

los agujeros negros no son tan negros... o sí

luis j. garay

¹Universidad Complutense de Madrid

²Instituto de Estructura de la Materia, CSIC

<http://jacobi.fis.ucm.es/lgaray>

<http://luisgaray.totalh.com>

Madrid, 19 de noviembre de 2010

X Semana de la Ciencia



8 al 21 noviembre 2010



Semana de la ciencia

CELEBRANDO LA BIODIVERSIDAD

MADRID 2010

fundación
madri+d
para el conocimiento

EM
La Suma de Todos
Comunidad de Madrid
www.madrid.org



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Instituto de Estructura de la Materia

8 al 21 noviembre 2010



Semana de la ciencia

CELEBRANDO LA BIODIVERSIDAD

MADRID 2010

Fundación
madri+d
para el conocimiento

EM
La Suma de Todos
Comunidad de Madrid
www.madrid.org



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Instituto de Estructura de la Materia

8 al 21 noviembre 2010



Experiencia

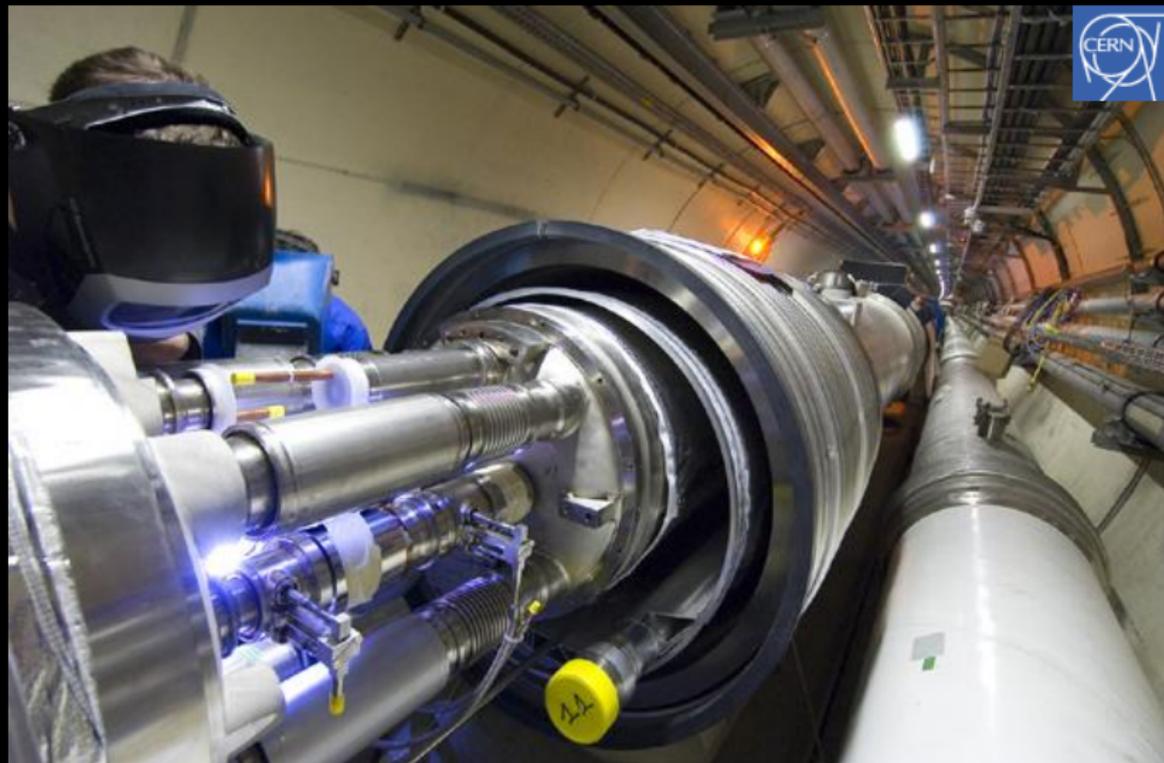
LA BIODIVERSIDAD

MADRID 2010

Fundación **madri+d**
para el conocimiento

EM
La Suma de Todos
Comunidad de Madrid
www.madrid.org

NO voy a hablar de ...



NO voy a hablar de ...

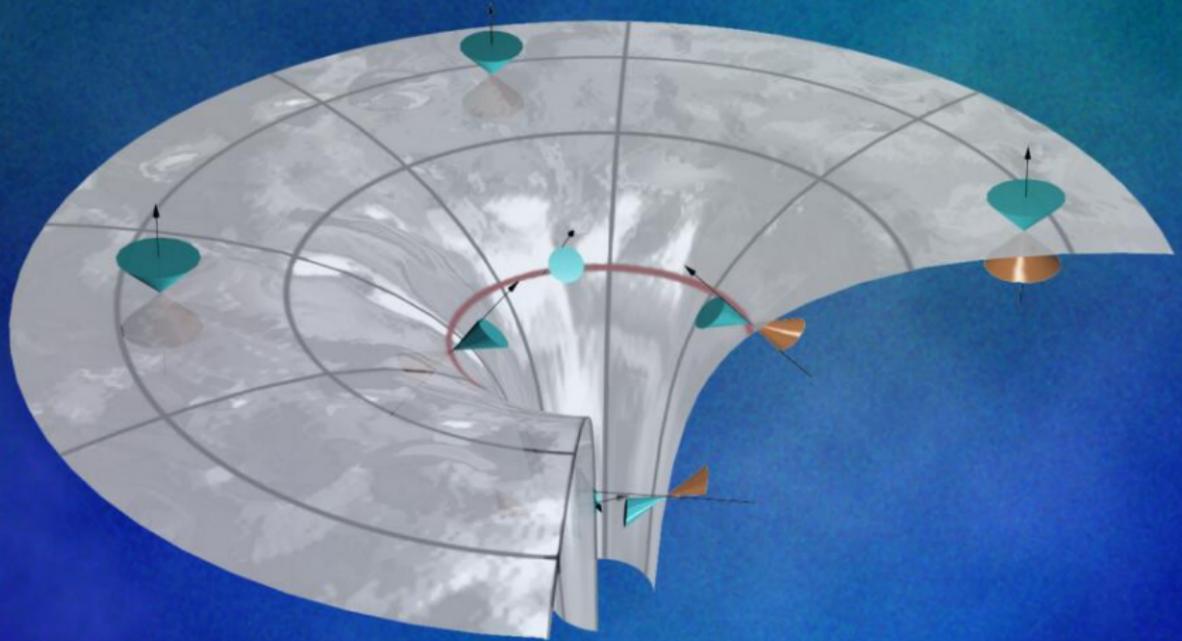


Resumen

- **Agujeros negros**
 - Ecuaciones de Einstein
 - Formación de un agujero negro estelar
 - Estructura de un agujero negro
 - Cómo y dónde encontrarlos
- **Termodinámica de agujeros negros**
 - Leyes de la termodinámica
 - Dinámica de agujeros negros
 - Radiación de Hawking
 - Evaporación de agujeros negros
- **Agujeros negros acústicos**
 - Experimentos en CBEs
 - Experimentos con olas

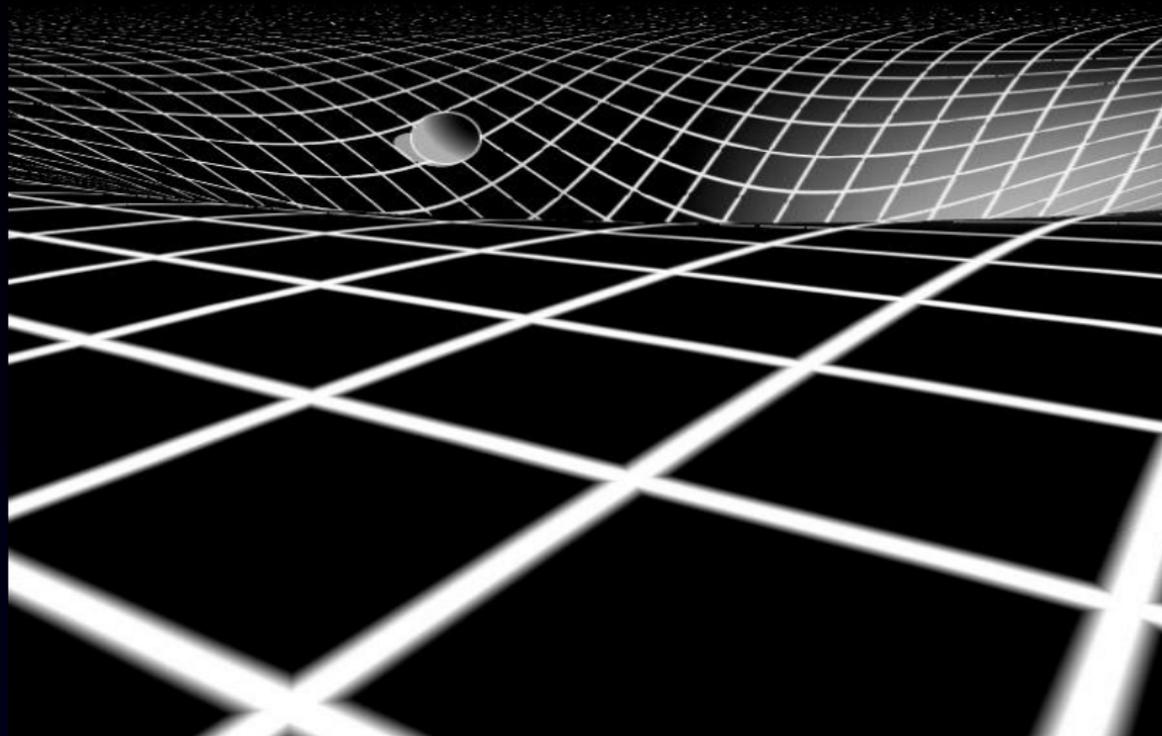


agujeros negros



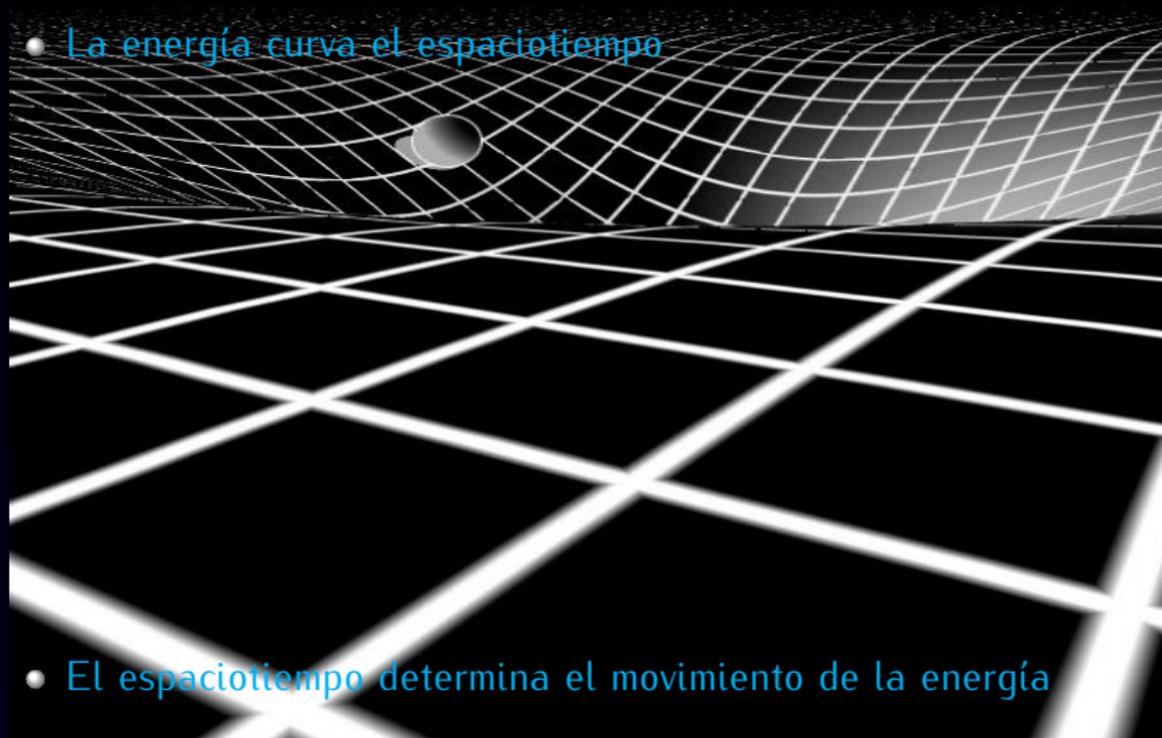
Arilla

La relatividad general es una teoría geométrica para la interacción gravitatoria



La relatividad general es una teoría geométrica para la interacción gravitatoria

- La energía curva el espaciotiempo



- El espaciotiempo determina el movimiento de la energía

La relatividad general es una teoría geométrica para la interacción gravitatoria

- La energía curva el espaciotiempo

Ecuaciones de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^3}T_{\mu\nu}$$

*curvatura (Ricci)
del espaciotiempo*

=

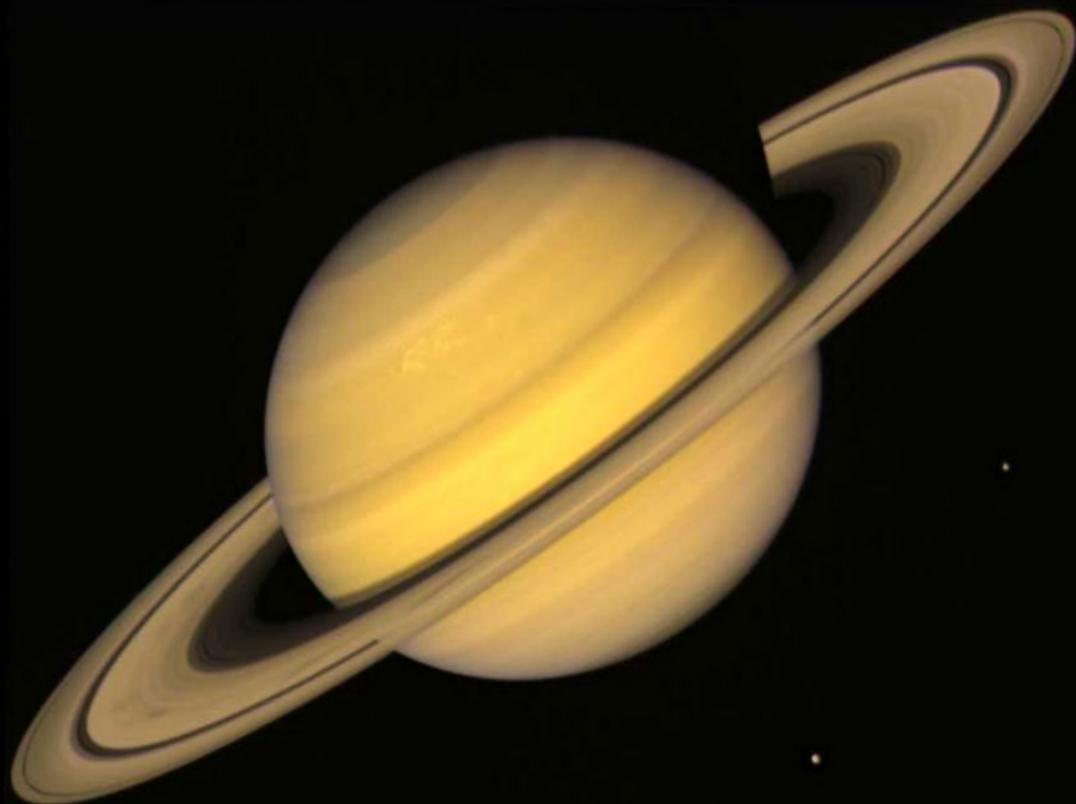
*densidad
de energía*

densidad = 0 \nRightarrow *curvatura (Weyl) = 0*

Fuerzas de marea

- El espaciotiempo determina el movimiento de la energía





- Evitan que los anillos de Saturno se deshagan y formen satélites
- Crean las mareas marinas



- Evitan que los anillos de Saturno se deshagan y formen satélites
- Crean las mareas marinas
- Se deben a la diferencia entre el campo gravitatorio en la parte más cercana y la más lejana a la fuente
- Son la esencia del campo gravitatorio, pues existen incluso en vacío



Formación de un agujero negro estelar

[Agujeros negros]

- Contracción de una nube de gas:
 - Energía gravitatoria \rightsquigarrow energía térmica: aumenta la presión y la temperatura
 - Se encienden las reacciones nucleares
 - Equilibrio: presión \iff fuerza gravitatoria
 - Formación de una estrella



Formación de un agujero negro estelar

[Agujeros negros]

- **Contracción de una nube de gas:**
 - Energía gravitatoria \rightsquigarrow energía térmica: aumenta la presión y la temperatura
 - Se encienden las reacciones nucleares
 - **Equilibrio:** presión \iff fuerza gravitatoria
 - Formación de una estrella

- El combustible nuclear se agota (primero H, después He)
 No se puede mantener la presión: la estrella se contrae
 El estado final del **colapso** depende de la masa de la estrella



Estado final del colapso

[Agujeros negros]

- **Enana blanca** ($M \lesssim 1.4M_{\odot}$):
 - Ionización
 - Presión electrónica (principio de exclusión de Pauli)



Estado final del colapso

[Agujeros negros]

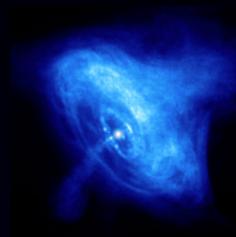
- **Enana blanca** ($M \lesssim 1.4M_{\odot}$):
 - Ionización
 - Presión electrónica (principio de exclusión de Pauli)
- **Estrella de neutrones** ($M \lesssim 3M_{\odot}$):
 - $e^{-} + p^{+} \rightarrow n + \nu$
 - Presión neutrónica (principio de Pauli)
 - Muy densa y pequeña



Estado final del colapso

[Agujeros negros]

- **Enana blanca** ($M \lesssim 1.4M_{\odot}$):
 - Ionización
 - Presión electrónica (principio de exclusión de Pauli)
- **Estrella de neutrones** ($M \lesssim 3M_{\odot}$):
 - $e^{-} + p^{+} \rightarrow n + \nu$
 - Presión neutrónica (principio de Pauli)
 - Muy densa y pequeña
- **Agujero negro** ($M \gtrsim 3M_{\odot}$):
 - La presión neutrónica no puede compensar la gravedad
 - *La estrella colapsa*



Los agujeros negros no tienen pelo (aún menos que yo)



Estructura de un agujero negro (i)

[Agujeros negros]

- Horizonte de sucesos
 - Superficie en la que la gravedad es tan fuerte que ni siquiera la luz puede escapar
 - Es el conjunto de trayectorias espaciotemporales de los rayos de luz que no pueden escapar y que se mueven eternamente en ese límite

El radio del horizonte es proporcional a la masa del agujero negro



- Horizonte de sucesos
 - Superficie en la que la gravedad es tan fuerte que ni siquiera la luz puede escapar
 - Es el conjunto de trayectorias espaciotemporales de los rayos de luz que no pueden escapar y que se mueven eternamente en ese límite

El radio del horizonte es proporcional a la masa del agujero negro

- Singularidad

En el centro del agujero negro, la densidad es infinita

Ecs. de Einstein:

curvatura infinita \implies ruptura del espaciotiempo



Estructura de un agujero negro (i)

[Agujeros negros]

- Horizonte de sucesos

- Superficie en la que la gravedad es tan fuerte que ni siquiera la luz puede escapar
- Es el conjunto de trayectorias espaciotemporales de los rayos de luz que no pueden escapar y que se mueven eternamente en ese límite

El radio del horizonte es proporcional a la masa del agujero negro

- Singularidad

En el centro del agujero negro, la densidad es infinita

Ecs. de Einstein:

curvatura infinita \implies ruptura del espaciotiempo

- Conjetura de censura cósmica

Las singularidades siempre están ocultas detrás de horizontes de sucesos que no permiten que *afecten al futuro* del exterior



Estructura de un agujero negro (ii)

[Agujeros negros]

- Supongamos que tenemos una masa M concentrada en una región muy pequeña del espacio (puntual)
- Existe un radio a partir del cual la gravedad es tan fuerte que ni siquiera la luz puede escapar: es el **horizonte de sucesos**

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = E_{\infty} \geq 0$$

$$r \geq \frac{2GM}{v^2} \geq \frac{2GM}{c^2} \equiv R_s$$

¡OJO! Hace falta relatividad general. Newton y $c < \infty$ son incompatibles

- R_s : Radio de Schwarzschild

Sol: $R_s = 3 \text{ km}$

Tierra: $R_s = 9 \text{ mm}$



Viaje a un agujero negro (i)

[Agujeros negros]

- Una nave viaja en caída libre hacia un agujero negro
- Dos posibles observadores:
 - ◆ nave en caída libre
 - ◆ laboratorio fijo alejado



Viaje a un agujero negro (i)

[Agujeros negros]

- Una nave viaja en caída libre hacia un agujero negro
- Dos posibles observadores:
 - ◆ nave en caída libre
 - ◆ laboratorio fijo alejado
- Según el laboratorio:
 - La nave disminuye su velocidad y necesita un tiempo infinito para llegar al horizonte
 - La nave enrojece y dejan de verla



Viaje a un agujero negro (i)

[Agujeros negros]

- Una nave viaja en caída libre hacia un agujero negro
- Dos posibles observadores:
 - ◆ nave en caída libre
 - ◆ laboratorio fijo alejado
- Según el laboratorio:
 - La nave disminuye su velocidad y necesita un tiempo infinito para llegar al horizonte
 - La nave enrojece y dejan de verla

• En la nave:

- La nave cruza el horizonte sin problemas

- Sufren fuerzas de marea cada vez mayores: $\Delta g \simeq 2GM \frac{l}{r^3}$
Cerca de la singularidad, Δg es muy grande



Viaje a un agujero negro (i)

[Agujeros negros]



vista frontal desde $500R_s$



Viaje a un agujero negro (i)

[Agujeros negros]



vista frontal desde $50R_s$



Viaje a un agujero negro (i)

[Agujeros negros]

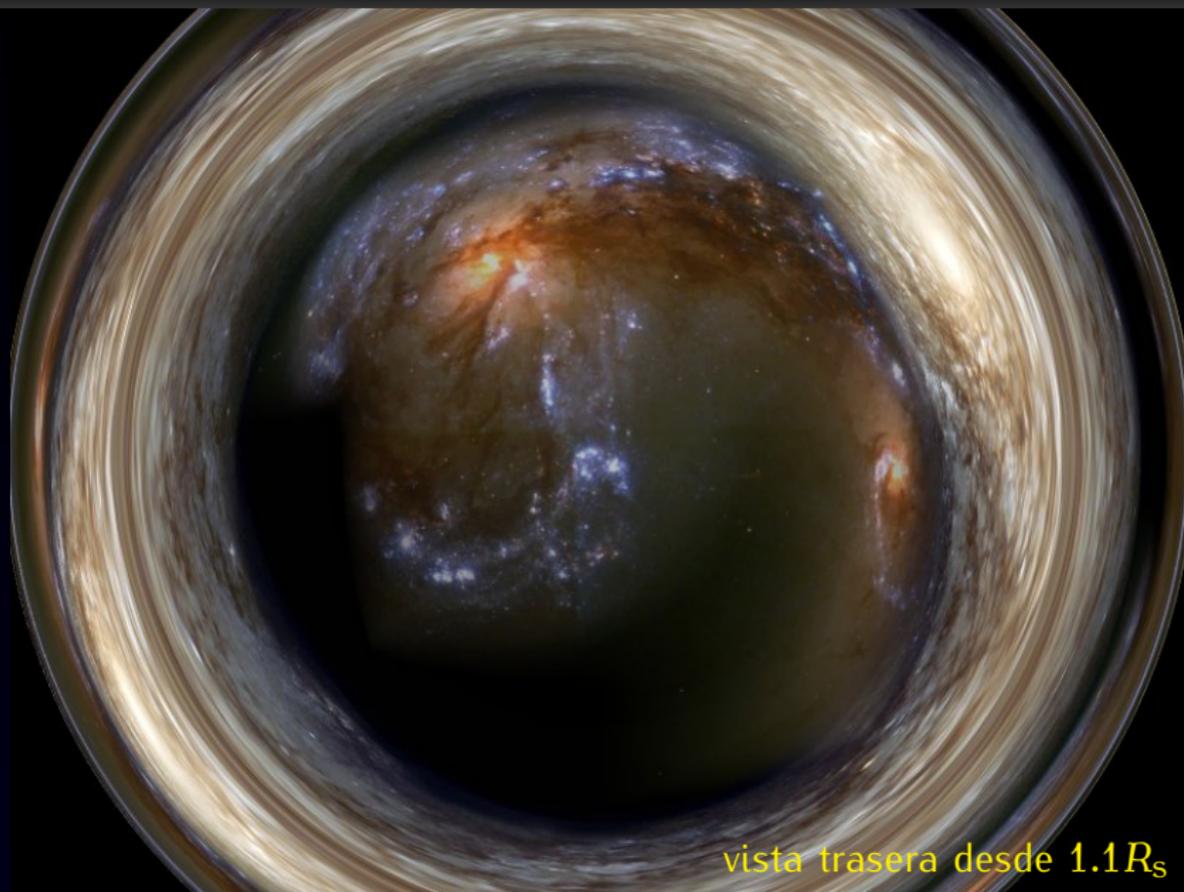


vista frontal desde $5R_g$



Viaje a un agujero negro (i)

[Agujeros negros]



vista trasera desde $1.1R_s$



Viaje a un agujero negro (i)

[Agujeros negros]



vista trasera desde $1.1R_s$



Inciso: Lentes gravitatorias

[Agujeros negros]



Inciso: Lentes gravitatorias

[Agujeros negros]



Inciso: Lentes gravitatorias

[Agujeros negros]



¿Y en el horizonte ?

[Agujeros negros]

- Fuerzas de marea

$$(r \simeq R_s = 2GM/c^2)$$

$$\Delta g_h \simeq 2GM \frac{l}{R_s^3} = \frac{c^6}{4G^2} \frac{l}{M^2}$$

- Agujeros grandes $\Rightarrow \Delta g_h$ pequeño
- Agujeros pequeños $\Rightarrow \Delta g_h$ grande



¿Y en el horizonte ?

[Agujeros negros]

- Fuerzas de marea

$$(r \simeq R_s = 2GM/c^2)$$

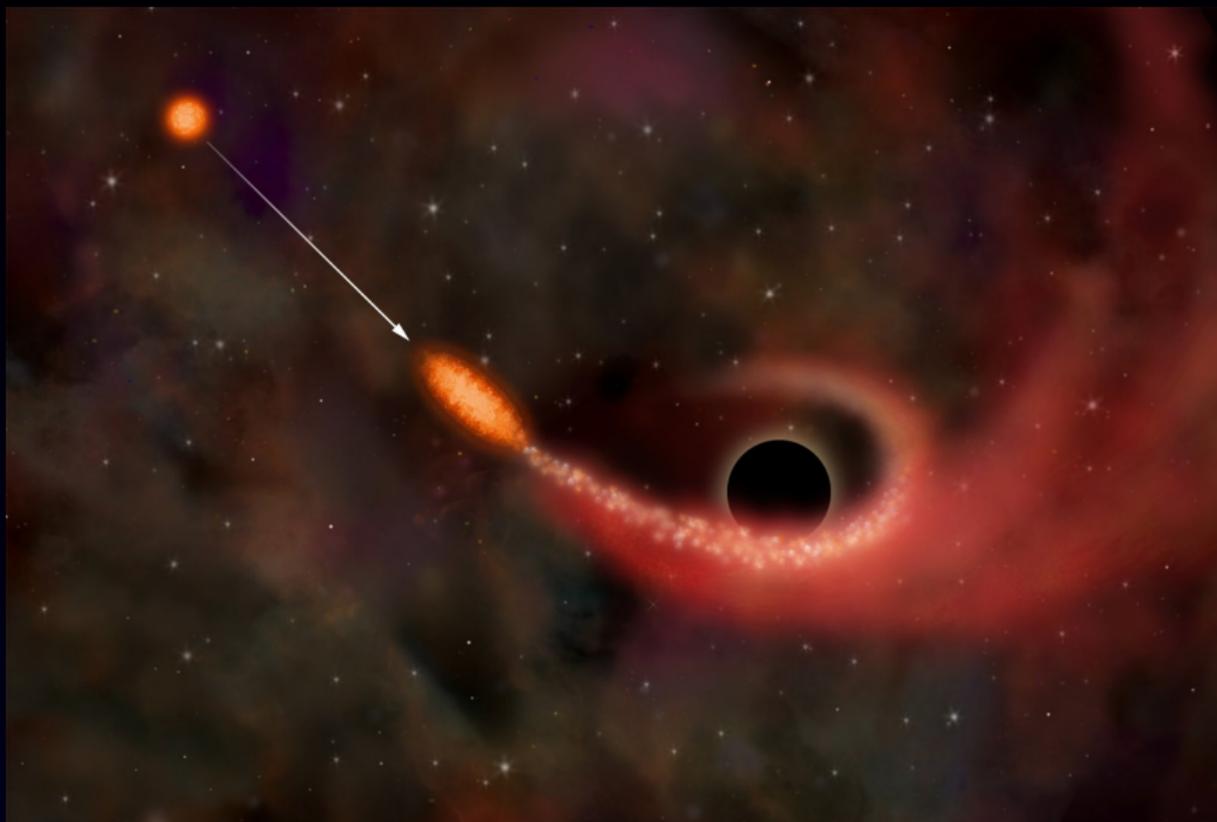
$$\Delta g_h \simeq \frac{2GM}{r^3} l = \frac{c^6}{4G^2} \frac{l}{M^2}$$

- Agujeros grandes
- Agujeros pequeños



¿Y en el horizonte ?

[Agujeros negros]



¿Y en el horizonte ?

[Agujeros negros]

- Fuerzas de marea

$$(r \simeq R_s = 2GM/c^2)$$

$$\Delta g_h \simeq 2GM \frac{l}{R_s^3} = \frac{c^6}{4G^2} \frac{l}{M^2}$$

- Agujeros grandes $\Rightarrow \Delta g_h$ pequeño
- Agujeros pequeños $\Rightarrow \Delta g_h$ grande

En cualquier caso, cerca de la singularidad, $\Delta g \rightarrow \infty$

...bastante desagradable

Además, la singularidad es inevitable (en tiempo finito)



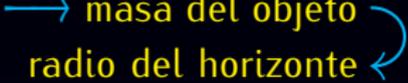
- **Cómo observarlos**
 - **Emisión** característica de radiación emitida por la materia que cae en el agujero negro



- **Cómo observarlos**
 - Emisión característica de radiación emitida por la materia que cae en el agujero



• **Cómo observarlos**

- **Emisión** característica de radiación emitida por la materia que cae en el agujero negro
- **Movimiento** de la materia cercana:
 - Radio y velocidad de la materia \rightarrow masa del objeto
radio del horizonte 
 - Si el tamaño del objeto parece menor o igual que el radio del horizonte, todo el objeto está dentro del horizonte y es un agujero negro

• **Dónde encontrarlos...**

Cygnus X-1

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

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

[Signature]

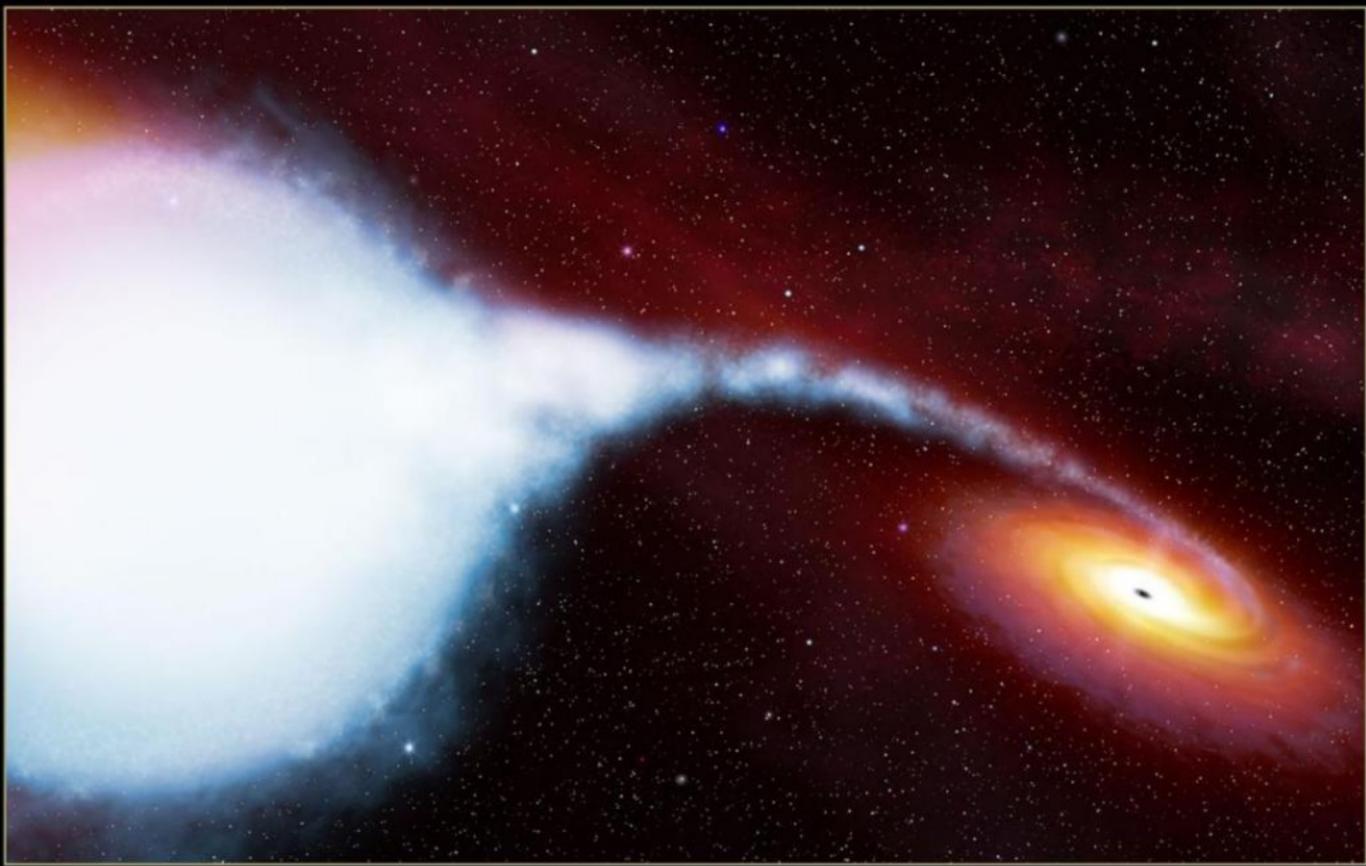
Kip S. Thorne



Witnessed this treaty
day of December 1974.

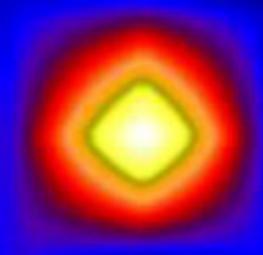


Franklin Armazylkas Nemor J

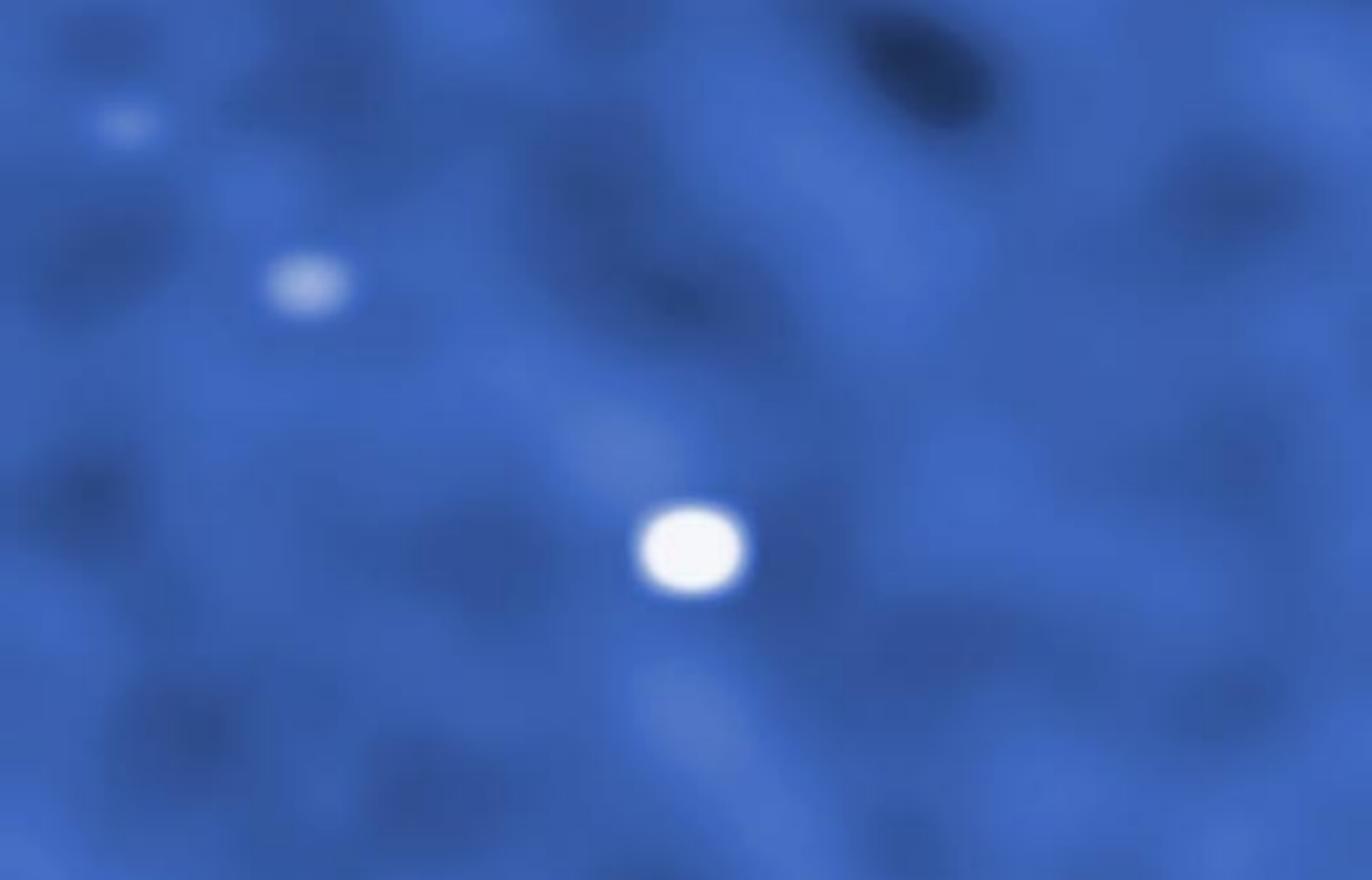


CYGNUS-X1 *Black hole*

Cygnus X-1 (rayos X)



Cygnus X-1 (rayos γ)



Cygnus X-1



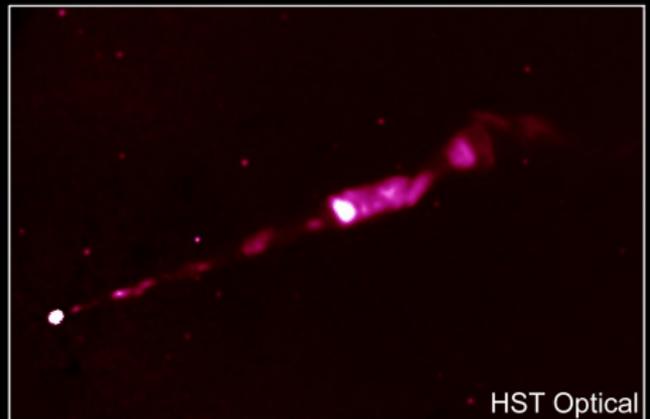
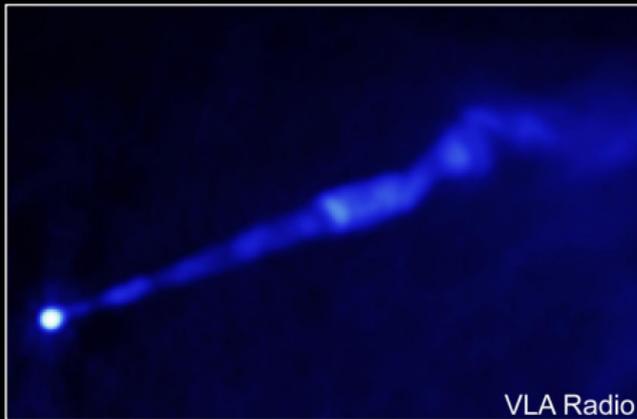
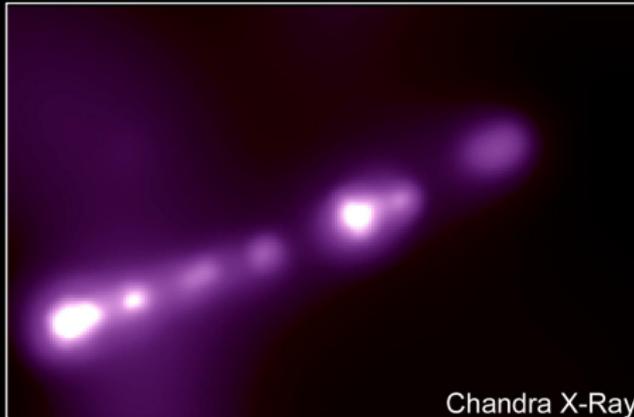
Nebulosa del Tulipán, Cygnus X-1



Galaxia del sombrero



M87

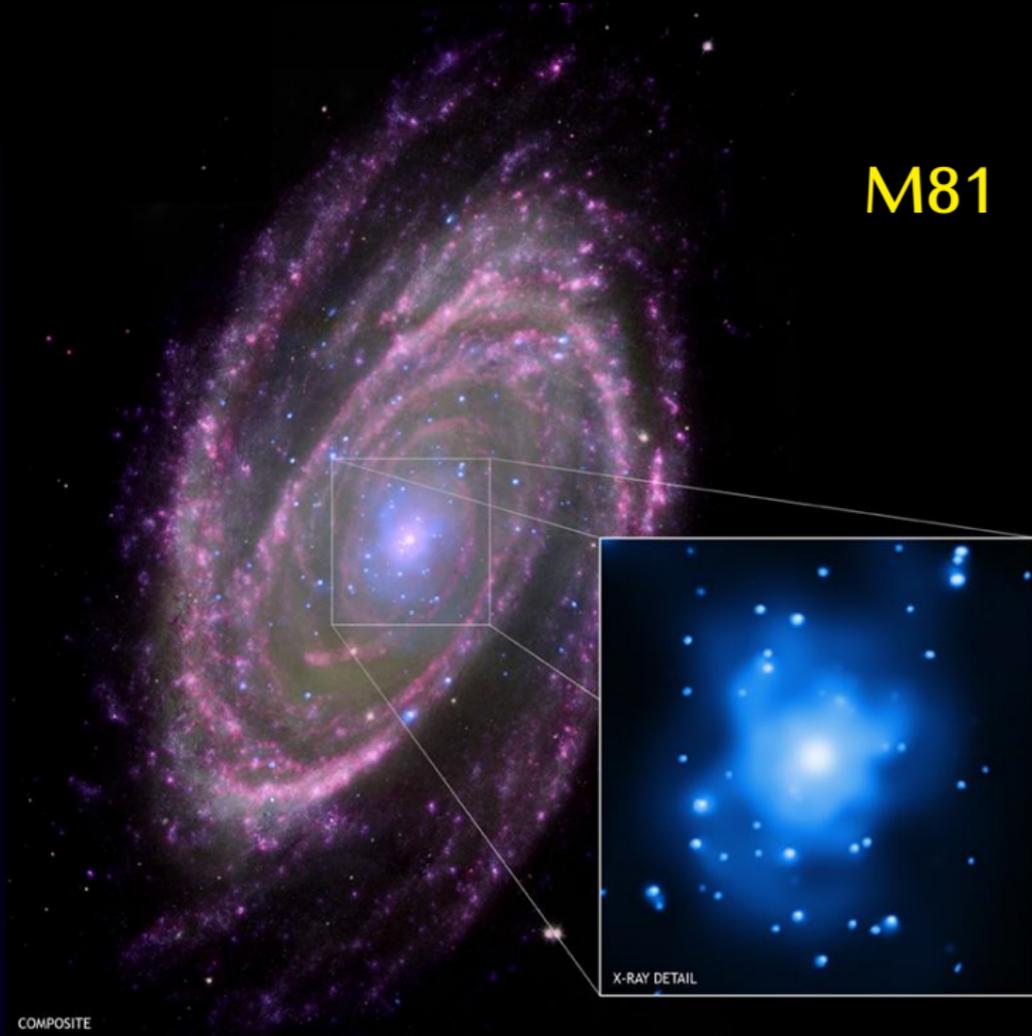


M87





M81



COMPOSITE

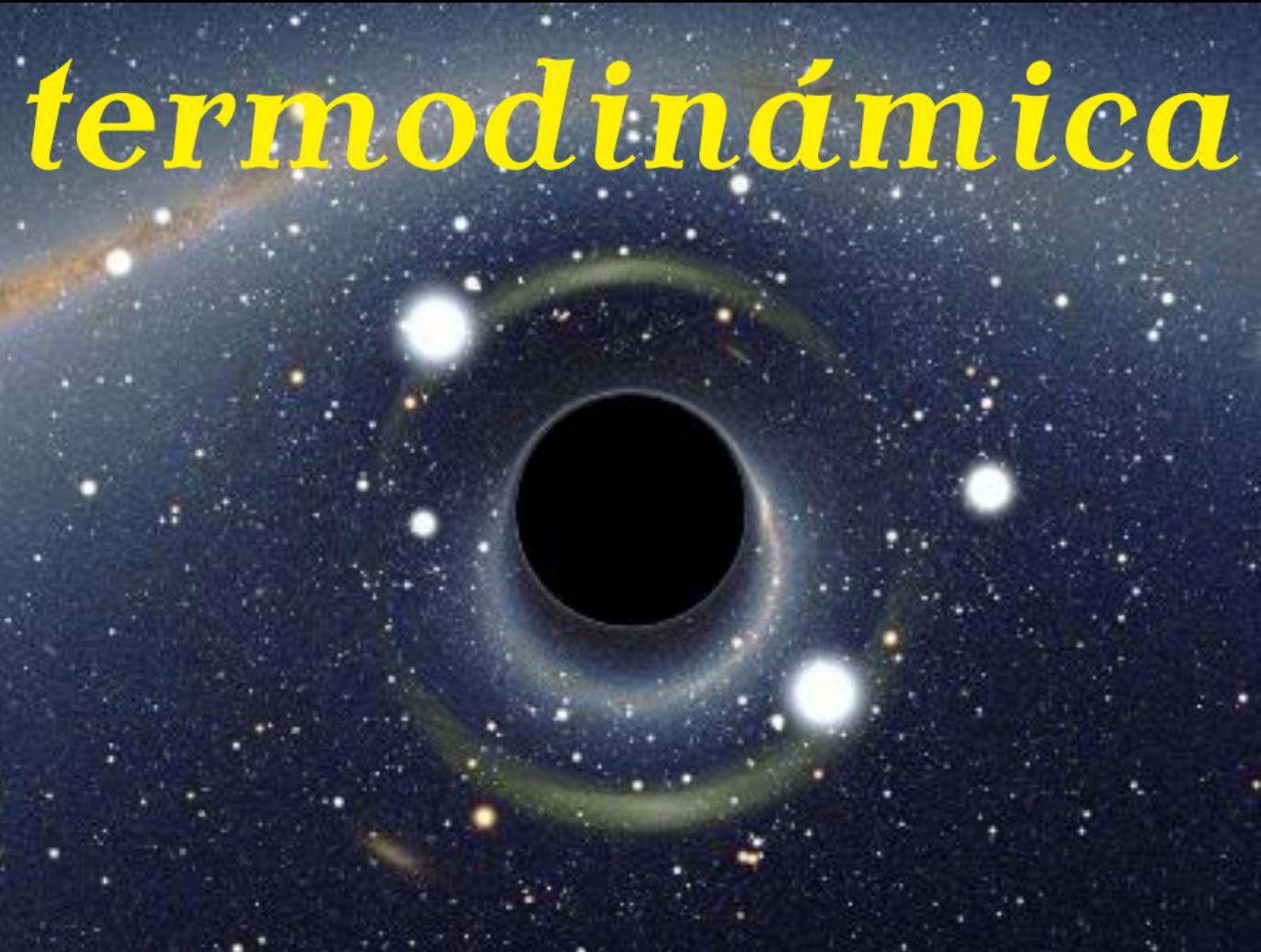
X-RAY DETAIL

Sagitario A* (Vía Láctea)

SGR A*



termodinámica





- Relaciones entre
- ◆ T Temperatura
 - ◆ E Energía
 - ◆ S Entropía (desorden)

- LEY 0. En equilibrio, T es constante
- LEY 1. $dE = T dS$
- LEY 2. $dS \geq 0$. La entropía siempre crece
- LEY 3. No se puede alcanzar $T = 0$



De las ecs. de Einstein se deducen los siguientes resultados:

- El área $A = 4\pi R_s^2$ nunca puede decrecer (LEY 2)
- Gravedad en el horizonte: $g_h = \frac{GM}{R_s^2} = \text{const}_h \neq 0$ (LEYES 0, 3)
- Relación entre dM , dA y g_h : $dM = \frac{1}{8\pi G} g_h dA$ (LEY 4)



De las ecs. de Einstein se deducen los siguientes resultados:

- El área $A = 4\pi R_S^2$ nunca puede decrecer (LEY 2)
- Gravedad en el horizonte: $g_h = \frac{GM}{R_S^2} = \text{const}_h \neq 0$ (LEYES 0, 3)
- Relación entre dM , dA y g_h : $dM = \frac{1}{8\pi G} g_h dA$ (LEY 4)

¿Podemos asignar $M \longrightarrow E$ ✓, $g_h \longrightarrow T$, $A \longrightarrow S$?

- No es posible utilizando solo la teoría clásica, es decir, utilizando solo las constantes universales G , c y k_B
- Dos problemas:
 - Dimensiones
 - Si el agujero negro tiene temperatura, debe radiar



h



Radiación de Hawking

[Termodinámica de agujeros negros]

- Dimensiones: $T = \frac{\hbar}{2\pi k_B c} g_h, \quad S = \frac{k_B c^3}{4G\hbar} A \quad \checkmark$

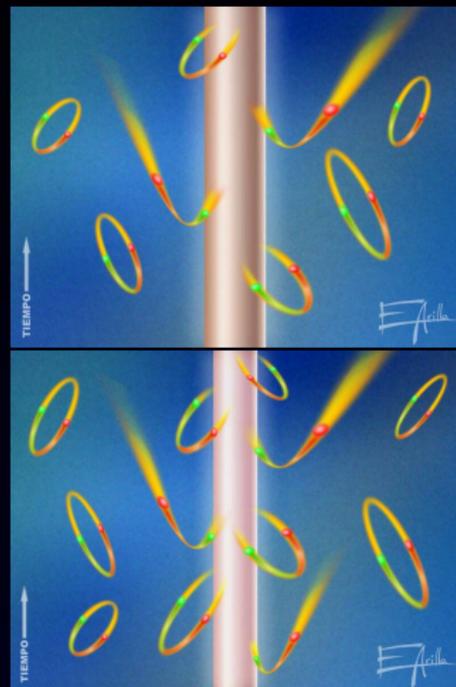


Radiación de Hawking

[Termodinámica de agujeros negros]

- Dimensiones: $T = \frac{\hbar}{2\pi k_{\text{B}} C} g_h$, $S = \frac{k_{\text{B}} C^3}{4G\hbar} A$ ✓

- El **vacío cuántico** es una *sopa* de fluctuaciones: **partículas virtuales**
- Cerca del horizonte, las partículas virtuales absorben energía del campo gravitatorio y se convierten en reales. **Algunas escapan del agujero**



Radiación de Hawking

[Termodinámica de agujeros negros]

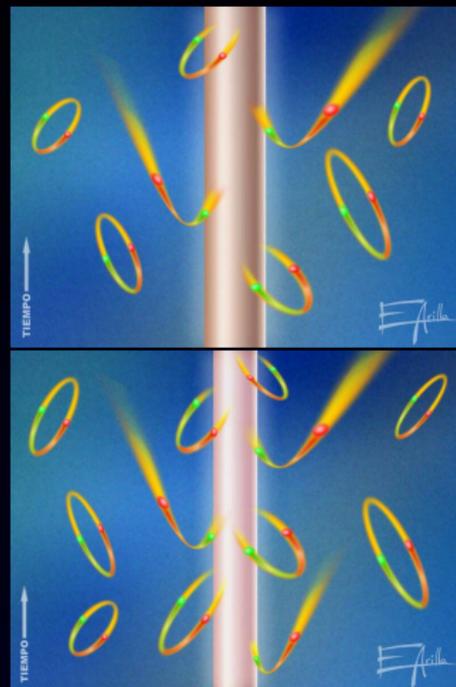
• Dimensiones: $T = \frac{\hbar}{2\pi k_B c} g_h$, $S = \frac{k_B c^3}{4G\hbar} A$ ✓

- El **vacío cuántico** es una *sopa* de fluctuaciones: **partículas virtuales**
- Cerca del horizonte, las partículas virtuales absorben energía del campo gravitatorio y se convierten en reales. **Algunas escapan del agujero**

- Desde muy lejos, esta emisión de partículas corresponde a la de un **cuerpo negro** con una temperatura

$$T = \frac{\hbar g_h}{2\pi k_B c} \propto \frac{1}{M}$$

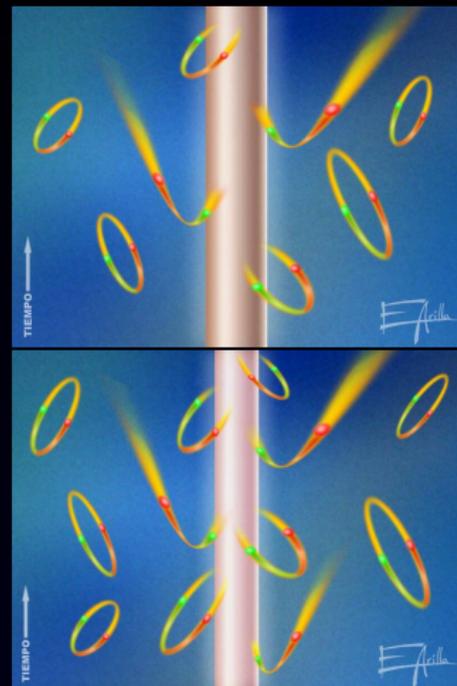
- Ejemplo egregio de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos



Evaporación de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

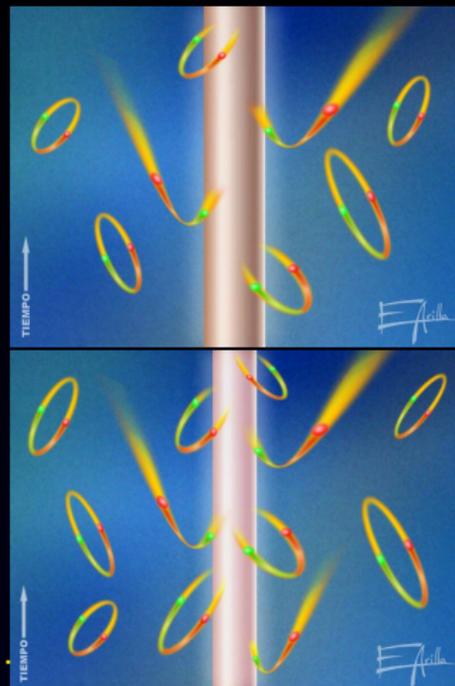
- El agujero negro pierde energía.
Se **evapora**
- A medida que disminuye la masa, aumenta la temperatura y, por tanto, la radiación
- No puede emitir toda la información. ¿Dónde está?



Evaporación de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

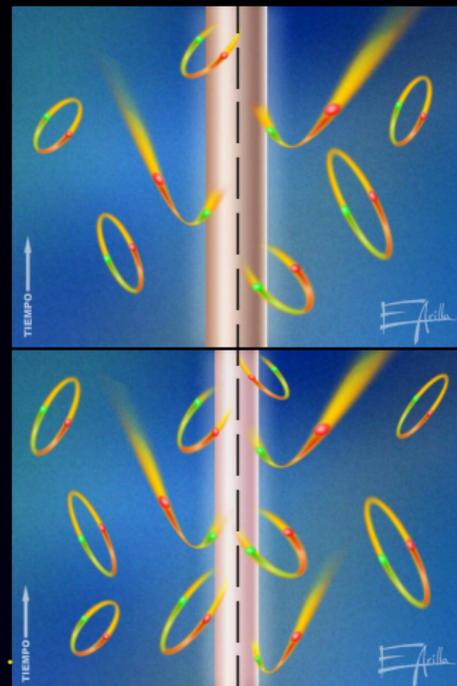
- El agujero negro pierde energía.
Se **evapora**
- A medida que disminuye la masa, aumenta la temperatura y, por tanto, la radiación
- No puede emitir toda la información. ¿Dónde está?
- Etapas finales de la evaporación:
 - Desaparece la singularidad
 - Remanente planckiano
 - Agujero de gusano
 - Mar de agujeros negros virtuales...



Evaporación de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

- El agujero negro pierde energía. Se **evapora**
- A medida que disminuye la masa, aumenta la temperatura y, por tanto, la radiación
- No puede emitir toda la información. ¿Dónde está?
- Etapas finales de la evaporación:
 - Desaparece la singularidad
 - Remanente planckiano
 - Agujero de gusano
 - Mar de agujeros negros virtuales...
- Por otro lado, con o sin evaporación, ¿qué pasa en la singularidad?



The background features a complex, multi-layered fractal pattern. On the left, there are dark, intricate fractal structures in shades of blue, purple, and brown. On the right, a large, glowing orange structure resembling a complex web or a series of interconnected filaments dominates the scene, set against a lighter, textured background.

gravidad , cuántica



gravidad

...pero ésta es otra historia

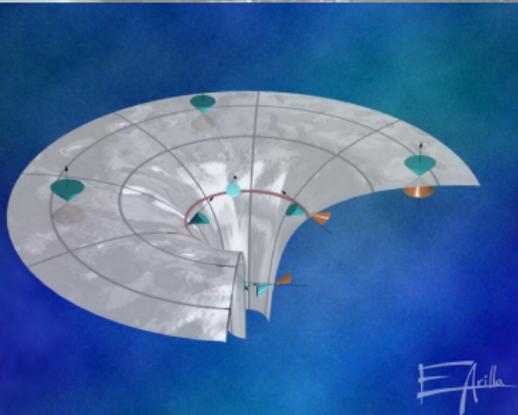
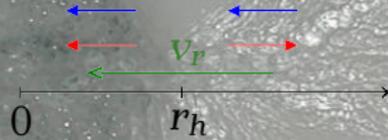
cuántica

agujeros negros

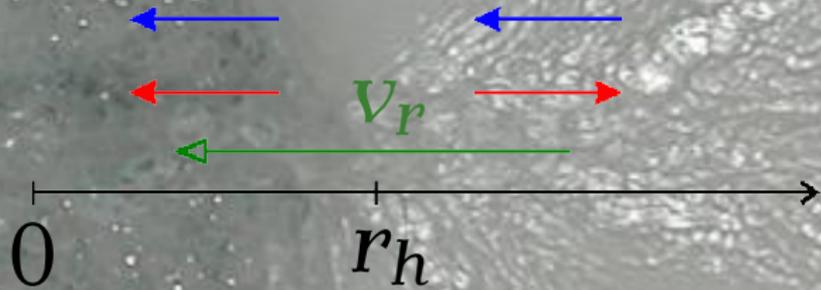


acústicos

agujeros negros



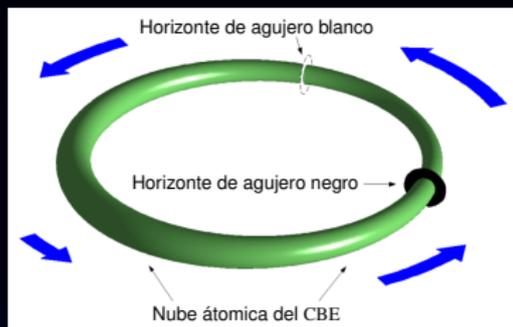
acústicos



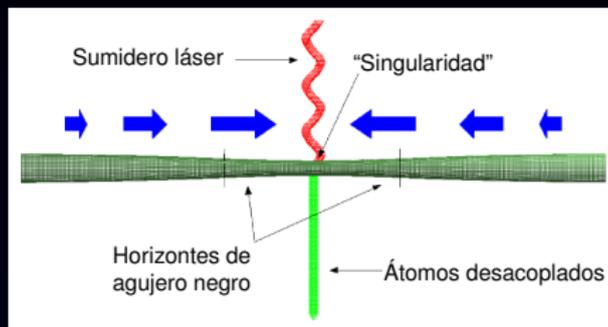
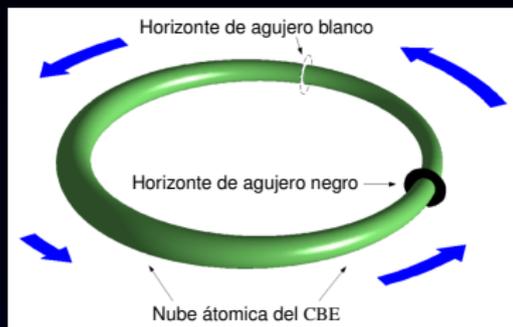
Experimentos en CBEs

[Agujeros negros acústicos]

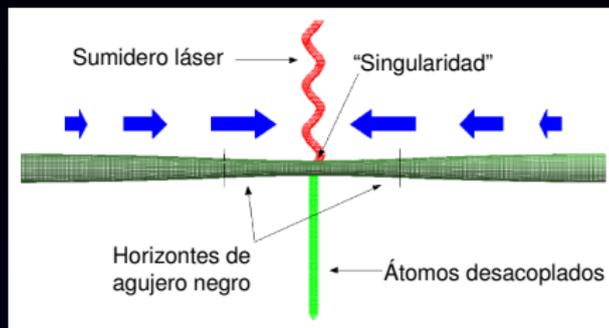
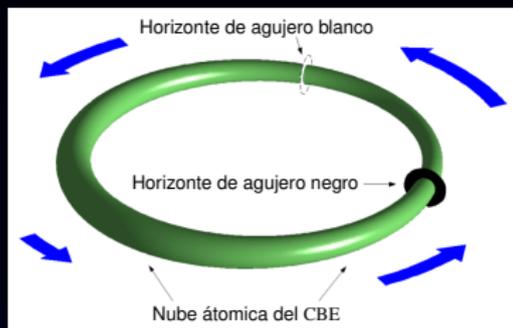
- Posibilidad de realización experimental (en CBEs)
 - Anillo. ¡Hecho (en anillo abierto)!



- Posibilidad de realización experimental (en CBEs)
 - Anillo. ¡Hecho (en anillo abierto)!
 - Sumidero. Experimentalmente más complicado. Hace falta un condensado muy grande o la posibilidad de alimentarlo continuamente



- Posibilidad de realización experimental (en CBEs)
 - Anillo. ¡Hecho (en anillo abierto)!
 - Sumidero. Experimentalmente más complicado. Hace falta un condensado muy grande o la posibilidad de alimentarlo continuamente

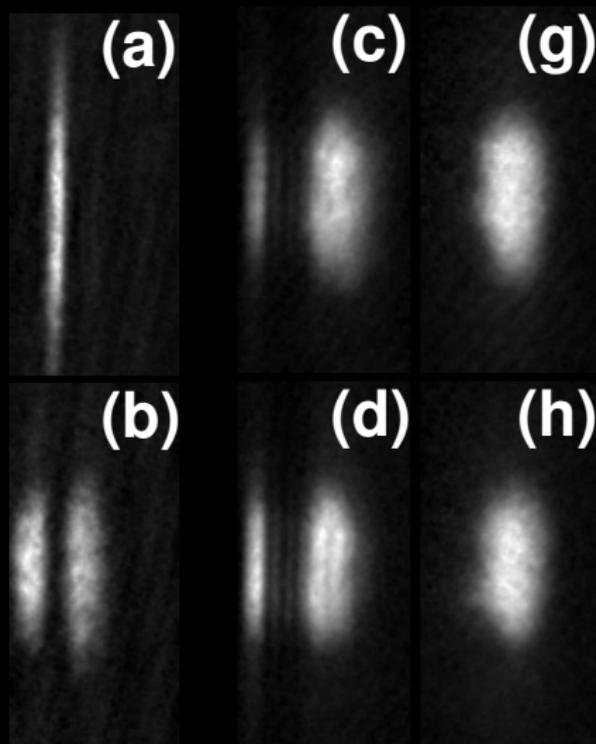


- Otros sistemas: ondas de gravedad...



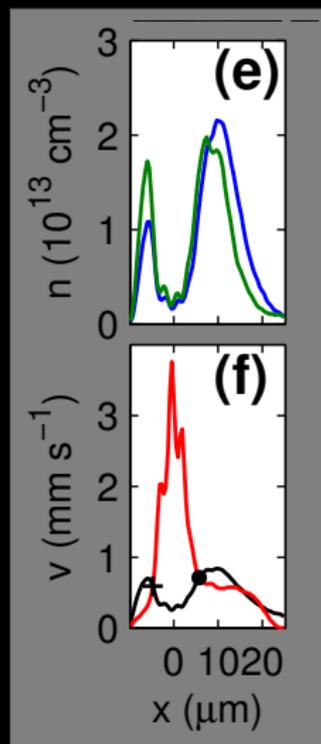
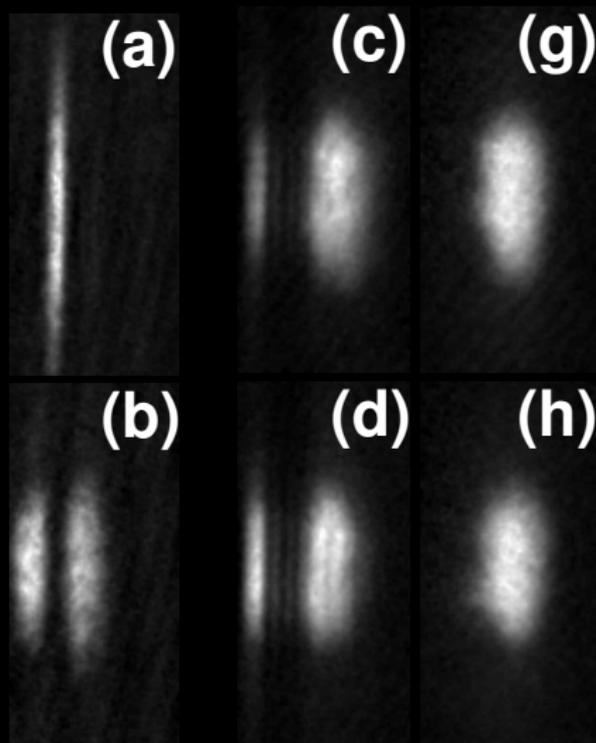
Agujero negro/blanco en un CBE

(O. Lahav, A. Itah, A. Blumkin, C. Gordon, J. Steinhauer)



Agujero negro/blanco en un CBE

(O. Lahav, A. Itah, A. Blumkin, C. Gordon, J. Steinhauer)



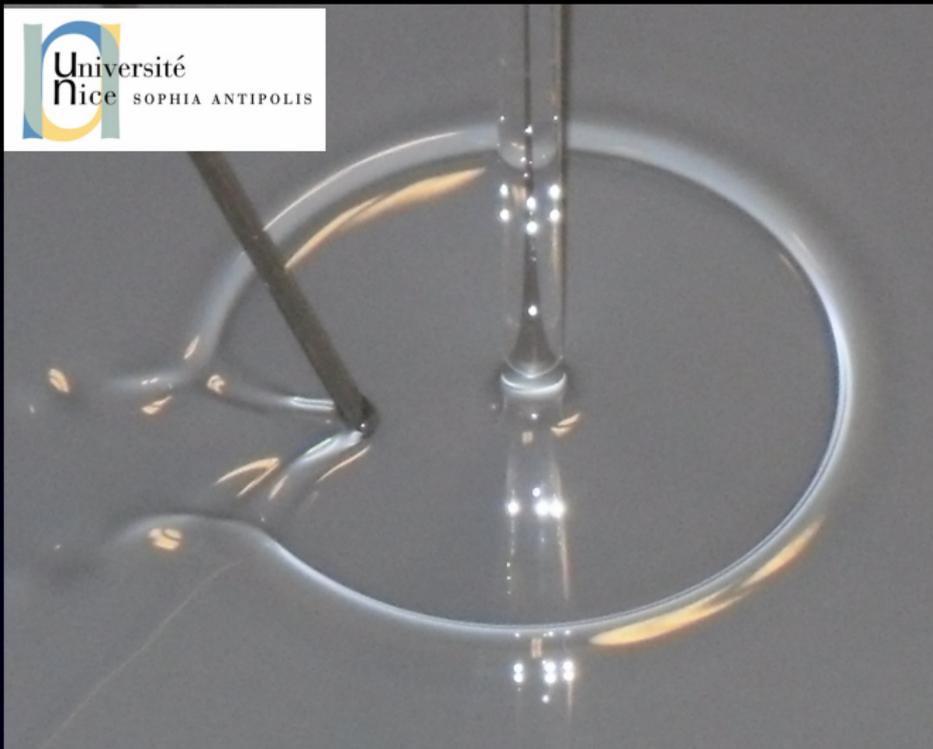
Experimentos con olas

[Agujeros negros acústicos]



Agujero blanco en aceite viscoso

(G. Jannes, R. Piquet, P. Maissa, C. Mathis, G. Rousseaux)



Resumen

- **Agujeros negros**
 - Ecuaciones de Einstein
 - Formación de un agujero negro estelar
 - Estructura de un agujero negro
 - Cómo y dónde encontrarlos
- **Termodinámica de agujeros negros**
 - Leyes de la termodinámica
 - Dinámica de agujeros negros
 - Radiación de Hawking
 - Evaporación de agujeros negros
- **Agujeros negros acústicos**
 - Experimentos en CBEs
 - Experimentos con olas



fin



fin

