

agujeros negros

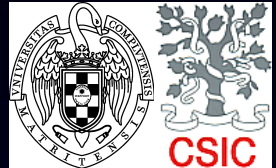
luis j. garay

¹Universidad Complutense de Madrid

²Instituto de Estructura de la Materia, CSIC

Madrid, 18 noviembre 2008

VIII Semana de la Ciencia – IEM, CSIC

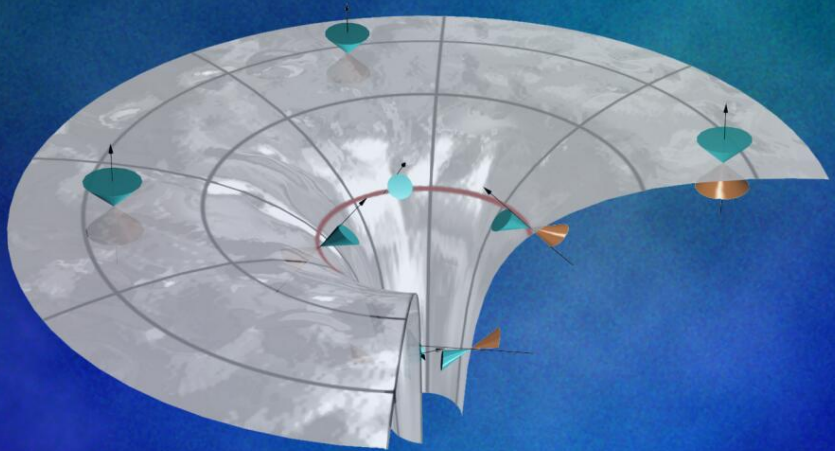


Resumen

- **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
 - Trabajos actuales



agujeros negros



Arilla

Ecuaciones de Einstein

[Agujeros negros]

- El espaciotiempo determina el movimiento de la energía.
- La energía curva el espaciotiempo.



- El espaciotiempo determina el movimiento de la energía.
- 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 \Rightarrow *curvatura (Weyl) = 0*

Fuerzas de marea

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)



- **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)



- 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

[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

[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

[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.



¿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 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 \longrightarrow masa del objeto
radio del horizonte \longleftarrow
 - 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.

Lefty Wright

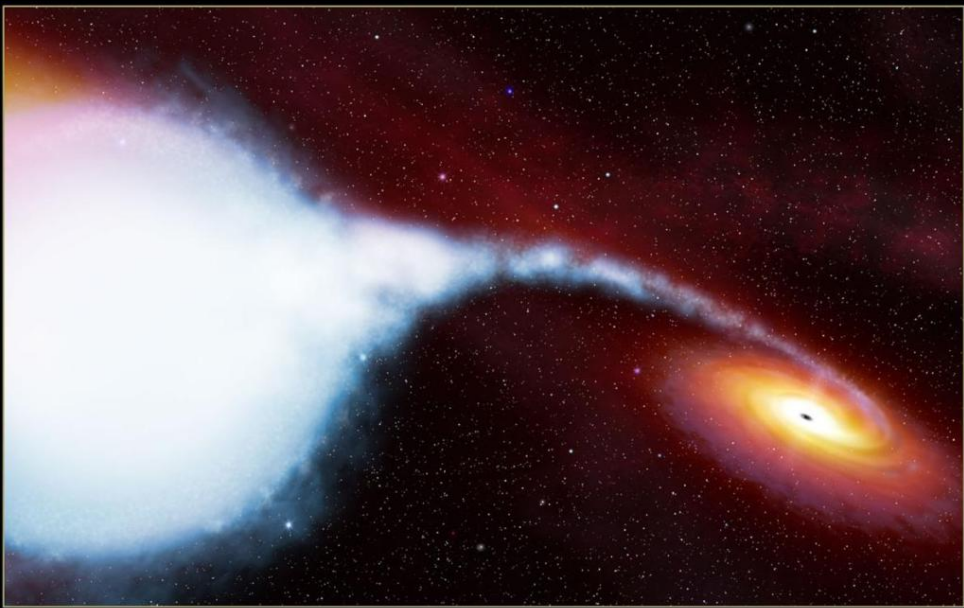
Kip S. Thorne



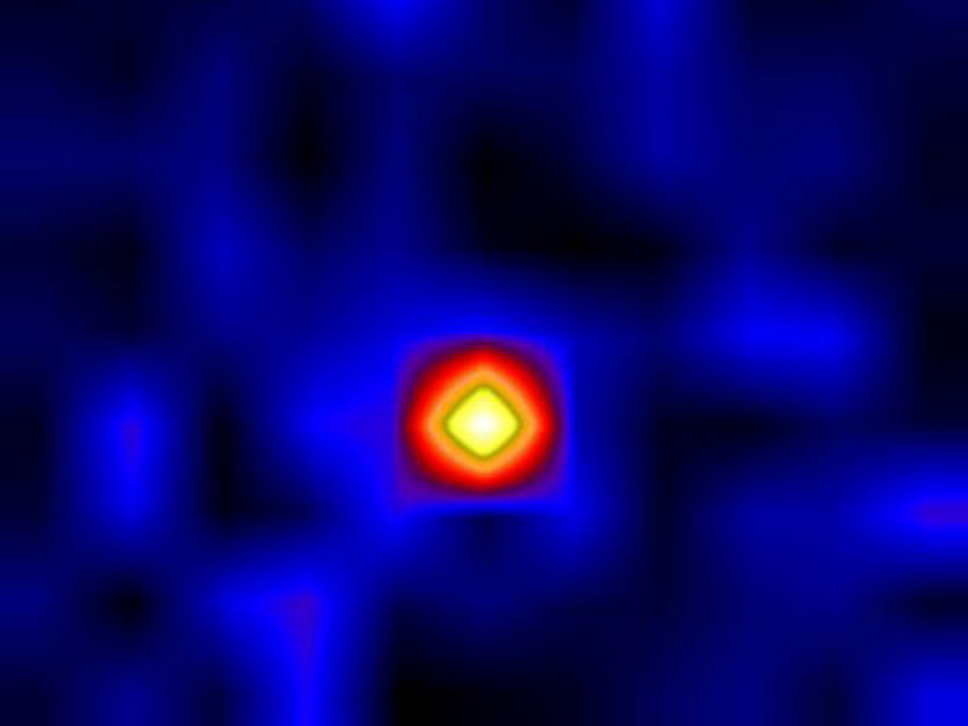
Witnessed this treaty
day of December 1974.

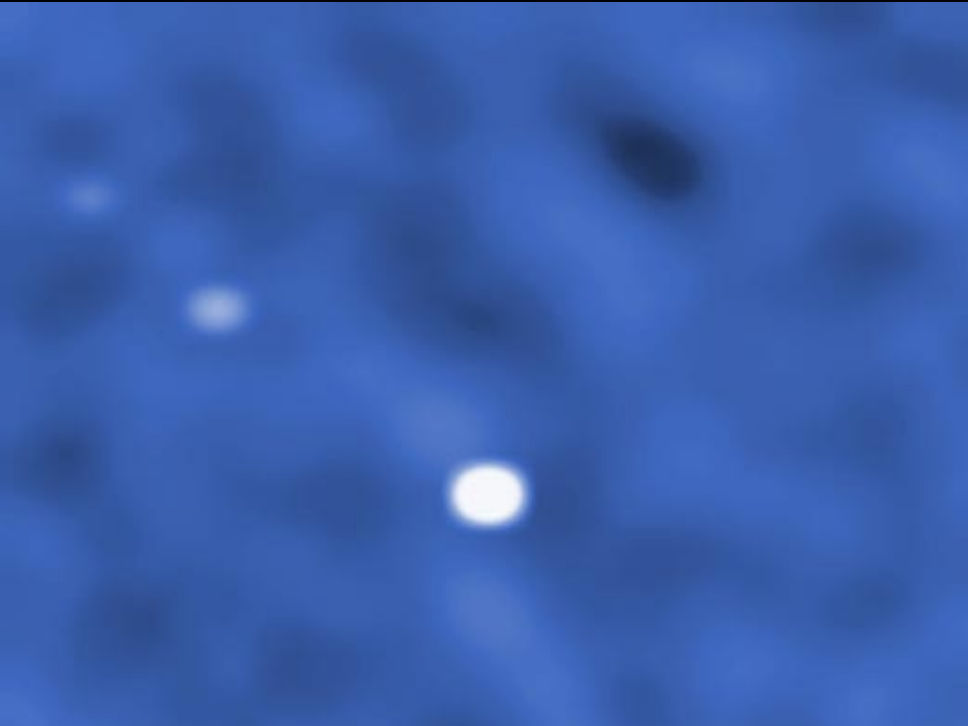


Franklin Armazylkas Nemor J



CYGNUS-X1 *Black hole*





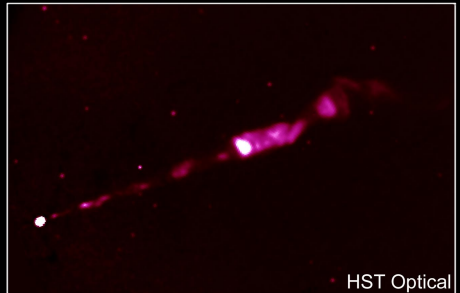
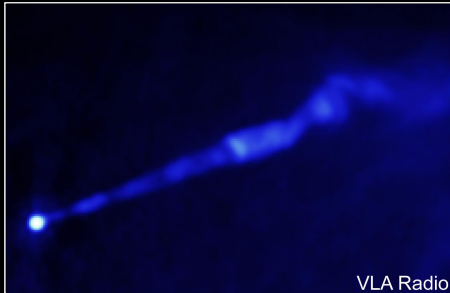
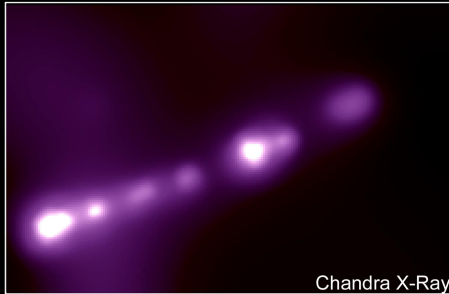




Galaxia del sombrero



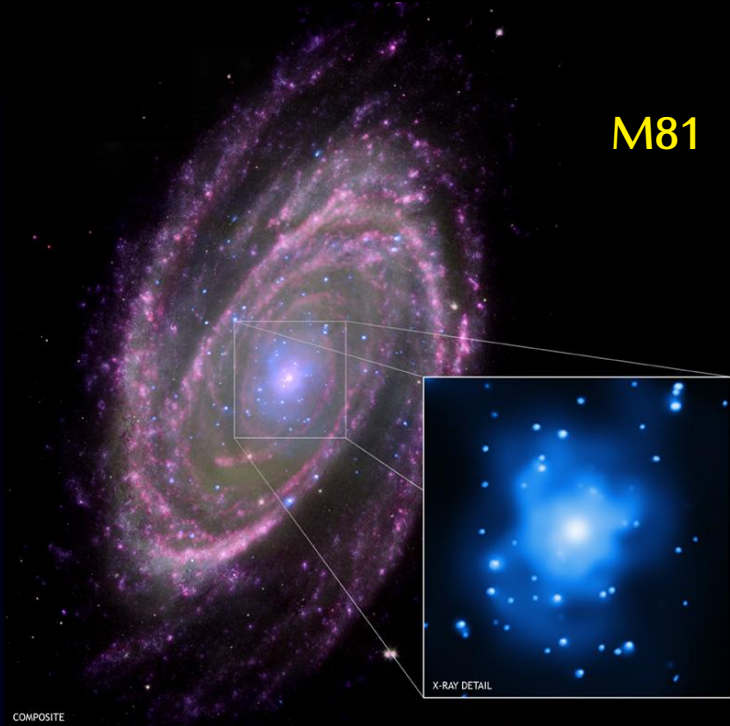
M87







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 $T = 0$.



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

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



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

- El área $A = 4\pi R_{\Sigma}^2$ nunca puede decrecer. (LEY 2)
- Gravedad en el horizonte: $g_h = \frac{GM}{R_{\Sigma}^2} = \text{const}_h \neq 0$. (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]

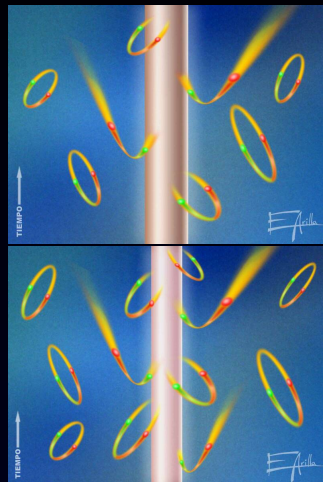
- Dimensiones: $T = \frac{\hbar}{2\pi k_{\text{BC}}} g_h, \quad S = \frac{k_{\text{BC}}^3}{4G\hbar} A. \quad \checkmark$



Radiación de Hawking

[Termodinámica de agujeros negros]

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



Radiación de Hawking

[Termodinámica de agujeros negros]

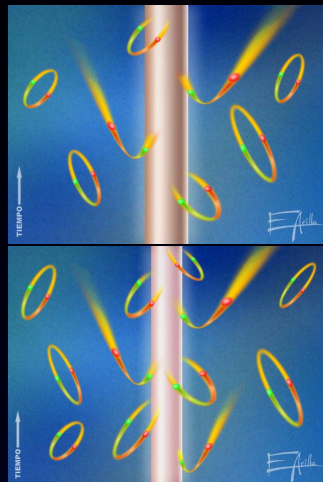
• Dimensiones: $T = \frac{\hbar}{2\pi k_{BC}} g_h,$ $S = \frac{k_{BC}^3}{4G\hbar} A.$ ✓

- 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

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

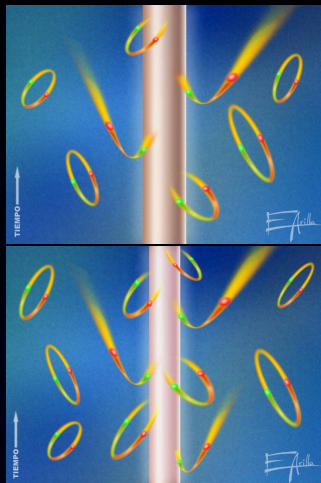
- Ejemplo egregio de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos.



Evaporación de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

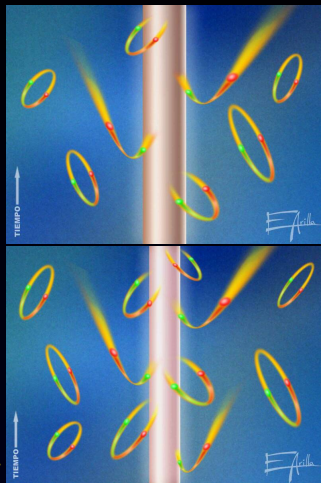
- El agujero negro pierde energía. Se *evapora*.
- A medida que disminuye la masa, aumenta la temperatura y, por tanto, la radiación.
- No puede emitir toda la información. ¿Dónde está?



Evaporación de agujeros negros

[Termodinámica de agujeros negros]

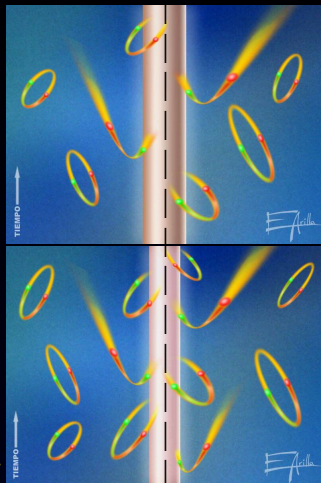
- El agujero negro pierde energía. Se **evapora**.
- A medida que disminuye la masa, aumenta la temperatura y, por tanto, la radiación.
- No puede emitir toda la información. ¿Dónde está?
- Etapas finales de la evaporación:
 - desaparece la singularidad;
 - remanente planckiano;
 - agujero de gusano;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



gravedad cuántica



gravedad

... pero ésta es otra historia

cuántica

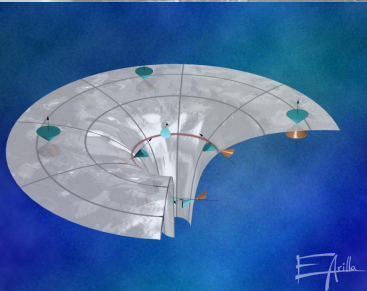
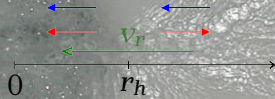


agujeros negros

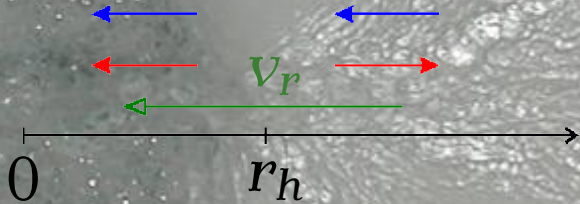


acústicos

agujeros negros



acústicos



Agujeros negros acústicos en la naturaleza

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



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 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



- 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 ✓



- 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: $T_H \sim 30 \text{ nK}$, $T_{\text{CBE}} \sim 100 \text{ nK}$



- 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: $T_H \sim 30 \text{ nK}$, $T_{\text{CBE}} \sim 100 \text{ nK}$

- Existen otros procesos radiativos (cuánticos) interesantes:

modos de relajación — ondas gravitatorias

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



- 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.



- 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.



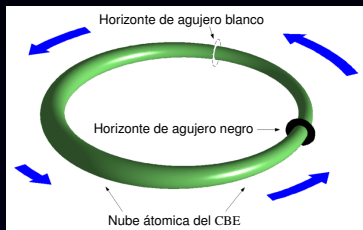
- Las perturbaciones de longitud de onda **corta** ven los átomos, es decir, requieren la **teoría completa**
- Las perturbaciones de longitud de onda **larga** no ven los átomos, sino un potencial efectivo. Se comportan como un **campo relativista** en un espaciotiempo curvo efectivo.
- En gravedad,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

Objetivo: aprender de otros sistemas.

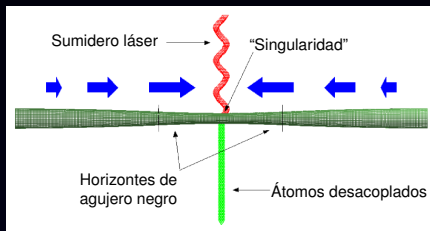
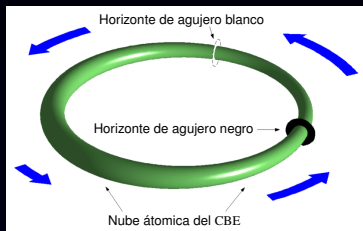
- **Modificaciones a la propagación relativista:**
 - **Disuelven el horizonte**



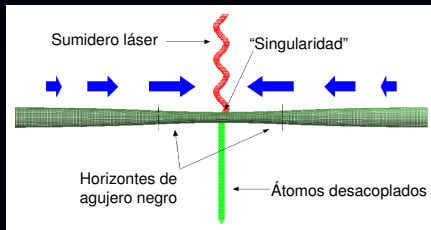
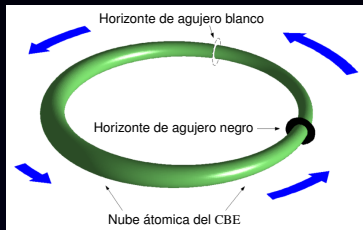
- Posibilidad de realización experimental
 - Anillo. Sin dificultades aparentes



- Posibilidad de realización experimental
 - Anillo. Sin dificultades aparentes
 - Sumidero. Experimentalmente más complicado. Hace falta un condensado muy grande o la posibilidad de alimentarlo continuamente



- Posibilidad de realización experimental
 - Anillo. Sin dificultades aparentes
 - Sumidero. Experimentalmente más complicado. Hace falta un condensado muy grande o la posibilidad de alimentarlo continuamente



- Otros sistemas: helio...

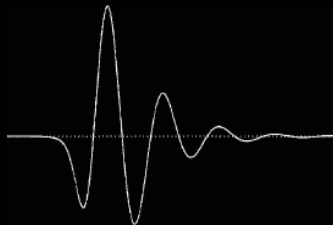


Modos cuasinormales (i)

[Agujeros negros acústicos, actual]

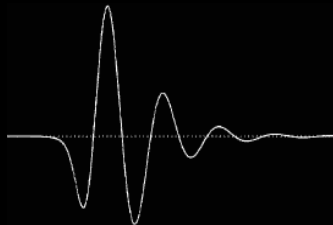
Los agujeros negros perturbados emiten radiación gravitatoria

- *Régimen inicial*: depende de la forma concreta de la perturbación
- *Oscilación amortiguada (MQNs)*: depende solo del agujero negro
- *Cola polinómica*



Los agujeros negros perturbados emiten radiación gravitatoria

- *Régimen inicial*: depende de la forma concreta de la perturbación
- *Oscilación amortiguada (MQNs)*: depende solo del agujero negro
- *Cola polinómica*



- Relajación — "modos de timbre"
- Espectro discreto
- relajación lenta: $\tau \sim R_S/c \gg t_p$

Modos cuasinormales (ii)

[Agujeros negros acústicos, actual]

Condiciones de contorno

- El horizonte es permeable
- Algunos modos tienen velocidad supersónica y pueden salir



Modos cuasinormales (ii)

[Agujeros negros acústicos, actual]

Condiciones de contorno

- El horizonte es permeable
- Algunos modos tienen velocidad supersónica y pueden salir

Resultado

- Espectro continuo
- Tiempo de relajación muy corto (análogo a t_p)

Extrapolación/especulación para agujeros negros gravitatorios

- El espectro de agujeros negros también contiene un sector continuo de modos cuasinormales de vida muy corta: se deberían a efectos cuánticos en el horizonte que modificarían las leyes de propagación (?)



Modificación de la radiación de Hawking (i)

[Agujeros negros acústicos, actual]

Agujeros negros gravitatorios

- La radiación de Hawking depende de la física de muy alta energía cerca del horizonte
- Las leyes de la gravedad podrían verse modificadas por efectos cuánticos



Modificación de la radiación de Hawking (i)

[Agujeros negros acústicos, actual]

Agujeros negros gravitatorios

- La radiación de Hawking depende de la física de **muy alta energía** cerca del horizonte
- Las leyes de la gravedad podrían verse modificadas por efectos cuánticos

Agujeros negros acústicos en CBEs

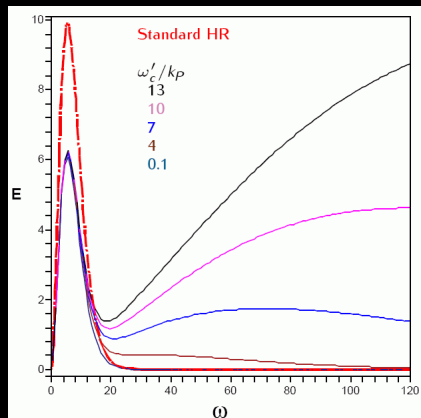
- Incorporan modificaciones cuánticas
- El horizonte es difuso y permeable
- La naturaleza de la radiación de Hawking depende de estas modificaciones (superluminales)
 - en su forma
 - en su duración



Modificación de la radiación de Hawking (ii)

[Agujeros negros acústicos, actual]

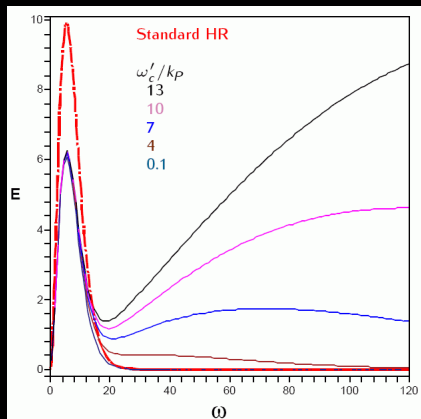
Modificación de la forma



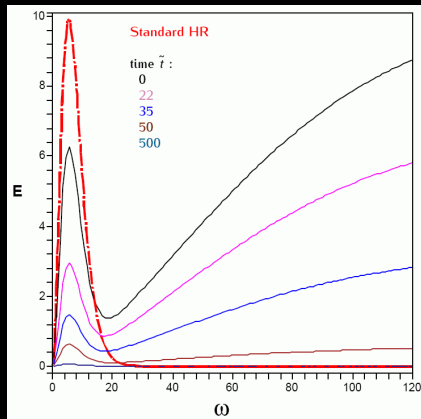
Modificación de la radiación de Hawking (ii)

[Agujeros negros acústicos, actual]

Modificación de la forma



Modificación de la duración



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
 - Trabajos actuales



the end

