

Agujeros negros

¿Agujeros? ¿Negros?

luis j. garay

Depto. de Física Teórica II, Universidad Complutense de Madrid

IEM-CSIC

<https://sites.google.com/site/luisjgaray>

Semana de la Ciencia

Madrid, 8 de noviembre de 2016



Agujeros negros

¿Agujeros? ¿Negros?

luis j. garay

<https://sites.google.com/site/luisjgaray>

Universidad Complutense de Madrid

IEM-CSIC



XVI SEMANA
DE LA
CIENCIA

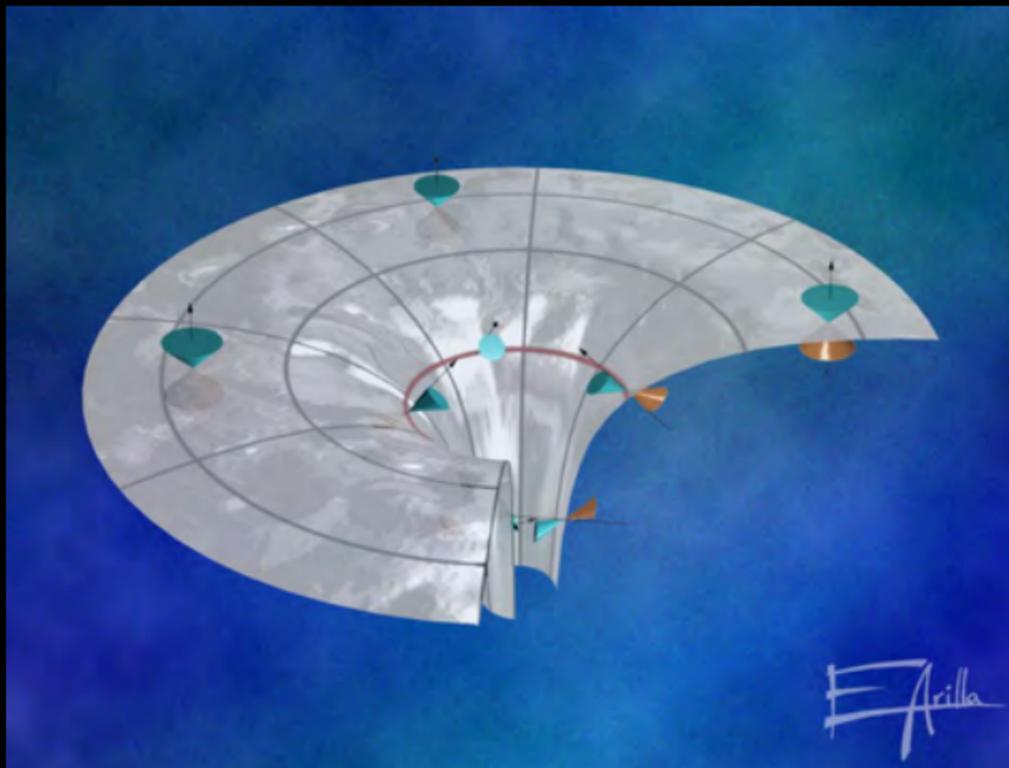
Madrid 2016 (7-20 de noviembre)

Instituto de Estructura de la Materia (CSIC)

Índice

1. Agujeros negros	3
1.1. Colapso gravitatorio	4
1.2. Estructura de un agujero negro	9
1.3. Cómo y dónde encontrarlos	21
2. ¿Negros?	31
2.1. Radiación de Hawking	32
2.2. Evaporación de agujeros negros	33
3. ¿Agujeros?	35
3.1. Una propuesta de colapso	38
3.2. El estado final	41
3.3. Consecuencias observacionales	42

1. Agujeros negros



1.1. Colapso gravitatorio

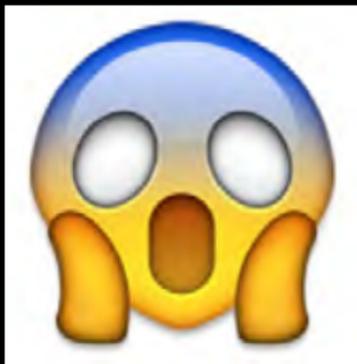
Formación de un agujero negro estelar

Nacimiento y muerte de una estrella:

- 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



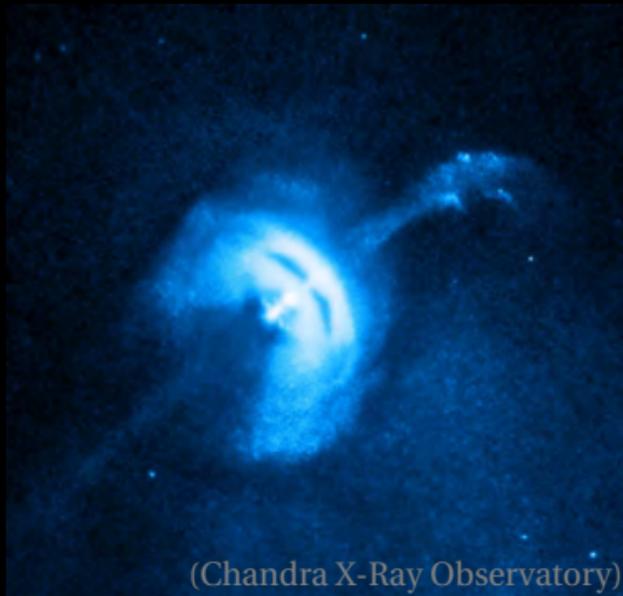
Estado final del colapso

- Enana blanca ($M \lesssim 1,4M_{\odot}$):
 - Ionización
 - Presión electrónica (principio de exclusión de Pauli)



(Chandra X-Ray Observatory)

- Estrella de neutrones ($1,4M_{\odot} \gtrsim M \lesssim 3M_{\odot}$):
 - $e^{-} + p^{+} \rightarrow n + \nu$
 - Presión neutrónica (principio de Pauli)
 - Muy densa y pequeña



(Chandra X-Ray Observatory)

- Agujero negro ($M \gtrsim 3M_{\odot}$):
 - La presión neutrónica no puede compensar la gravedad
 - La estrella colapsa: Se forma un agujero negro

Las estrellas más grandes *arden* más rápido para compensar la mayor fuerza gravitatoria

Al final, fracasan

Los agujeros negros se caracterizan solo por su masa y por su momento angular (“cantidad de rotación”)

Los agujeros negros no tienen pelo

(aún menos que yo)

1.2. Estructura de un agujero negro

- Los agujeros negros están hechos de espaciotiempo curvo y de nada más; no de materia
- Los agujeros negros están vacíos



Singularidad

- En el centro del agujero negro, la densidad es infinita
- Las fuerzas de marea son tan grandes que trastornan el espaciotiempo hasta hacerlo caótico (como cuando se amasa pan) — conjetura BKL (Belinsky-Khalatnikov-Lifshitz)
- *Ecs. de Einstein:*
curvatura infinita \implies ruptura del espaciotiempo



(J. Pollock, One: Number 31, 1950)

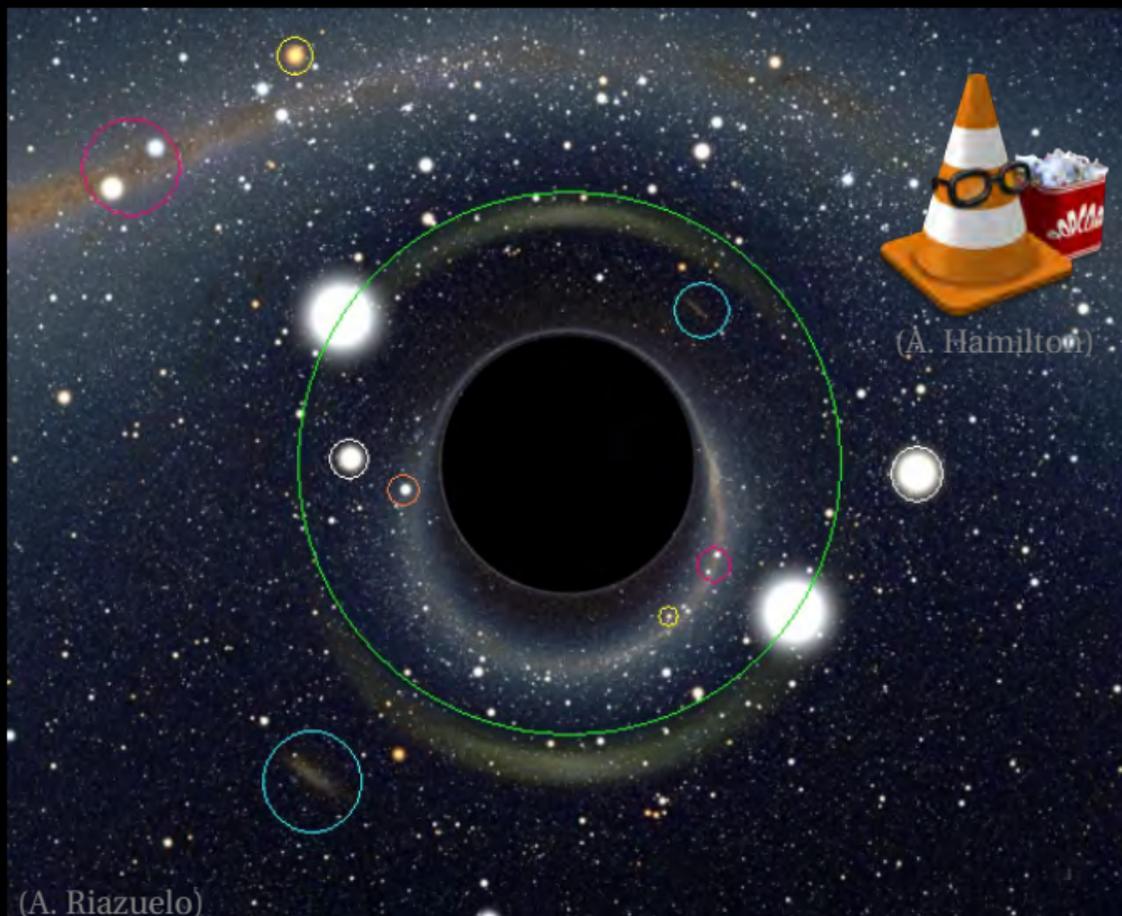
Viaje a un agujero negro

- Según un laboratorio fijo alejado:
 - La nave disminuye su velocidad y necesita un tiempo infinito para llegar al horizonte
 - La nave enrojece y dejan de verla

- Según la nave:
 - La nave cruza el horizonte sin problemas
 - Fuerzas de marea cada vez mayores:
 - ★ Espaguetificación
 - ★ Cerca de la singularidad son demasiado grandes
El espacio es un caos
 - La singularidad es inevitable (en tiempo finito)

Lentes gravitatorias



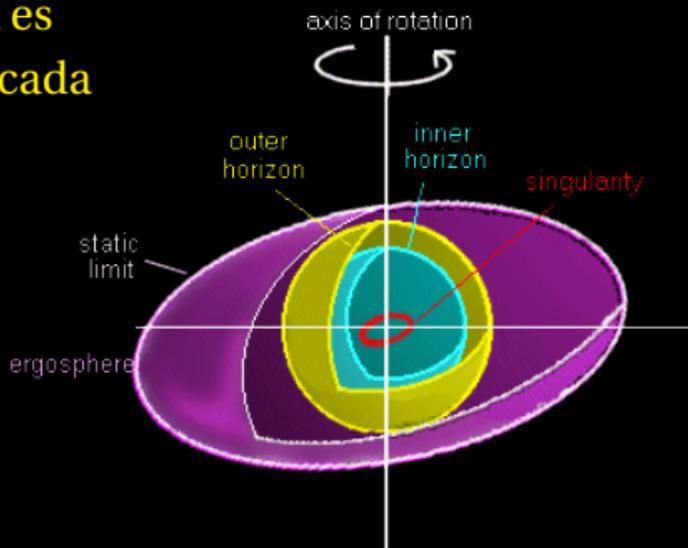


(A. Riazuelo)

(A. Hamilton)

Rotación

- Los agujeros negros pueden estar en rotación
- El espacio que los rodea se ve arrastrado en un torbellino
- La estructura interna es bastante más complicada



Disco de acreción

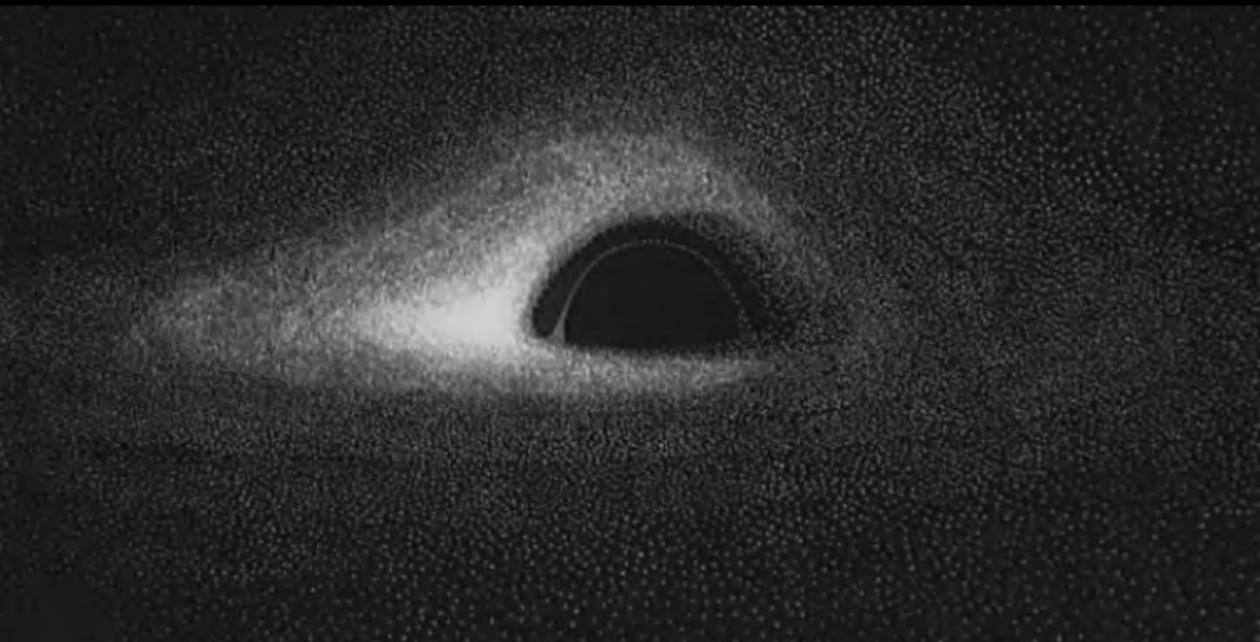
- La materia que cae a un agujero negro sufre fuerzas de marea y se desintegra formando un disco que gira alrededor del agujero negro



(NASA)



(O. James et al., 2015)



(J.P. Luminet, 1979)

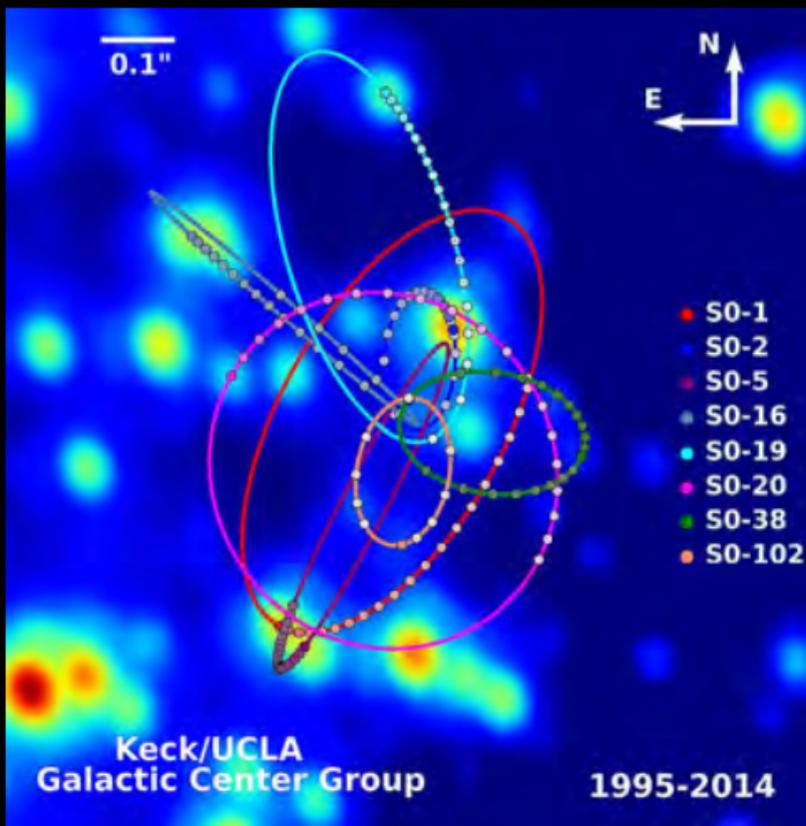
1.3. Cómo y dónde encontrarlos

■ *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



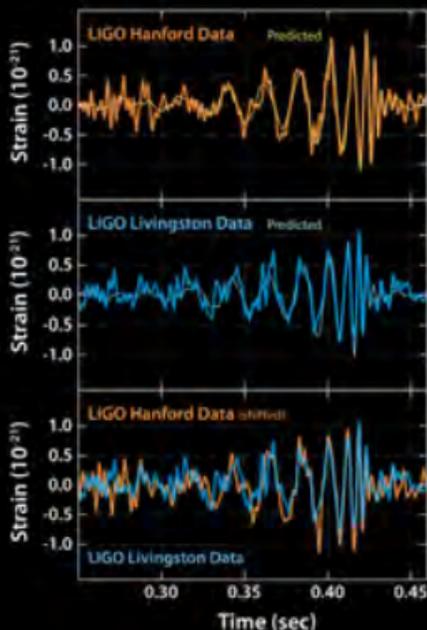
Trayectorias de
estrellas alrededor
del agujero negro
de Sagitario A*,
en el centro de la
Vía Láctea

(4 millones de ma-
sas solares)



(ESO/ S. Gillessen,
R. Genzel, 2015)

- Ondas gravitatorias detectadas por LIGO en 2015
 - Coalescencia de dos agujeros negros



■ *Dónde encontrarlos ...*



Cygnus X-1

(Carnegie Observatories)



Nebulosa del Tulipán, Cygnus X-1

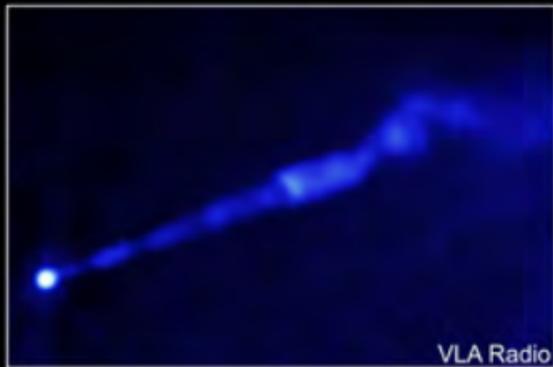


Galaxia del sombrero

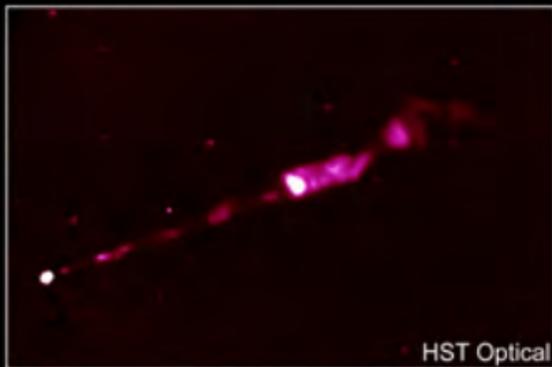
M87



Chandra X-Ray



VLA Radio

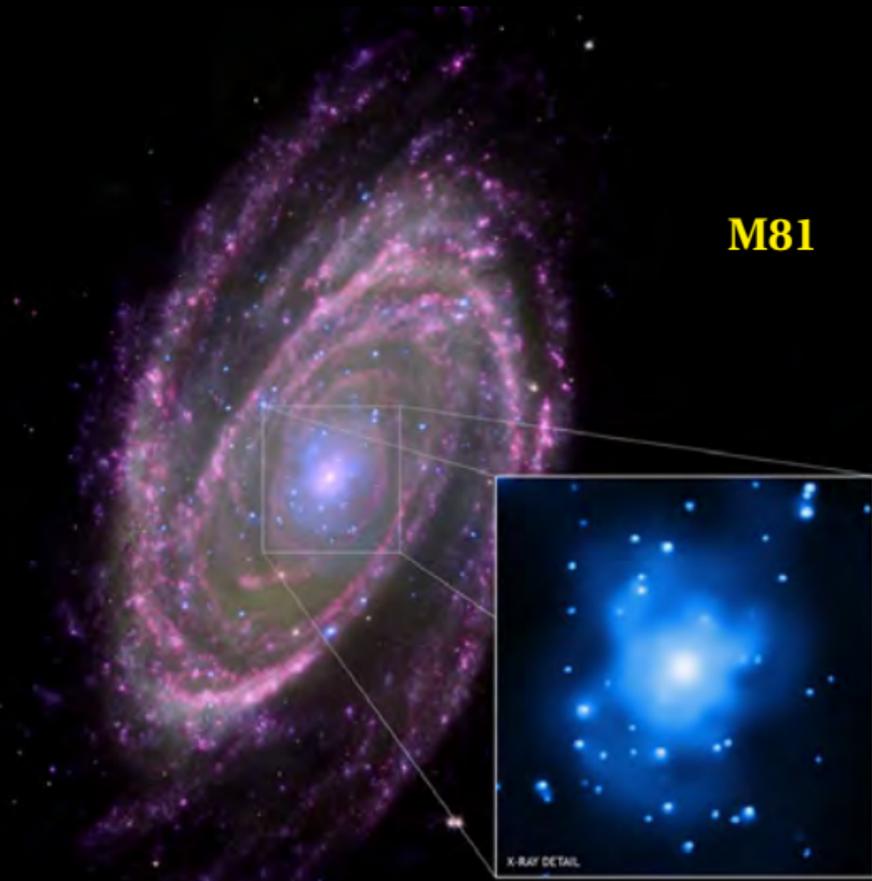


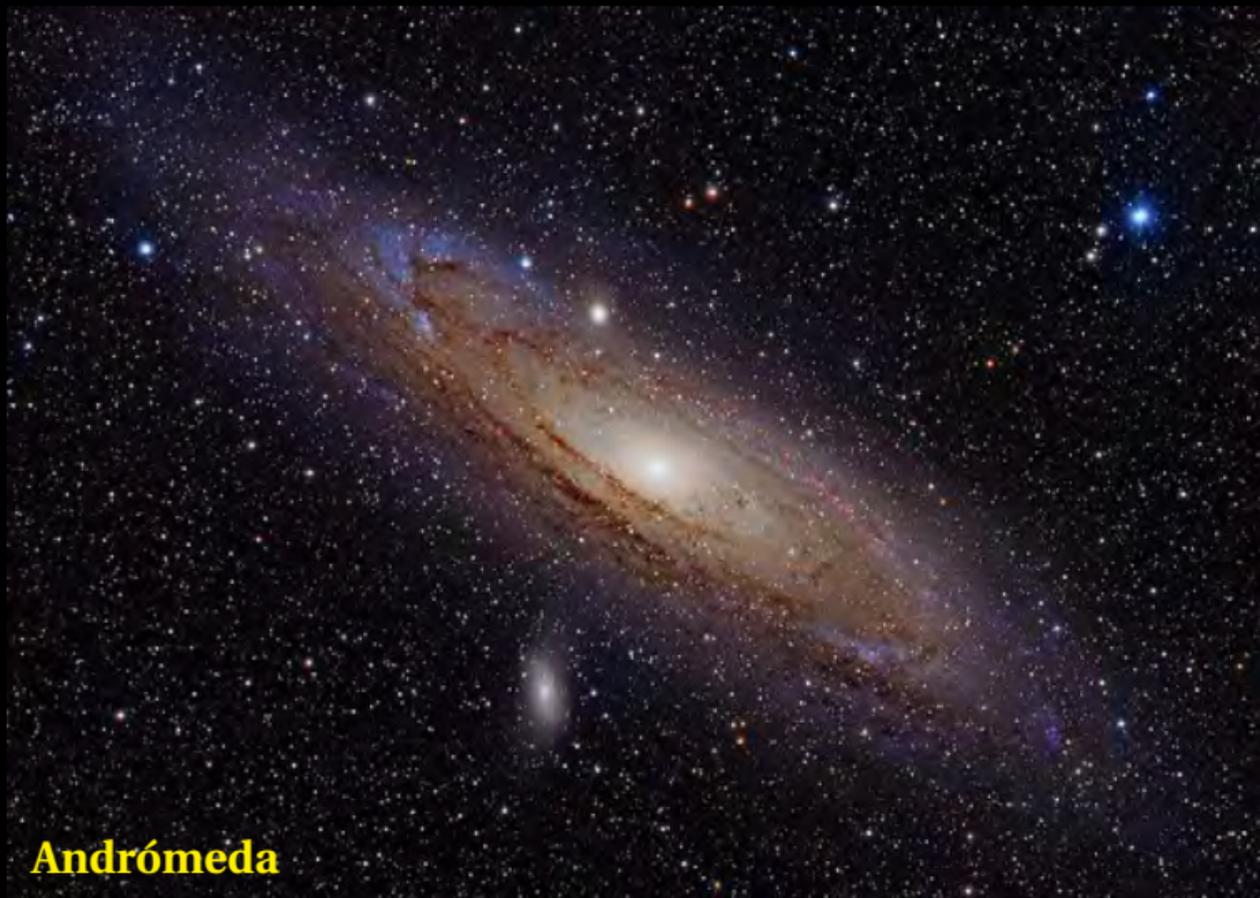
HST Optical

M81

COMPOSITE

X-RAY DETAIL





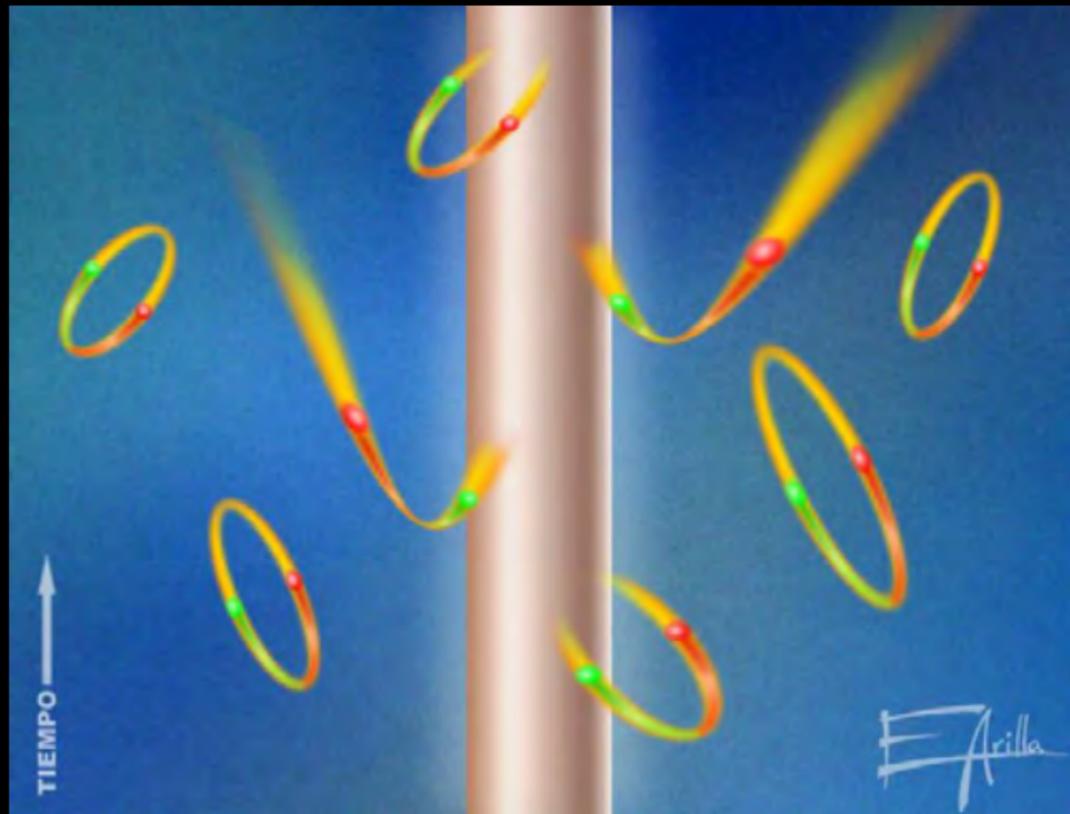
Andrómeda



Sagitario A* (Vía Láctea)

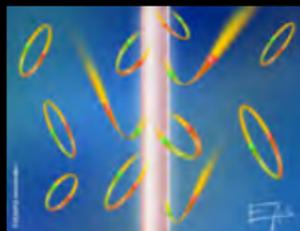
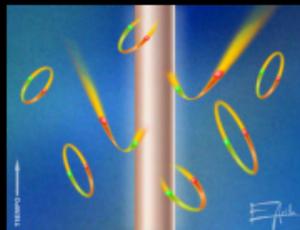
CHANDRA X-RAY

2. ¿Negros?



2.1. Radiación de Hawking

- El vacío cuántico es una *sopa* de fluctuaciones cuánticas: 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 $T \propto 1/M$
- Ejemplo egregio de la TQC en espaciotiempos curvos
- Ya ha sido detectada en CBEs



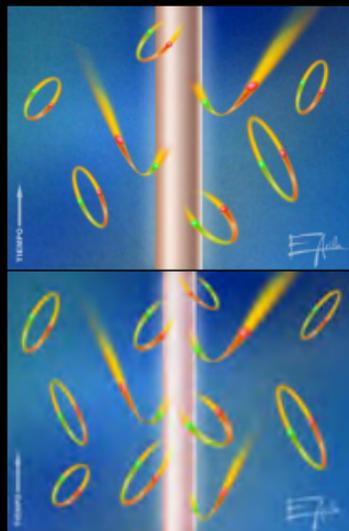
...pero esa es otra historia



2.2. Evaporación 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...

▶ *Quizá no haya horizontes*



- Por otro lado, con o sin evaporación,
¿qué pasa en la singularidad?

Gravedad cuántica

...pero esa es otra historia



3. ¿Agujeros?



- En relatividad general, los agujeros negros presentan
 - singularidades y horizontes
- La mecánica cuántica puede cambiar este modelo:
 - Evaporación de los agujeros negros
 - Regularización de las singularidades

Evaporación (radiación de Hawking)

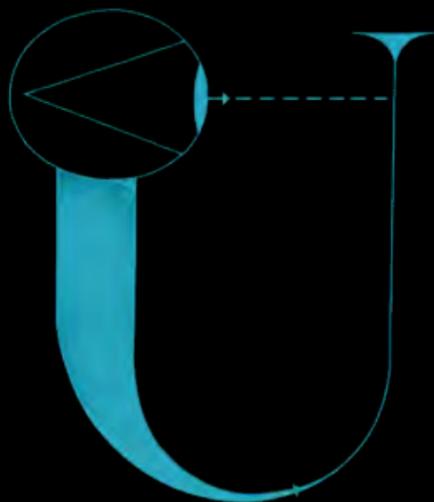
- Horizontes de larga vida en vez de horizontes eternos
- ▶ Es un proceso muy largo ($\sim 10^{58} \times$ edad del universo)
 - Los experimentos no están al alcance humano
 - Irrelevante astrofísicamente



- ¿Es esta la etapa final del colapso gravitatorio?
¿Existen otras posibilidades?

Regularización de singularidades

- Si la singularidad se suaviza por efectos cuánticos, se produce un rebote en el colapso
- Esto ocurre cuando se alcanzan densidades planckianas:
 - radio de la estrella $\sim 10^{-22}$ m (diez millones de veces menor que un núcleo atómico)



3.1. Una propuesta de colapso

- Conectar regularmente un agujero negro con uno blanco
 - Tiempo de rebote **muy corto** (naturalidad y estabilidad)
- Una fase oscilatoria disipativa hasta que se estabiliza como una estrella ultra-densa
 - **Disipación:** rebotes cada vez más pequeños
 - No hay horizontes de larga vida, solo transitorios
- Efectos cuánticos perceptibles en el exterior
 - Propagación de una onda de choque



Inestabilidades de agujeros blancos

- Las transiciones lentas son muy inestables:
Se convierten rápidamente en agujeros negros otra vez
- Mecanismo de la inestabilidad (clásica y cuántica):
 - Los agujeros blancos atraen materia que no puede entrar en el horizonte
 - La materia acumulada aumenta la atracción gravitatoria
 - La materia que sale de la explosión se queda atrapada por el campo gravitatorio de la materia acumulada
 - Se para la explosión y se forma un agujero negro

Canales de decaimiento de un agujero negro

■ Hawking (agujero negro \rightarrow espaciotiempo plano):

◦ $\mathcal{T} \sim t_p (M/m_p)^3 \sim 10^{57} \times$ edad del universo

◦ Es el canal menos eficiente IRRELEVANTE

■ Haggard-Rovelli (agujero negro \rightarrow blanco):

◦ $\mathcal{T} \sim t_p (M/m_p)^2 \sim 10^{17} \times$ edad del universo

◦ Más eficiente pero inestable PROHIBIDO

■ Nuestra propuesta

Transiciones rápidas agujero negro \rightarrow blanco:

◦ $\mathcal{T} \sim t_p (M/m_p)^1 \sim 1 \mu\text{s}$

◦ El canal más eficiente y estable PREFERIDO

3.2. El estado final

- Cada recolapso comenzaría cada vez más cerca del “horizonte” y llegarían a él cada vez más despacio
- Los efectos cuánticos acumulados cerca de los horizontes podrían llegar a parar el colapso
- Se generarían estructuras cuasi-estacionarias ultra-densas justo por encima del “horizonte” (estrellas negras)
 - sin singularidades ni horizontes
 - no huecas, sino llenas de materia
- Los agujeros negros relativistas serían muy buenas aproximaciones (fuera)
- Podrían emitir radiación de “Hawking”



3.3. Consecuencias observacionales

- Los rebotes transitorios producirían efectos distintivos
- Una vez formada la estrella negra, se comportaría como los agujeros negros (en observaciones pasivas)
- Diferencias en los ecos de radar
- Ondas gravitatorias



Resumen

- Relatividad general: agujeros negros
- Efectos cuánticos:
 - Radiación de Hawking y evaporación
 - ▶ Reolapsos amortiguados
 - ▶ Estrellas negras



fin