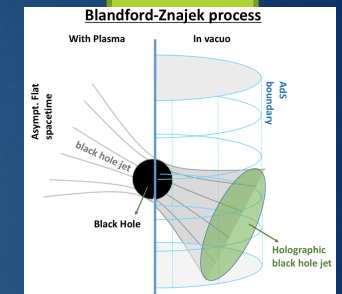
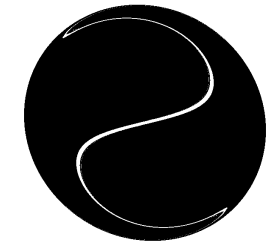


Lo que se acerca: agujeros negros en el Universo

MARIA J. RODRIGUEZ



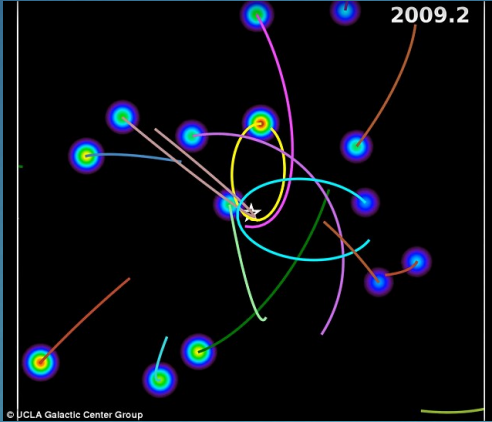
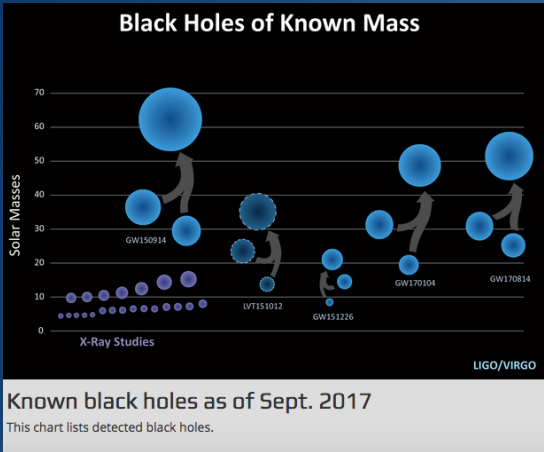
RESIDENCIA DE ESTUDIANTES CSIC-16 NOV. 2018



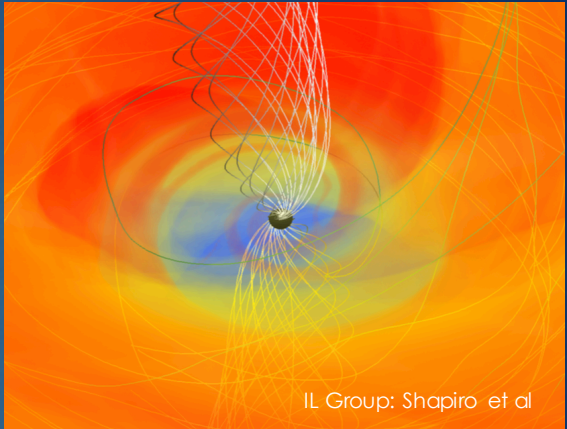
Ciclo de Conferencias
Perspectivas
en la Física
Fundamental
7, 8, 15 y 16 de Noviembre 2018
Semana de la Ciencia
de la Comunidad de Madrid



Se acercan magníficos tiempos para la investigación de agujeros negros

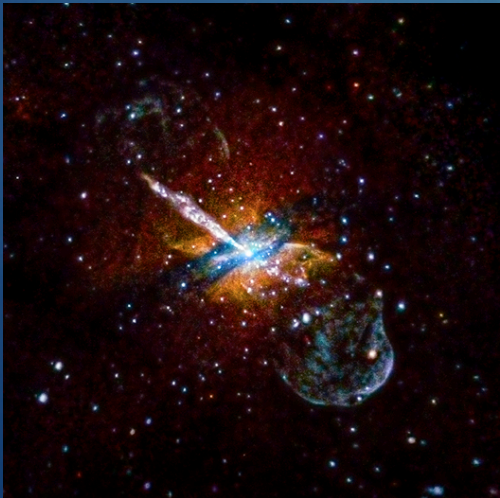


Agujero Negro SgrA *

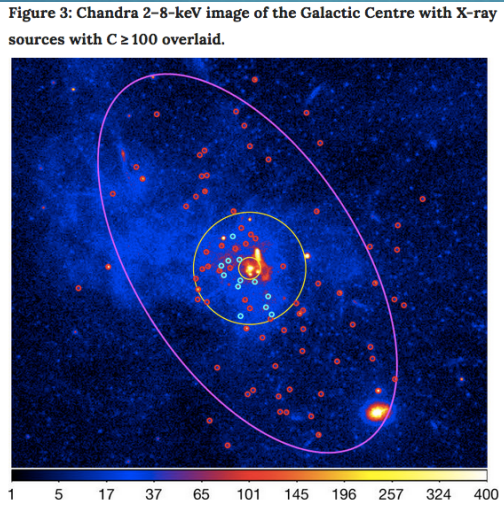


Simulaciones GRMHD de colisión de AN

Detecciones de ondas gravitacionales (OG) de LIGO



Imágenes de Jets de agujeros negros de CHANDRA

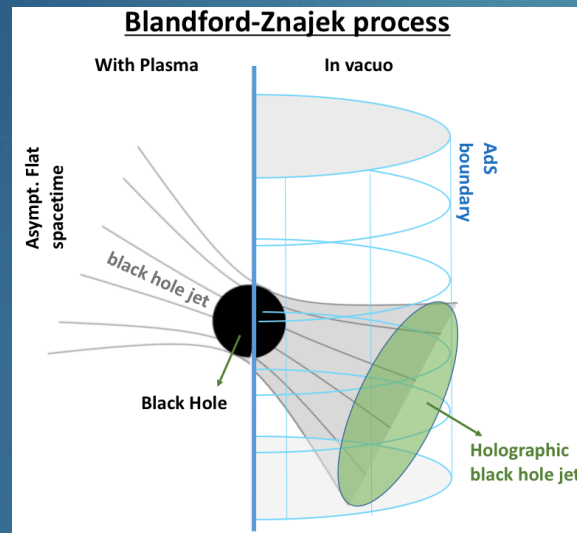


Agujeros negros estelares rodean agujero negro masivo

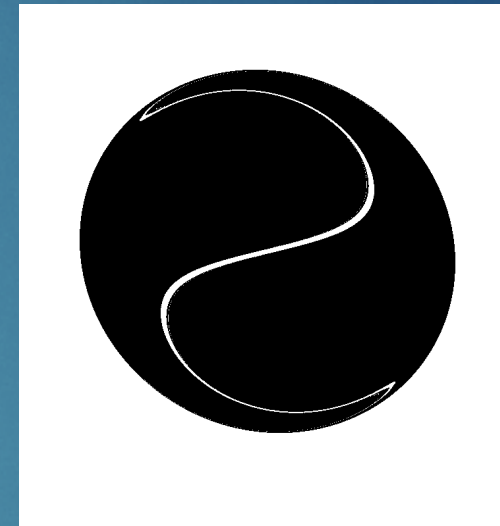


Simulaciones de OG

Los últimos hallazgos sobre agujeros negros en el Universo han promovido grandes avances en la descripción teórica de los fenómenos que producen estos misteriosos objetos.



Jets de Agujeros Negros Holográficos



Sombras de agujeros negros extremales

Palabras claves:

Agujero Negro (AN) - Ergosfera – Jets de AN– Sombras de AN – AN binarios extremales



¿ Qué distingue a un agujero negro?

¿Dónde se encuentran los agujeros negros en el Universo?

¿Y cómo afectan a sus galaxias vecinas?

¿Qué teorías los describen?

Agujeros Negros



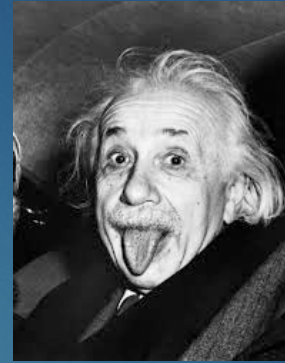
No es una agujero en el suelo



Image Credit: Nasa

Son los objetos más extraordinarios que existen en el cielo

¿Pero qué es exactamente un agujero negro?



Se puede pensar que los agujeros negros son los ojos de huracanes cósmicos, que se mantienen rotando por las estrellas, gas y otros agujeros negros que caen a su interior



Y, cualquier cosa que viaja muy próximos a estos tendrá grandes dificultades para evitar caer en sus garras.

¿Pero qué produce que los agujeros negros engullan todo?

La respuesta a esta pregunta es



La fuerza de la gravedad que no sólo mantiene los planetas en órbita alrededor del sol, sino que también nos mantiene los pies sobre la Tierra

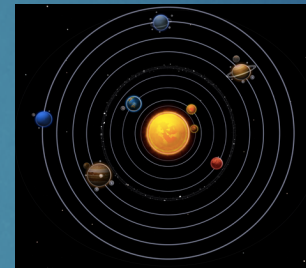


Image Credit: tes.com



Image Credit: norykwa.ankop.com

La gravedad es lo que se mide cuando uno se pesa en la balanza. Tu peso es la cantidad que mide la fuerza de la gravedad que la Tierra ejerce sobre uno. Cuanto mayor es la masa que tu cuerpo contiene, mayor es tu peso. Y, de la misma manera, a mayor cantidad de masa que un objeto contiene, mayor es su fuerza gravitacional.

¿Pero qué hace que los agujeros sean NEGROS?

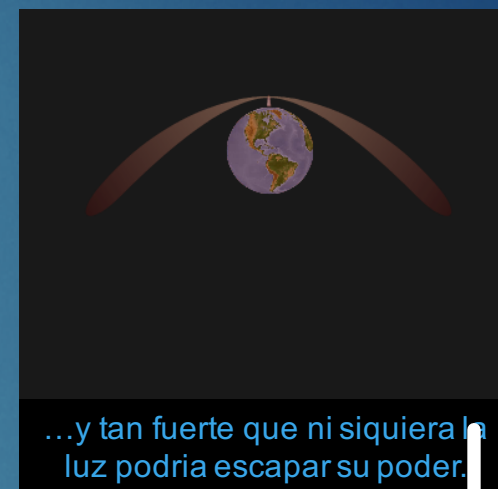
Hablamos de la fuerza de gravedad en la Tierra, sigamos con este ejemplo....



¿Pero qué hace que los agujeros sean NEGROS?



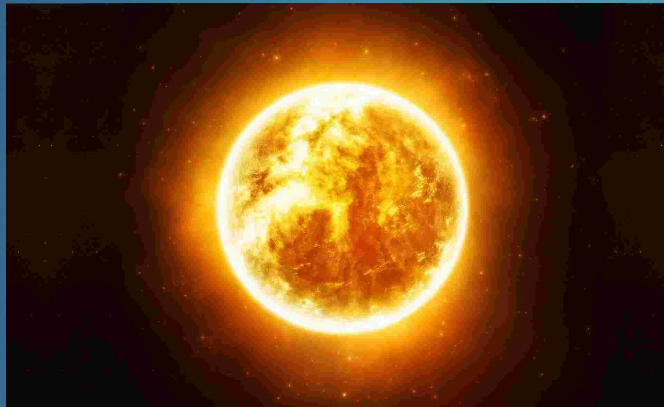
Image Credit: hubblespace.org



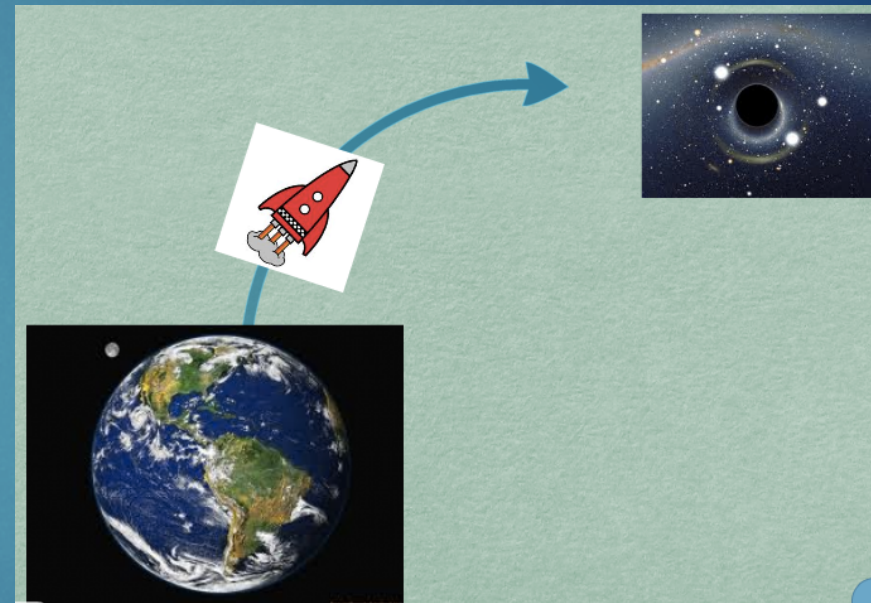
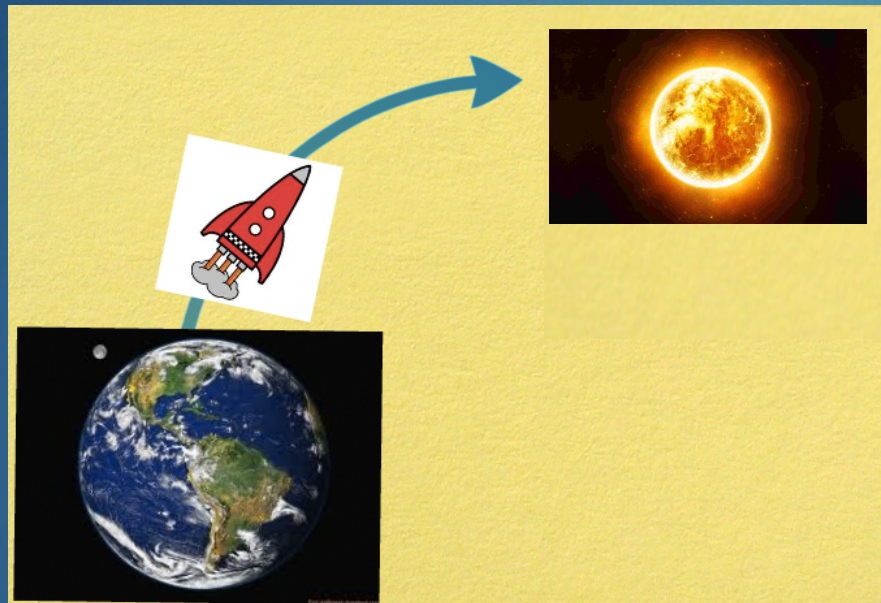
Esto es lo que llamamos un agujero negro

Agujero Negro: un objeto que es tan compacto (que contiene suficiente masa en un pequeño volumen) que su fuerza gravitacional previene que la luz y cualquier otro objeto escape.

¿Cuál es la diferencia entre cualquier otro objeto (estrella/planeta) en el Universo y un agujero negro?



¿Cuál es la diferencia entre un cualquier otro objeto (estrella/planeta) en el Universo y un agujero negro?



La superficie de no retorno – el horizonte de eventos – es lo que realmente caracteriza a los agujeros negros

Nuestros vecinos: agujeros negros en el Universo



Nuestra Galaxia: la Vía Láctea

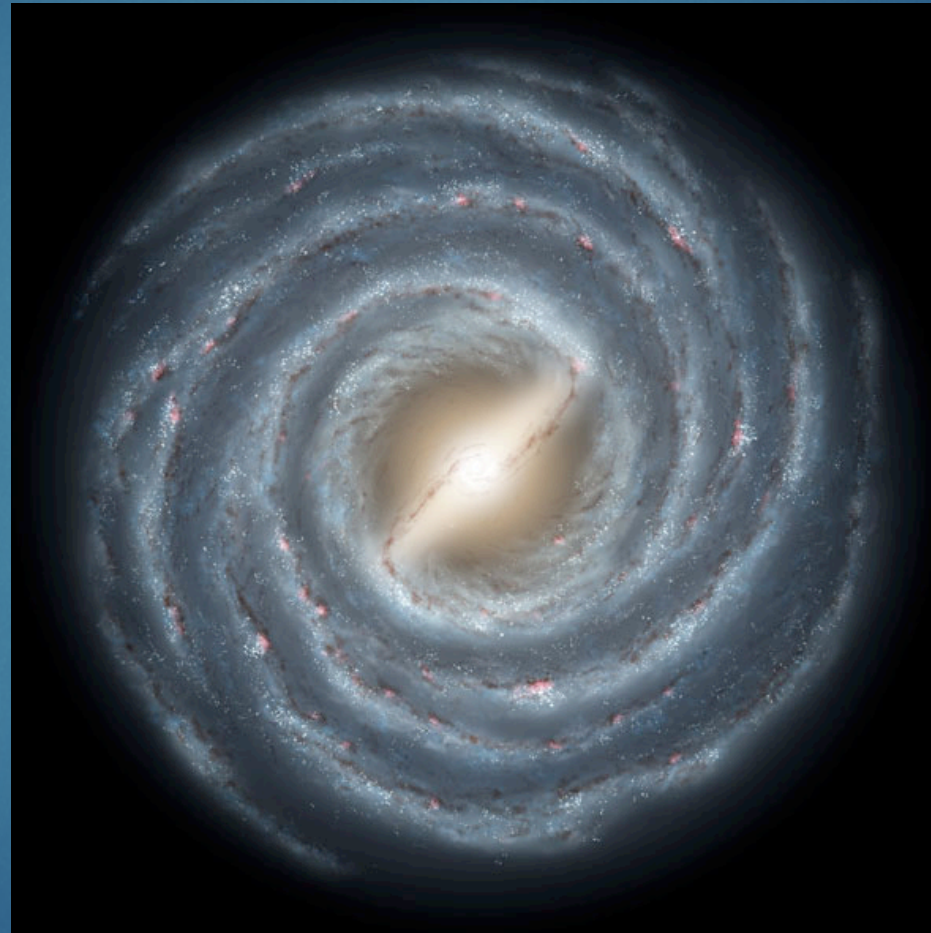


Image Credit: NASA

¿Dónde están los agujeros negros en nuestra galaxia?

¿Está la Tierra cerca de algún agujero negro?

Nuestra Galaxia: la Vía Láctea

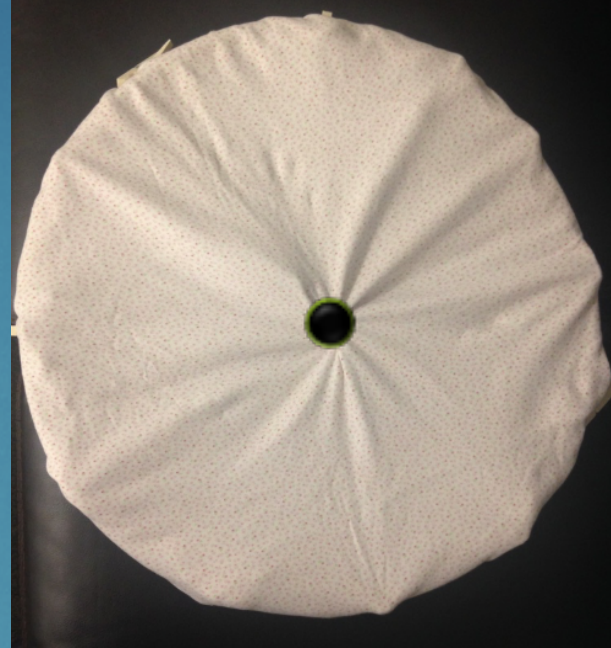


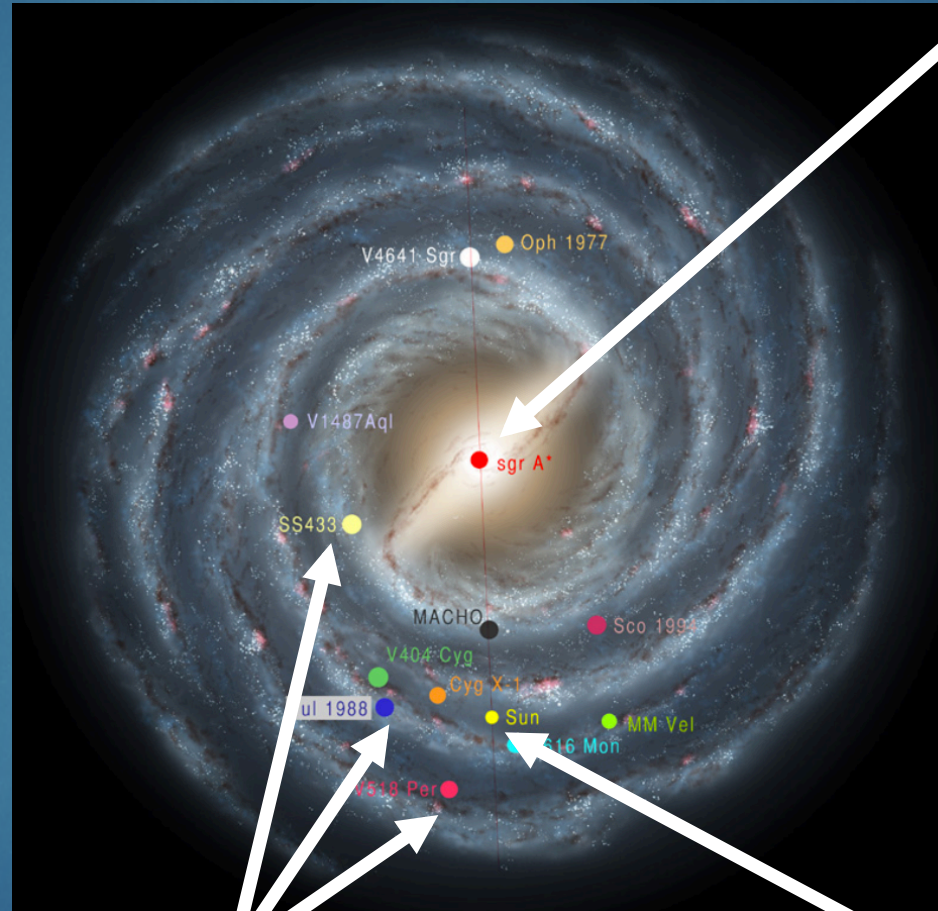
Image Credit: NASA

Nuestra Galaxia: la Vía Láctea



1 agujero negro supermasivo

La vía lactea es una galaxia
espiral de
925,000,000,000,000 km
= $9,5 \cdot 10^{17}$ km de largo



Distancia del centro de la
galaxia al Sol es
270,000,000,000,000 km
= $2,7 \cdot 10^{17}$ km

Sistema solar

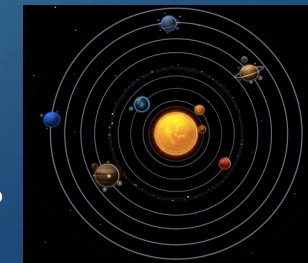


Image Credit: tes.com

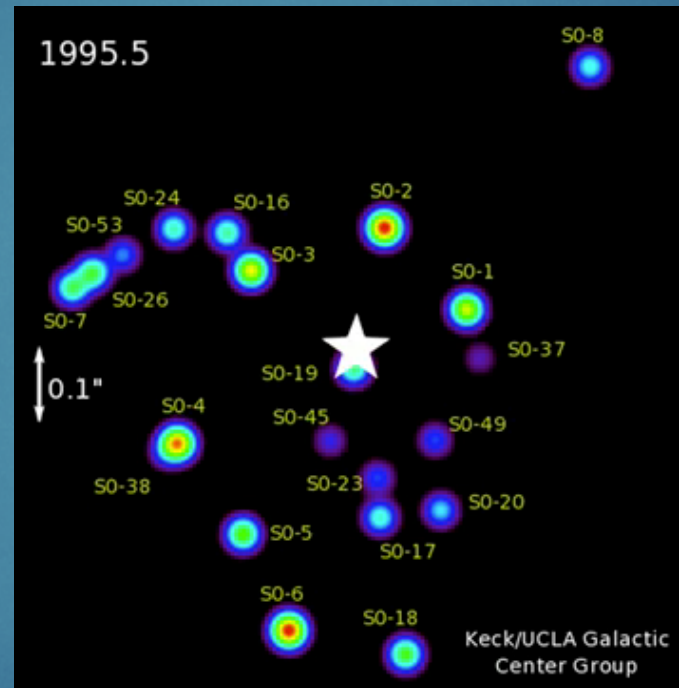
Image Credit: NASA

100 millones de agujeros negros de masas estelares

Nuestra Galaxia: la Vía Láctea



Miremos al centro de la galaxia con más detalle...



Es muy posible, que exista un agujero negro en el centro de nuestra Galaxia



Efectos extravagantes: agujeros negros en el Universo

Jets de agujeros negros

Energías extravagantes en el Universo

El cielo contiene objetos singulares (pulsars y quasars)
Que producen señales energéticas extravagantes en forma de haces (jets)
de radiación electromagnética

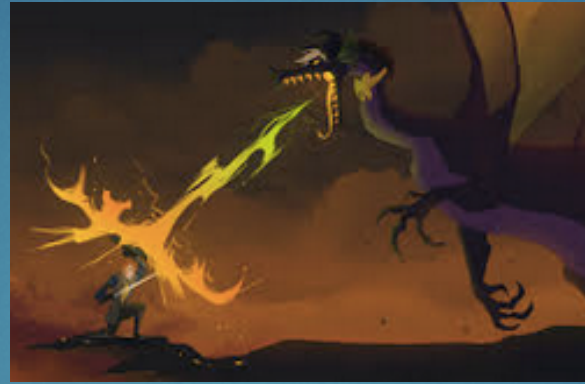
Jets de Agujeros Negros



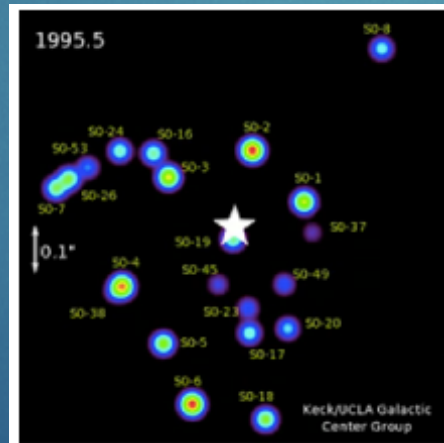
En la imagen, los X-rays más bajos que Chandra detecta son rojos, los X-rays de mediana intensidad en verde, y los de más alta energía en azul.

Jets de agujeros negros

Los agujeros negros son como dragones



Pero SGA*, nuestro agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia





Descripción Teórica de: agujeros negros en el Universo

Solución de agujero negro de Kerr

La métrica de Kerr describe un agujero negro rotando con momento angular J y masa M :

$$ds^2 = -\frac{\Delta}{\Sigma} \left(dt - a \sin^2 \theta d\phi \right)^2 + \frac{\Sigma}{\Delta} d\hat{r}^2 + \frac{\sin^2 \theta}{\Sigma} \left[(\hat{r}^2 + a^2) d\phi - a dt \right]^2 + \Sigma d\theta^2,$$

donde

$$\Delta \equiv \hat{r}^2 - 2M\hat{r} + a^2,$$

$$\Sigma \equiv \hat{r}^2 + a^2 \cos^2 \theta,$$

$$a \equiv \frac{J}{M}.$$

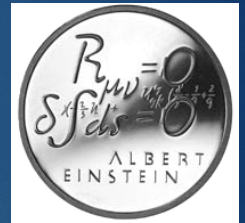
Está dotado de un horizonte de eventos

$$\hat{r}_H = M + \sqrt{M^2 - a^2},$$

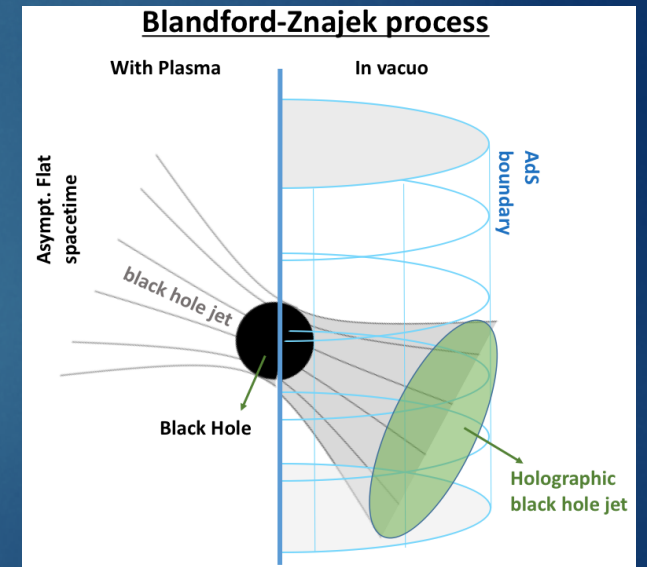
$$|a| \leq M.$$

Esta desigualdad se satura para los **agujeros negros extremales de Kerr**, que para una cantidad de masa fija, tienen el máximo momento angular posible

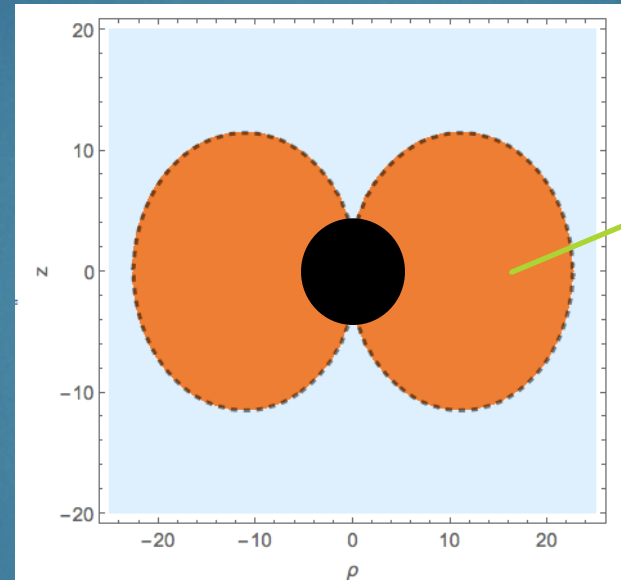
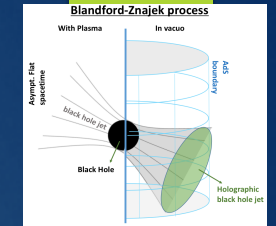
$$|J| = M^2.$$



Holografía para los jets de: agujeros negros en el Universo



La Teoría de la Relatividad General de Einstein contiene soluciones excepcionales: **agujeros negros**



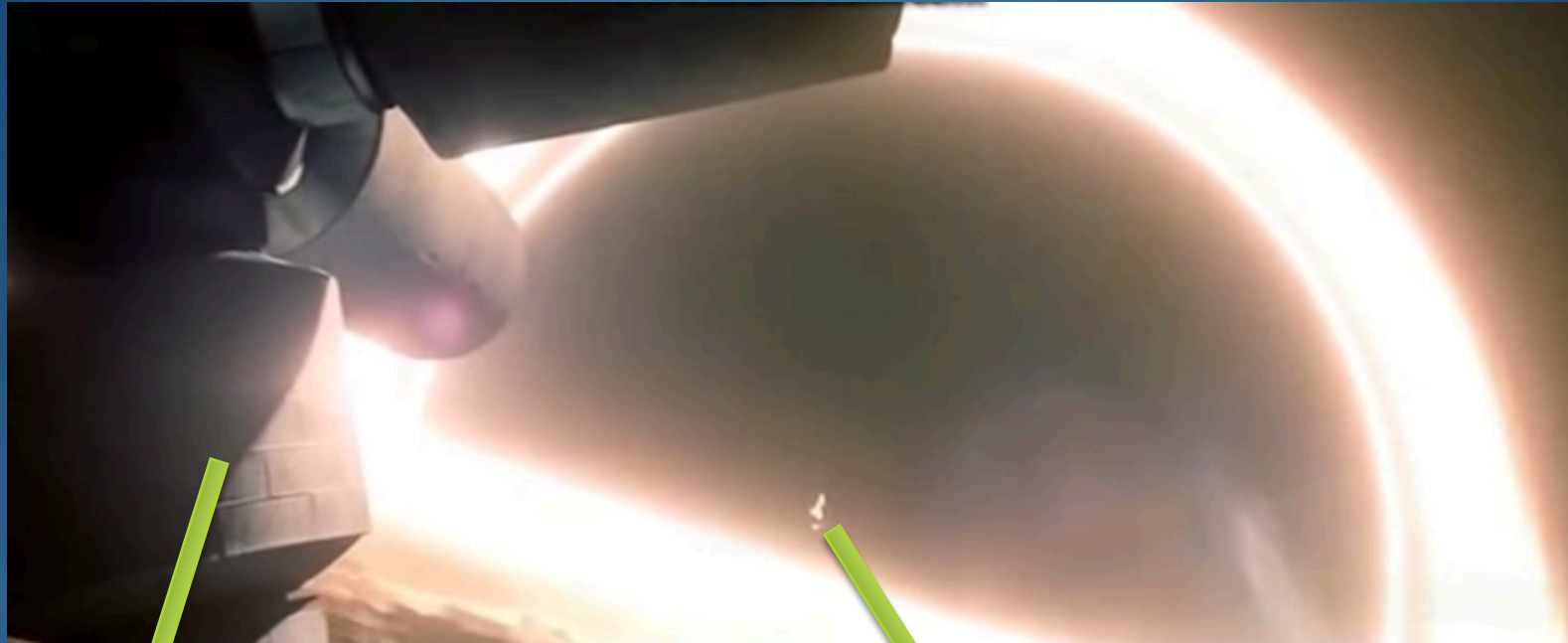
Ergosfera: región en la cual una partícula debe moverse en la misma dirección en la que rota el espacio-tiempo

Poseen **horizonte de eventos** que caracteriza a los agujeros negros de forma única

Y a pesar de que nada puede escapar de dentro de un agujero negro, grandes cantidades de energía rotacional se encuentran almacenadas, fuera del horizonte de eventos, en la llamada **ergosfera**

Esta energía se puede extraer por el mecanismo de Penrose

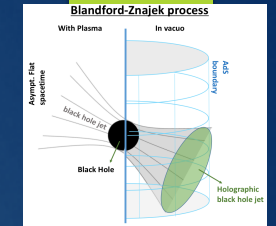
Efecto de Penrose @Pelicula Interstellar



Anne Hathaway



Mathew McConaughey



Ciclo de Conferencias
Perspectivas
en la Física
Fundamental
7, 8, 15 y 16 de Noviembre 2018
Semana de la Ciencia
de la Comunidad de Madrid

ift

excelencia UAM CSIC
EXCELENCIA SENERO OCIOA

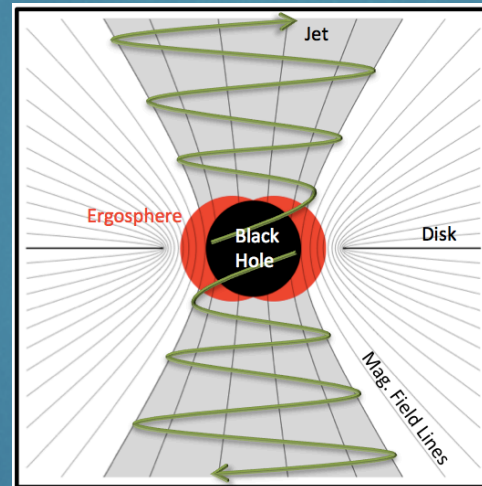
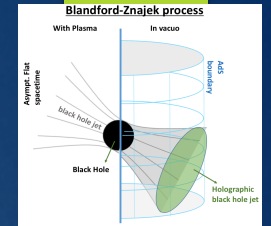
UAM
CSIC

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC
<http://www.ift.uam-csic.es/>

Gracias Kip Thorne!

Blandford- Znajek process

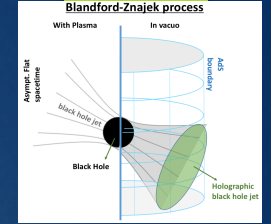
Cuando un agujero negro está rodeado de un campo magnético y un plasma existe otra forma del proceso de Penrose: el proceso de Blandford-Znajek (BZ)



Es la ergosfera la que causa que los campos roten en la dirección en la que rota el agujero negro, produciendo un flujo de energía hacia el exterior que es extraída del agujero negro.

Motivación

Para entender mejor el proceso de BZ, realizamos un “toy model,” y solucionamos las ecuaciones de este proceso para un agujero negro en un espaciotiempo de 2+1 dimensiones.



Ted Jacobson +MJR
arxiv:1709.10090 [hep-th]

Construir la primera solución exacta de este modelo para un agujero con rotación para:

- Desarrollar una mayor intuición de cómo el flujo electromagnético y la corriente se organizan en el espacio, y
- para entender el origen de la energía

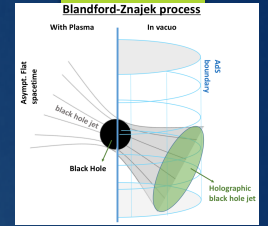
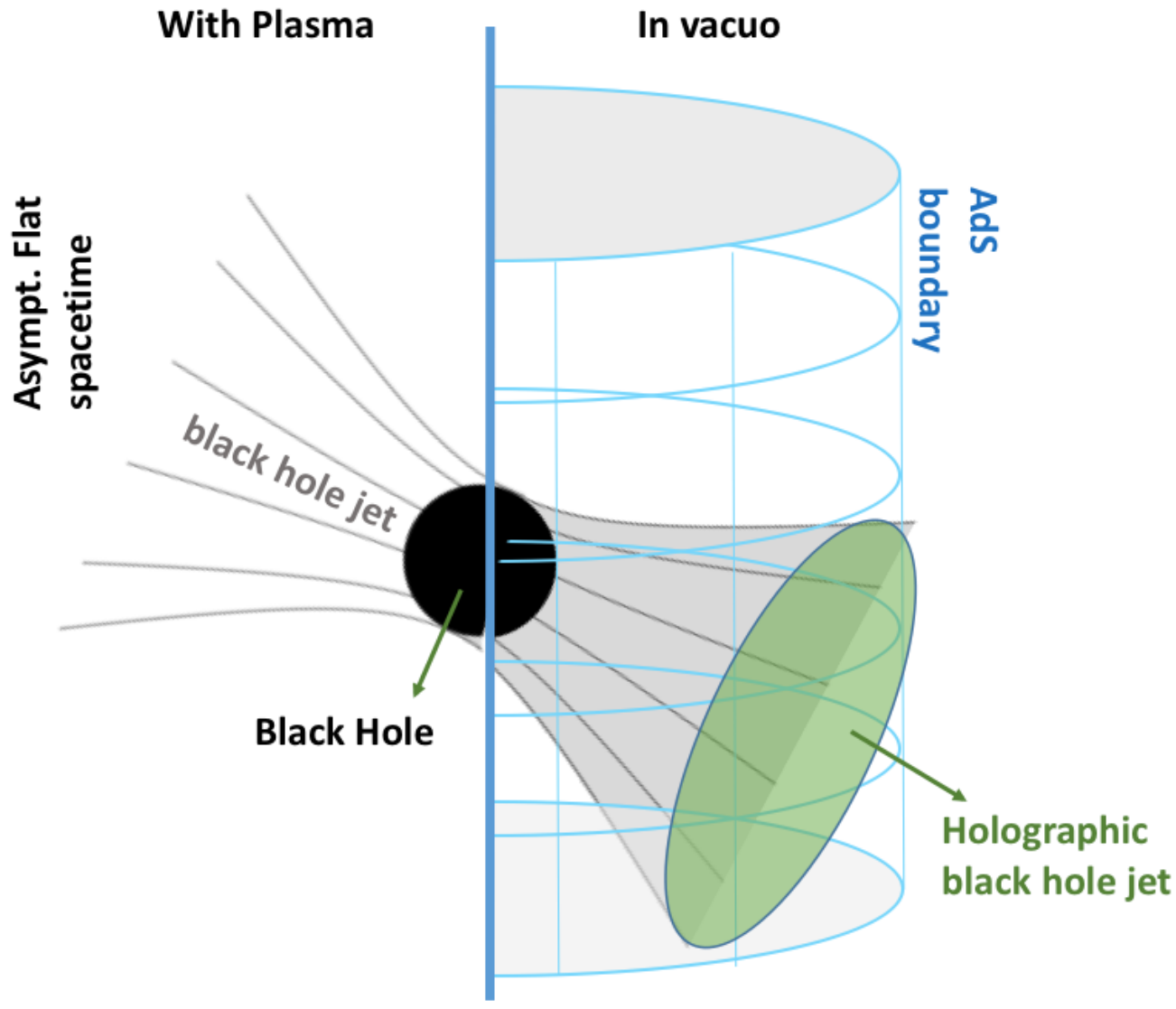
Pero también para

- Dilucidar el proceso de BZ para agujeros negros extremales, y
- Encontrar el dual holográfico del proceso de Blandford-Znajek

Resultados

Para nuestra sorpresa encontramos que se puede desarrollar el proceso de extracción puramente con campos electromagnéticos, **donde el plasma no juega ningún rol.**

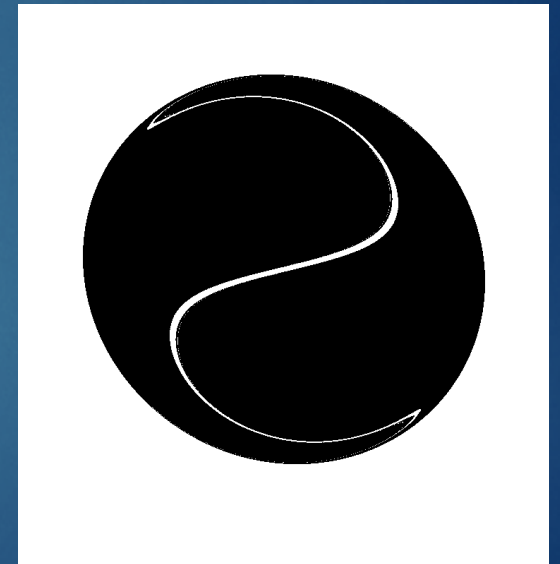
Blandford-Znajek process



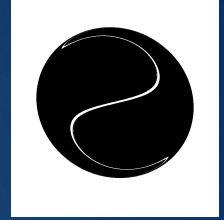
$$\mathcal{E}_{\tau_H} = 2\pi(\psi_z)^2 \tau_H \Omega_F (\Omega_H - \Omega_F).$$

Dimos los primeros pasos para establecer el dual holográfico del proceso de BZ de jets de agujeros negros

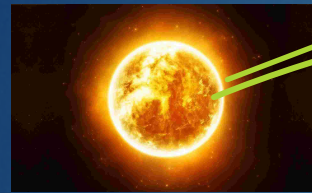
Sombras de los:
agujeros negros
en el Universo



Sombras de Agujeros Negros (AN)



Cunha+Herdeiro+MJR



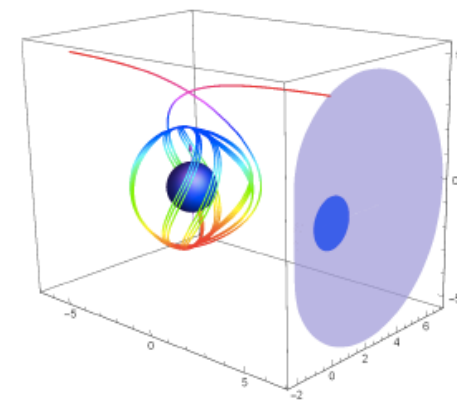
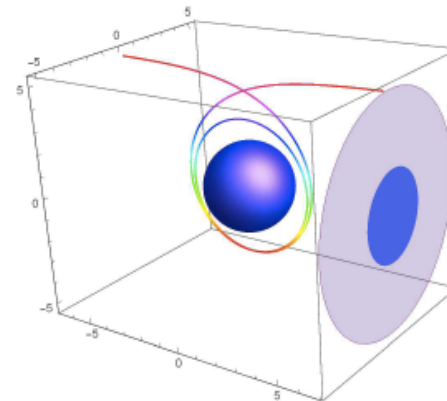
Sol



AN

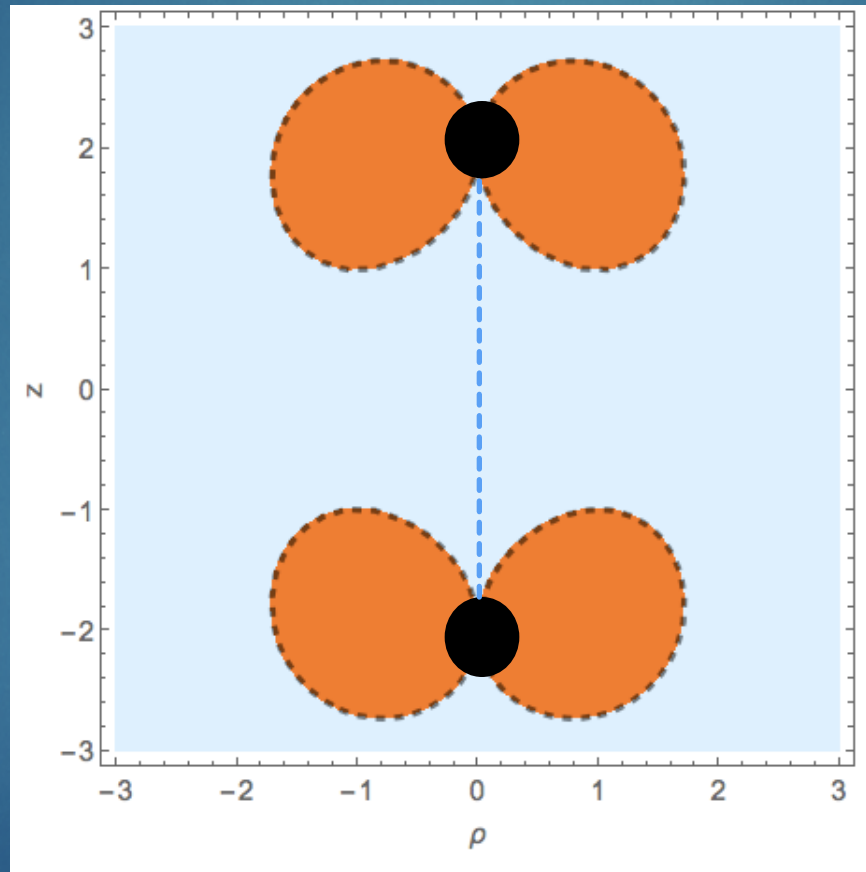


Las **sombras** de los agujeros negros son imágenes del horizonte de eventos, aumentadas por el fuerte campo gravitacional producido por el agujero negro -que curva los haces de luz, actuando como una lente y distorsionando su imagen- superpuesto sobre un fondo luminoso.



[Dokuchaev+Nazarova]

La Teoría de la Relatividad General de Einstein contiene soluciones de:
agujeros negros binarios (sin carga electromagnética)
que contienen dos agujeros negros de Kerr separados por un **strut (puntal)**



Sombras exactas de AN binarios

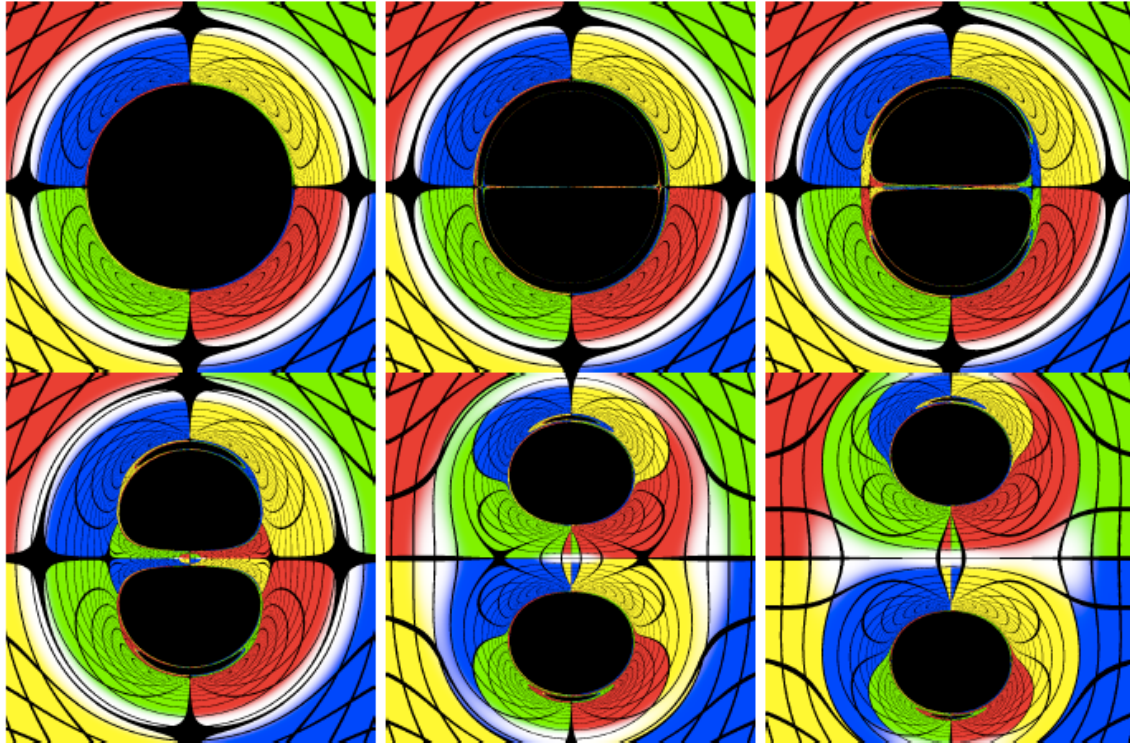


Figure 2: Shadows of the double Schwarzschild BH solution with equal masses ($\epsilon = 0$) and different BH distances, corresponding to a value z_o/M of: (from left to right) (top) 0.5, 0.81, 1; (bottom): 1.5, 3, 4.

Calculamos las sombras exactas de agujeros negros binarios (con un puntal)

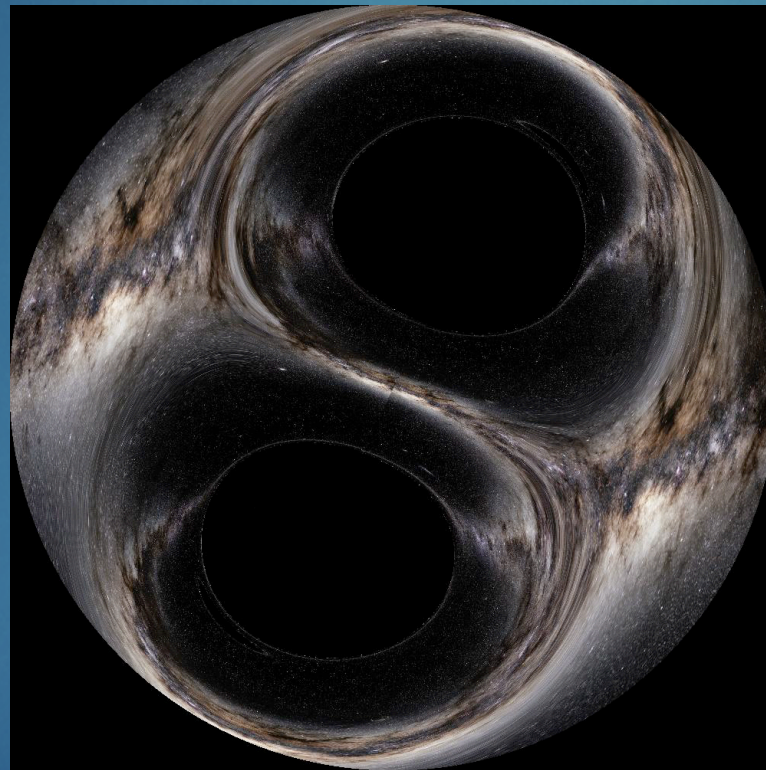
Cunha+Herdeiro+MJR
arXiv:1802.02675[gr-qc]

Demostramos que el puntal (singularidad cónica) no afecta a las sombras de los agujeros negros binarios debido a la simetría de las ecuaciones de geodésicas nulas.

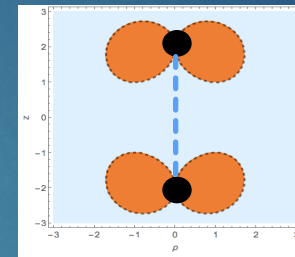
Sombras exactas de AN binarios



AN binario cuasiestático



<http://gravitation.web.ua.pt/node/1496>



Las soluciones de AN binarios que analizamos son estacionarios. Por ello desarrollamos un método para construir un sustituto para la rotación que imite los efectos de la rotación orbital del problema AN binario dinámico.

Para ello, rotamos al final la trayectoria de los fotones en el sistema de referencia del observador.



AN binarios dinámicos

AN binarios cuasiestáticos

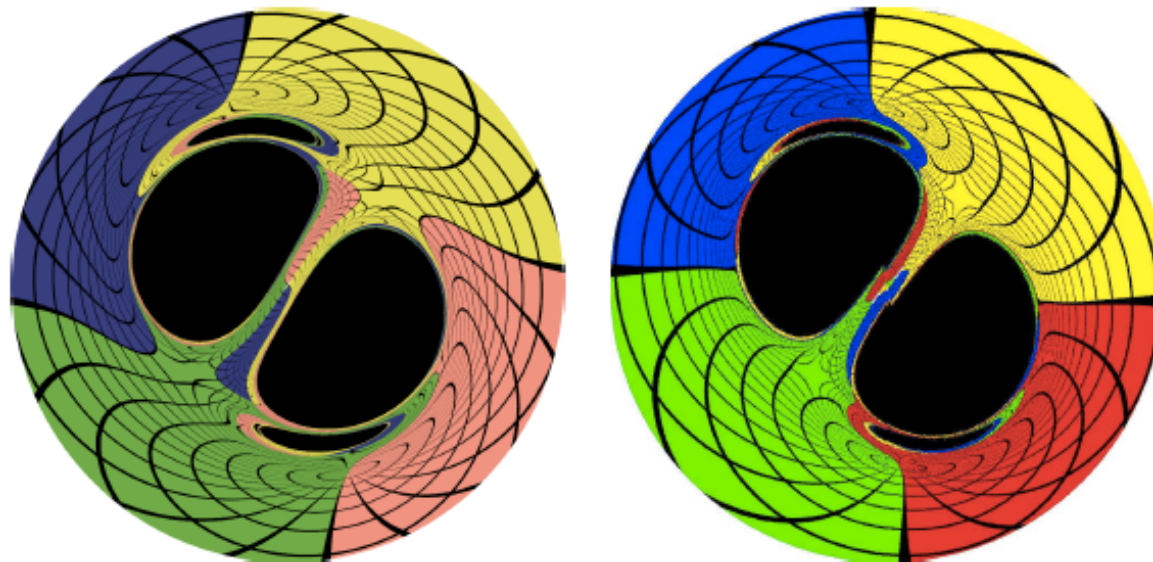
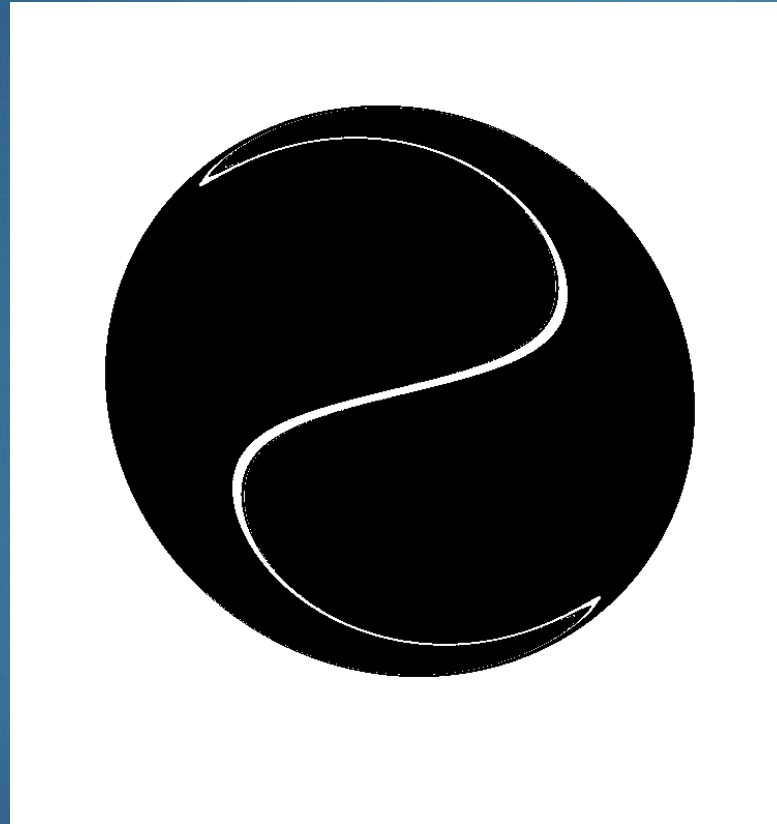
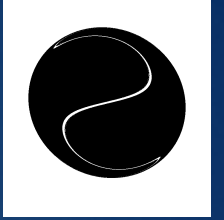


Figure 3: *Left:* Shadows and lensing of a fully dynamical binary of equal-mass BHs with no spin (adapted [Bohn et al](#)) *Right:* Quasi-static BH binary with $z_o = 1.5M$ and $\omega = 0.06 M^{-1}$.

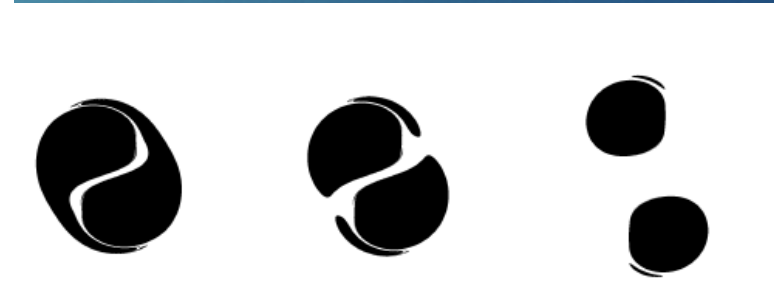
Encontramos métodos más efectivos para calcular y simular las sombras de AN binarios

Cunha+Herdeiro+MJR
arXiv:1805.03798[gr-qc]

Sombras exactas de AN binarios extremos

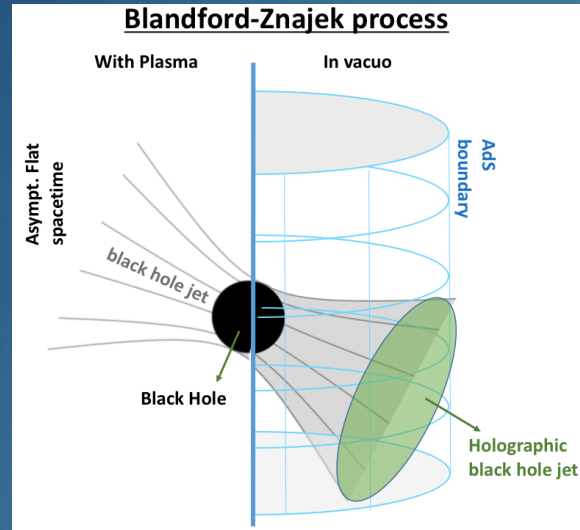


Cunha+Herdeiro+MJR]



Calculamos exáctamente las
sombras de agujeros negros
binarios extremos

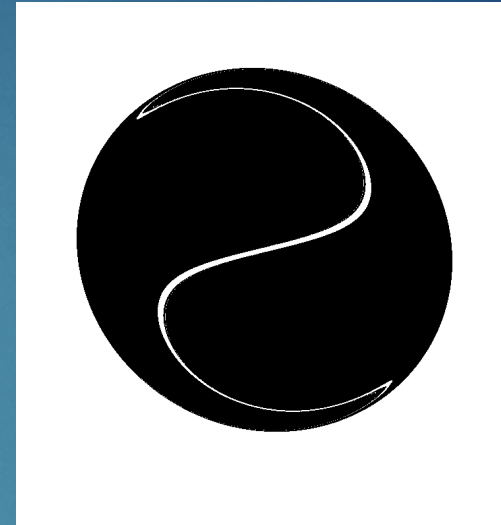
Conclusiones:



Holografía de Jets de AN

Descubrimos que el proceso de formación de Jets se puede hacer sin plasma (corrientes)

Dimos los primeros pasos para la construcción holográfica de Jets de AN



Sombras exactas de AN binarios

Calculamos las sombras de AN binarios extremales exáctamente

Encontramos un método más efectivo para producir las sombras de AN binarios

Esta tarde vimos que nuestros vecinos

Nuestra Galaxia: la Vía Láctea

3 1 agujero negro supermasivo

4.5 millones de agujeros negros de masas estelares

9 1 The Milky Way is a spiral galaxy
125,000,000,000,000 km
 $\approx 9.5 \cdot 10^{17}$ km long

10 10 Distance from the center of the Milky Way to the Sun is
270,000,000,000,000 km
 $\approx 2.7 \cdot 10^{17}$ km

8 8 Sistema solar

7 7 100 millones de agujeros negros de masas estelares

1 1 Image Credit: NASA

8 8 Image Credit: NASA

Jets de agujeros negros

1 1 Energías extravagantes en el Universo

2 2 El cielo contiene objetos singulares (pulsars y cuasars) que producen señales energéticas extravagantes en forma de haces (jets) de radiación electromagnética

3 3 Jets de Agujeros Negros

3 3 En la imagen, los X-rays más bajos que Chandra detecta son rojos, los X-rays de mediana intensidad en verde, y los de más alta energía en azul.

Conclusiones:

1 1 Blandford-Znajek process

2 2 Descubrimos que el proceso de formación de Jets se puede hacer sin plasma (corrientes)

3 3 Damos los primeros pasos para la construcción holográfica de Jets de AN

4 4 Sombras exactas de AN binarios.

5 5 Calculamos las sombras de AN binarios extremales exactamente

6 6 Encontramos un método más efectivo para producir las sombras de AN binarios

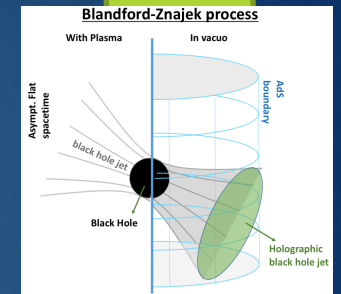
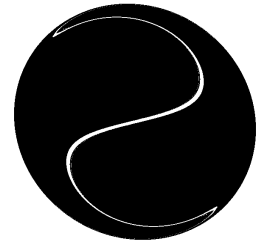
La diversión acaba de empezar...

Lo que se acerca: agujeros negros en el Universo

MARIA J. RODRIGUEZ

Muchas gracias por su atención

RESIDENCIA DE ESTUDIANTES CSIC-16 NOV. 2018



Ciclo de Conferencias
Perspectivas
en la Física
Fundamental
7, 8, 15 y 16 de Noviembre 2018
Semana de la Ciencia
de la Comunidad de Madrid



Instituto de Física Teórica UAM-CSIC
<http://www.ift.uam-csic.es/>