

# agujeros negros

*luis j. garay*

<sup>1</sup>Universidad Complutense de Madrid

<sup>2</sup>Instituto de Estructura de la Materia, CSIC

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

<http://luisgaray.totalh.com>

*Madrid, 20 de noviembre de 2009*

*IX Semana de la Ciencia – IEM, CSIC*



EL UNIVERSO  
PARA QUE LO DESCUBRAS



AÑO INTERNACIONAL DE LA  
ASTRONOMÍA  
2009



# CSIC



AÑO INTERNACIONAL DE LA  
ASTRONOMÍA  
2009



# CSIC



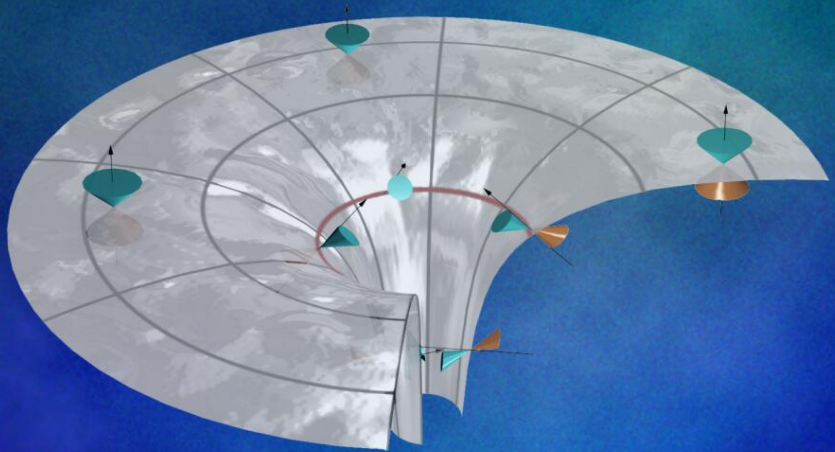
CONGRESO INTERNACIONAL DE LA  
ASTRONOMÍA  
2009

# 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
  - Agujeros negros acústicos en fluidos
  - Agujeros negros acústicos en CBEs
  - Experimentos

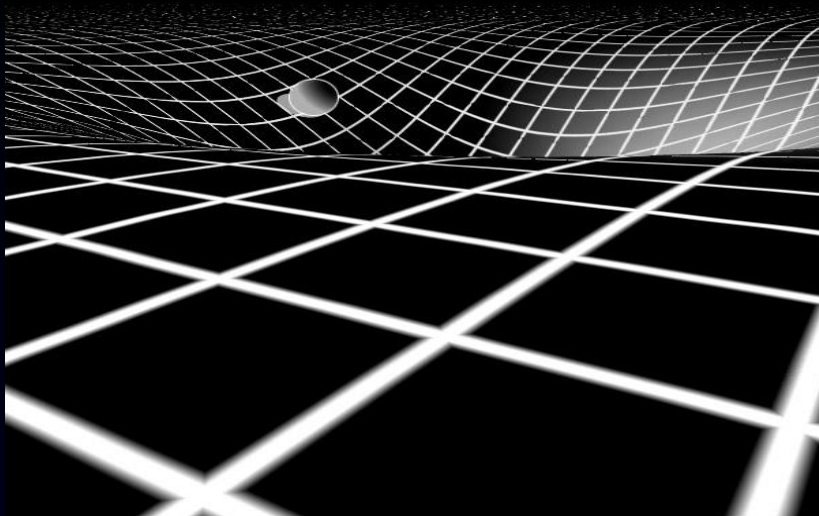


# agujeros negros



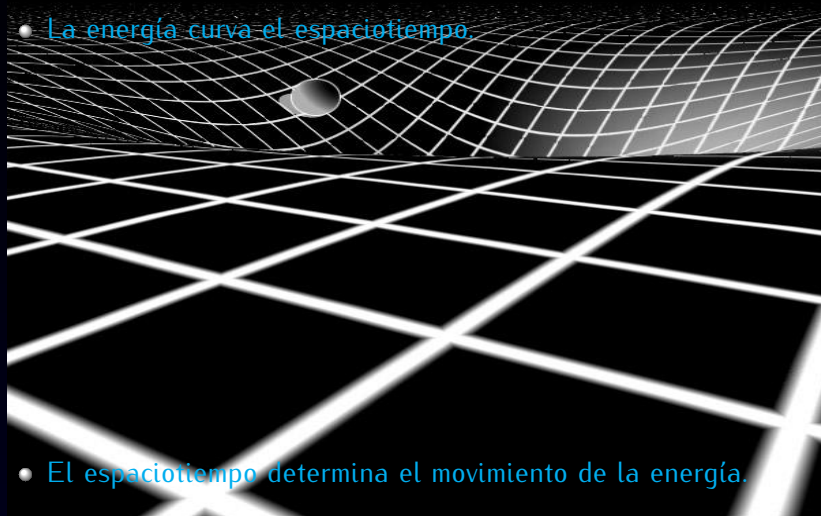
Arilla

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.



# Ecuaciones de Einstein

[Agujeros negros]

La relatividad general es una teoría geométrica para la interacción gravitatoria.

- La energía curva el espaciotiempo.

Ecuaciones de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^3} T_{\mu\nu}$$

*curvatura (Ricci)  
del espaciotiempo*

=

*densidad  
de energía*

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

## Fuerzas de marea

- El espaciotiempo determina el movimiento de la energía.



# *Ecuaciones de Einstein — Fuerzas de marea*

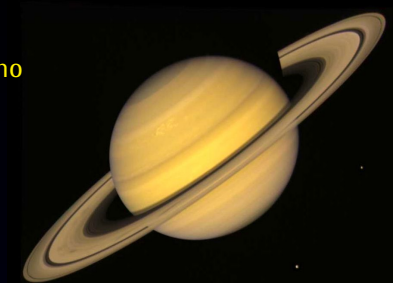
[Agujeros negros]



# Ecuaciones de Einstein — Fuerzas de marea

[Agujeros negros]

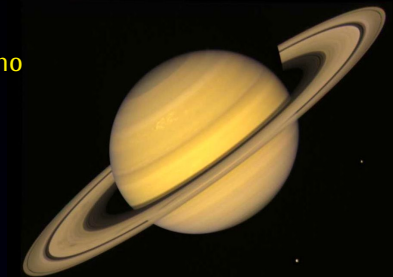
- Evitan que los anillos de Saturno se deshagan y formen satélites.
- Crean las mareas marinas.



# Ecuaciones de Einstein — Fuerzas de marea

[Agujeros negros]

- 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  $\Longleftrightarrow$  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  $\Longleftrightarrow$  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]

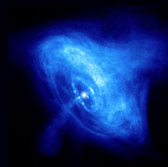
- Enana blanca ( $M \lesssim 1.4M_{\odot}$ ):
  - Ionización
  - Presión electrónica (principio de exclusión de Pauli)



# 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





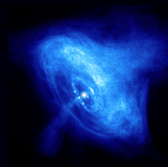
# Estado final del colapso

[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.



# 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.



# 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)

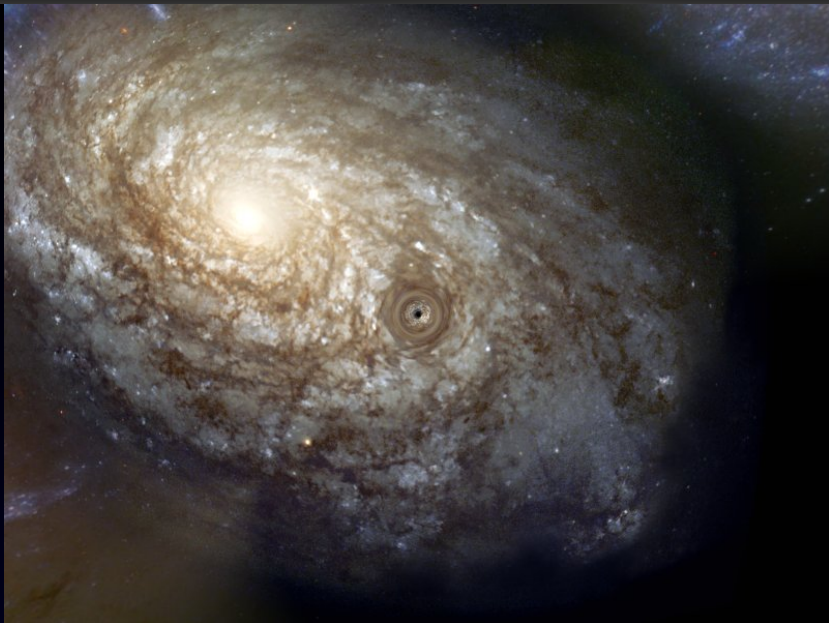
[Agujeros negros]

- 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,  $\Delta g$  es muy grande.





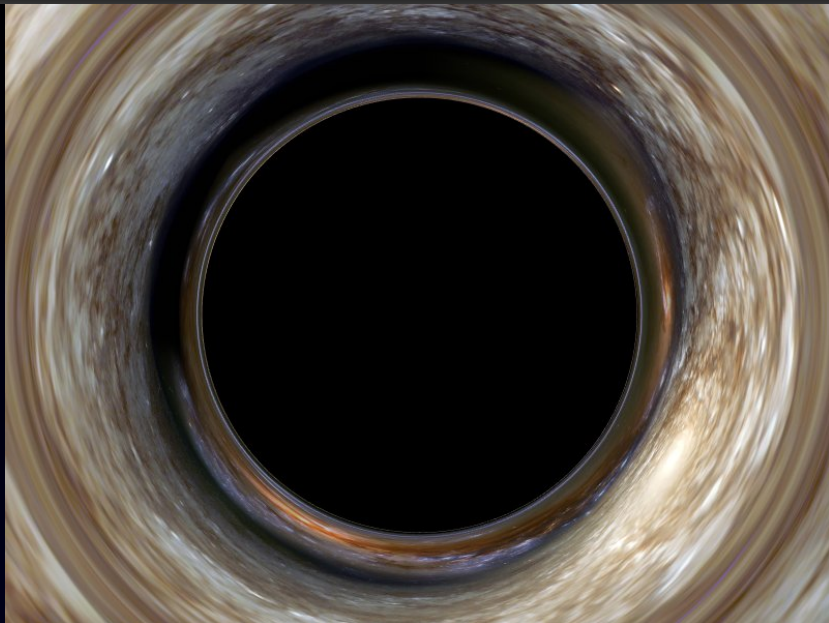
# Viaje a un agujero negro (ii) <http://stephenbrooks.org/misc/blackhole/> [Agujeros negros]



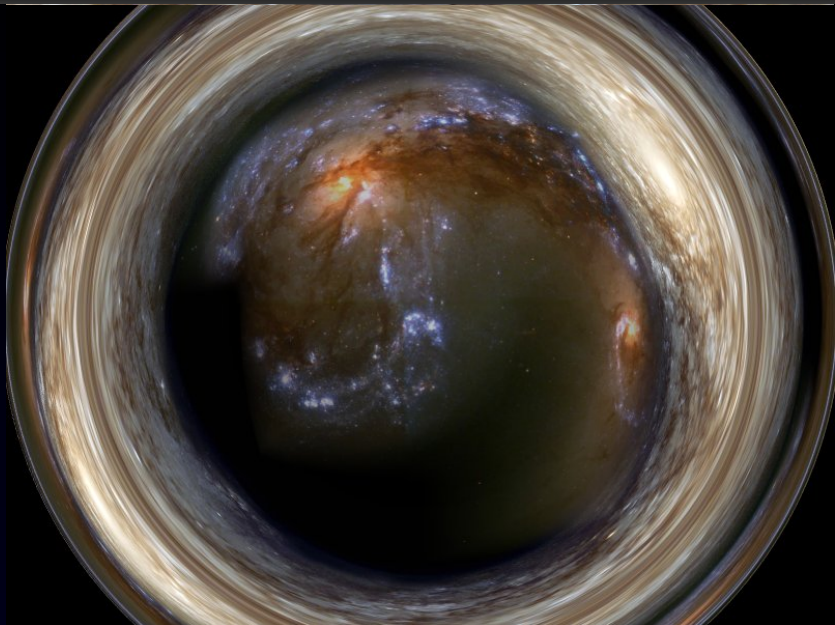
# Viaje a un agujero negro (ii) <http://stephenbrooks.org/misc/blackhole/> [Agujeros negros]



# Viaje a un agujero negro (ii) <http://stephenbrooks.org/misc/blackhole/> [Agujeros negros]



# Viaje a un agujero negro (ii) <http://stephenbrooks.org/misc/blackhole/> [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

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

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

- 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 y dónde encontrarlos

[Agujeros negros]

## • **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  $\leftarrow$
  - 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.

 *Kip S. Thorne*

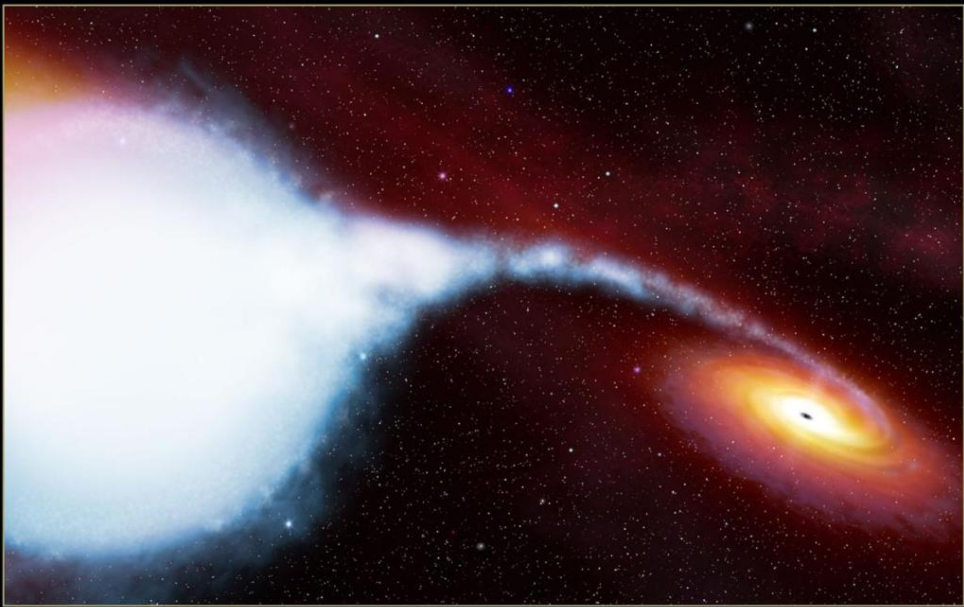
*Kip S. Thorne*

Witnessed this tenth  
day of December 1974.  
*Franklin D. Swets*

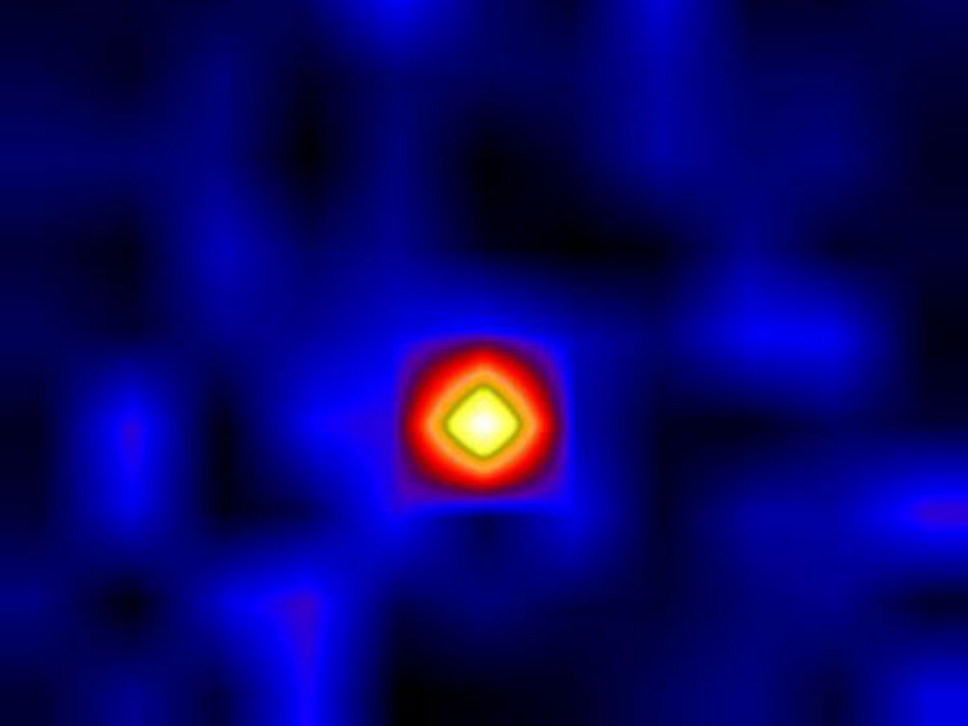
*Franklin D. Swets*

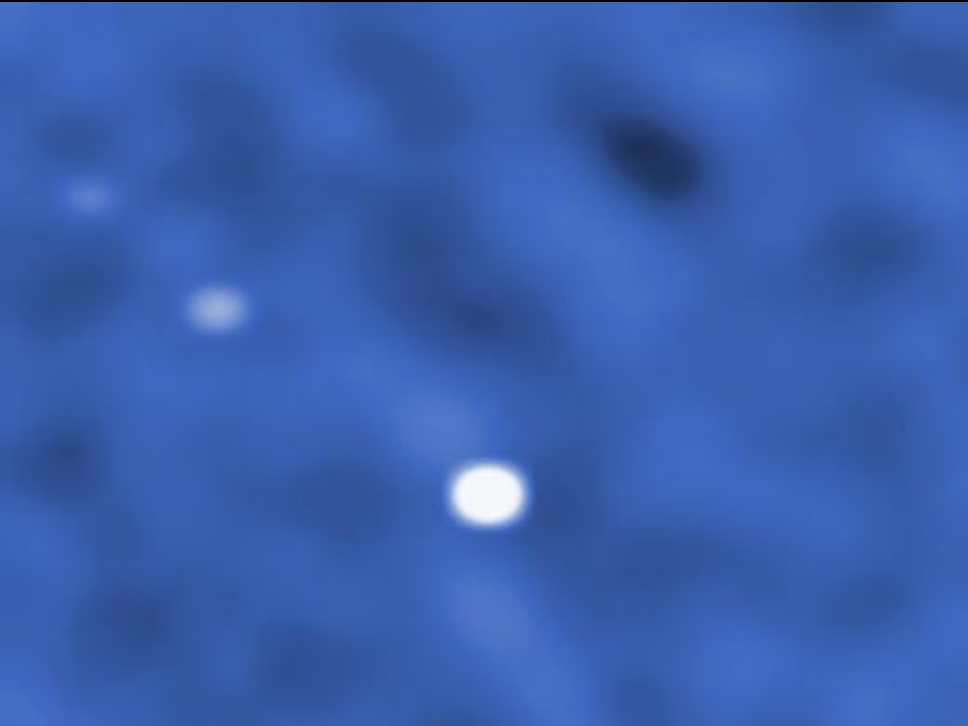






CYGNUS-X1 *Black hole*





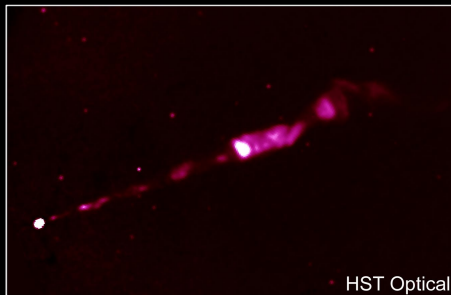
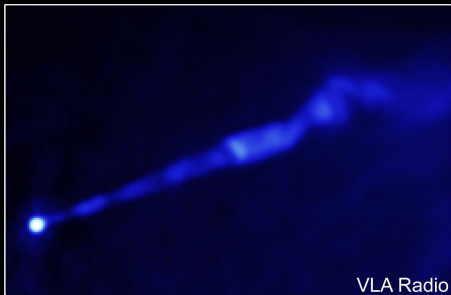
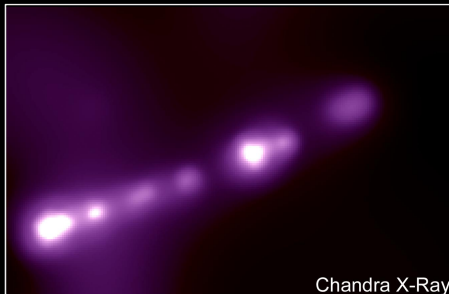




# Galaxia del sombrero



**M87**

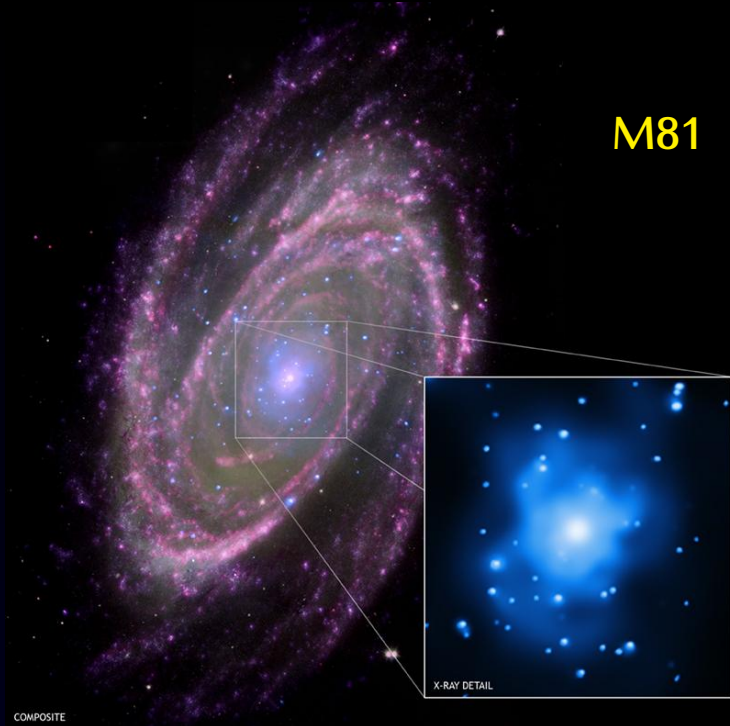








M81



COMPOSITE

X-RAY DETAIL

# Sagitario A\* (Vía Láctea)

SGR A\*



*termodinámica*



# Leyes de la termodinámica

[Termodinámica de agujeros negros]



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  $T = 0$ .



# Dinámica de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

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 1)



# Dinámica de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

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 1)

¿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]

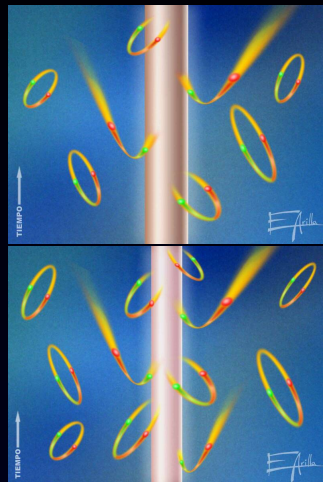
- Dimensiones:  $T = \frac{\hbar}{2\pi k_B c} g_h, \quad S = \frac{k_B c^3}{4G\hbar} A. \quad \checkmark$



# Radiación de Hawking

[Termodinámica de agujeros negros]

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

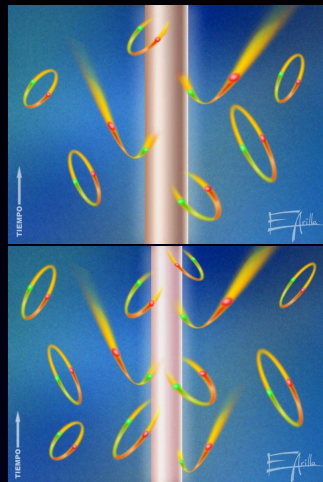
• Dimensiones:  $T = \frac{\hbar}{2\pi k_{\text{BC}}} g_h$ ,  $S = \frac{k_{\text{BC}}^3}{4G\hbar} A$ . ✓

- 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

$$T = \frac{\hbar g_h}{2\pi k_{\text{BC}}} \propto \frac{1}{M}.$$

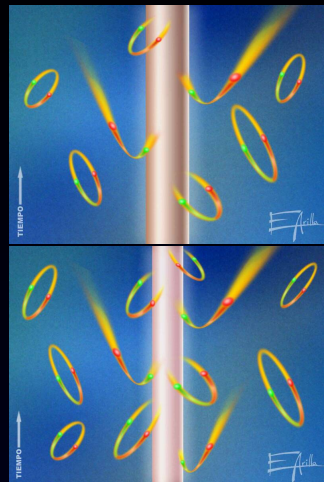
- Ejemplo egregio de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos.



# Evaporación de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

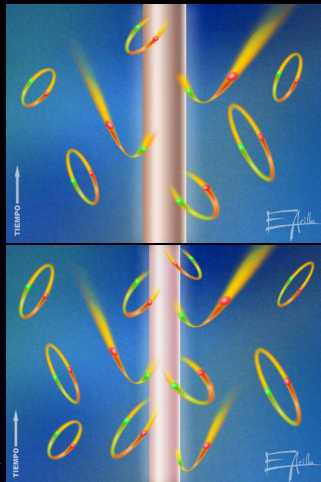
- El agujero negro pierde energía. Se **evapora**.
- A medida que disminuye la masa, aumenta la temperatura y, por tanto, la radiación.
- No puede emitir toda la información. ¿Dónde está?



# Evaporación de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

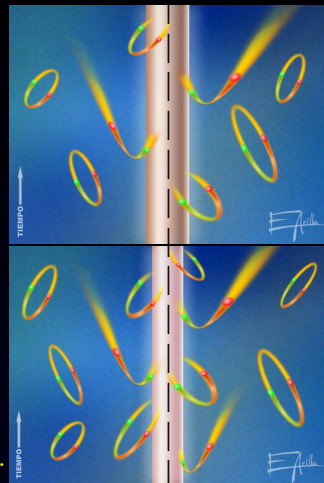
- El agujero negro pierde energía. Se **evapora**.
- A medida que disminuye la masa, aumenta la temperatura y, por tanto, la radiación.
- No puede emitir toda la información. ¿Dónde está?
- Etapas finales de la evaporación:
  - desaparece la singularidad;
  - remanente planckiano;
  - agujero de gusano;
  - 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 is a complex, abstract composition. It features a dense network of fine, intersecting lines in shades of orange, red, and brown, creating a web-like or fractal appearance. In the center, there is a prominent, glowing, golden-yellow structure that resembles a complex, multi-lobed shape or a stylized, organic form. The overall effect is one of intricate, organic complexity.

# gravidad cuántica



# gravidad

...pero ésta es otra historia

# cuántica

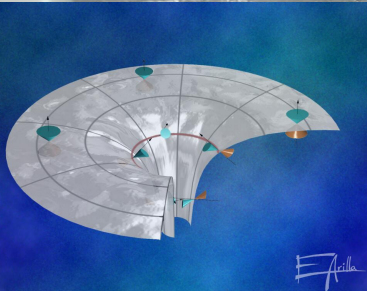
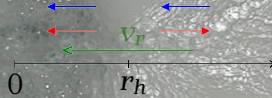


**agujeros negros**

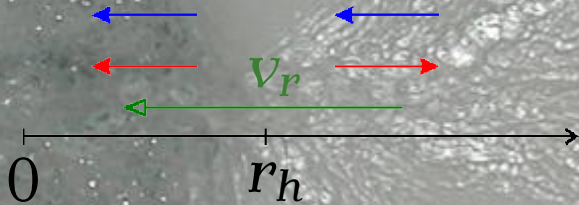


**acústicos**

# agujeros negros



# acústicos



# *Agujeros negros acústicos en fluidos (i)*

[Agujeros negros acústicos]

## Agujeros negros acústicos en la naturaleza

- viento solar
- acrecimiento de Bondi-Hoyle
- túneles de viento supersónicos



# *Agujeros negros acústicos en fluidos (i)*

[Agujeros negros acústicos]

## Agujeros negros acústicos en la naturaleza

- viento solar
- acrecimiento de Bondi-Hoyle
- túneles de viento supersónicos



no son útiles para  
nuestros propósitos



# Agujeros negros acústicos en fluidos (i)

[Agujeros negros acústicos]

## Agujeros negros acústicos en la naturaleza

- viento solar
  - acrecimiento de Bondi-Hoyle
  - túneles de viento supersónicos
- } no son útiles para nuestros propósitos
- condensados de Bose-Einstein:
    - sin viscosidad
    - con efectos cuánticos
    - relativamente simples
    - deterioro cuántico en los CBEs  $< 1\%$   
son sistemas muy limpios



## Agujeros negros acústicos en fluidos (ii)

[Agujeros negros acústicos]

- La analogía entre agujeros negros gravitatorios y acústicos solo es válida para aspectos **cinemáticos**, no dinámicos, es decir, para los que no hagan falta las ecuaciones de Einstein
- **No existe colapso** acústico, en comparación con el colapso gravitatorio
- Los agujeros negros acústicos son fruto de la **ingeniería**, no de la dinámica

...al menos de momento



# Agujeros negros acústicos en CBEs (i)

[Agujeros negros acústicos]

- Existen soluciones de tipo agujero negro, en los regímenes adecuados
- La existencia de soluciones no es suficiente. Además, han de ser estables ✓





# Agujeros negros acústicos en CBEs (i)

[Agujeros negros acústicos]

- Existen soluciones de tipo agujero negro, en los regímenes adecuados
- La existencia de soluciones no es suficiente. Además, han de ser estables ✓
- La radiación de Hawking acústica es pequeña pero, aún así, mejora las perspectivas de detección
  - Agujero negro solar:  $T_H \sim 60 \text{ nK}$ ,  $T_{\text{frc}} \sim 3 \text{ K}$
  - Agua:  $T_H \sim 1 \mu\text{K}$ ,  $T_{\text{agua}} \sim 300 \text{ K}$
  - CBE:  $T_H \sim 30 \text{ nK}$ ,  $T_{\text{CBE}} \sim 100 \text{ nK}$



# Agujeros negros acústicos en CBEs (i)

[Agujeros negros acústicos]

- Existen soluciones de tipo agujero negro, en los regímenes adecuados
- La existencia de soluciones no es suficiente. Además, han de ser estables ✓
- La radiación de Hawking acústica es pequeña pero, aún así, mejora las perspectivas de detección
  - Agujero negro solar:  $T_H \sim 60 \text{ nK}$ ,  $T_{\text{fre}} \sim 3 \text{ K}$
  - Agua:  $T_H \sim 1 \text{ } \mu\text{K}$ ,  $T_{\text{agua}} \sim 300 \text{ K}$
  - CBE:  $T_H \sim 30 \text{ nK}$ ,  $T_{\text{CBE}} \sim 100 \text{ nK}$
- Existen otros procesos radiativos (cuánticos) interesantes:  
**modos de relajación — ondas gravitatorias**



## *Agujeros negros acústicos en CBEs (ii)*

[Agujeros negros acústicos]

- Las perturbaciones de longitud de onda corta ven los átomos, es decir, requieren la teoría completa



## *Agujeros negros acústicos en CBEs (ii)*

[Agujeros negros acústicos]

- Las perturbaciones de longitud de onda **corta** ven los átomos, es decir, requieren la **teoría completa**
- Las perturbaciones de longitud de onda **larga** no ven los átomos, sino un potencial efectivo. Se comportan como un **campo relativista** en un espaciotiempo curvo efectivo.



## Agujeros negros acústicos en CBEs (ii)

[Agujeros negros acústicos]

- Las perturbaciones de longitud de onda **corta** ven los átomos, es decir, requieren la **teoría completa**
- Las perturbaciones de longitud de onda **larga** no ven los átomos, sino un potencial efectivo. Se comportan como un **campo relativista** en un espaciotiempo curvo efectivo.
- En gravedad, tenemos situación similar, pero no conocemos la teoría global, para todas las longitudes de onda.

Objetivo: aprender de otros sistemas.



## Agujeros negros acústicos en CBEs (ii)

[Agujeros negros acústicos]

- Las perturbaciones de longitud de onda **corta** ven los átomos, es decir, requieren la **teoría completa**
- Las perturbaciones de longitud de onda **larga** no ven los átomos, sino un potencial efectivo. Se comportan como un **campo relativista** en un espaciotiempo curvo efectivo.
- En gravedad, tenemos situación similar, pero no conocemos la teoría global, para todas las longitudes de onda.

Objetivo: aprender de otros sistemas.

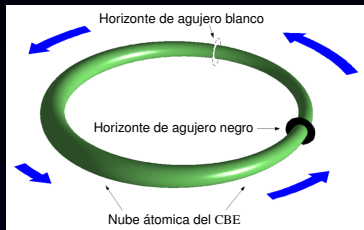
- **Modificaciones a la propagación relativista:**
  - Disuelven el horizonte
  - Modificaciones en la radiación de Hawking (en forma, intensidad y duración)



# Experimentos

[Agujeros negros acústicos]

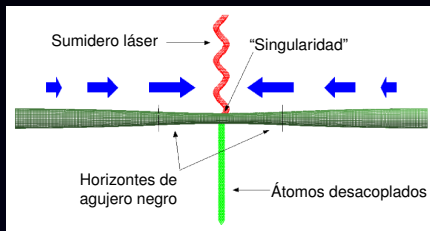
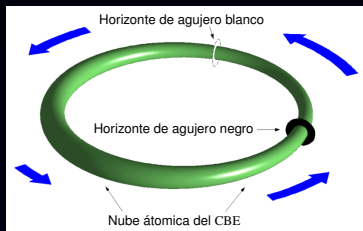
- Posibilidad de realización experimental
  - Anillo. ¡Hecho (en anillo abierto)!



# Experimentos

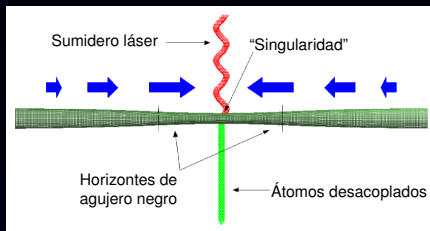
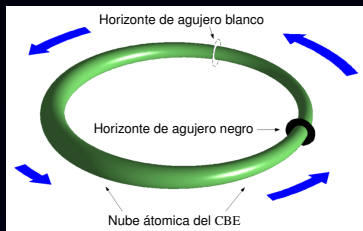
[Agujeros negros acústicos]

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

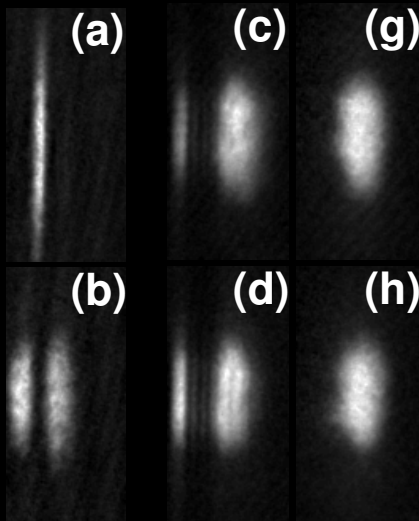


- Otros sistemas: helio...



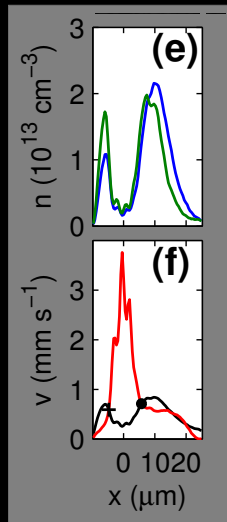
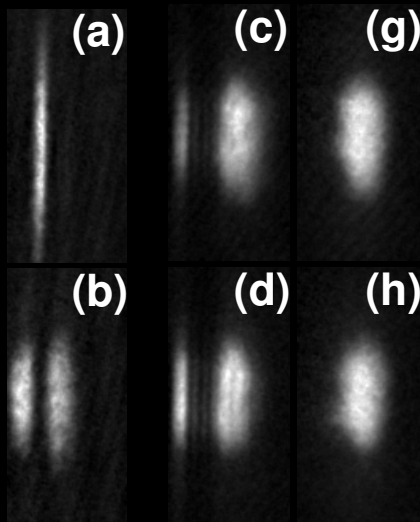
## Agujero negro/blanco en un CBE

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



## Agujero negro/blanco en un CBE

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



# 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
  - Agujeros negros acústicos en fluidos
  - Agujeros negros acústicos en CBEs
  - Experimentos





# the end