Stephen Hawking

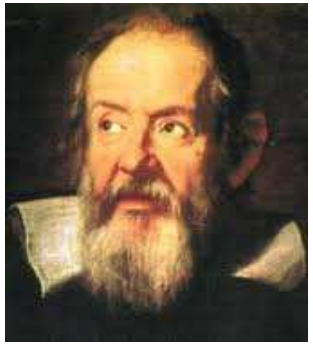
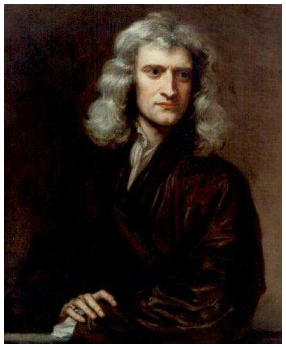
Una breve historia de su trabajo

Bert Janssen

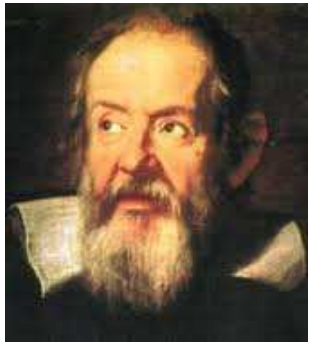
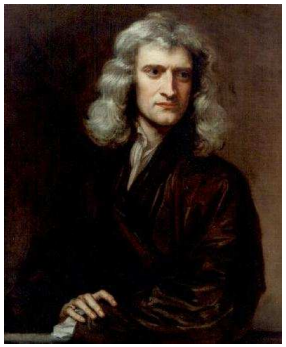
Dpto. de Física Teórica y del Cosmos &
Centro Andaluz de Física de Partículas Elementales

Stephen Hawking

(8 enero 1942 - 14 marzo 2018)

Pero... ¿qué hizo en realidad?

Pero... ¿qué hizo en realidad?

Teoremas de singularidad de agujeros negros (Penrose & Hawking)

Teoremas de singularidad del Big Bang (Penrose & Hawking)

Leyes de la mecánica de agujeros negros (Bardeen, Carter, Hawking)

Teoremas de unicidad de agujeros negros (Carter, Israel, Hawking, Robinson)

Teorema del área de agujeros negros

Radiación de Hawking

Entropía de Bekenstein-Hawking

Paradoja de la Información

Estado de Hartle-Hawking

Término de frontera de Gibbons-Hawking-York

Transición de fase de Hawking-Page

...

Contenido de la charla

1. Teoremas de Singularidades (1965)

   $\longrightarrow$ ¿Hasta dónde es válida la Relatividad General?

2. Teoremas de Unicidad de Agujeros Negros (1965 - 1975)

   $\longrightarrow$ ¿Cuántos agujeros negros hay?

3. Mecánica de Agujeros Negros (1973)

   $\longrightarrow$ Agujeros negros y termodinámica

4. Radiación de Hawking (1974)

   $\longrightarrow$ ¿Son negros los agujeros negros?

5. Paradoja de la Infomación ($\sim$ 1980)

   $\longrightarrow$ ¿Qué pasa al final de la vida de un agujero negro?

Contenido de la charla

0. Breve introducción a Relatividad General y agujeros negros

1. Teoremas de Singularidades

   $\longrightarrow$ ¿Hasta dónde es válida la Relatividad General?

2. Teoremas de Unicidad de Agujeros Negros

   $\longrightarrow$ ¿Cuántos agujeros negros hay?

3. Mecánica de Agujeros Negros

   $\longrightarrow$ Agujeros negros y termodinámica

4. Radiación de Hawking & Entropía de Bekenstein-Hawking

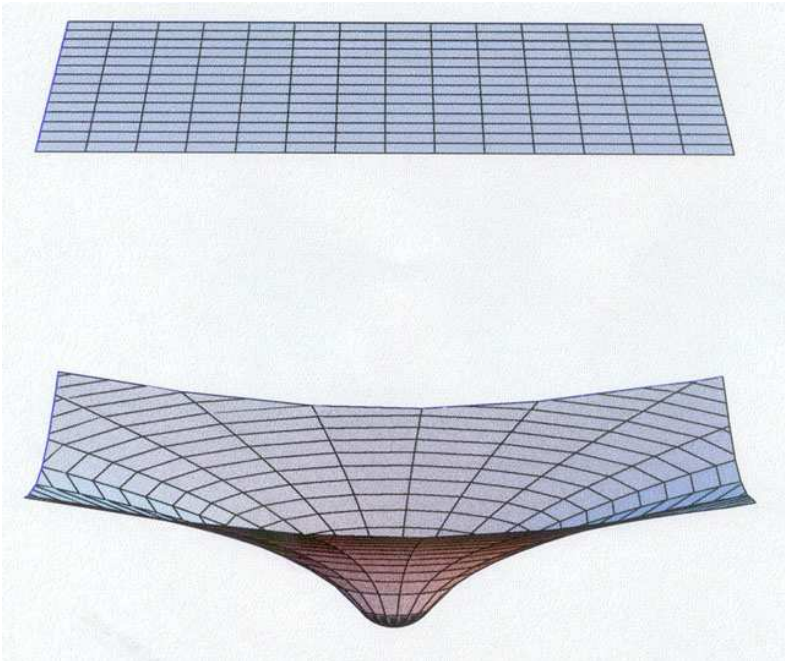
   $\longrightarrow$ ¿Son negros los agujeros negros?

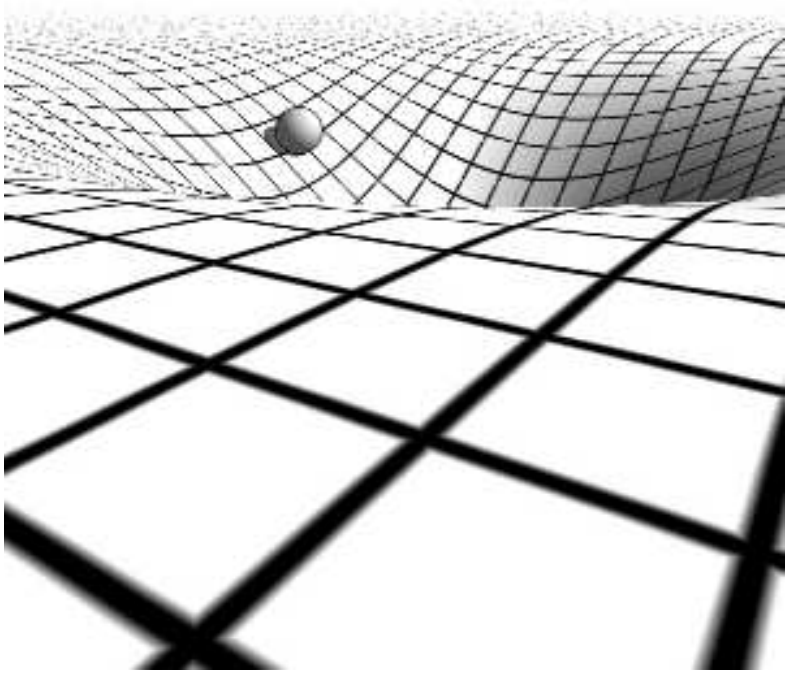
5. Paradoja de la Infomación

   $\longrightarrow$ ¿Qué pasa al final de la vida de un agujero negro?

0. Breve introducción a Relatividad General

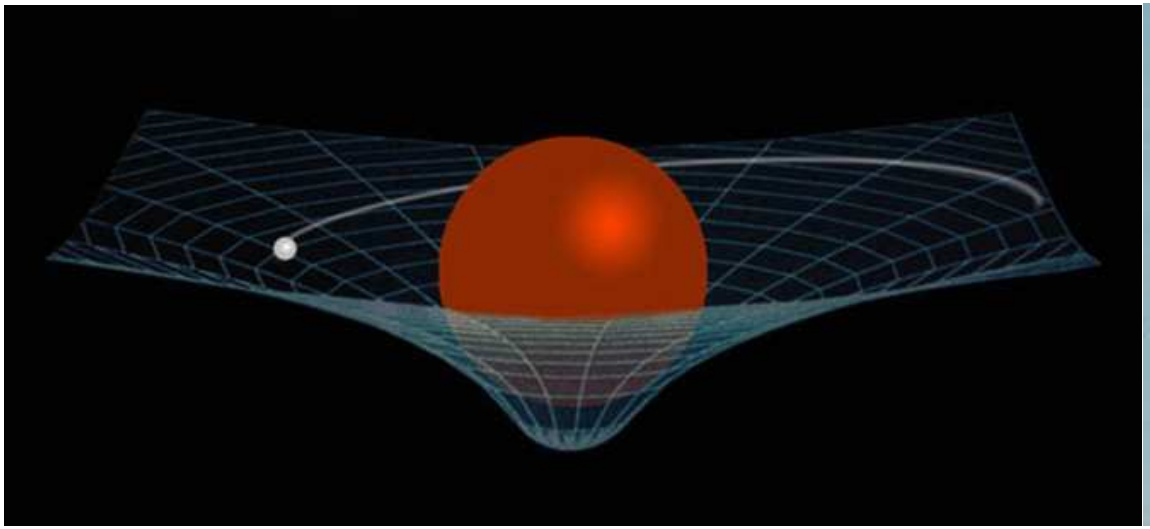
Gravedad = espaciotiempo curvo

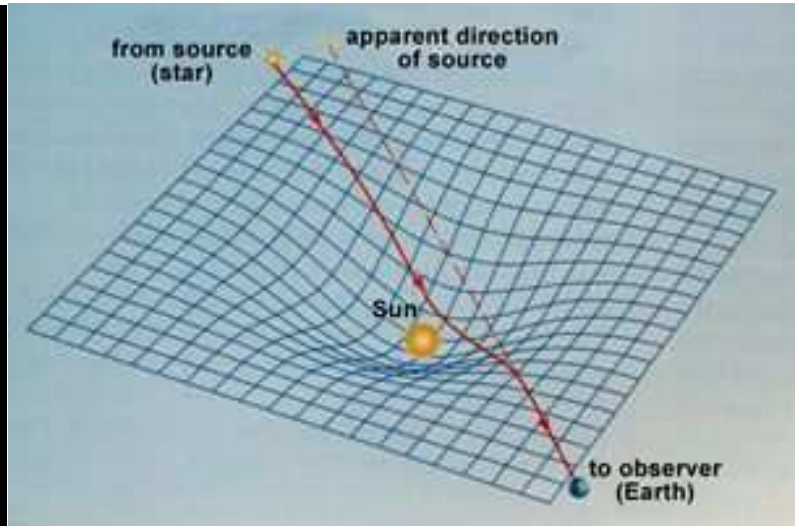




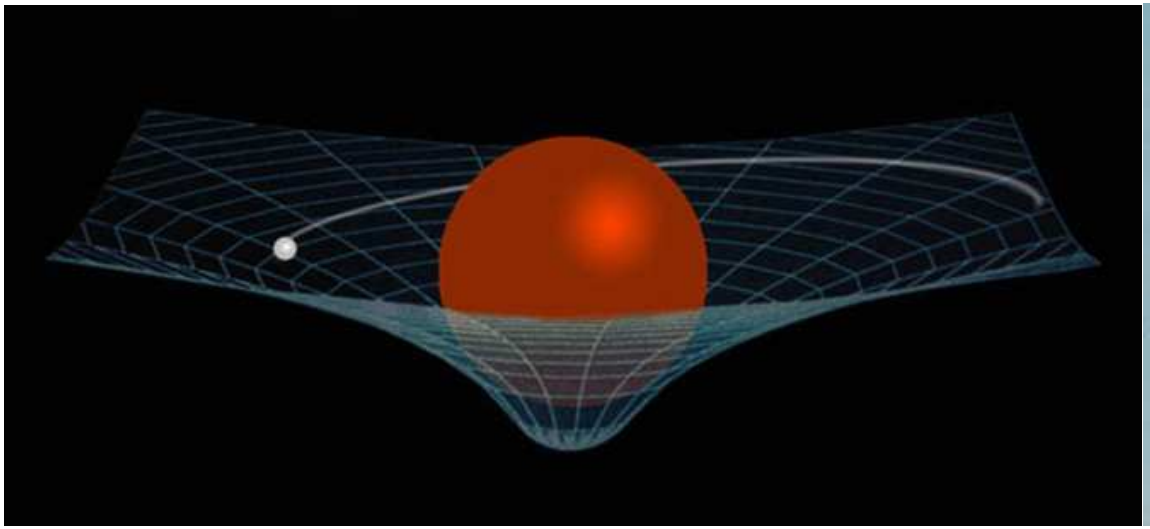
"Matter tells space how to curve.
Space tells matter how to move."
(John A. Wheeler)

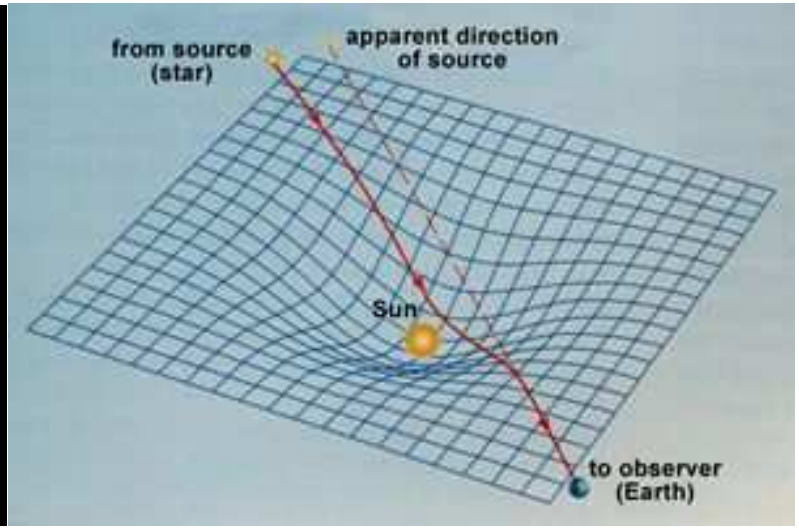
Materia y luz siguen trayectorias más rectos posibles



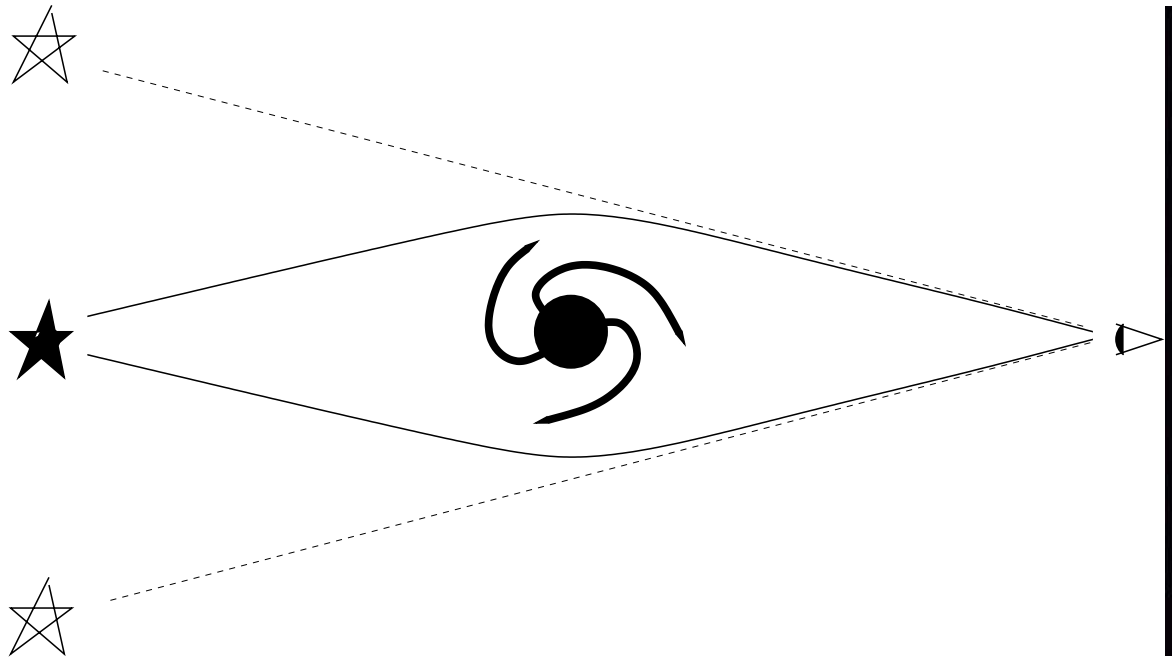


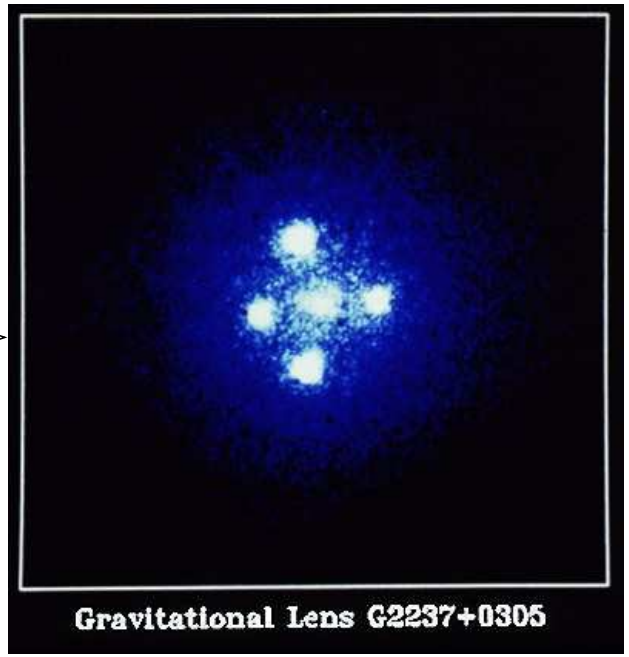
Materia y luz siguen trayectorias más rectos posibles





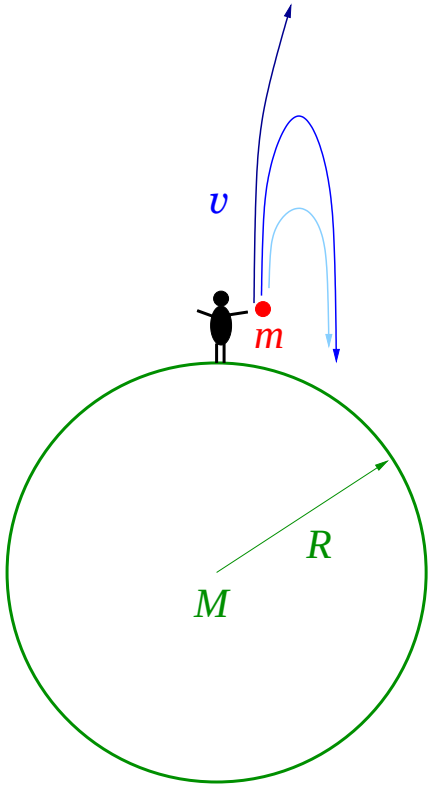
Lentes gravitatorias:





Agujero negro = Campo gravitatorio extremadamente fuerte

Agujero negro = Campo gravitatorio extremadamente fuerte



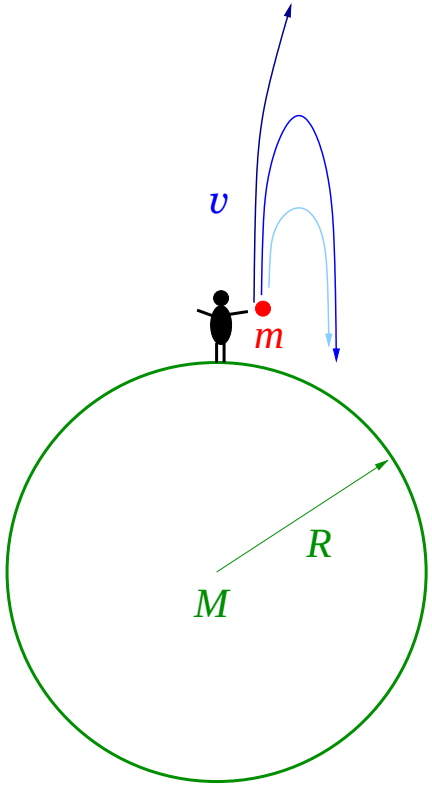
Velocidad de escape = velocidad necesaria para una masa m no vuelva a caer

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

Objeto masivo atrapa la luz:

$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \qquad \Longleftrightarrow \qquad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$

Agujero negro = Campo gravitatorio extremadamente fuerte

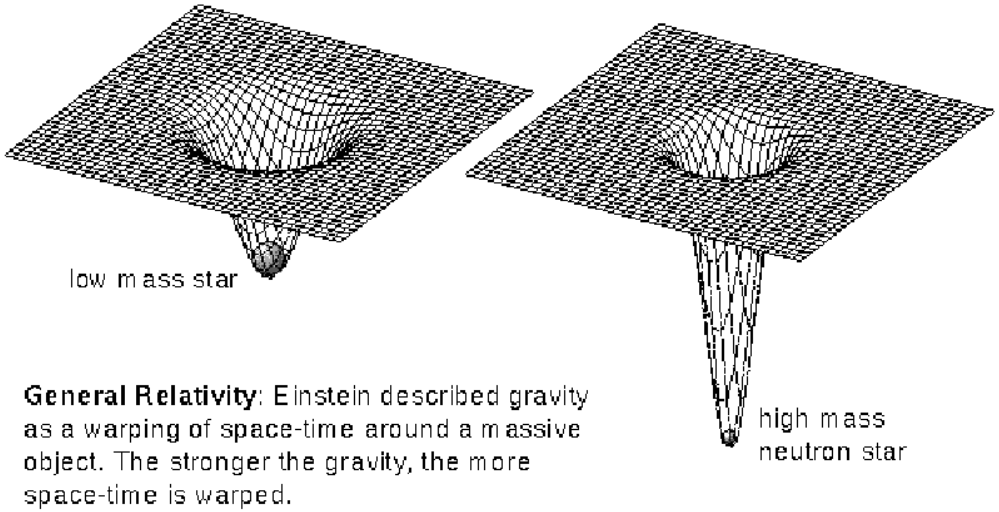


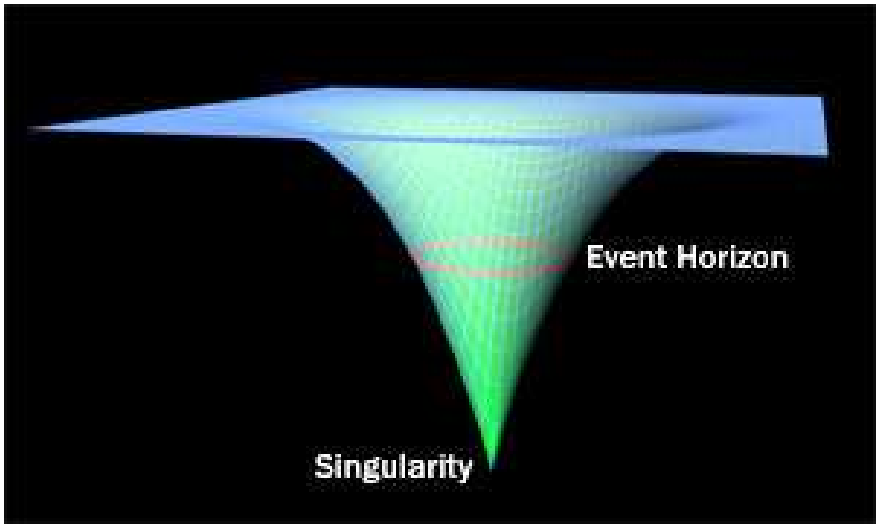
Velocidad de escape = velocidad necesaria para una masa m no vuelva a caer

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

Objeto masivo atrapa la luz:

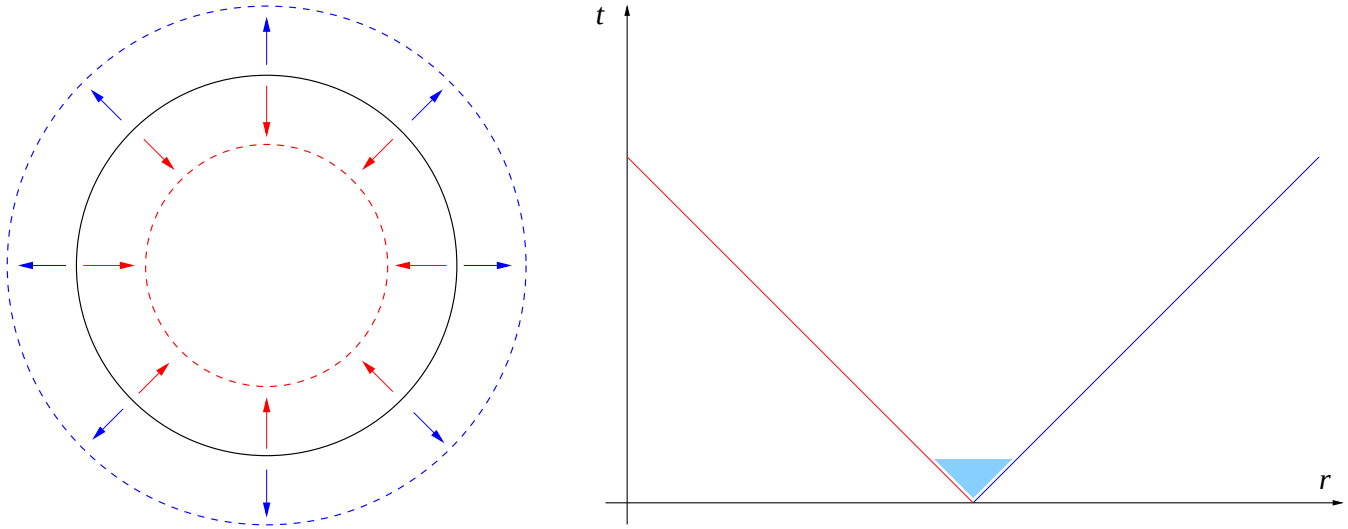
$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \qquad \Longleftrightarrow \qquad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$





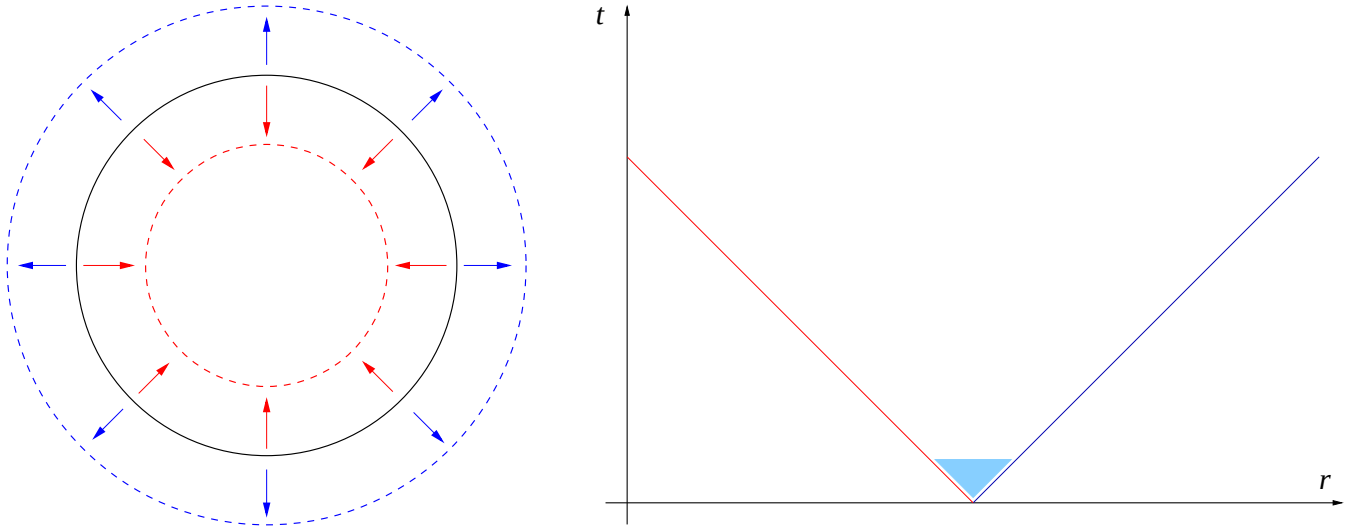
1. Teoremas de singularidad

Rayos entrantes y salientes de una esfera inmaterial

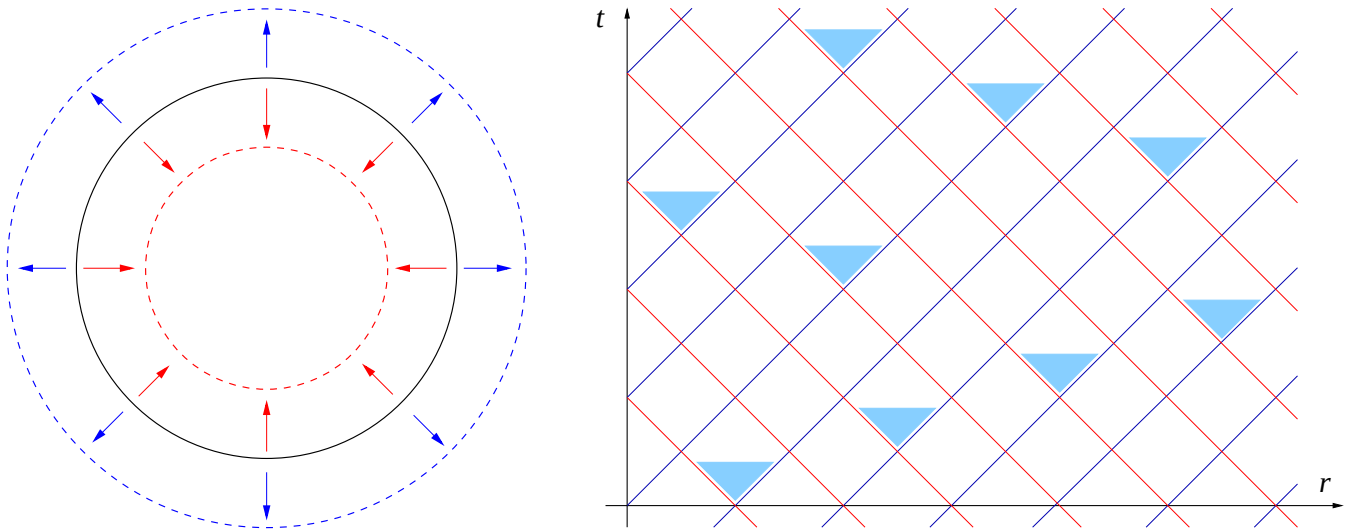


1. Teoremas de singularidad

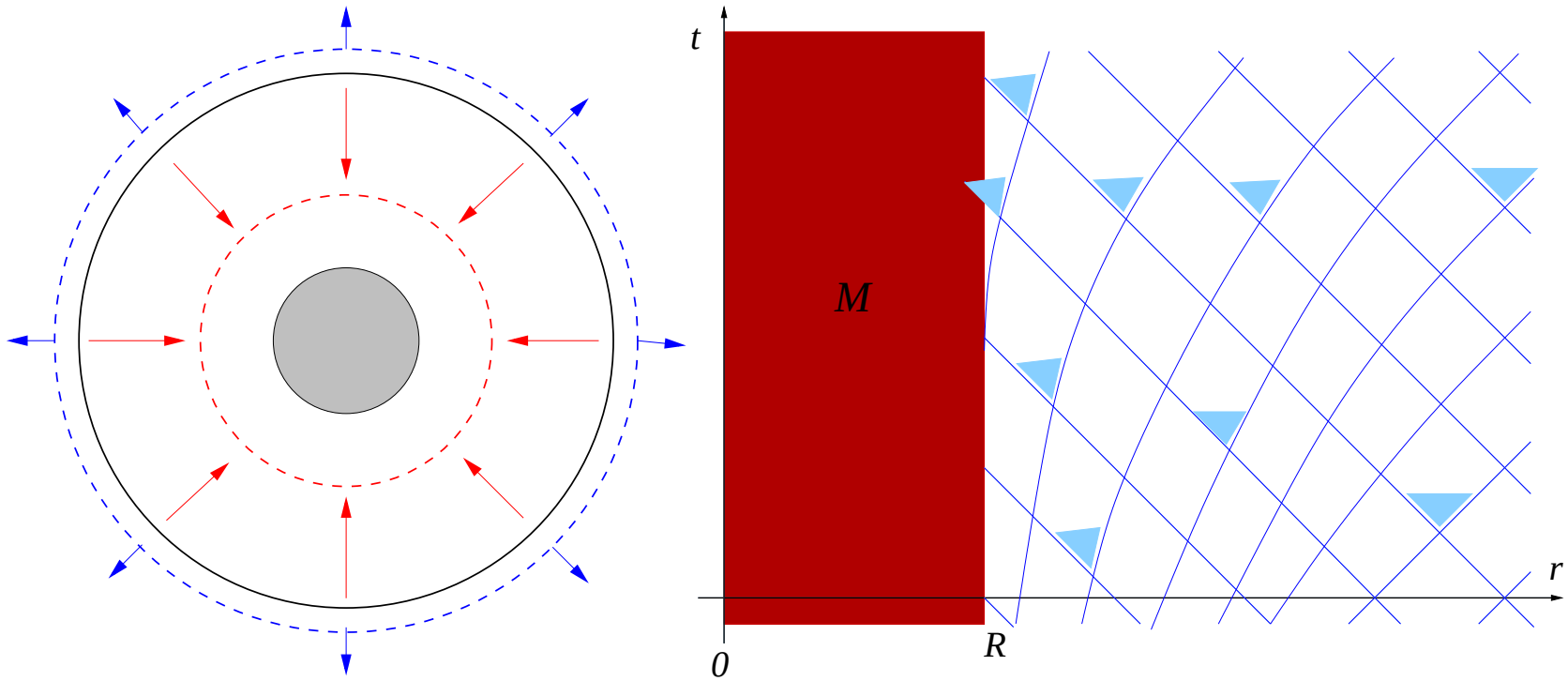
Rayos entrantes y salientes de una esfera inmaterial



Esfera inmaterial en cada punto



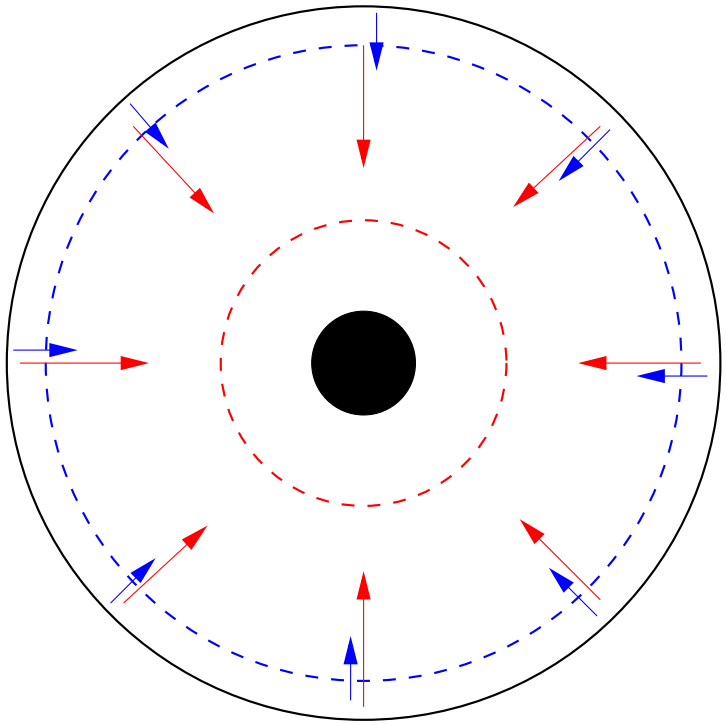
Rayos influenciados por objeto masivo

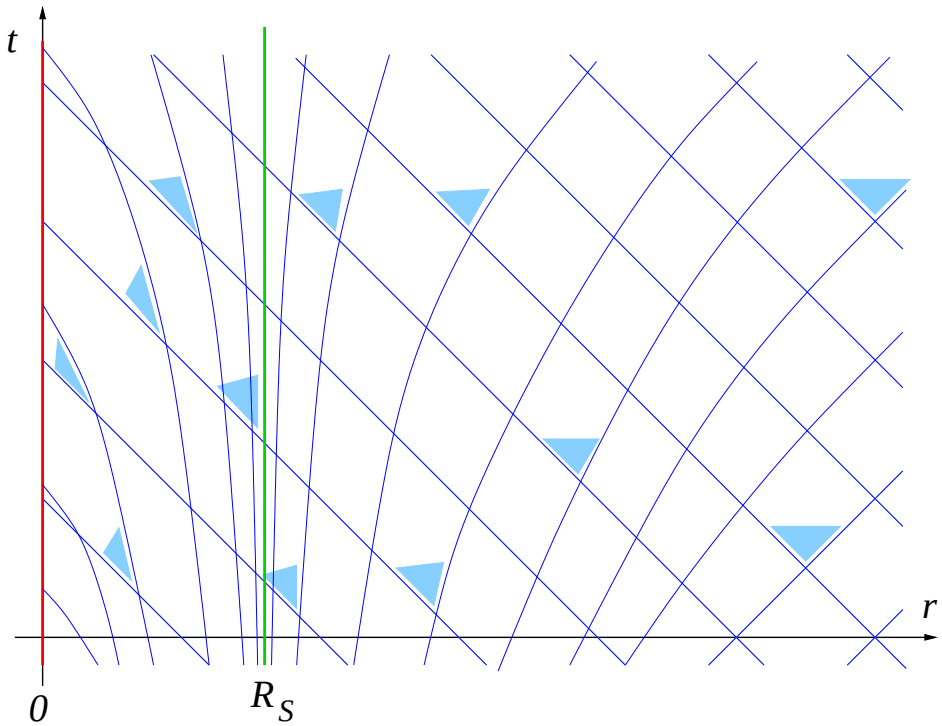


$\longrightarrow$ A los rayos salientes les cuesta salir

$\longrightarrow$ Efecto Doppler gravitatorio, dilatación temporal, ...

Objetos muy masivo crea superficies atrapadas: radio crítico

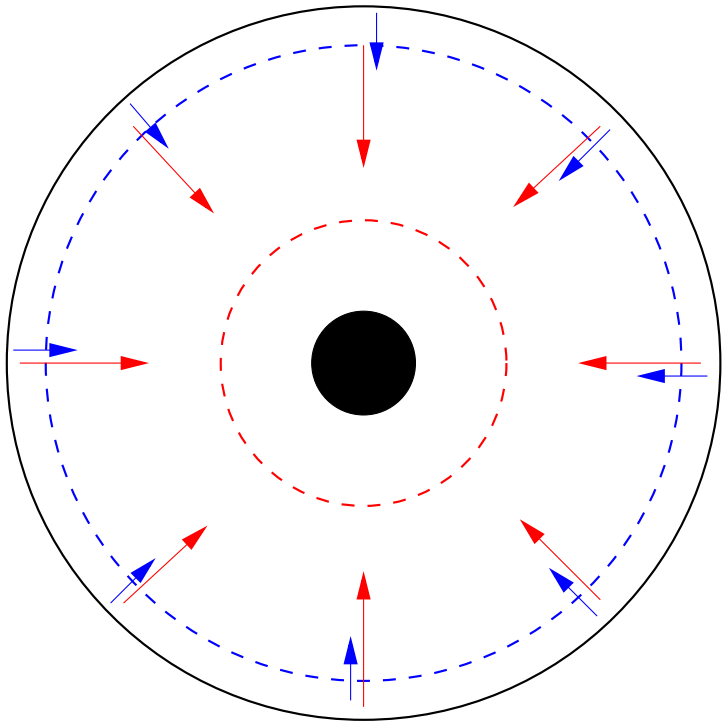


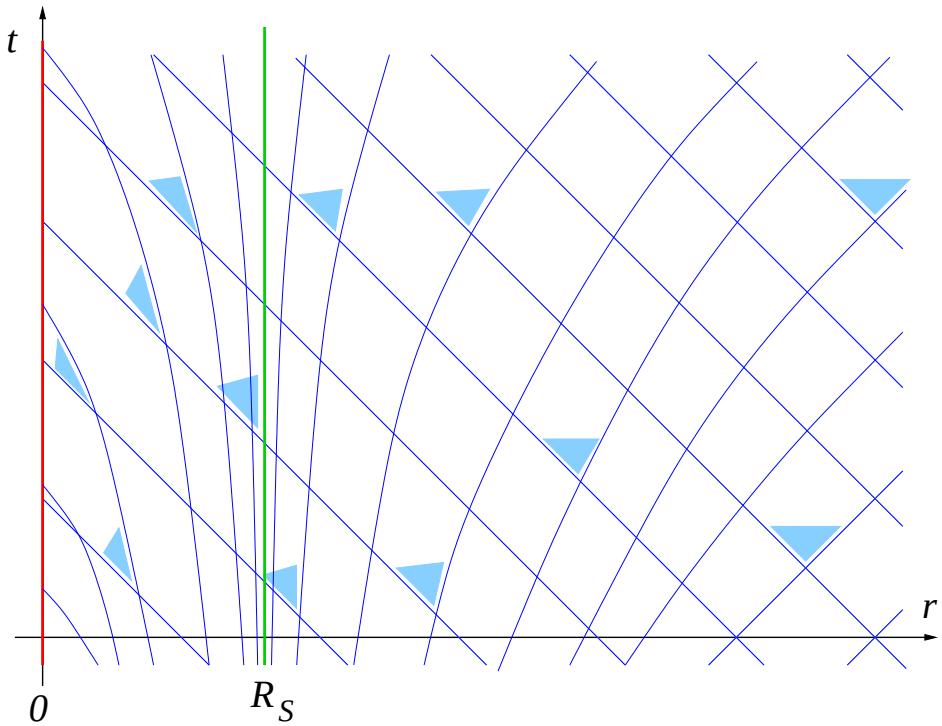


La luz se queda atrapada dentro del radio de Schwarzschild

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

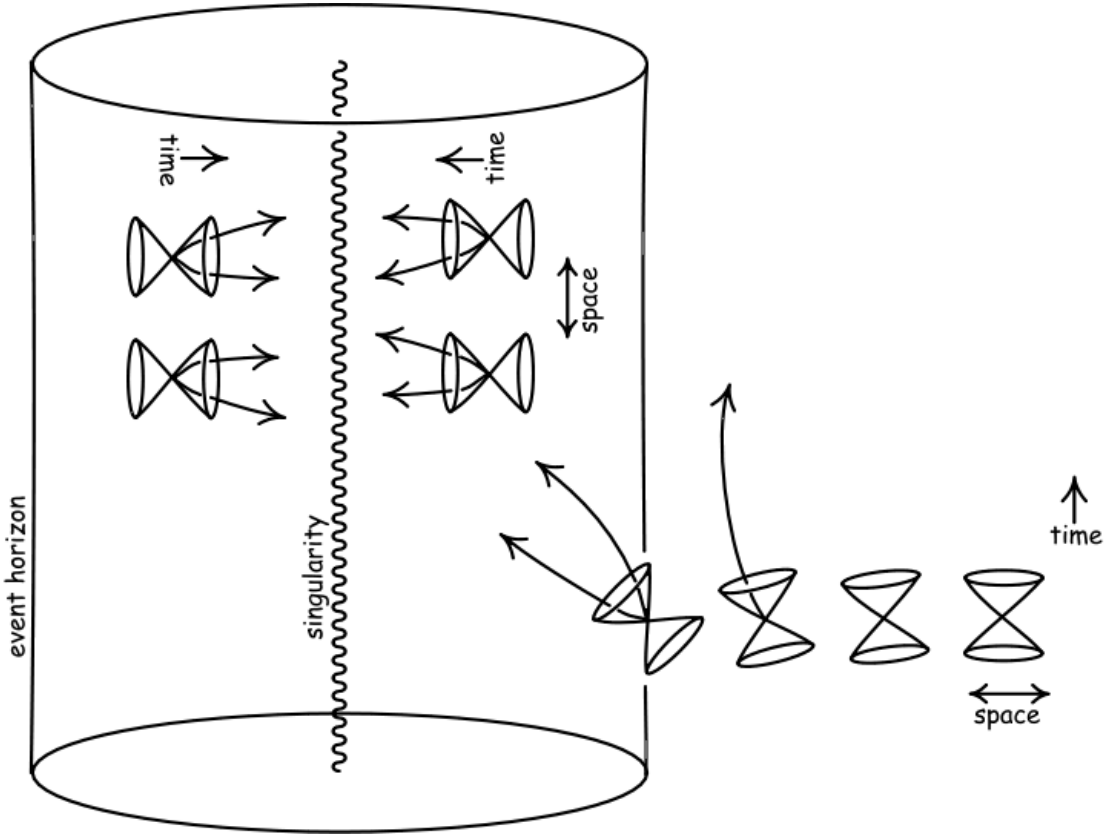
Se forma un horizonte: no salen señales desde el interior

Nada puede viajar más rápido que la luz

$\longrightarrow$ No puede salir nada desde dentro del horizonte

$\longrightarrow$ AGUJERO NEGRO!!

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

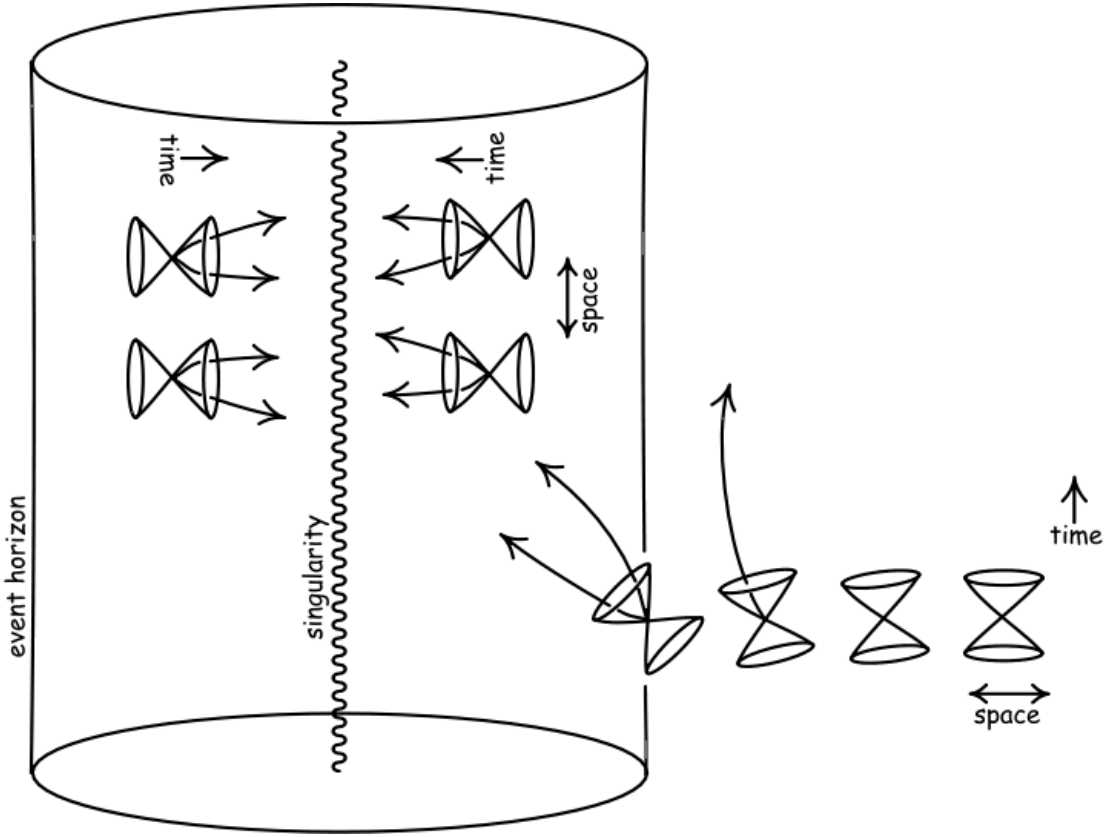


$\longrightarrow$ Cono de luz dirigido hacia dentro

$\longrightarrow$ Trayectorias de partículas dirigidas hacia dentro

$\longrightarrow$ Imposible quedarse en reposo dentro del horizonte

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



$\longrightarrow$ Cono de luz dirigido hacia dentro

$\longrightarrow$ Trayectorias de partículas dirigidas hacia dentro

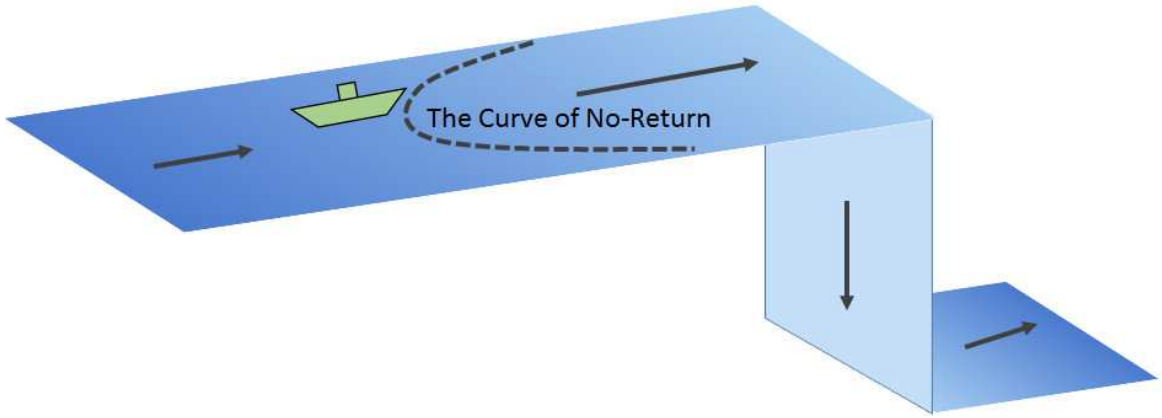
$\longrightarrow$ Imposible quedarse en reposo dentro del horizonte

$\longrightarrow$ Se forma una singularidad (= punto de curvatura infinita)

$\longrightarrow$ todo acabará inevitablemente en la singularidad

Horizonte = punto de no retorno
= frontera del agujero negro
= punto pefectamente regular

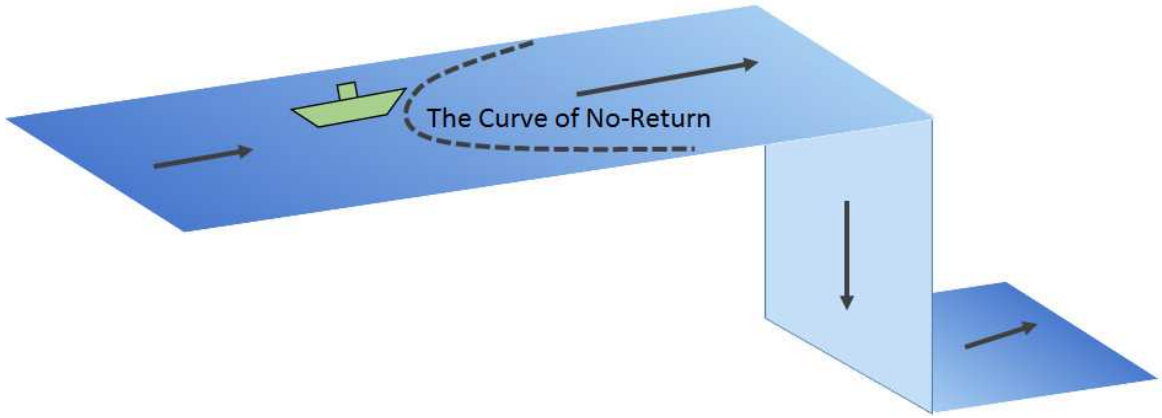
Singularidad = punto de curvatura infinita
= final del espaciotiempo
= final de la física conocida



$\longrightarrow$ Agujero negro estacionario está vacío por dentro!!

Horizonte = punto de no retorno
= frontera del agujero negro
= punto pefectamente regular

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



$\longrightarrow$ Agujero negro estacionario está vacío por dentro!!

¿Siempre se forma una singularidad?
¿O sólo es artefacto de solución encontrada?

Teorema de Singularidad de Penrose-Hawking (1965):

Un espaciotiempo con densidad de energía no-negativa, que contiene una superficie atrapada, siempre tiene una singularidad dentro de esa superficie.

Teorema de Singularidad de Penrose-Hawking (1965):

> Un espaciotiempo con densidad de energía no-negativa, que contiene una superficie atrapada, siempre tiene una singularidad dentro de esa superficie.

- Teorema matemático sobre resultado físico (cfr Teorema de Noether)
- Singularidades son inevitables en Relatividad General

Teorema de Singularidad de Penrose-Hawking (1965):

> Un espaciotiempo con densidad de energía no-negativa, que contiene una superficie atrapada, siempre tiene una singularidad dentro de esa superficie.

- Teorema matemático sobre resultado físico (cfr Teorema de Noether)
- Singularidades son inevitables en Relatividad General

  $\longrightarrow$ Singularidades son indicaciones de final de física conocida

  $\longrightarrow$ Relatividad General predice sus propios límites de validez

Teorema de Singularidad de Penrose-Hawking (1965):

> Un espaciotiempo con densidad de energía no-negativa, que contiene una superficie atrapada, siempre tiene una singularidad dentro de esa superficie.

- Teorema matemático sobre resultado físico (cfr Teorema de Noether)
- Singularidades son inevitables en Relatividad General

  $\longrightarrow$ Singularidades son indicaciones de final de física conocida

  $\longrightarrow$ Relatividad General predice sus propios límites de validez

  $\longrightarrow$ Sustituto para Relatividad General cerca de singularidades

  $\longrightarrow$ Gravedad cuántica?

2. Teoremas de unicidad

Agujero negro de Schwarzschild (1916):

$\longrightarrow$ esféricamente simétrico y estático en el vacío

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

2. Teoremas de unicidad

Agujero negro de Schwarzschild (1916):

$\longrightarrow$ esféricamente simétrico y estático en el vacío

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

Zoo de soluciones de agujeros negros:

Nombre	masa	carga	J	simetría	depend temp.
Schwarzschild (1916)	M			esférica	estático
Reissner-Nordström (1918)	M	Q		esférica	estático
Kerr (1963)	M		a	axial	estacionario
Kerr-Newman (1965)	M	Q	a	axial	estacionario
...					

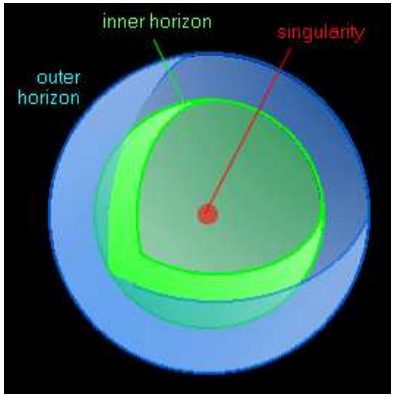
- Teorema de Birkhoff (1923):
  Cualquier solución esféricamente simétrica del vacío es estática
  $\longrightarrow$ Schwarzschild es única solución de vacío con simetría esférica

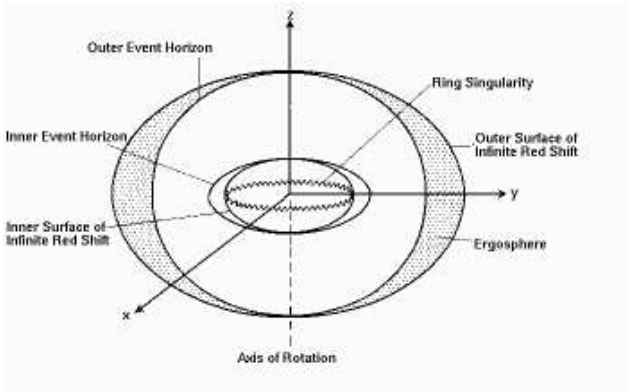
- Teorema de Birkhoff (1923):
  Cualquier solución esféricamente simétrica del vacío es estática
  $\longrightarrow$ Schwarzschild es única solución de vacío con simetría esférica

- Teoremas de unicidad (Hawking, Carter, Israel; 1965-1975)
  Cualquier solución de Einstein-Maxwell asintóticamente plana con horizontes regulares:

- Teorema de Birkhoff (1923):
  Cualquier solución esféricamente simétrica del vacío es estática
  $\longrightarrow$ Schwarzschild es única solución de vacío con simetría esférica

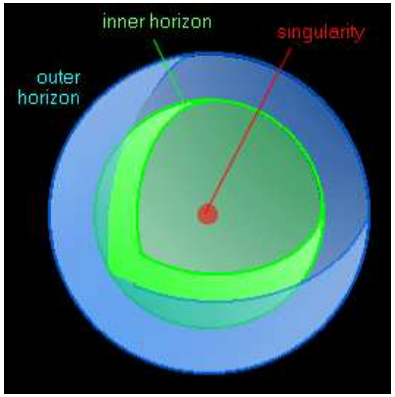
- Teoremas de unicidad (Hawking, Carter, Israel; 1965-1975)
  Cualquier solución de Einstein-Maxwell asintóticamente plana con horizontes regulares:
  - solución estática $\Longrightarrow$ simetría esférica
    solución estacionaria $\Longrightarrow$ simetría axial

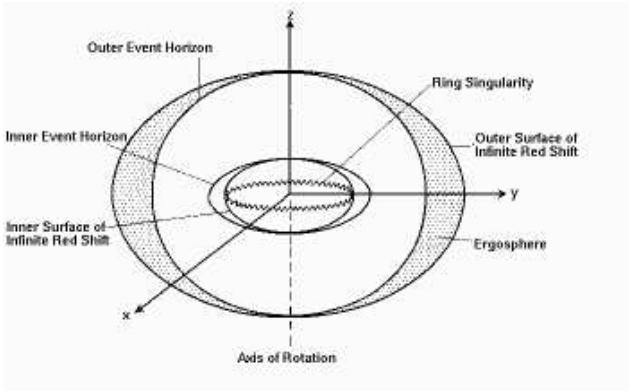




- Teorema de Birkhoff (1923):
  Cualquier solución esféricamente simétrica del vacío es estática
  $\longrightarrow$ Schwarzschild es única solución de vacío con simetría esférica

- Teoremas de unicidad (Hawking, Carter, Israel; 1965-1975)
  Cualquier solución de Einstein-Maxwell asintóticamente plana con horizontes regulares:
  - solución estática $\Longrightarrow$ simetría esférica
    solución estacionaria $\Longrightarrow$ simetría axial





  - simetría esférica $\Longrightarrow$ Reissner-Nordström (M, Q)
    simetría axial $\Longrightarrow$ Kerr-Newmann (M, Q, a)

Agujeros negros no tienen pelo: Completamente determinados por (M, Q, a)

3. Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

Es posible extraer energía de un agujero negro en rotación [Penrose, 1969]

$\longrightarrow$ es posible reducir la masa de un agujero negro

3. Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

Es posible extraer energía de un agujero negro en rotación [Penrose, 1969]
$\longrightarrow$ es posible reducir la masa de un agujero negro

El área A del horizonte de un agujero negro nunca disminuye en un proceso físico, ni si quiera en un proceso de Penrose [Hawking, 1971]

$$A \;=\; 4\pi \left[2M^2 \,+\, 2M\sqrt{M^2 - a^2} \right]$$

3. Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

Es posible extraer energía de un agujero negro en rotación [Penrose, 1969]
$\longrightarrow$ es posible reducir la masa de un agujero negro

El área A del horizonte de un agujero negro nunca disminuye en un proceso físico, ni si quiera en un proceso de Penrose [Hawking, 1971]

$$A \;=\; 4\pi\left[2M^2 \,+\, 2M\sqrt{M^2 - a^2}\,\right]$$

La masa irreducible M_* de un agujero negro nunca disminuye en un proceso físico, ni si quiera en un proceso de Penrose [Christodoulou & Ruffini, 1971]

$$M^2 \;=\; M_*^2 \,+\, \frac{J^2}{4M_*^2} \qquad \text{con} \quad A = 16\pi M_*^2$$

3. Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

Es posible extraer energía de un agujero negro en rotación [Penrose, 1969]
$\longrightarrow$ es posible reducir la masa de un agujero negro

El área A del horizonte de un agujero negro nunca disminuye en un proceso físico, ni si quiera en un proceso de Penrose [Hawking, 1971]

$$A \;=\; 4\pi\left[2M^2 \;+\; 2M\sqrt{M^2 - a^2}\,\right]$$

La masa irreducible M_* de un agujero negro nunca disminuye en un proceso físico, ni si quiera en un proceso de Penrose [Christodoulou & Ruffini, 1971]

$$M^2 \;=\; M_*^2 \;+\; \frac{J^2}{4M_*^2} \qquad \text{con} \quad A = 16\pi M_*^2$$

$\longrightarrow$ huele a entropía...

Leyes de la mecánica de agujeros negros:

(Bardeen, Carter, Hawking, 1973)

Leyes de la mecánica de agujeros negros:

(Bardeen, Carter, Hawking, 1973)

- **Ley Cero:** En agujeros negros estacionarios, la gravedad de superficie κ_H es constante en todo el horizonte.

  NB: Gravedad de superficie κ_H = fuerza ejercida por observador asintótico para mantener partícula estacionaria en el horizonte

Leyes de la mecánica de agujeros negros:

(Bardeen, Carter, Hawking, 1973)

- **Ley Cero:** En agujeros negros estacionarios, la gravedad de superficie κ_H es constante en todo el horizonte.

  NB: Gravedad de superficie κ_H = fuerza ejercida por observador asintótico para mantener partícula estacionaria en el horizonte

- **Primera Ley**: En procesos casi-estacionarios, M, A y J y Q varían como

$$dM = \frac{\kappa_H}{8\pi G_N} dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ$$

Leyes de la mecánica de agujeros negros:

(Bardeen, Carter, Hawking, 1973)

- **Ley Cero:** En agujeros negros estacionarios, la gravedad de superficie κ_H es constante en todo el horizonte.

  NB: Gravedad de superficie κ_H = fuerza ejercida por observador asintótico para mantener partícula estacionaria en el horizonte

- **Primera Ley**: En procesos casi-estacionarios, M, A y J y Q varían como

$$dM = \frac{\kappa_H}{8\pi G_N} dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ$$

- **Segunda Ley**: El área del horizonte de un agujero negro nunca disminuye en un proceso físico

Leyes de la mecánica de agujeros negros:

(Bardeen, Carter, Hawking, 1973)

- **Ley Cero:** En agujeros negros estacionarios, la gravedad de superficie κ_H es constante en todo el horizonte.

  NB: Gravedad de superficie κ_H = fuerza ejercida por observador asintótico para mantener partícula estacionaria en el horizonte

- **Primera Ley**: En procesos casi-estacionarios, M, A y J y Q varían como

$$dM = \frac{\kappa_H}{8\pi G_N} dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ$$

- **Segunda Ley**: El área del horizonte de un agujero negro nunca disminuye en un proceso físico

- **Tercera Ley**: No es posible reducir la gravedad de superficie κ_H a cero a través de procesos físicos en un tiempo finito

Leyes de la termodinámica (S. XIX): [Clausius, Kelvin, Gibbs, Nernst, S. XIX]

- **Ley Cero:** En un sistema en equilibrio termodinámico, la temperatura T es constante en todo el sistema.
- **Primera Ley**: En procesos casi-estacionarios, E, S, V y N varian como

$$dE = k_B T\, dS - P\, dV + \mu\, dN,$$

- **Segunda Ley**: La entropía de un sistema cerrado nunca disminuye en un proceso físico
- **Tercera Ley**: No es posible reducir la temperatuta T a cero absoluto a través de procesos físicos en un tiempo finito.

Leyes de la termodinámica (S. XIX): [Clausius, Kelvin, Gibbs, Nernst, S. XIX]

- **Ley Cero:** En un sistema en equilibrio termodinámico, la temperatura T es constante en todo el sistema.
- **Primera Ley**: En procesos casi-estacionarios, E, S, V y N varian como

$$dE \;=\; k_B T\, dS \;-\; P\, dV \;+\; \mu\, dN,$$

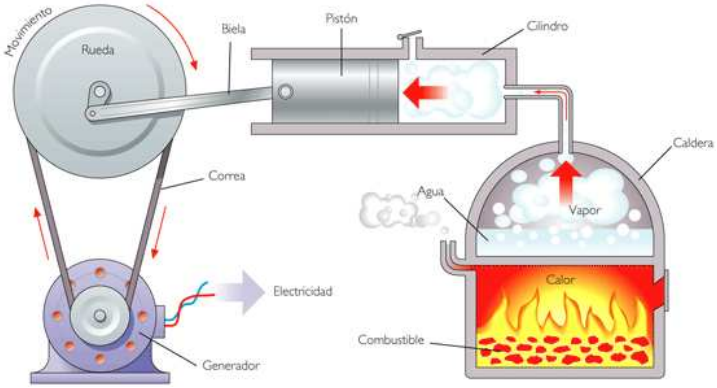
- **Segunda Ley**: La entropía de un sistema cerrado nunca disminuye en un proceso físico
- **Tercera Ley**: No es posible reducir la temperatuta T a cero absoluto a través de procesos físicos en un tiempo finito.

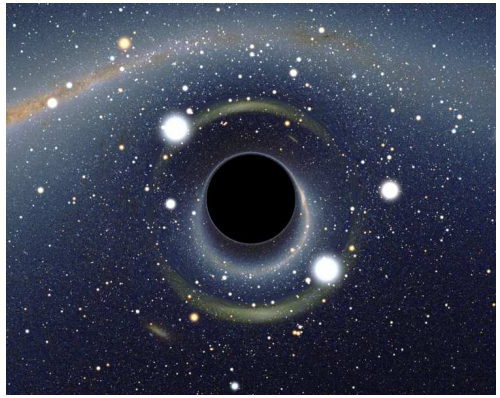
Sugiere:

$M \sim E$	masa y energía relativista
$\Omega_H dJ \sim -PdV$	trabajo ejercido por sistema
$A \sim S$	$\leftrightarrow$ teorema de no-pelo: $S = 0$
$\kappa_H \sim T$	$\leftrightarrow$ agujero negro no emite nada: $T = 0$

$\longrightarrow$ ¿Cuál es la relación con agujeros negros?

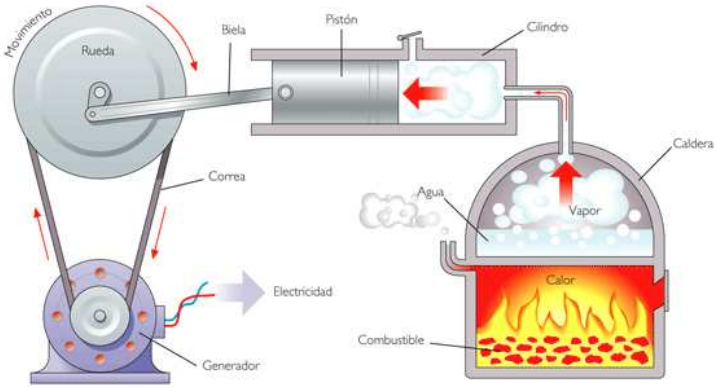
Bardeen, Carter, Hawking: Sólo analogía, no hay relación física...

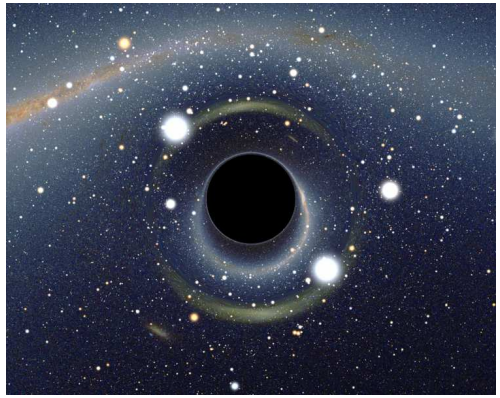




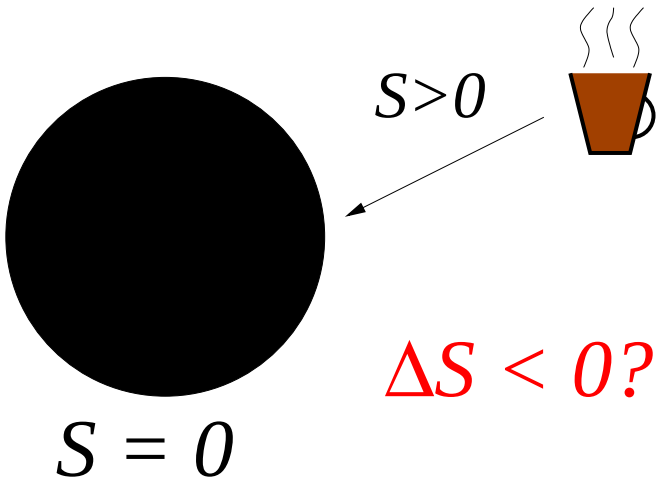
$\longrightarrow$ ¿Cuál es la relación con agujeros negros?

Bardeen, Carter, Hawking: Sólo analogía, no hay relación física...





Bekenstein (1973): Relacion profunda entre agujeros negros y termodinámica



Agujeros negros tienen entropía no-trivial, para no violar la Segunda Ley de la termodinámica...

$\longrightarrow$ Entropía es real y enorme! $S \sim A/\ell_P^2$

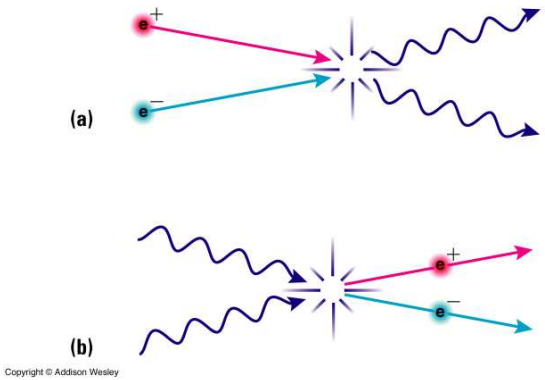
4. Radiación de Hawking

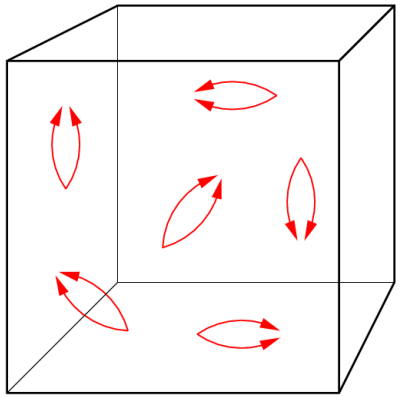
¿Cómo es posible que un A.N. tenga temperatura, si no emite nada?

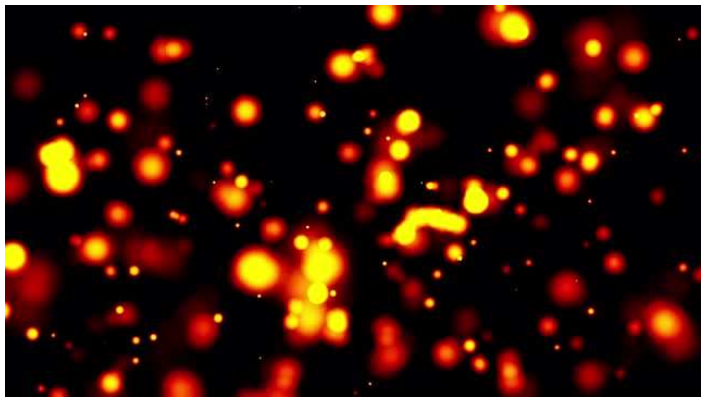
4. Radiación de Hawking

¿Cómo es posible que un A.N. tenga temperatura, si no emite nada?

Teoría cuántica de campos: vacío cuántico no está vacío



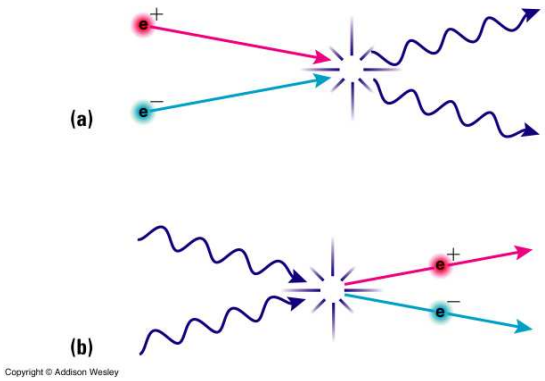


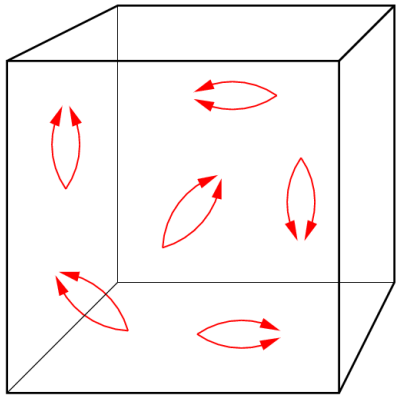


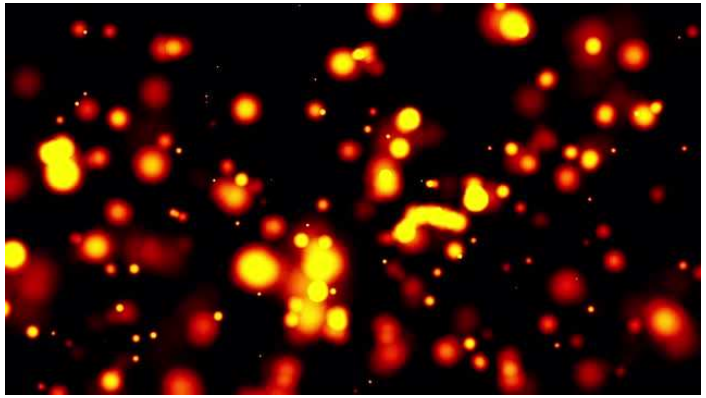
4. Radiación de Hawking

¿Cómo es posible que un A.N. tenga temperatura, si no emite nada?

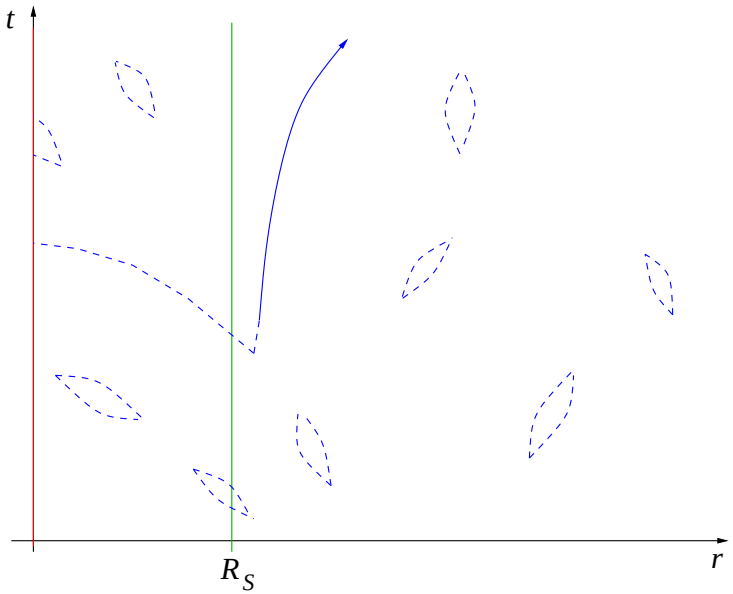
Teoría cuántica de campos: vacío cuántico no está vacío







TCC en espacios curvos: A.N. se comportan como cuerpos negros



Creación de partículas cerca del horizonte

$\Longrightarrow$ radiación térmica con

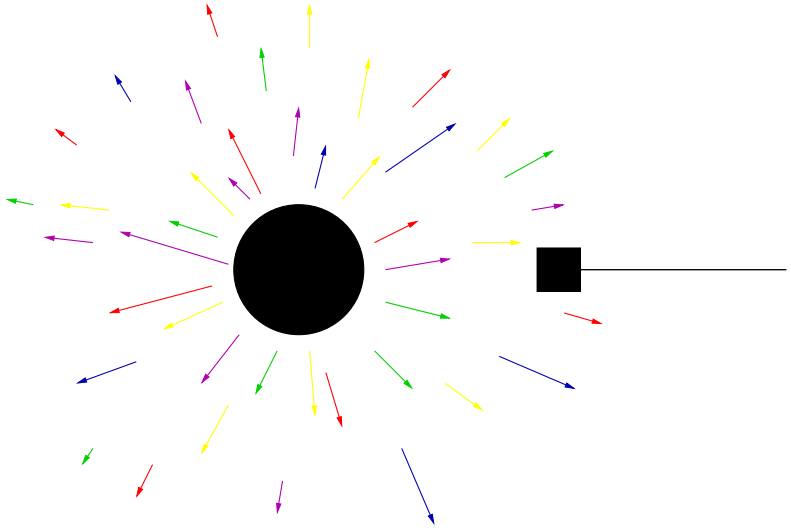
$$T = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi k_B}$$

$\Longrightarrow$ identifica entropía como

$$S_{BH} = \frac{A}{4G_N\hbar}$$

Los agujeros negros emiten una radiación térmica

Los agujeros negros poco a poco se van evaporando

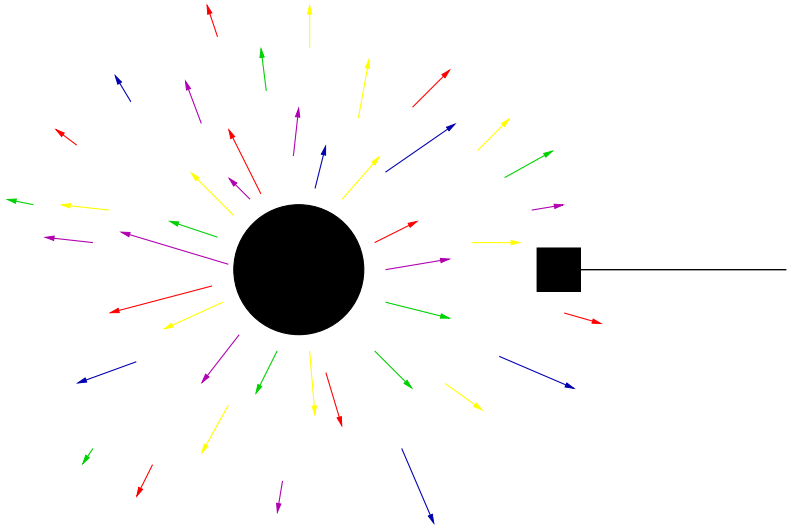


$$T = \frac{\hbar}{8\pi\, k_B\, G_N\, M}$$

$$t_{\rm ev} = \frac{5120\pi\, G_N^2\, M^3}{\hbar}$$

Los agujeros negros emiten una radiación térmica

Los agujeros negros poco a poco se van evaporando



$$T = \frac{\hbar}{8\pi\, k_B\, G_N\, M}$$

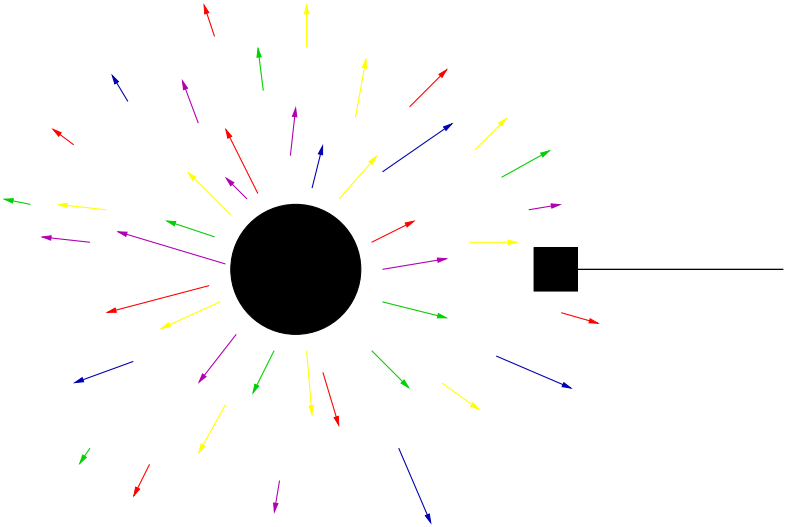
$$t_{\rm ev} = \frac{5120\pi\, G_N^2\, M^3}{\hbar}$$

- Para agujero negro con $M = M_\odot$:

$$T \sim 10^{-8} K, \qquad t_{\rm ev} \sim 10^{67} \text{ años}$$

Recuérdese: $T_\star \sim 2,7K, \qquad t_\star \sim 1,3 \cdot 10^{10}$ años

Los agujeros negros emiten una radiación térmica
Los agujeros negros poco a poco se van evaporando



$$T = \frac{\hbar}{8\pi\, k_B\, G_N\, M}$$

$$t_{\rm ev} = \frac{5120\pi\, G_N^2\, M^3}{\hbar}$$

- Para agujero negro con $M = M_\odot$:

$$T \sim 10^{-8} K, \qquad t_{\rm ev} \sim 10^{67} \text{ años}$$

Recuérdese: $T_\star \sim 2,7K$, $\quad t_\star \sim 1,3 \cdot 10^{10}$ años

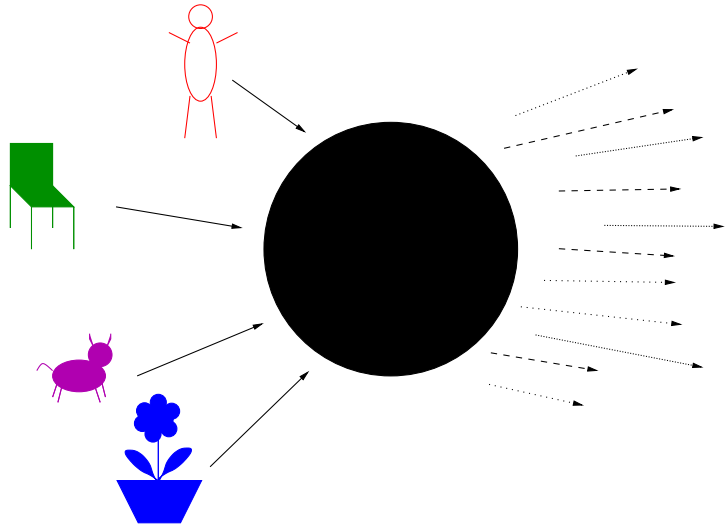
- Para agujero negro con $M \sim 10^{11} kg = 10^{-19} M_\odot$:

$$T \sim 10^{11} K, \qquad t_{\rm ev} \sim 10^{10} \text{ años}$$

$\longrightarrow$ ¿observable en eventos astrofísicos?

5. Paradoja de la Información

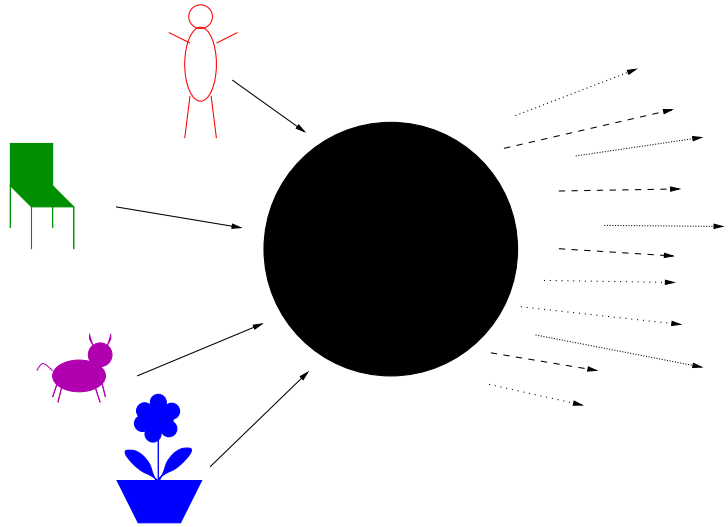
¿Dónde está la información sobre la materia que la entrado?



- Clásicamente: dentro del agujero negro, inaccesible...

5. Paradoja de la Información

¿Dónde está la información sobre la materia que la entrado?



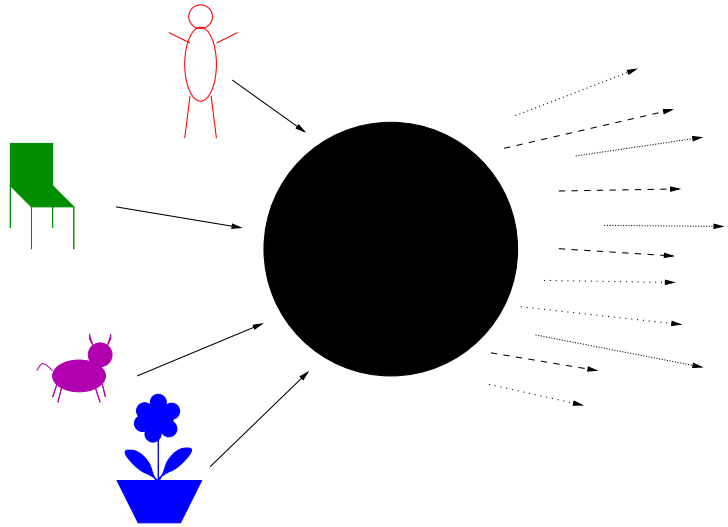
- Clásicamente: dentro del agujero negro, inaccesible...
- Cuánticamente: evaporación de agujeros negros $\longrightarrow$ dispersión

  In-state = (suma de) estados puros; Out-state = estado térmico

  $\longrightarrow$ Viola unitaridad de la Mecánica Cuántica! [Hawking, $\sim$ 1980]

5. Paradoja de la Información

¿Dónde está la información sobre la materia que la entrado?



- Clásicamente: dentro del agujero negro, inaccesible...
- Cuánticamente: evaporación de agujeros negros $\longrightarrow$ dispersión

  In-state = (suma de) estados puros; Out-state = estado térmico

  $\longrightarrow$ Viola unitaridad de la Mecánica Cuántica! [Hawking, $\sim$ 1980]

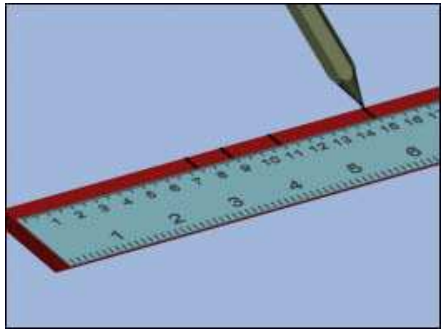
$\longrightarrow$ Conflicto grande entre Relatividad General y Mecánica Cuántica...

¿Por qué la información tiene tanto importancia?

$\longrightarrow$ problema del extraterrestre y la Wikipedia

WIKIPEDIA

$\longrightarrow$



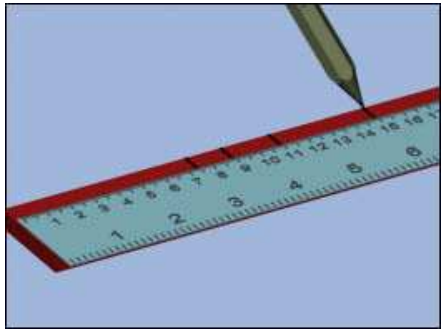
¿Se puede comprimir todo el conocimiento humano indefinidamente?

¿Por qué la información tiene tanto importancia?

$\longrightarrow$ problema del extraterrestre y la Wikipedia

WIKIPEDIA

$\longrightarrow$



¿Se puede comprimir todo el conocimiento humano indefinidamente?

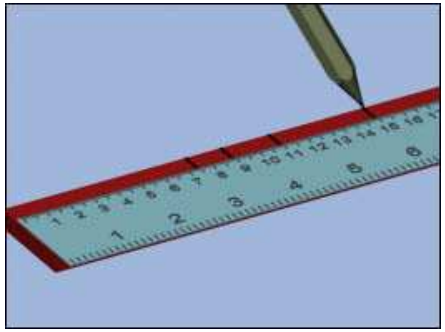
"Sí" $\longrightarrow$ S $\sim$ 20; I $\sim$ 09 $\longrightarrow$ 2009 $\longrightarrow$ 0,2009 m

¿Por qué la información tiene tanto importancia?

$\longrightarrow$ problema del extraterrestre y la Wikipedia

WIKIPEDIA

$\longrightarrow$



¿Se puede comprimir todo el conocimiento humano indefinidamente?

"Sí" $\longrightarrow$ S $\sim$ 20; I $\sim$ 09 $\longrightarrow$ 2009 $\longrightarrow$ 0,2009 m

En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

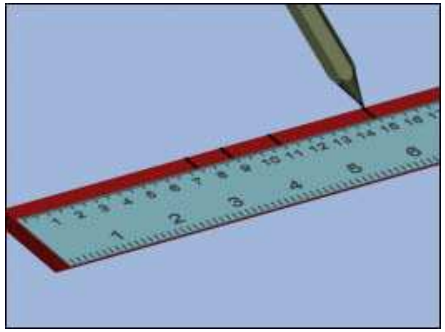
"Wikipedia" (9 letras): $\Delta x \sim 10^{-18}\, m \sim 10^{-3} \cdot R_{p^+}$

¿Por qué la información tiene tanto importancia?

$\longrightarrow$ problema del extraterrestre y la Wikipedia

WIKIPEDIA

$\longrightarrow$



¿Se puede comprimir todo el conocimiento humano indefinidamente?

"Sí" $\longrightarrow$ S $\sim$ 20; I $\sim$ 09 $\longrightarrow$ 2009 $\longrightarrow$ 0,2009 m

En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

"Wikipedia" (9 letras): $\Delta x \sim 10^{-18}\, m \sim 10^{-3} \cdot R_{p^+}$

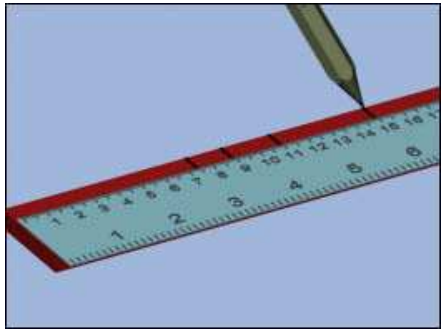
"Esternocleidomastoideo" (22 letras): $\Delta x \sim 10^{-44}\, m \sim 10^{-9} \cdot \ell_P$

¿Por qué la información tiene tanto importancia?

$\longrightarrow$ problema del extraterrestre y la Wikipedia

WIKIPEDIA

$\longrightarrow$



¿Se puede comprimir todo el conocimiento humano indefinidamente?

"Sí" $\longrightarrow$ S $\sim$ 20; I $\sim$ 09 $\longrightarrow$ 2009 $\longrightarrow$ 0,2009 m

En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

"Wikipedia" (9 letras): $\Delta x \sim 10^{-18}\, m \sim 10^{-3} \cdot R_{p^+}$

"Esternocleidomastoideo" (22 letras): $\Delta x \sim 10^{-44}\, m \sim 10^{-9} \cdot \ell_P$

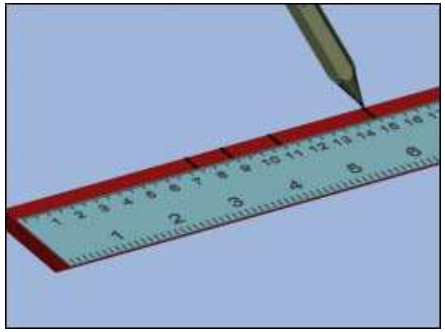
"En un lugar de La Macha, de cuyo nombre no quiero acordarme"...

¿Por qué la información tiene tanto importancia?

$\longrightarrow$ problema del extraterrestre y la Wikipedia

WIKIPEDIA

$\longrightarrow$



¿Se puede comprimir todo el conocimiento humano indefinidamente?

"Sí" $\longrightarrow$ S $\sim$ 20; I $\sim$ 09 $\longrightarrow$ 2009 $\longrightarrow$ 0,2009 m

En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

"Wikipedia" (9 letras): $\Delta x \sim 10^{-18}\, m \sim 10^{-3} \cdot R_{p^+}$

"Esternocleidomastoideo" (22 letras): $\Delta x \sim 10^{-44}\, m \sim 10^{-9} \cdot \ell_P$

"En un lugar de La Macha, de cuyo nombre no quiero acordarme"...

$\longrightarrow$ Información es una entidad física, con energía, volumen, ...

$\longrightarrow$ Información sobre lo que formó el A.N. tiene que estar en algún lado...

Preguntas abiertas....

- ¿Sirven los principios básicos de la Mecánica Cuántica para describir la evolución de agujeros negros?
  $\longrightarrow$ Apuesta Thorne-Hawking-Preskill (1997 - 2004)

Preguntas abiertas....

- ¿Sirven los principios básicos de la Mecánica Cuántica para describir la evolución de agujeros negros?
  $\longrightarrow$ Apuesta Thorne-Hawking-Preskill (1997 - 2004)

- ¿La radiación de Hawking es realmente térmica, o sólo en aproximación (semi-)clásica? ¿Contiene información en correlaciones sutiles?
  $\longrightarrow$ Cfr quemar una enciclopedia

Preguntas abiertas....

- ¿Sirven los principios básicos de la Mecánica Cuántica para describir la evolución de agujeros negros?
  $\longrightarrow$ Apuesta Thorne-Hawking-Preskill (1997 - 2004)

- ¿La radiación de Hawking es realmente térmica, o sólo en aproximación (semi-)clásica? ¿Contiene información en correlaciones sutiles?
  $\longrightarrow$ Cfr quemar una enciclopedia

- ¿Cuál es el final de la proceso de evaporación de agujeros negros? ¿Un remnante? ¿Una singularidad desnuda?

Preguntas abiertas....

- ¿Sirven los principios básicos de la Mecánica Cuántica para describir la evolución de agujeros negros?
  $\longrightarrow$ Apuesta Thorne-Hawking-Preskill (1997 - 2004)

- ¿La radiación de Hawking es realmente térmica, o sólo en aproximación (semi-)clásica? ¿Contiene información en correlaciones sutiles?
  $\longrightarrow$ Cfr quemar una enciclopedia

- ¿Cuál es el final de la proceso de evaporación de agujeros negros? ¿Un remnante? ¿Una singularidad desnuda?

- ¿Los agujeros negros realmente existen, o son sólo una aproximación (semi-)clásica de estados en Gravedad Cuántica?
  $\longrightarrow$ Complementaridad de agujeros negros? Firewalls? Fuzzballs?

Preguntas abiertas....

- ¿Sirven los principios básicos de la Mecánica Cuántica para describir la evolución de agujeros negros?
  $\longrightarrow$ Apuesta Thorne-Hawking-Preskill (1997 - 2004)

- ¿La radiación de Hawking es realmente térmica, o sólo en aproximación (semi-)clásica? ¿Contiene información en correlaciones sutiles?
  $\longrightarrow$ Cfr quemar una enciclopedia

- ¿Cuál es el final de la proceso de evaporación de agujeros negros? ¿Un remnante? ¿Una singularidad desnuda?

- ¿Los agujeros negros realmente existen, o son sólo una aproximación (semi-)clásica de estados en Gravedad Cuántica?
  $\longrightarrow$ Complementaridad de agujeros negros? Firewalls? Fuzzballs?

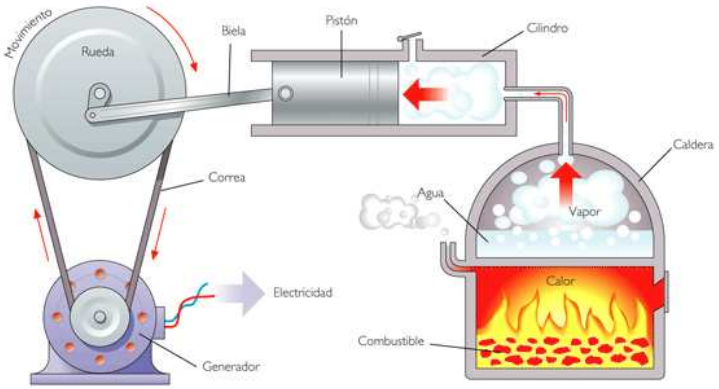
Problema:

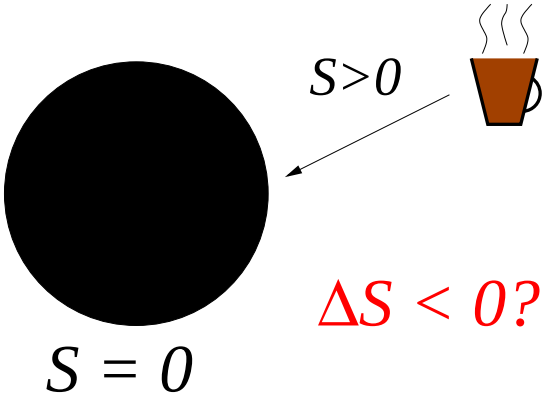
Incompatibilidad entre Principio de Equivalencia, unitaridad or localidad?

$\longrightarrow$ ¿Cuál debemos sacrificar?

Resumen

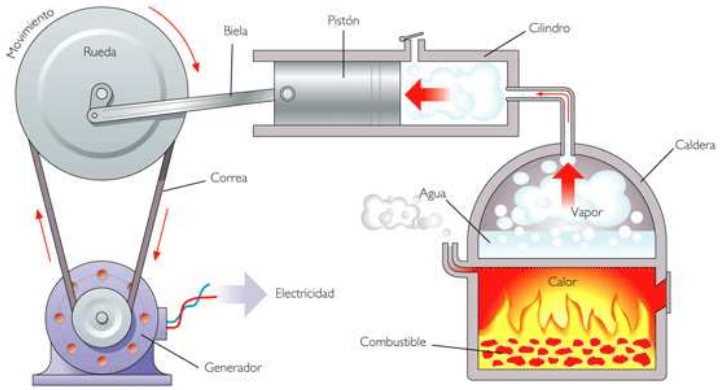
- Los agujeros negros son sistemas termodinámicos

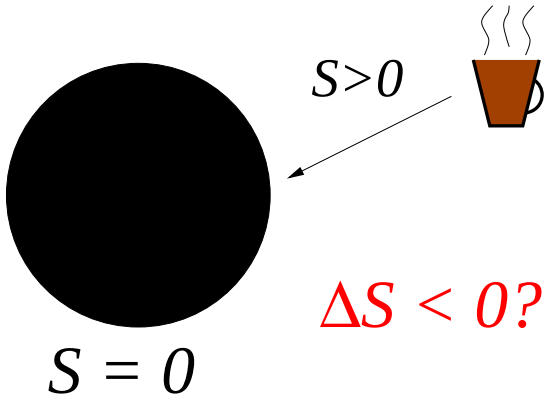




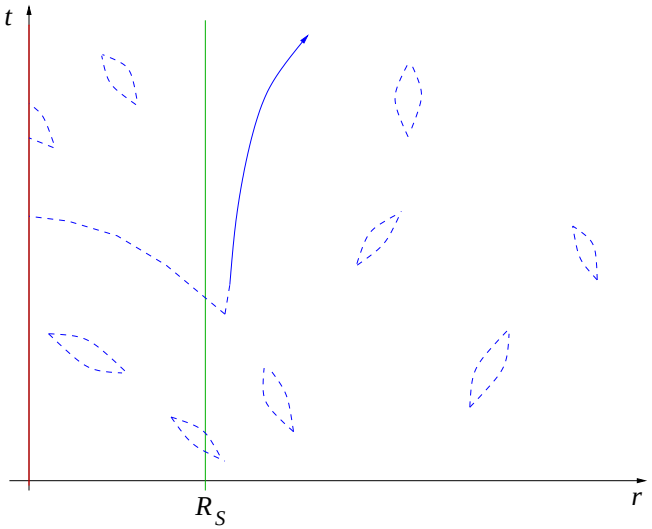
Resumen

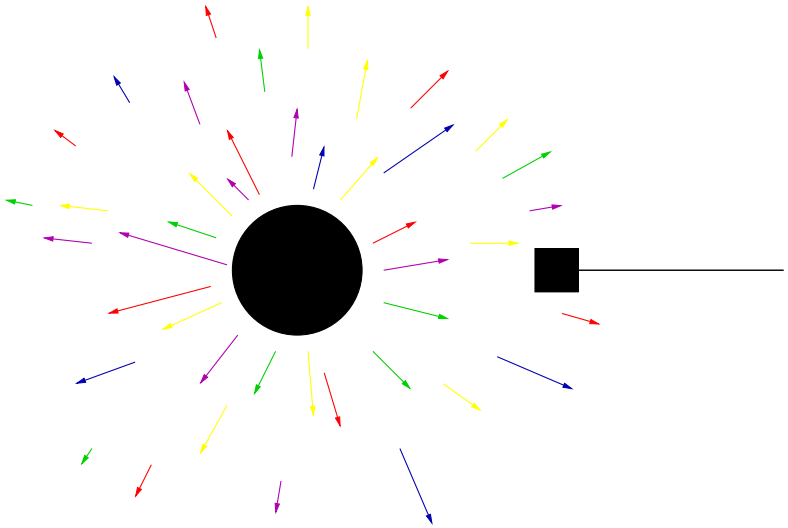
- Los agujeros negros son sistemas termodinámicos





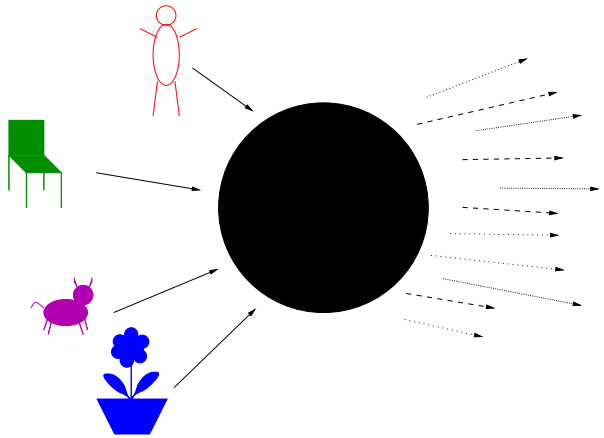
- A nivel cuántico, los agujeros negros se comportan como cuerpo negro





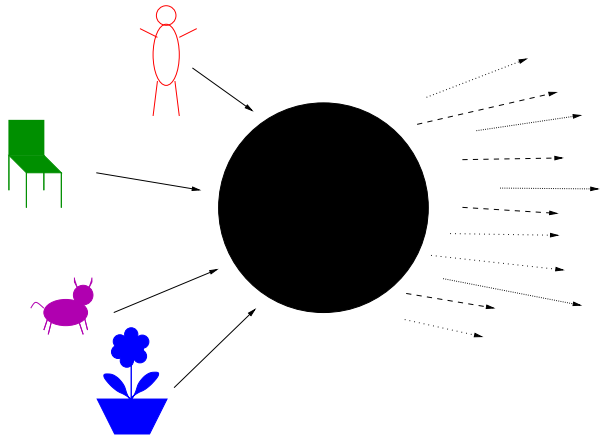
$$T = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi k_B} \qquad S = \frac{A}{4G_N\hbar}$$

- No conocemos el origen microscópico de la entropía...
  No sabemos dónde reside la información de la materia tragada...



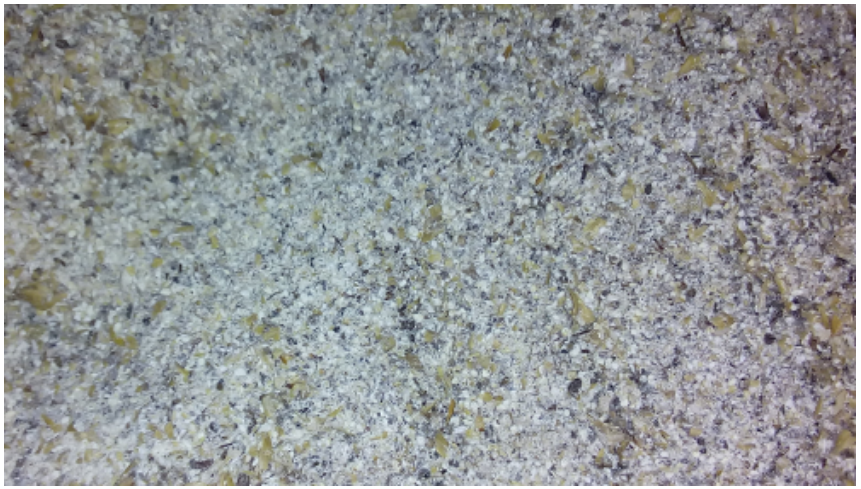
$\longrightarrow$ Paradoja de la Información & Conteo de los microestados

- No conocemos el origen microscópico de la entropía...
  No sabemos dónde reside la información de la materia tragada...

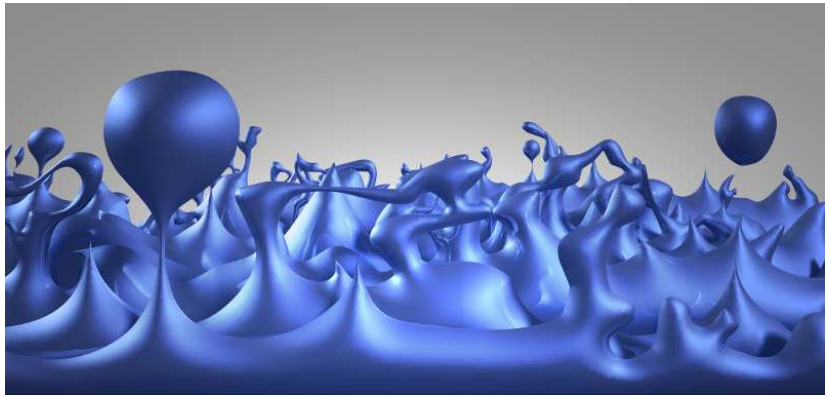


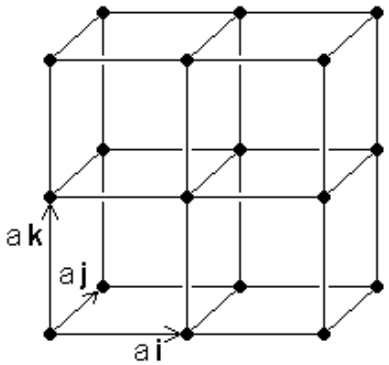
$\longrightarrow$ Paradoja de la Información & Conteo de los microestados

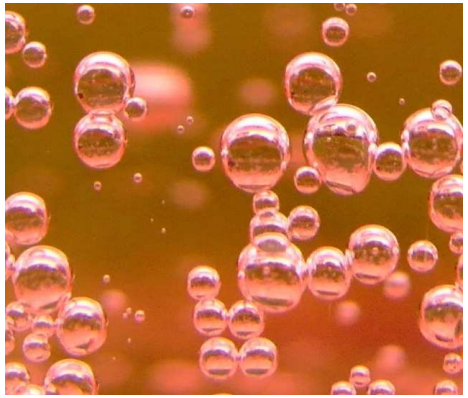
- Relatividad General es descripción granulada, (semi-)clásica de un sistema cuántico subyacente...



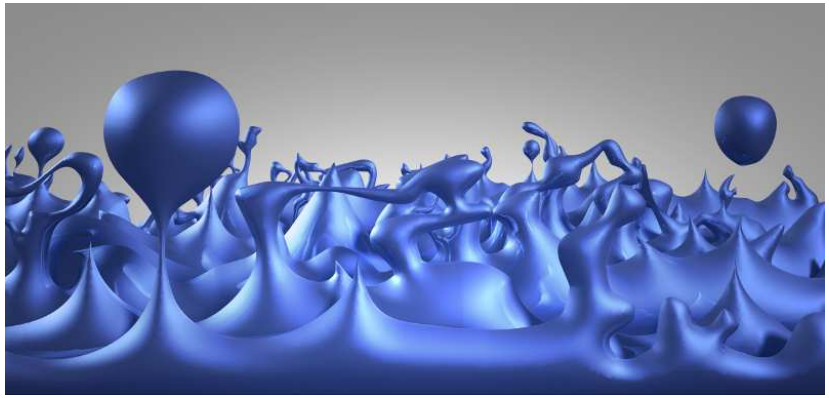
- Gravedad cuántica debe dar descripción cuántica del espaciotiempo

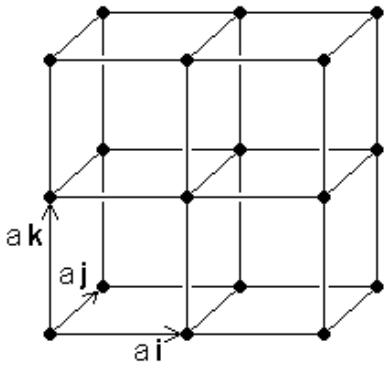


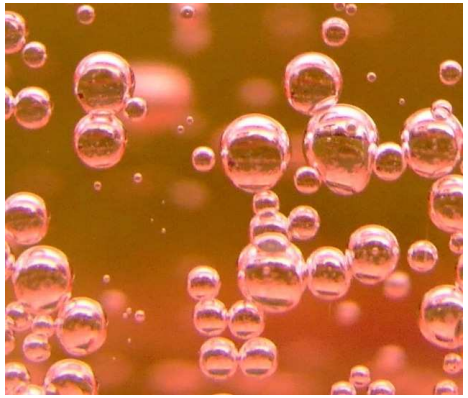




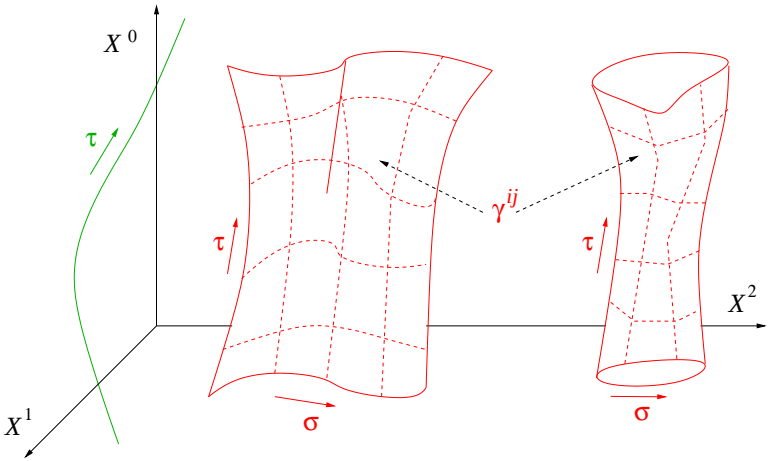
- Gravedad cuántica debe dar descripción cuántica del espaciotiempo

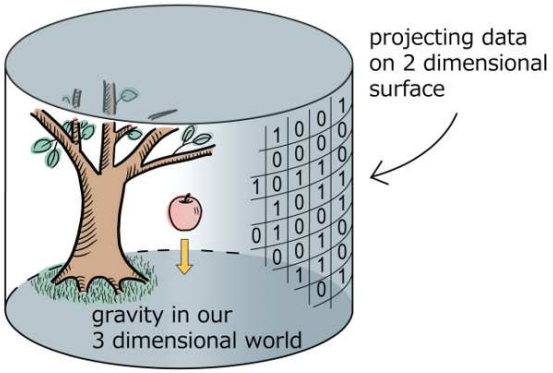


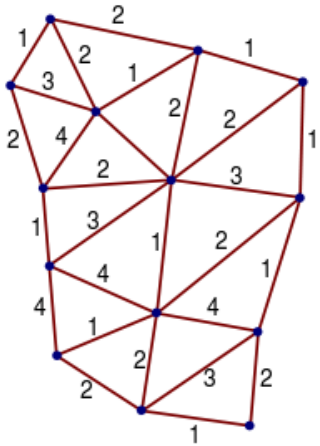




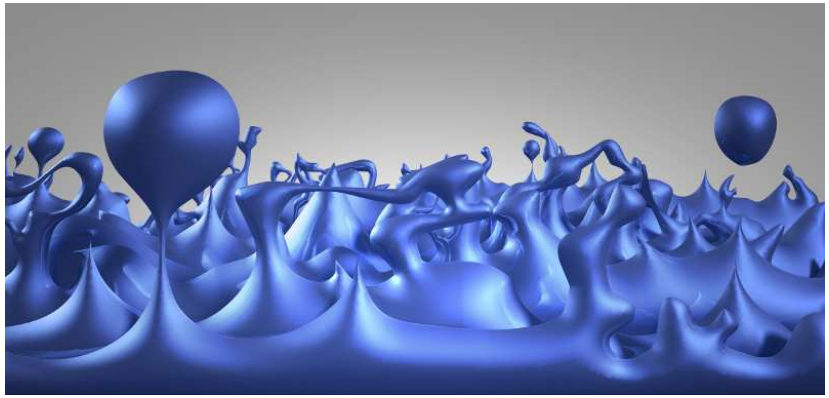
- Aún no sabemos cuáles son los grados de libertad de gravedad cuántica

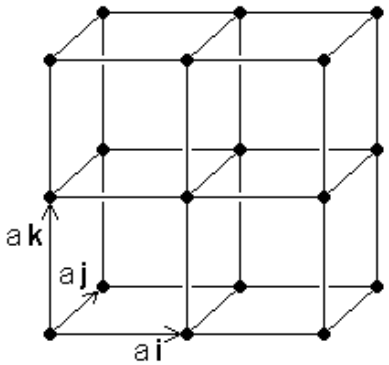


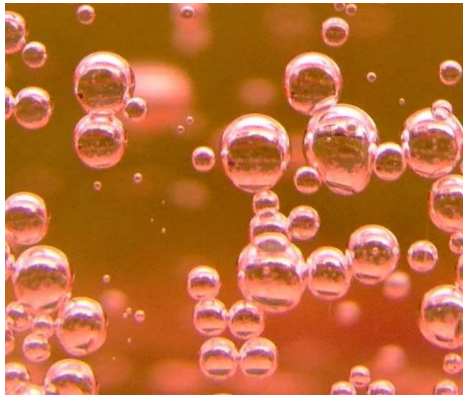




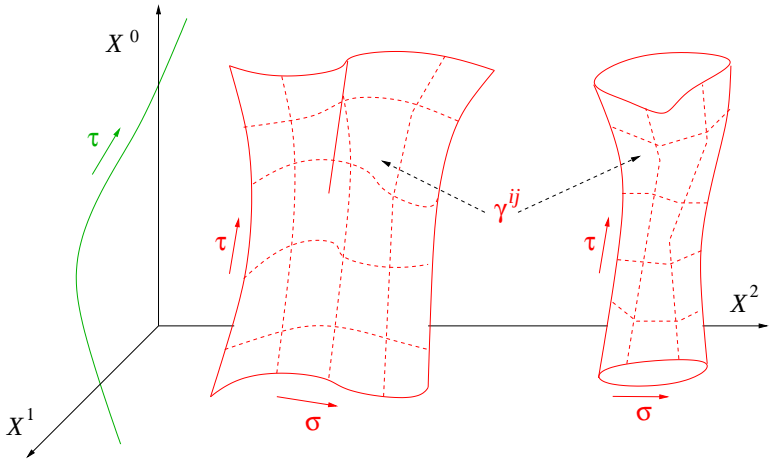
- Gravedad cuántica debe dar descripción cuántica del espaciotiempo

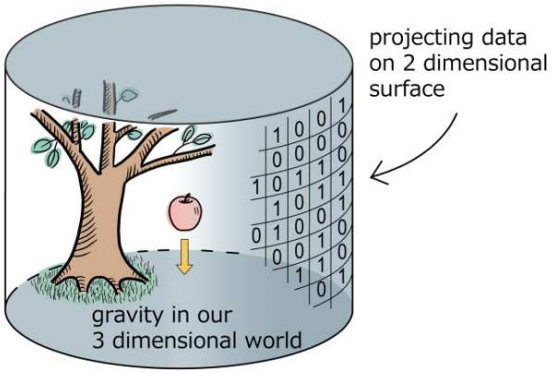


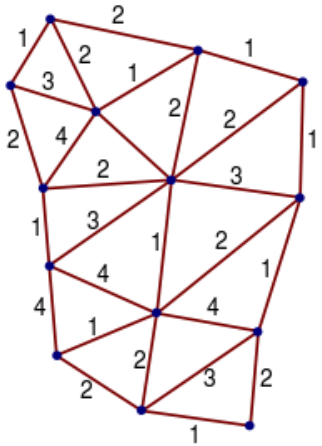




- Aún no sabemos cuáles son los grados de libertad de gravedad cuántica







- El trabajo de Hawking nos ha abierto caminos insospechados
  Sus aportaciones le han dado un lugar merecido en la Historia

REVEAL ALL MYSTERIES OF THE UNIVERSE? ARE YOU NUTS?!?
YOU KNOW ONE SHOULD NEVER EXPLAIN A GOOD JOKE ...
LECTRR

Gracias!

Conteo de los microestados: ¿Cuál es el origen de la entropía?

Boltzmann: $S = \frac{A}{4G_N\hbar} = \ln N$

$$M = m_\odot \quad \Longrightarrow \quad S \sim 10^{77}$$
$$\Longrightarrow \quad N \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}}$$

$\longrightarrow$ ¿Cuáles son los microestados?

Conteo de los microestados: ¿Cuál es el origen de la entropía?

Boltzmann: $S = \frac{A}{4G_N\hbar} = \ln N$

$$M = m_\odot \quad \Longrightarrow \quad S \sim 10^{77}$$
$$\Longrightarrow \quad N \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}}$$

$\longrightarrow$ ¿Cuáles son los microestados?

- # posibles colapsos de materia para formar Kerr-Newmann con M, Q y J?
  $\longrightarrow$ Teoría de cuerdas: agujeros negros extremales en $D = 5$

Conteo de los microestados: ¿Cuál es el origen de la entropía?

Boltzmann: $S = \frac{A}{4G_N\hbar} = \ln N$

$$M = m_\odot \quad \Longrightarrow \quad S \sim 10^{77}$$
$$\Longrightarrow \quad N \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}}$$

$\longrightarrow$ ¿Cuáles son los microestados?

- # posibles colapsos de materia para formar Kerr-Newmann con M, Q y J?
  $\longrightarrow$ Teoría de cuerdas: agujeros negros extremales en $D = 5$
- Entropía de entrelazamiento? $|\psi_{\text{tot}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\Big(|0_{\text{int}}\rangle|0_{\text{ext}}\rangle + |1_{\text{int}}\rangle|1_{\text{ext}}\rangle\Big)$

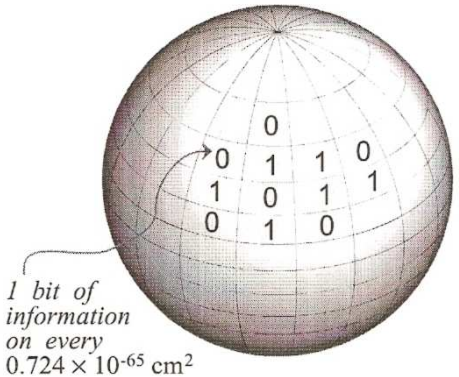
Conteo de los microestados: ¿Cuál es el origen de la entropía?

Boltzmann: $S = \frac{A}{4G_N\hbar} = \ln N$

$$M = m_\odot \quad \Longrightarrow \quad S \sim 10^{77}$$
$$\Longrightarrow \quad N \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}}$$

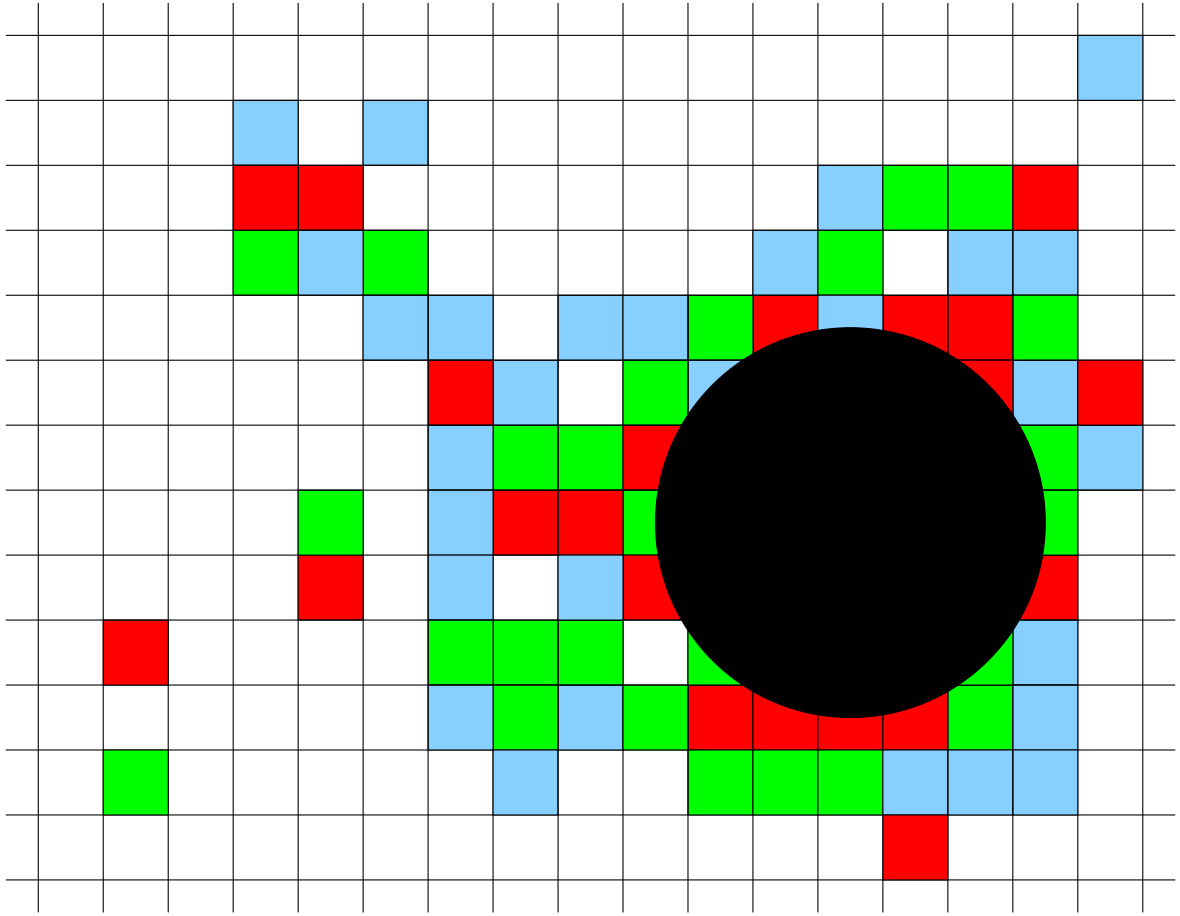
$\longrightarrow$ ¿Cuáles son los microestados?

- # posibles colapsos de materia para formar Kerr-Newmann con M, Q y J?
  $\longrightarrow$ Teoría de cuerdas: agujeros negros extremales en $D = 5$
- Entropía de entrelazamiento? $|\psi_{\text{tot}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\Big(|0_{\text{int}}\rangle|0_{\text{ext}}\rangle + |1_{\text{int}}\rangle|1_{\text{ext}}\rangle\Big)$
- ¿Principio Holográfico? Entropía del agujero negro crece con área del horizonte, no como volumen



$$S = \frac{A}{4G_N\hbar} = \frac{4\pi R_s^2}{G_N\hbar}$$

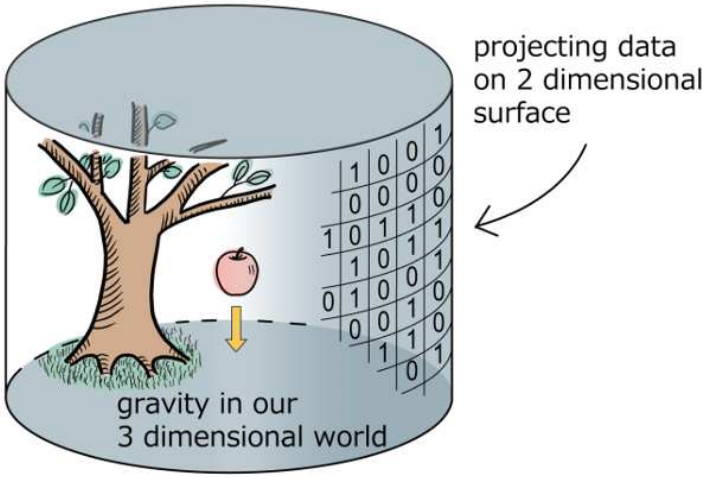
- Grados de libertad gravitacionales locales no son independientes

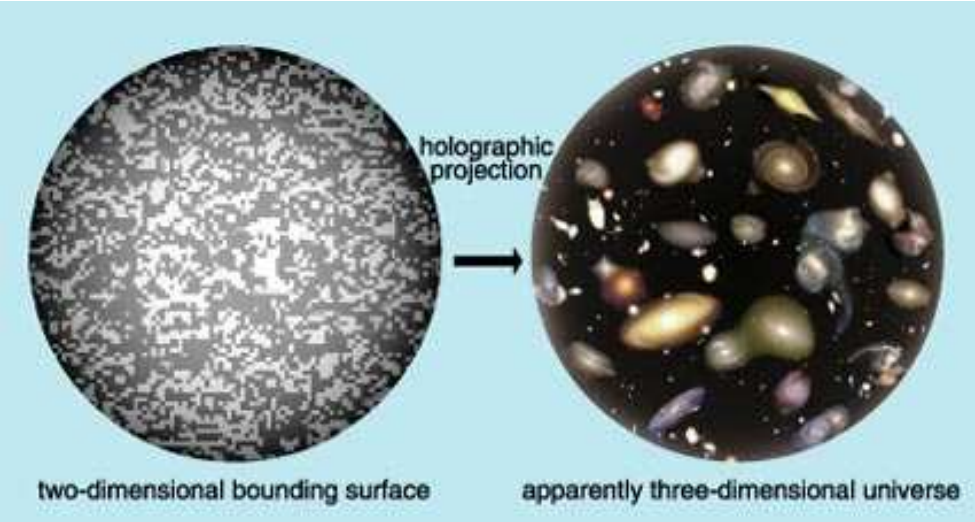


$\longrightarrow$ número de grados de libertad no crece como vol, sino como área

$\longrightarrow$ Información del interior almacenada en superficie del agujero negro

- Principio Holográfico: Teoría con gravedad en (3+1)-dim codificado en datos en frontera (2+1)-dim $\longrightarrow$ Propiedad fundfamental?





$\longrightarrow$ gravedad es fenómeno emergente?

$\longrightarrow$ espaciotiempo 4-dim es fenómeno emergente?

Proceso de Penrose: extraer energía del agujero negro!

Conservación de energía y momento angular: $A \longrightarrow B + C$

$$E_A = E_B + E_C, \qquad L_A = L_B + L_B$$

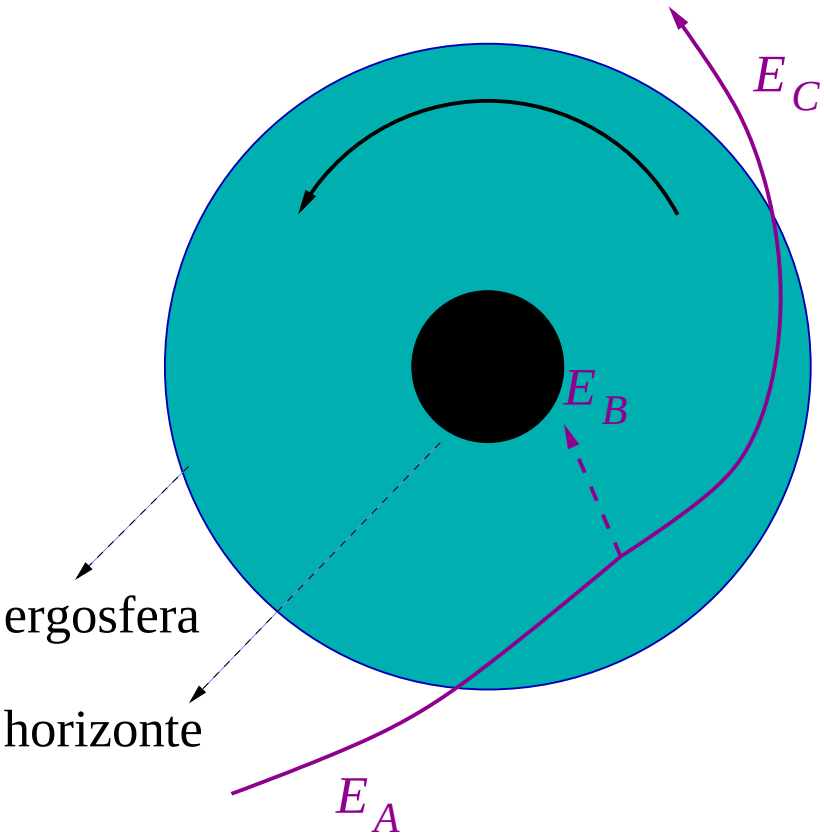
Proceso de Penrose: extraer energía del agujero negro!

Conservación de energía y momento angular: $A \longrightarrow B + C$

$$E_A = E_B + E_C, \qquad L_A = L_B + L_B$$

Lanza part'icula tal que $E_B < 0$:

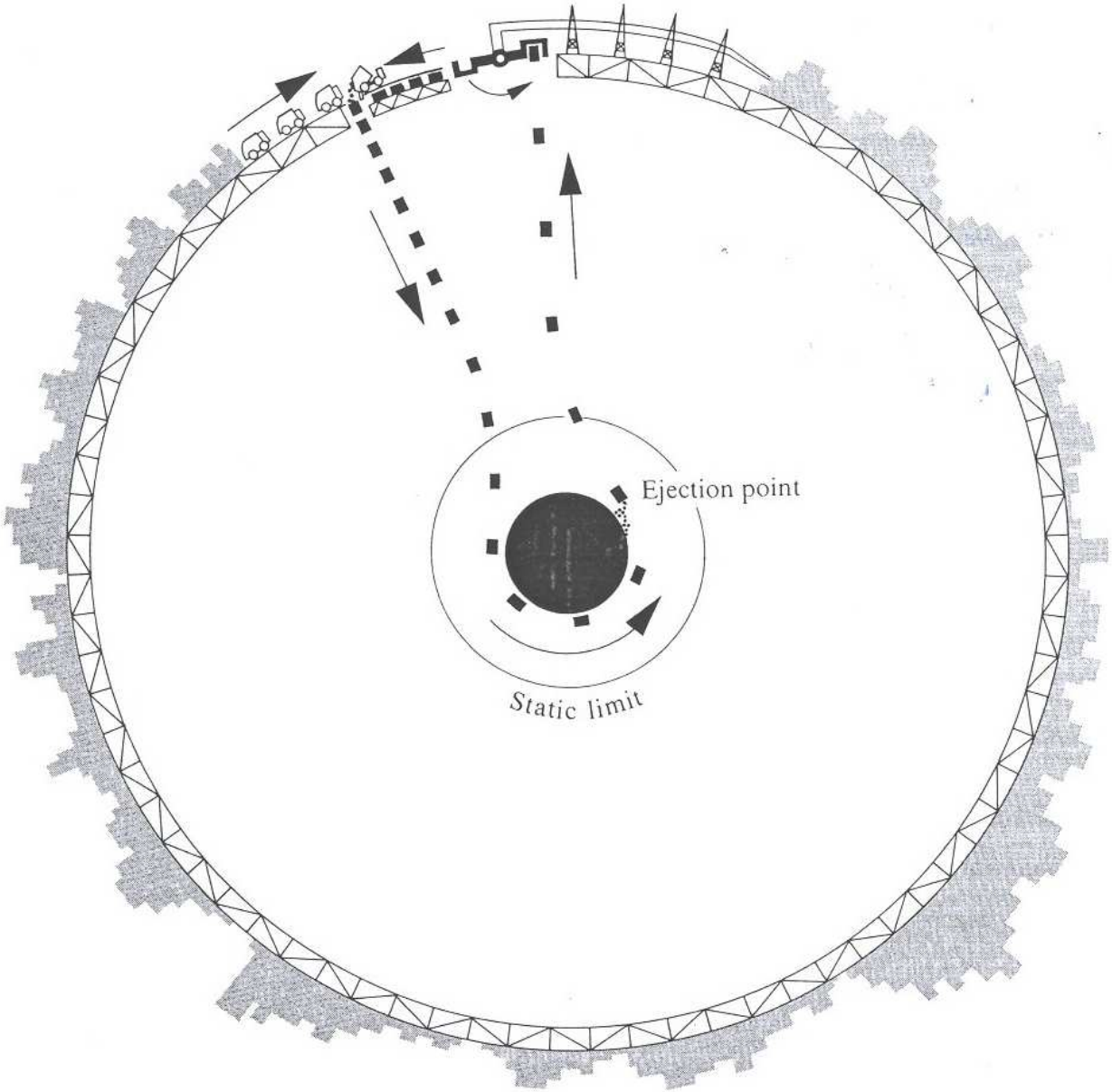
$$\Delta M = E_B = E_A - E_C < 0 \qquad \Delta J = L_B = L_A - L_C < 0$$



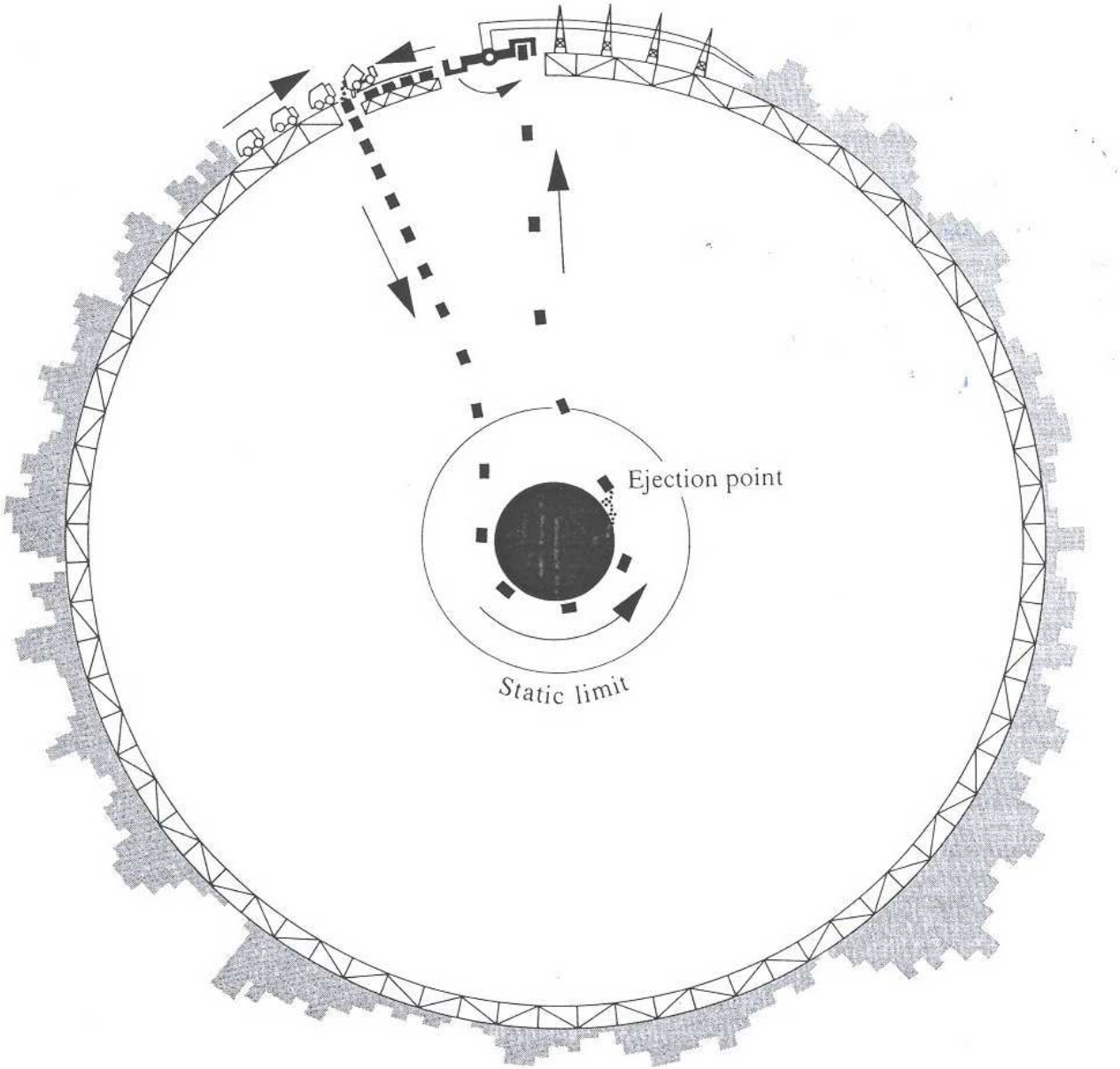
- $E_C > E_A$:
  Agujero negro ejerce trabajo sobre partícula!
- $\Delta M < 0, \ \Delta J < 0$:
  Agujero negro pierde masa y momento angular!

$\longrightarrow$ Agujeros negros no son sólo sumideros del universo...

Misner, Thorme & Wheeler: Sistema de reciclaje de sociedad avanzada



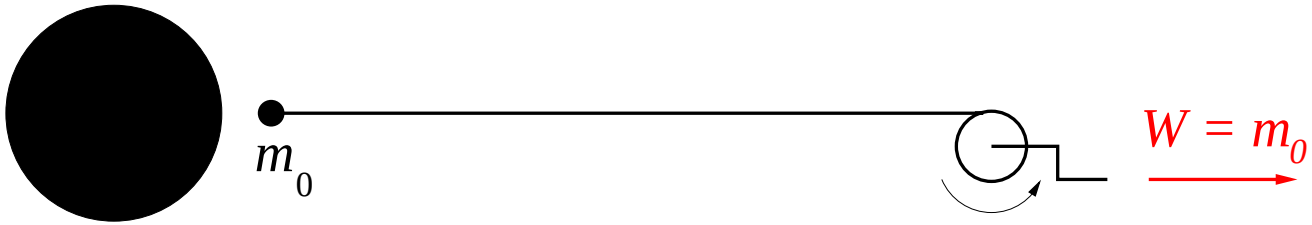
Misner, Thorme & Wheeler: Sistema de reciclaje de sociedad avanzada



$\longrightarrow$ CT12: Sensibilidad hacia temas medioambientales

También funciona con otros agujeros negros:

- Schwarzschild:

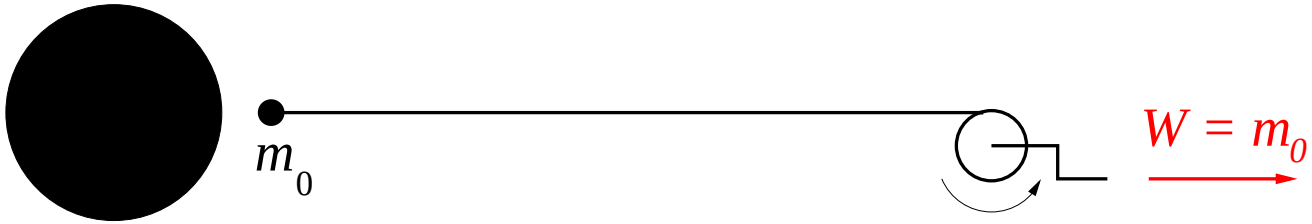


$$E(r) \;=\; m_0\sqrt{1-\frac{2M}{r}} \quad\Longrightarrow\quad E=0 \;\;\text{en}\;\; r=2M$$

$$\Longrightarrow\quad \Delta M_{BH} \;=\; 0$$

También funciona con otros agujeros negros:

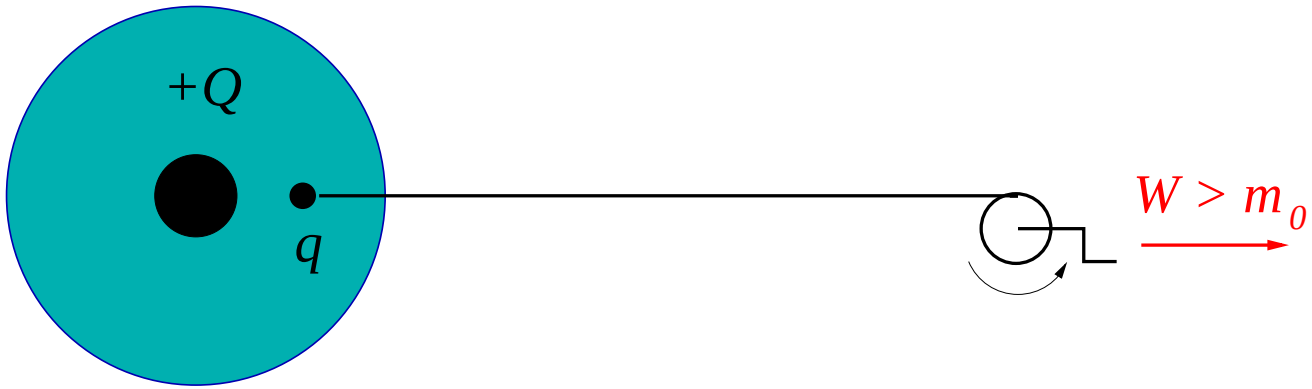
- Schwarzschild:



$$E(r) \;=\; m_0\sqrt{1-\frac{2M}{r}} \quad\Longrightarrow\quad E=0 \;\;\text{en}\;\; r=2M$$

$$\Longrightarrow\quad \Delta M_{BH} \;=\; 0$$

- Reissner-Nordström



$$E(r) \;=\; m_0\sqrt{1-\frac{2M}{r}} + \frac{qQ}{r} \quad\Longrightarrow\quad E=\frac{qQ}{R_+} \;\;\text{en}\;\; r=R_+$$

$$\Longrightarrow\quad \Delta M_{BH} \;=\; qQ/R_+$$