

Agujeros Negros

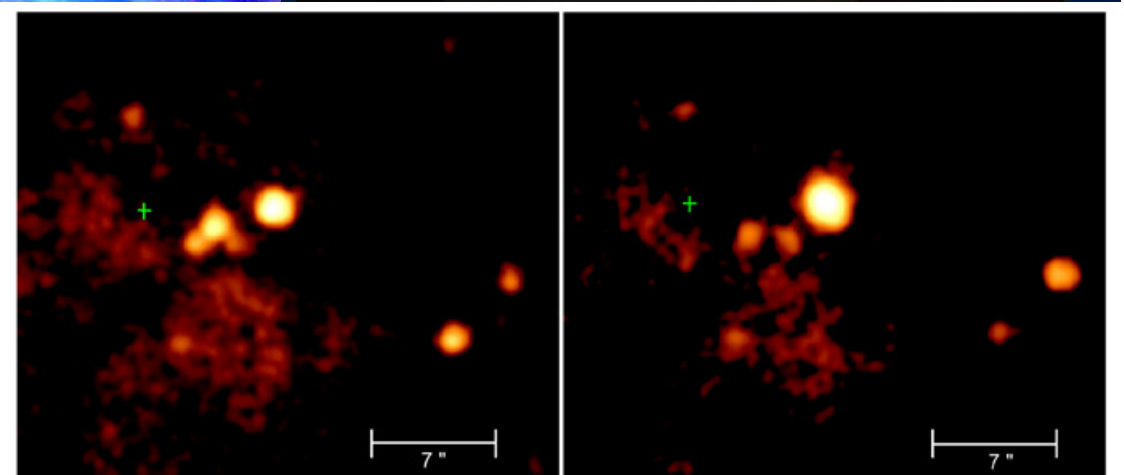
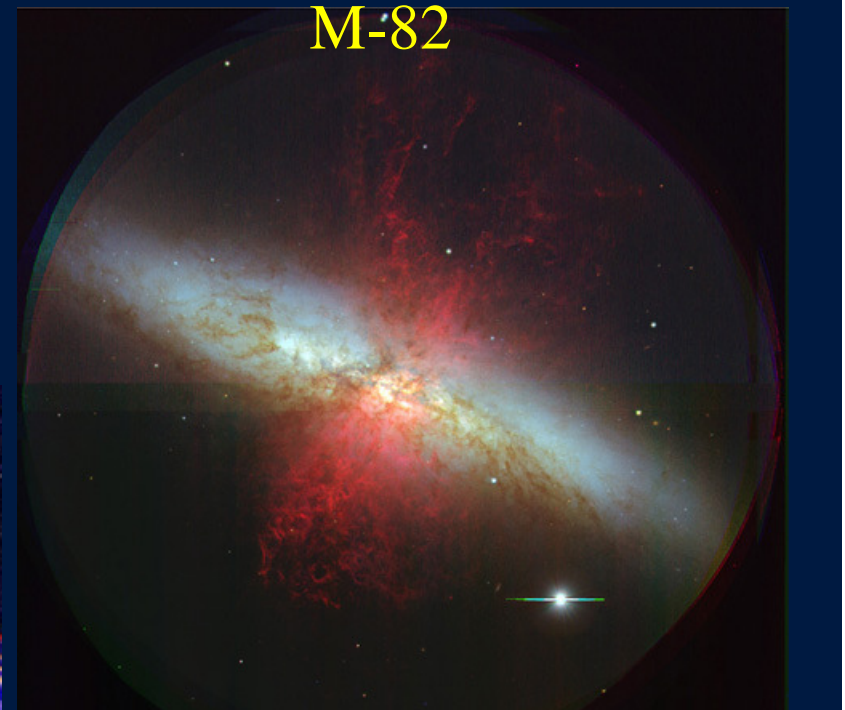
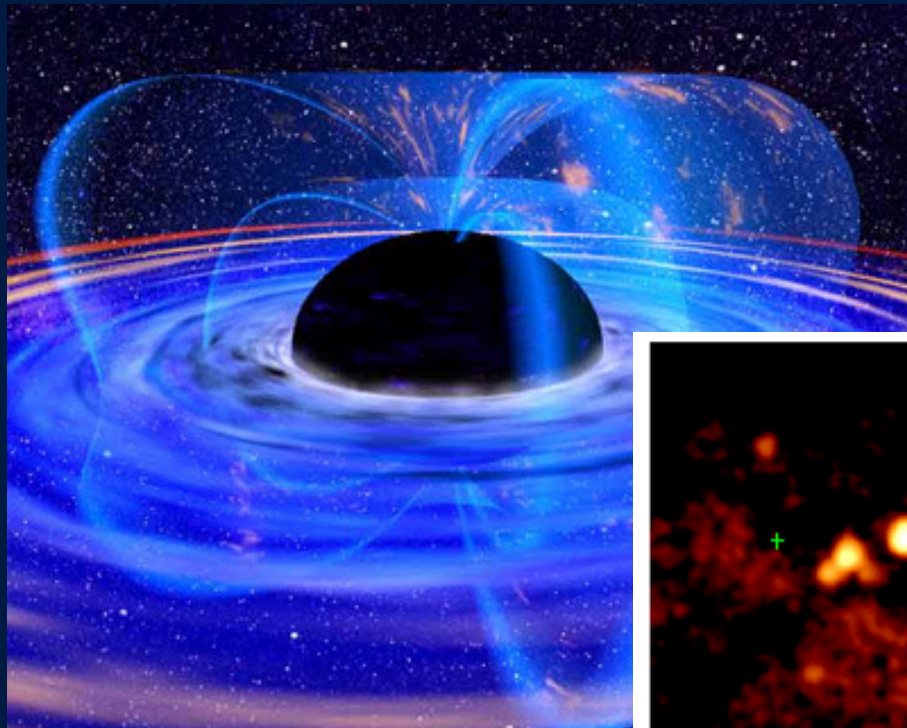
Marc Mars

Curso de Verano 2005, Instituto Universitario de Física y Matemáticas

¿Qué es un agujero negro?

Versión intuitiva:

Una región finita del espacio-tiempo en la que la atracción gravitatoria es tan intensa que nada puede escapar.



Breves Apuntes Históricos: Estrellas Oscuras

- John Mitchel (1783)

Si en la Naturaleza existieran objetos cuya densidad fuera al menos la del Sol y cuyo diámetro fuera más de 500 veces el diámetro del Sol ... su luz no podría alcanzarnos.

Artículo redescubierto en la década de 1970

- Pierre Simon Laplace (1796)

Un sistema luminoso de la misma densidad que la Tierra y con un diámetro 250 veces mayor que el Sol no permitirían, como consecuencia de su atracción, que ninguno de sus rayos nos alcanzara; por lo tanto es posible que los objetos luminosos mayores del Universo sean invisibles para nosotros.

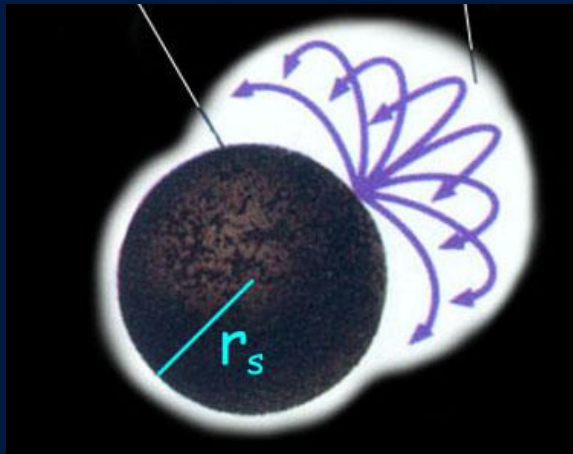
Velocidad de Escape:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \iff v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

$$v_e \geq c \iff r \leq r_S \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

Tierra: $r_S = 0.89 \text{ cm}$

Sol: $r_S = 3.0 \text{ Km}$



► La estrella es visible desde cerca



No obstante la luz llega a una altura de

$$r_{\max} = \frac{r_S}{1 - \frac{r_S}{r_0}}$$

Principios de 1800:

Experimentos de interferometría → Preeminencia teoría ondulatoria de la luz

El interés en estrellas oscuras cesó

Relatividad General

Ecuaciones de Einstein:
$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}Rg_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta} \quad (\text{Nov. 1915})$$

Ecuaciones diferenciales no lineales para diez funciones (componentes de la métrica)

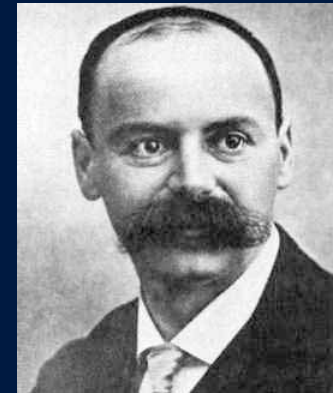
► Einstein era escéptico sobre la posibilidad de encontrar soluciones.

Enero 1916: El físico Karl Schwarzschild encuentra la primera solución a estas ecuaciones.

Métrica de Schwarzschild:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$
$$-\infty < t < +\infty, \quad r > 2GM, \quad (\theta, \phi) \in S^2$$

La métrica no está definida en $r = 2GM$
(es una esfera de área $16\pi G^2 M^2$, no es un punto!).



Se bautizó como *Singularidad de Schwarzschild* (actualmente Radio de Schwarzschild).

¿Cuál era la interpretación de esto?

Coordenadas de Eddington (-Finkelstein)

1924: Coordenadas de Eddington (-Finkelstein):

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{r} \right) dv^2 + 2dvdr + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$
$$-\infty < v < +\infty, \quad r > 0, \quad (\theta, \phi) \in S^2$$

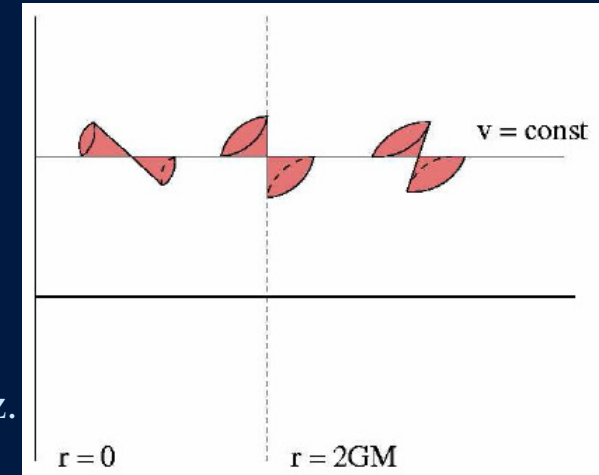
Una partícula en reposo $r = 2GM$, se mueve a la velocidad de la luz.
Toda partícula masiva en $r = 2GM$ debe moverse hacia valores menores de r .

- ▶ La superficie $r = 2GM$ sólo deja pasar partículas en una dirección.

No hay fuerza capaz de mantener a una estrella de radio menor o igual que $2GM$ en reposo → Colapso gravitatorio.

Eddington:

“Various accidents may intervene to save the star, but I want more than that. I think there should be a law of Nature to prevent a star from behaving in such an absurd way!”



Situación confusa durante bastantes años.

- ▶ Poco a poco se impone la idea de que el interior de $r = 2GM$ es una región de la que nada puede escapar.
- ▶ En 1958 John Archibald Wheeler inventa el término agujero negro.

Definición de agujero negro

Queremos hacer precisa la noción de “región del espacio de la que nada puede escapar”

¿Escapar a dónde? Necesitamos un concepto de “región asintótica” = Infinito

Espacio-tiempo asintóticamente plano = $\left\{ \begin{array}{l} \text{En regiones suficientemente alejadas de las fuentes del} \\ \text{campo gravitatorio la métrica espacio-temporal difiere} \\ \text{de la métrica plana en términos que decaen como } 1/r \\ \\ ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 + O\left(\frac{1}{r}\right) \end{array} \right.$

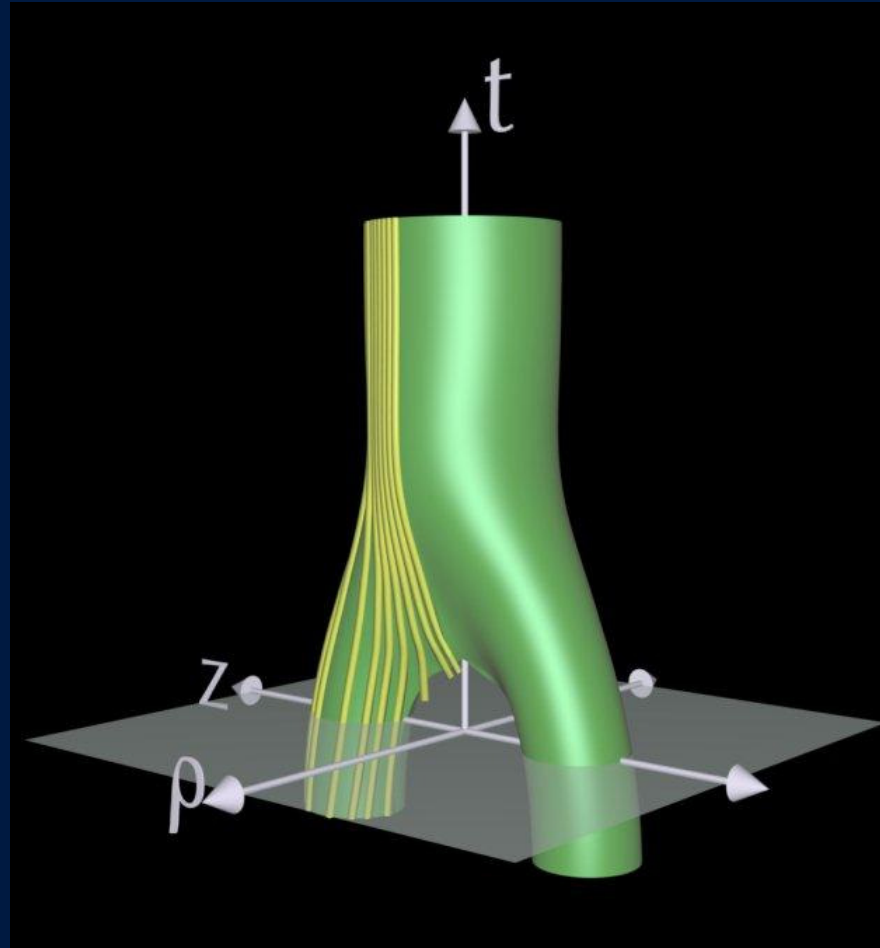
Para cualquier suceso $x \in M$ nos preguntamos: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } x \in D \\ \text{No } x \notin D \end{array} \right.$
¿ Existe un rayo que luz que vaya de x a la región asintótica?

Definición: Un espacio-tiempo asintóticamente plano es un agujero negro si $\partial D \neq \emptyset$

$E \equiv \partial D =$ Horizonte de sucesos

- ▶ Es la frontera del agujero negro
- ▶ Es una 3-superficie luminosa
La historia de una superficie cuyos puntos se mueven a la velocidad de la luz.
- ▶ Corresponde a $r = 2 G M$ en la métrica de Schwarzschild (radio de Schwarzschild)

Horizonte de sucesos



Teoremas de unicidad de agujeros negros

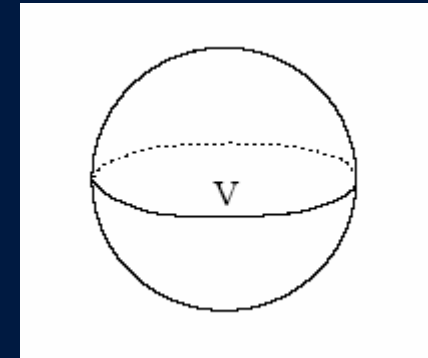
Es lógico pensar que un agujero negro tiende a llegar a un estado de equilibrio (**Problema abierto**).

Importante: Conocer los estados de equilibrio de las soluciones de agujero negro.

Analogía con las pompas de jabón:

Después de oscilar un rato llega a un estado de equilibrio: **una esfera**.

Solución con mucha simetría y pocos parámetros (radio).



Para un espacio-tiempo, ¿Qué significa “estar en equilibrio”?

En Relatividad General no hay sistemas de referencia ni sistemas de coordenadas privilegiados



No existe una manera canónica de medir tiempo

Estacionario = Existe algún sistema de referencia para el que la métrica es independiente del tiempo

Las fuentes del campo pueden estar en movimiento

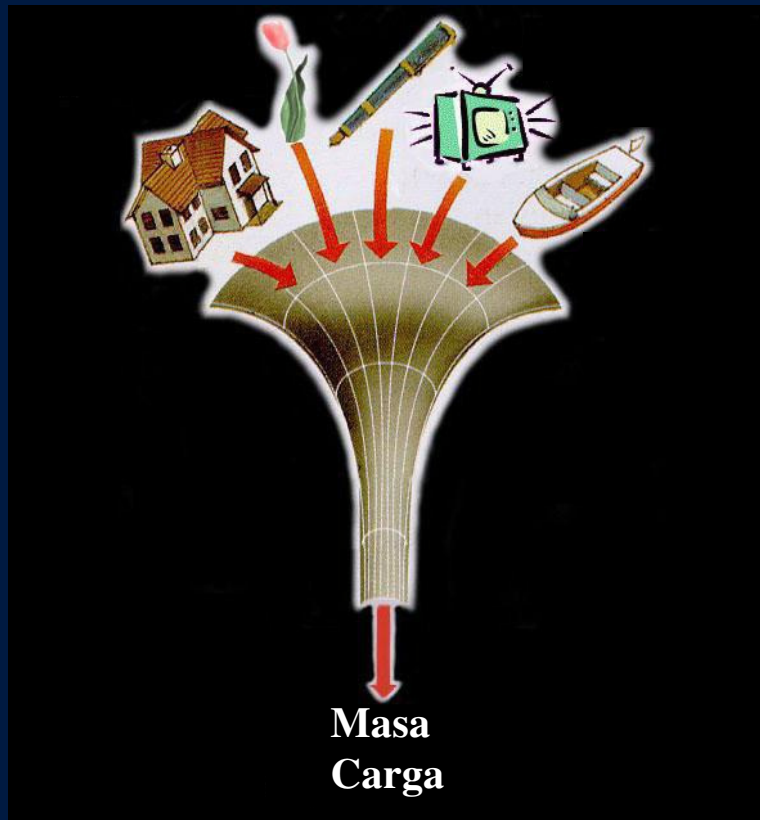
Estático = Además de estacionaria, la métrica es invariante bajo inversión temporal → Futuro y pasado son indistinguibles

Las fuentes están en reposo

Teorema de unicidad (caso estático)

La estructura externa de un agujero negro estático y asintóticamente plano sólo depende de dos parámetros: la masa total M y la carga total Q

► La mayor parte de las propiedades de la materia desaparecen cuando entran en un agujero negro (y se alcanza un estado de equilibrio): Composición química, forma, tamaño, color, composición elemental (electrones, protones...), campo magnético, etc.



Sobreviven:

- la energía total (Conservación de la energía)
- la carga eléctrica total (Conservación de la carga)

El agujero negro rápidamente absorberá partículas con carga contraria $\rightarrow Q = 0$

Métrica de Schwarzschild

Israel (1967)

Bunting y Masood-ul-Alam (1987)

Teorema de unicidad (caso estacionario)

El agujero negro puede estar en movimiento → **Rotación**

Momento angular total: J

Cantidad conservada cuando el espacio-tiempo tiene simetría axial

▶ no puede ser emitido mediante ondas gravitatorias

La estructura externa de un agujero negro estacionario y asintóticamente plano sólo depende de tres parámetros: M, J, Q

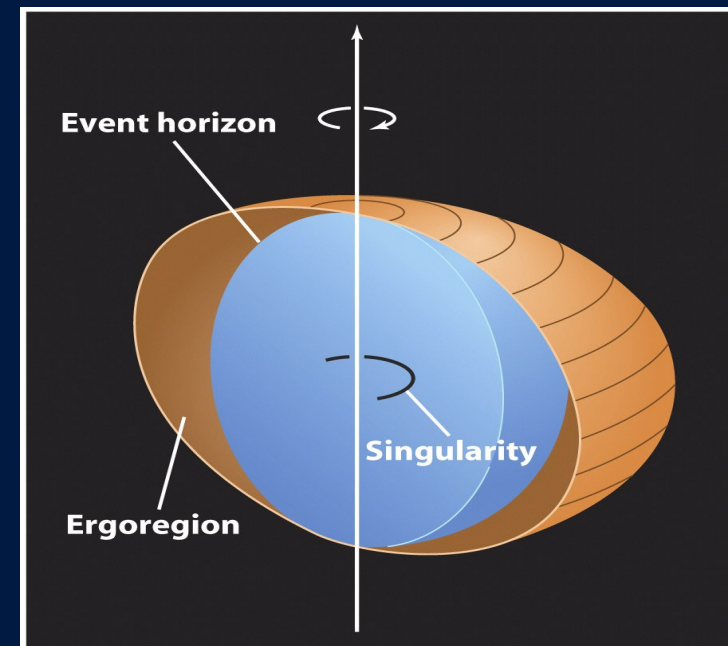
Robinson (1975)

Hawking (1973)

Si $Q = 0$ → Métrica de Kerr (R. Kerr 1963)

4 diferencias fundamentales:

1. El horizonte gira con una velocidad angular $\Omega \neq 0$ (respecto al infinito)
2. El horizonte no es una esfera (simetría axial, achatado por los polos)
3. El momento angular no puede ser arbitrariamente grande $J \leq G M^2$
4. Existe un ergoregión donde ningún observador puede permanecer en reposo.



Las leyes de los agujeros negros

Para agujeros negros en equilibrio podemos definir

1. Gravedad superficial κ \rightarrow Medida de la fuerza gravitatoria en la superficie del horizonte de sucesos

Caso estático: Límite en el horizonte de la fuerza por unidad de masa que debemos hacer desde el infinito para mantener una partícula en reposo

2. Area del horizonte de sucesos A Se puede definir para cualquier agujero negro $A(t)$
Para el caso estacionario, $A = \text{const.}$

Ley 0 : La gravedad superficial es constante en todo el horizonte
(agujeros negros en equilibrio)

Primera Ley : Si modificamos el momento angular J y el área A de forma quasi-estacionaria, la masa total del agujero negro cambia según la formula

$$\delta M = \frac{1}{8\pi G} \kappa \delta A + \Omega \delta J$$

Cambio en la energía total \swarrow

\searrow ¿Algo que ver con entropía?

\swarrow Si fuera un objeto rígido: trabajo que hay que hacer para modificar el momento angular

Hawking (1971)



- Los rayos de luz que forman el horizonte de sucesos nunca convergen
→ el área del horizonte de sucesos nunca decrece
- Incluso si dos agujeros negros se combinan para formar uno solo, el área no puede disminuir

Segunda Ley: No existe ningún proceso dinámico por el cual el área de un agujero negro disminuye

$$\delta A \geq 0$$

Tercera Ley: No es posible generar, mediante un número finito de procesos físicos, un agujero negro “extremal” $\kappa = 0$

Clara analogía con las leyes de la termodinámica

Sugiere $A \leftrightarrow S$ y $\kappa \leftrightarrow T$

No obstante, la entropía es una medida del número de estados compatibles con una configuración macroscópica → Teoremas de unicidad implicarían que la entropía de un agujero negro es cero...

Implicaría violación de la segunda ley de la termodinámica

1972: Punto de vista comúnmente aceptado por casi todos, excepto Jacob Bekenstein que propuso

$$S \propto A \quad \text{y por lo tanto tiene asociada una temperatura} \quad T \propto \kappa$$

Radiación de Hawking

Hawking 1972: Si tuviera $T \neq 0$ debería radiar, y nada puede escapar de un agujero negro, \rightarrow los agujeros negros no pueden tener ni T , ni S y deben violar la segunda ley

Bekestein 1972: “Admito que los agujeros negros no pueden radiar, pero debe haber algo mal en su punto de vista porque los agujeros negros deben obedecer las leyes de la termodinámica”

Hawking 1974: Los agujeros negros emiten radiación mediante un proceso cuántico

Emite radiación de cuerpo negro a una temperatura de

$$kT = \frac{hc^3}{16\pi GM}$$

La energía es extraída del agujero negro
 \rightarrow éste disminuye su masa.

$$T(3M_{\odot}) \approx 10^{-8} K$$

Tiempo de evaporación:

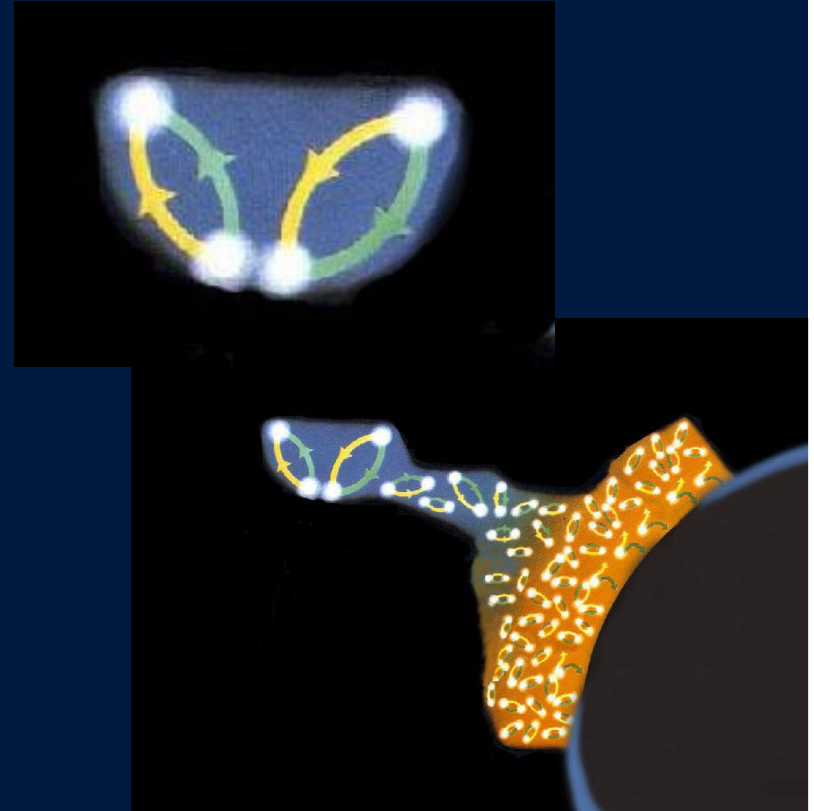
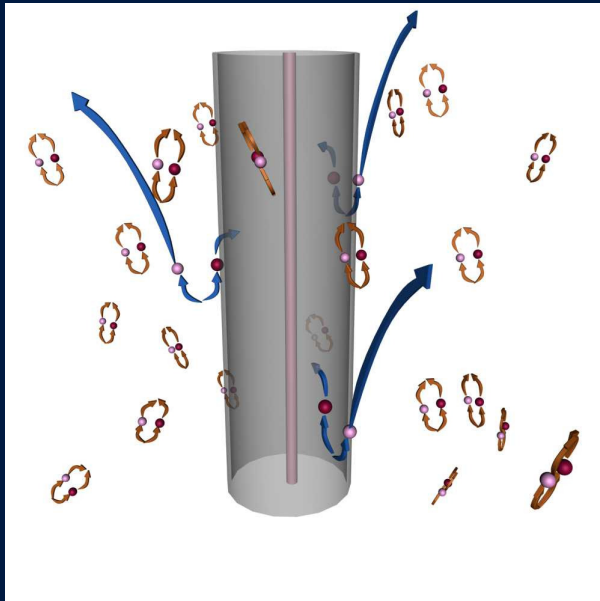
$$t = \frac{10240\pi^2 G^2 M^3}{hc^2} \left\{ \begin{array}{ll} M = 10^9 M_{\odot} & t = 10^{94} \text{ años} \\ M = 2M_{\odot} & t = 10^{67} \text{ años} \\ M = 100\text{kg} & t = 1 \text{ segundo} \end{array} \right.$$

Es un cálculo semiclásico (campos cuánticos en espacio-tiempos clásicos)
Resultado muy robusto → Ligaduras para una posible teoría cuántica de la gravedad

Intuitivamente:

En el vacío hay fluctuaciones cuánticas,
→ se forman pares de partícula-antipartícula virtuales
→ Estos pares se aniquilan en un intervalo de tiempo compatible con el principio de Heisenberg

$$\Delta t \Delta E \approx h$$



- Cerca del horizonte, una partícula virtual puede entrar el agujero negro
- La otra puede escapar al infinito usando la energía extraída del agujero (absorbe una partícula con $E < 0$)

¿Como podemos detectar agujeros negros?

Los agujeros negros son predicciones teóricas de la relatividad general:

¿Existen en la Naturaleza?

Clásicamente nada escapa de un agujero negro →

Sólo podemos detectar el campo gravitatorio que produce

Situación estacionaria → Métrica de Kerr →

En la práctica imposible de distinguir mediante medidas físicas en la región asintótica

Necesitamos: {
Medidas indirectas
Medidas dinámicas del campo gravitatorio (ondas gravitatorias)

Para que sea detectable necesitamos agujeros muy pequeños

¿Radiación de Hawking?

Temperatura (por lo tanto luminosidad) decrece con la M

Un agujero negro con la masa de un asteroide emitiría radiación similar a la de una bomba de un millón de megatones

¿Existen agujeros negros tan pequeños?

¿Agujeros negros primordiales?

Medidas indirectas

Una estrella de neutrones no puede tener una masa superior a $3M_{\odot}$

La atracción gravitatoria no puede ser compensada por la presión de degeneración de los neutrones

(de acuerdo con los conocimientos actuales de la ecuación de estado para estrellas de neutrones)

Si la masa del invisible $> 3 M_{\odot}$

Buen candidato a agujero negro

Diversas maneras de estimar la masa, la más simple:

En sistemas binarios,
(un objeto visible y uno invisible):

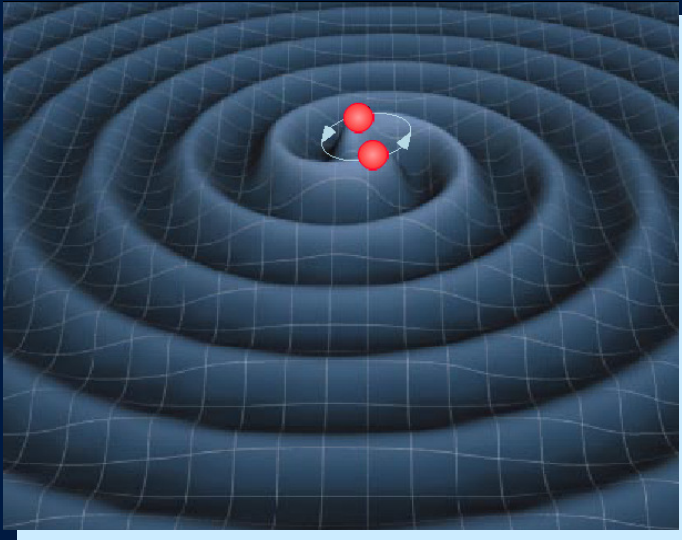
Medir el periodo orbital y el semieje mayor del visible y aplicar la ley de Kepler (valida excepto muy cerca del horizonte)

$$\frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^3} = \frac{r^3}{T^2}$$

Existen métodos mucho más sofisticados: Área muy activa de la astrofísica

Medidas directas

Sistemas binarios:

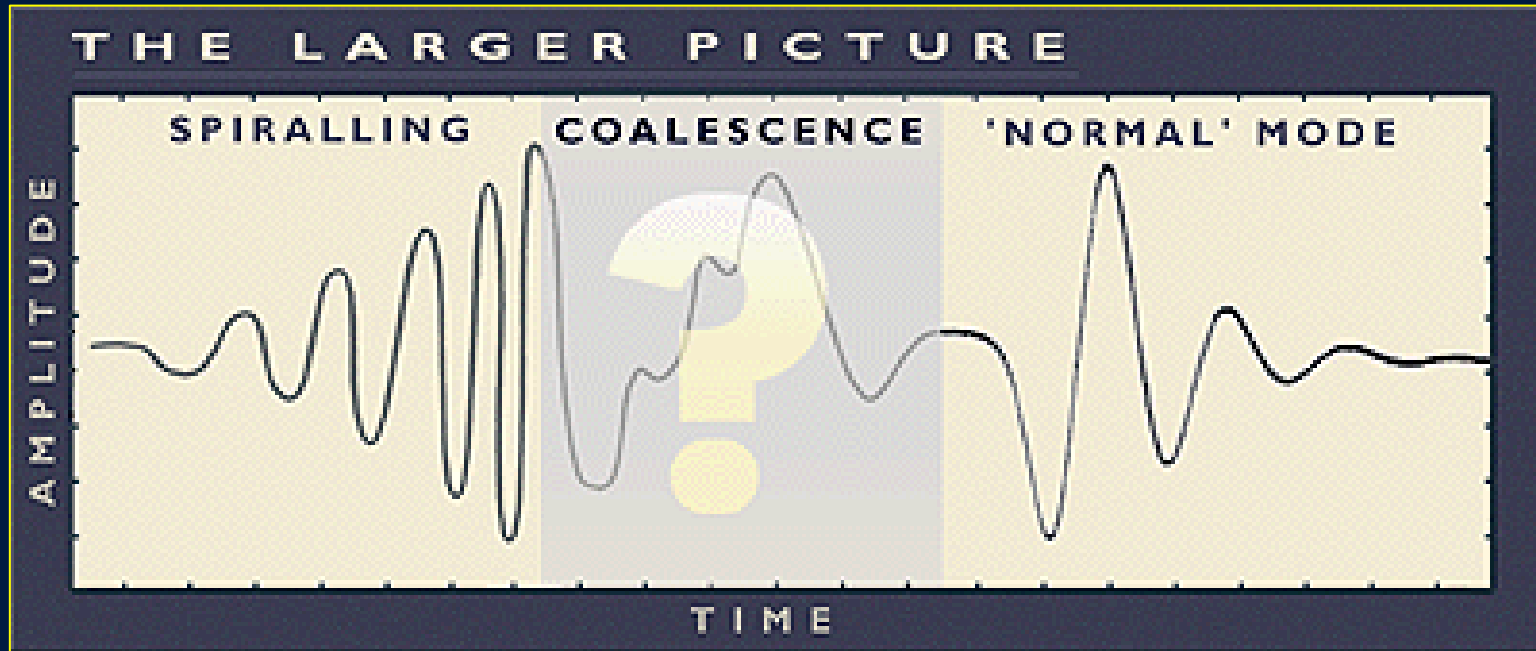


Detección de ondas gravitatorias emitidas por la fusión de dos agujeros negros

Un sistema binario de dos agujeros negros, emite ondas gravitatorias,

- El sistema emite energía
- Los agujeros negros se aproximan y coalescen

3 fases distintas



Periodo acercamiento espiral:
aproximación post-newtoniana

Situación altamente no lineal:
Uso de métodos numéricos.
Grandes computadores, problema abierto

Vibraciones del agujero negro
perturbaciones a primer y
segundo orden

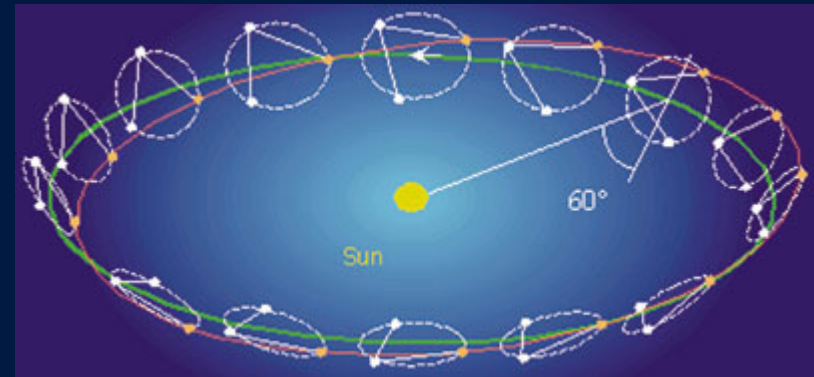
Detección de ondas gravitatorias:

LIGO (Estados Unidos)



LISA (Espacial) ~ 2012 ?

GEO 600 (Alemania)



Evidencia experimental de agujeros negros

2 tipos de agujeros negros:

1. Agujeros negros de masa estelar:

Creados por el colapso de estrellas masivas
Encontrados en sistemas binarios

$$3 - 100 M_{\odot}$$

Agujeros negros estelares:

Cygnus X-1 (1986)

- La estrella HD 226868 es una supergigante azul
- Periodo orbital = 5.6 días
- $M = 25 M_{\odot}$
- No se observa ninguna estrella acompañante,

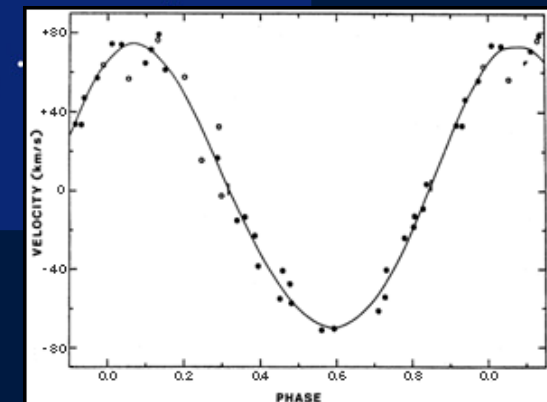
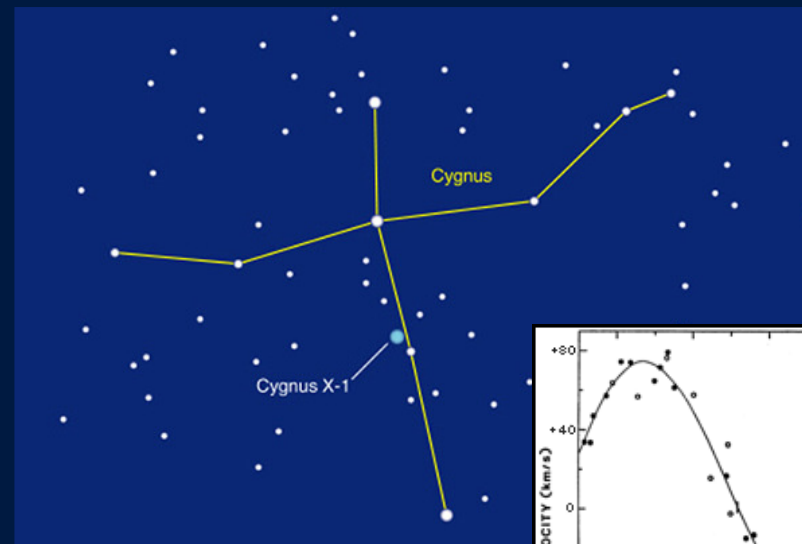
$$M_2 = 10 M_{\odot}$$

En la actualidad hay approx. 20 candidatos de agujeros negro en sistemas binarios

2. Agujeros negros supermasivos

Posiblemente creados por colapso de cúmulos de estrellas y posterior acreción.
Encontrados en el centro de las galaxias, quásares, núcleos galácticos activos (AGN)

$$10^6 - 10^9 M_{\odot}$$



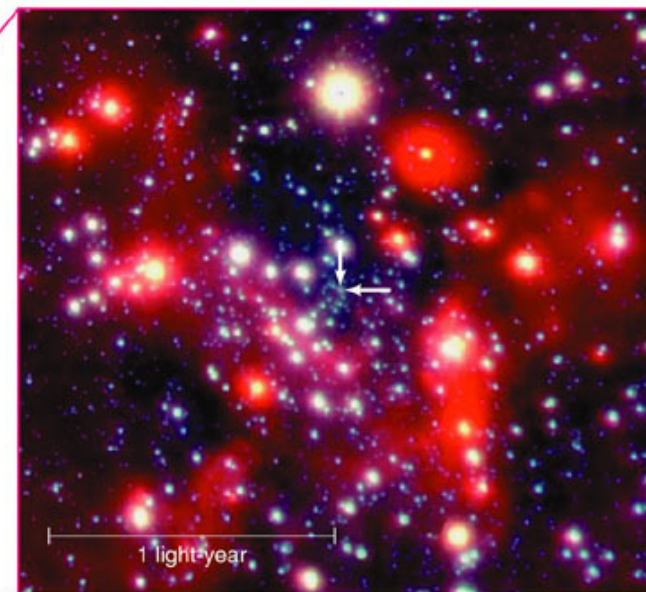
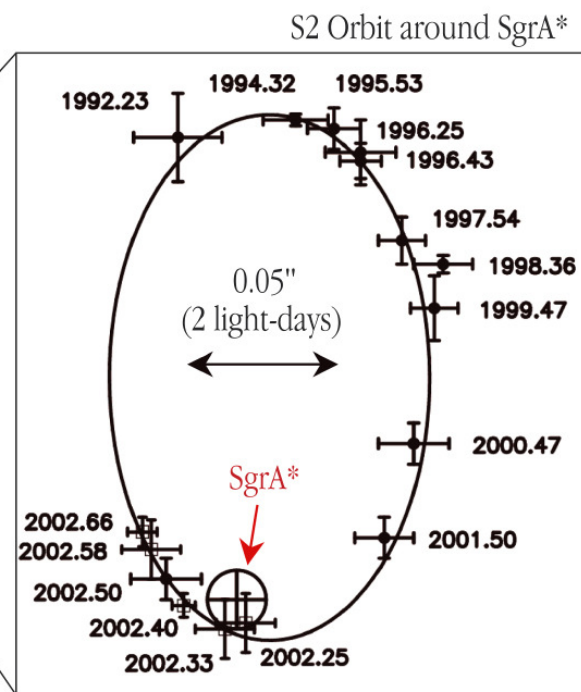
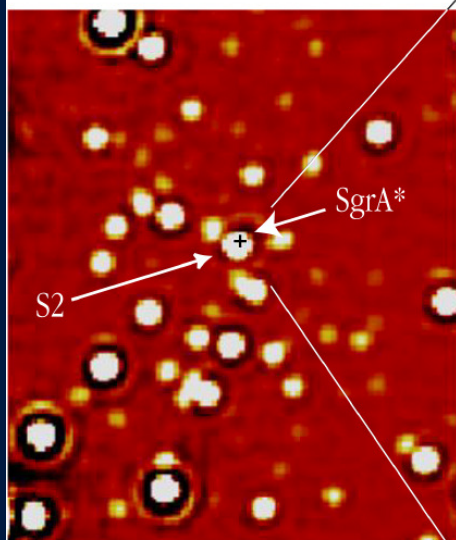
Agujeros negros supermasivos:

Se cree que una gran mayoría de Galaxias tienen en un centro un agujero negro supermasivo.

Vía Láctea:



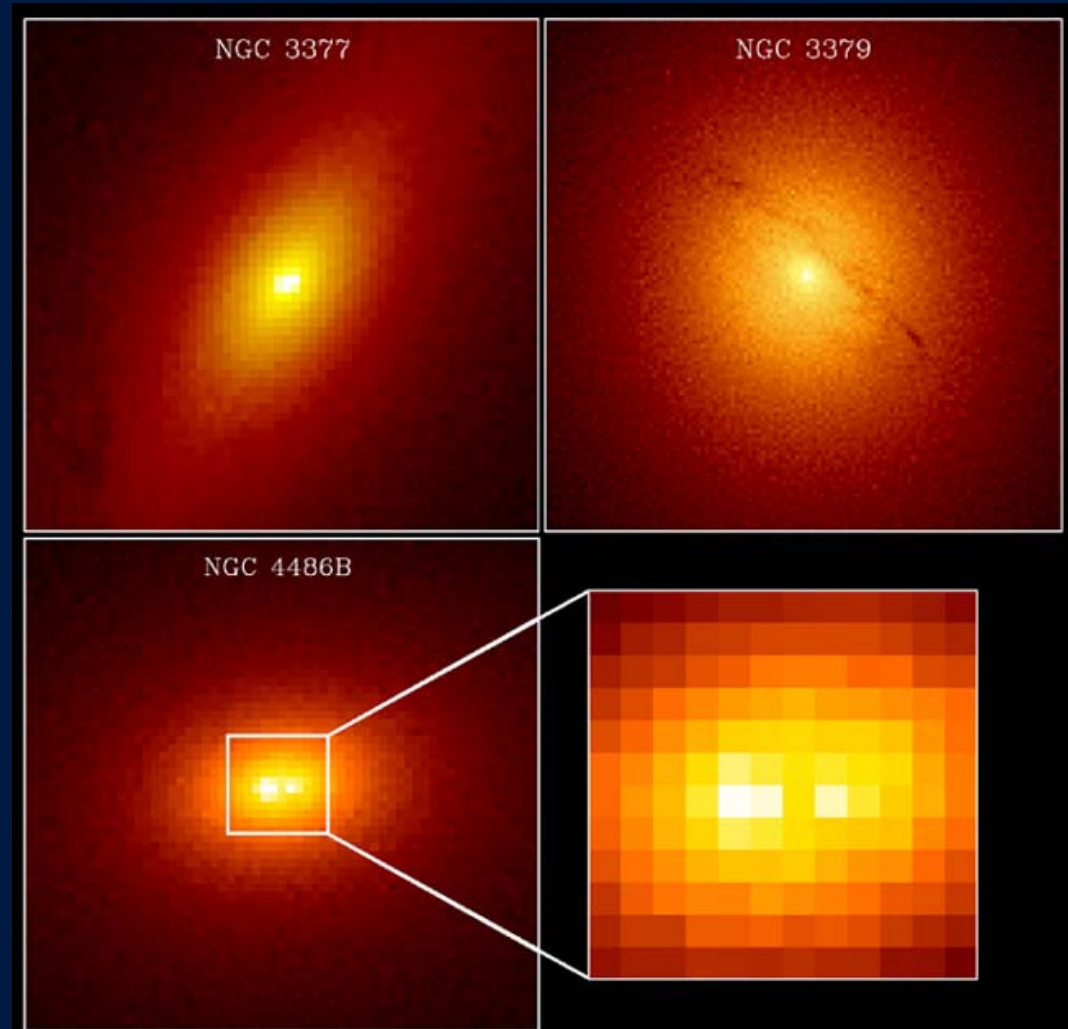
NACO May 2002



*SgrA**

The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

- Imagen de NGC 3377 y NGC 4486B = **2.7 arcsec**
NGC 3379 = **5.4 arcsec**
- NGC 4486B parece tener un núcleo doble
Ampliación = **0.5 arcsec**



Galaxies Possibly Containing Black Holes

HST • WFPC2

PRC97-01 • ST ScI OPO • January 13, 1997 • K. Gebhardt (U. MI), T. Lauer (NOAO) and NASA