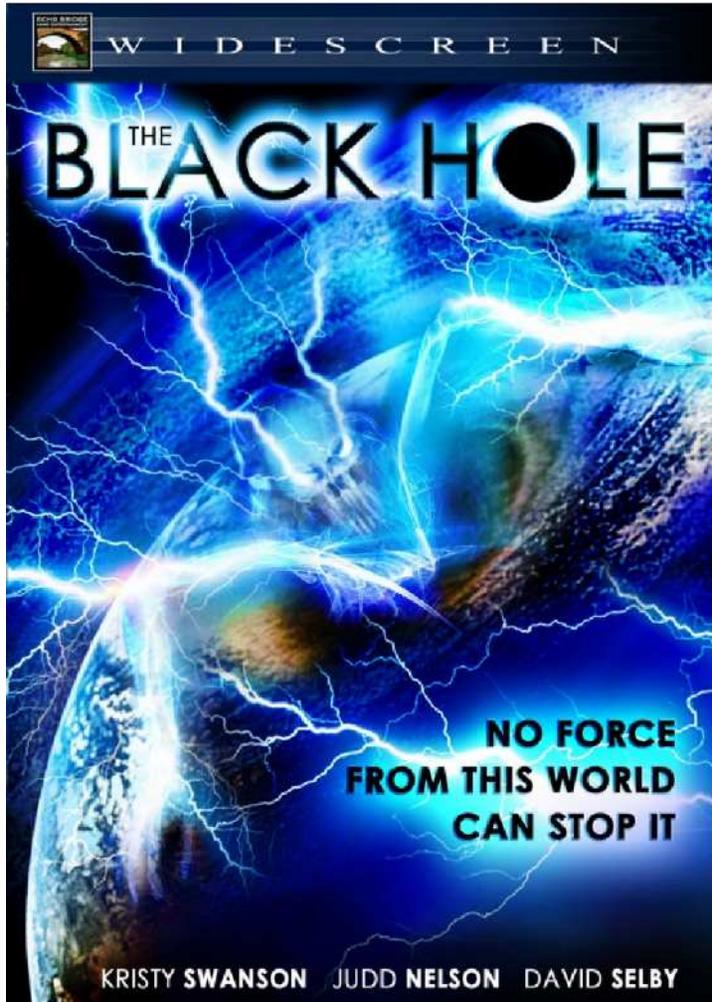


Bert Janssen

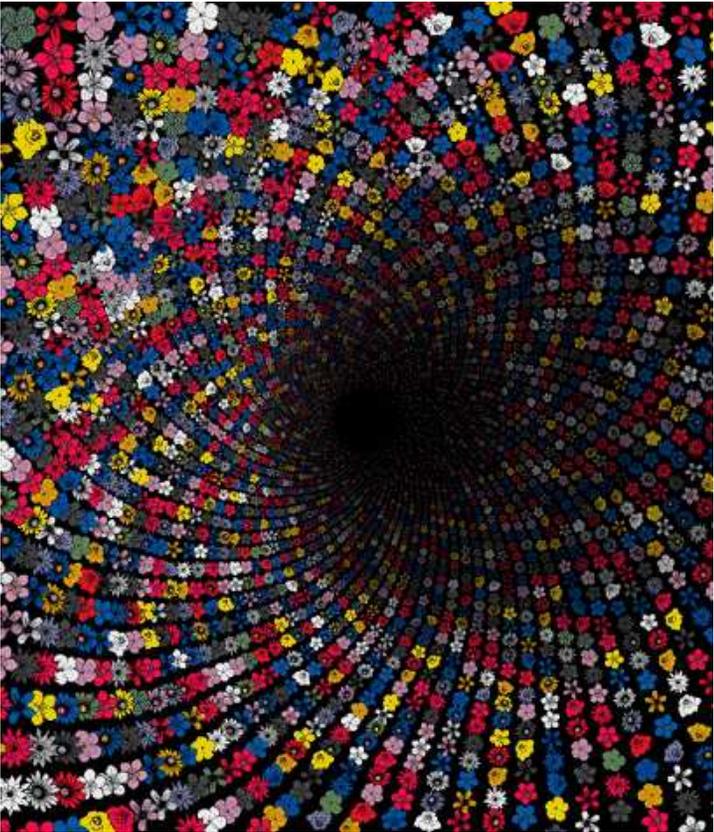
Dpto. de Física Teórica y del Cosmos



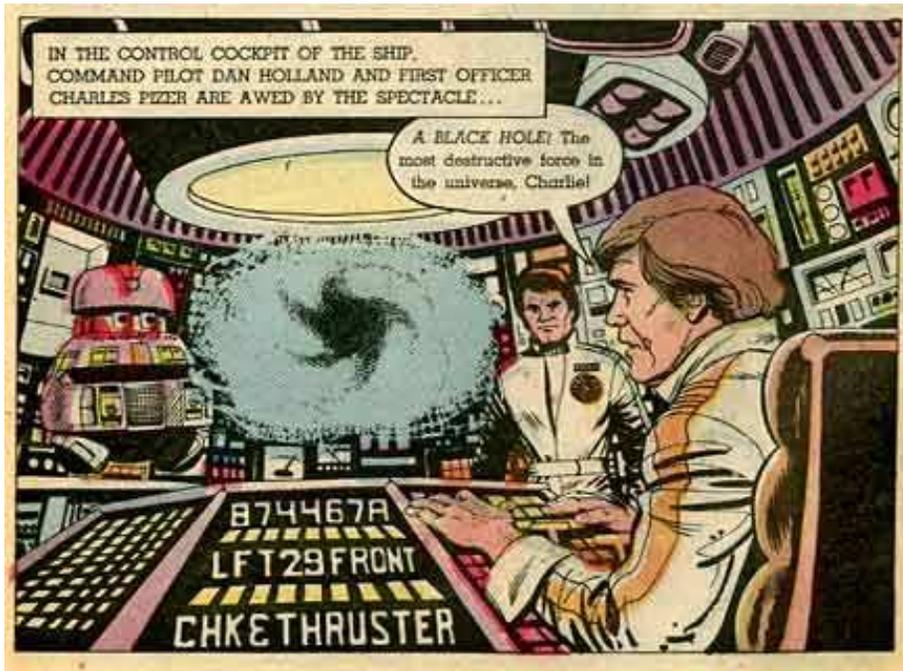
Desde los años '60, los agujeros negros están en todas partes:
en el cine:



En el arte:



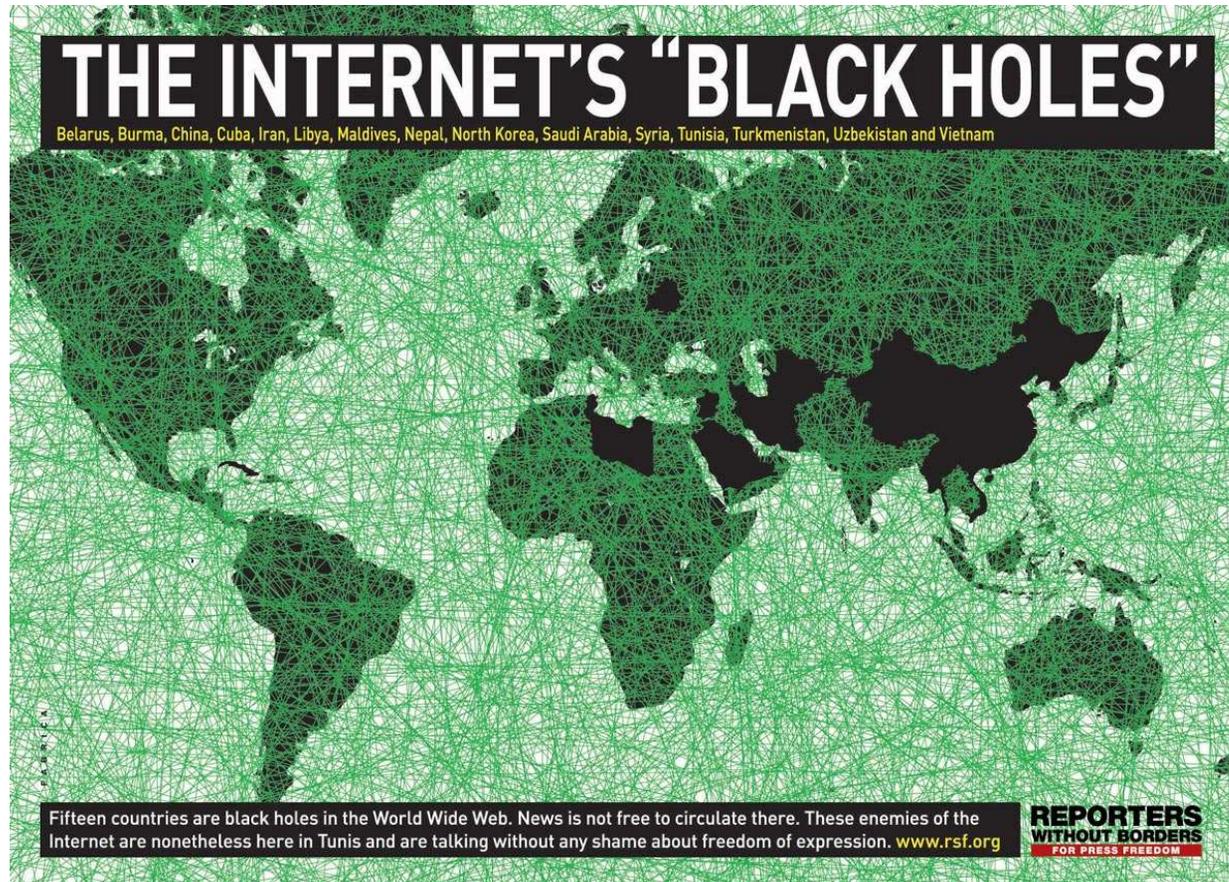
en los tebeos:



en los juegos:



en internet:



Google™

black hole: 30.800.000 entradas

agujero negro: 5.500.000 entradas

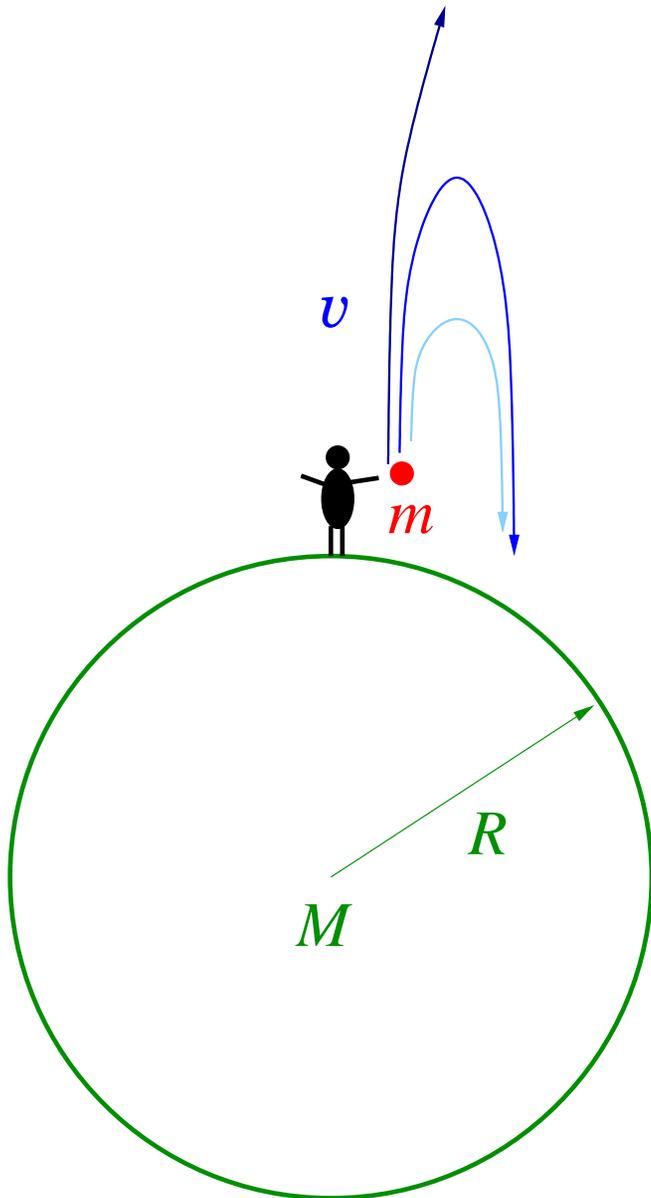
¿Pero qué son realmente?

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

Interrumpidme cuando querais

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

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

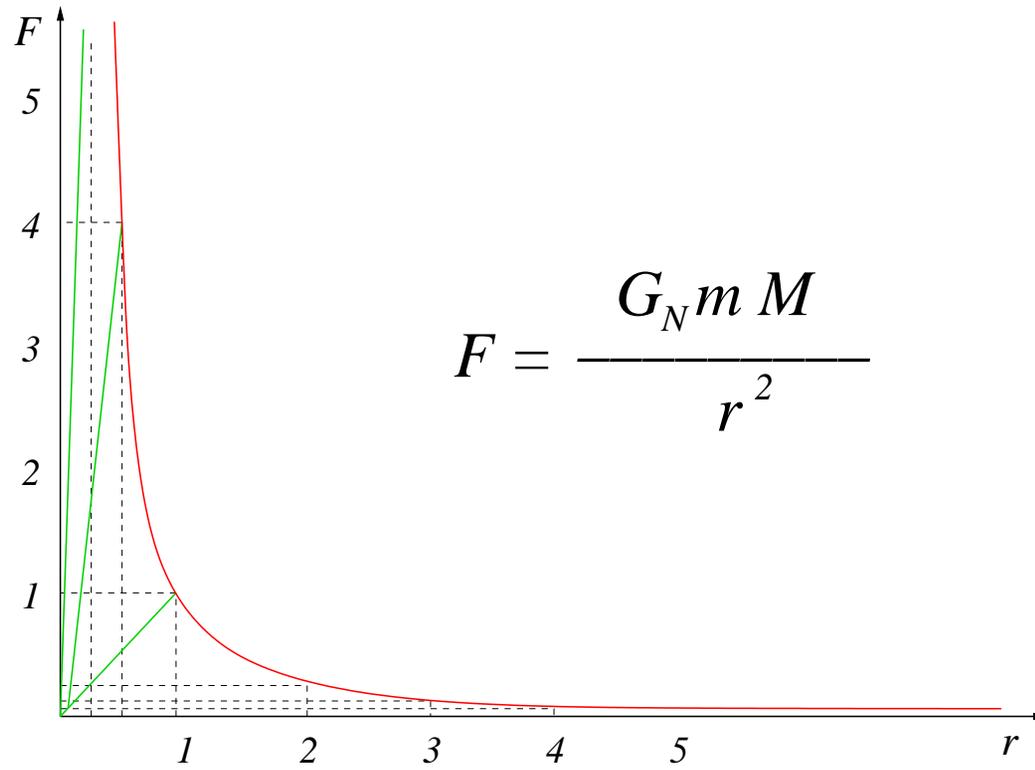
Sol: $v_e = 600 \text{ km/s} = 2\,160\,000 \text{ km/h}$

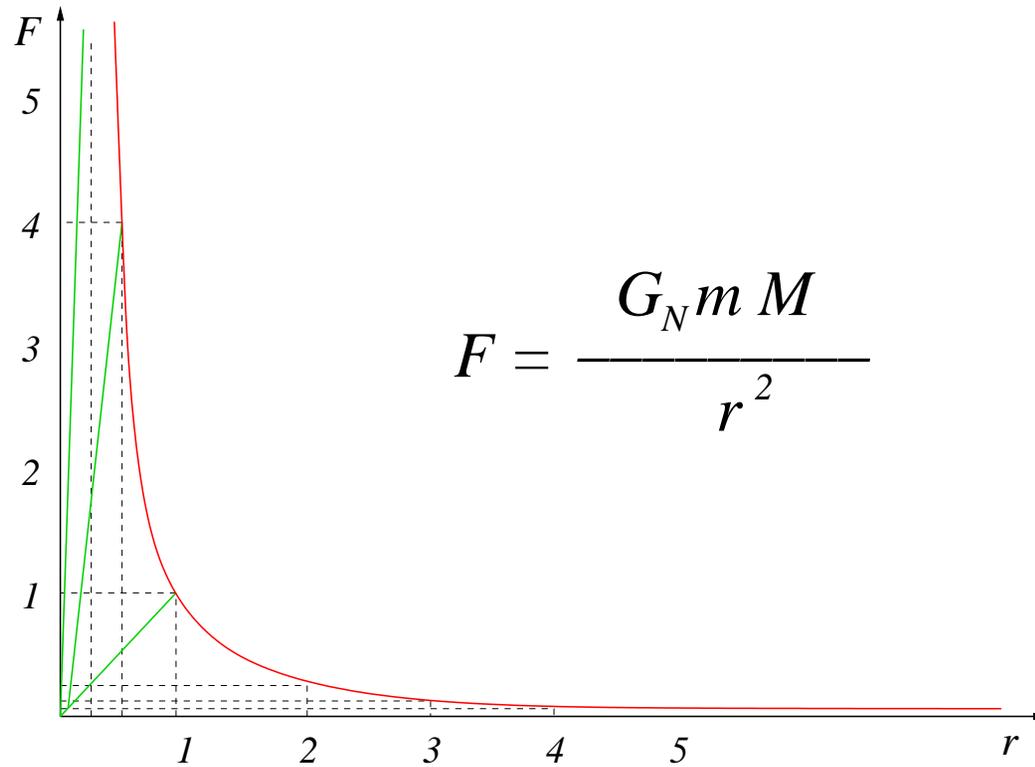
...

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

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

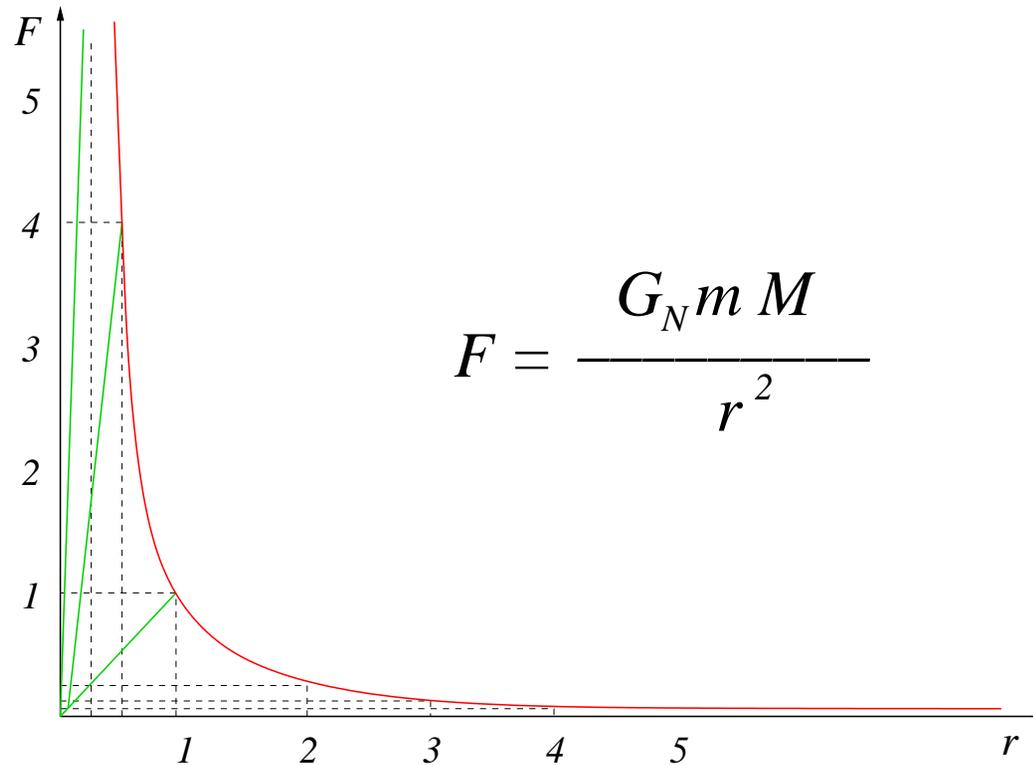
v_e aumenta si **disminuye el radio R** del planeta





Laplace (1798):
$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \quad \Leftrightarrow \quad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$

→ Estrella negra



Laplace (1798):
$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \quad \iff \quad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$

→ Estrella negra

Einstein (1905): c es velocidad máxima permitida

→ **Agujero negro: Imposible escapar!**

Observación importante:

La formación de un agujero negro:

depende de la **densidad** 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 órbita de Saturno
Agujero negro primordial	$\sim 10^{12} \text{ kg} = 10^{-18} M_\odot$	\sim núcleo de átomo

2. Agujeros negros en la Teoría de la Relatividad

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

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

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

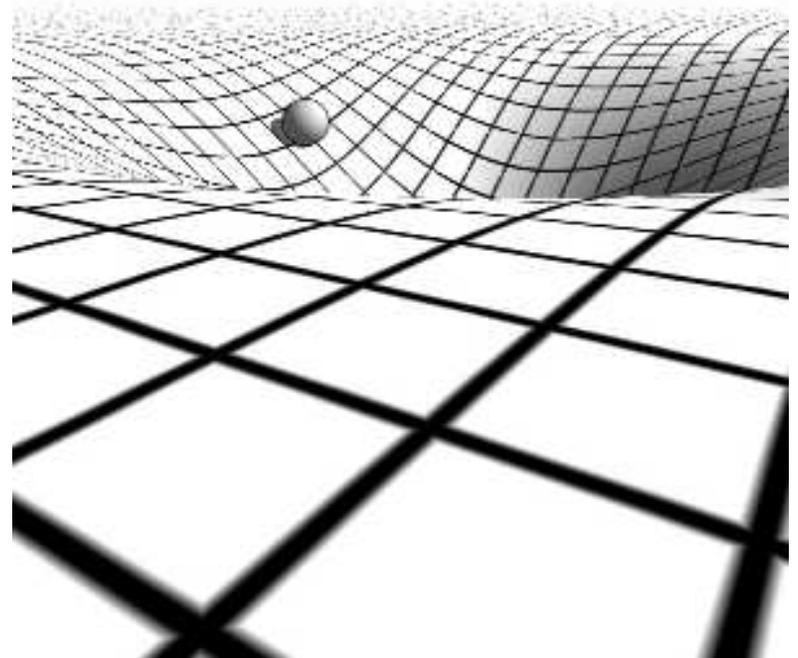
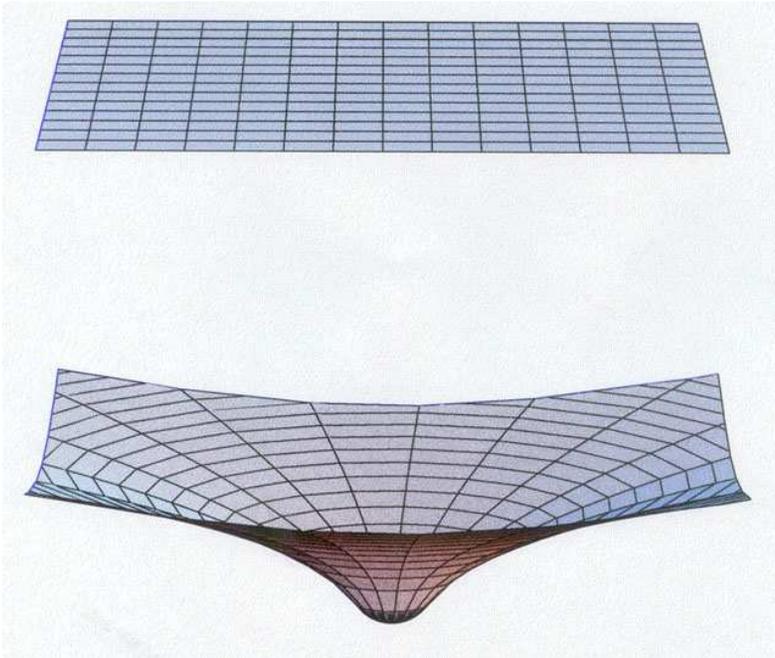
EINSTEIN SIMPLIFIED





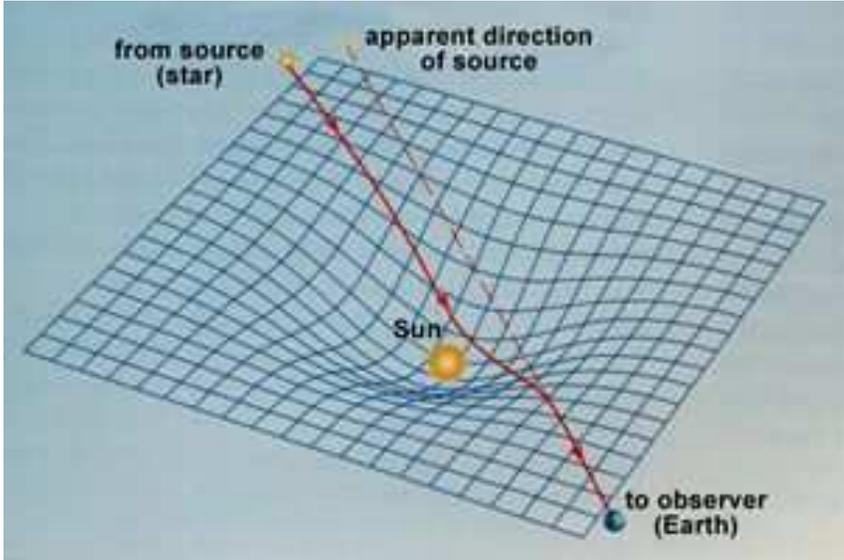
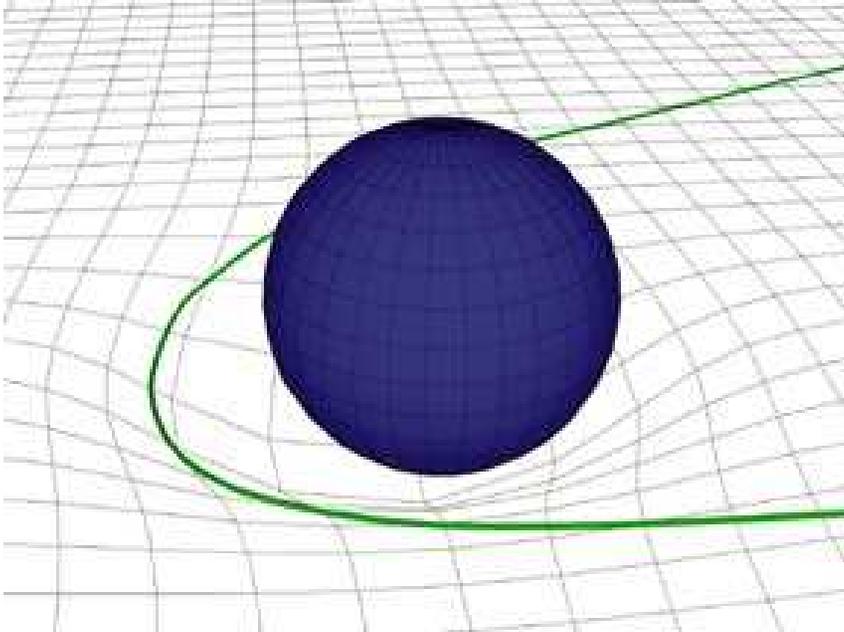
Cementerio de trenes, Uyuni, Bolivia

Gravedad = espacio curvo

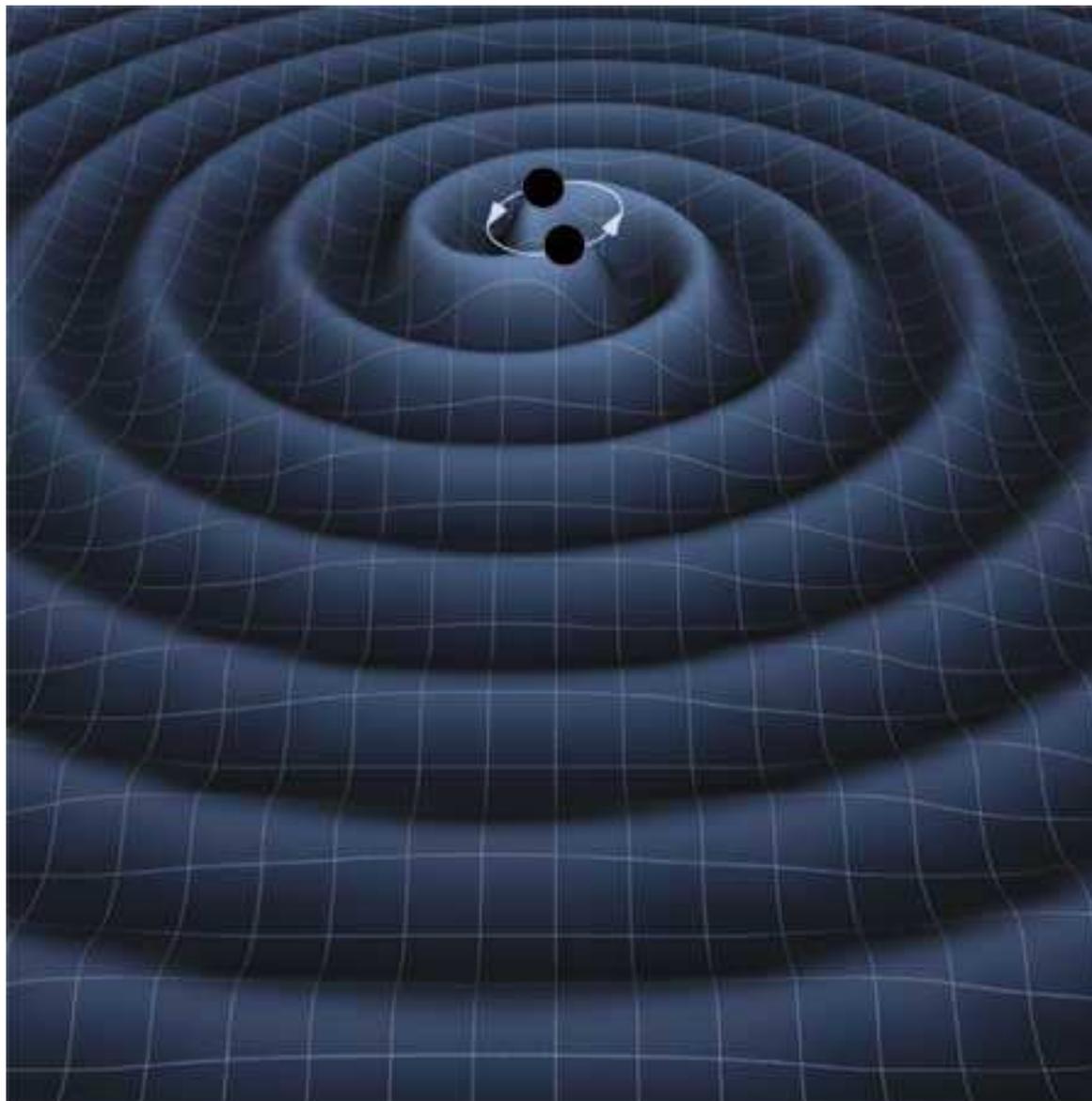


La materia indica como se curva el espacio.
El espacio indica como se mueve la materia.

Partículas y luz siguen trayectorias curvas en el espacio curvo:



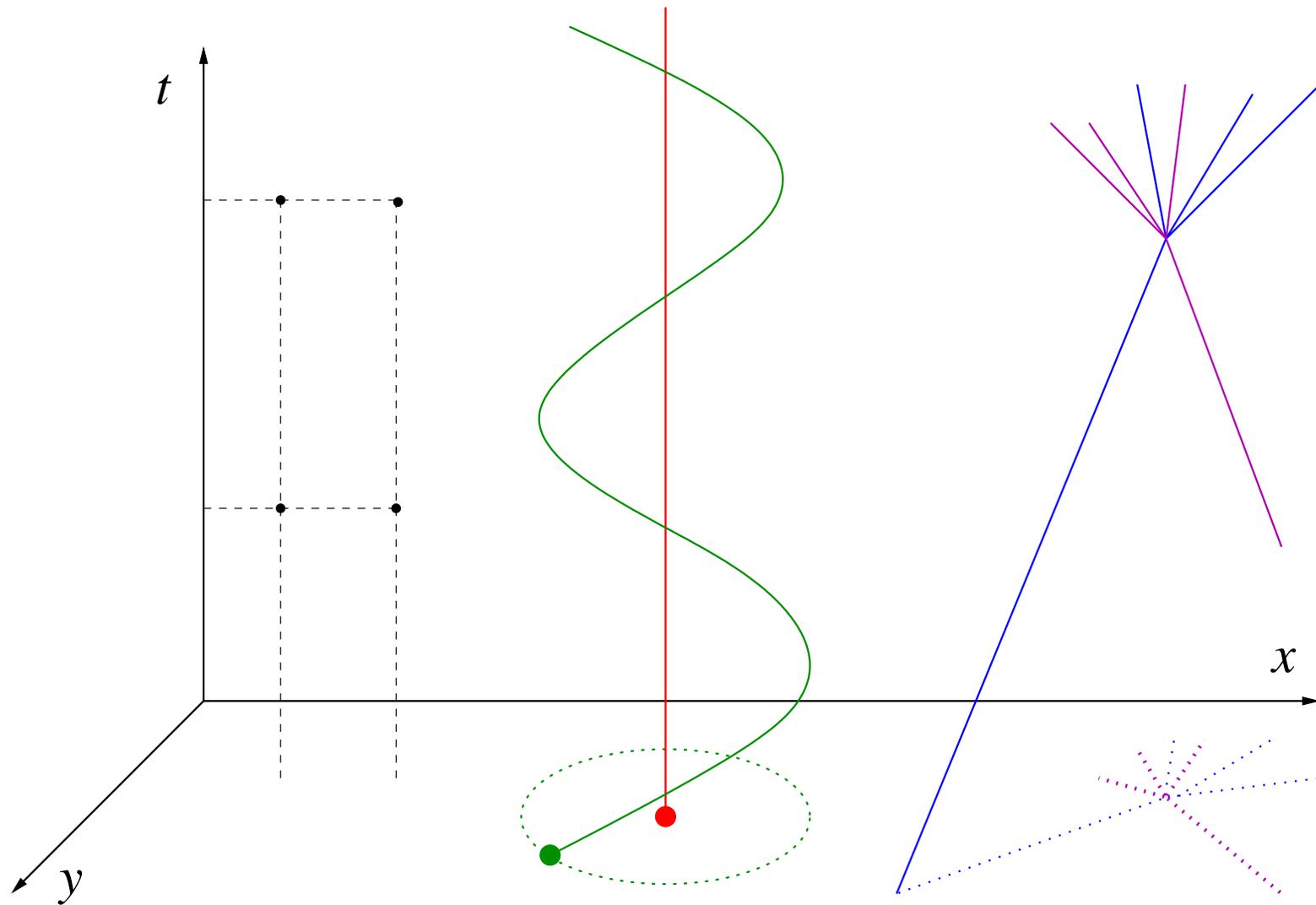
En general la curvatura es muy, muy complicada:



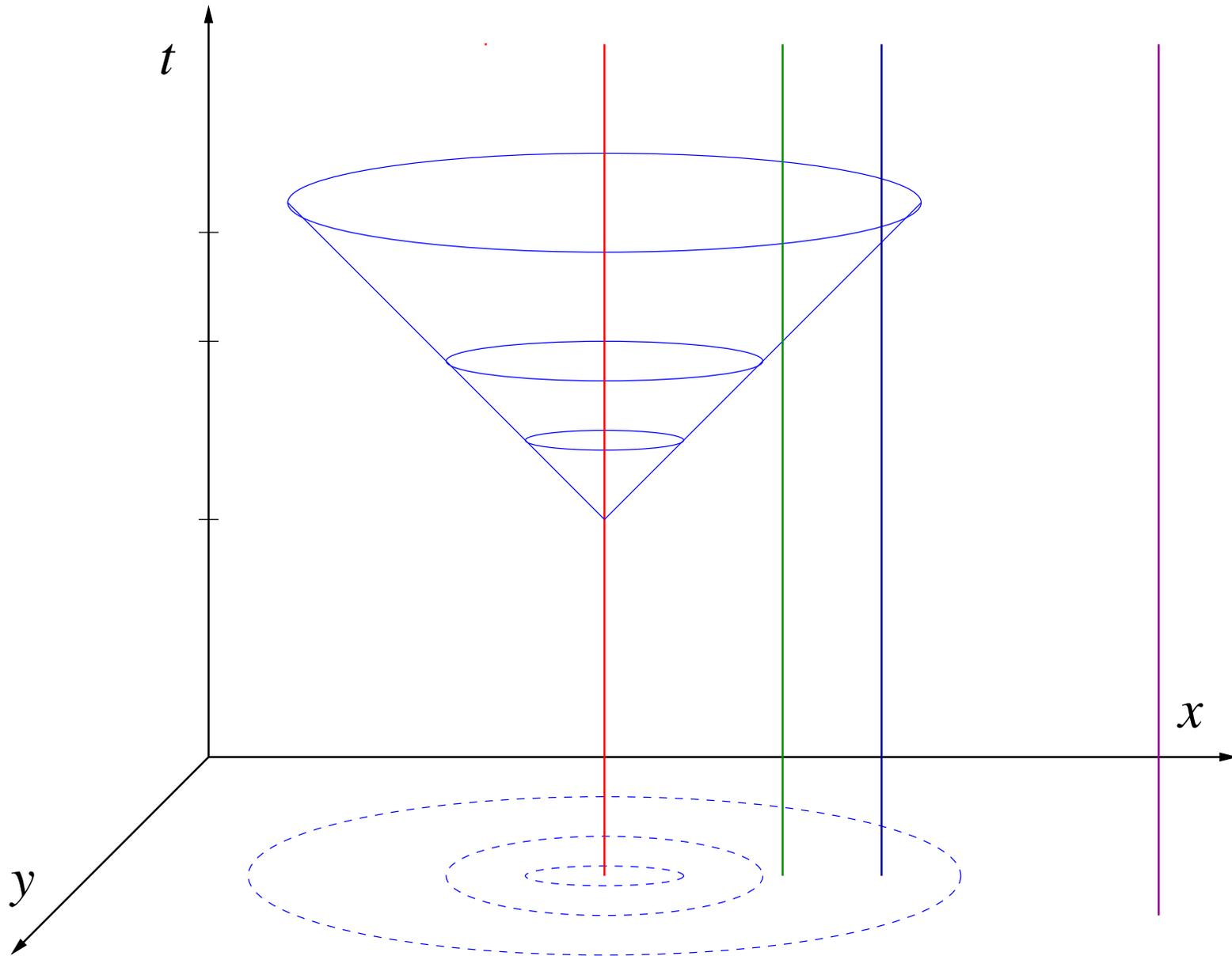
Diagramas de espaciotiempo:

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

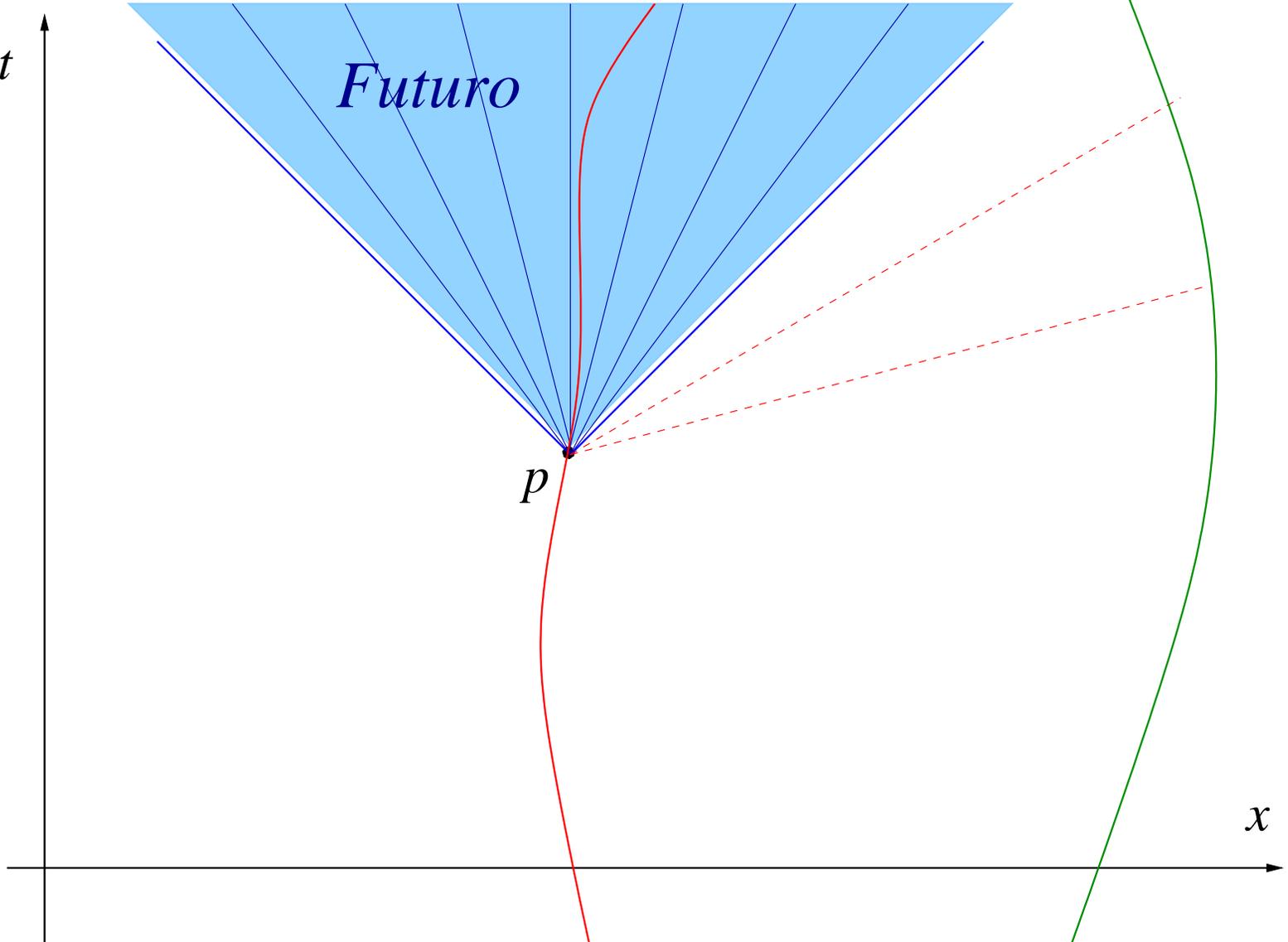
Lineas de universo = película de las **trayectorias** de las partículas



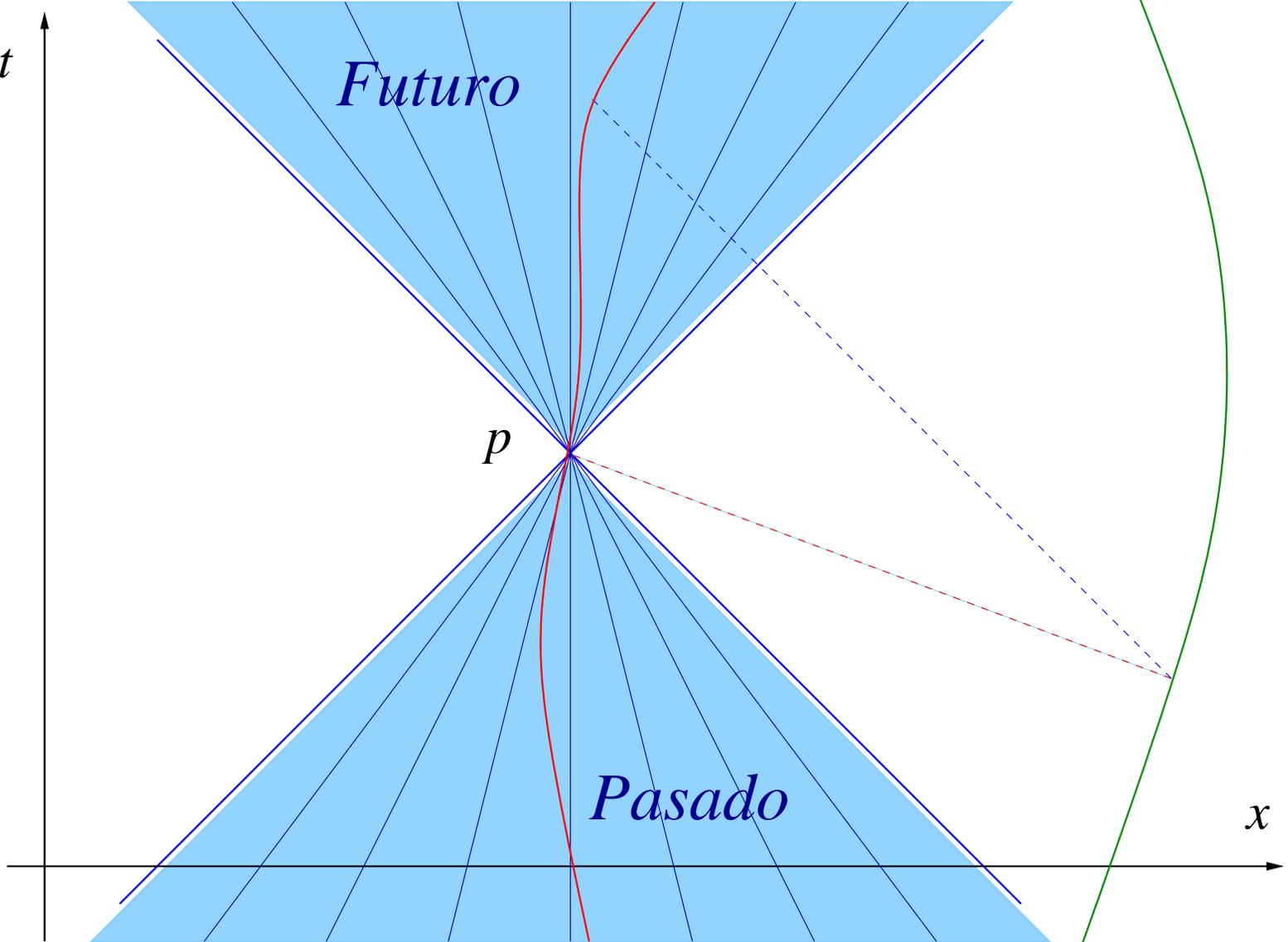
Cono de luz = película de las trayectorias de la luz



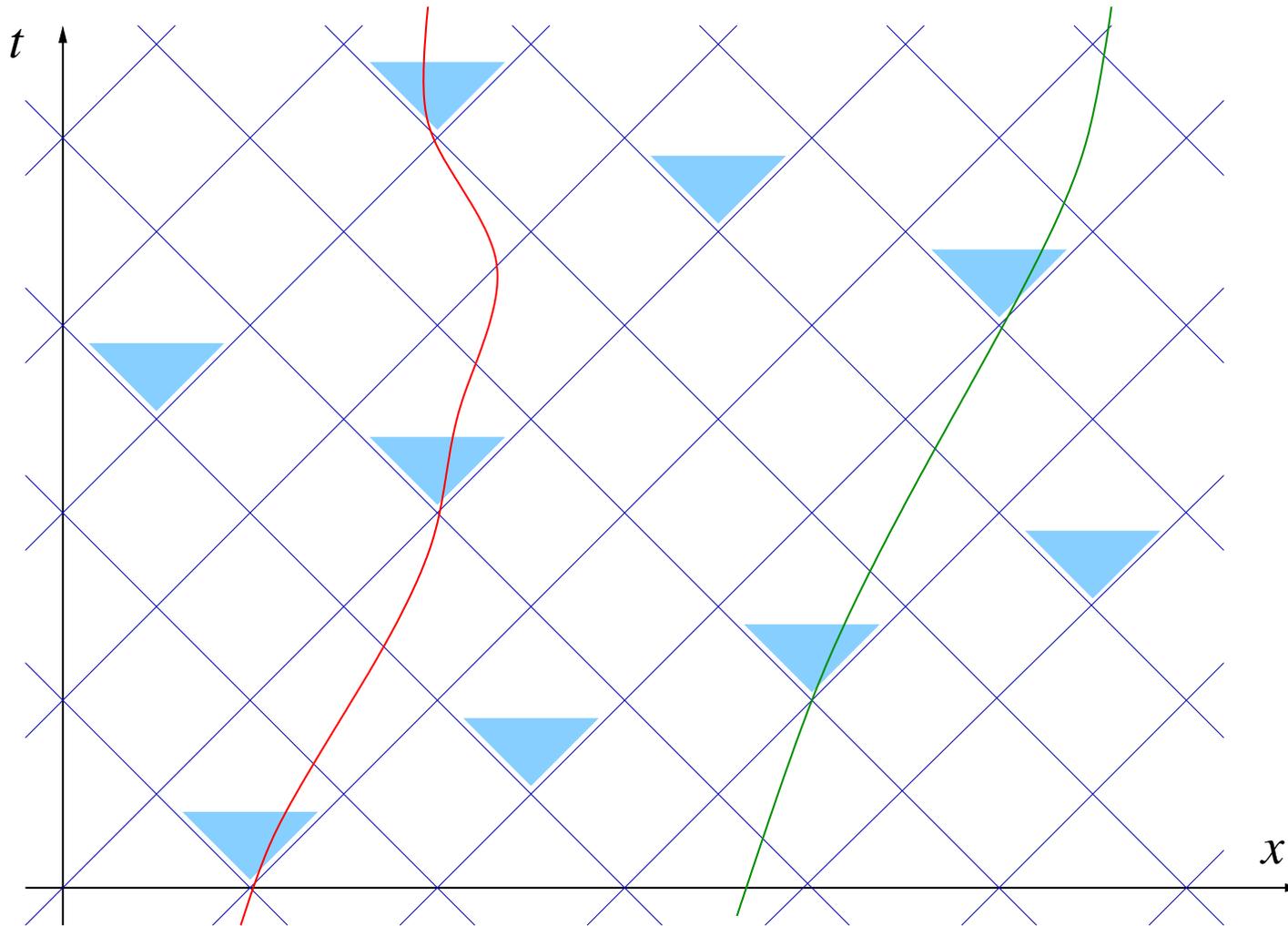
Cono de luz \longrightarrow relaciones causales entre eventos



Cono de luz \rightarrow relaciones causales entre eventos



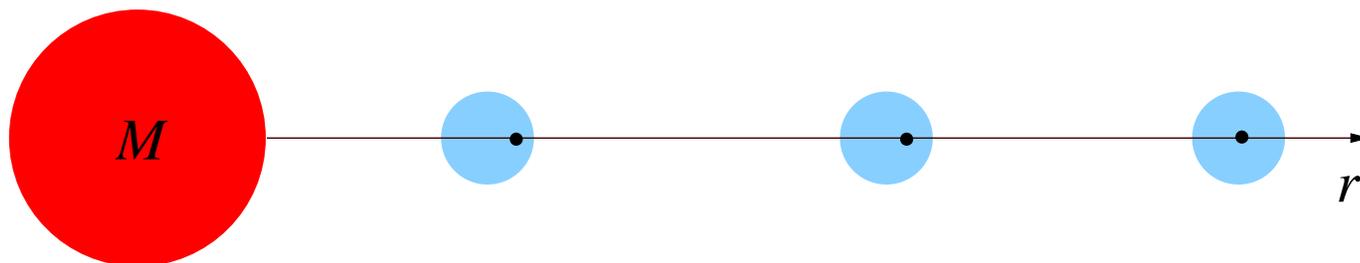
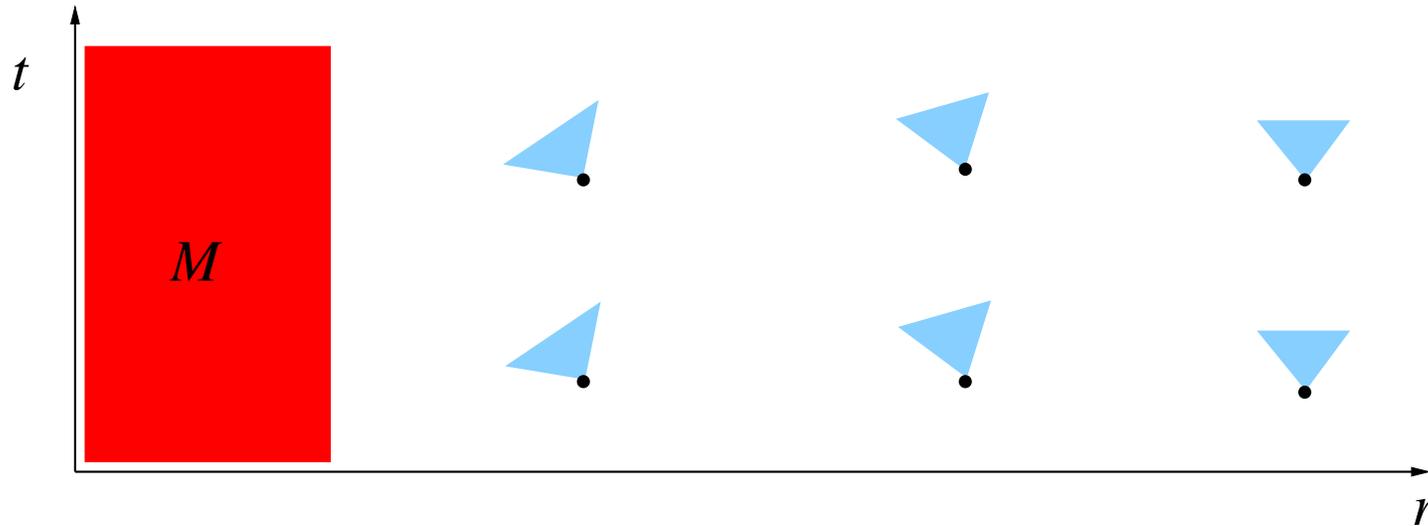
Espacio plano: La luz sigue **lineas rectas**



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

Cerca de objetos masivos: el espacio se curva

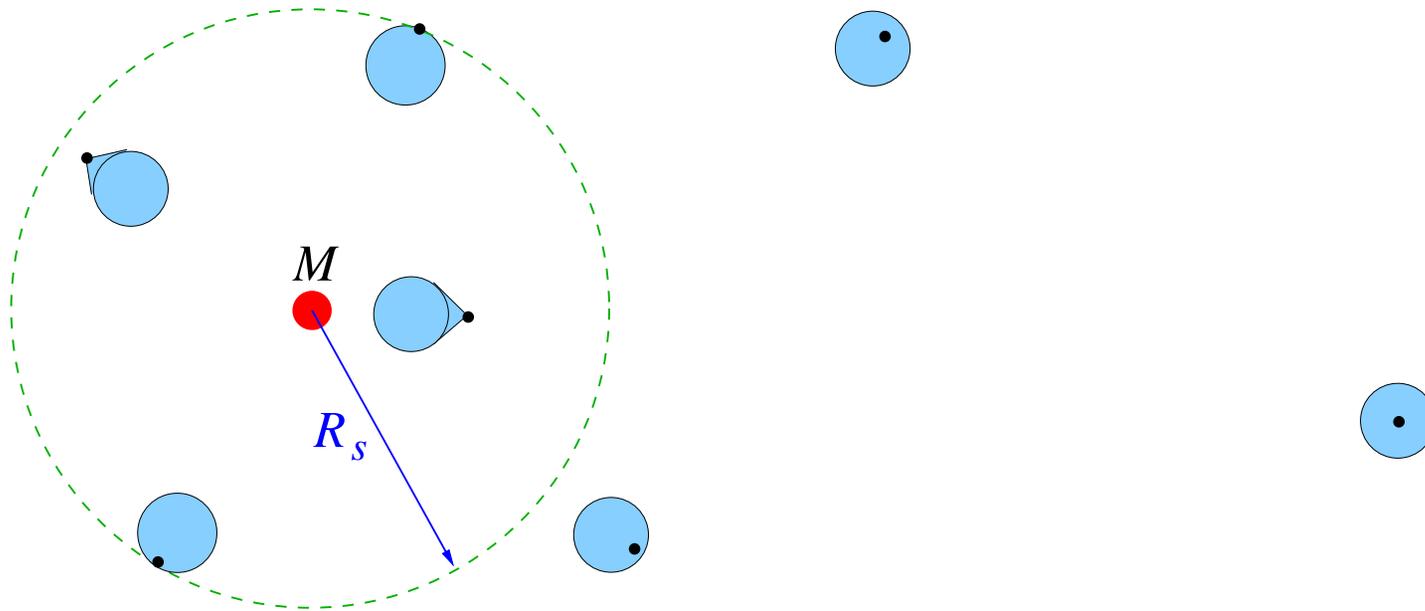
→ La luz sigue **lineas curvas**



→ La luz está “atraída” por el campo gravitatorio

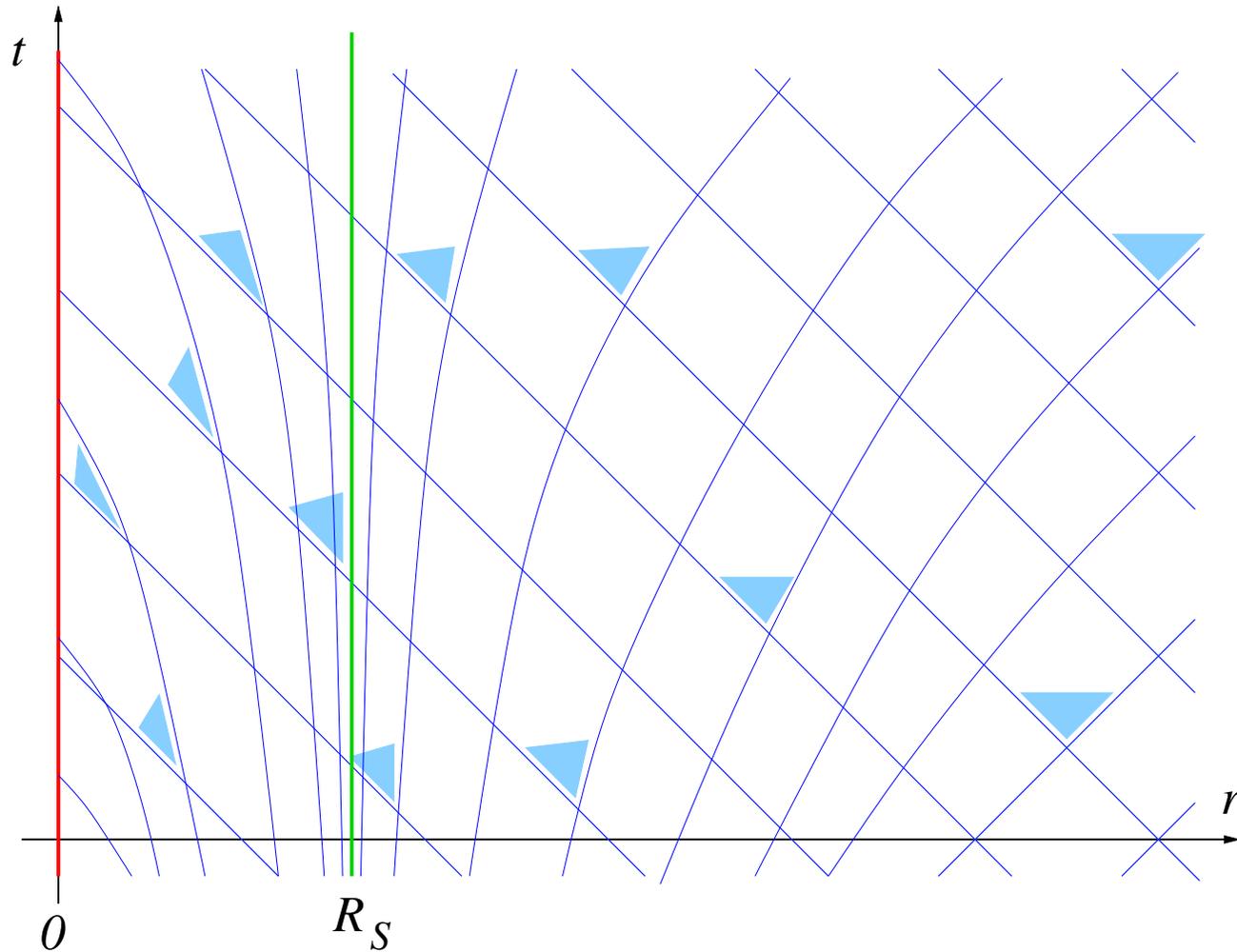
→ Los conos de luz se inclinan hacia el objeto masivo

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



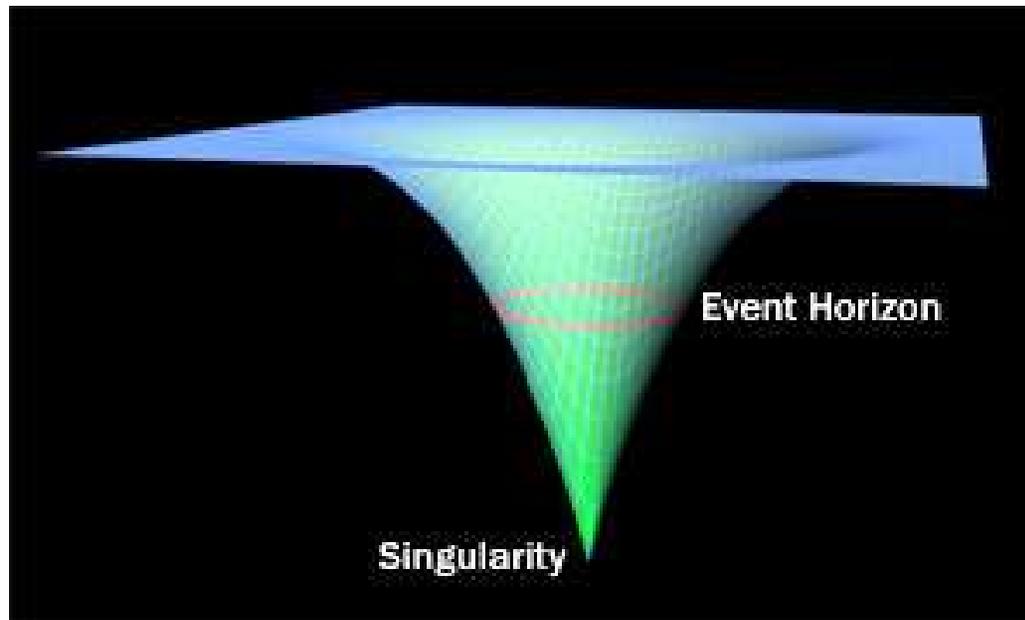
- > la luz se **queda atrapada** dentro del radio de Schwarzschild
- > Se forma un **horizonte**: no salen señales desde el interior
- > Se forma un **agujero negro**

Agujero negro: La luz queda atrapada



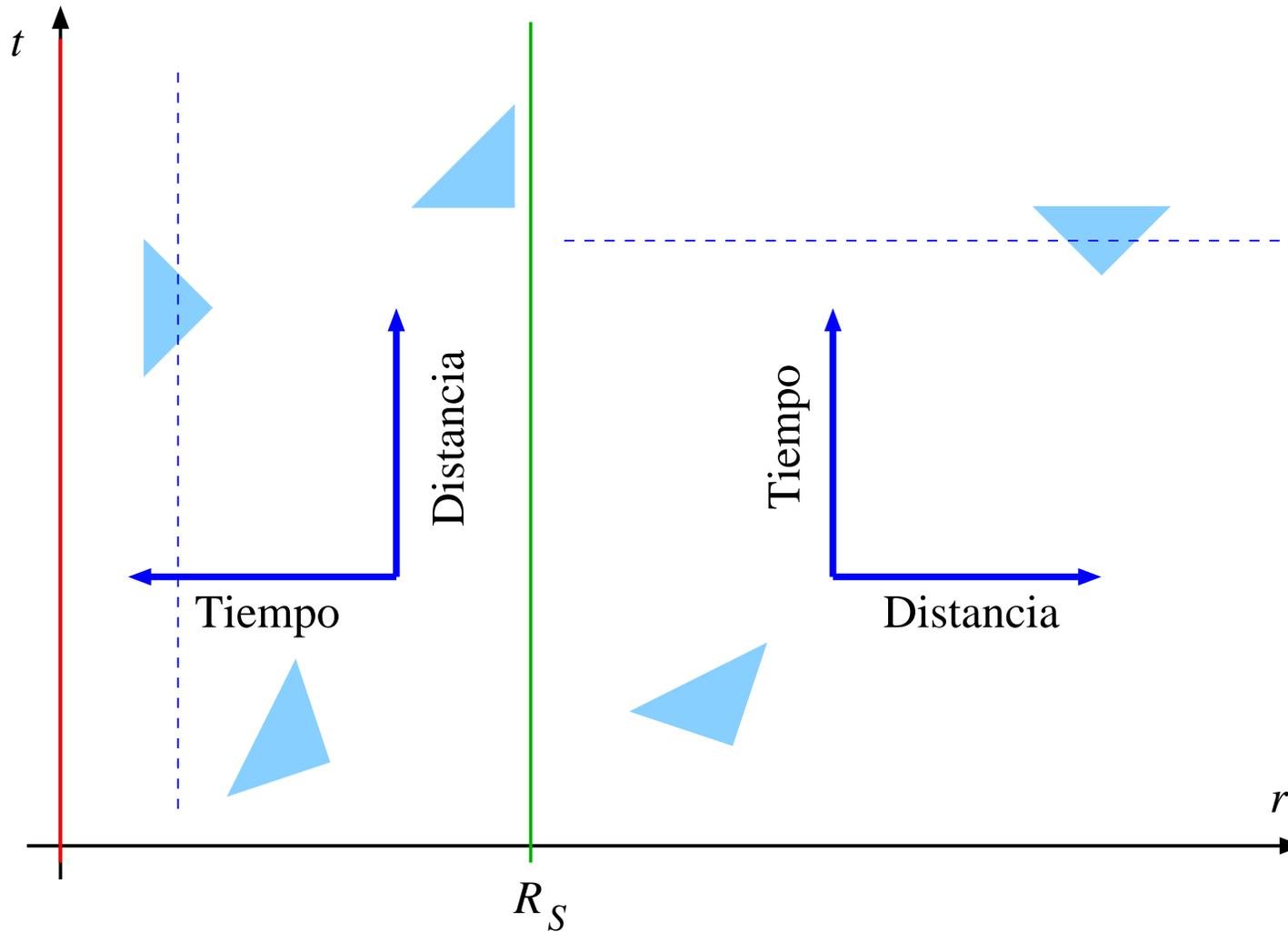
- > **horizonte** = membrana unidireccional
- > Se forma una **singularidad** = punto de **curvatura infinita**
- > todo **acabará inevitablemente** en la **singularidad**

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



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

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**

3. ¿Cómo se observa un agujero negro ya que ni se escapa la luz?

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

... ya que ni se escapa la luz?

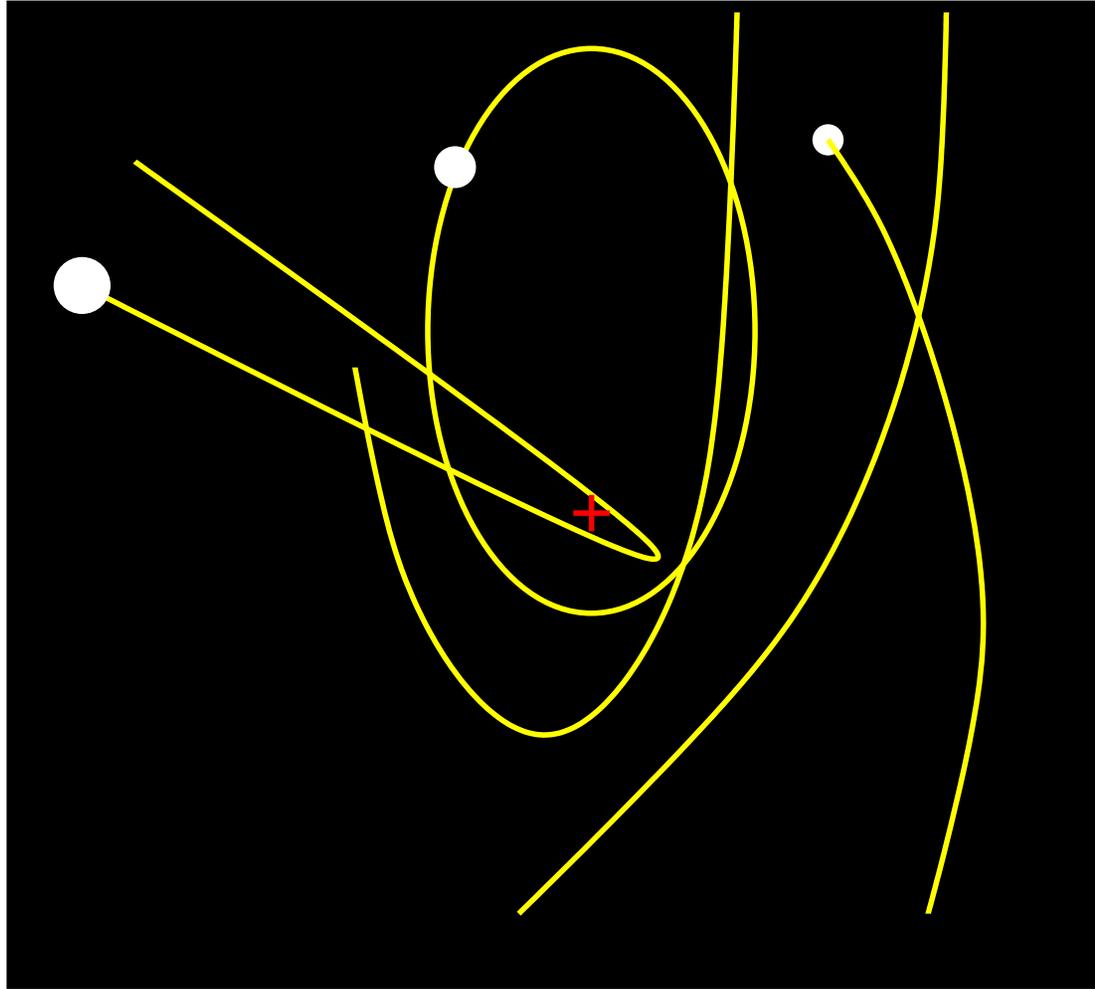
1. Por los efectos en los alrededores:



Absorción de materia cercana → Discos de acreción

2. Por los efectos en los alrededores:

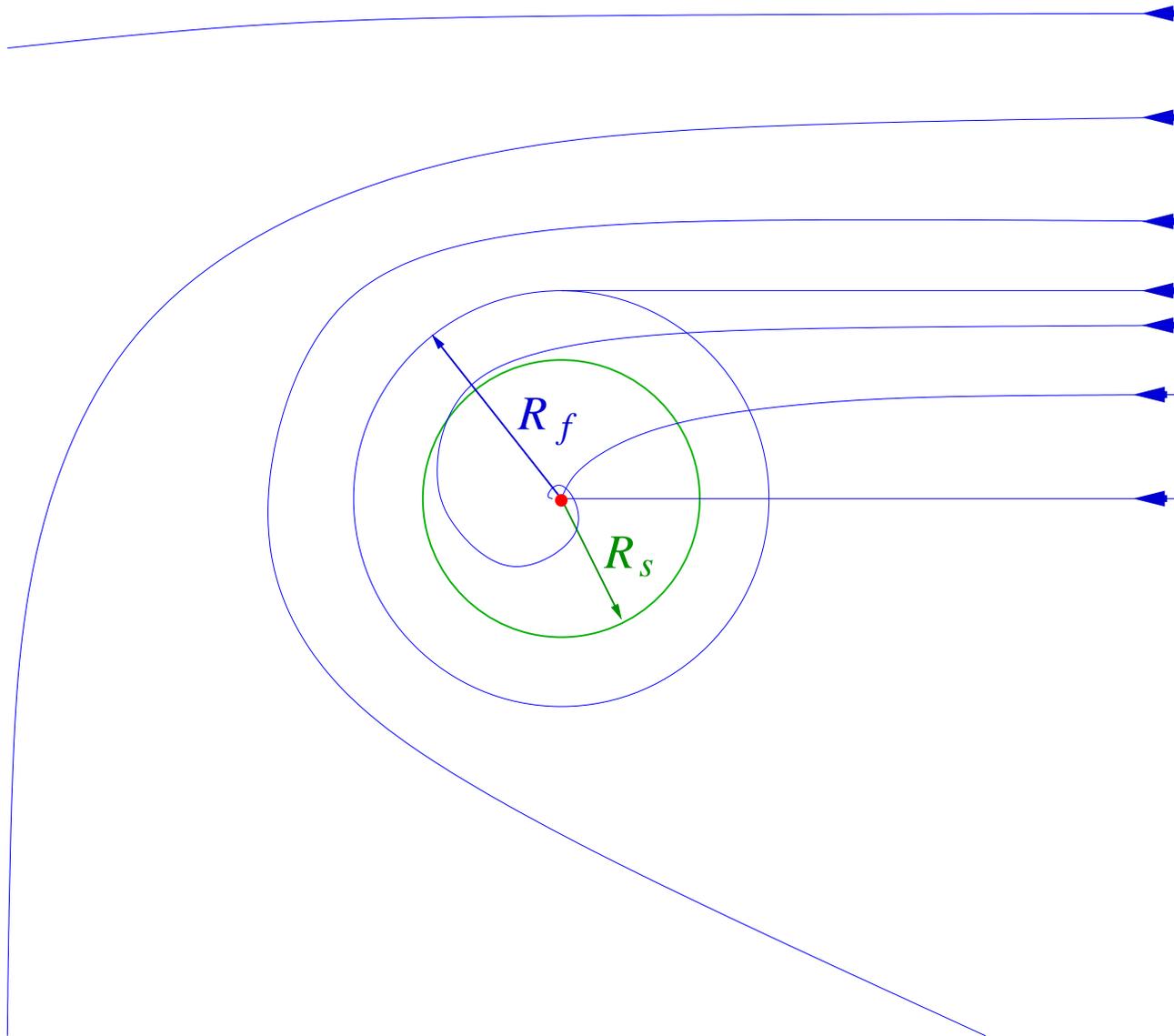
Atracción de objetos cercanos \longrightarrow trayectorias muy aceleradas



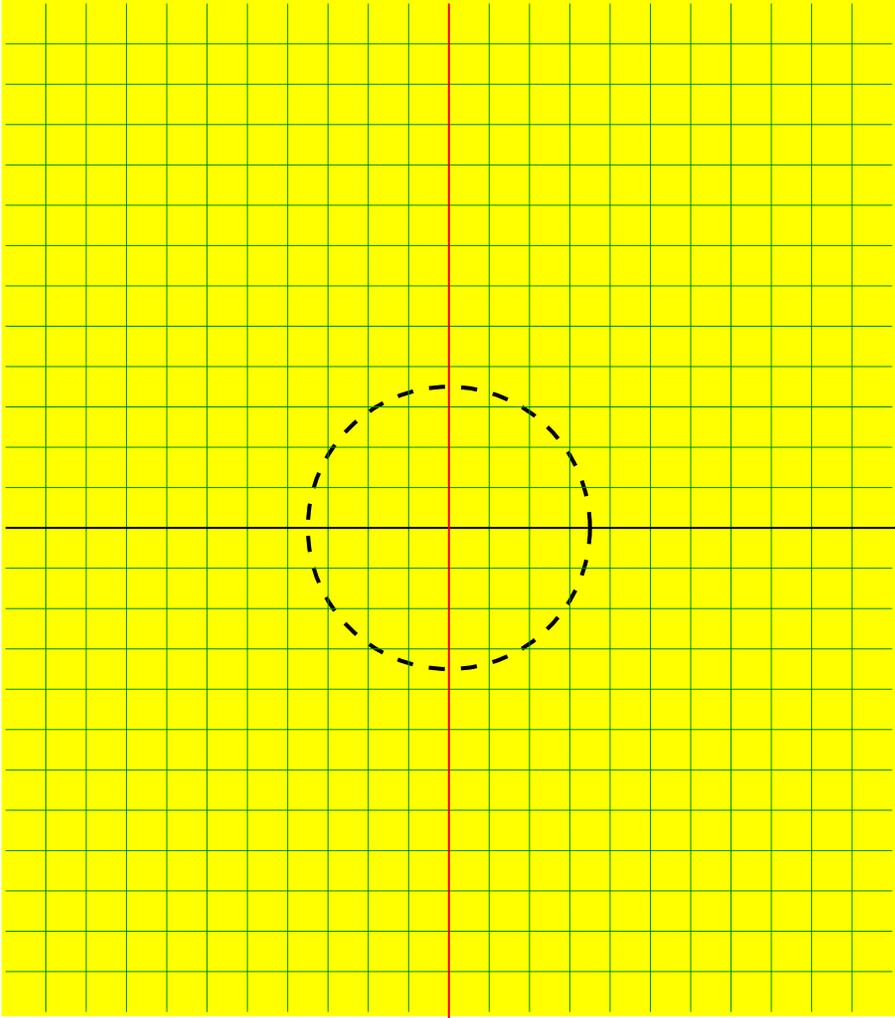
Objeto de 3 millones de masas solares en el centro de la galaxia

3. Por los efectos en los alrededores:

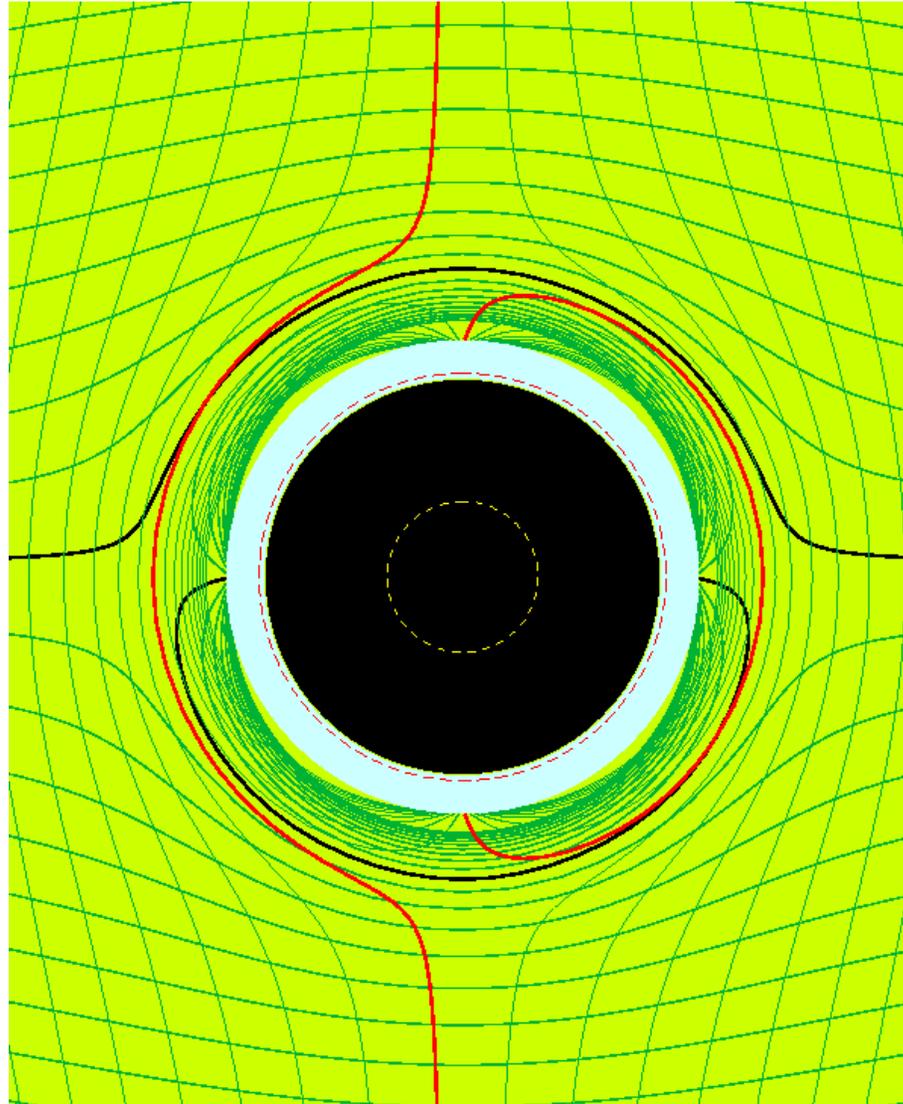
Efectos gravitatorios sobre la luz \longrightarrow distorsión de imágenes



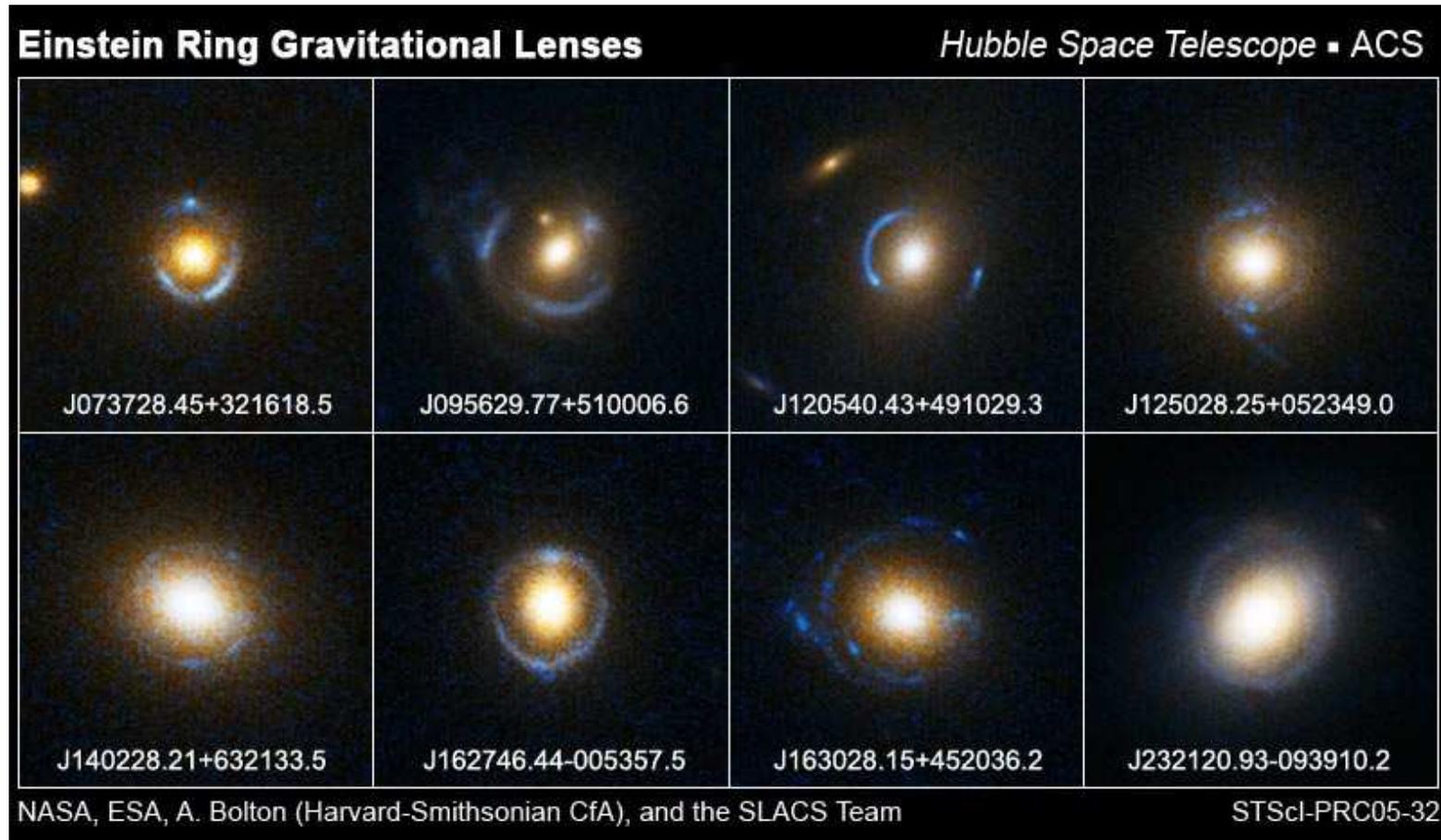
Un agujero negro sobre un fondo de coordenadas ...



... se vería así:



Efecto óptico: Anillos de Einstein (no sólo para agujeros negros)



caso especial: SDSSJ0946+1006



Por lo tanto la imagen típica de un agujero negro ...



... está mal, porque no toma en cuenta la distorsión de imágenes.

Más realista sería:



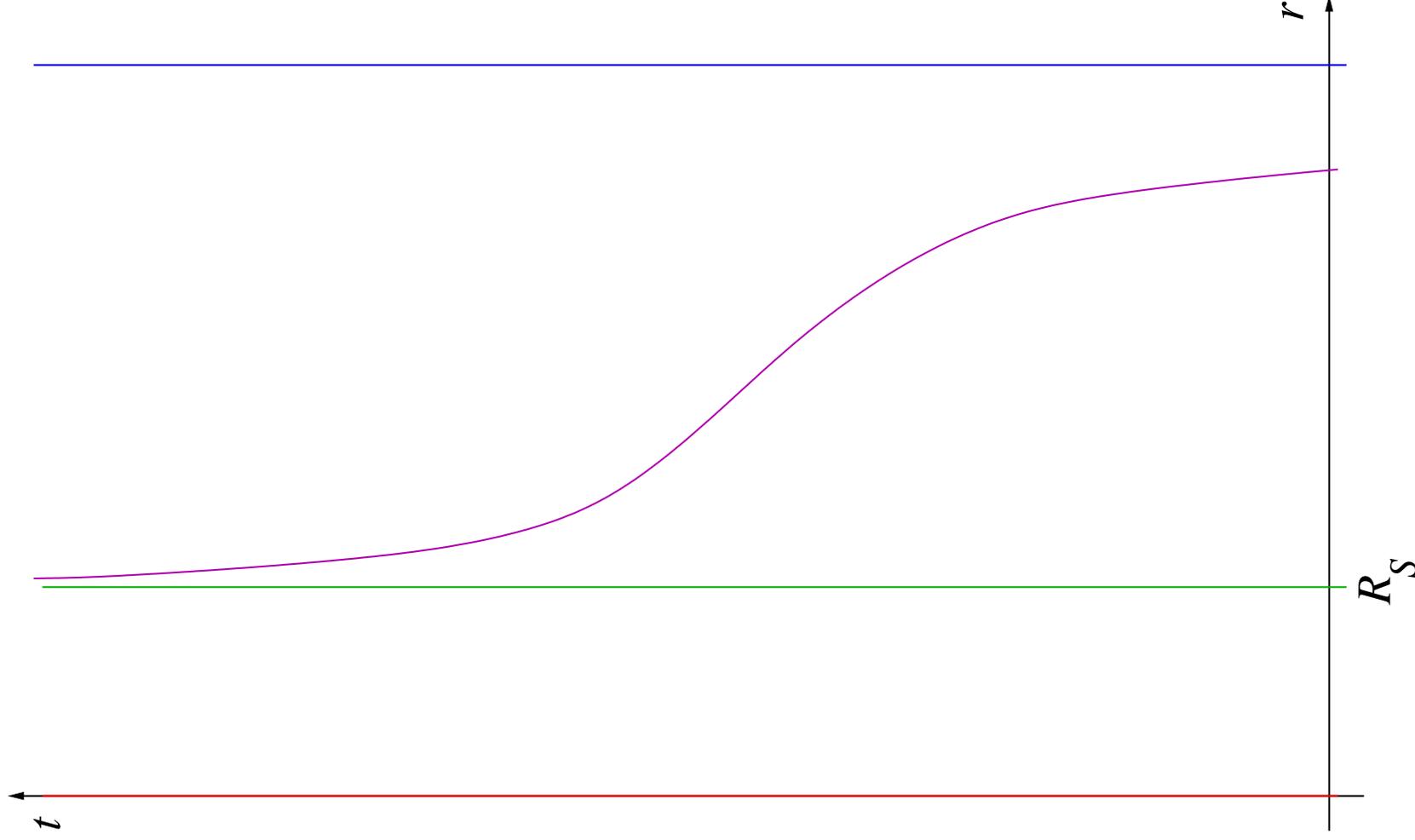
4. ¿Qué pasa si uno se acerca al agujero negro?

Depende ...

- ... 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

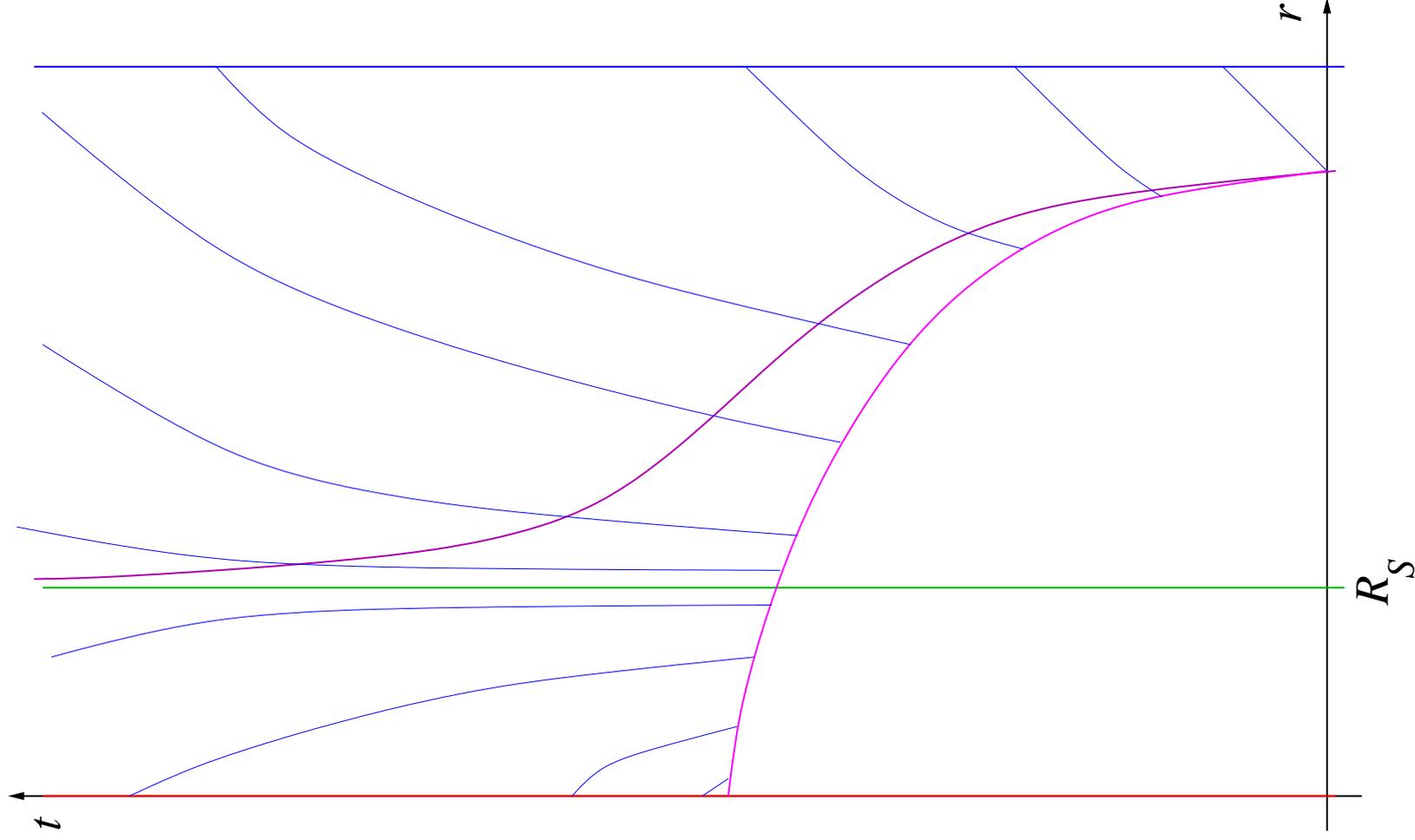
... desde donde se mira:

el observador lejano



Parece imposible cruzar el horizonte

... desde donde se mira:
el observador cayendo



Se llega al horizonte y la singularidad
en un tiempo finito

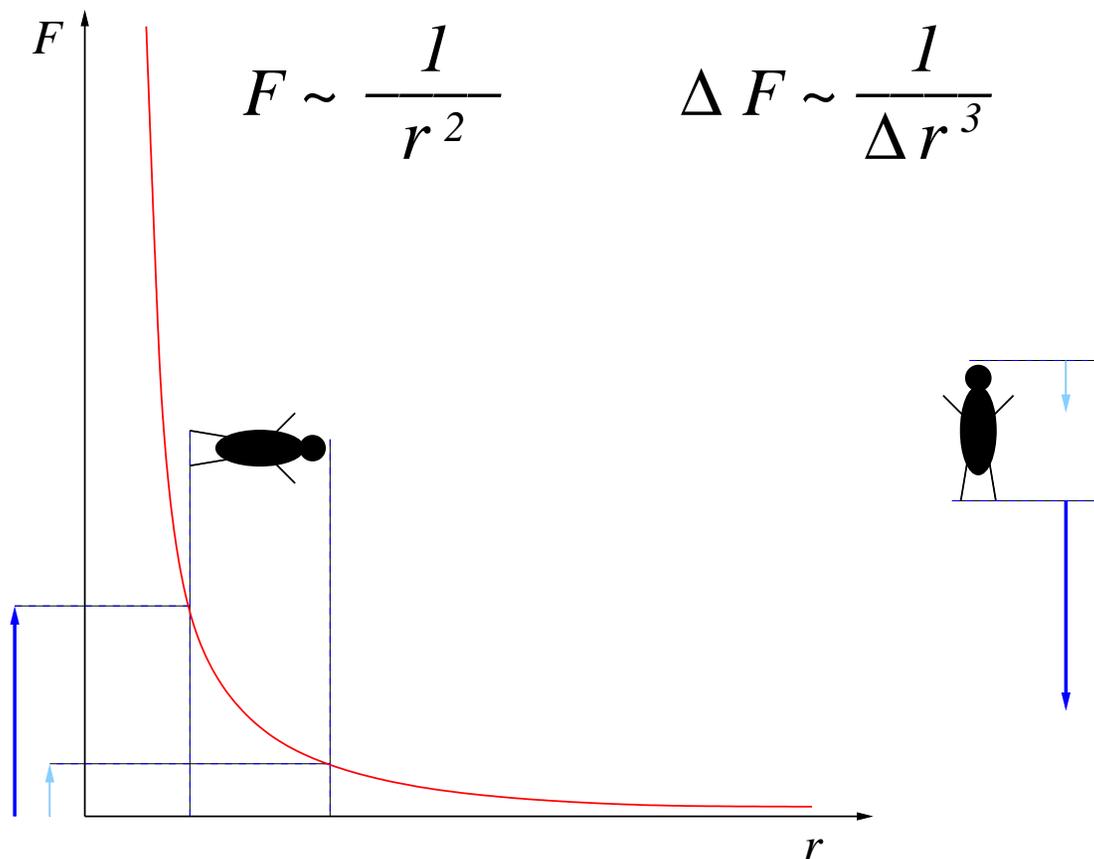
...de lo grande que seas:

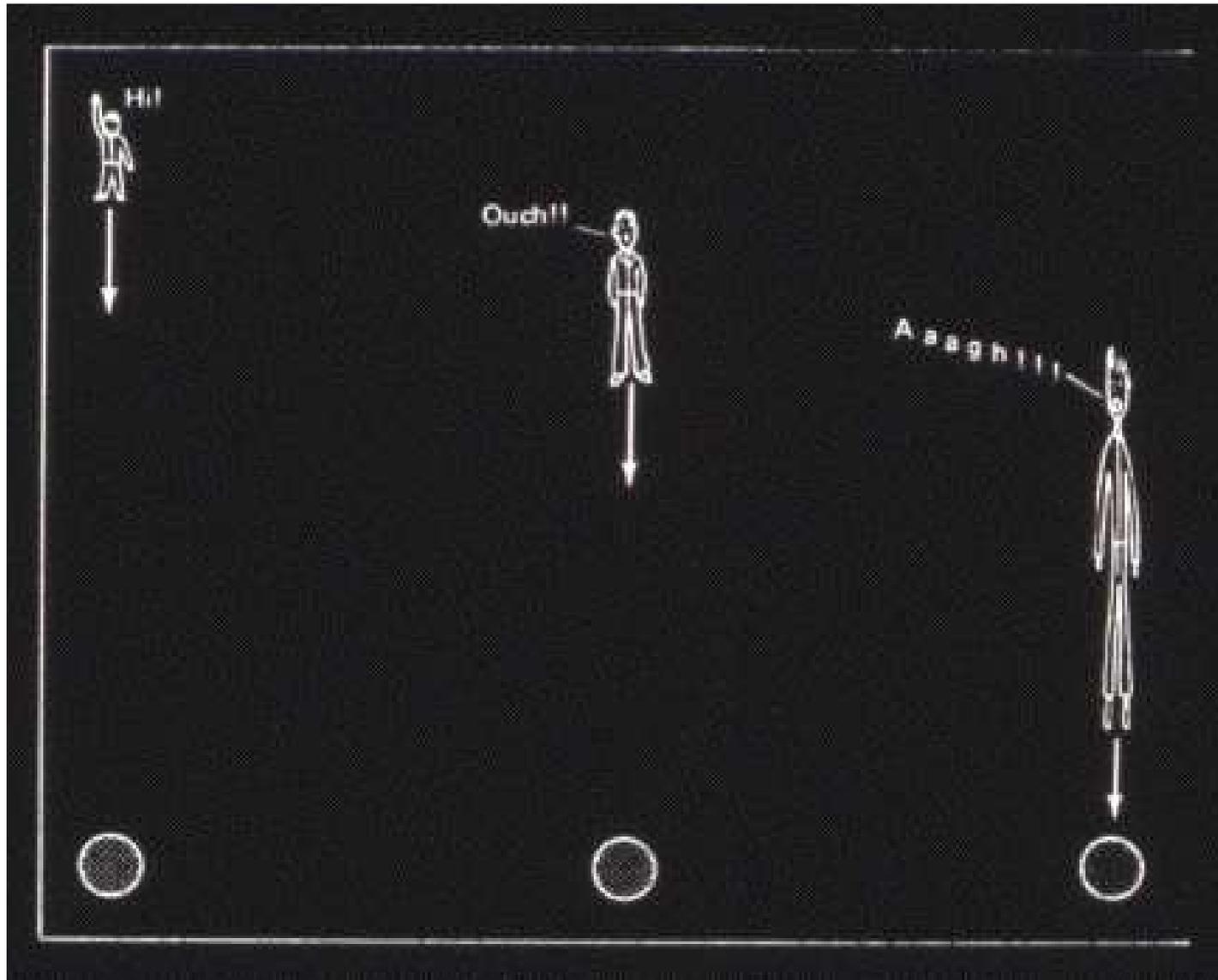
- observador puntual: historia anterior

→ no pasa nada al cruzar el horizonte

Principio de Equivalencia: observadores en caída libre se sienten localmente inerciales

- observador humano: fuerzas de marea



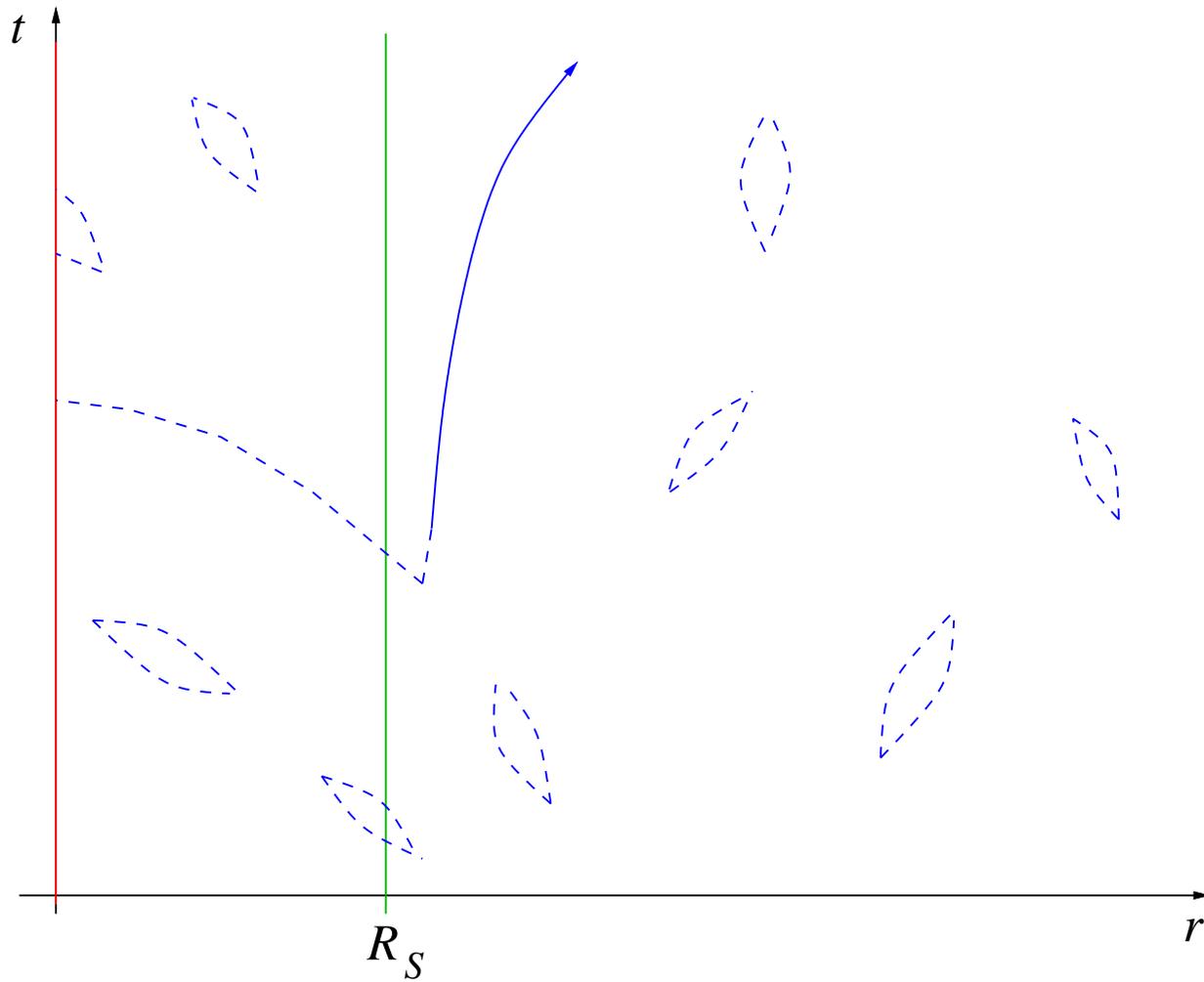


—→ las fuerza de marea actuan como un **potro de tortura cósmico**

...de tu manera de moverte:

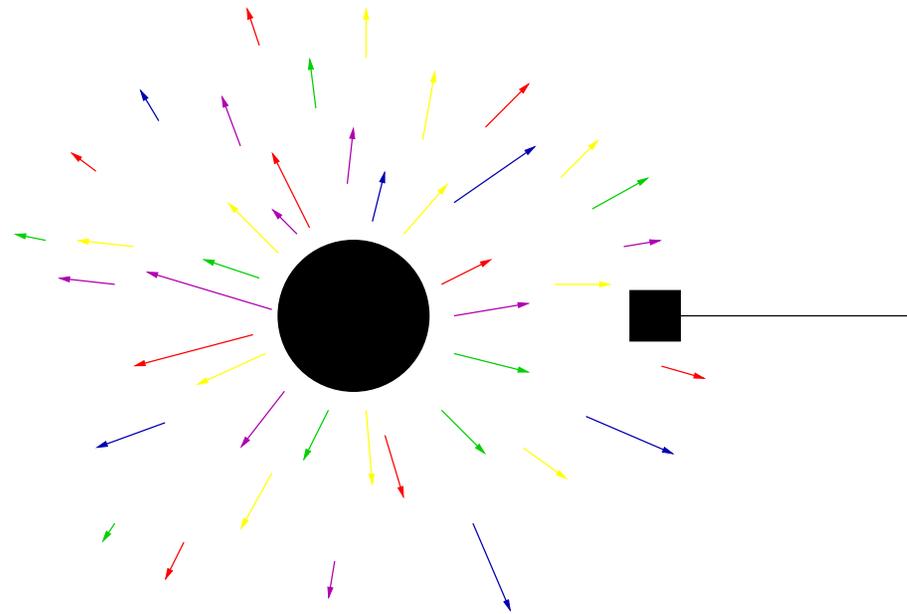
- en caída libre: historia anterior
(Principio de Equivalencia: observadores en caída libre se sienten localmente inerciales)
- en reposo encima del agujero negro: radiación de Hawking

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**

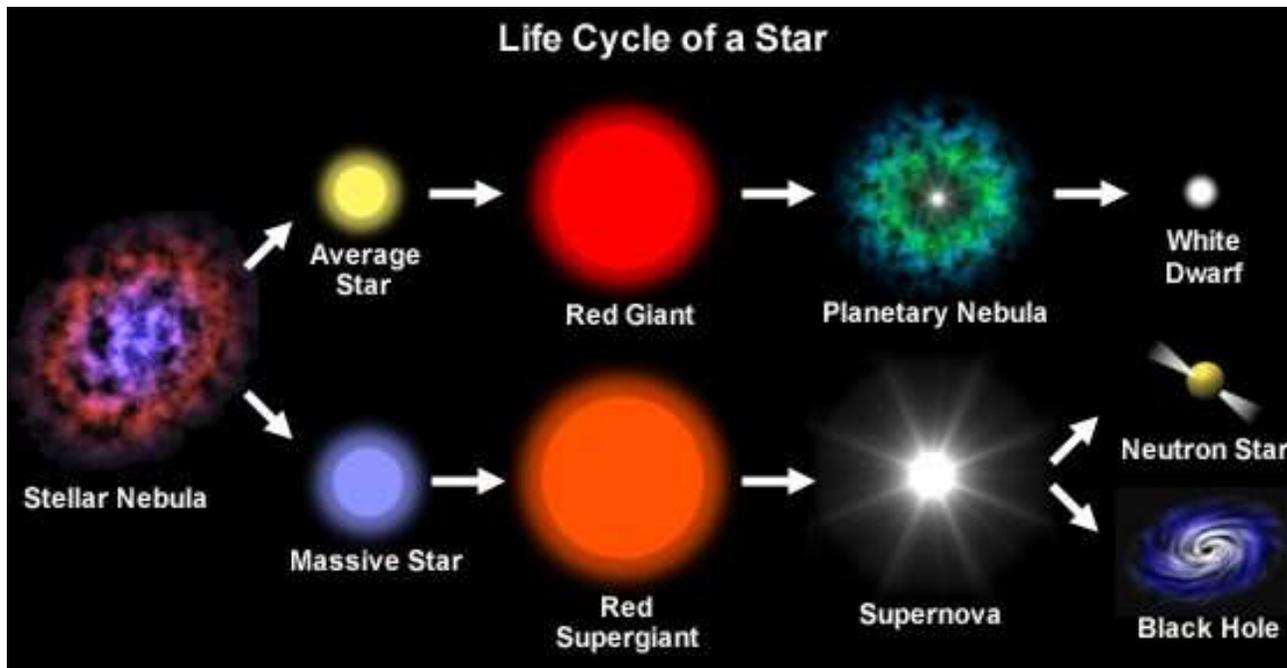
→ **¡ ¡ Terreno completamente desconocido !!**

Preguntas abiertas

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

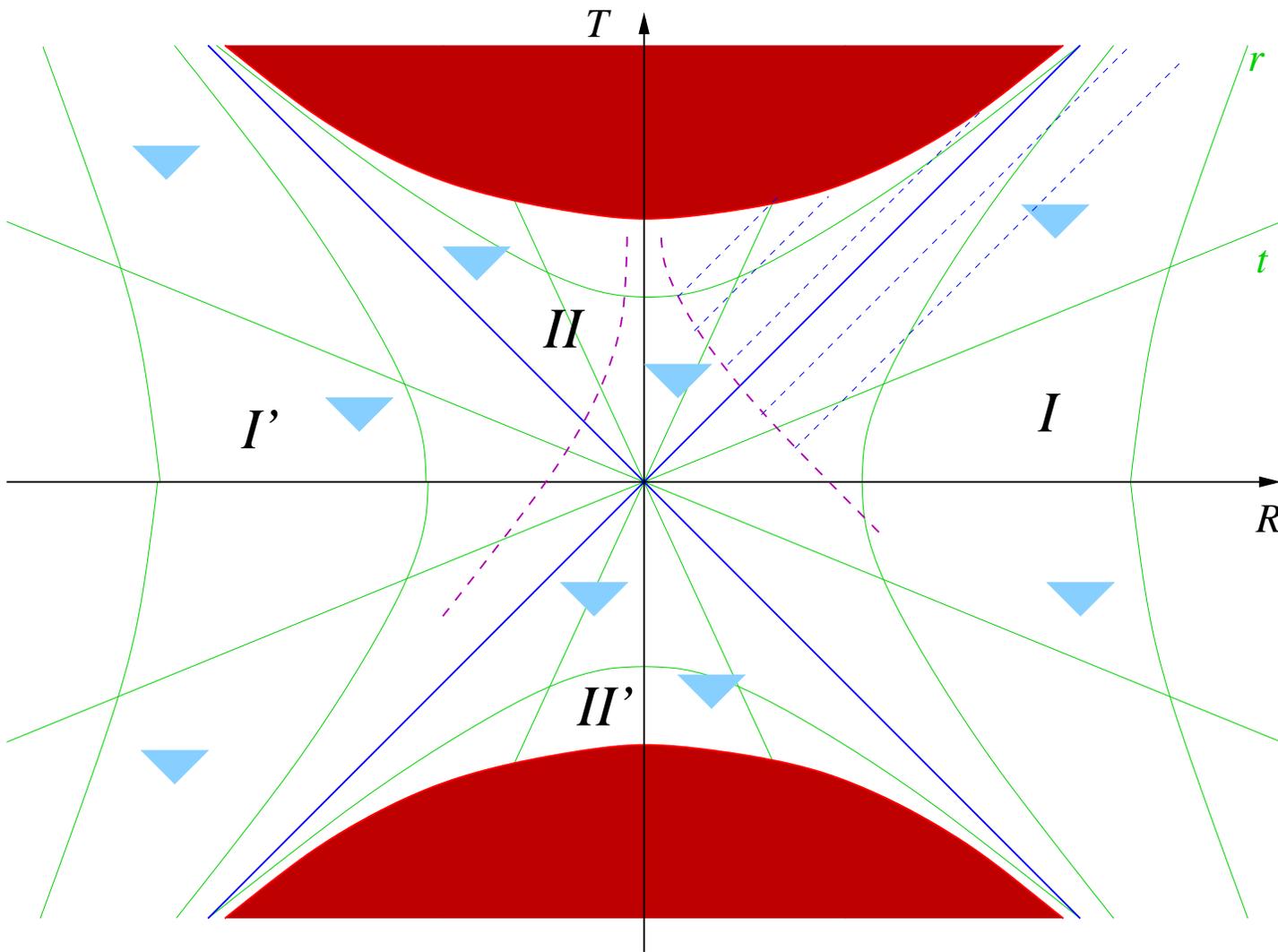
¡Gracias por vuestra atención!

Formación de agujeros negros

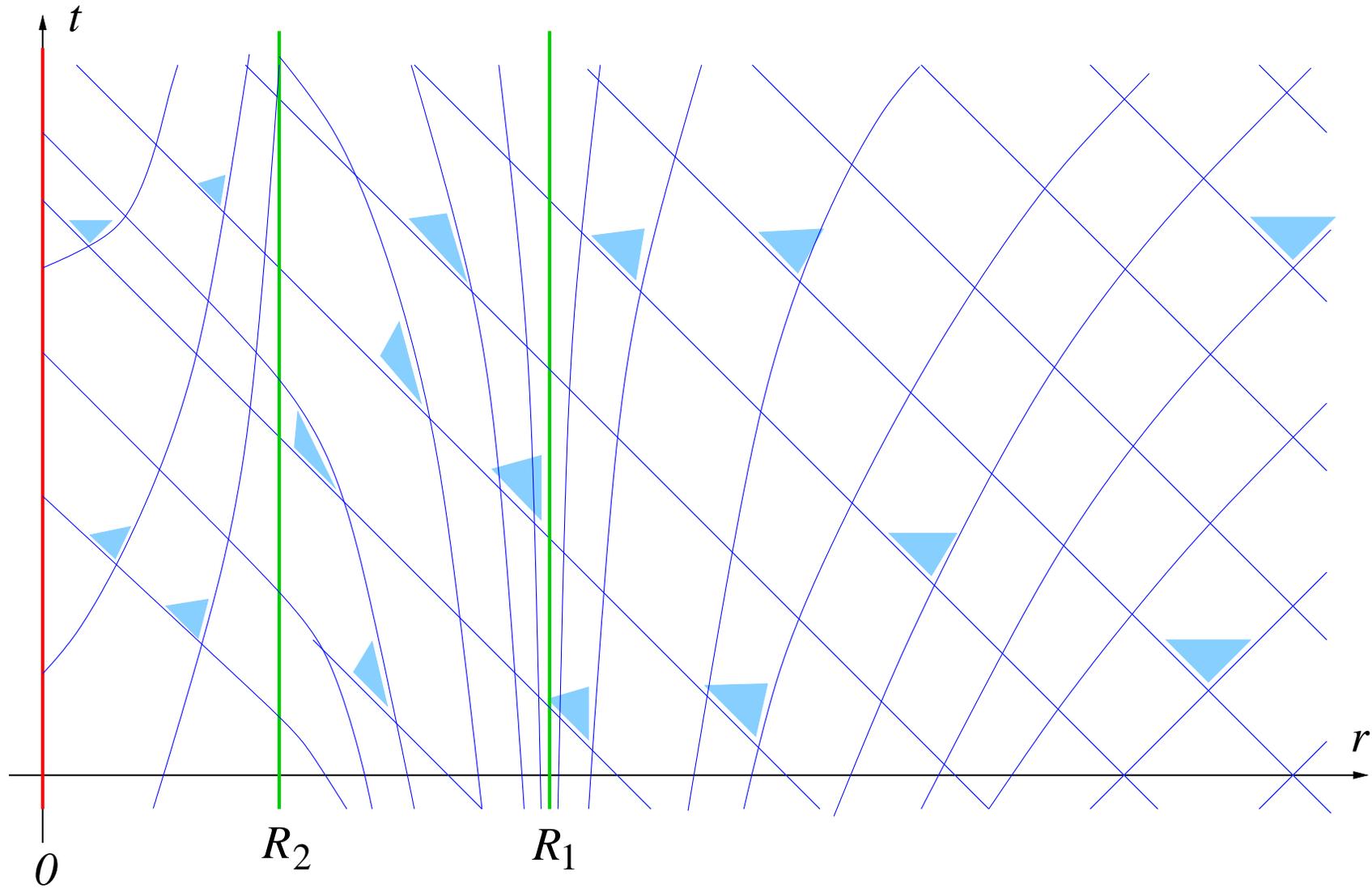


Objeto	Masa	radio
Enano blanco:	$M < 1,4 M_{\odot}$	5000 <i>km</i>
Estrella de neutrones:	$1,4 M_{\odot} < M < 2,3 M_{\odot}$	50 <i>km</i>
Agujero negro:	$M > 2,3 M_{\odot}$	R_S

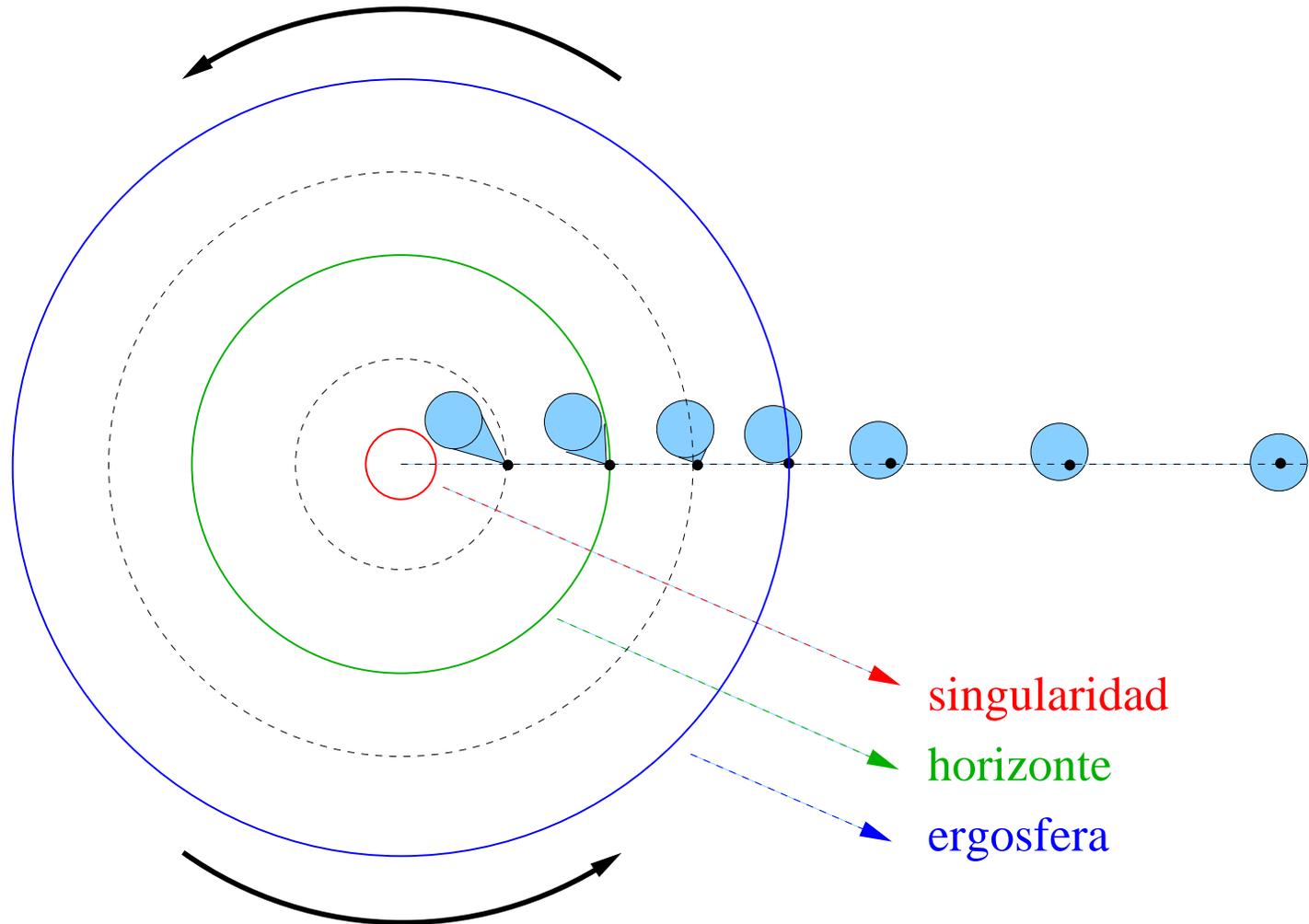
Coordenadas de Kruskal



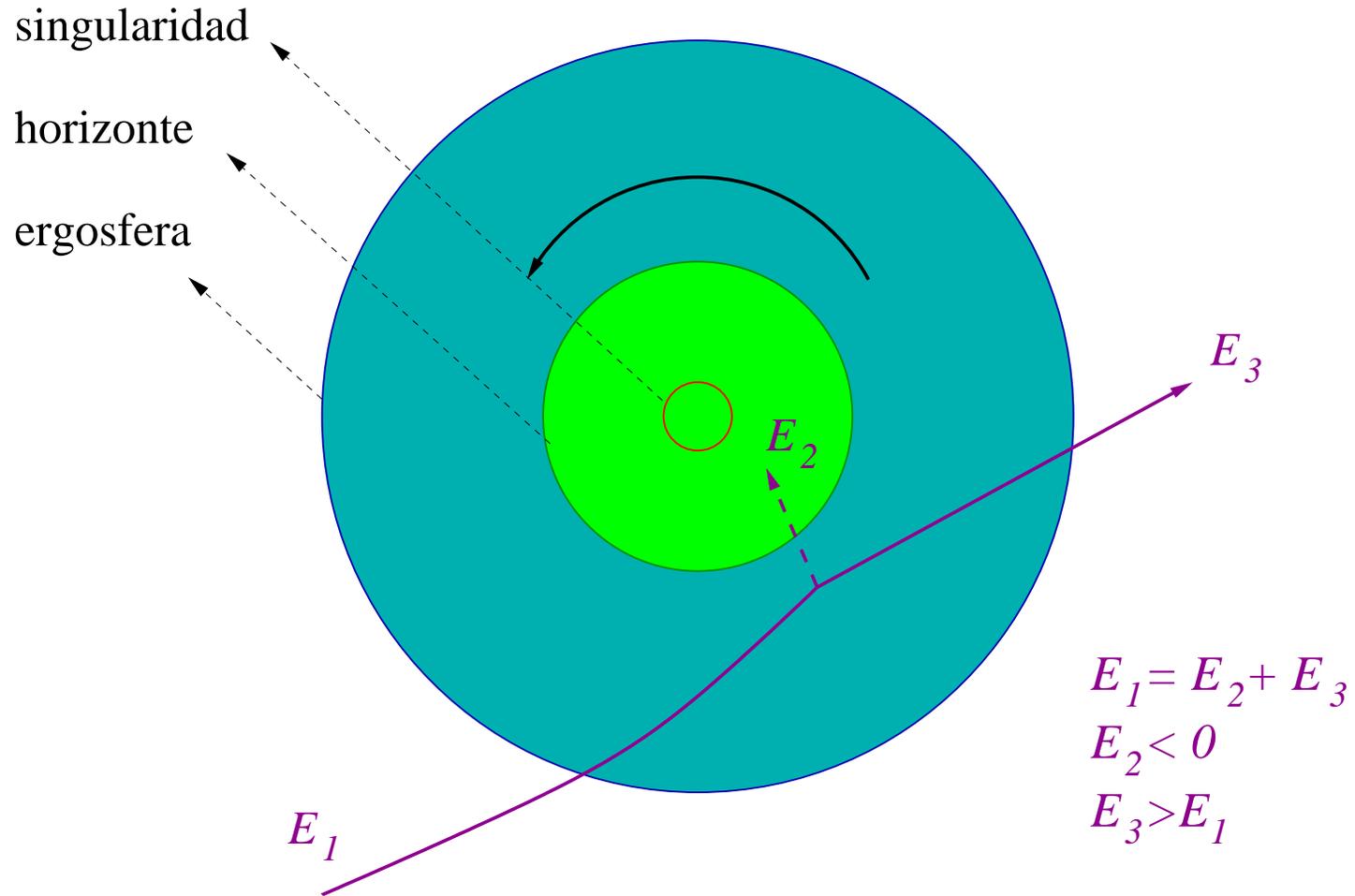
Reissner-Nordström

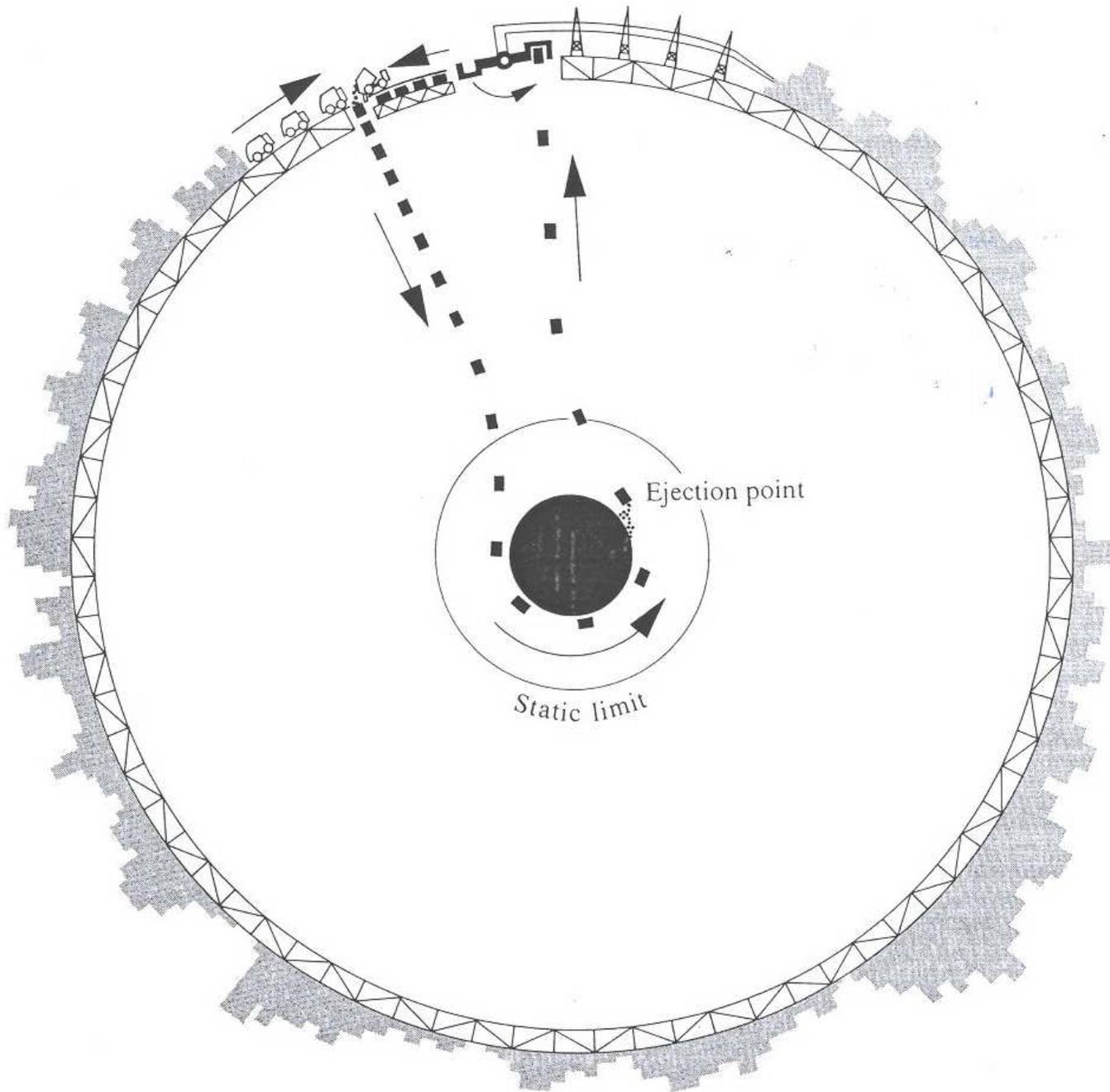


Agujero negro con rotación



Proceso de Penrose





Agujero de gusano

