

# Agujeros Negros

EL MATRIMONIO PERFECTO ENTRE TEORÍA Y OBSERVACIONES

Giovanni Miniutti

Centro de Astrobiología



# AGUJEROS NEGROS: DEFINICIÓN

Definición:

es una región finita del espacio en cuyo interior existe una concentración de masa que genera una gravedad tan fuerte que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de ella



La velocidad de escape es la velocidad mínima con la que debe lanzarse un cuerpo para que escape de la atracción gravitatoria de otro cuerpo, por ejemplo la Tierra



$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

depende solo de  $M/R$  es decir que  $V_{esc}$  crece si el objeto del cual queremos alejarnos es compacto

# AGUJEROS NEGROS: DEFINICIÓN

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

En el caso de la Tierra  $V_{esc} \sim 11 \text{ km/s} \sim 40\,000 \text{ km/h}$

Si comprimimos toda la masa de la Tierra en un radio mas pequeño, la  $V_{esc}$  es mayor

Por ejemplo, si comprimimos la Tierra hasta tener un radio de tan solo 100 km  
 $V_{esc} \sim 90 \text{ km/s} \sim 324\,000 \text{ km/h}$

Si seguimos comprimiendo la Tierra llegamos a un punto en el cual  
 $V_{esc} = c$  (velocidad de la luz)  $\sim 300\,000 \text{ km/s} \sim 1\,000\,000\,000 \text{ km/h}$

Eso ocurre cuando

$$V_{esc} = c = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

es decir

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

# AGUJEROS NEGROS: DEFINICIÓN



En el caso de la Tierra  $R_S \sim 8 \text{ mm}$

## Otros ejemplos



Jupiter sería un agujero negro si tuviera un radio de  $\sim 3 \text{ m}$



El Sol sería un agujero negro si tuviera un radio de  $\sim 3 \text{ km}$



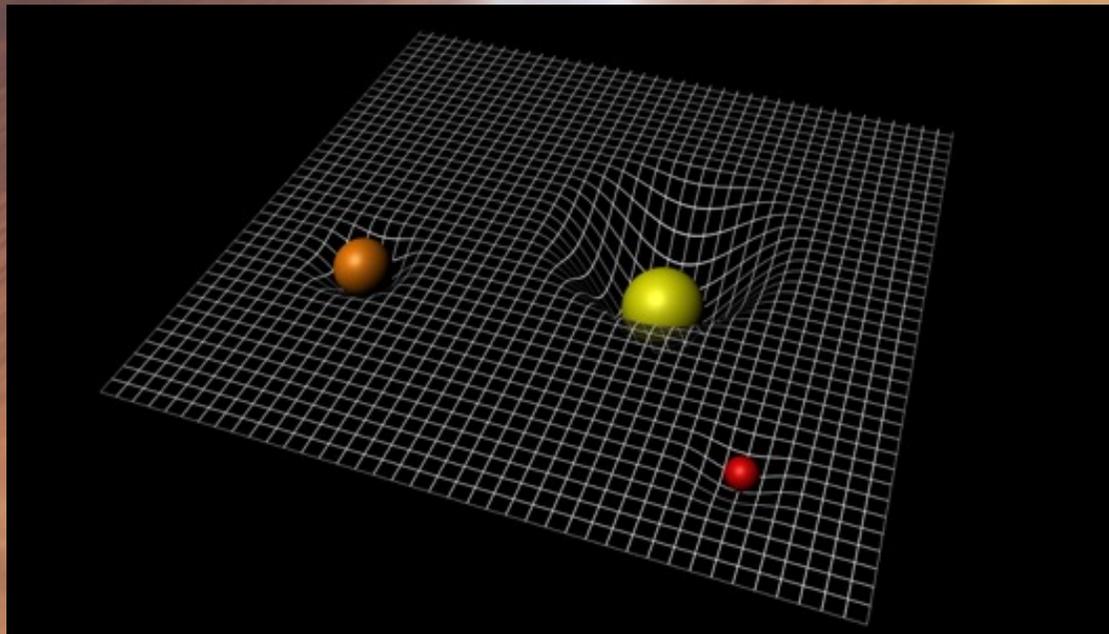
Una estrella 100 veces mas masiva que el Sol sería un agujero negro si tuviera un radio de  $\sim 300 \text{ km}$

# AGUJEROS NEGROS: DEFINICIÓN

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Pero la luz (fotones cuya masa es = 0) no tendría porque obedecer a la gravedad

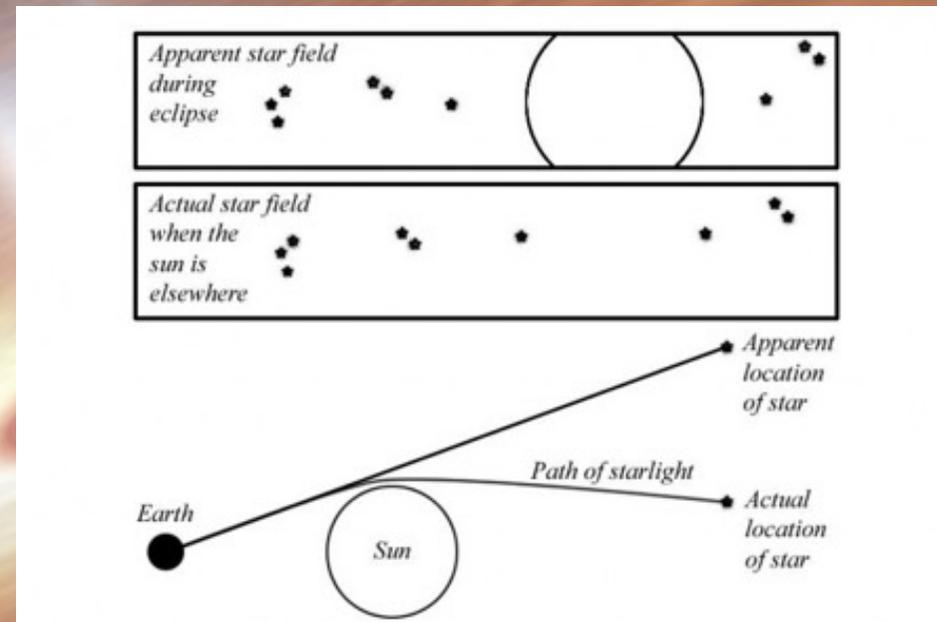
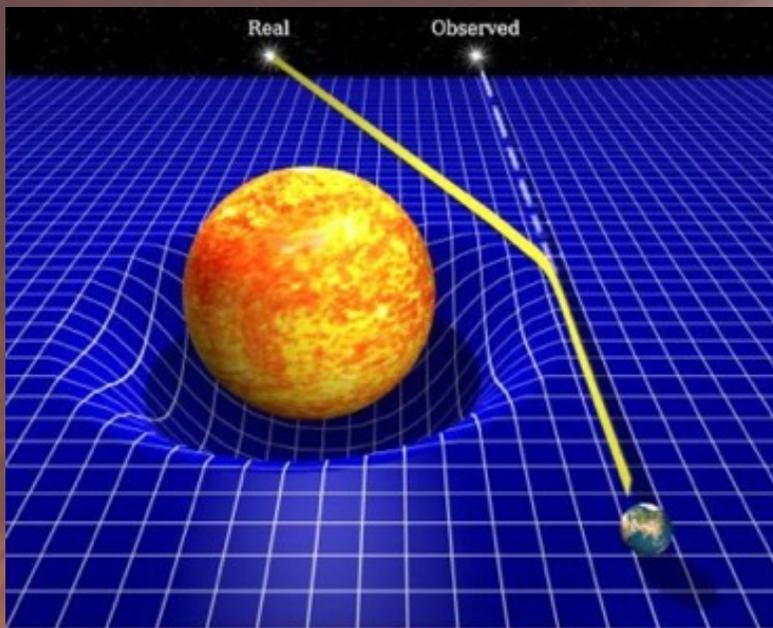
-> Einstein y su teoría de la gravedad (la Relatividad General)



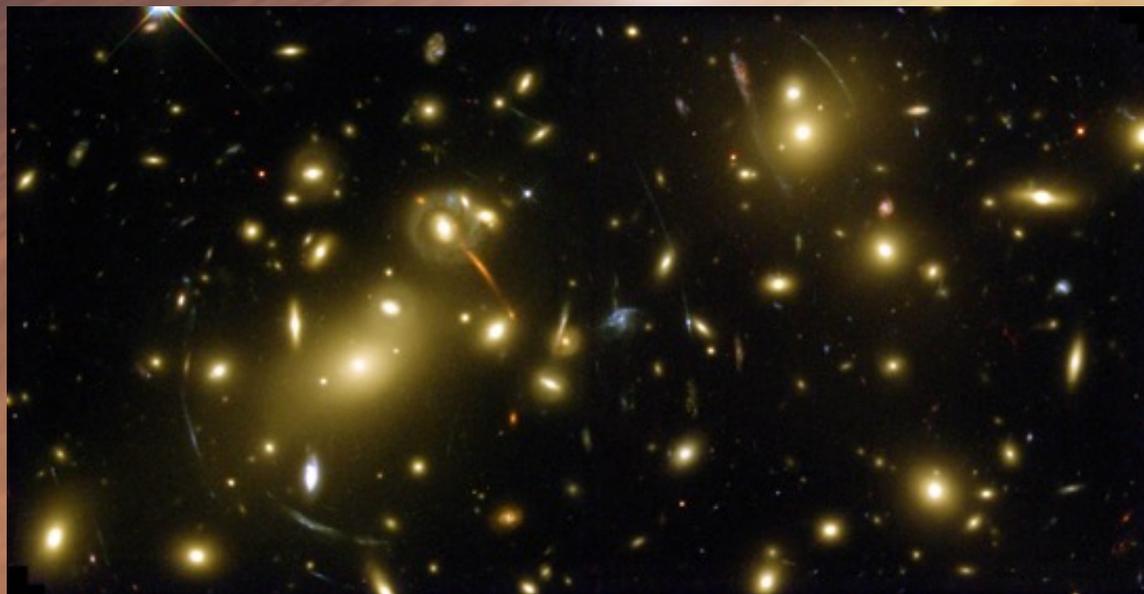
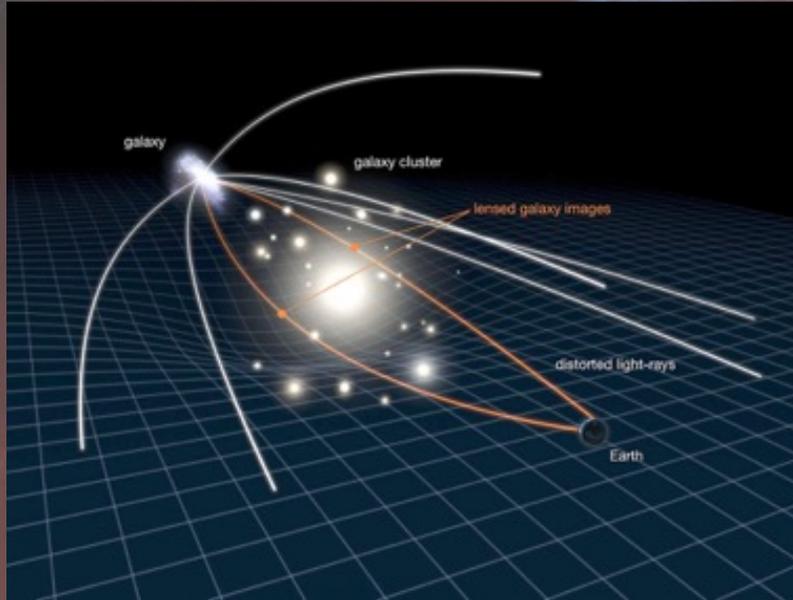
# AGUJEROS NEGROS: DEFINICIÓN

Es decir que una masa (o energía) deforma el espacio-tiempo  
Las orbitas (por ejemplo de los planetas alrededor del Sol) no son debidas a una fuerza entre los objetos -> simplemente cada objeto sigue la trayectoria que le impone la estructura del espacio-tiempo

Predicción: la luz también

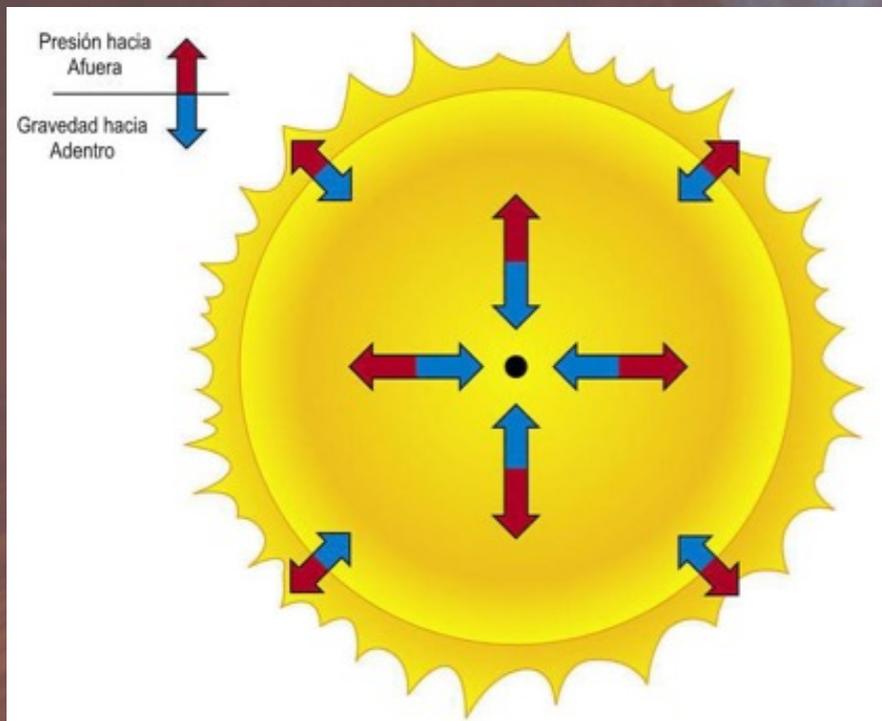


# AGUJEROS NEGROS: DEFINICIÓN



# AGUJEROS NEGROS REALES: FORMACIÓN

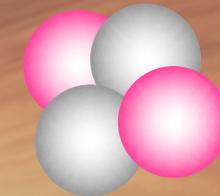
Los agujeros negros se forman por el colapso de estrellas masivas  
Para entenderlo tenemos que abordar brevemente la estructura estelar



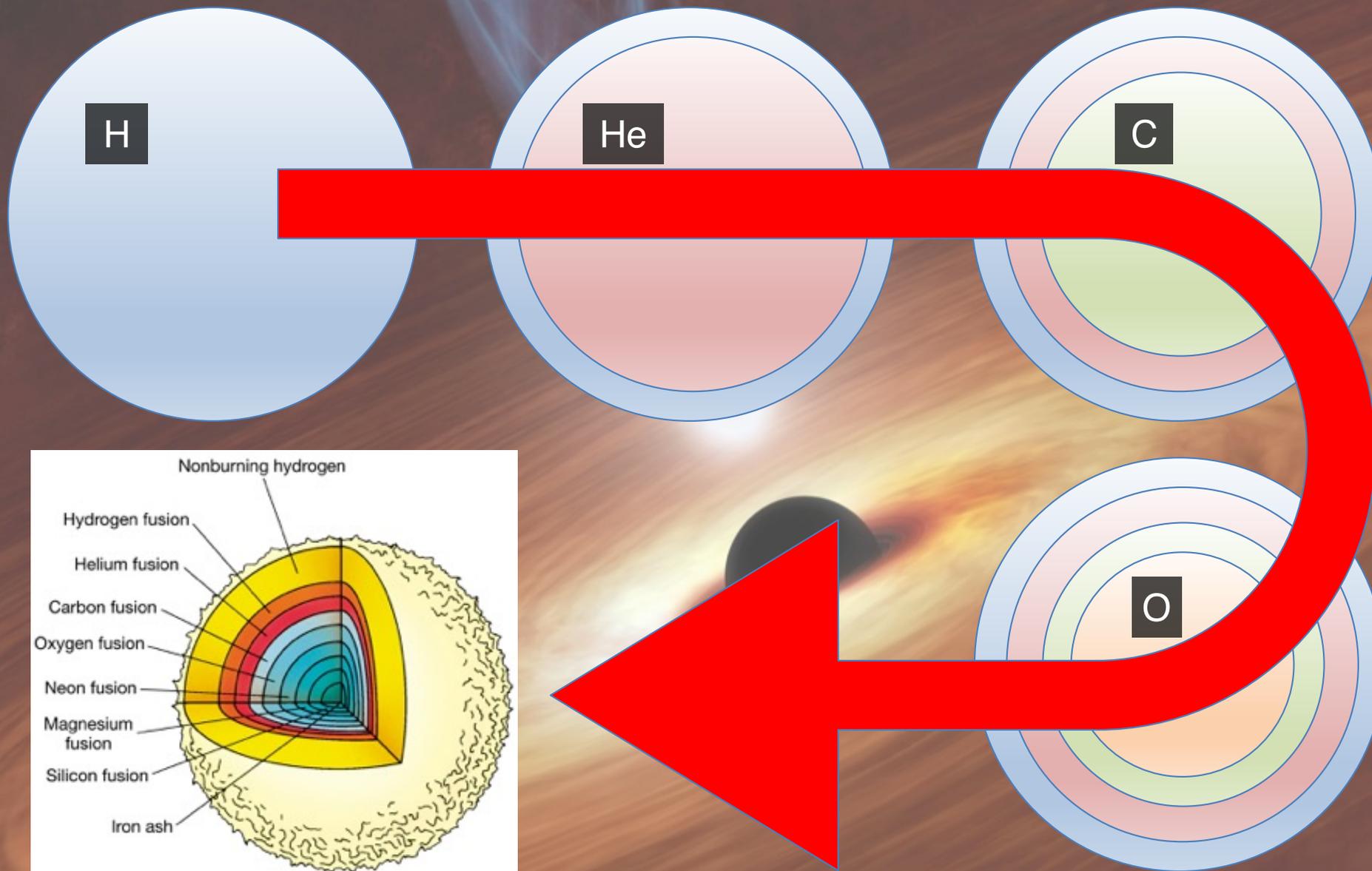
4 átomos de H



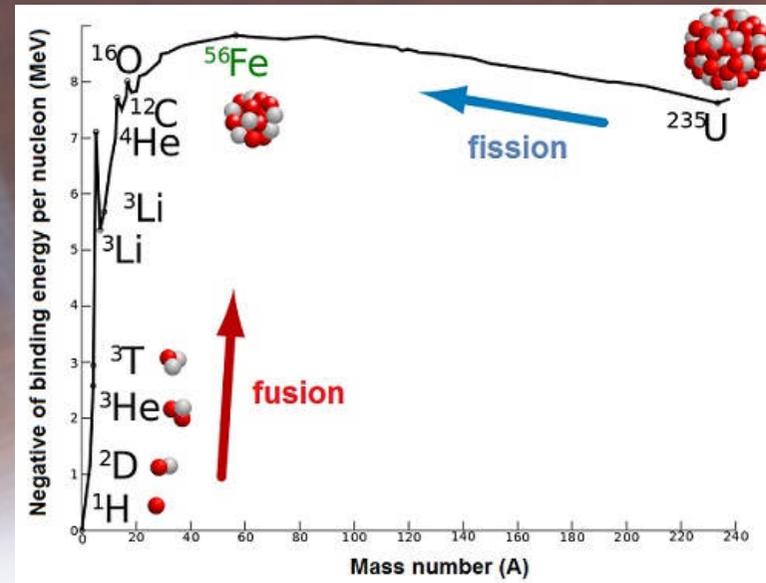
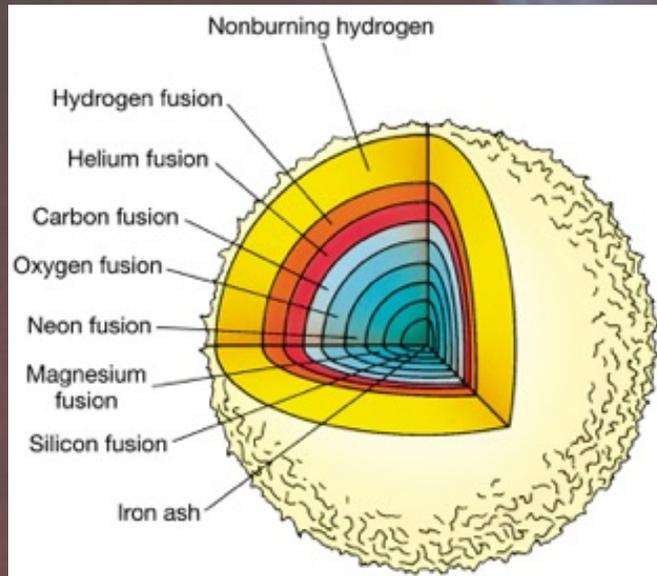
1 átomo de He



# AGUJEROS NEGROS REALES: FORMACIÓN



# AGUJEROS NEGROS REALES: FORMACIÓN

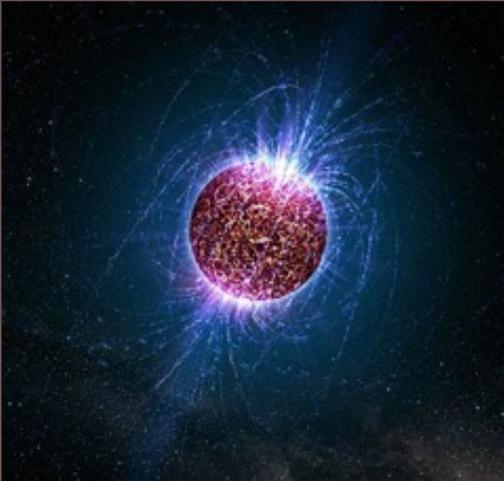


Cuando llegamos al Fe no podemos seguir en la fusión de los núcleos hacia elementos más pesados porque el proceso no genera mas energía, al contrario la necesita

Es decir que no podemos generar la energía necesaria para balancear la gravedad y el colapso es inevitable hasta encontrar otro tipo de presión que pueda bloquearlo

# AGUJEROS NEGROS REALES: FORMACIÓN

1. Si la masa inicial de la estrella es de entre 8 y 25 veces la masa del Sol ( $M_{\odot}$ )



## Estrellas de neutrones

- Presión de Fermi
- Masa de  $\sim 1.4-3 M_{\odot}$
- Radio de tan solo unos 10-15 km (la M-40)

2. Si la masa inicial de la estrella es mayor que 20-25 veces  $M_{\odot}$



## Agujeros negros

- Colapso completo
- Masa mayor que  $3 M_{\odot}$
- Radio del horizonte de los sucesos

# AGUJEROS NEGROS REALES: FORMACIÓN

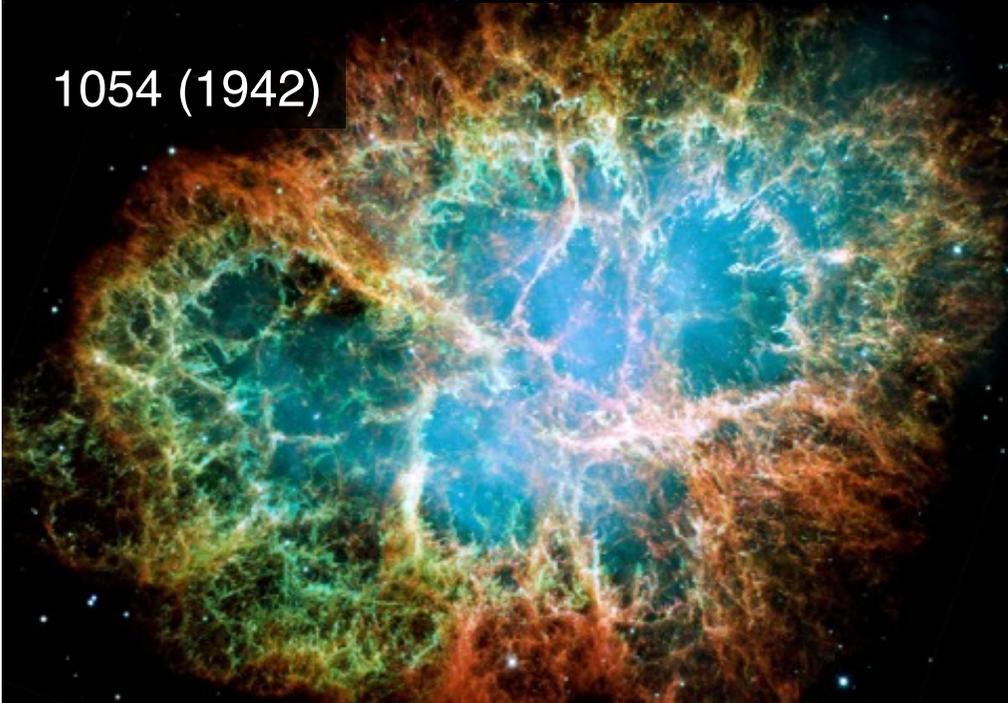
1054 (1942)



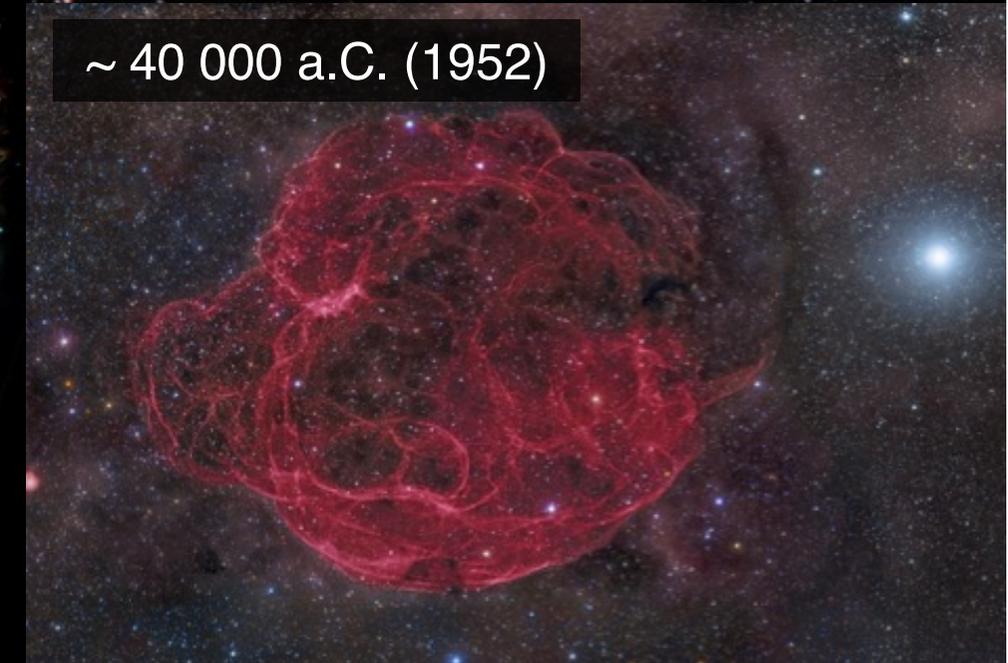
1572 (1952)



1054 (1942)



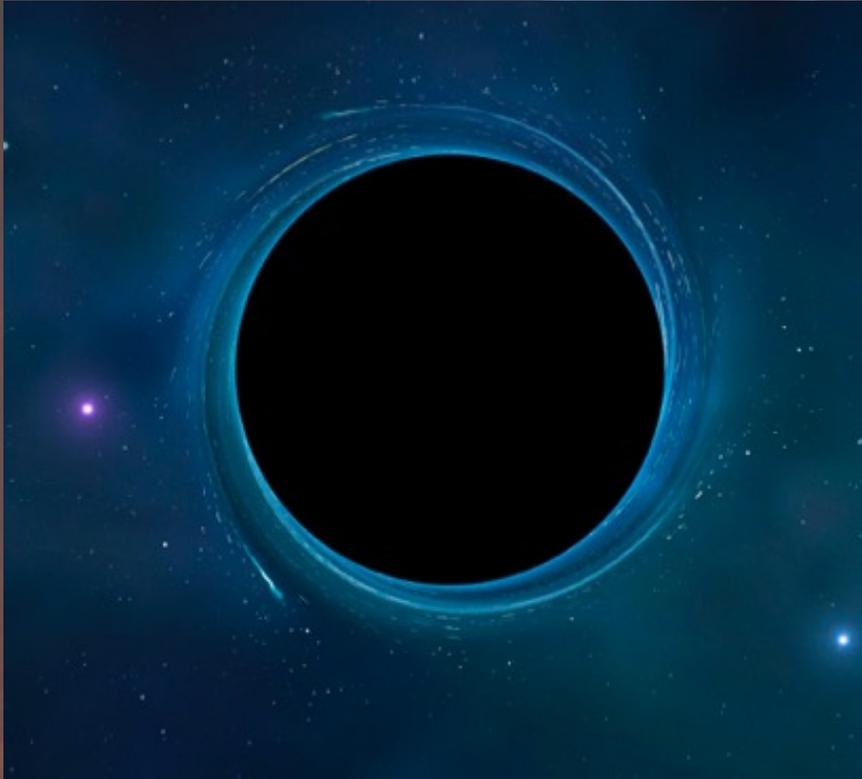
~ 40 000 a.C. (1952)



# AGUJEROS NEGROS REALES: FORMACIÓN



# AGUJEROS NEGROS: PROPIEDADES



Horizonte de los sucesos

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

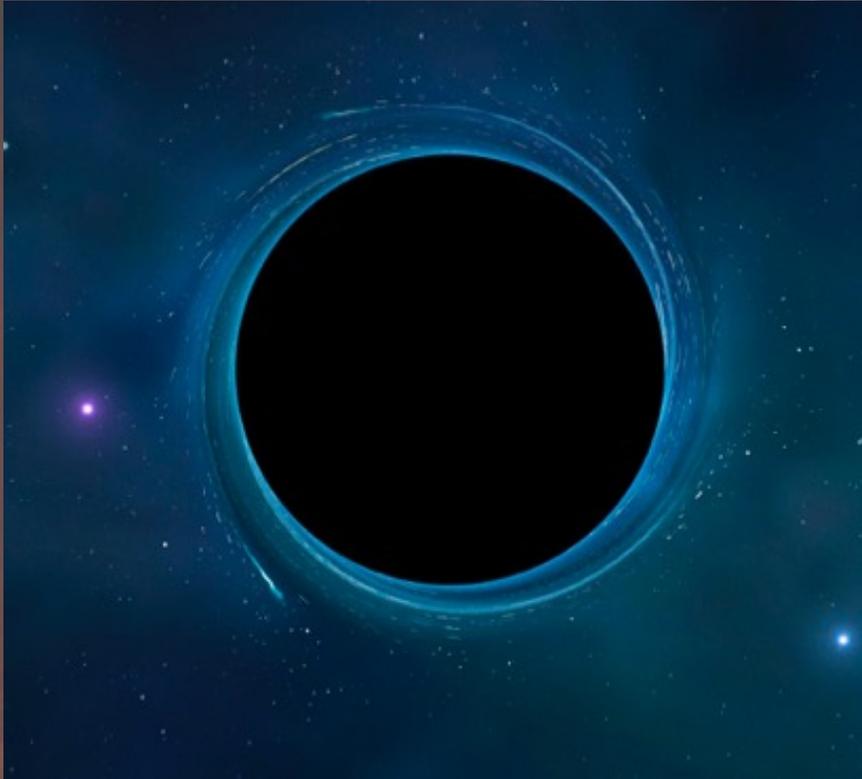
Para la masa del Sol, el agujero negro es ~ 230 000 veces mas pequeño que la estrella

Eso quiere decir que la gravedad cerca del horizonte es 50 mil millones de veces mas intensa que a la superficie del Sol

Es el tamaño de los agujeros negros que los hace especiales porque la materia puede acercarse al horizonte y estar sujeta a una gravedad inmensa

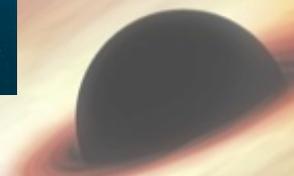
Si estamos a distancias grandes, no hay diferencias entre una estrella y un agujero negro de la misma masa (si, la Tierra y los demás planetas podrían orbitar tranquilamente alrededor de un agujero negro)

# AGUJEROS NEGROS: PROPIEDADES

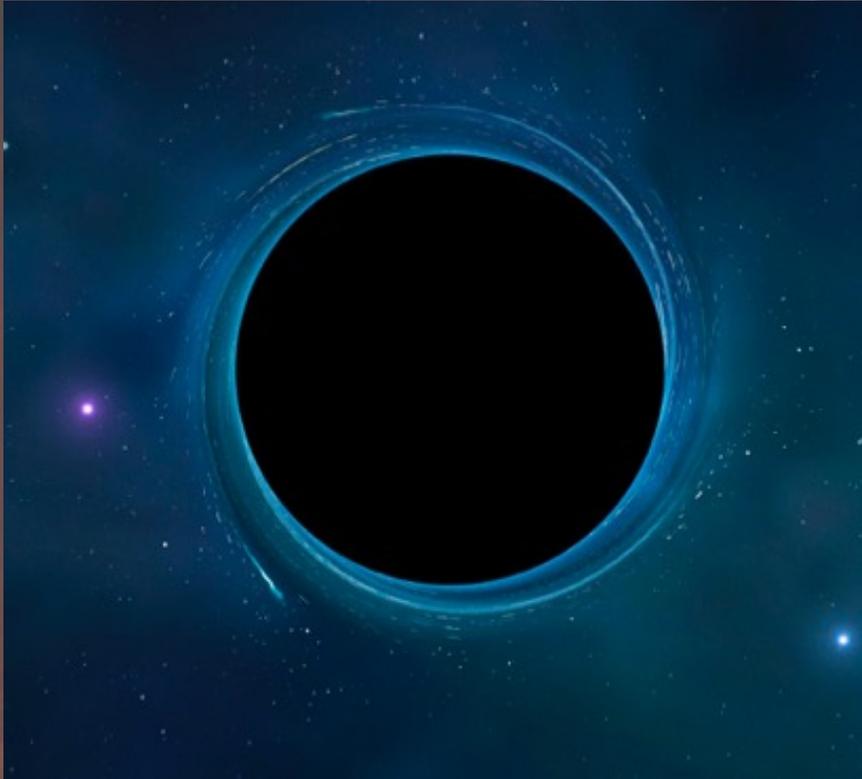


Efectos en las cercanías de los agujeros negros

1. Fuerzas de marea
2. Dilatación del tiempo
3. Pérdida de energía (redshift)



# AGUJEROS NEGROS: PROPIEDADES



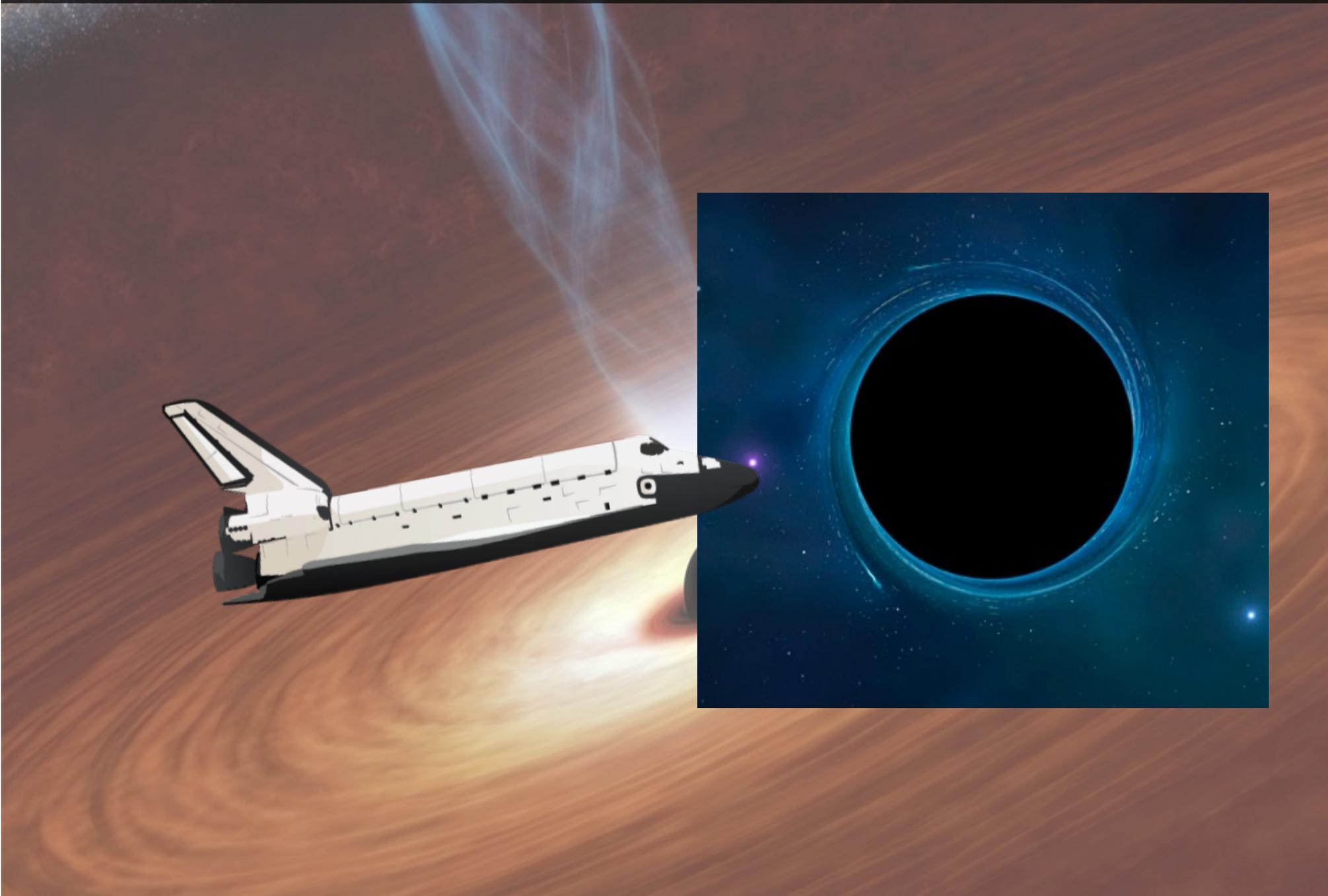
Efectos en las cercanías de los agujeros negros

1. Fuerzas de marea
2. Dilatación del tiempo
3. Pérdida de energía (redshift)

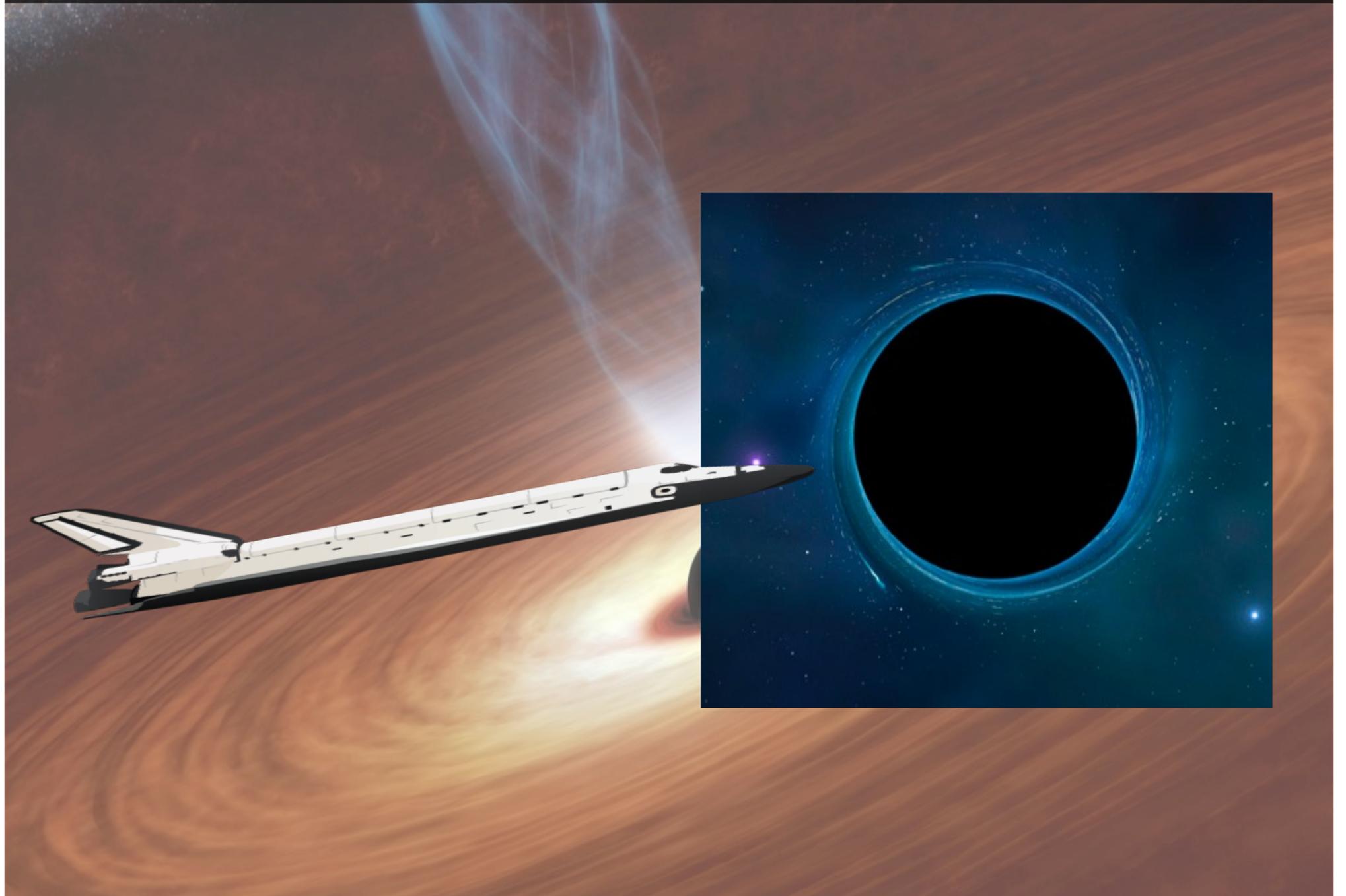
Dependen de la distancia y, en caso de agujero negro no demasiado masivos, pueden destruir incluso estrellas, antes de que se acerquen al horizonte



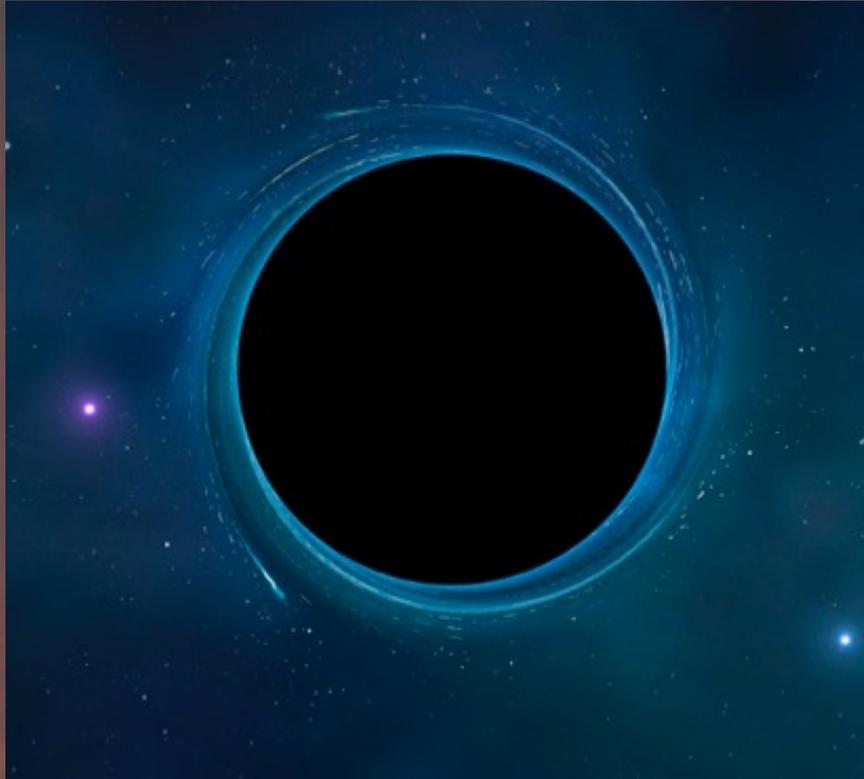
# AGUJEROS NEGROS: PROPIEDADES



# AGUJEROS NEGROS: PROPIEDADES



# AGUJEROS NEGROS: PROPIEDADES



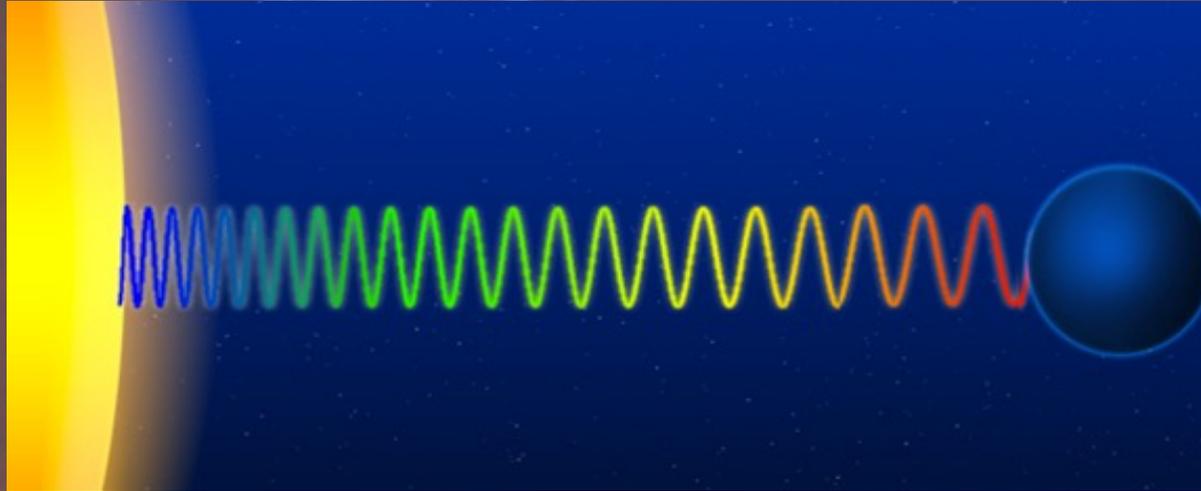
Efectos en las cercanías de los agujeros negros

1. Fuerzas de marea
2. Dilatación del tiempo
3. Pérdida de energía (redshift)

En un campo gravitatorio intenso, una señal, para llegar a un observador lejano tiene que gastar parte de su energía para salir del campo gravitatorio

Es decir que pierde energía o, en otras palabras, que su longitud de onda se alarga

# AGUJEROS NEGROS: PROPIEDADES



Es una predicción de la relatividad general de Einstein y se puede medir incluso por la luz que nos llega desde el Sol (un experimento en 1959 lo confirmó utilizando una torre de tan solo 22 m de alto !)

La diferencia con agujeros negros es que el efecto es mucho mayor, debido a la gravedad más intensa en las cercanías del agujero negro

# AGUJEROS NEGROS REALES

Vale, pero si son "negros" y ni siquiera la luz puede salir de su campo gravitatorio, ¿ como sabemos que existen de verdad ?



El material a los alrededores va cayendo hacia el agujero negro formando una estructura a espiral (el disco de acrecimiento)

El material se calienta (fricción) y emite grandes cantidades de radiación electromagnética (luz)

Las regiones más internas (más calientes) emiten principalmente en los rayos X

# AGUJEROS NEGROS REALES: CYGNUS X-1



# AGUJEROS NEGROS REALES: CYGNUS X-1

1964 – se detecta una fuente brillante de rayos X en la costellación del Cisne

1970 – observaciones con mejores observatorios de rayos X confirman la fuente y demuestran que la fuente es muy variable en tiempos de escalas tan cortos (menos de 1 s) que la fuente tiene que ser muy compacta

1971 – la posición de la fuente se conoce con suficiente precisión para buscar la fuente con telescopios ópticos

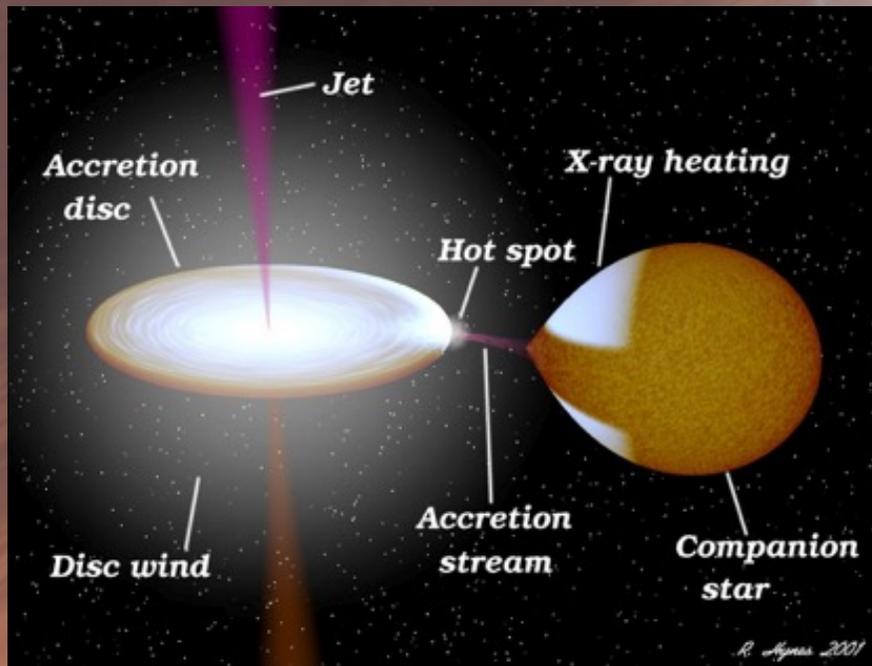
se encuentra una estrella coincidente con la posición de la fuente de rayos X

pero, ninguna estrella podría emitir tantos rayos X como los que se habían detectado



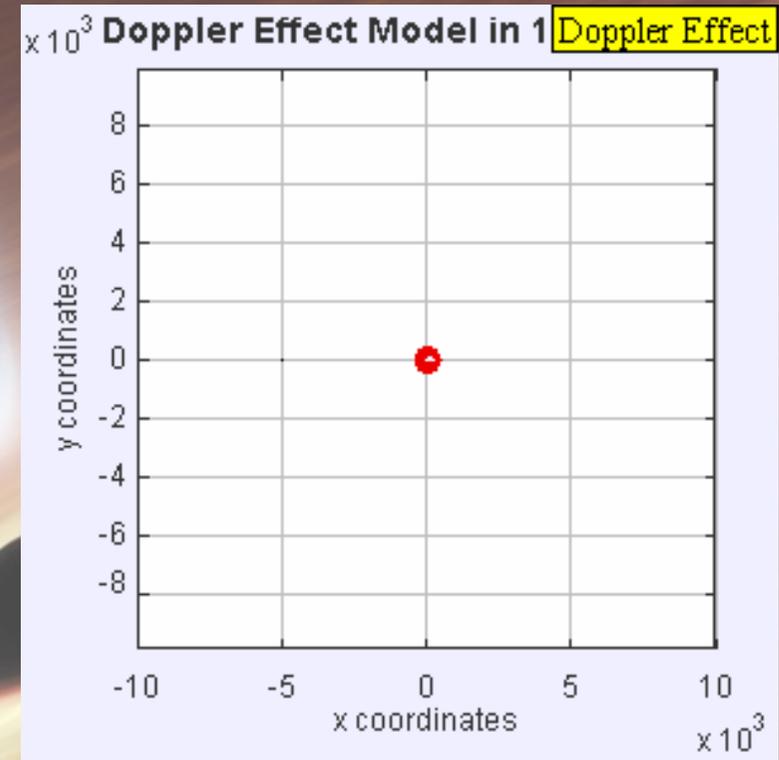
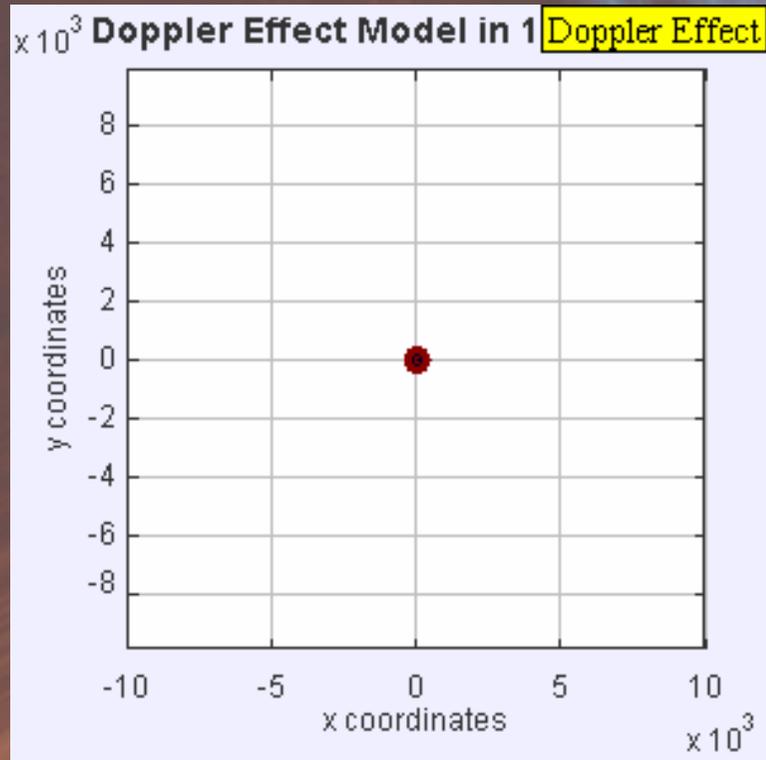
# AGUJEROS NEGROS REALES: CYGNUS X-1

Para confirmar que el objeto es un agujero negro es necesario medir su masa y que sea superior a la masa máxima para una estrella de neutrones ( $> 3 M_{\odot}$ )



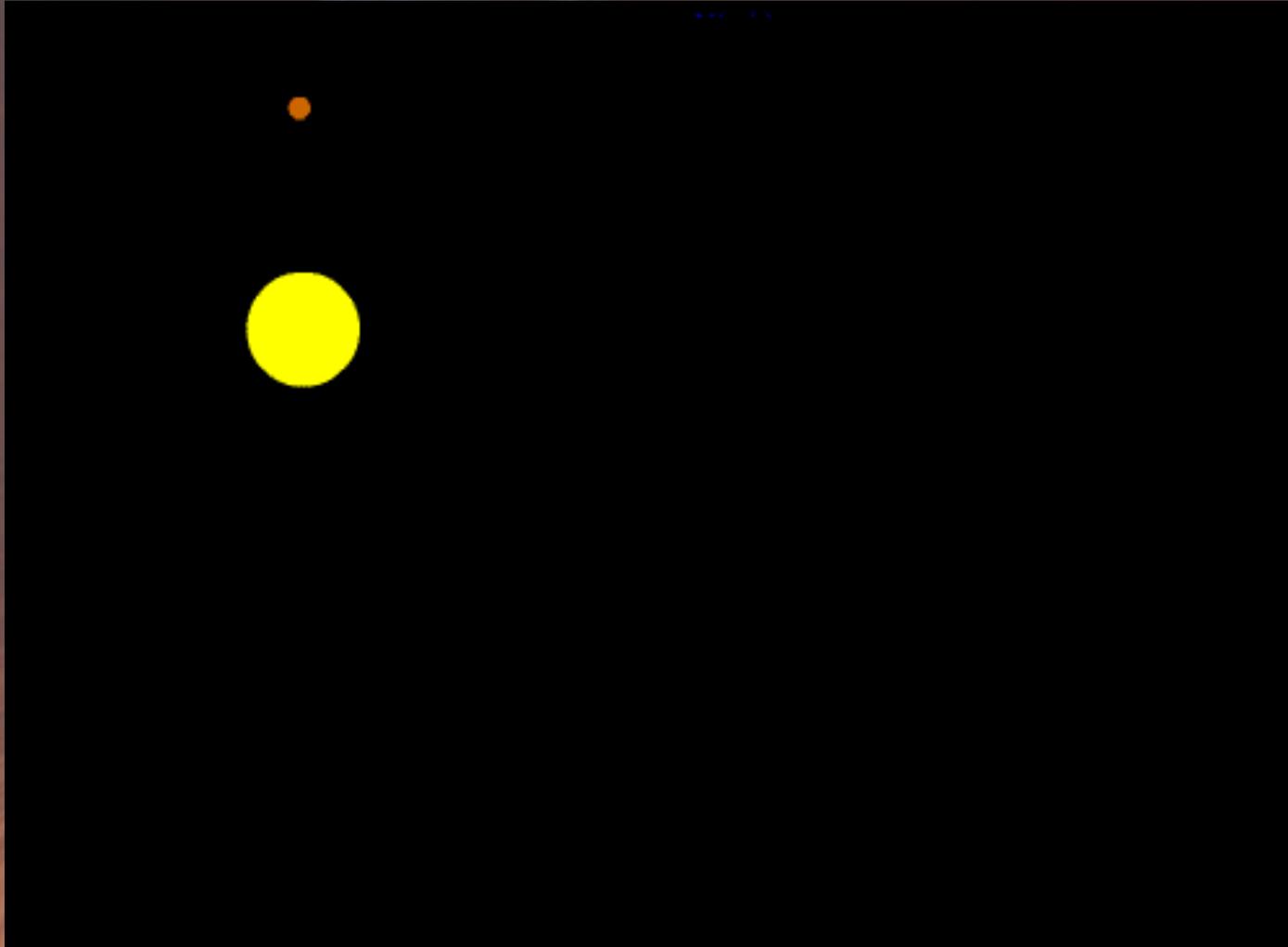
# AGUJEROS NEGROS REALES: CYGNUS X-1

## Efecto Doppler

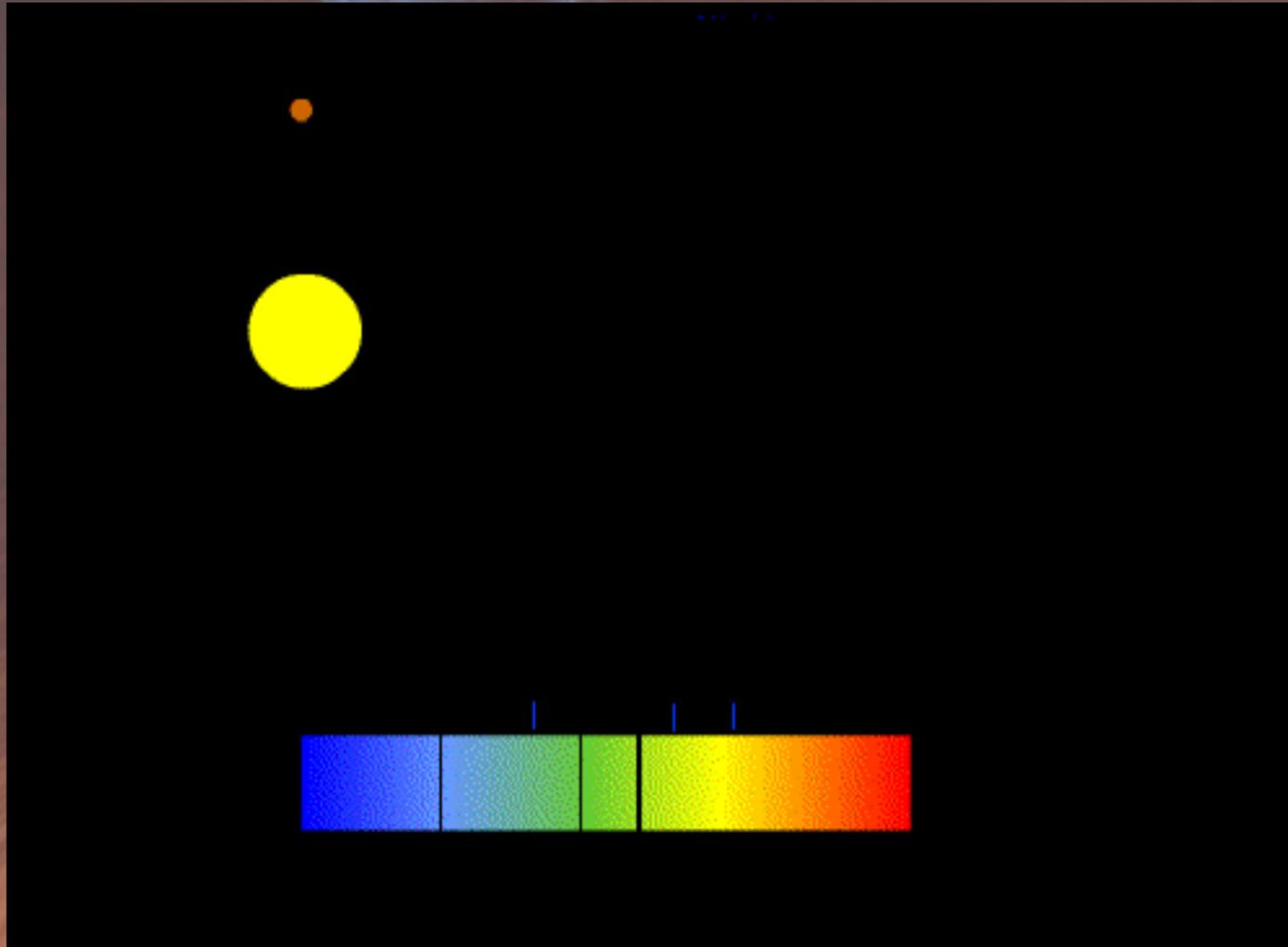


Si la fuente se mueve hacia nosotros, medimos una energía mayor  
Si la fuente se aleja de nosotros, medimos una energía menor

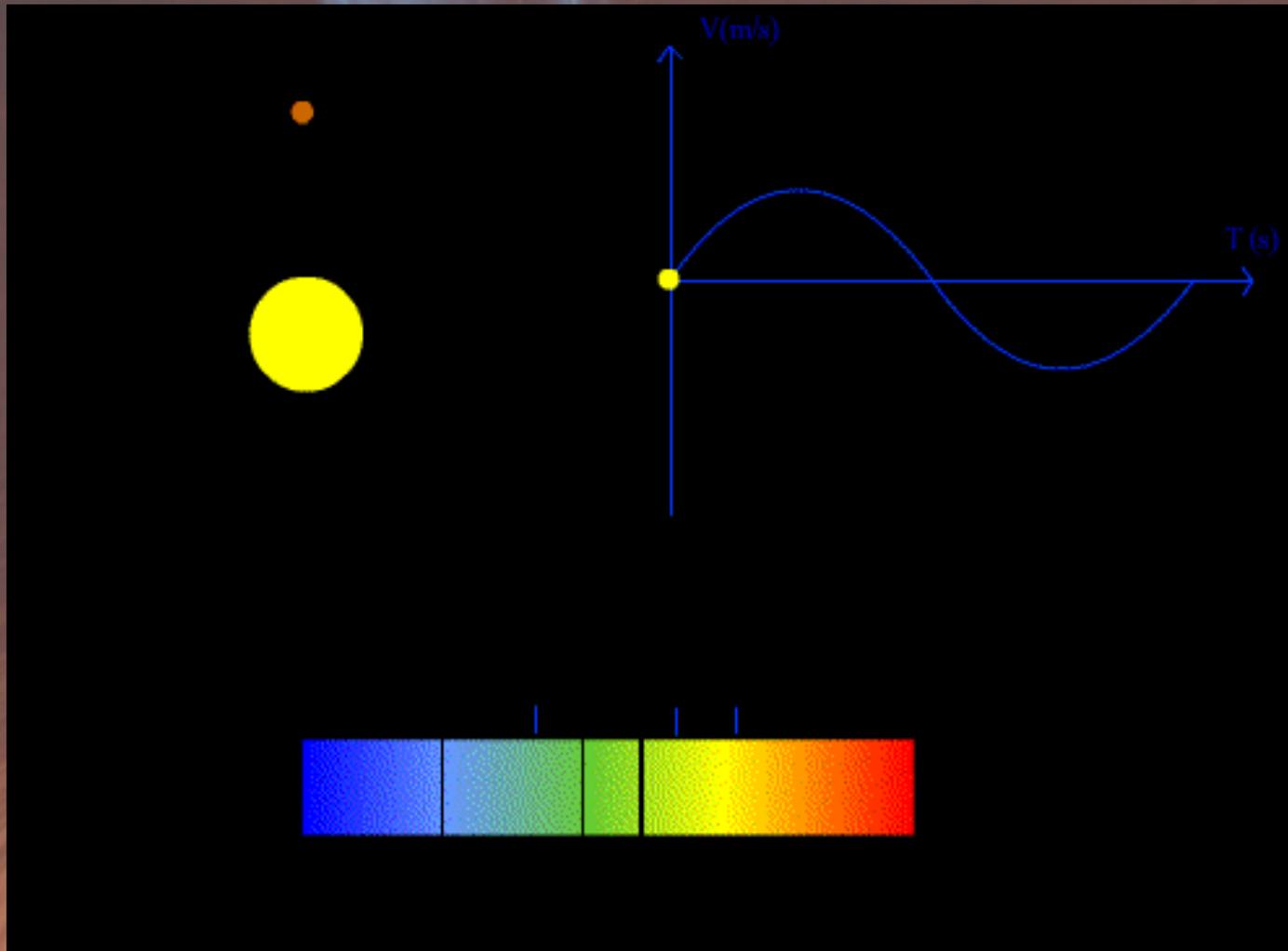
# AGUJEROS NEGROS REALES: CYGNUS X-1



# AGUJEROS NEGROS REALES: CYGNUS X-1

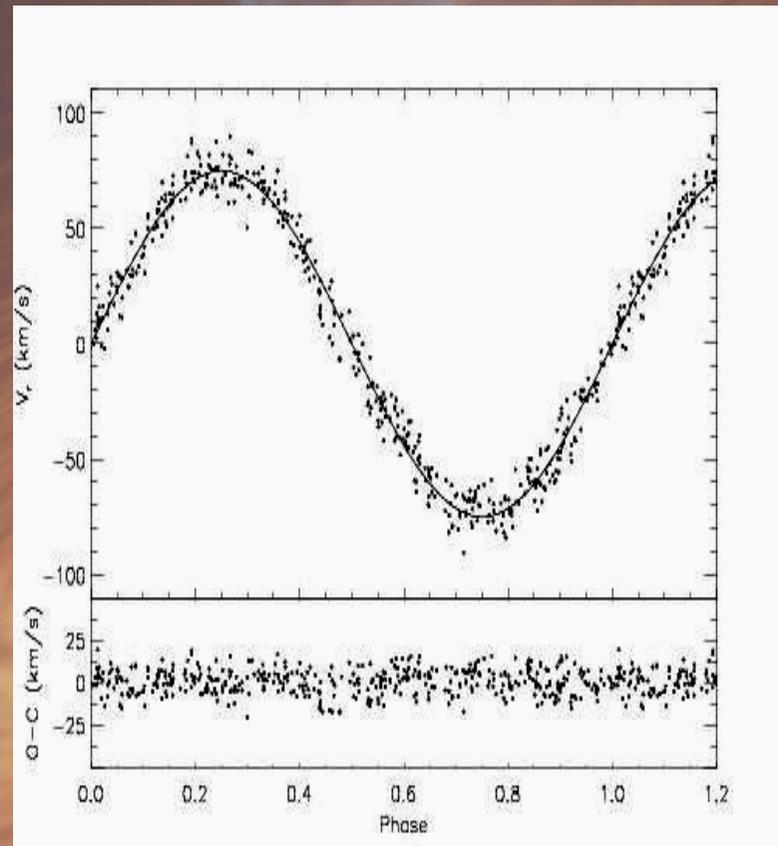


# AGUJEROS NEGROS REALES: CYGNUS X-1

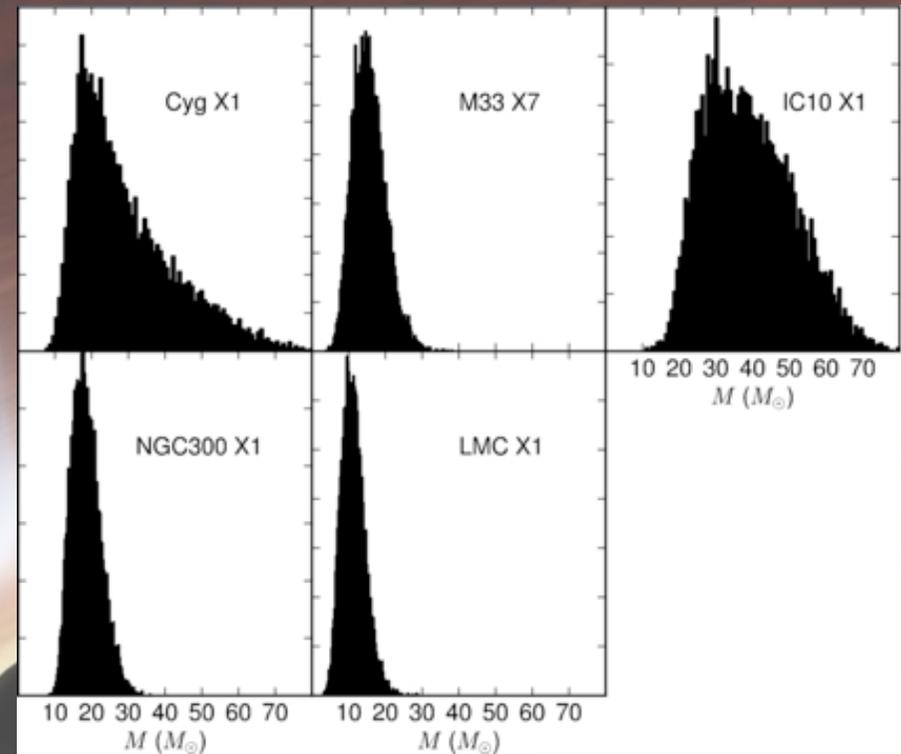
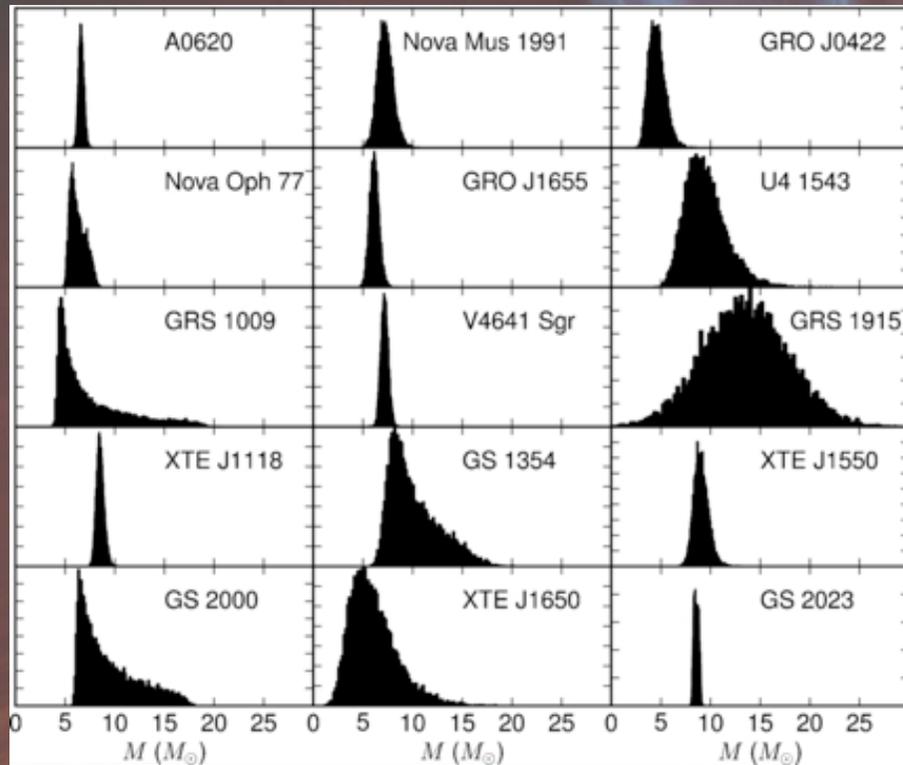


# AGUJEROS NEGROS REALES: CYGNUS X-1

$$f(M_1, M_2, i) = \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{Pv_1^3}{2\pi G} \leq M_2$$



# AGUJEROS NEGROS REALES



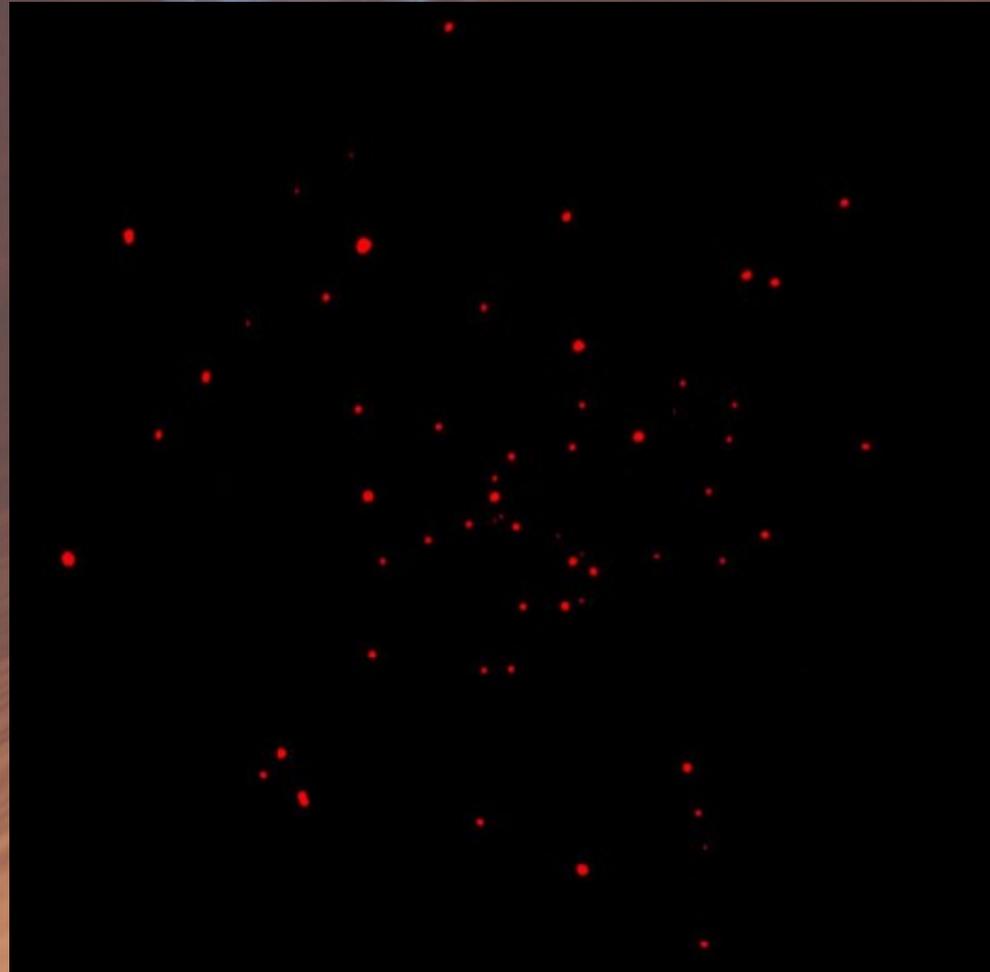
Representativos de una población de  $\sim$  millones de agujeros negros con masa  $\sim 3-20 M_{\odot}$  presentes en nuestra galaxia

# AGUJEROS NEGROS REALES



M 74 en el óptico: estrellas y gas

# AGUJEROS NEGROS REALES



M 74 en rayos X: objetos compactos (estrellas de neutrones y agujeros negros) con discos de acrecimiento (sistemas binarios con una estrella compañera)

# AGUJEROS NEGROS REALES

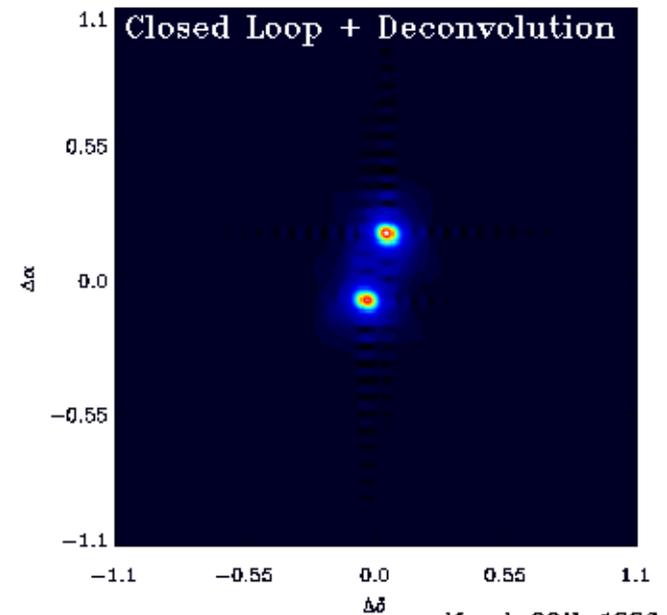
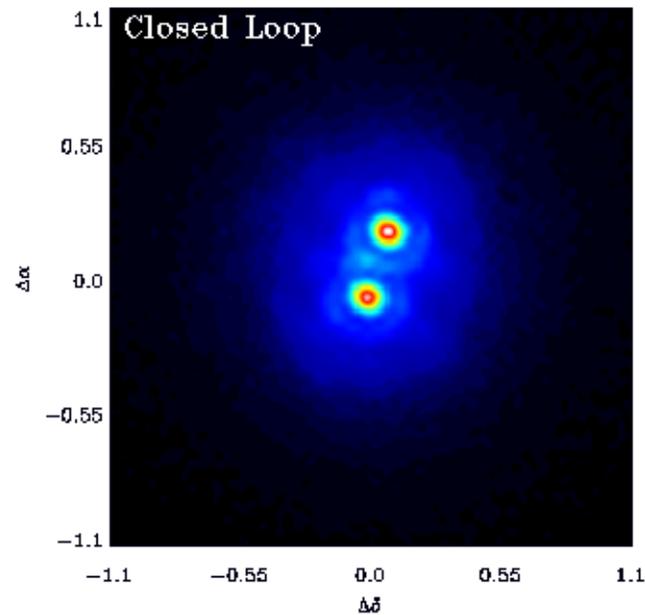
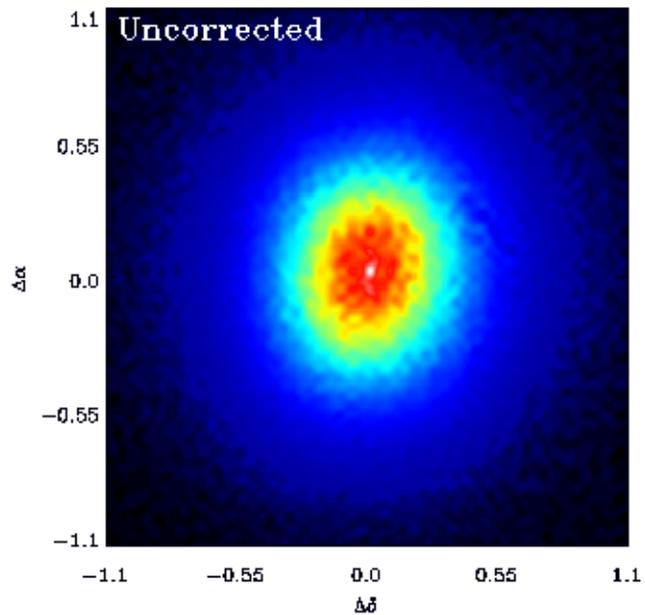


M 74 en una imagen óptica + rayos X

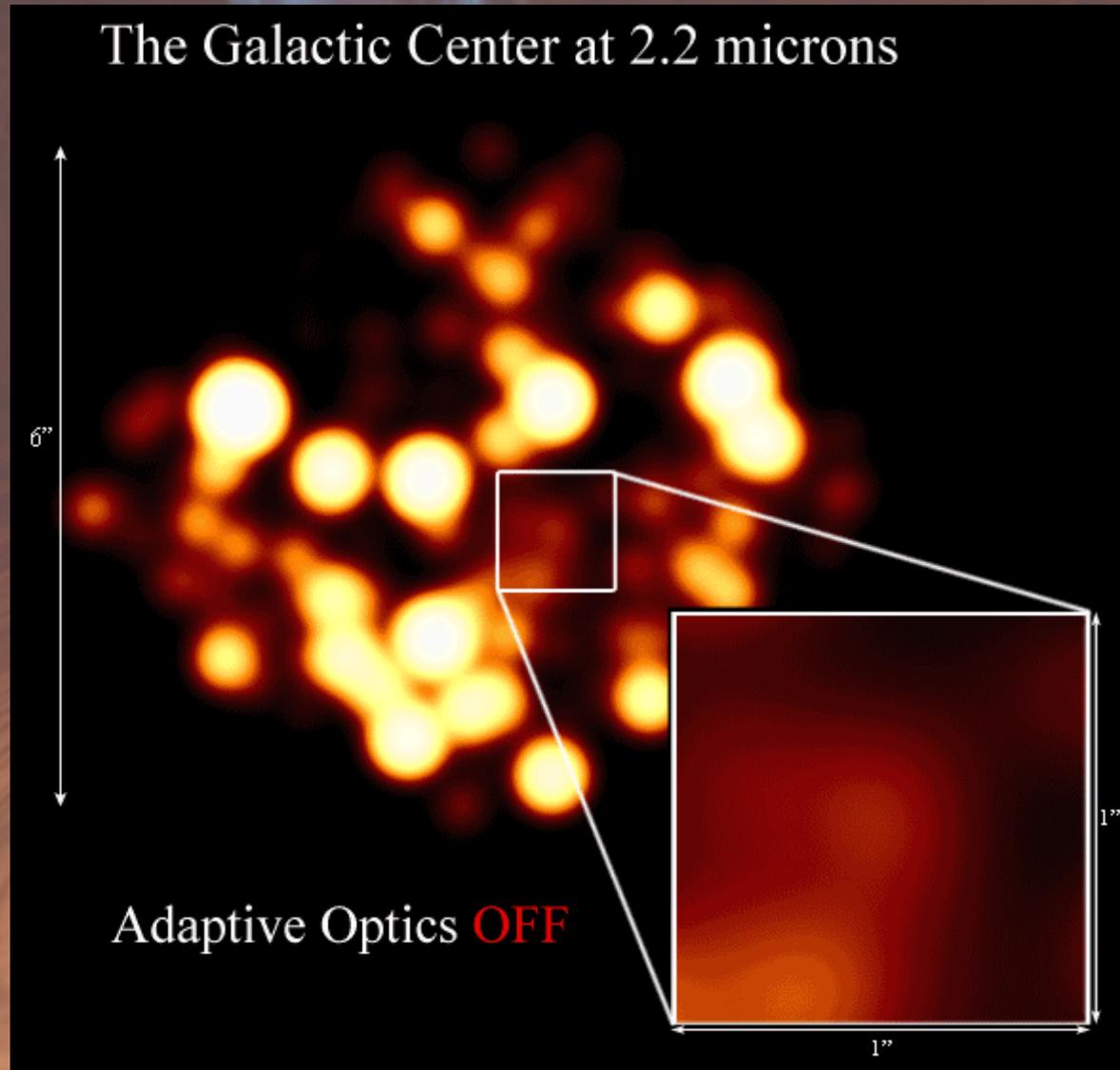
# AGUJEROS NEGROS REALES: EL CENTRO GALACTICO



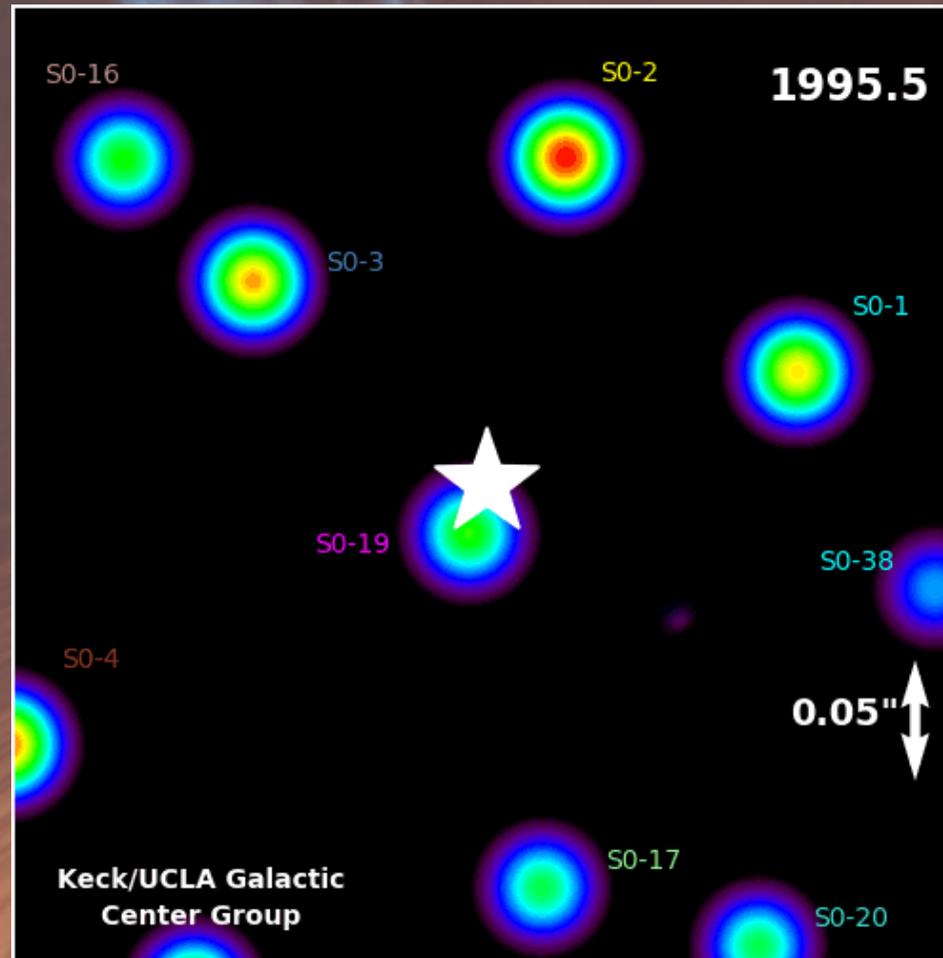
# AGUJEROS NEGROS REALES: EL CENTRO GALACTICO



# AGUJEROS NEGROS REALES: EL CENTRO GALACTICO



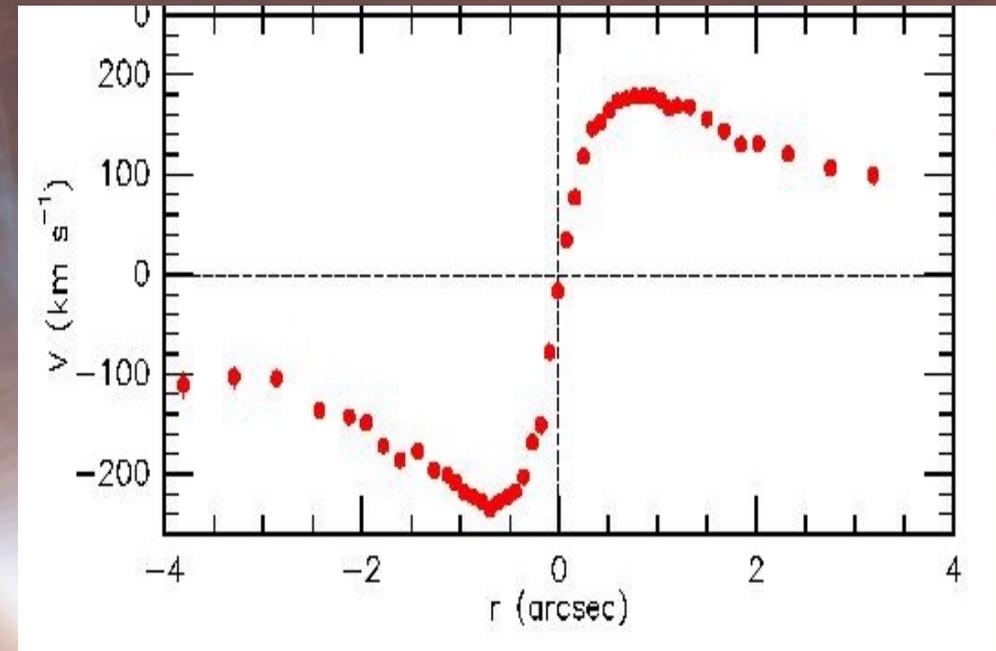
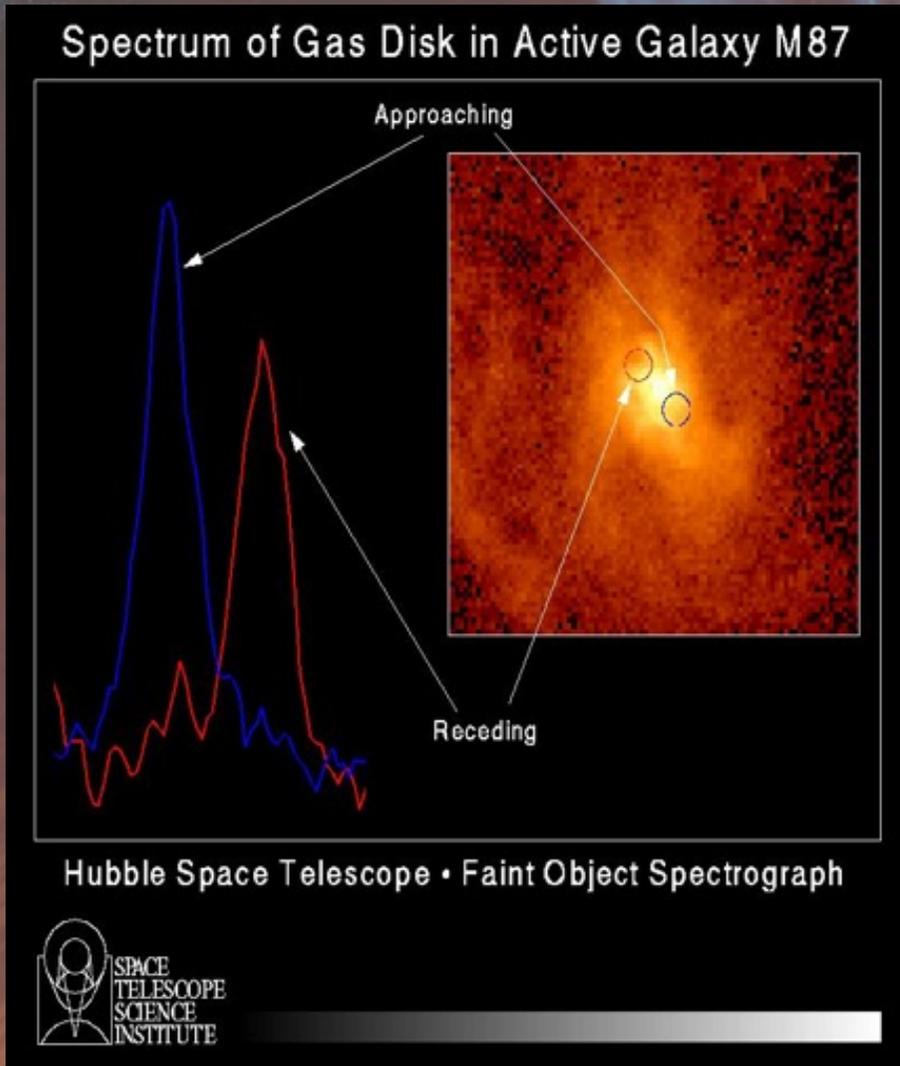
# AGUJEROS NEGROS REALES: EL CENTRO GALACTICO



En el centro de nuestra Galaxia hay un agujero negro super-masivo (SMBH)

Su masa es de  $\sim 4$  millones de Soles

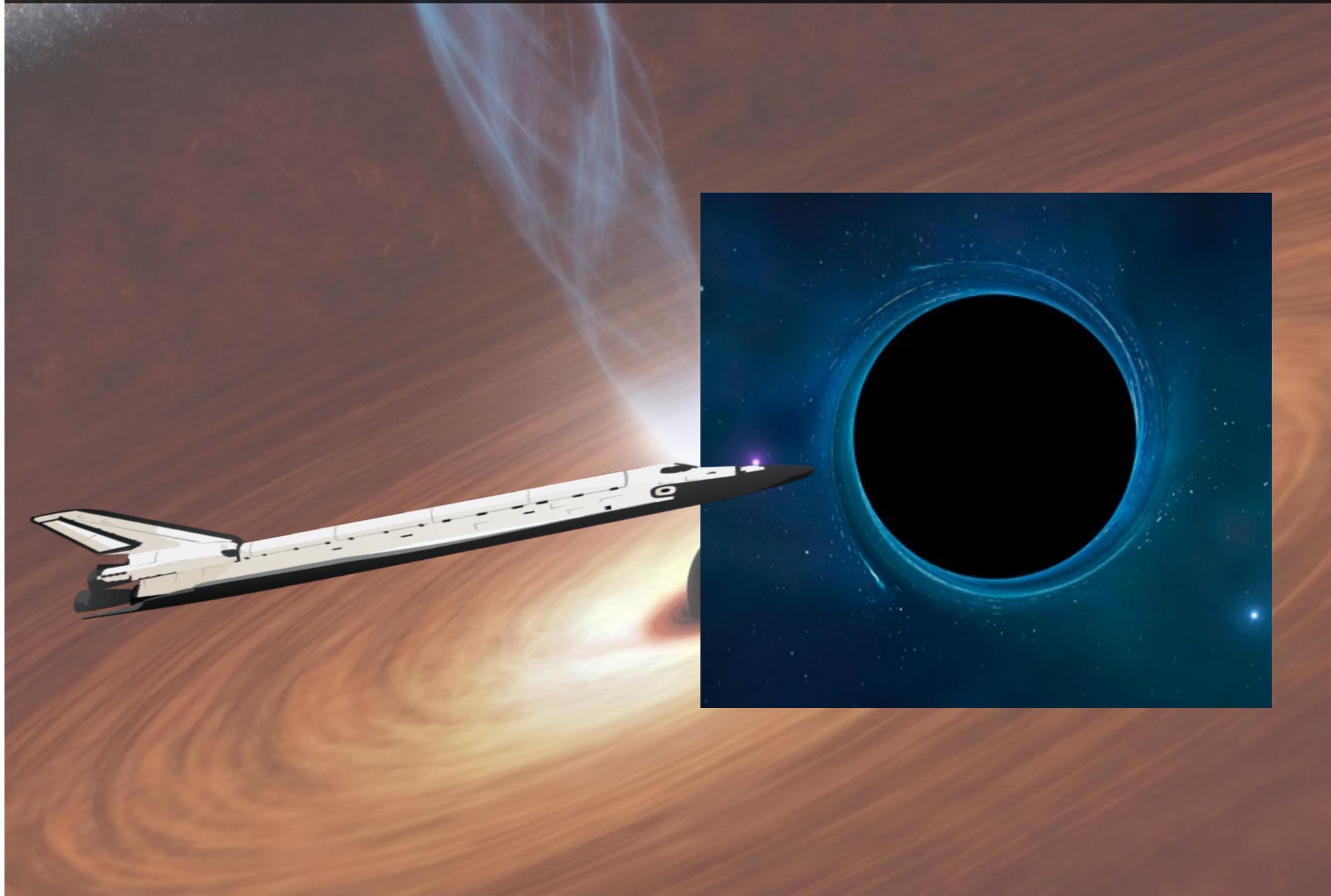
# AGUJEROS NEGROS REALES: SMBH EN OTRAS GALAXIAS



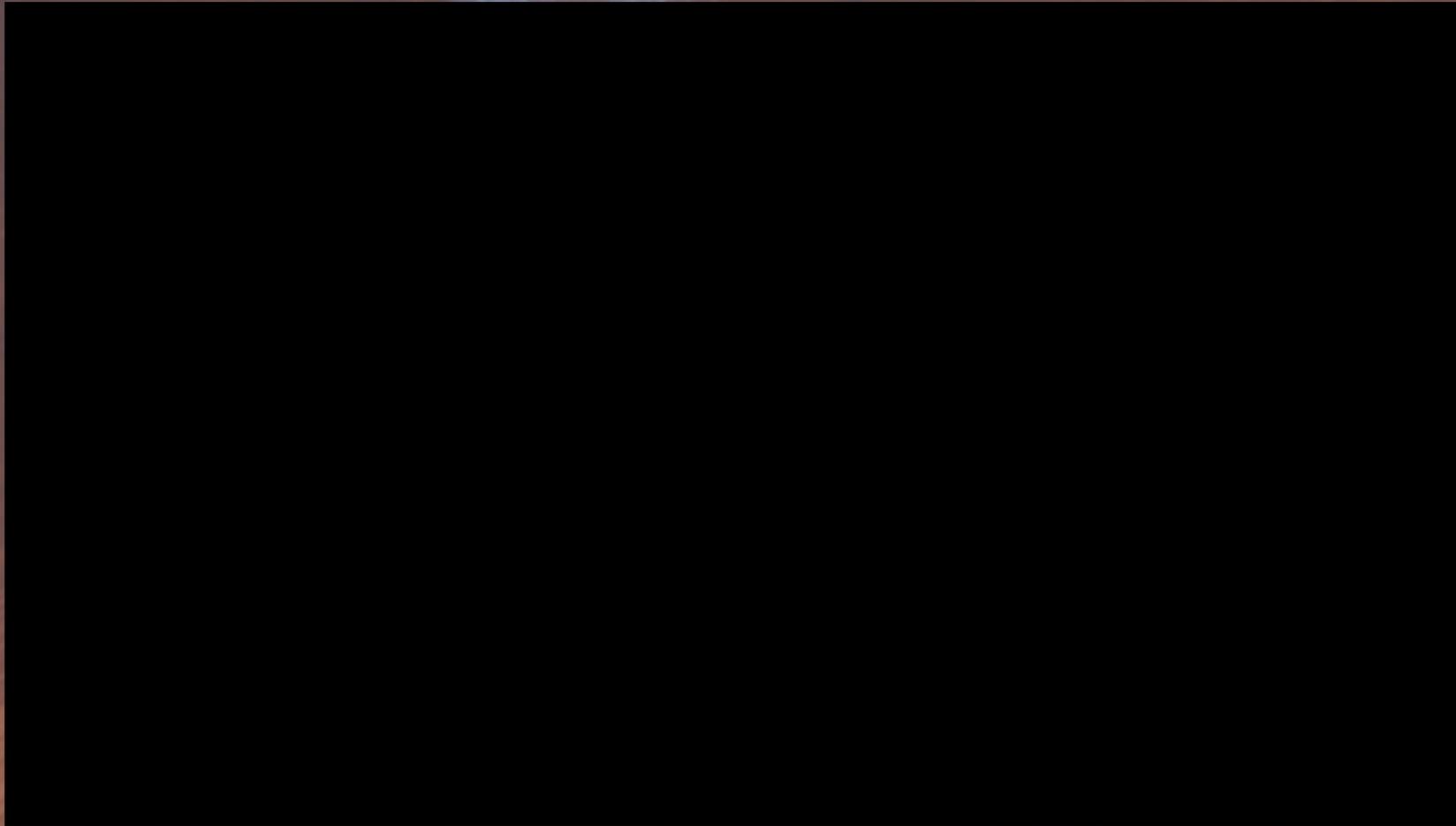
$$M_{BH} \cong 3 \times 10^9 M_{sun}$$

Hay acuerdo hoy en día que en el centro de todas las galaxias reside un SMBH con masa desde 1 millón hasta miles de millones de Soles

# AGUJEROS NEGROS REALES: FUERZAS DE MAREA



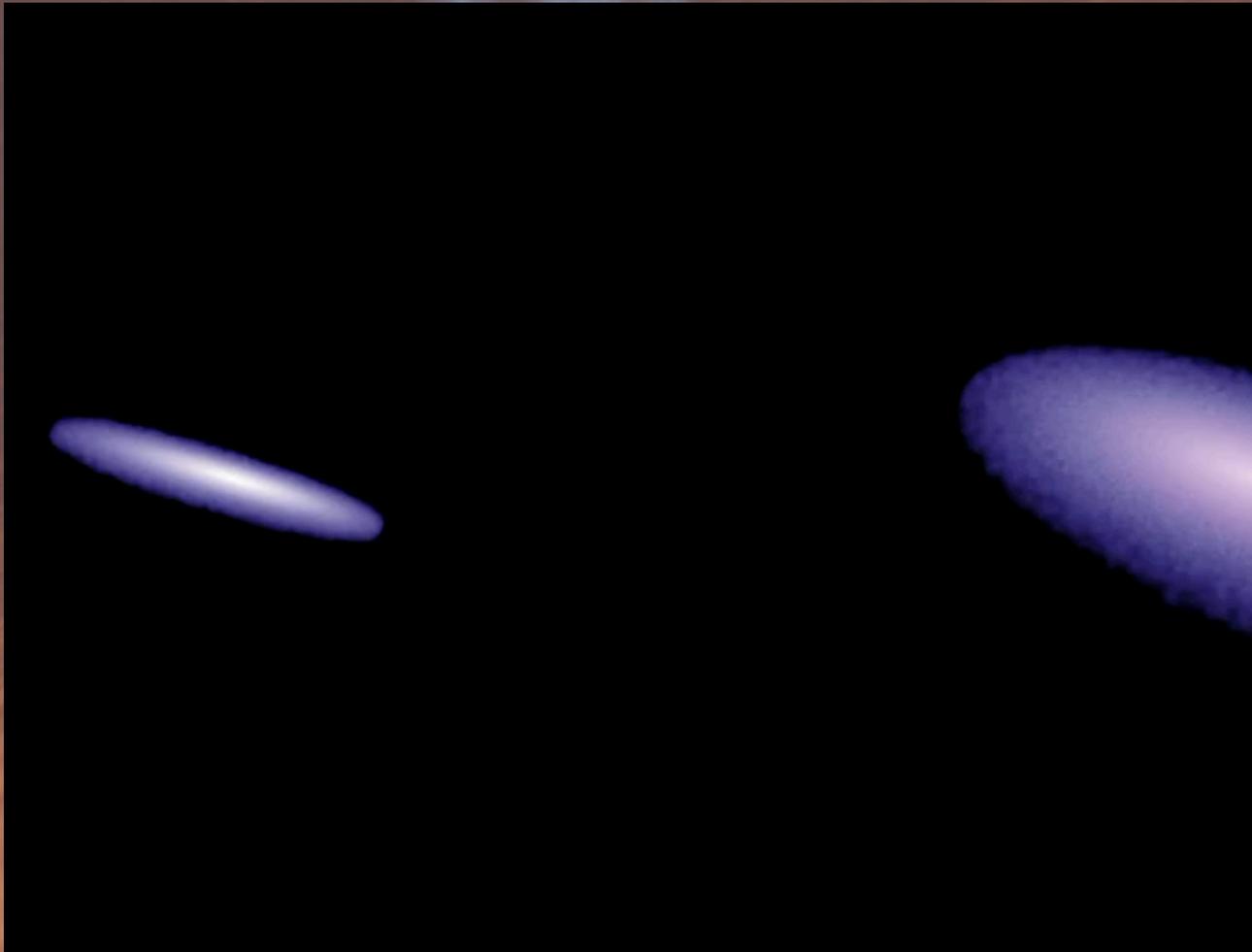
# AGUJEROS NEGROS REALES: FUERZAS DE MAREA



En los últimos años, se empiezan a detectar (en rayos X) eventos parecidos

# AGUJEROS NEGROS REALES: SMBH EN OTRAS GALAXIAS

Si los agujeros negros que se forman por el colapso de estrellas masivas pueden alcanzar tan solo  $\sim 100\text{-}200 M_{\odot}$  ¿ Porqué hay SMBH con masa de millones (o más)  $M_{\odot}$  en el centro de las galaxias ?



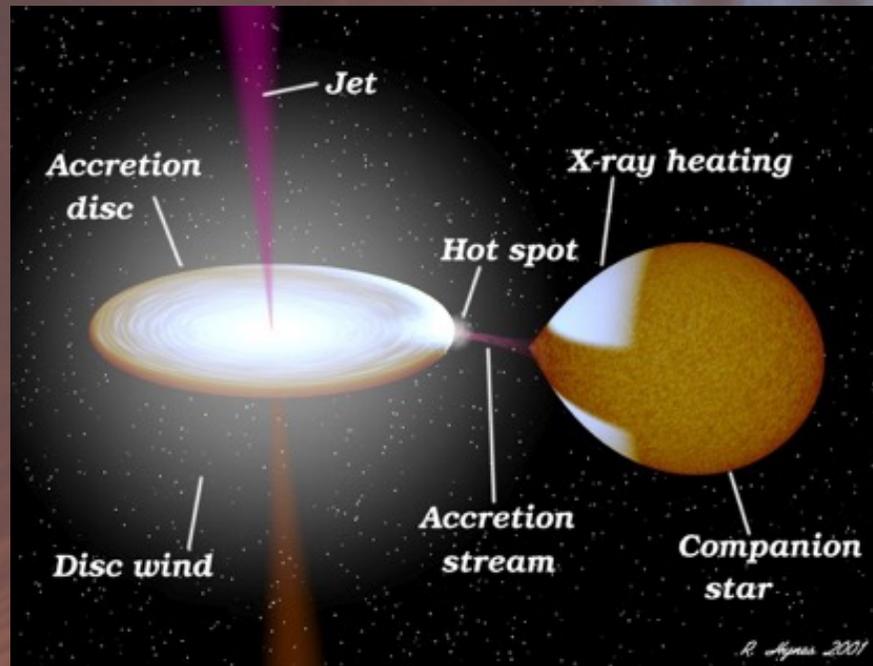
# AGUJEROS NEGROS REALES: SMBH EN OTRAS GALAXIAS

¿ Hay evidencias de colisiones entre galaxias ?



# AGUJEROS NEGROS REALES: QUASARES

Cuando hay grandes cantidades de gas en los alrededores de un SMBH al centro de una galaxia ...



El acrecimiento produce una enorme luminosidad que nos permite estudiar los quasar a grandes distancias

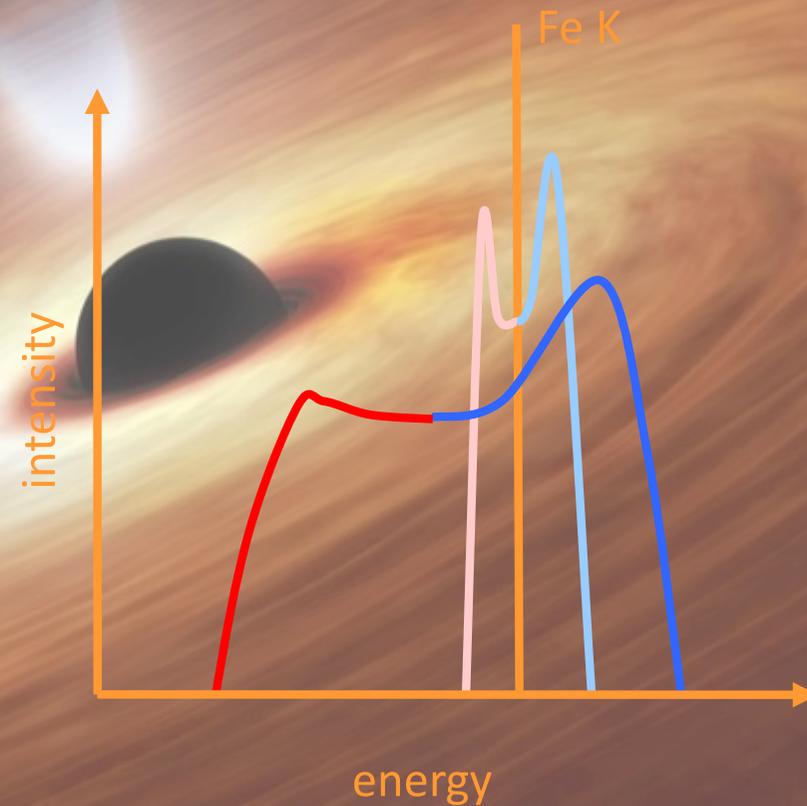
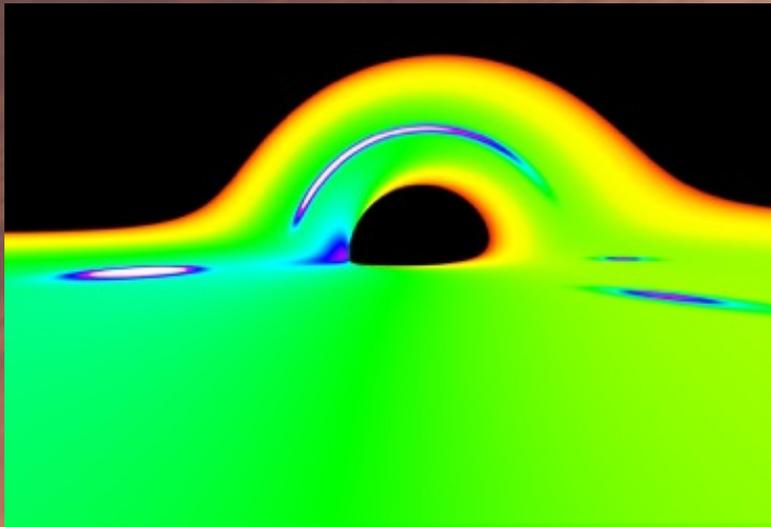
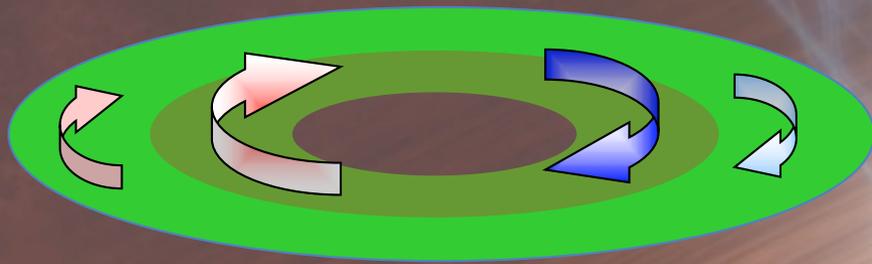
# AGUJEROS NEGROS REALES: QUASARES

Solo voy a presentar uno de los efectos más espectaculares que nos permite decir que estamos detectando materia justo antes de desaparecer en el BH para siempre

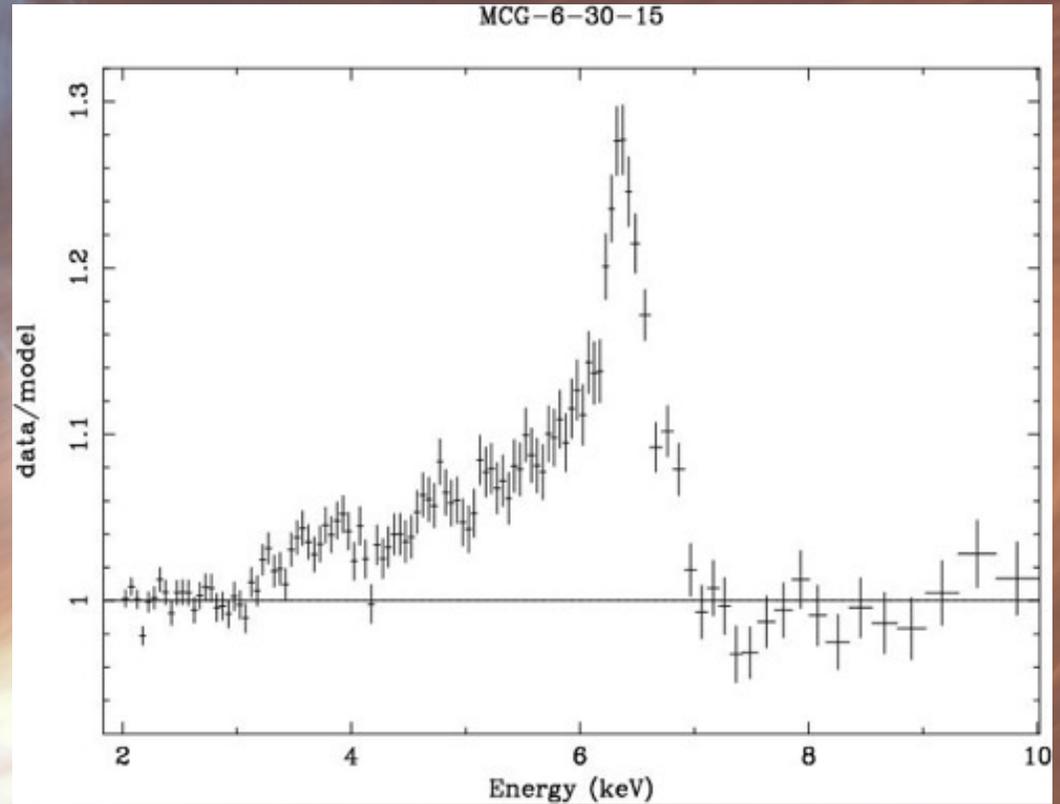
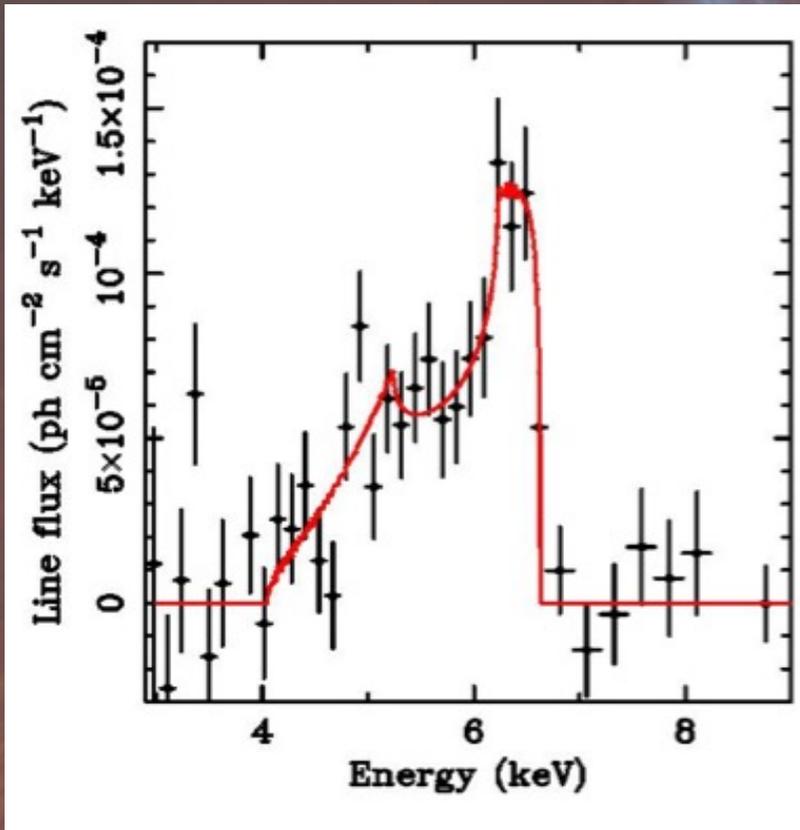


# AGUJEROS NEGROS REALES: QUASARES

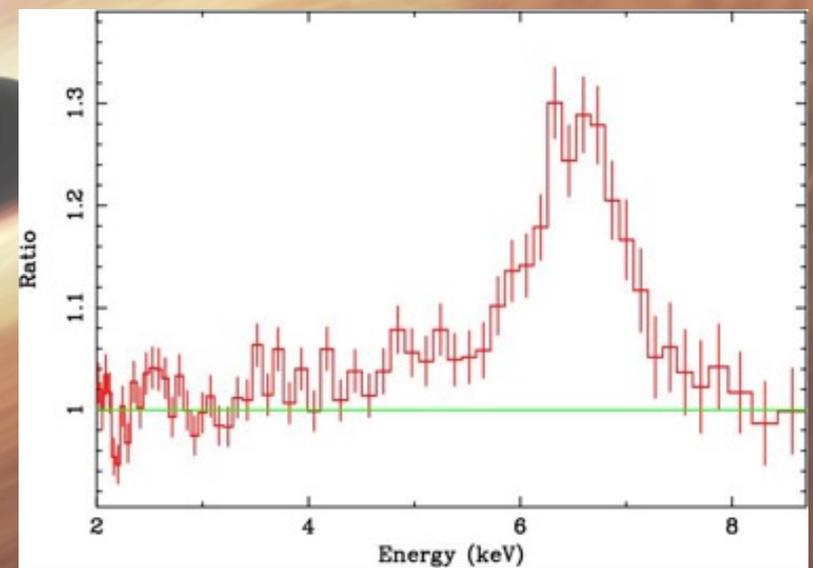
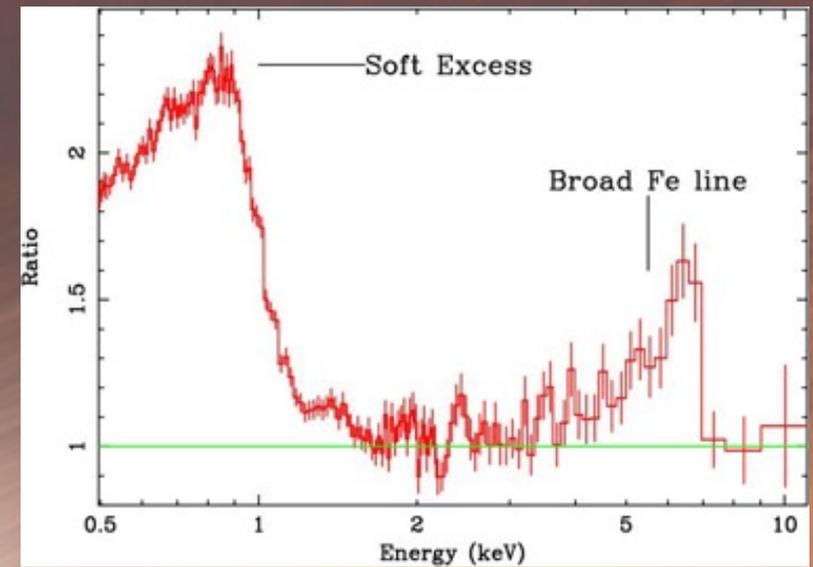
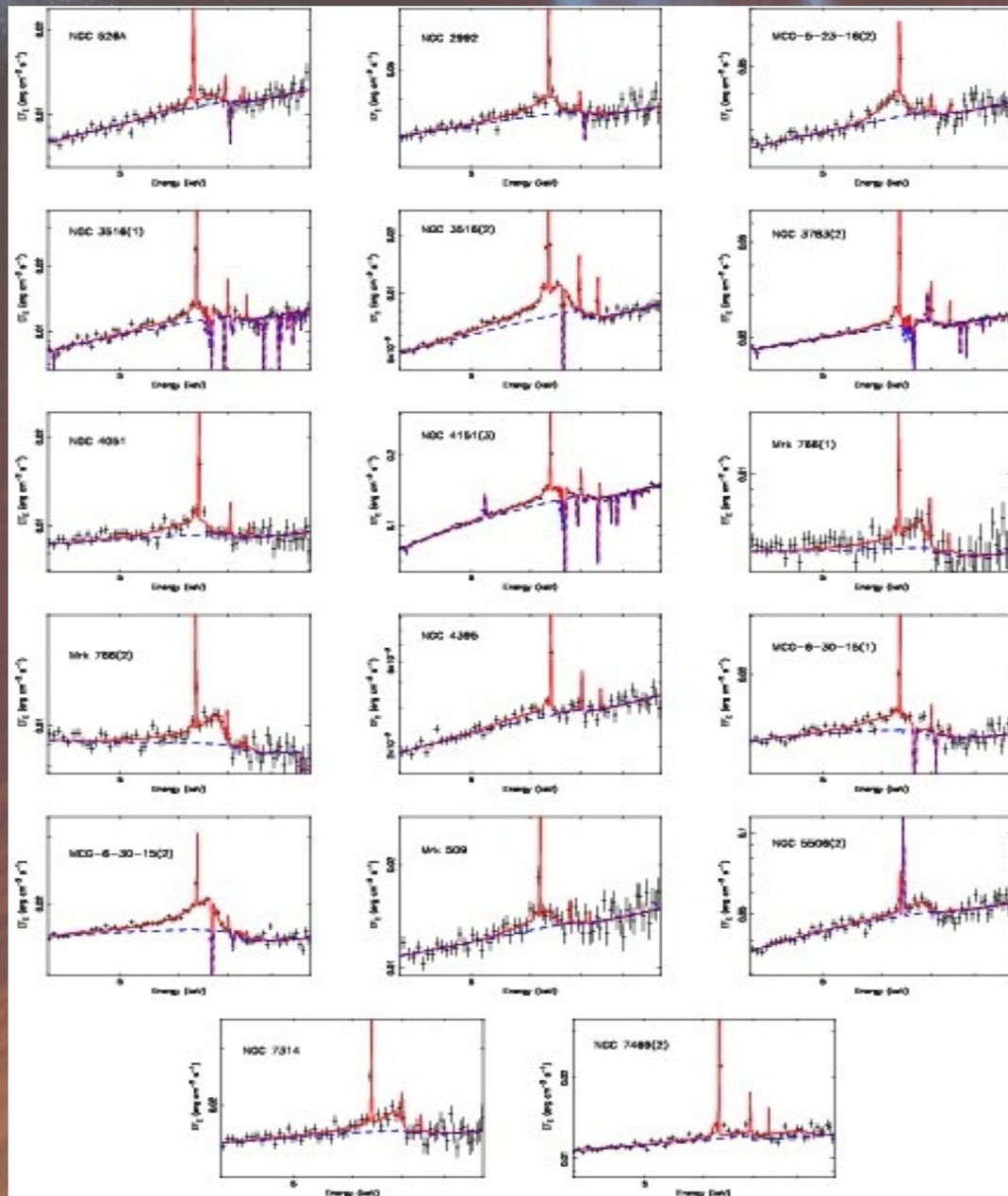
Solo voy a presentar uno de los efectos más espectaculares que nos permite decir que estamos detectando materia justo antes de desaparecer en el BH para siempre



# AGUJEROS NEGROS REALES: QUASARES



# AGUJEROS NEGROS REALES: QUASARES



# AGUJEROS NEGROS REALES: CHOQUES ENTRE BHs

