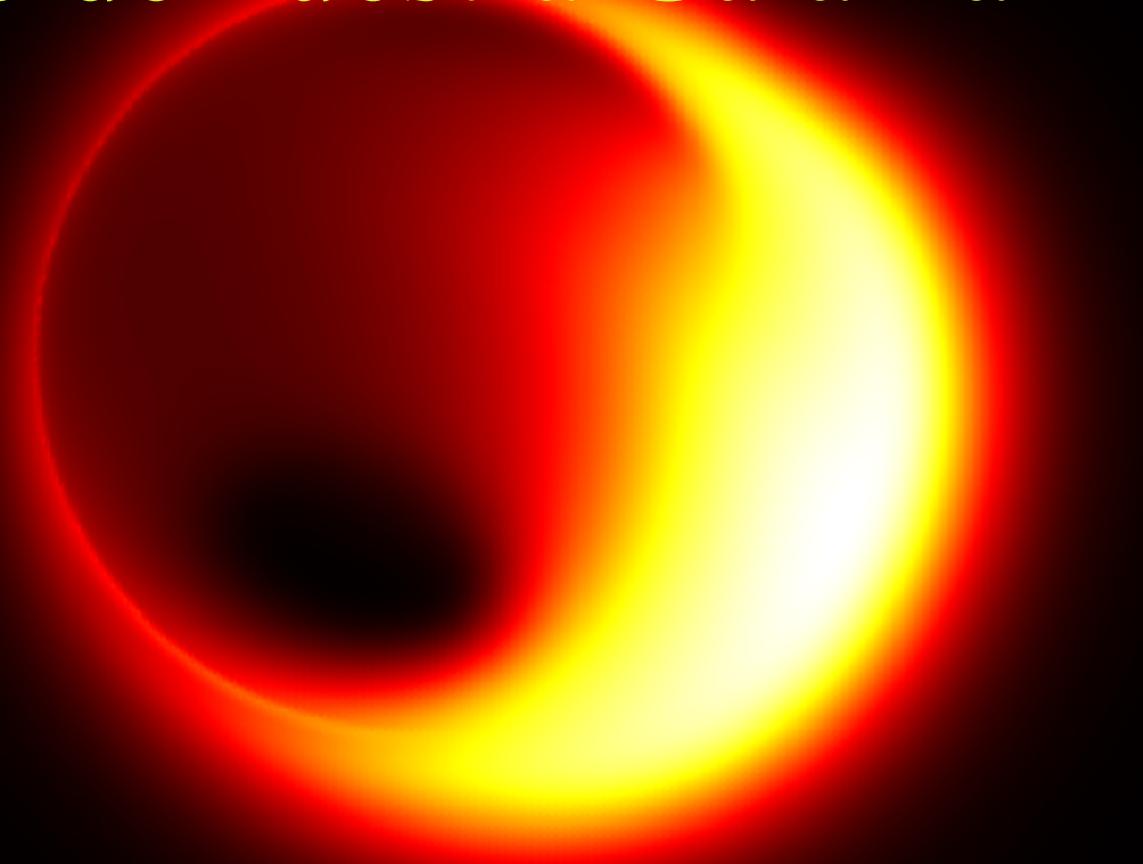


www.crya.unam.mx
Campus Morelia de la
UNAM



CENTRO DE RADIOASTRONOMÍA
Y ASTROFÍSICA
INSTITUTO DE MATEMÁTICAS
UNAM

Sgr A*: El Hoyo Negro en el Centro de nuestra Galaxia



Luis Felipe Rodríguez Jorge

IRyA, UNAM y
El Colegio Nacional

A black and white portrait of Albert Einstein, showing him from the chest up. He has dark, wavy hair and a prominent mustache. He is wearing a dark suit jacket over a white shirt with a high collar. The background is a plain, light-colored wall.

La materia le dice al espacio como curvarse,
el espacio le dice a la materia como moverse

A black and white portrait of David Schwarzschild, a man with a mustache wearing a suit and tie, looking slightly to his right.
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{R}$$

$$v \rightarrow c$$

Si la velocidad de escape alcanza a la velocidad de la luz...

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

$$\left[\frac{R}{km} \right] = 3.0 \left[\frac{M}{M(Sol)} \right]$$

Radio de Schwarzschild:

Define región del espacio de la cual nada, ni siquiera la luz, puede salir



Si quisiéramos transformar a
la Tierra en un hoyo negro...

...habría que comprimirla al tamaño de una canica.

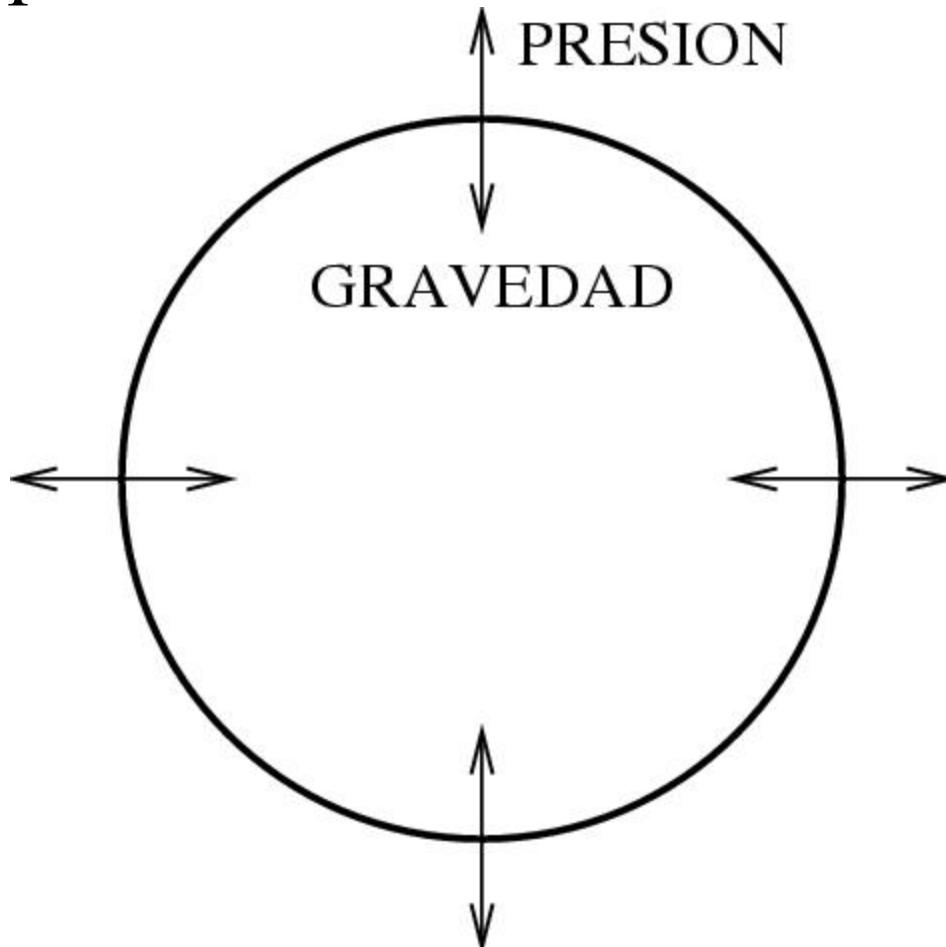




En la actualidad sigue siendo
imposible crear un hoyo
negro en el laboratorio...

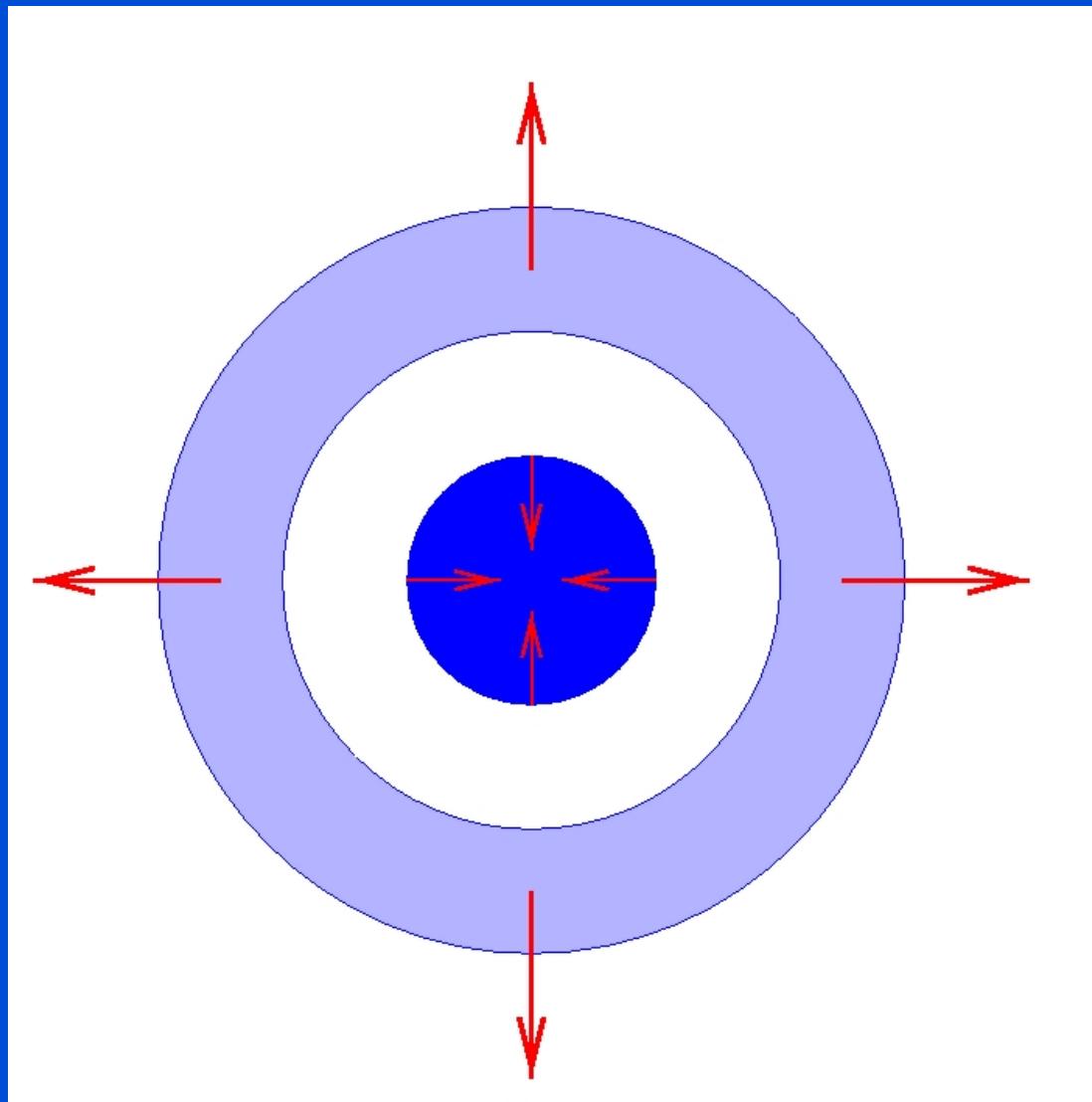
Sin embargo, la naturaleza tenía ya
un mecanismo para transformar
estrellas en hoyos negros

Las estrellas mantienen su tamaño gracias a un equilibrio de fuerzas...



¿Qué ocurrirá cuando la estrella “muera” y ya no tenga presión que contenga a la gravedad?

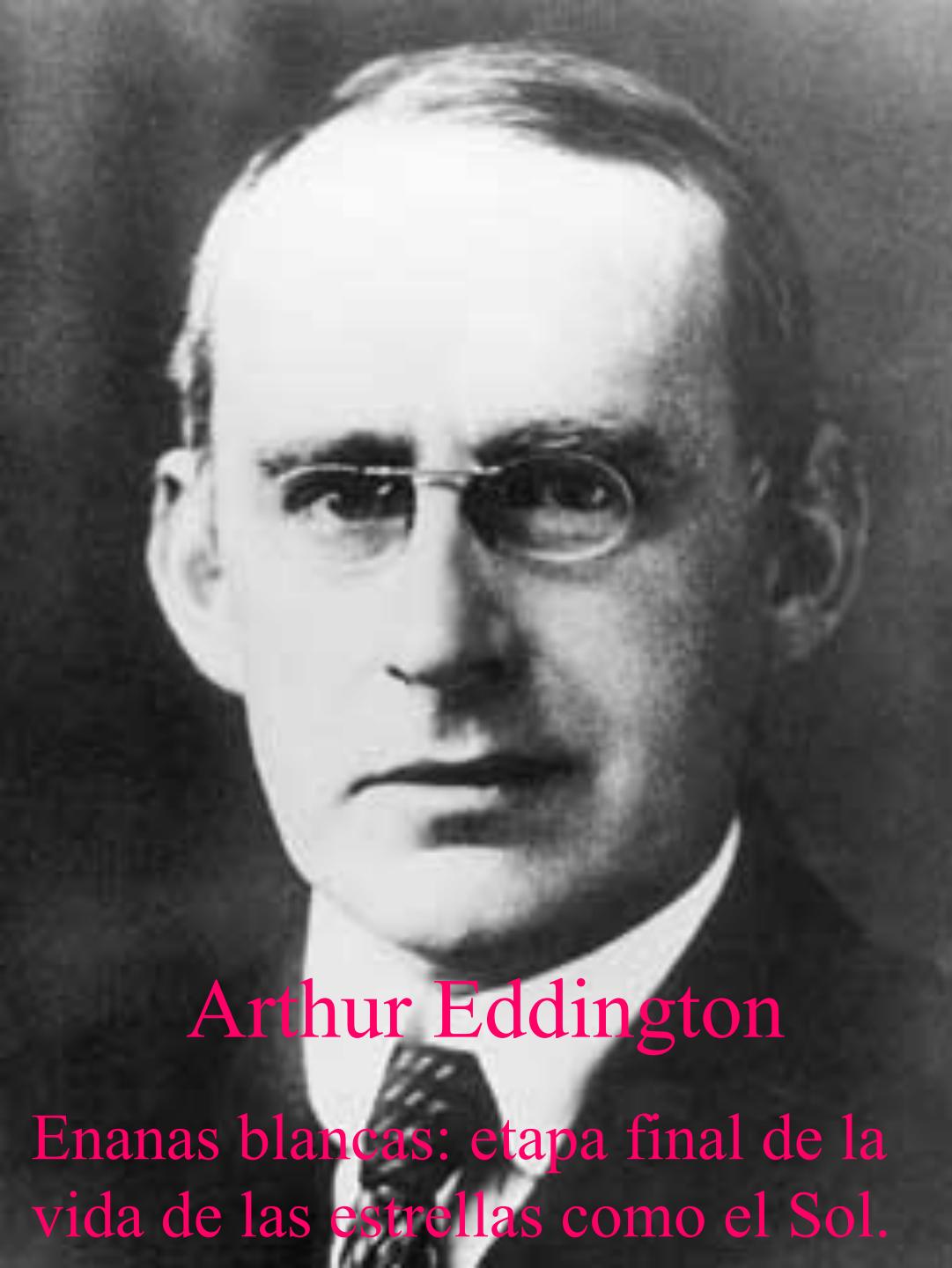
La “muerte” de una estrella generalmente consiste de la contracción de una parte interna y de la expulsión al medio circundante de una parte externa.



El triunfo final de la gravedad

Una vez que la estrella consume su combustible termonuclear (o sea “muere”), su propia gravedad la comprime a un tamaño mucho menor que el que tuvo anteriormente.

El tamaño final del cuerpo dependerá de la masa de la estrella.



Arthur Eddington

Enanas blancas: etapa final de la
vida de las estrellas como el Sol.

$M < 1.4 M_{\odot}$



Enana Blanca
Radio = 6000 km

IC 418





Si la masa de la estrella excede 1.4 veces la masa del Sol (el límite de Chandrasekhar), el colapso continuará más allá de la etapa de enana blanca.

$M < 1.4 \text{ Msol}$

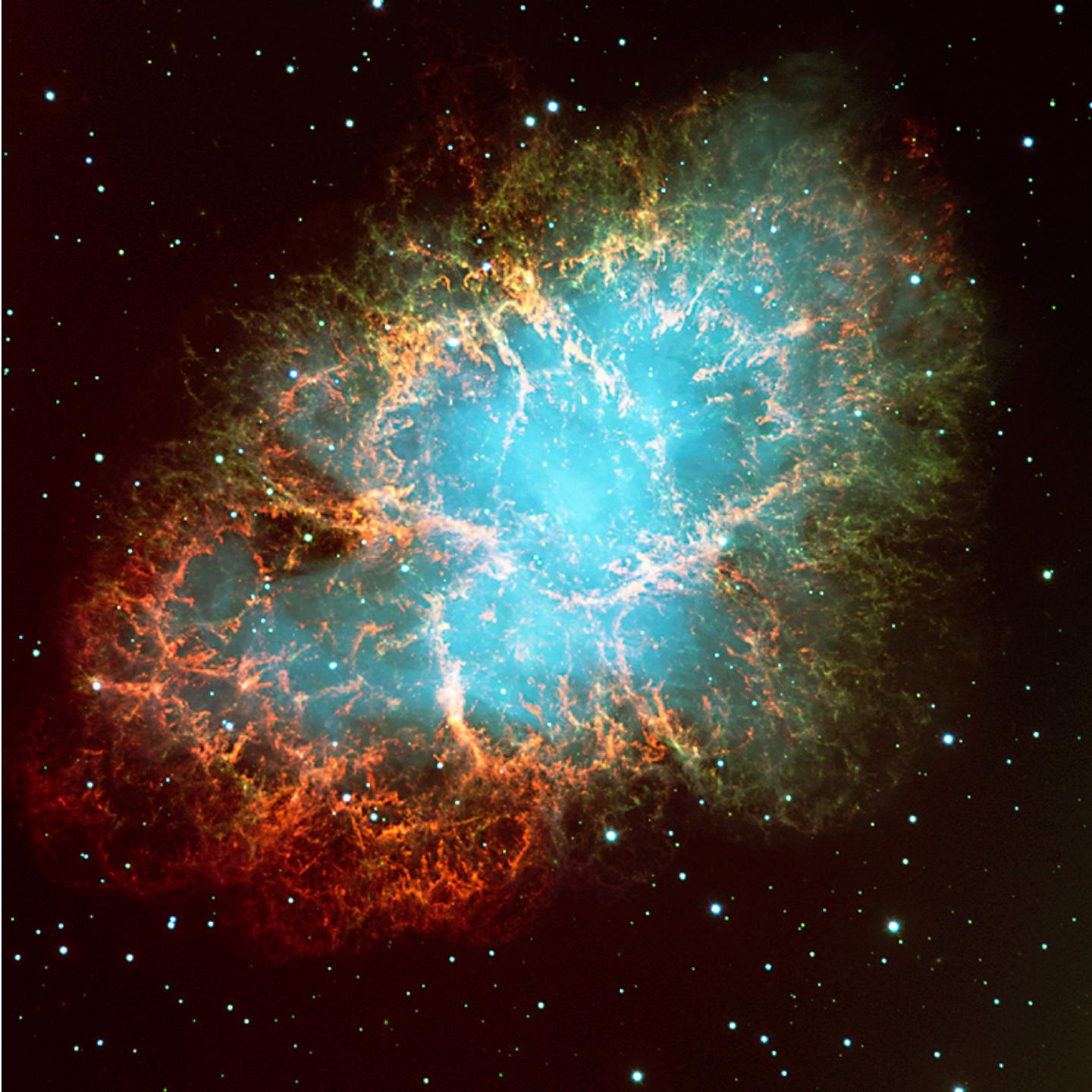


Enana Blanca
Radio = 6000 km

$1.4 < M < 3 \text{ Msol}$



Estrella de Neutrones
Radio = 10 km







J. Robert Oppenheimer

$M < 1.4 \text{ Msol}$



Enana Blanca
Radio = 6000 km

$1.4 < M < 3 \text{ Msol}$



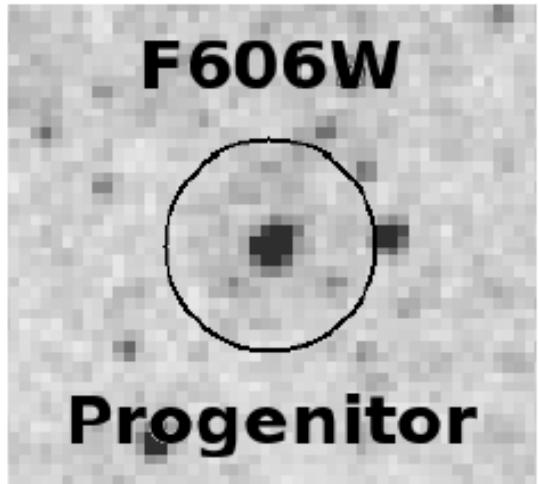
Estrella de Neutrones
Radio = 10 km

$M > 3 \text{ Msol}$

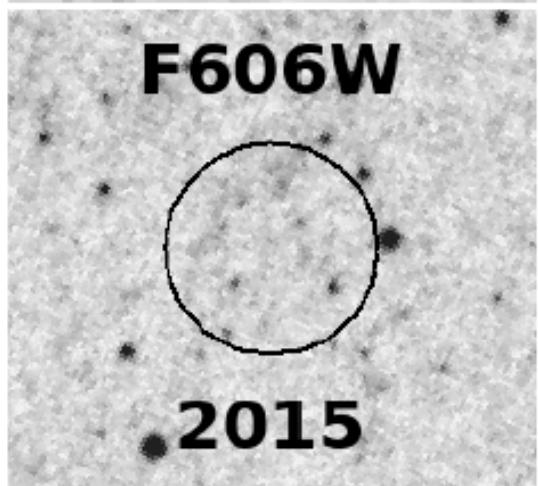


Hoyo Negro
Radio = Singularidad

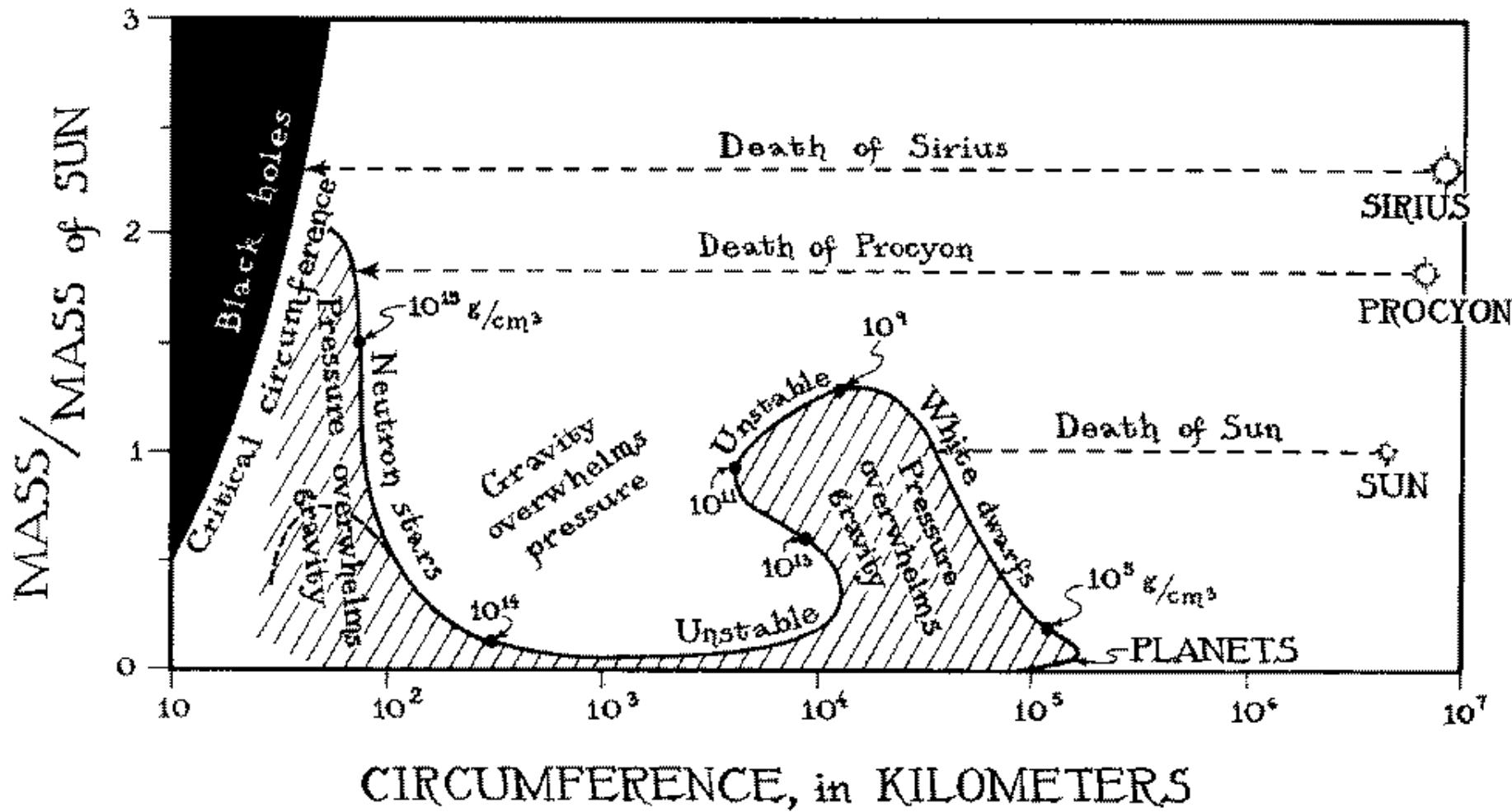
¿Se crea necesariamente una supernova?



2007



2015

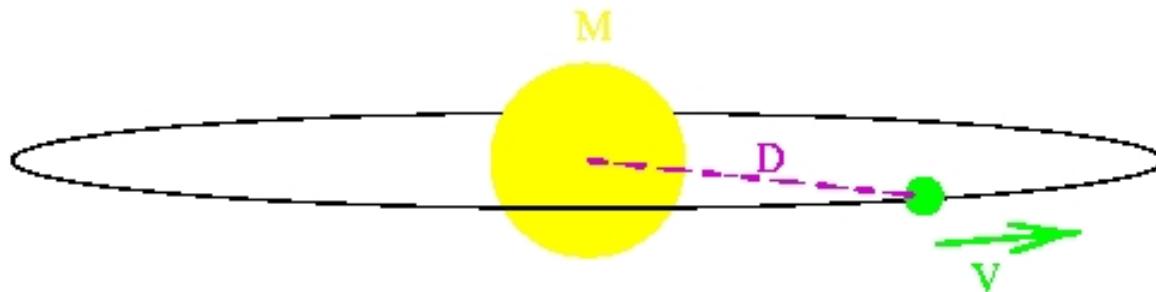


¿Pero, cómo demostrar que existen los hoyos negros?

Intrínsecamente, los hoyos negros no emiten nada (hay que recordar que ni la luz puede escapar de ellos). La radiación de Hawking es indetectable.

Entonces, hay que tratar de detectarlos indirectamente, por su efecto sobre otros cuerpos cósmicos que estén cerca de ellos.

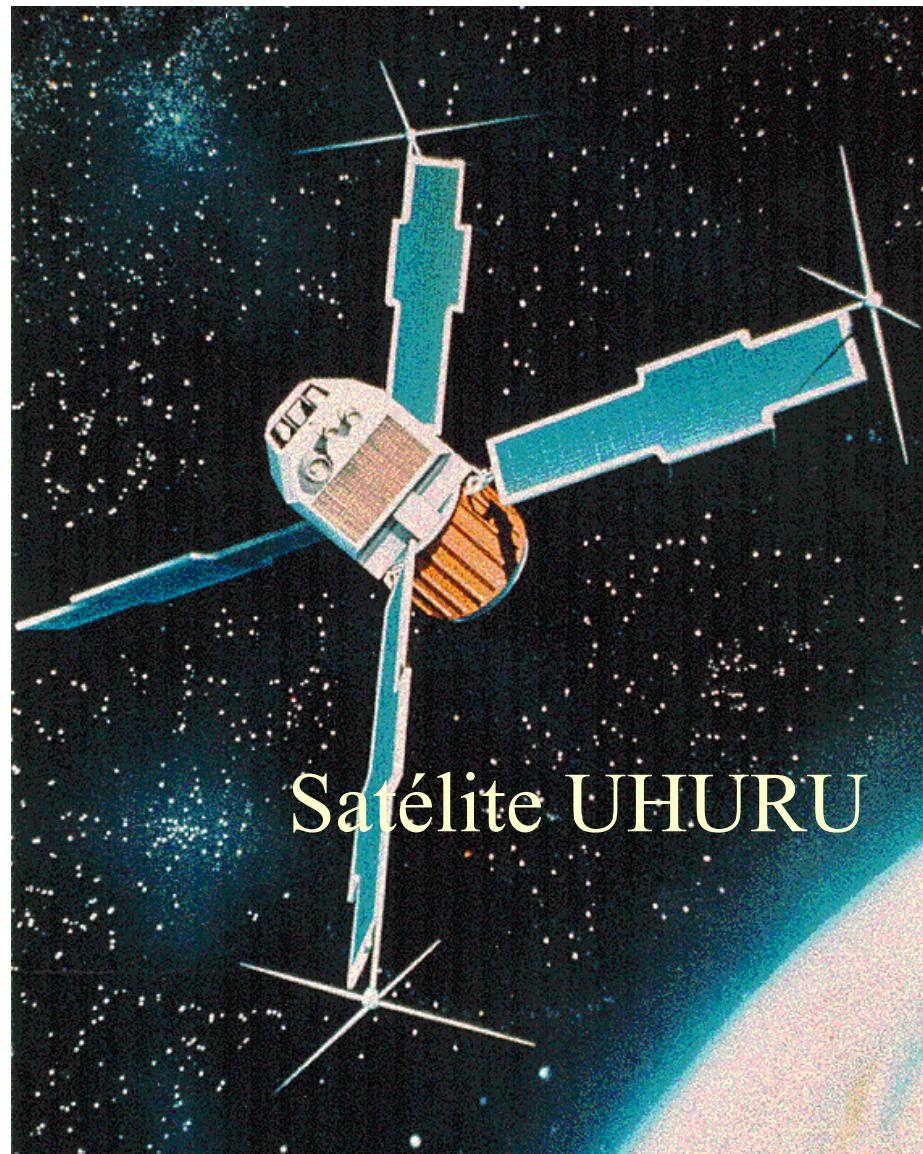
Si podemos medir la velocidad de un cuerpo y su distancia al hoyo negro, podemos estimar la masa del hoyo negro.

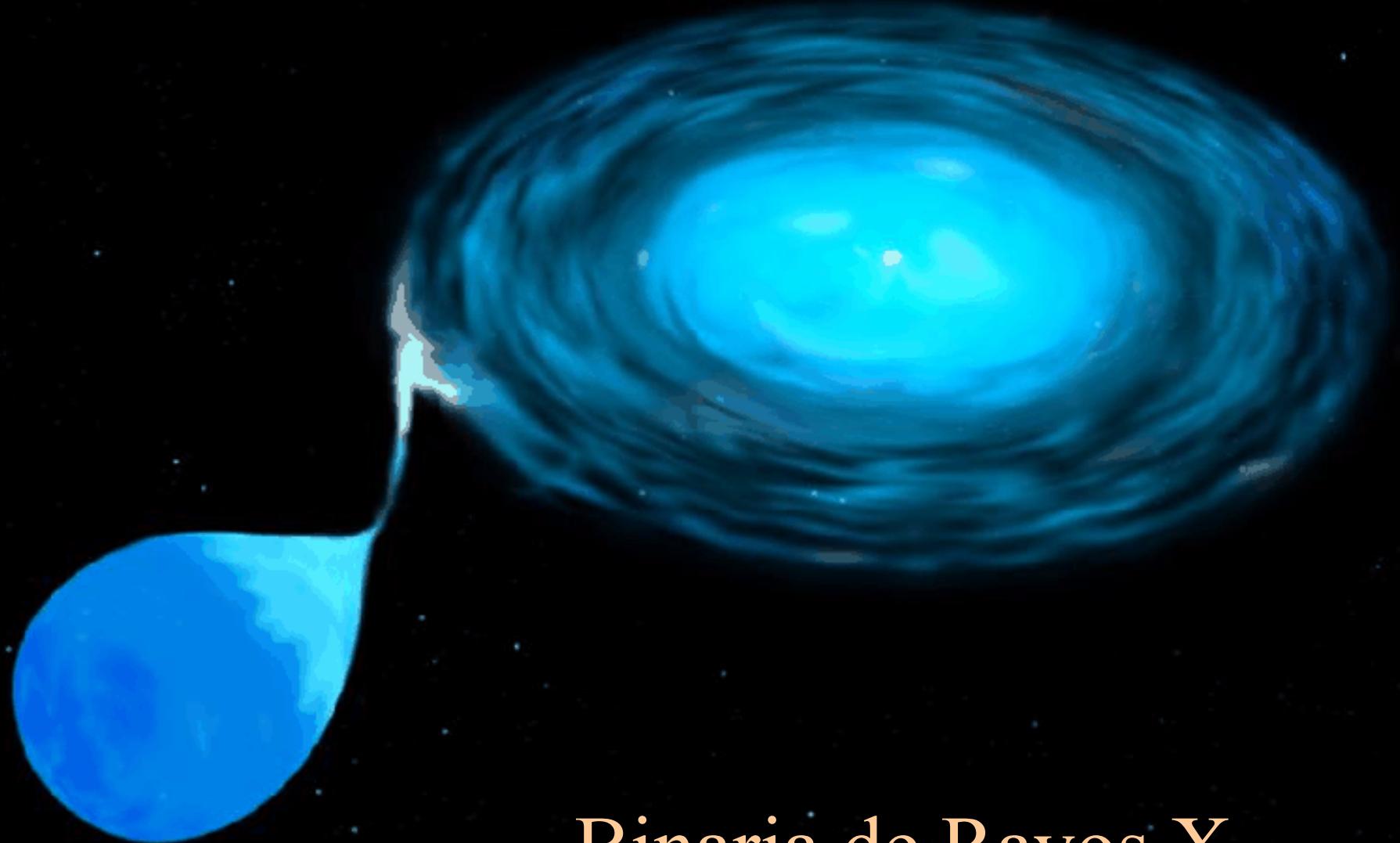


$$M = v^2 D / G$$

¿Cómo podemos buscar a los hoyos negros astronómicamente?

- La astronomía de rayos X jugó en esto un papel clave.

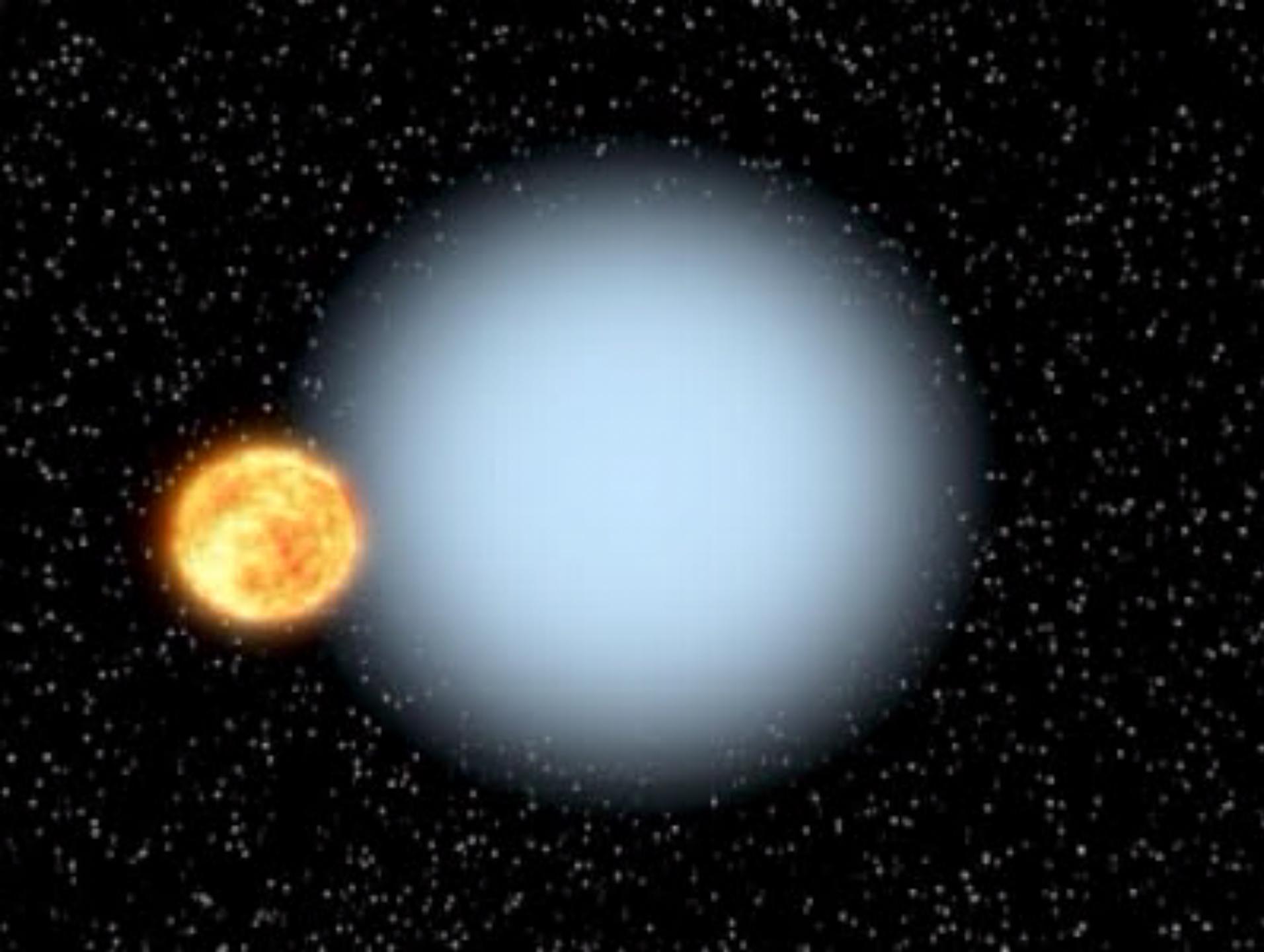


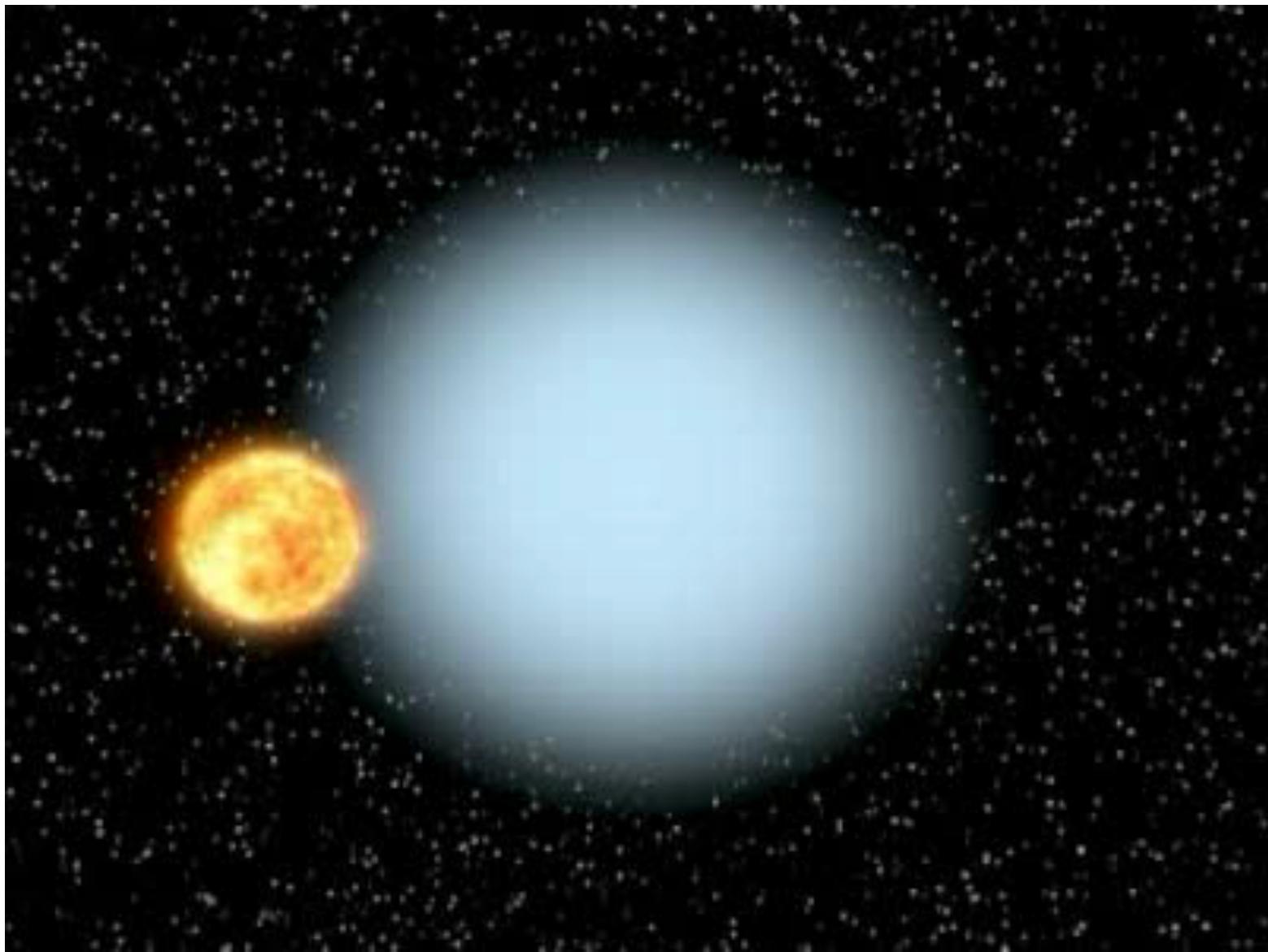


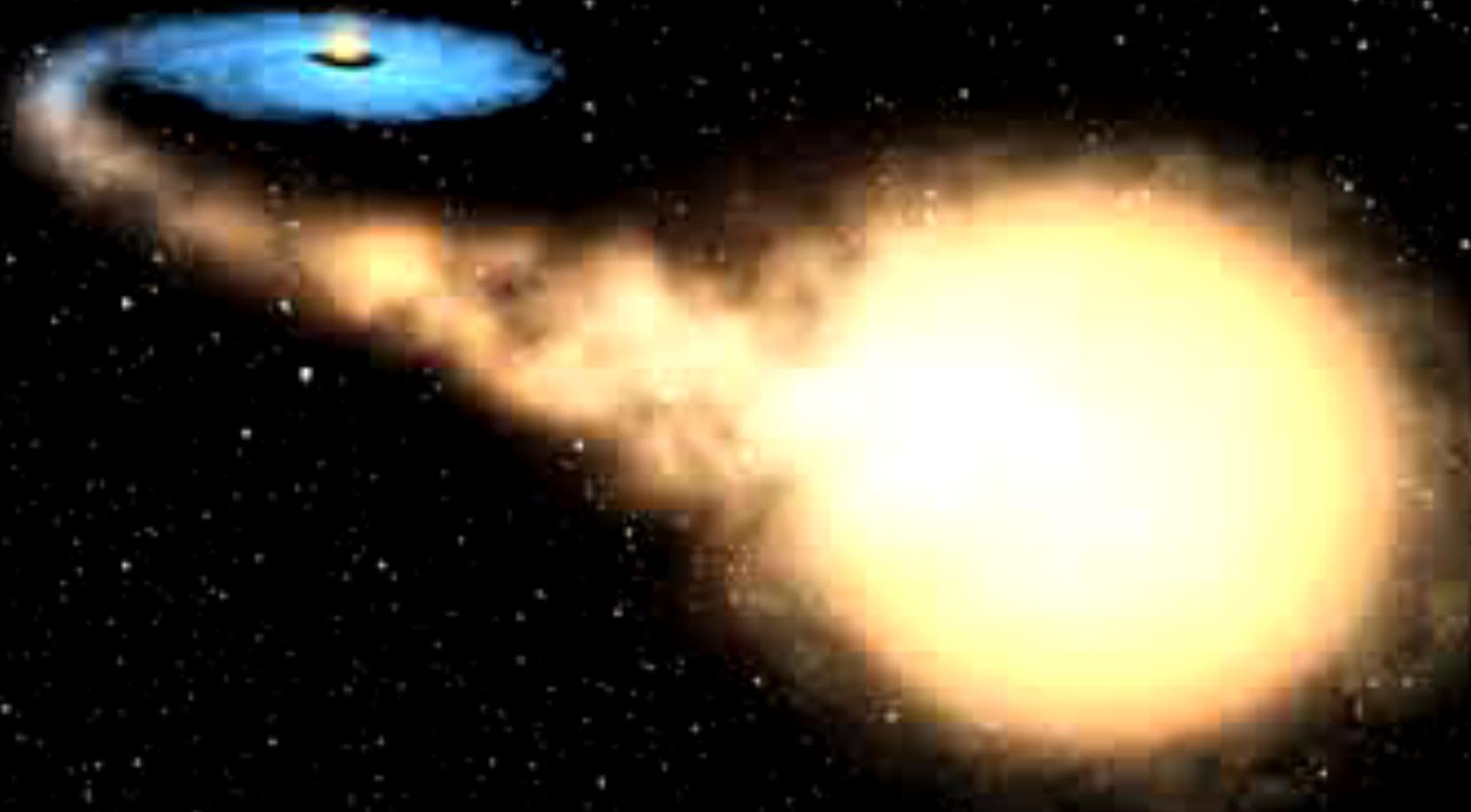
Binaria de Rayos X

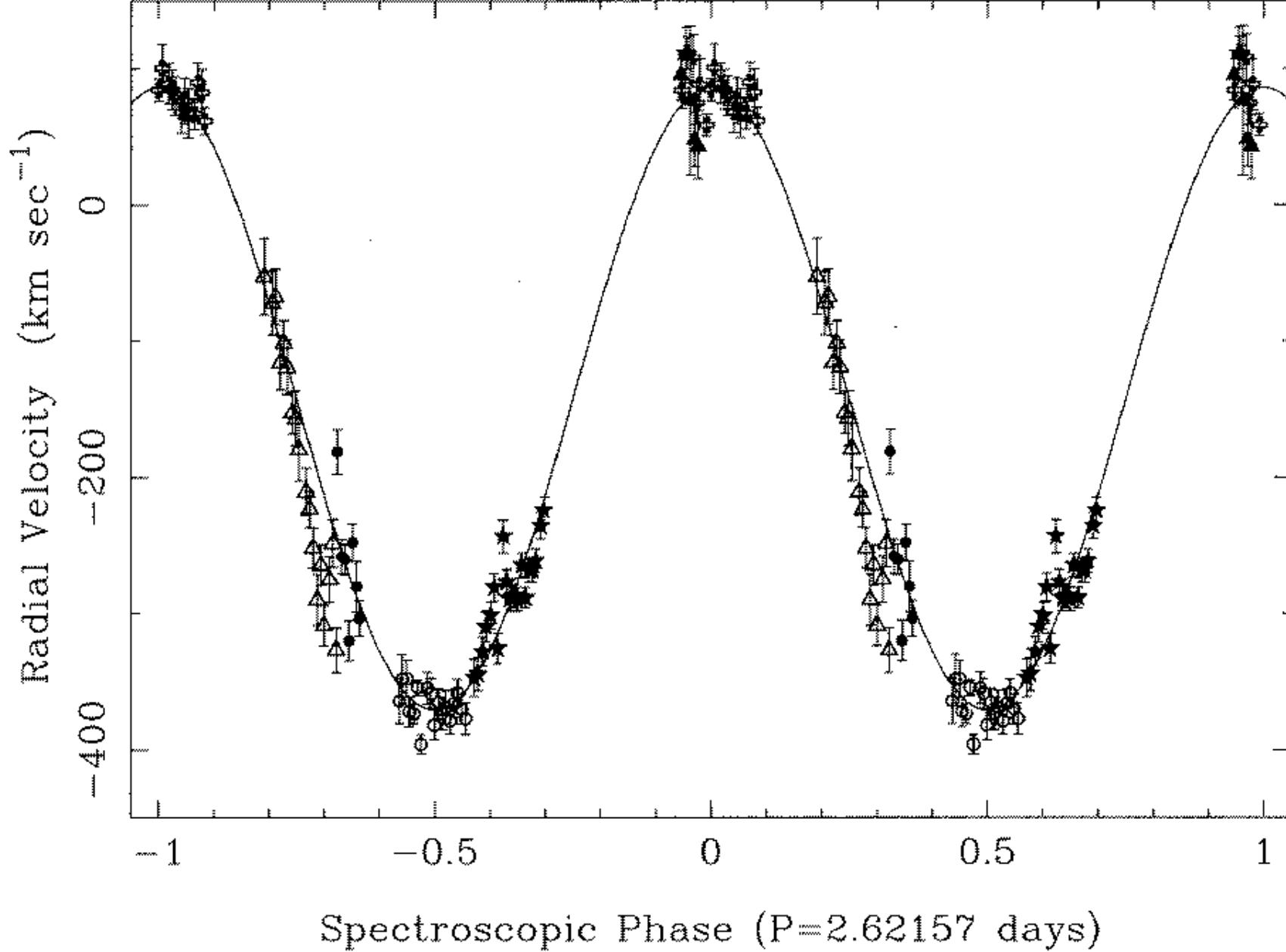


Riccardo Giacconi
Premio Nobel Física 2002









Compact Objects in Binary Systems

X-RAY BINARIES

Cyg X-1
LMC X-3
LMC X-1

A0620-00 (XN Mon 75)
GS2023+338 (V404 Cyg)
XN Mus 91
XN Oph 77
GROJ1655-40 (XN Sco 94)
GS2000+251 (XN Vul 88)
GROJ0422+32 (XN Per 92)

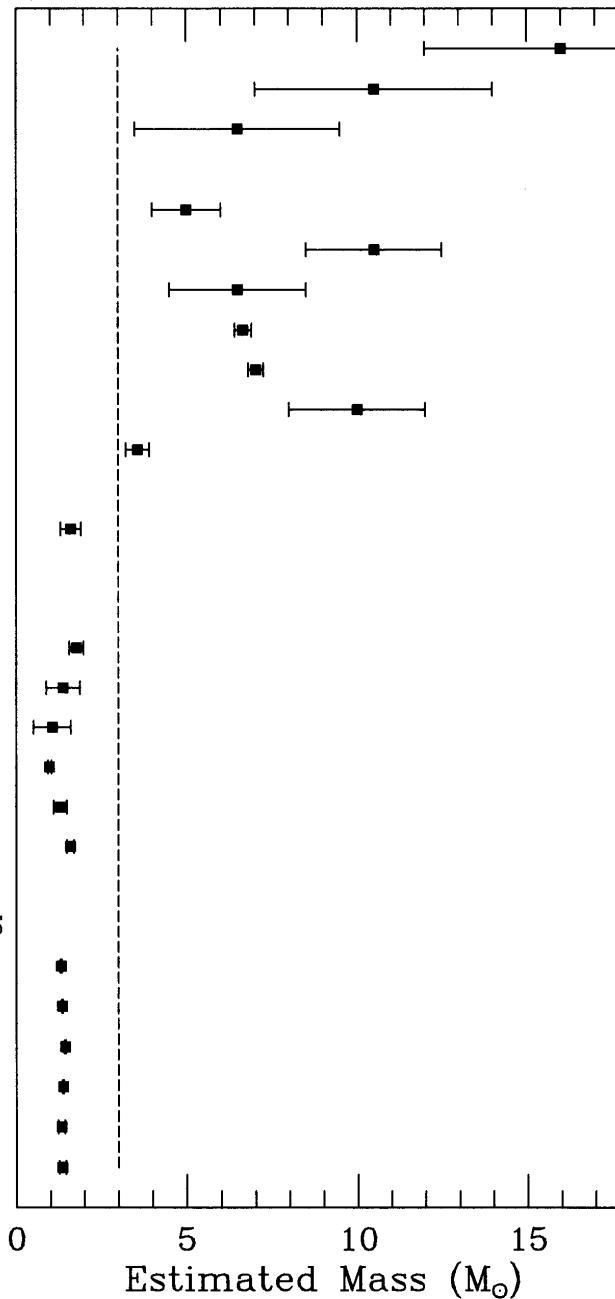
Cen X-4 (burster)

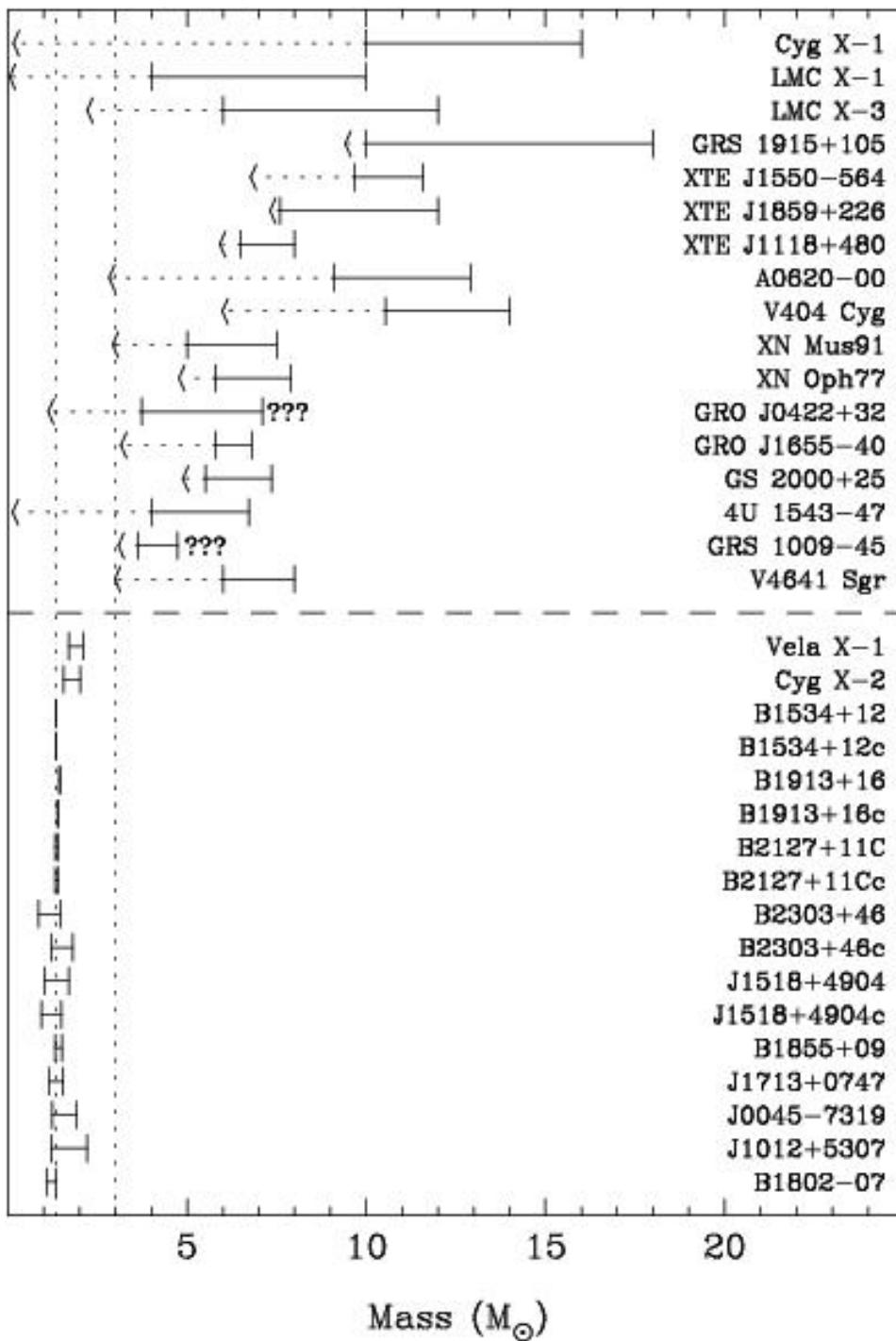
ECLIPSING X-PULSARS

Vela X-1
LMC X-4
Cen X-3
Her X-1
4U1538-52
SMC X-1

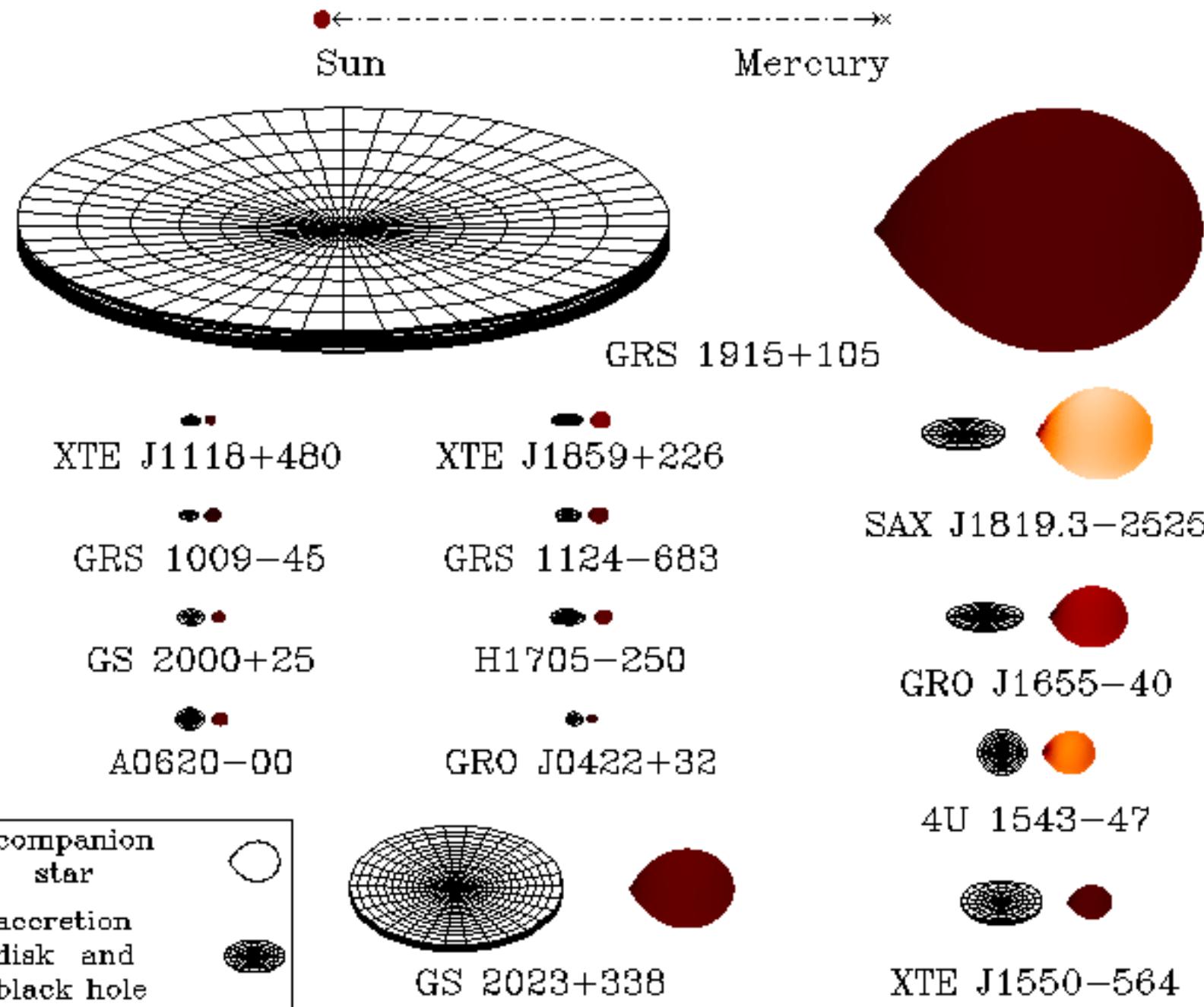
BINARY RADIO PULSARS

PSR B1534+12
PSR B1534+12_B
PSR B1913+16
PSR B1913+16_B
PSR 2127+11C
PSR 2127+11C_B





Masa de objetos compactos en sistemas binarios.

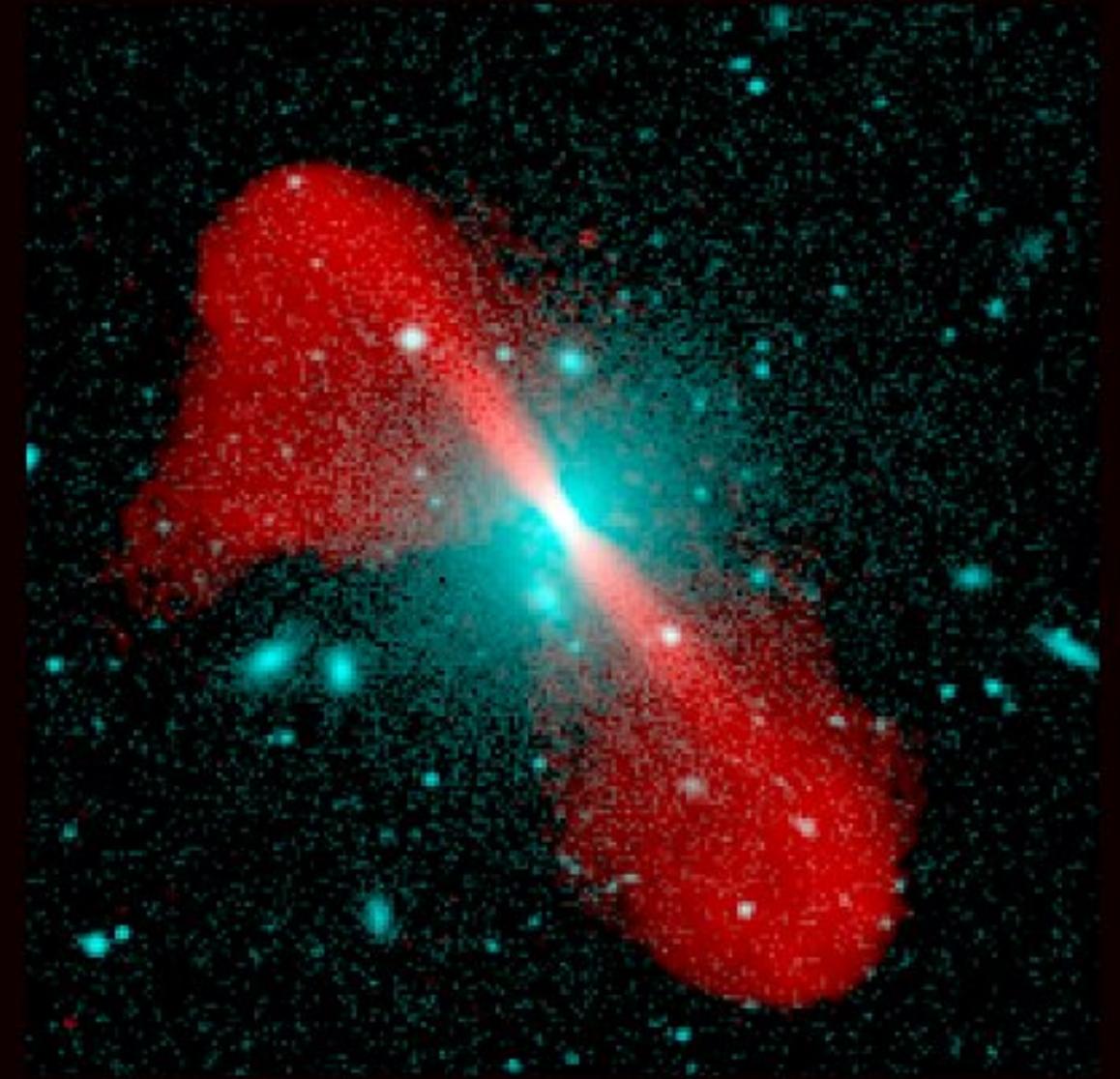


En la actualidad se conocen alrededor de 30 sistemas binarios de rayos X en los que la masa de la estrella “muerta” excede 3 veces la masa del Sol y por lo tanto se cree que es un hoyo negro.

La presencia del hoyo negro se deduce de manera indirecta: a través de los movimientos de la estrella compañera y de las características del disco de acreción.

Se estima que en nuestra Galaxia hay del orden de 10^8 hoyos negros estelares. La Galaxia tiene 10^{10} años de formada y aproximadamente cada 100 años “muere” una estrella masiva.

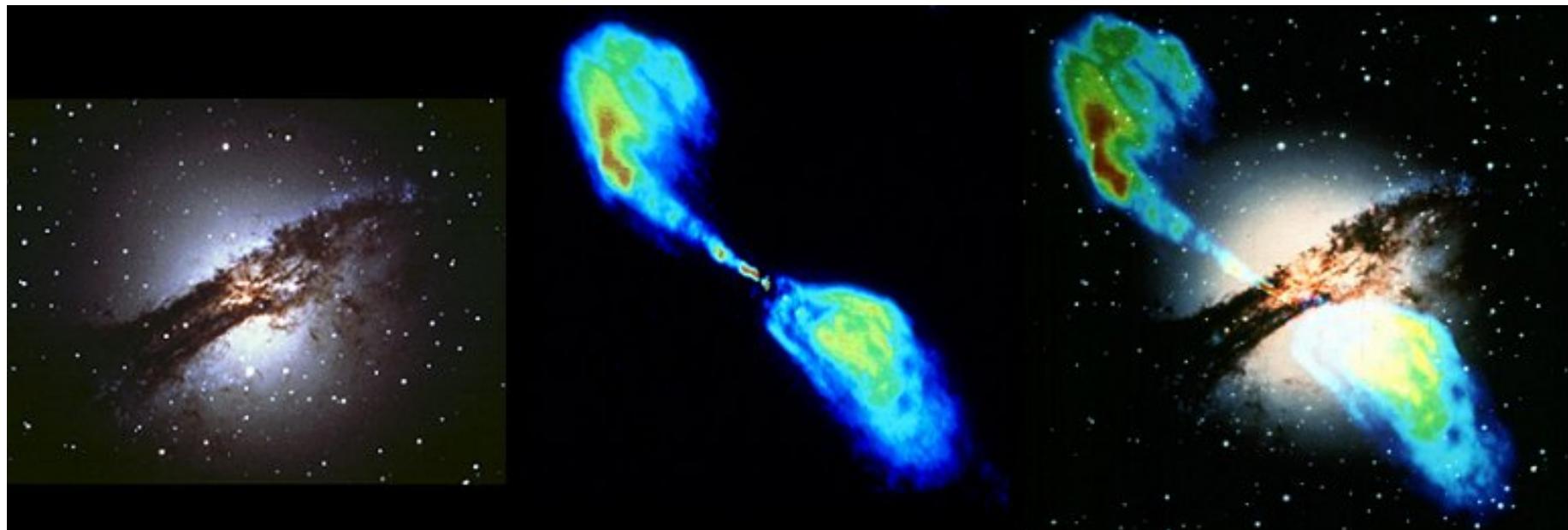
Al mismo tiempo que se establecía la existencia en nuestra Galaxia de hoyos negros con masas de entre 3 y 20 veces la masa del Sol, en los centros de otras galaxias comenzaba a consolidarse la necesidad de hoyos negros, pero éstos con una masa de millones a miles de millones de veces la masa del Sol: los llamados hoyos negros supermasivos.



Radio Galaxy 3C296
Radio/optical superposition

Copyright (c) NRAO/AUI 1999

Centauro A



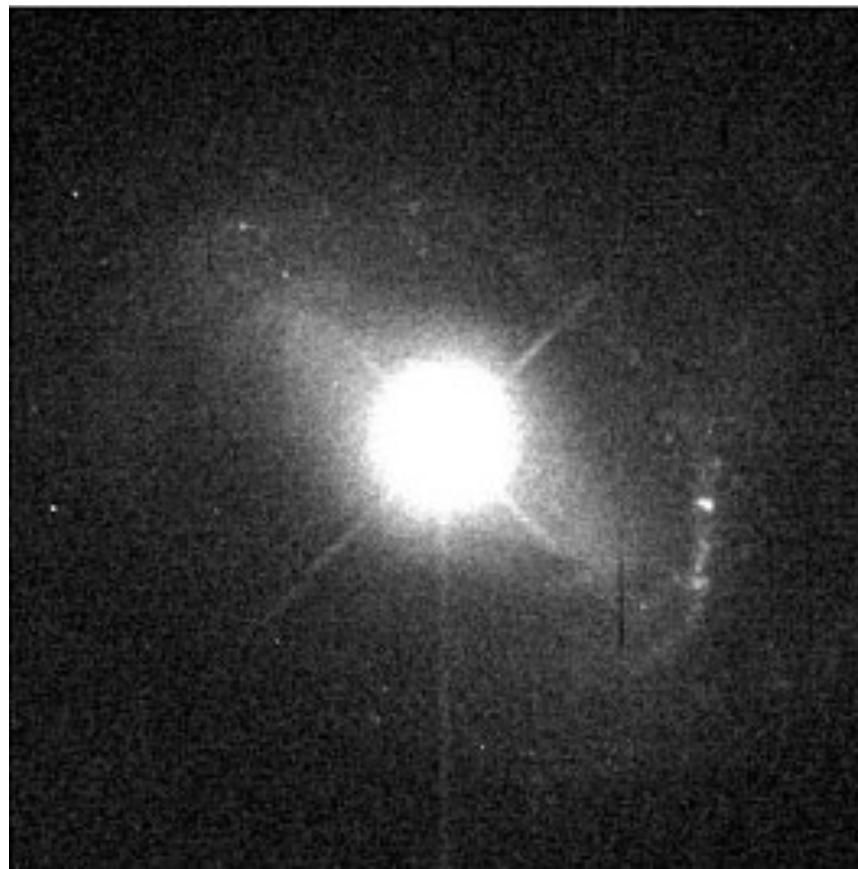
Hercules A: Optico y Radio



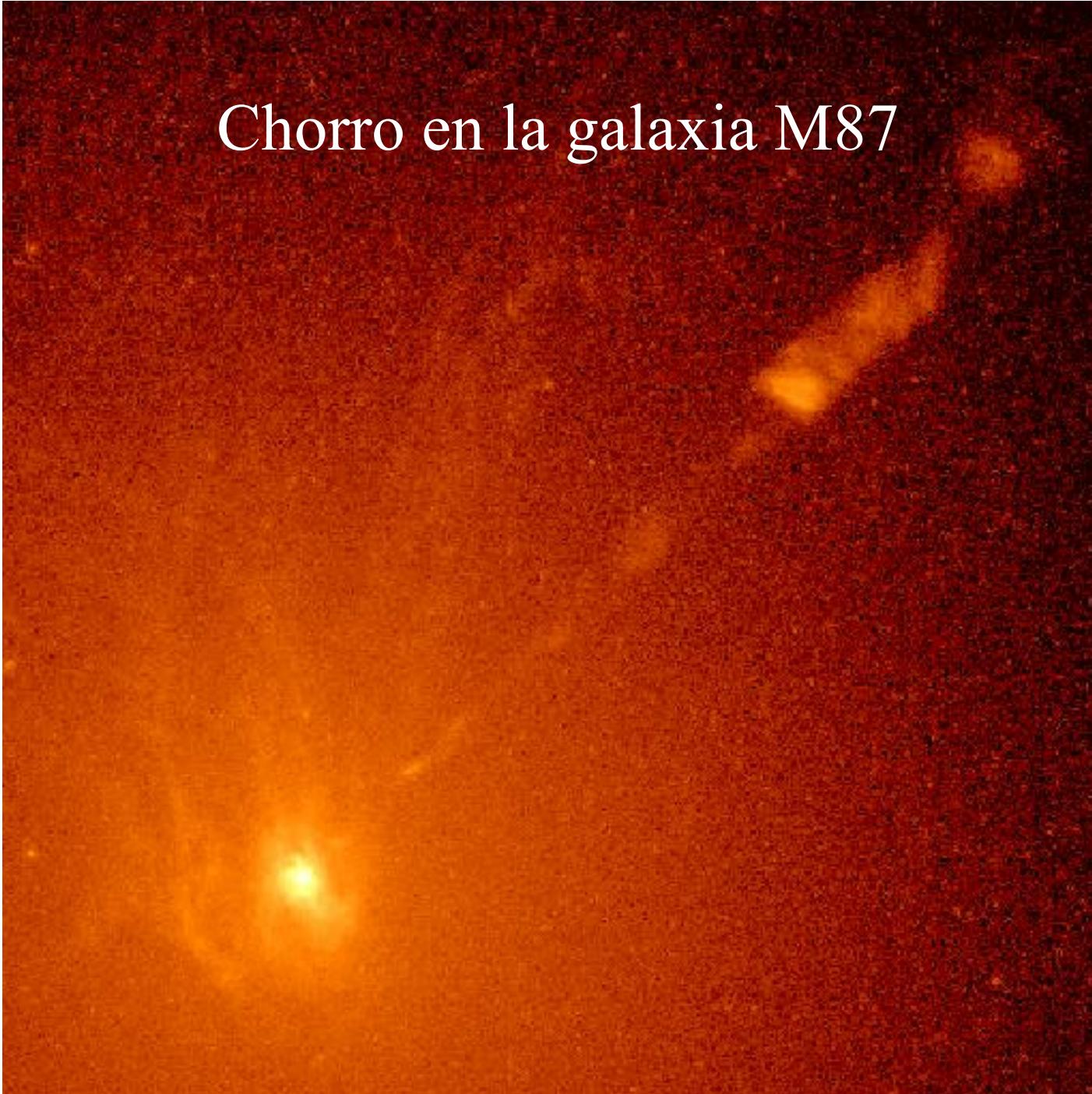
1963: Descubrimiento de los cuasares

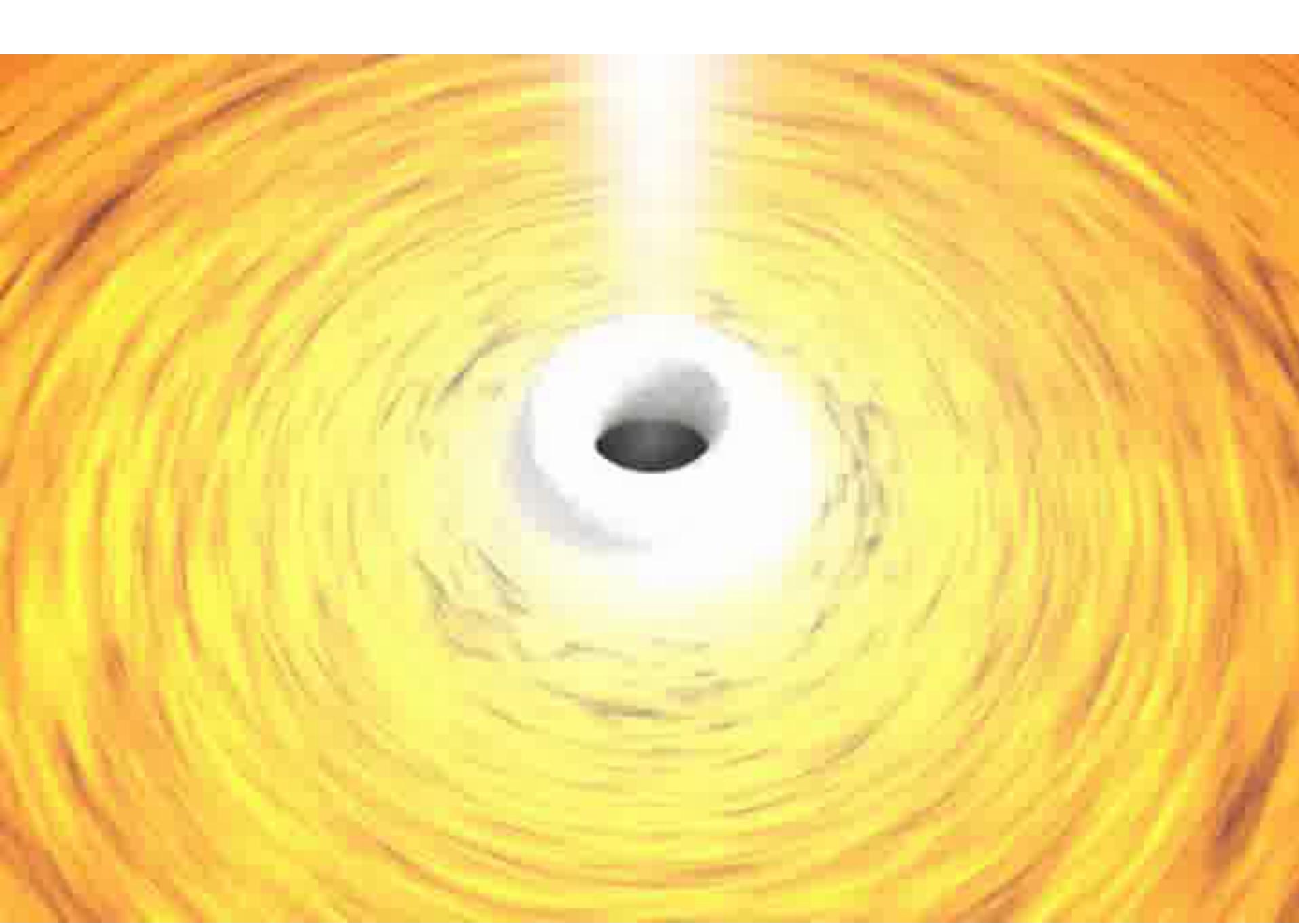


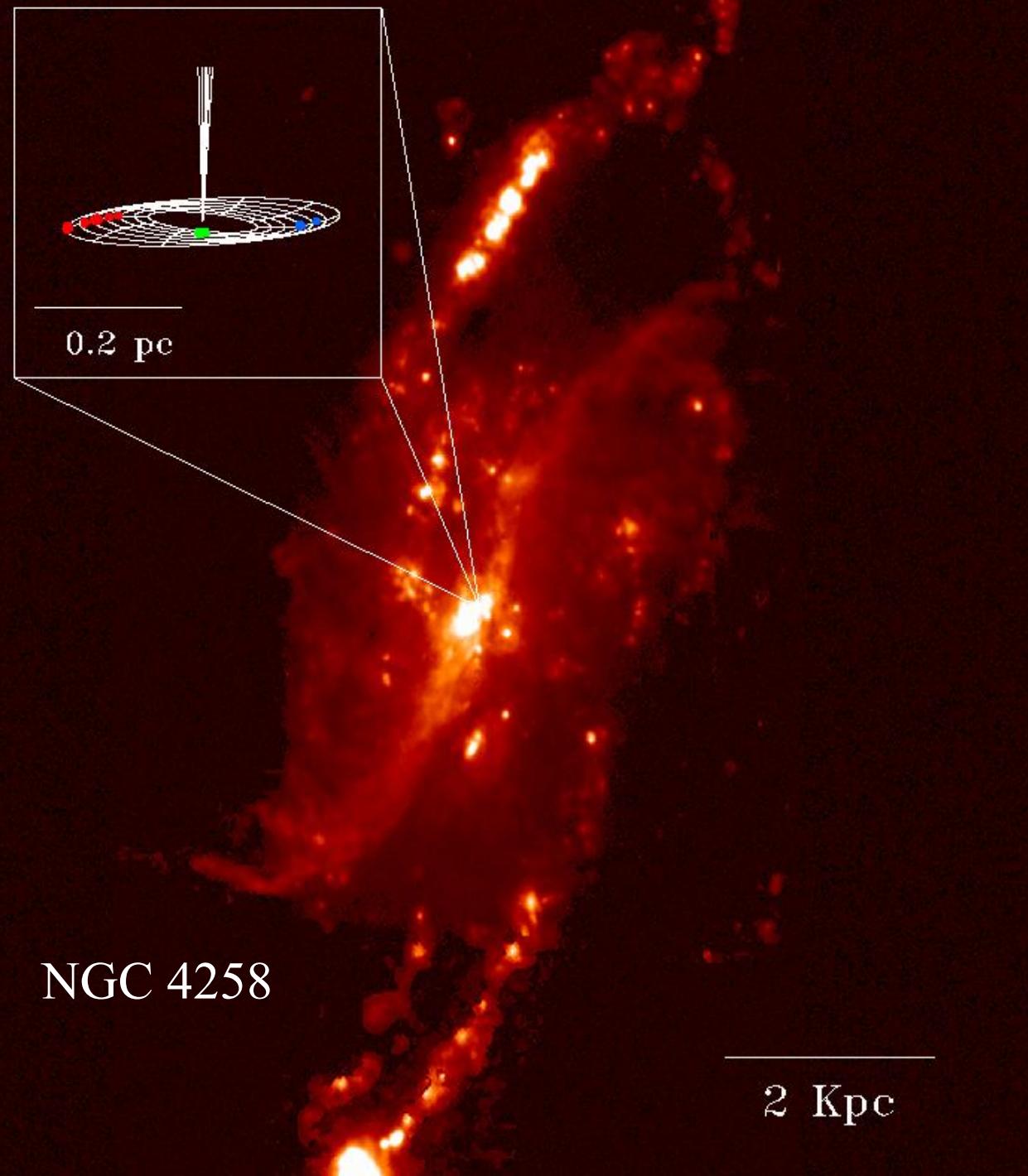
Cuasares: el centro de remotas galaxias

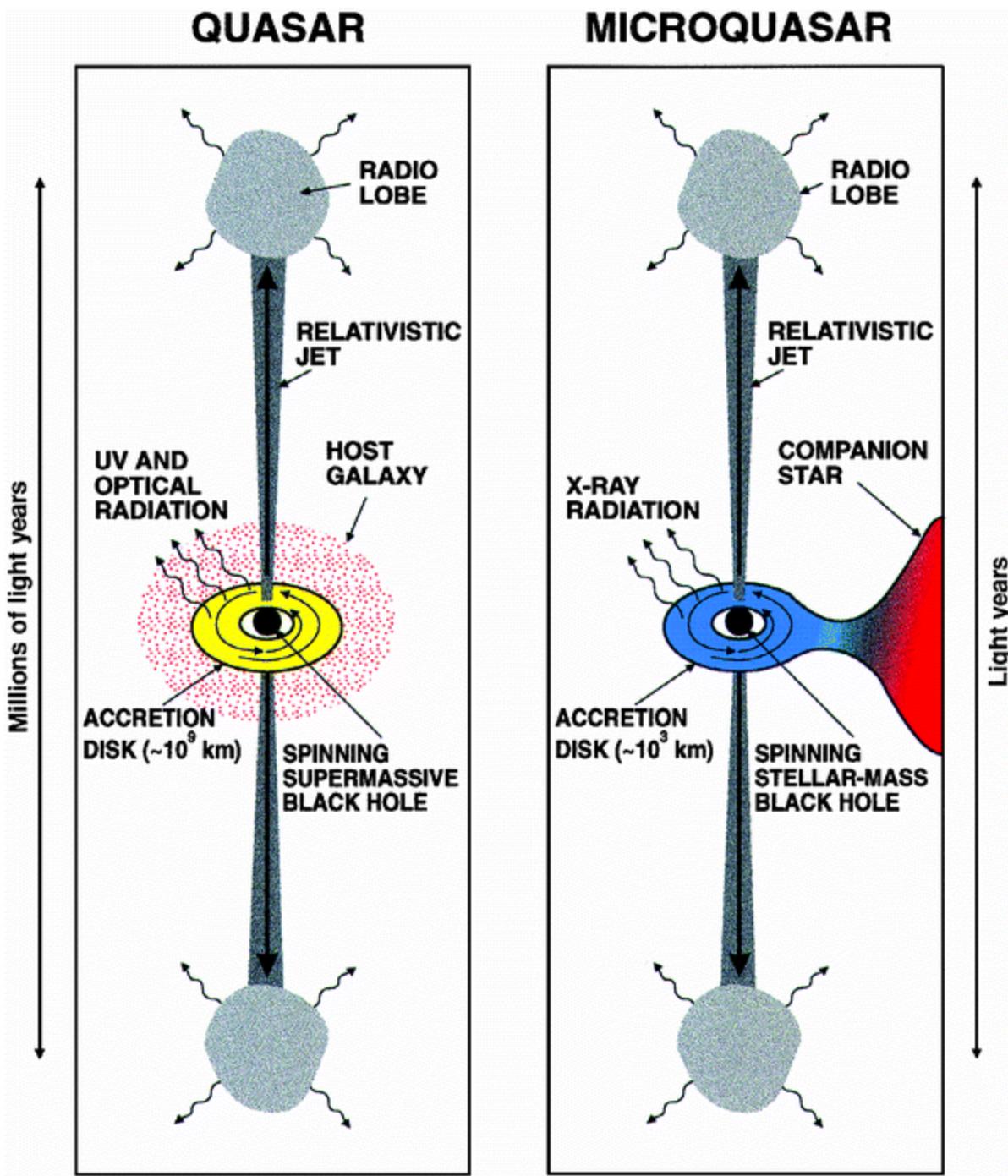


Chorro en la galaxia M87



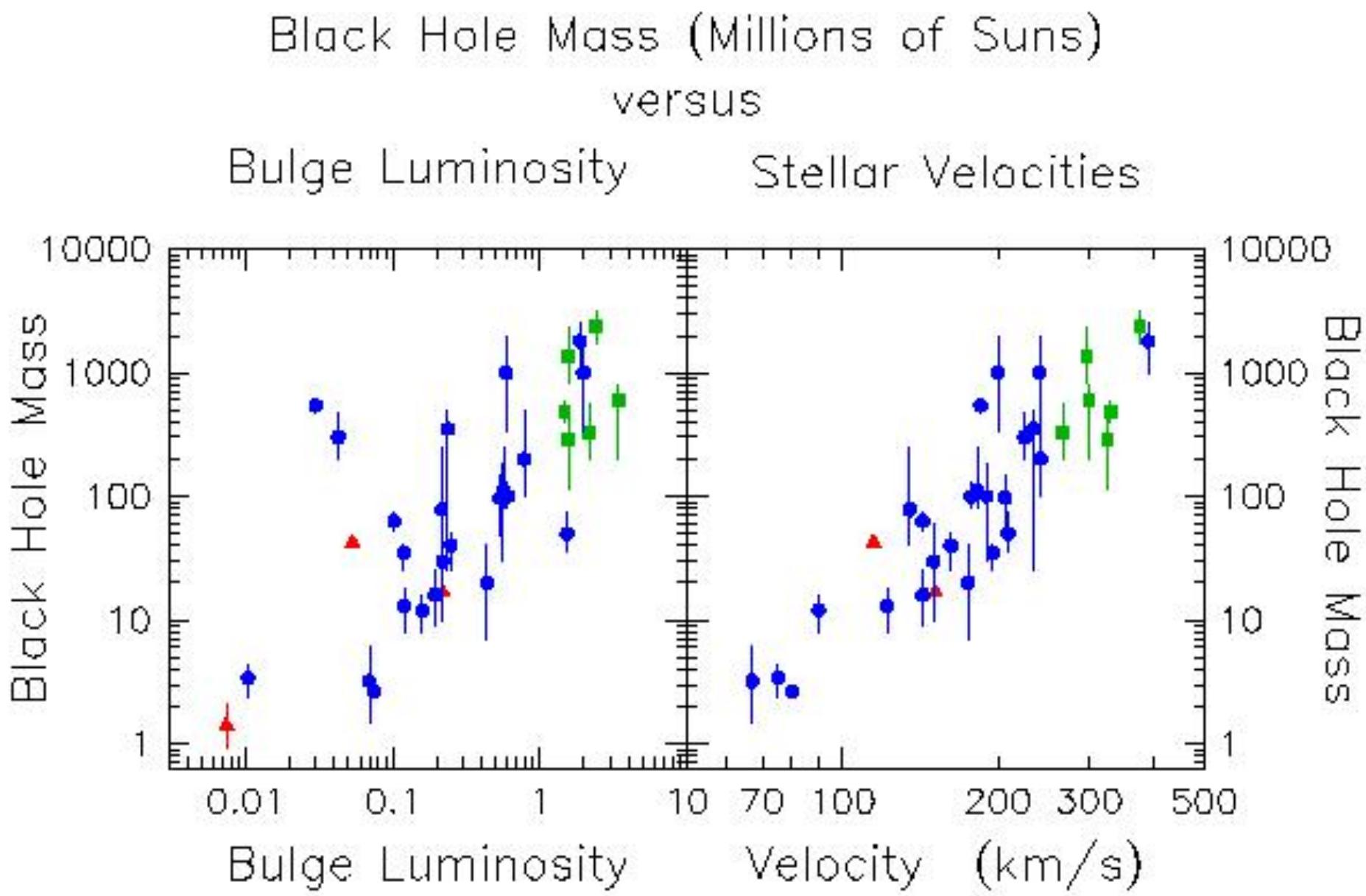






En los 1970s...

- La idea es que algunas galaxias podrían tener hoyos negros.
- En la actualidad esto ha cambiado a creer que todas o casi todas las galaxias tienen hoyos negros, pero que estos están activos sólo en una pequeña fracción de ellas.
- Se descubre Sgr A*, una fuente de radio peculiar en el centro de nuestra Galaxia.



El Sistema Solar en la Vía Láctea





The image shows a circular view of the Milky Way galaxy against a black background. The central region is bright and yellowish-white, representing the galactic core and central bulge. This central light gradually fades into the surrounding disk of the galaxy, which is densely packed with small white stars of various sizes. The overall shape is slightly irregular, suggesting a view from within or near the plane of the galaxy's disk.

La Vía Láctea, nuestra Galaxia

THE TEMPERATURE AND DYNAMICS OF THE IONIZED GAS IN THE NUCLEUS OF OUR GALAXY

LUIS F. RODRIGUEZ* AND ERIC J. CHAISSON†

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

Received 1978 August 18; accepted 1978 September 26

ABSTRACT

Observations of the H_{65α} (23.4 GHz), H_{84α} (10.9 GHz), and H_{94α} (7.8 GHz) radio recombination lines from Sgr A West are presented. We suggest that a core-halo model can satisfactorily account for the reported radio and infrared observations of this source. Due to instrumental limitations, the observed infrared lines are dominated by the core, while the observed radio radiation arises mostly in the halo. Although more than a factor of 10 brighter than the halo, the core is responsible for only about one-fourth of the integrated thermal continuum from Sgr A West. Our model implies that the neon abundance determination from infrared observations, previously considered consistent with the solar value, should be revised upward by a factor of 4. This suggested enrichment of neon relates strongly to our derivation of an unusually low electron temperature, $T_e = 5000 \pm 1000$ K, since nebular cooling is expected to be enhanced by an overabundant heavy-element content. The dynamical structure of Sgr A West can be explained in terms of Keplerian rotation due to the gravitational field of the normal stellar population plus a central mass point of $5 \times 10^6 M_\odot$.

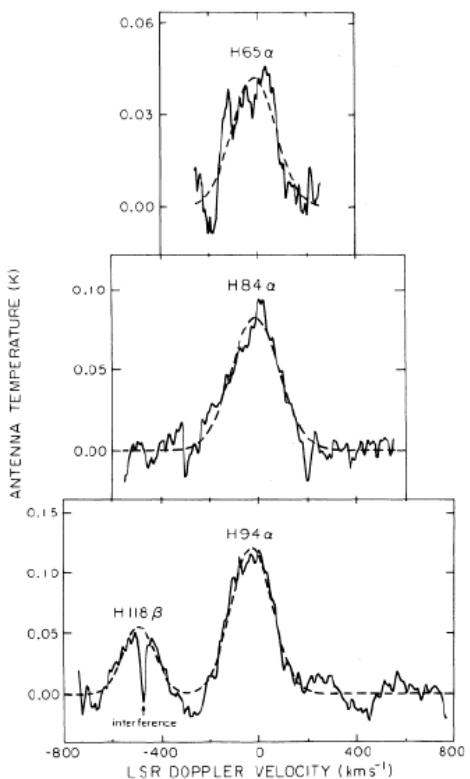


FIG. 1.—H_{65α}, H_{84α}, and H_{94α} spectra observed in the direction of Sgr A West. Solid curve, data; dashed curve, suggested least-squares fit. The autocorrelator sampling rate for each spectrum was 100 MHz.

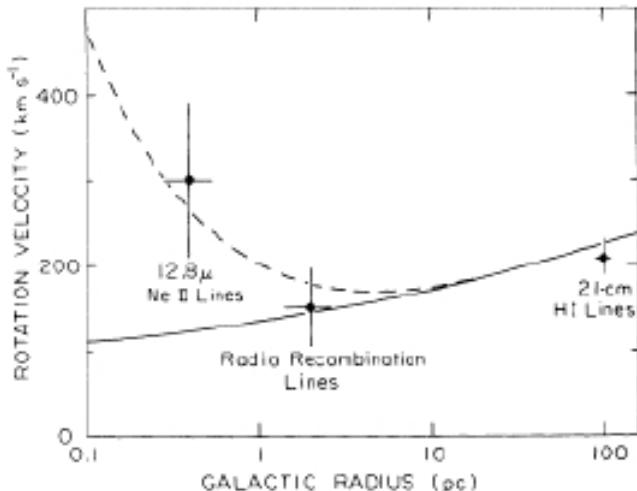


FIG. 4.—A tentative rotation curve for the galactic nucleus. Solid curve, model having normal stellar population; dashed curve, model having the same normal stellar population plus a mass point of $5 \times 10^6 M_\odot$. Error bars are estimated to be twice the standard deviation.

Del estudio de líneas provenientes de nubes de gas alrededor del centro de nuestra Galaxia se infirió la presencia de "...una masa puntual de 5 millones de veces la del Sol."



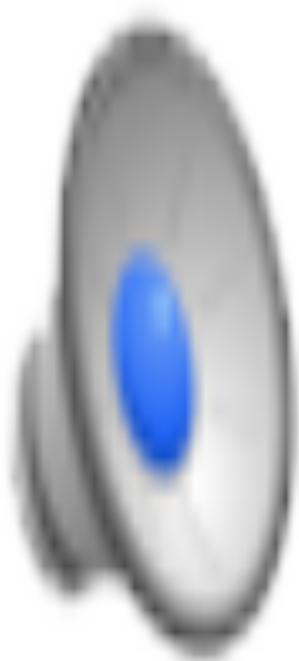
BLACK HOLE

HOW AN IDEA
ABANDONED BY
NEWTONIANS,
HATED BY EINSTEIN,
AND GAMBLED ON
BY HAWKING
BECAME LOVED

MARCIA BARTUSIAK

Poco a poco, un concepto inicialmente rechazado por la comunidad astronómica, se convirtió en algo aceptado por la misma.

Este proceso se presenta en el libro “HOYO NEGRO: Como una idea abandonada por los Newtonianos, odiada por Einstein, y apostada por Hawking, se convirtió en algo amado.”

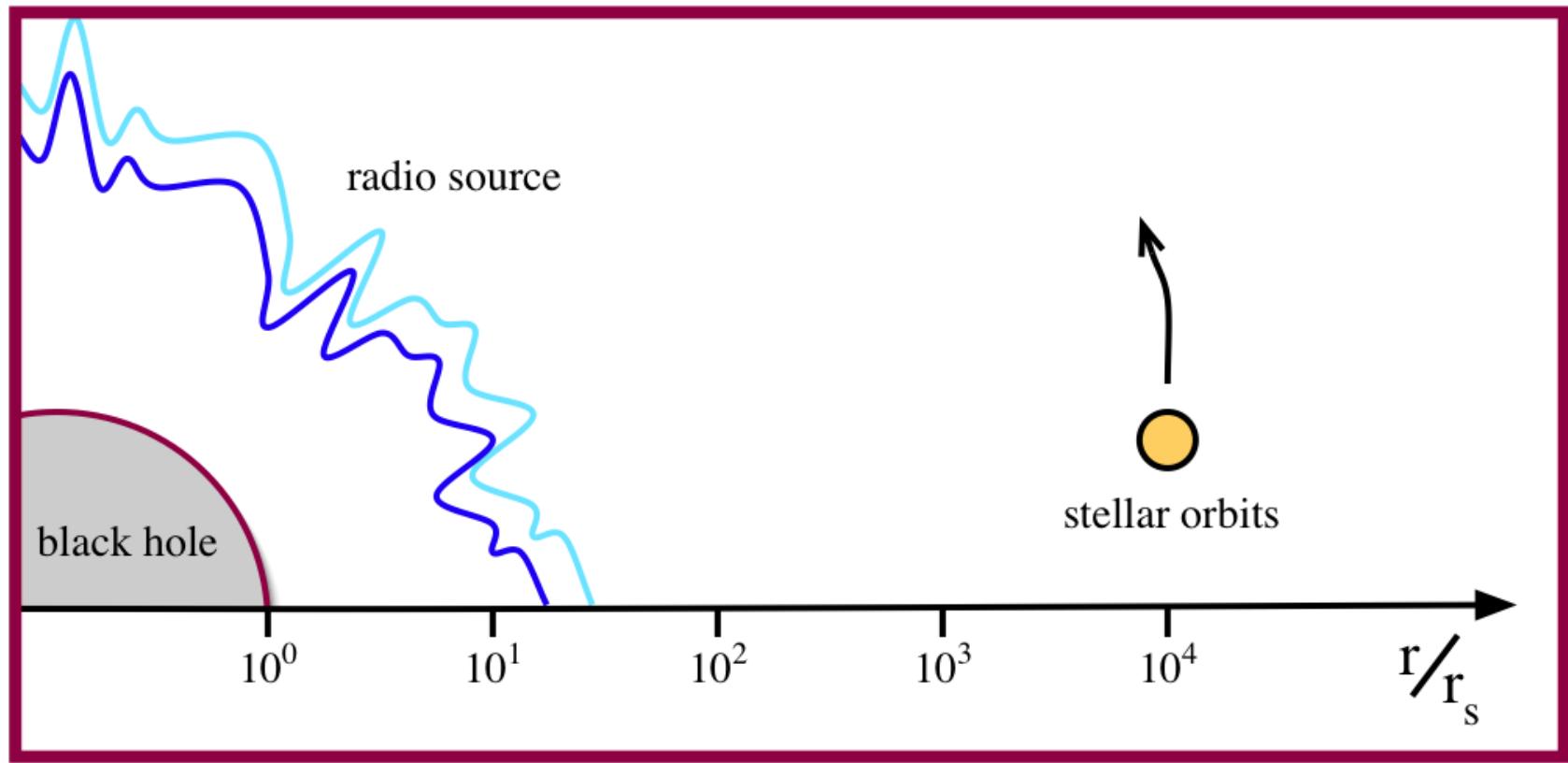


Los dos grupos comparten el Premio Crafoord 2012



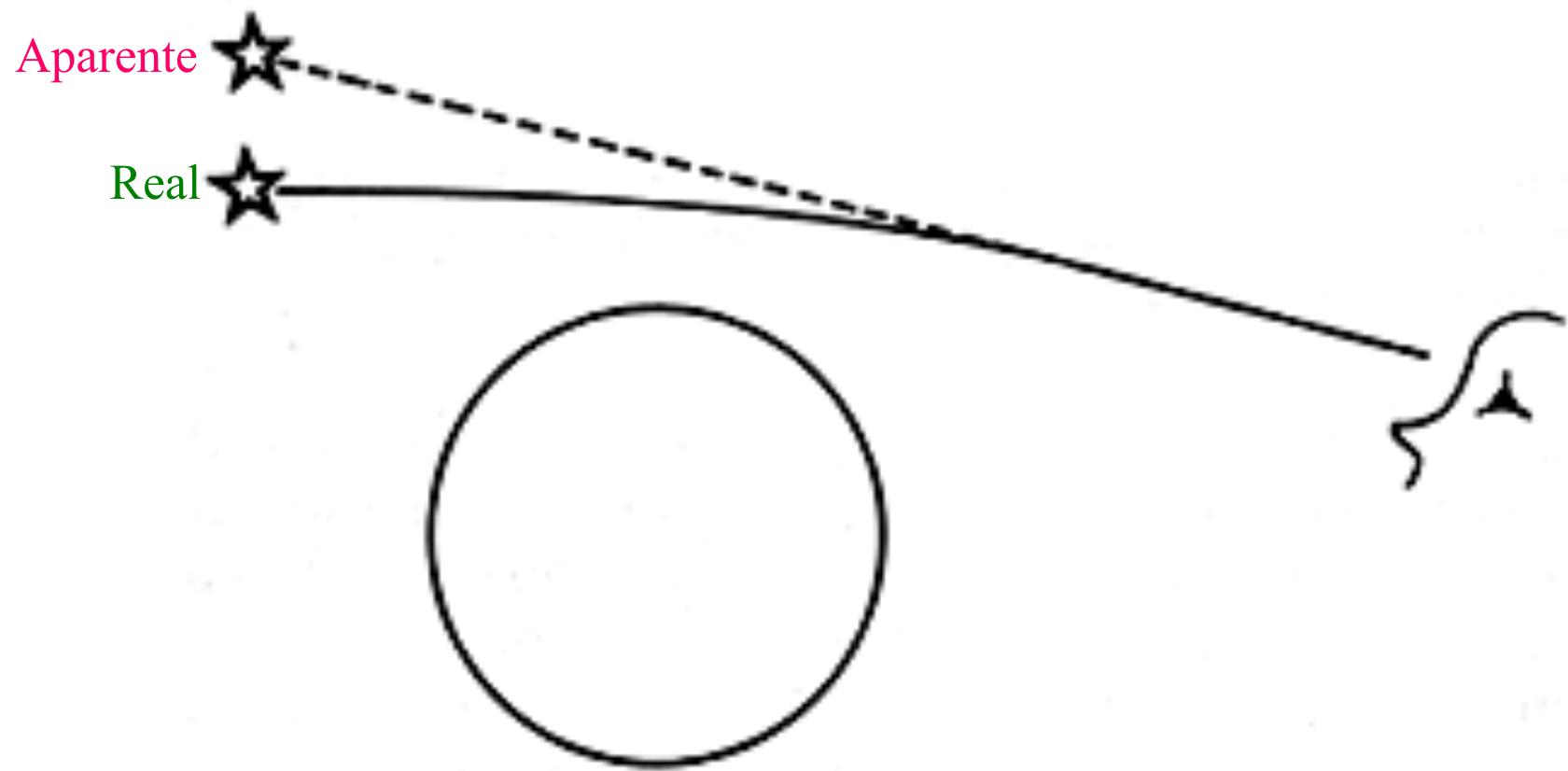
$$M_{bh} = 4.02 \pm 0.16 \pm 0.04 \times 10^6 M_{\odot}$$

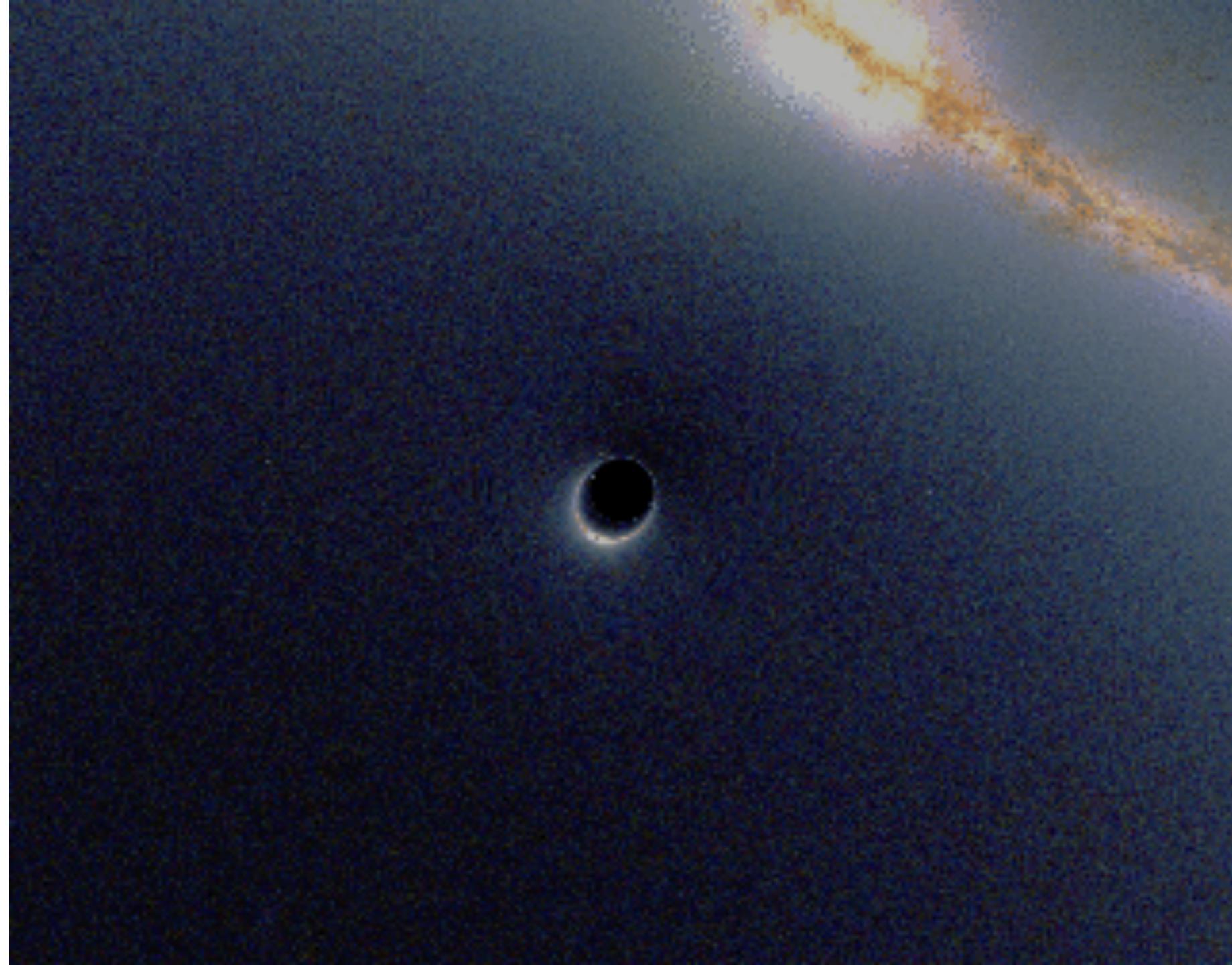
Some Scales at the Galactic Center



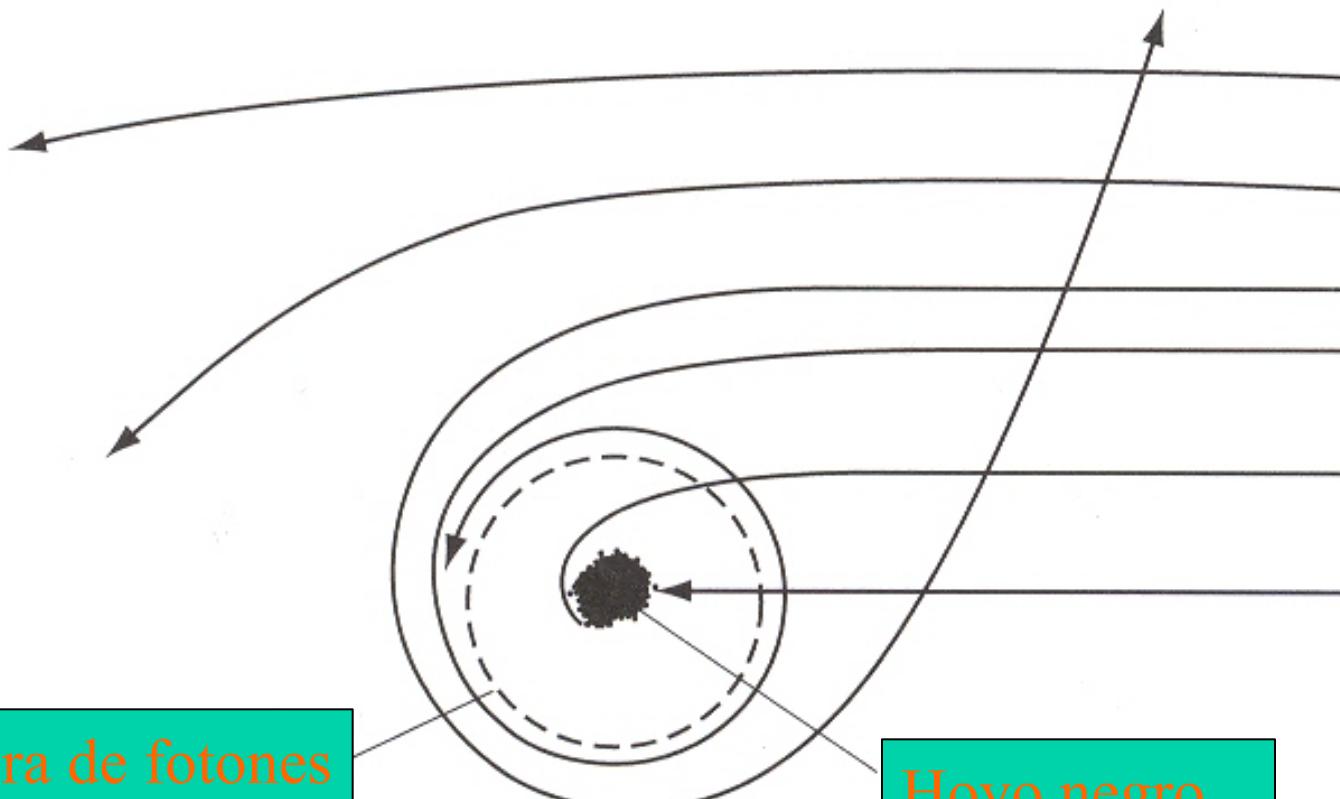
$r_s = 1.3 \times 10^{12} \text{ cm}$ (for 4.3×10^6 solar masses) $= 10 \mu\text{as}$ at 8.3 kpc
Luminosity $\sim 300 L_{\text{Sun}}$ or 10^{-9} Eddington ("starved" black hole)

Deflexión de la luz





La gravedad curva el espacio y la luz siente que se mueve en línea recta



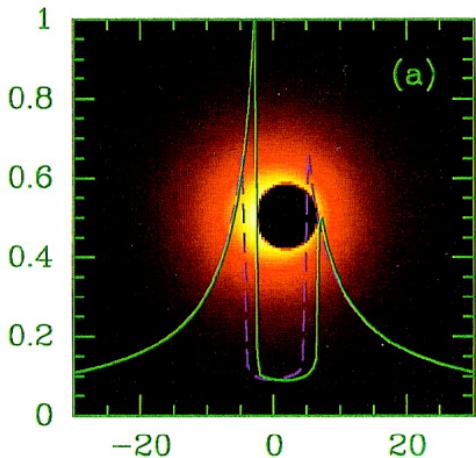
Esfera de fotones

Hoyo negro

La “imagen” está dominada por la Relatividad General

La “sombra” del hoyo negro

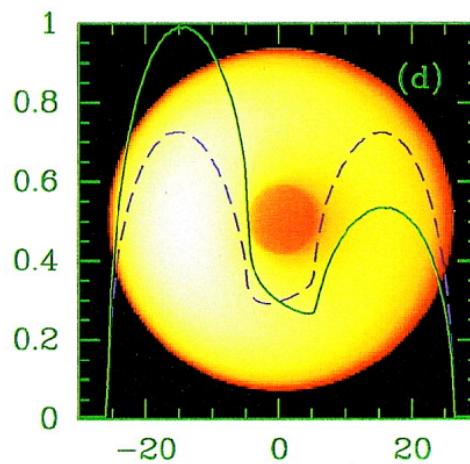
(Bardeen 1973; Falcke, Agol, Melia 2000; Johannsen and Psaltis 2010)



Maximally spinning BH

Free fall envelope

$$D_{\text{shadow}} = 9/2 * R_{\text{sch}}$$



Non-spinning BH

Rotating accretion envelope

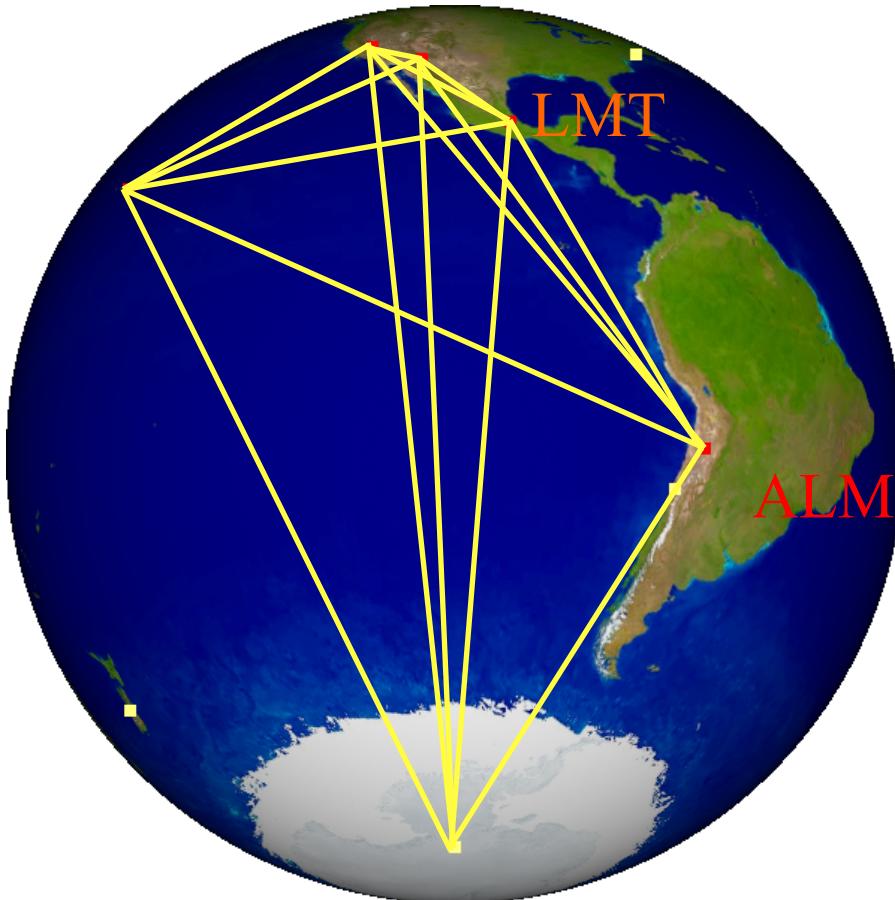
$$D_{\text{shadow}} = \sqrt{27} * R_{\text{sch}}$$

Estudiar a la sombra nos da la masa y espín.

(Johannsen, Psaltis et al. 2012)

Como se ve el EHT desde Sgr A*

GLT - Groenlandia



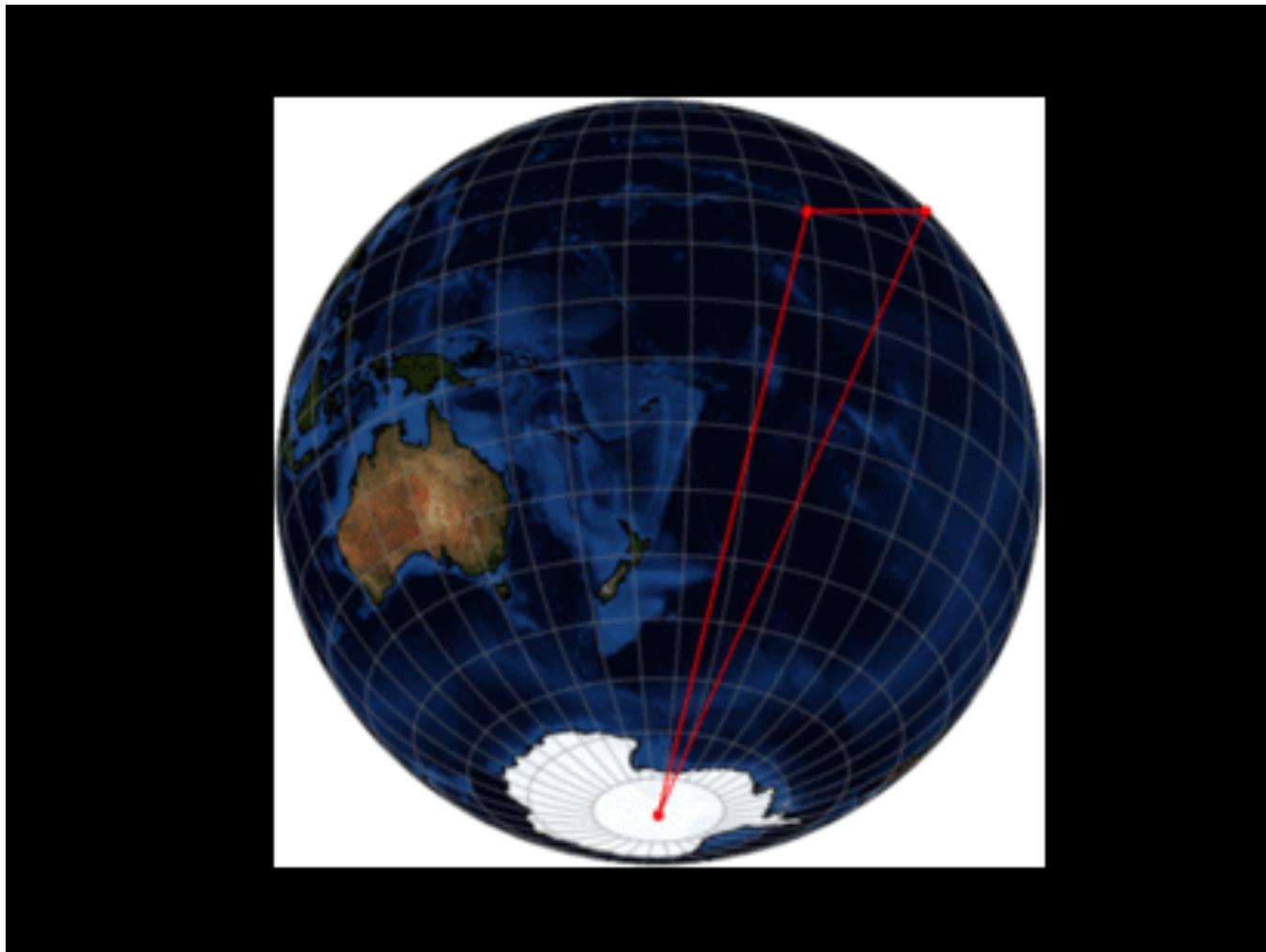
Polo Sur

IRAM

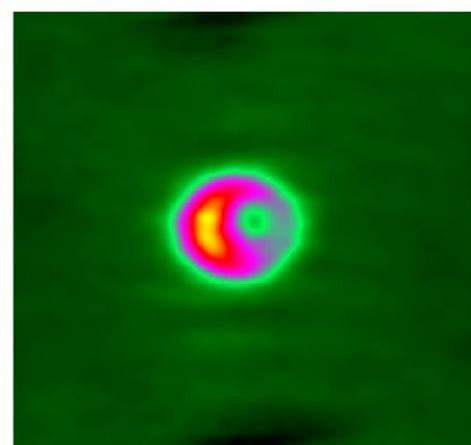
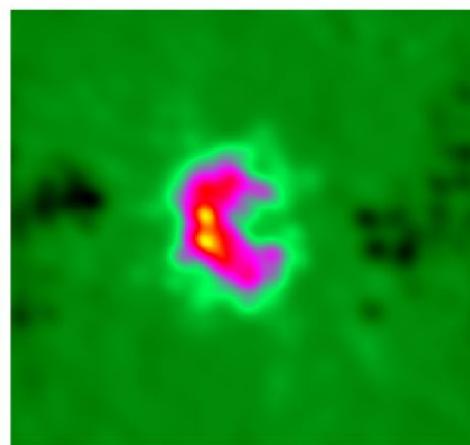
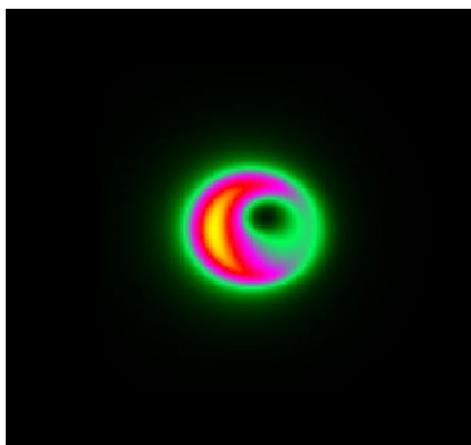
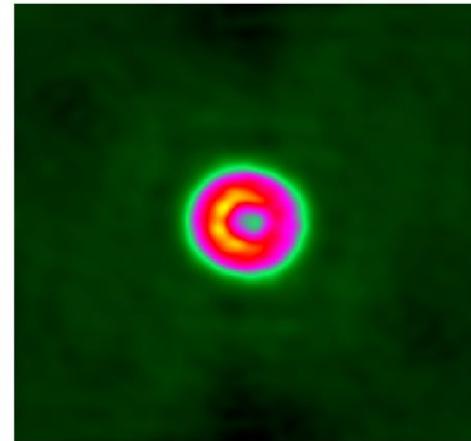
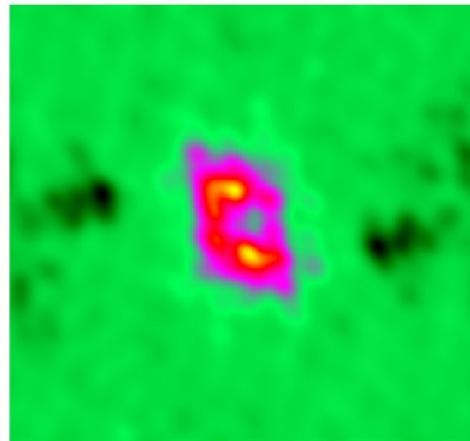
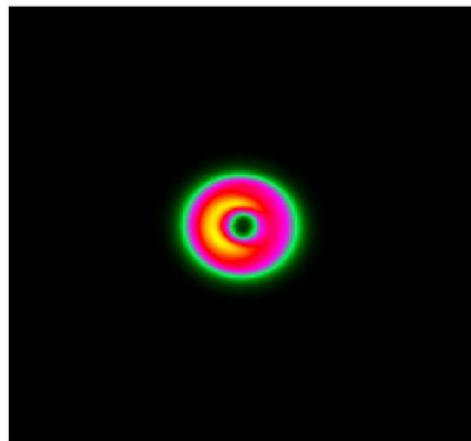


Polo Sur

La Tierra desde Sgr A*



Hacia una imagen de calidad



Modelo

7 estaciones

13 estaciones

Doeleman et al., “The Event Horizon Telescope,” Astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, Science White Papers, no. 68

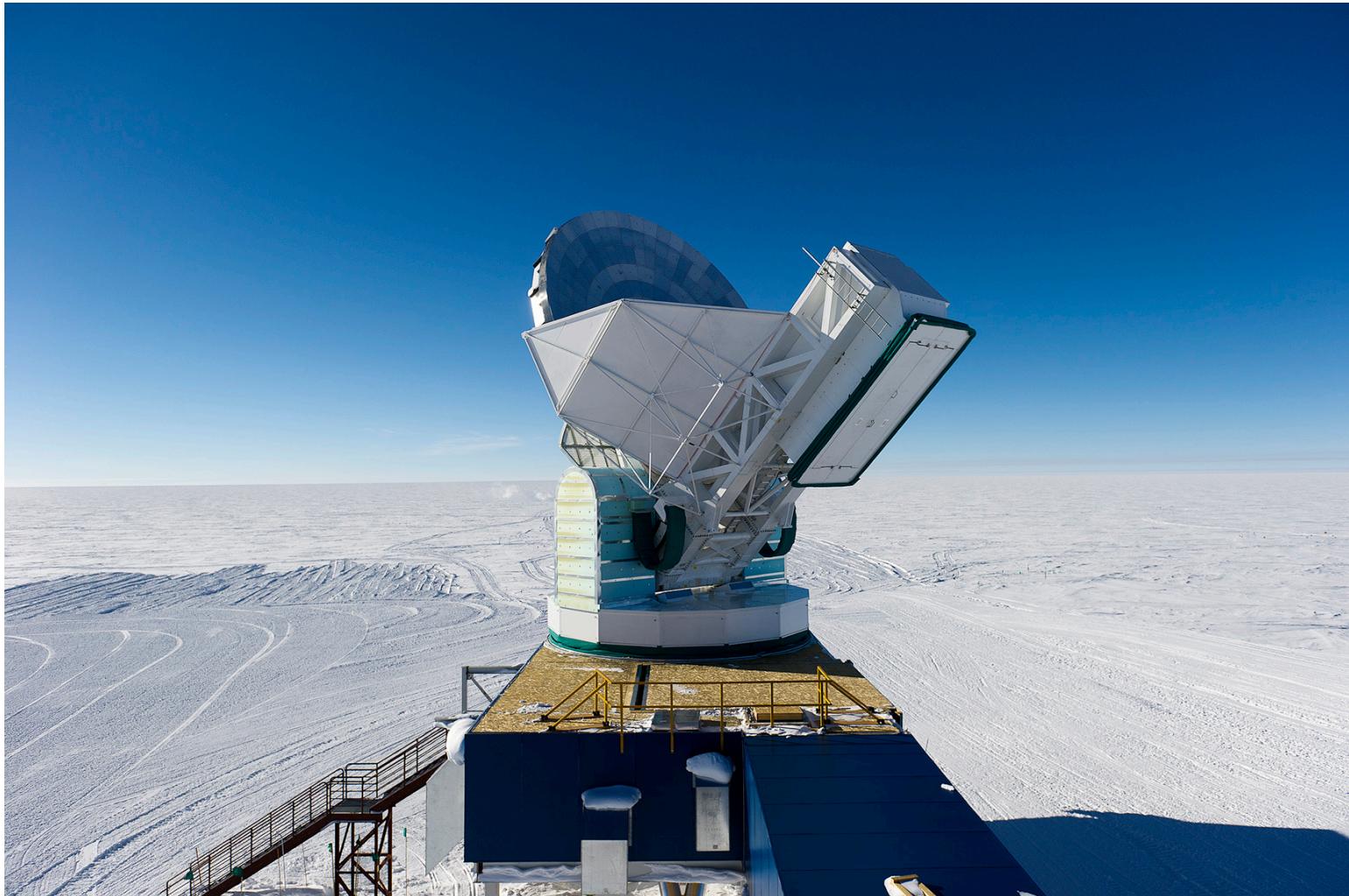
Gran Telescopio Milimétrico





Atacama Large Millimeter Array, Chile

The South Pole Telescope



Resultados preliminares...

- Se detecta la emisión a 3 mm, pero es necesario llegar a 1 mm. ¿Porqué?
- Pronto se incluirá ALMA y el SPT y en abril de 2017 habrá una campaña de observaciones.

THE INTRINSIC SHAPE OF SAGITTARIUS A* AT 3.5-MM WAVELENGTH

GISELA N. ORTIZ-LEÓN¹, MICHAEL D. JOHNSON², SHEPERD S. DOLEMAN^{2,3}, LINDY BLACKBURN², VINCENT L. FISH³, LAURENT LOINARD^{1,4}, MARK J. REID², EDGAR CASTILLO^{5,6}, ANDREW A. CHAE², ANTONIO HERNÁNDEZ-GÓMEZ¹, DAVID HUGHES⁵, JONATHAN LEÓN-TAVARES^{5,7}, RU-SEN LU⁴, ALFREDO MONTAÑA^{5,6}, GOPAL NARAYANAN⁸, KATHERINE ROSENFELD², DAVID SÁNCHEZ⁵, F. PETER SCHLOERB⁸, ZHI-QIANG SHEN⁹, HOTAKA SHIOKAWA², JASON SOOHO³, AND LAURA VERTATSCHITSCH²

Draft version March 16, 2016

Abstract

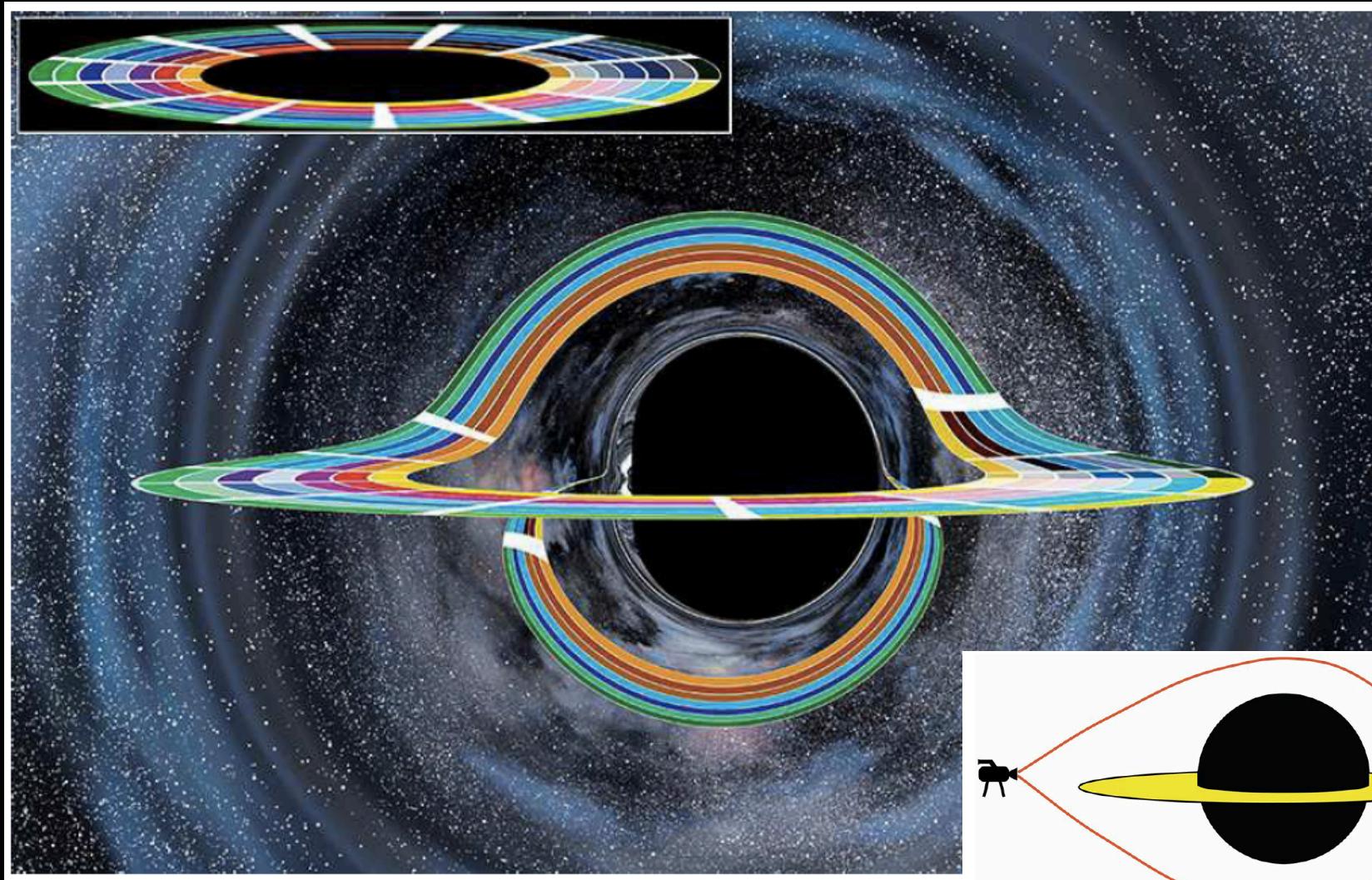
The radio emission from Sgr A* is thought to be powered by accretion onto a supermassive black hole of $\sim 4 \times 10^6 M_\odot$ at the Galactic Center. At millimeter wavelengths, Very Long Baseline Interferometry (VLBI) observations can directly resolve the bright innermost accretion region of Sgr A*. Motivated by the addition of many sensitive, long baselines in the north-south direction, we developed a full VLBI capability at the Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano (LMT). We successfully detected Sgr A* at 3.5 mm with an array consisting of 6 Very Long Baseline Array telescopes and the LMT. We model the source as an elliptical Gaussian brightness distribution and estimate the scattered size and orientation of the source from closure amplitude and self-calibration analysis, obtaining consistent results between methods and epochs. We then use the known scattering kernel to determine the intrinsic two dimensional source size at 3.5 mm: $(147 \pm 7 \mu\text{as}) \times (120 \pm 12 \mu\text{as})$, at position angle $88^\circ \pm 7^\circ$ east of north. Finally, we detect non-zero closure phases on some baseline triangles, but we show that these are consistent with being introduced by refractive scattering in the interstellar medium and do not require intrinsic source asymmetry to explain.

Subject headings: accretion, accretion disks – galaxies: active – galaxies: individual: Sgr A* – Galaxy: center – techniques: interferometric

El hoyo negro Gargantúa y el planeta de Miller en
“Interstellar”

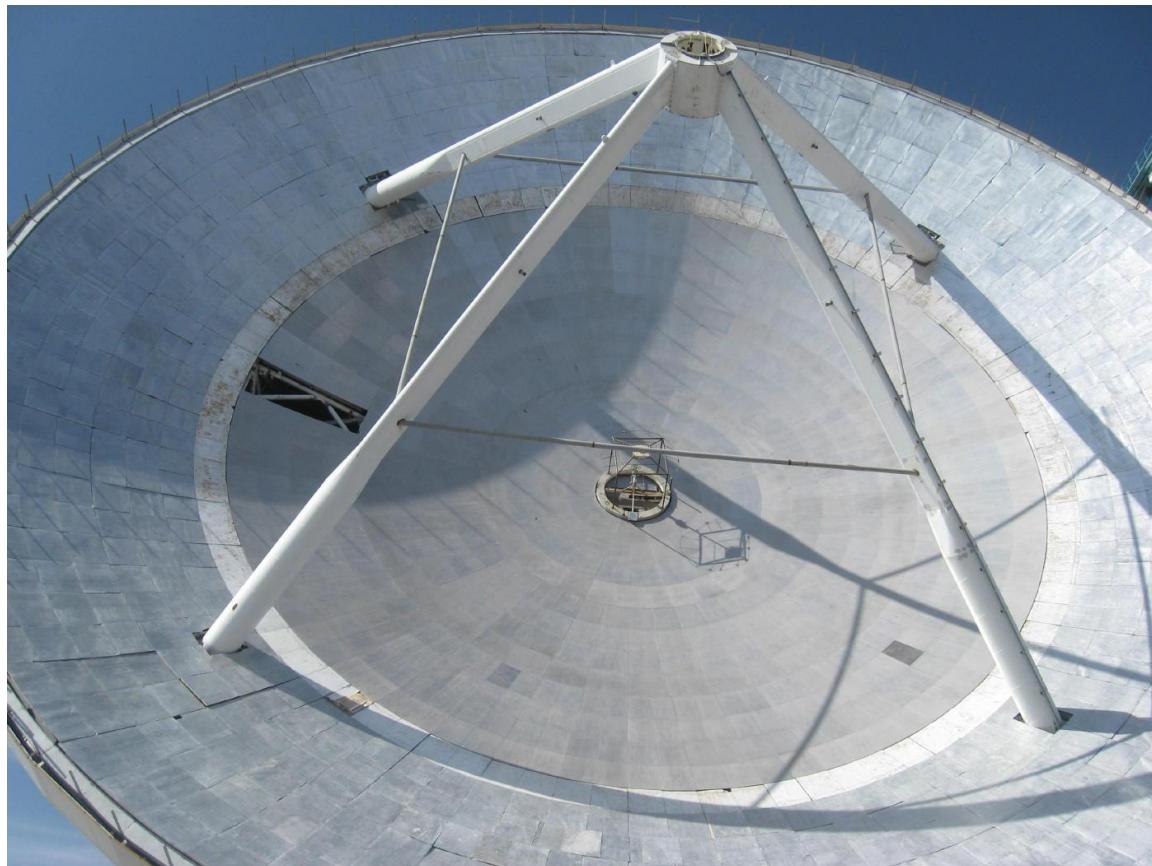


El disco distorsionado



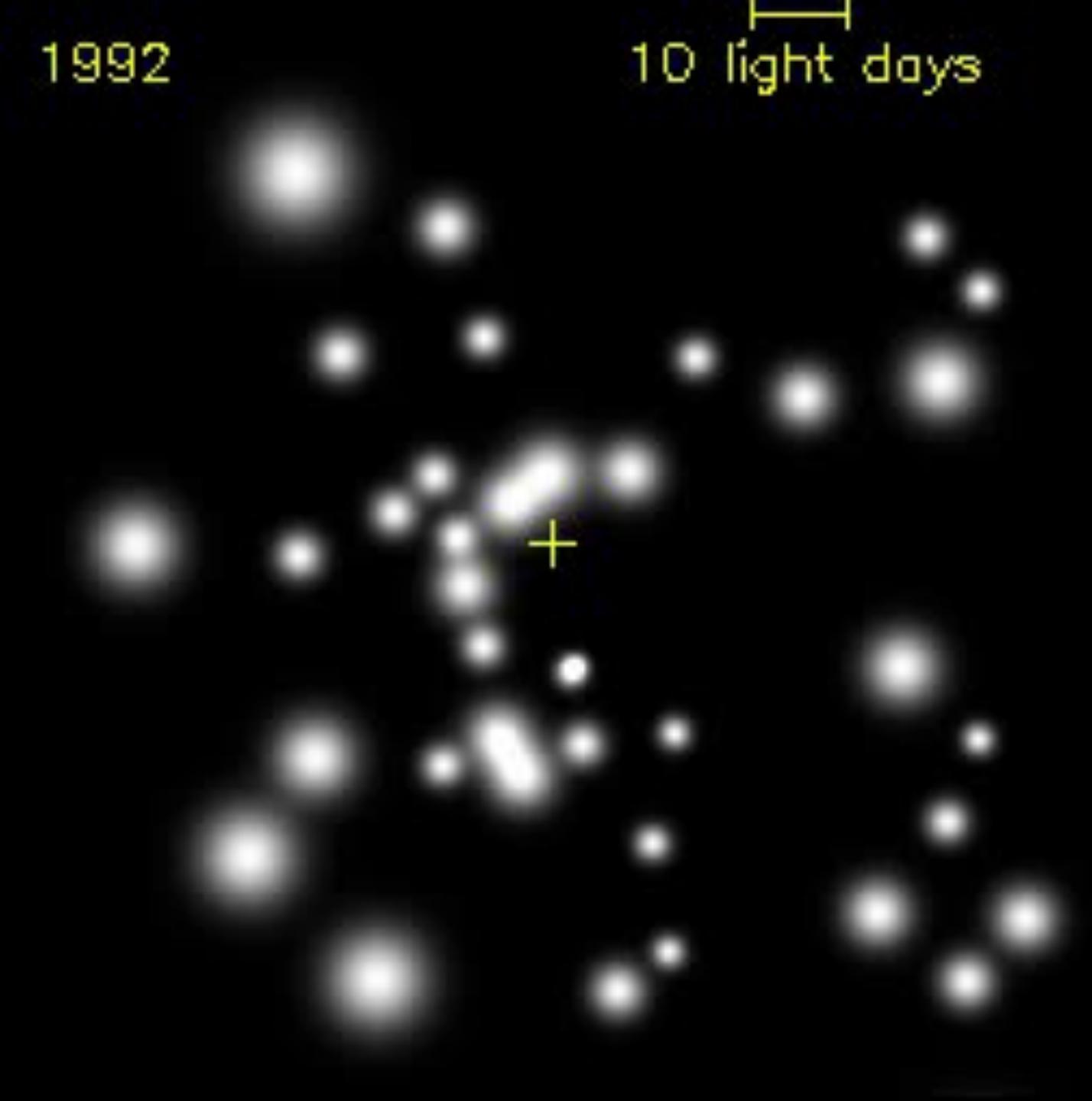
Muchas gracias por su atención

Superficie incompleta



1992

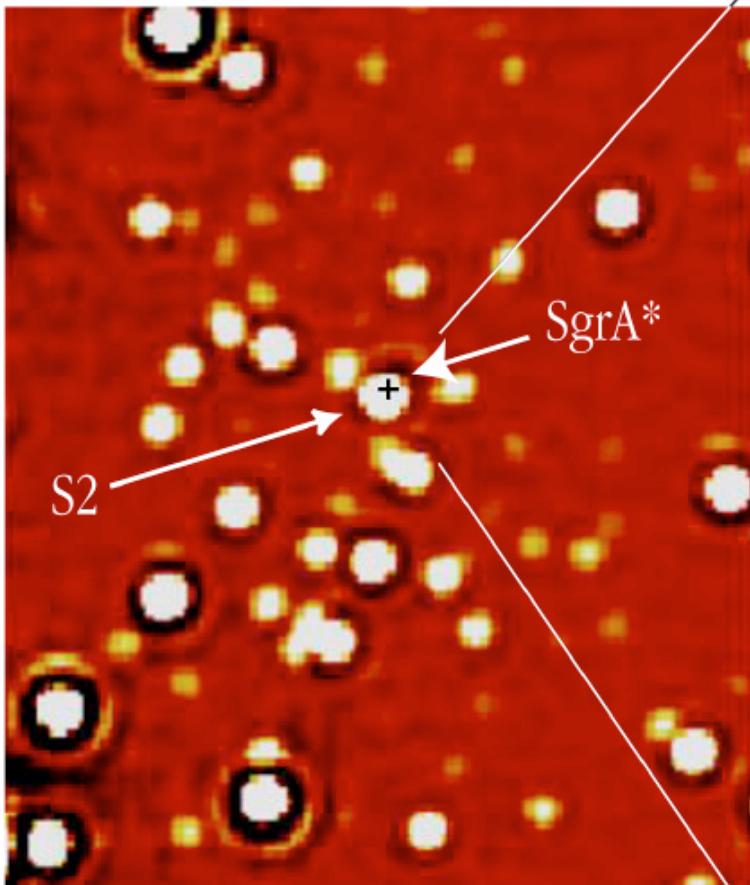
10 light days



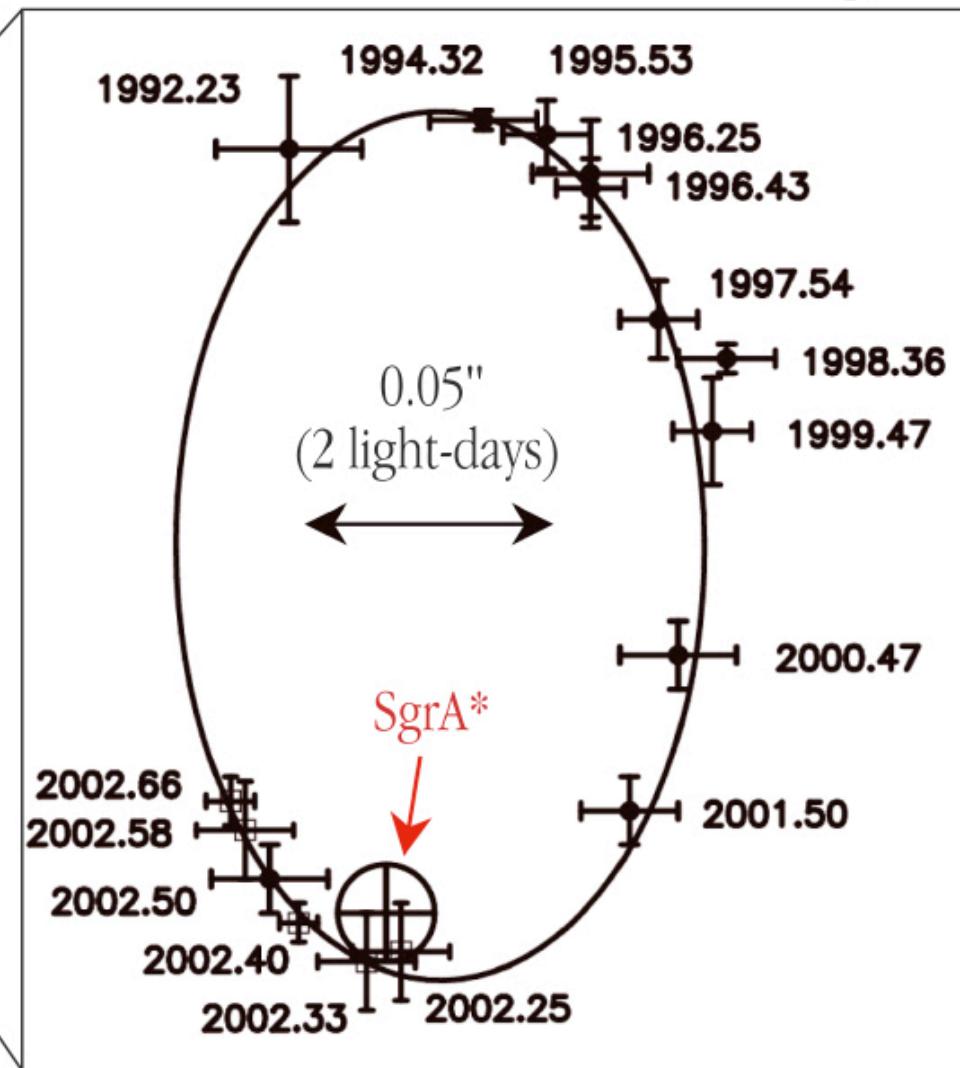
En busca de la sombra...

- Se espera que el hoyo negro en el centro de nuestra Galaxia produzca una “sombra” que podría detectarse en el futuro cercano...

NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*



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



SMTO



SEST



PLATEAU DE BURE / PICO VELETA



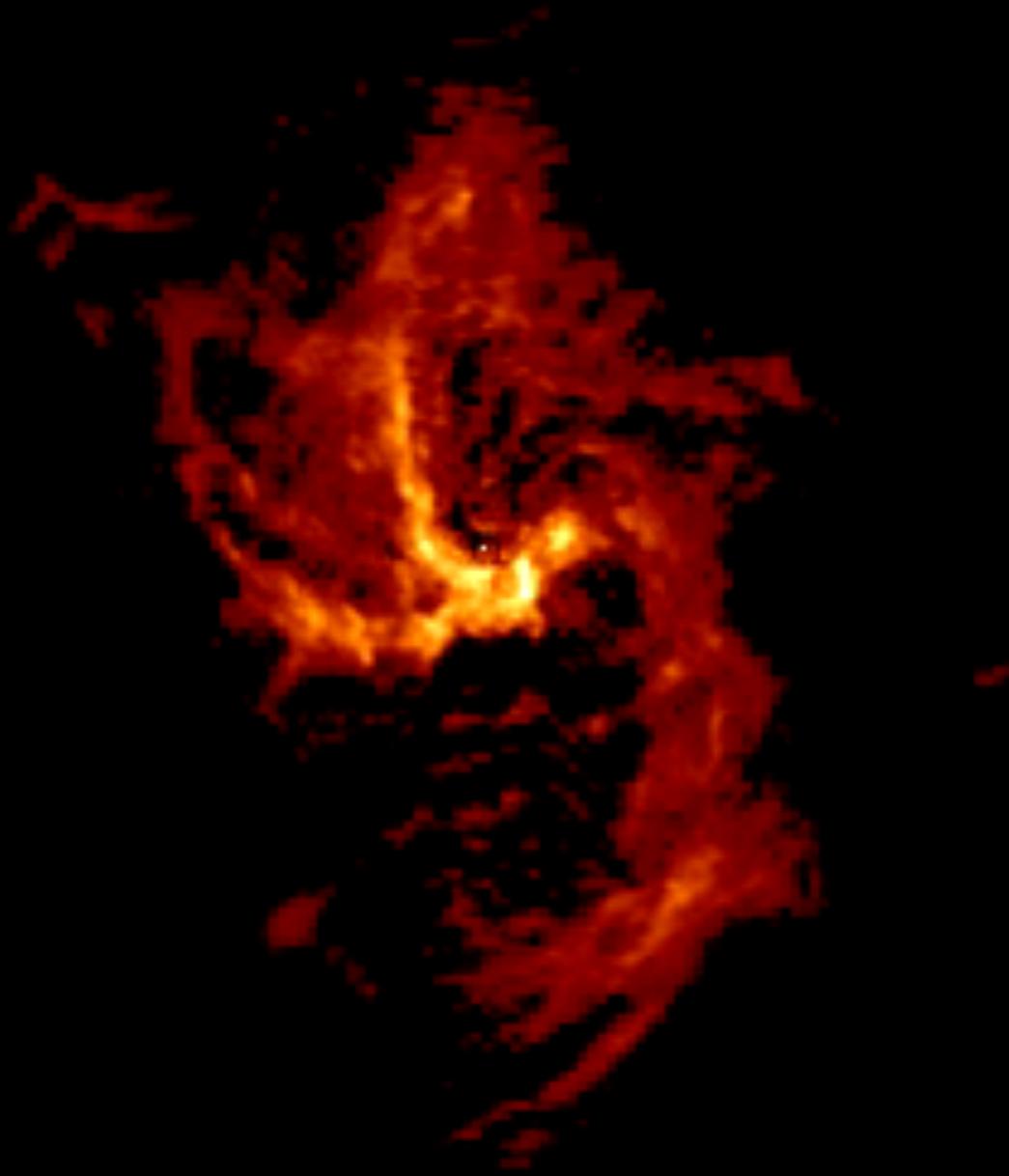
ONSALA

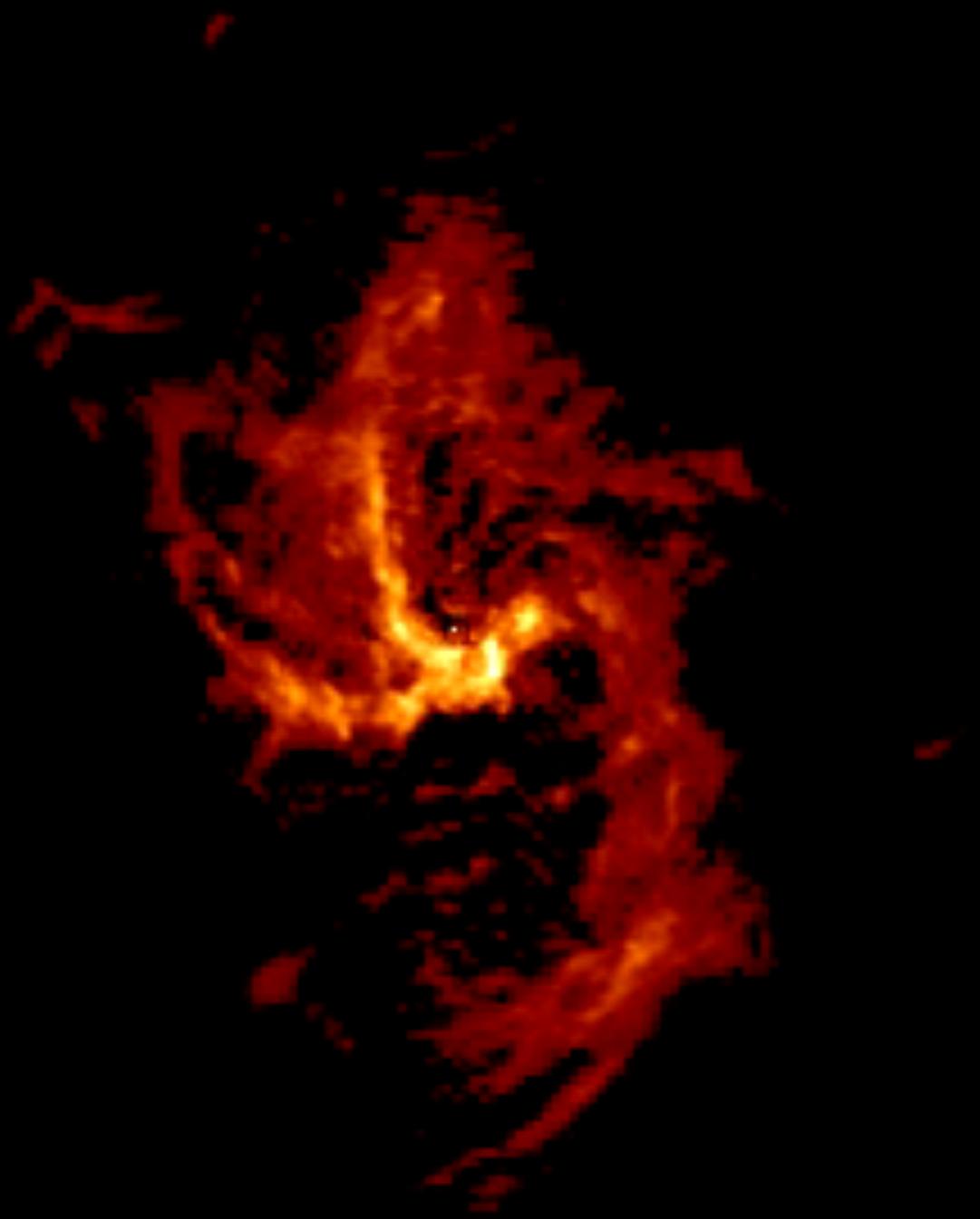


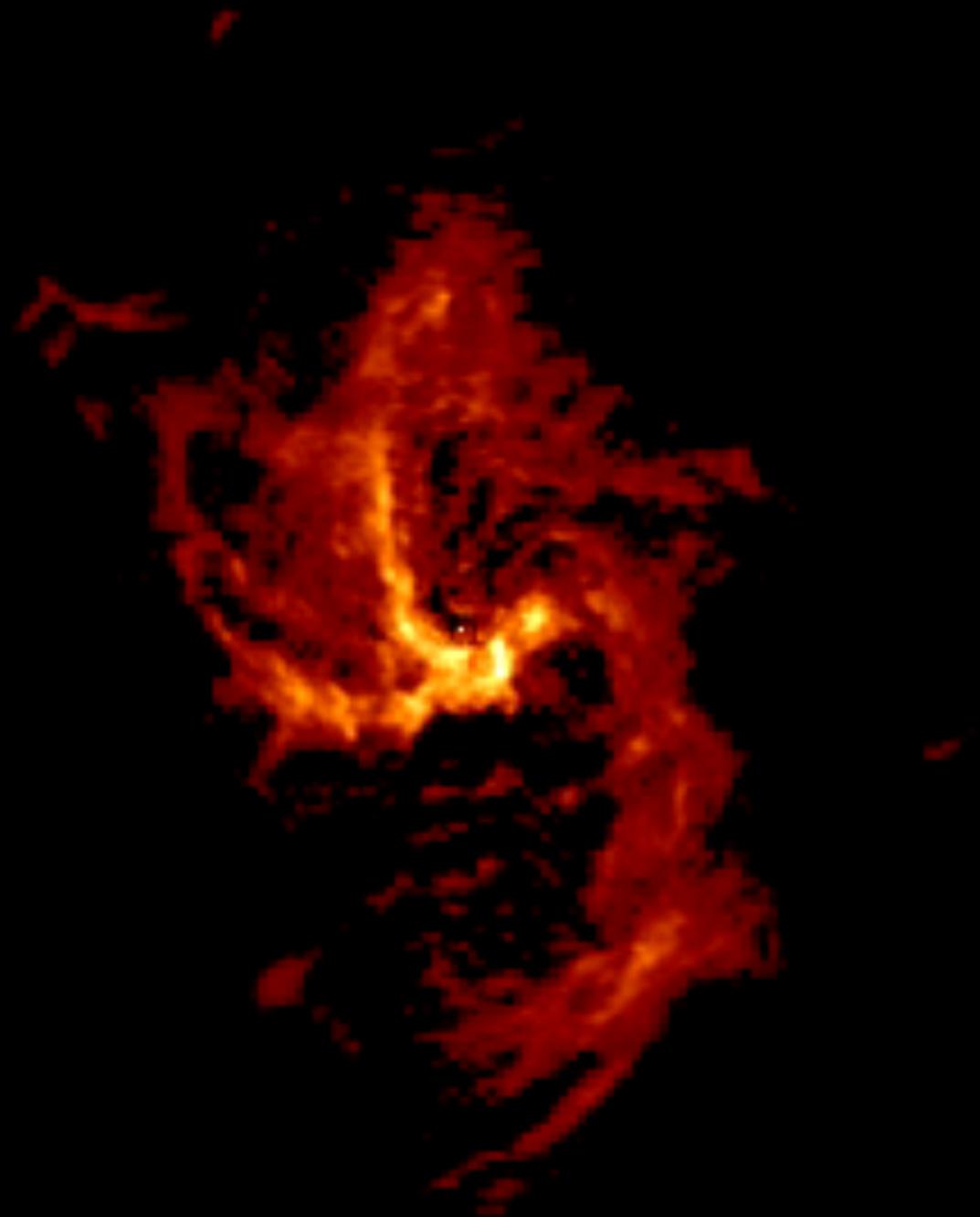
METSÄHOVI
EFFELSBERG



Melia et al.







Otra posibilidad...

- Detectar la ruptura de una estrella que pase cerca del hoyo negro por las fuerzas de marea que se producen...



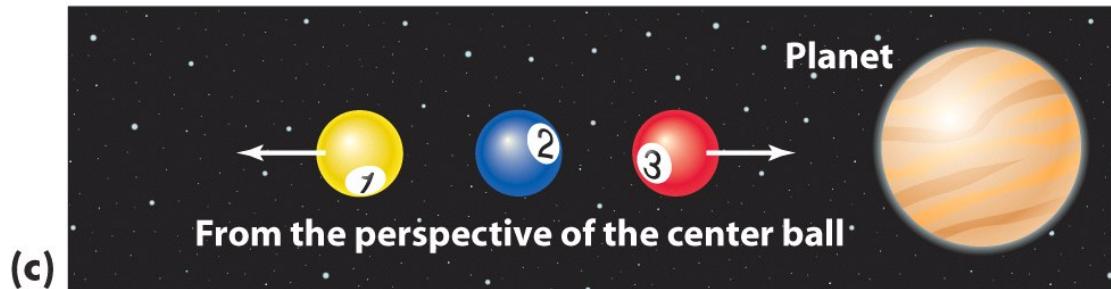
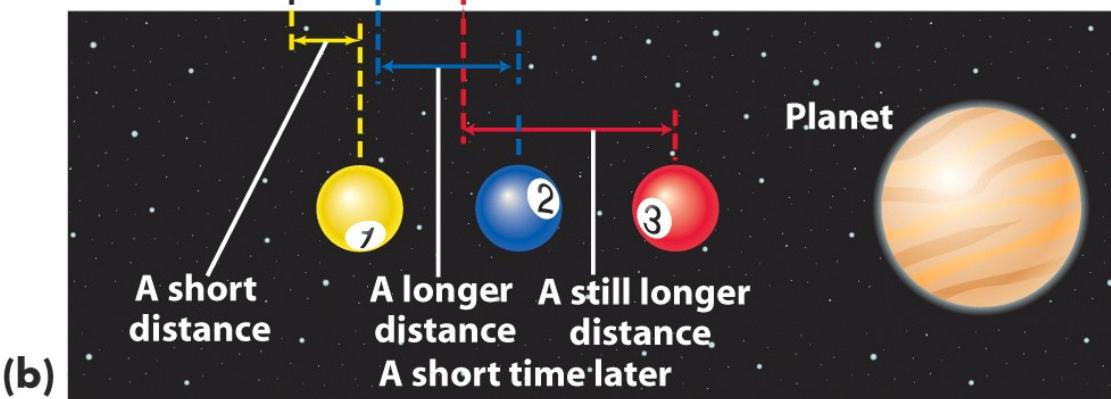
Pregunta:

- ¿Porqué las fuerzas de marea pueden romper a un cuerpo?

Pregunta:

- ¿Porqué las fuerzas de marea pueden romper a un cuerpo?
- Porque se produce una fuerza mas fuerte en la parte del cuerpo cercana al hoyo negro que en la parte lejana y esto “estira” al cuerpo.

Explicación de la fuerza de marea

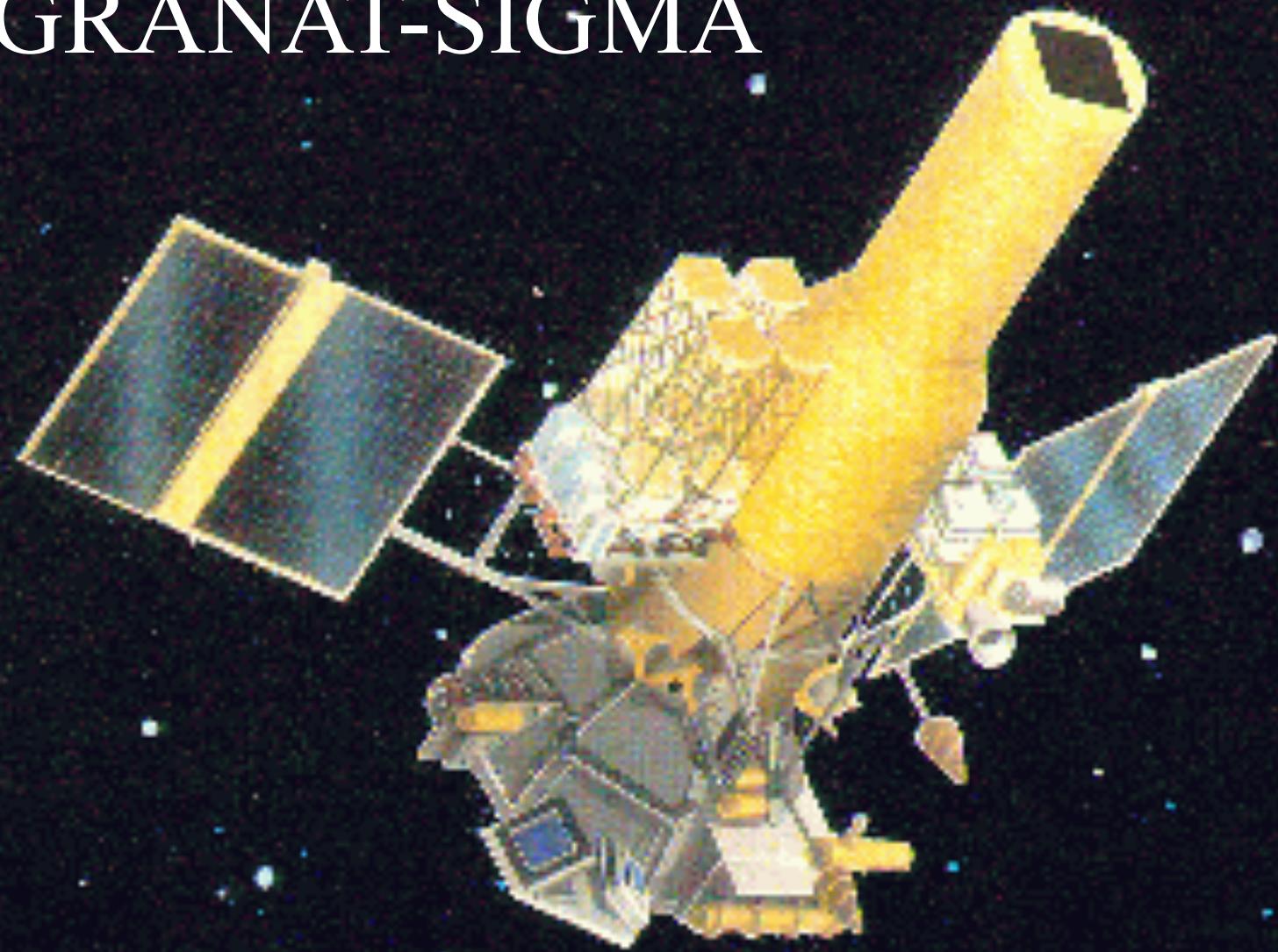


Cinco preguntas
sobre hoyos negros.

¿Qué tan similar es la Física alrededor de los hoyos negros de masa estelar y de los hoyos negros supermasivos?



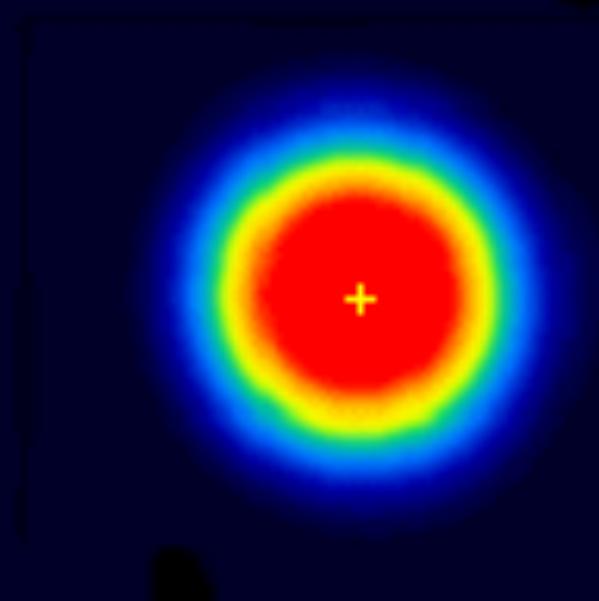
GRANAT-SIGMA



Very Large Array

Nuevo Mexico, EUA

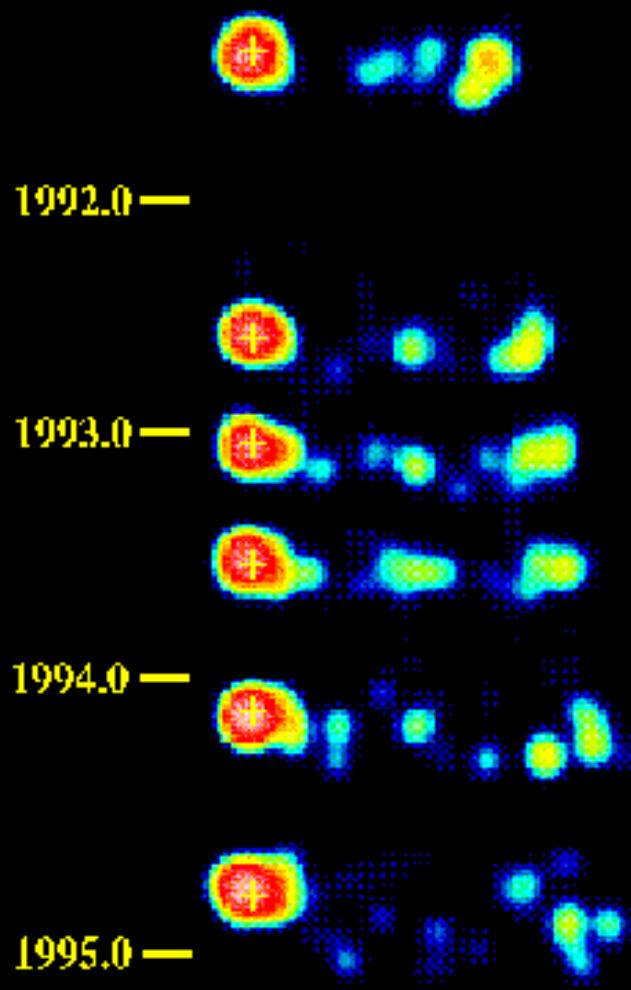




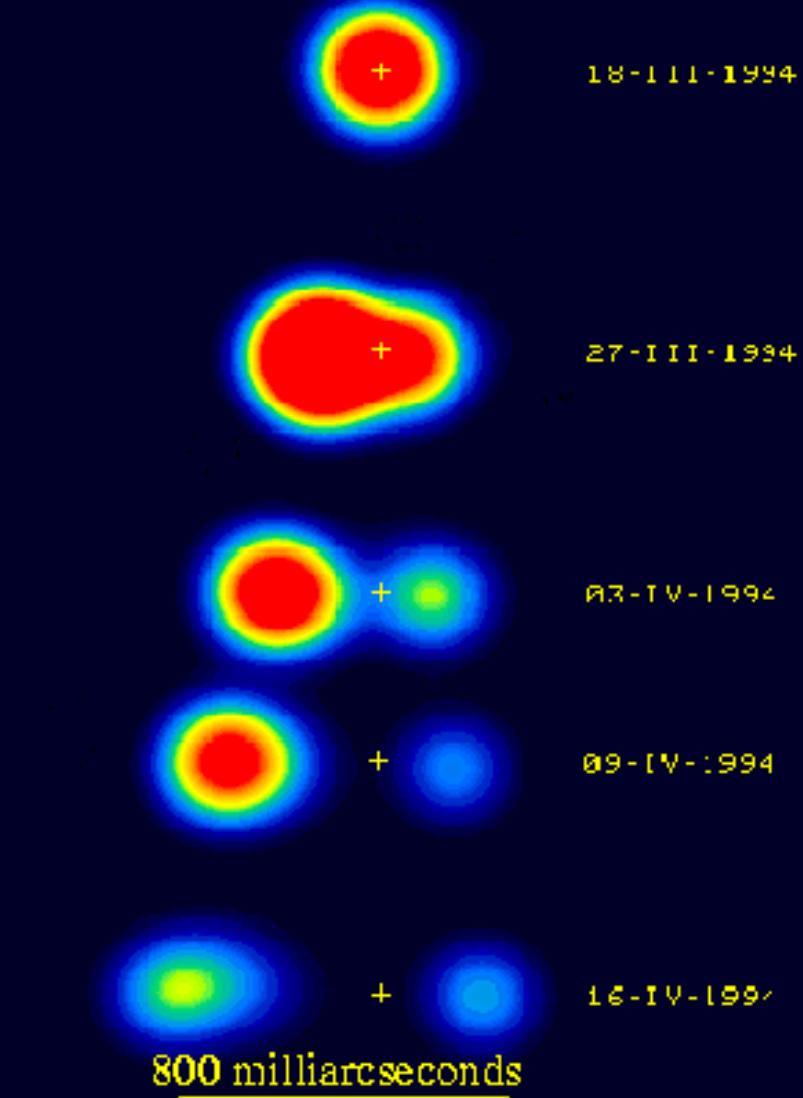
18 - III - 1994

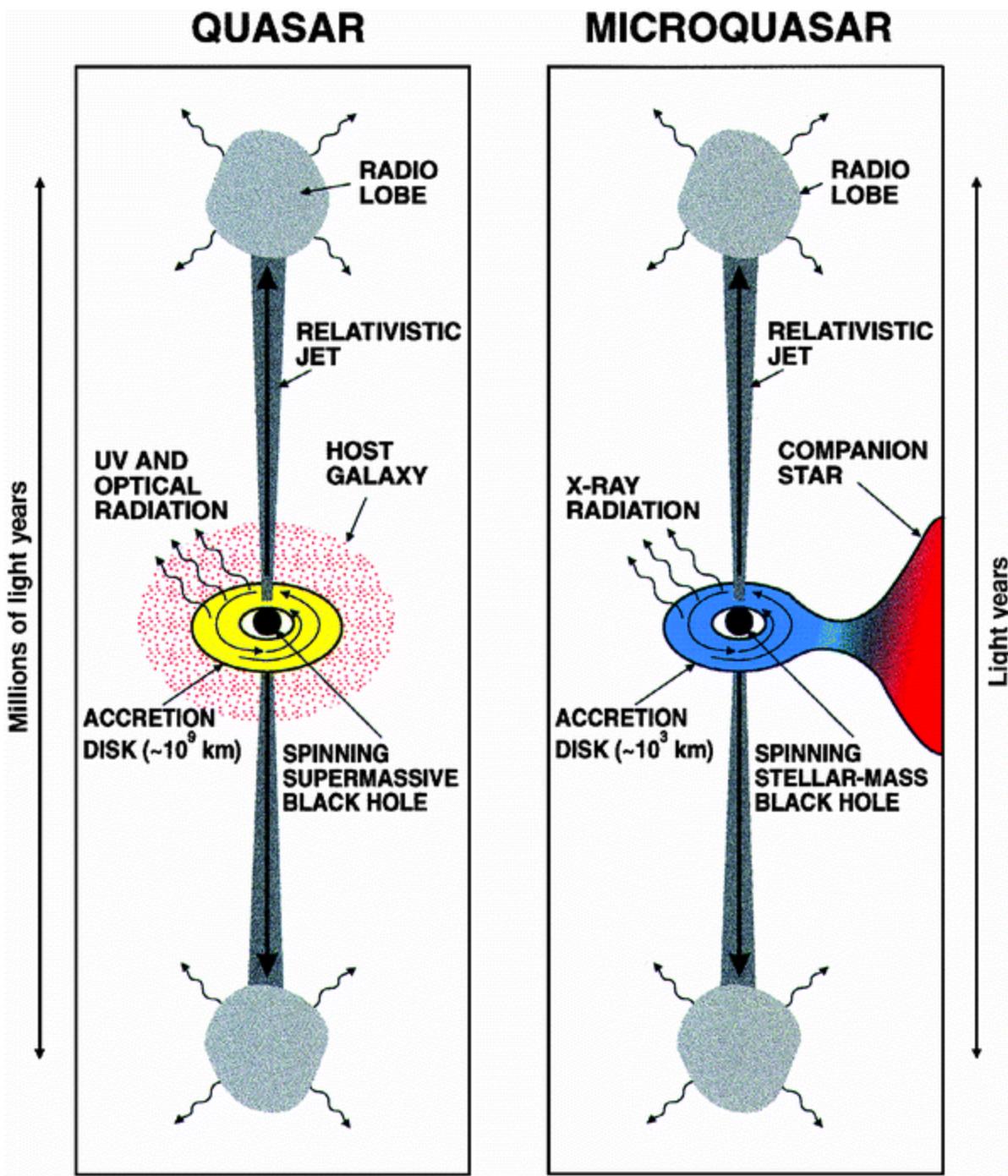
SUPERLUMINAL MOTIONS

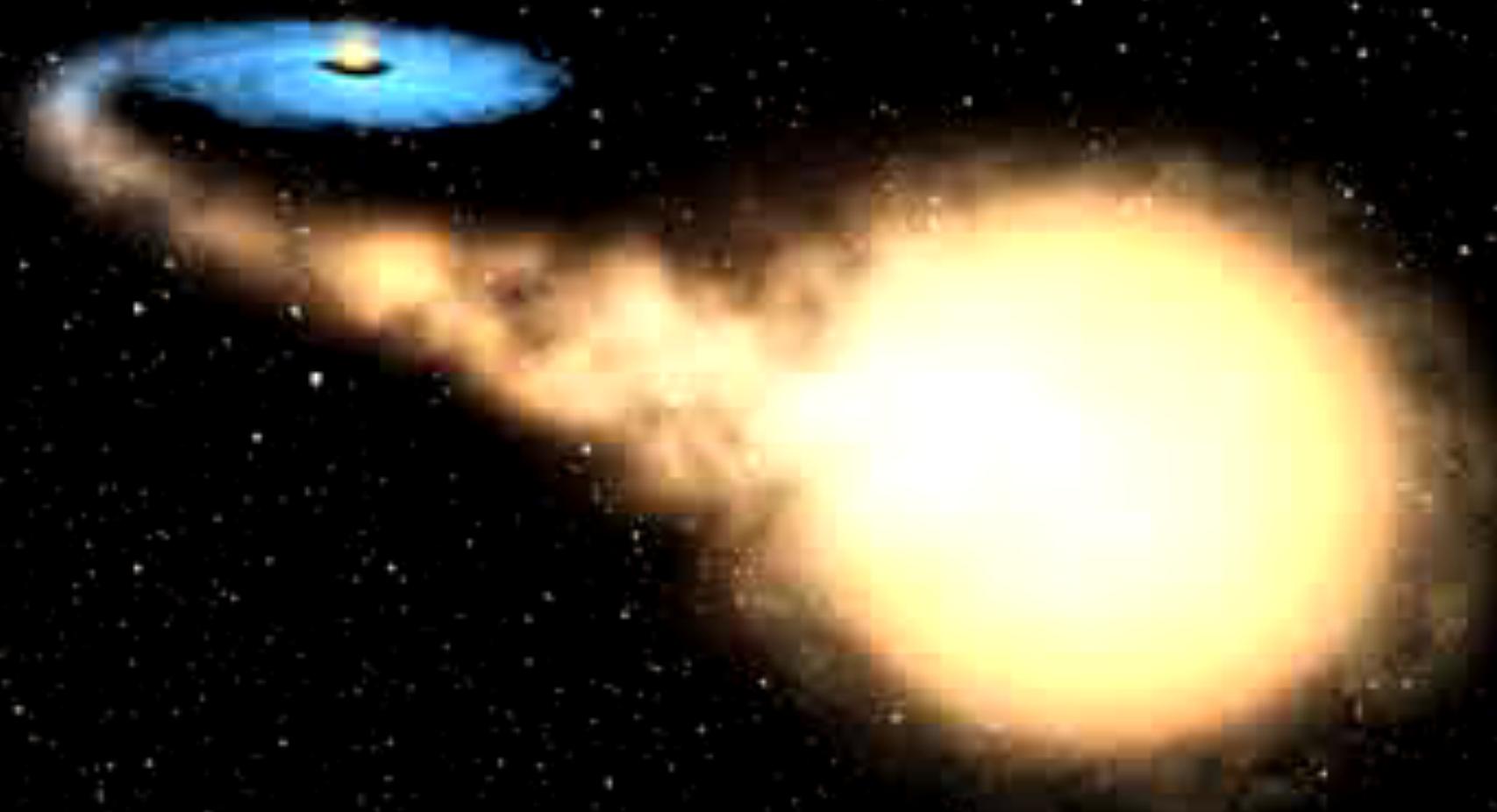
QUASAR 3C279



MICROQUASAR GRS 1915+105







Formación de chorros relativistas

Evidencia del “horizonte” del hoyo negro

Búsqueda de hoyos negros de masa intermedia

Gravitación Cuántica

Muchas gracias por su atención



Rev. George Coyne S.J.
Director of Vatican Observatory

Para mí, la ciencia y la religión son empresas humanas totalmente separadas. La ciencia es completamente neutral en cuanto a que se puedan alcanzar resultados científicos que apoyen o refuten la existencia de Dios.



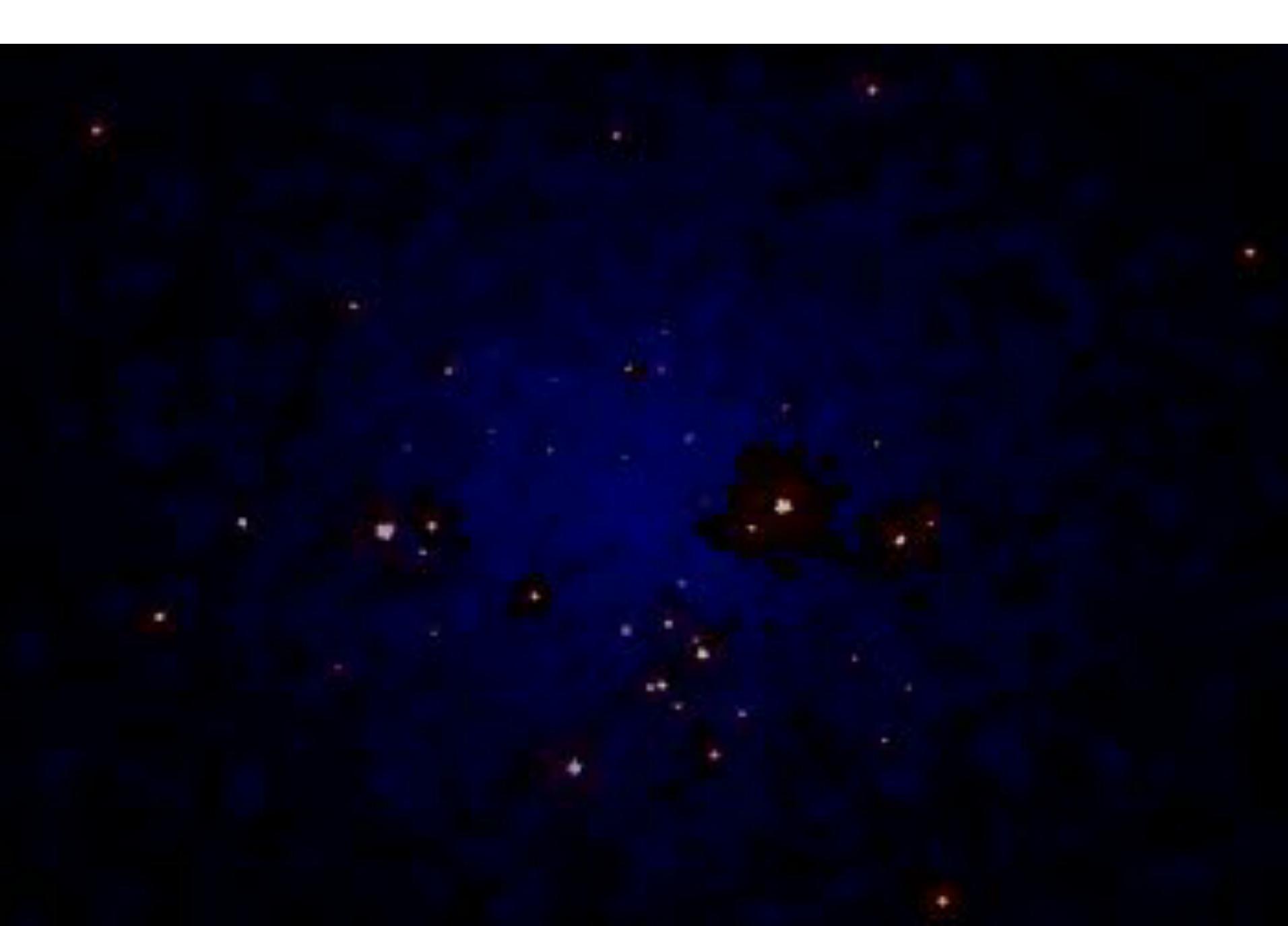
Rev. George Coyne S.J.
Director of Vatican Observatory

I distinguish, and will continue to do so, that science and religion are totally separate human pursuits. Science is completely neutral with respect to theistic or atheistic implications which may be drawn from scientific results.

Muchas gracias por su atención

¿Cómo se forman los hoyos negros supermasivos?

¿Porqué las masas de los hoyos negros parecen ser o bien estelares o bien supermasivas? ¿Hay hoyos negros de masa intermedia?

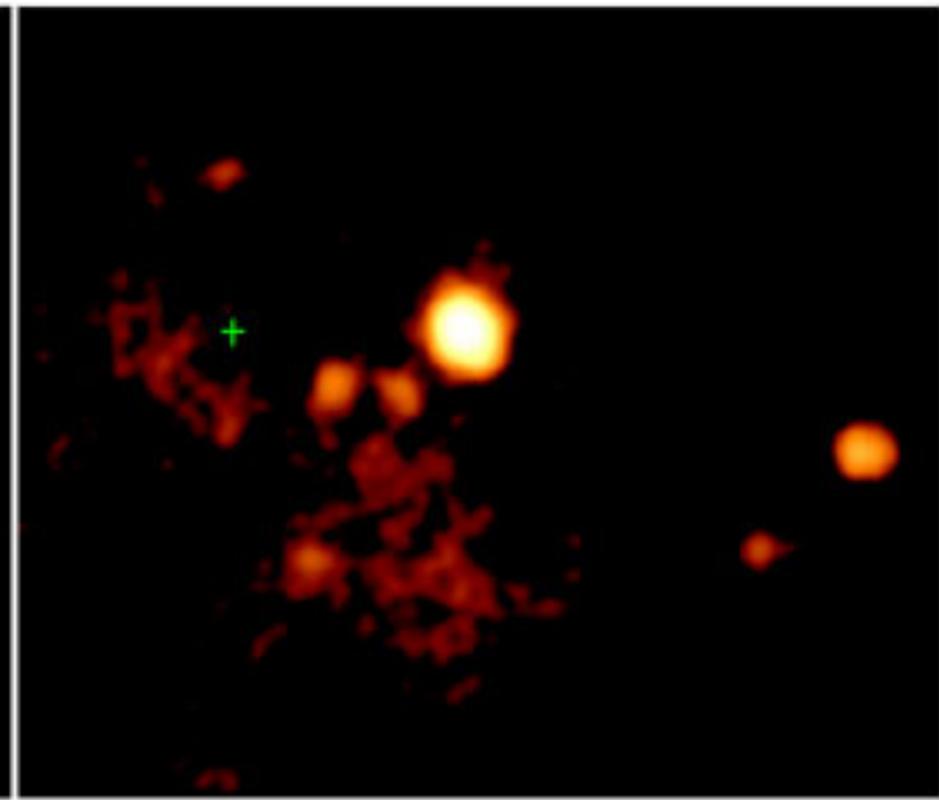
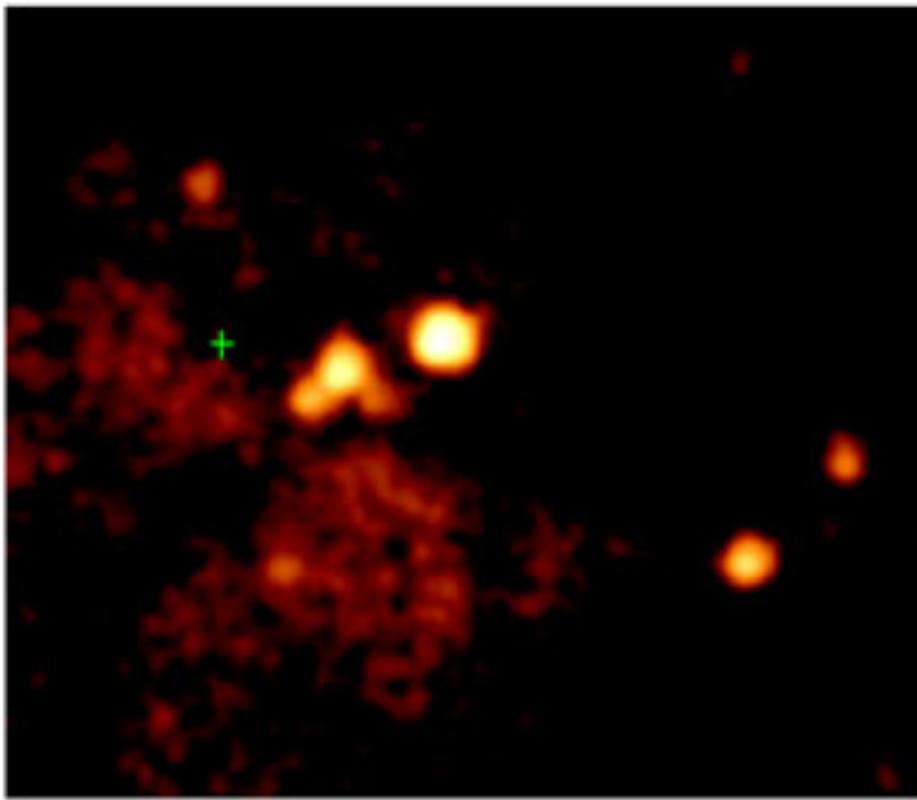


¿Hoyos negros de masa intermedia?



Satélite Chandra





¿HAY HOYOS
NEGROS CERCA DE
NOSOTROS?

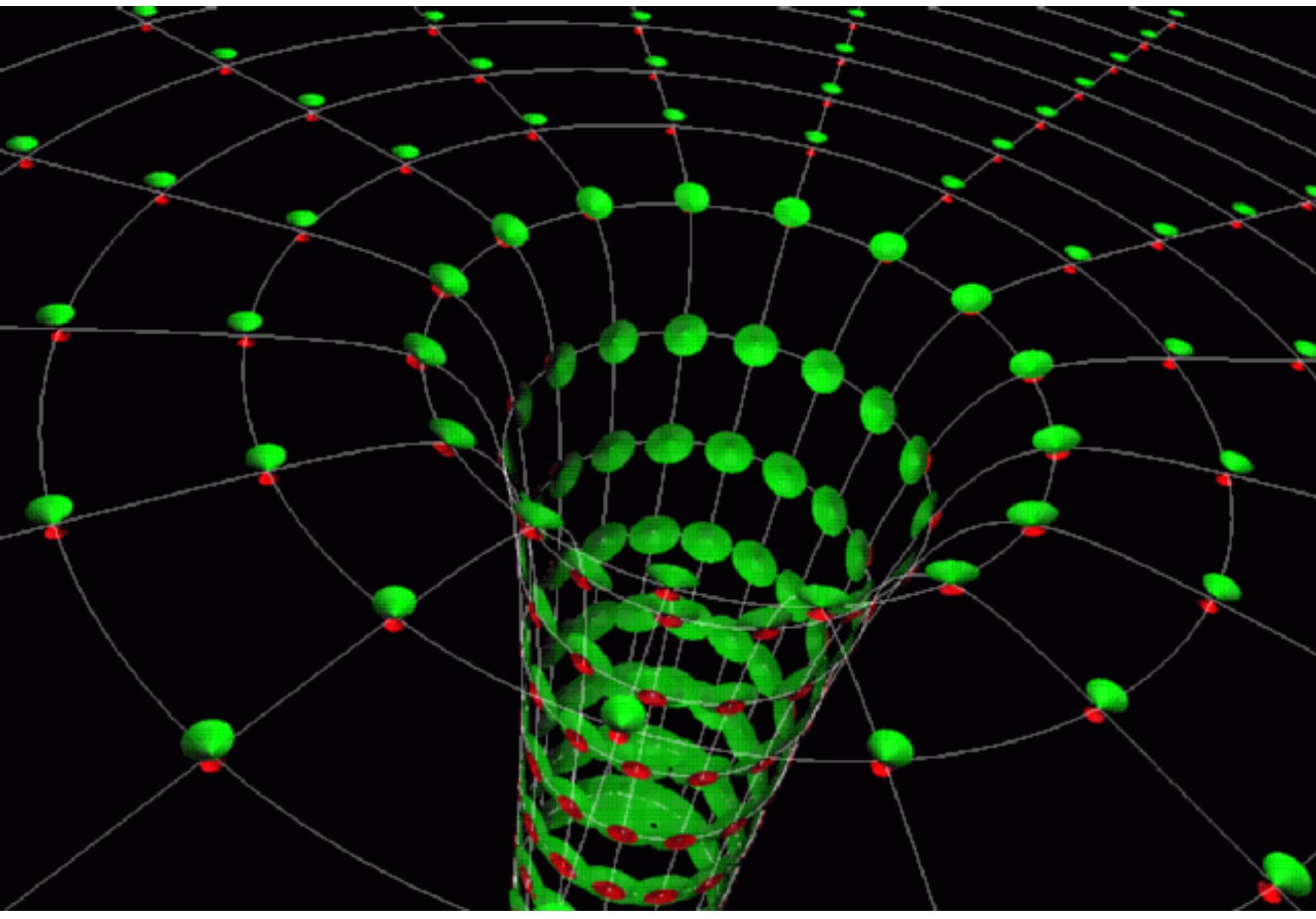
Motion of the black hole and the Sun about the Galactic centre for the last 230 Million years

I. Rodrigues & I.F. Mirabel

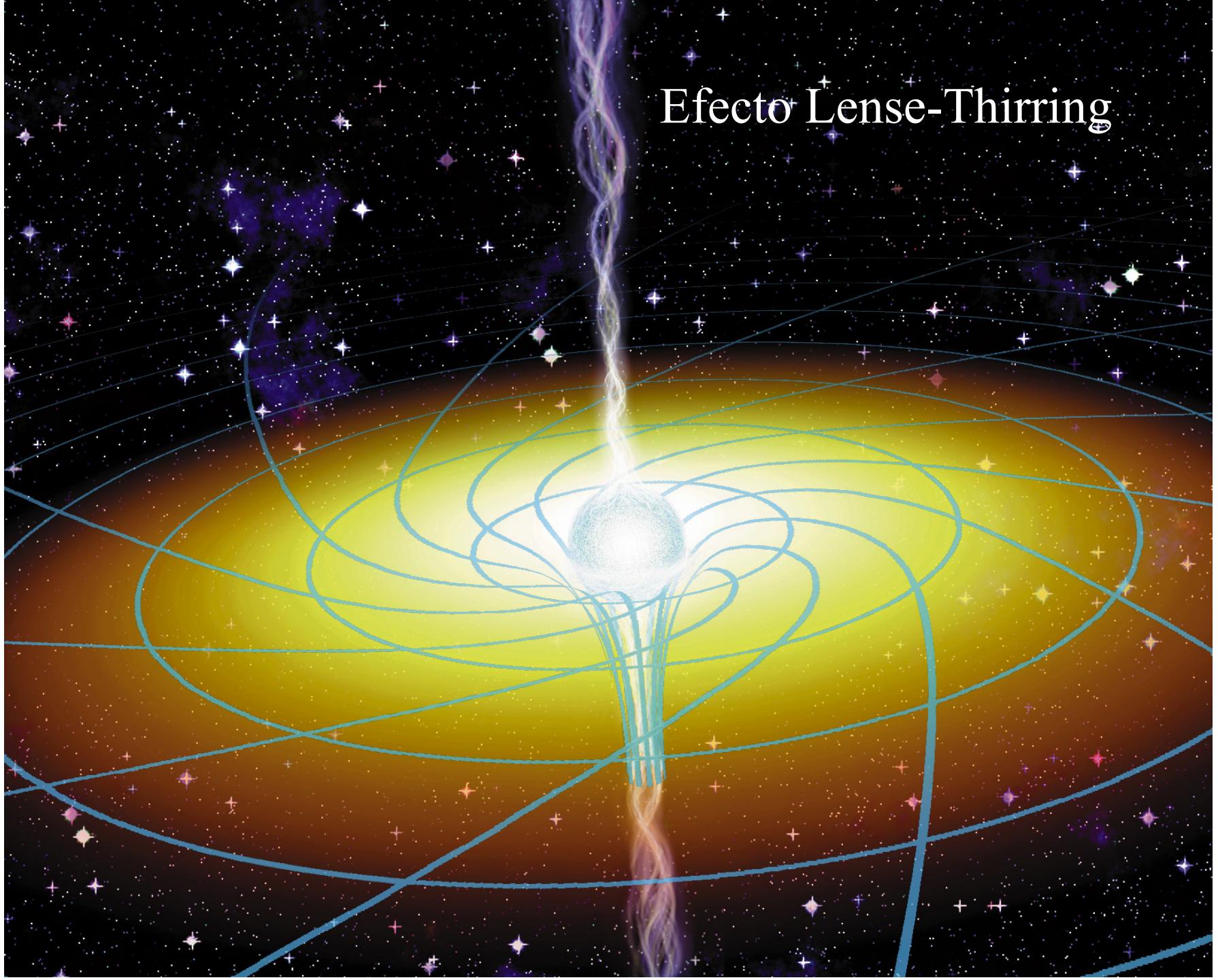
Motion of the black hole and the Sun about the Galactic centre for the last 230 Million years

I. Rodrigues & I.F. Mirabel

¿Qué pasa cerca y
adentro de un
hoyo negro?



Efecto Lense-Thirring



SINGULARIDAD

LA DISTANCIA
A LA SINGULARIDAD
SIEMPRE DISMINUYE

ESPACIO

TIEMPO

EL TIEMPO AVANZA
SIEMPRE PARA
ADELANTE

ESPACIO

TIEMPO

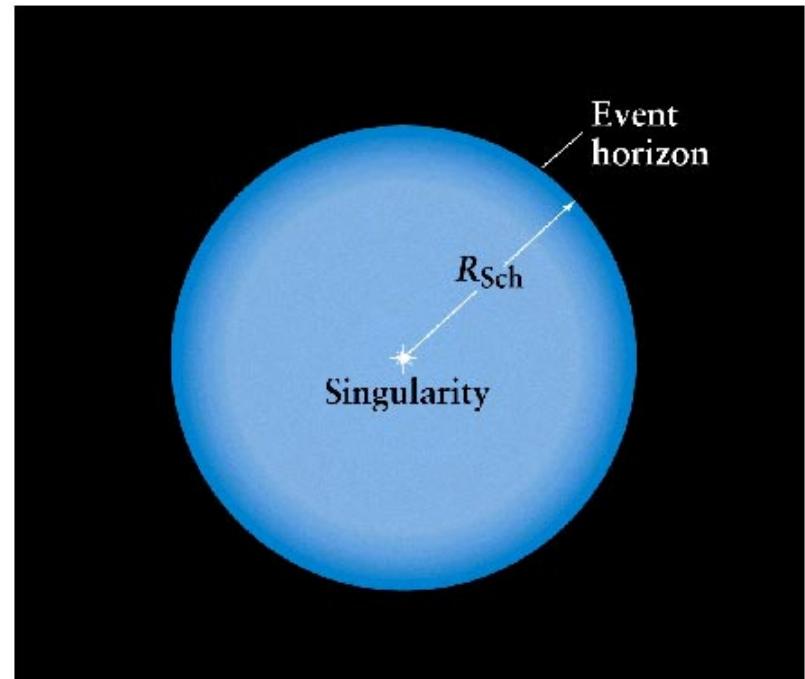
RADIO DE
SCHWARSZCHILD

¿Túneles a otros
puntos del
espacio-tiempo?



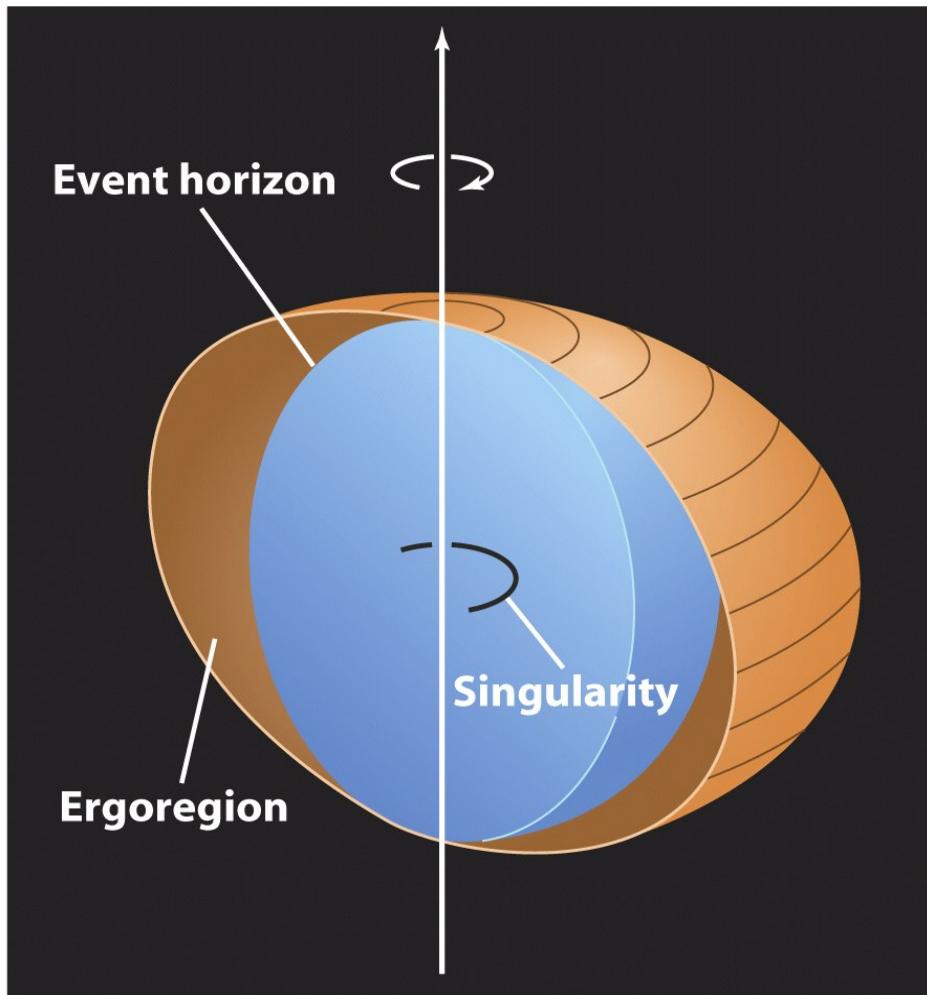
Un hoyo negro sin rotación sólo tiene un “centro” y una “superficie”

- El hoyo negro está rodeado por el *horizonte de eventos* el cual es una superficie esférica de la cual ni la luz puede escapar
- La distancia entre el hoyo negro y el horizonte de eventos es el *radio de Schwarzschild* ($R_{\text{Sch}} = 2GM/c^2$)
- El centro del hoyo negro es un punto de densidad infinita y volumen cero, llamado *singularidad*

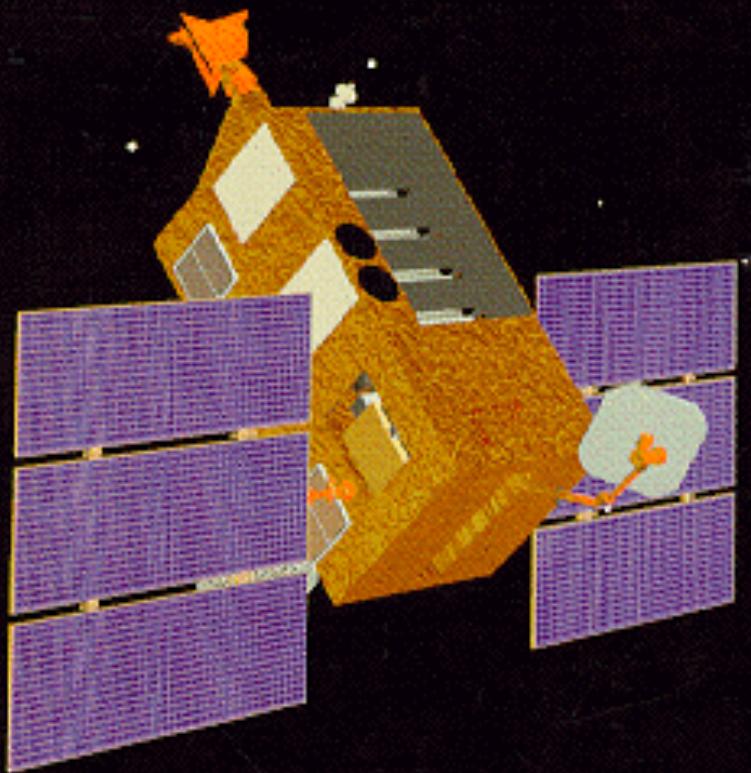


Hoyos negros con rotación

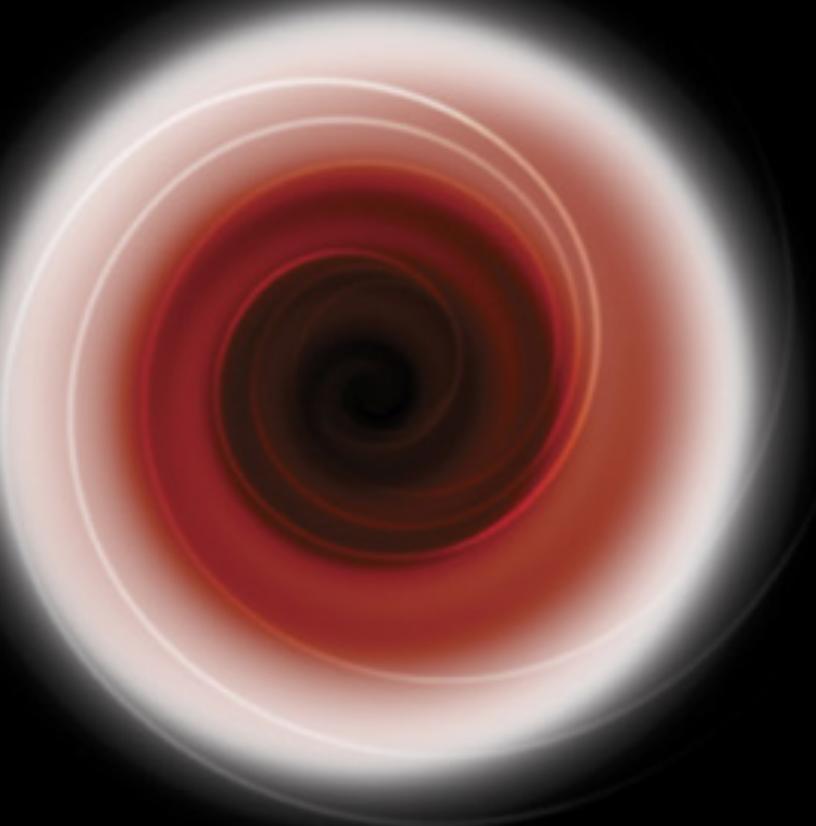
- Un hoyo negro con rotación (o sea con momento angular) tiene una ergosfera afuera del horizonte de eventos
- En la ergoregión, el espacio y el tiempo son arrastrados por la rotación del hoyo negro



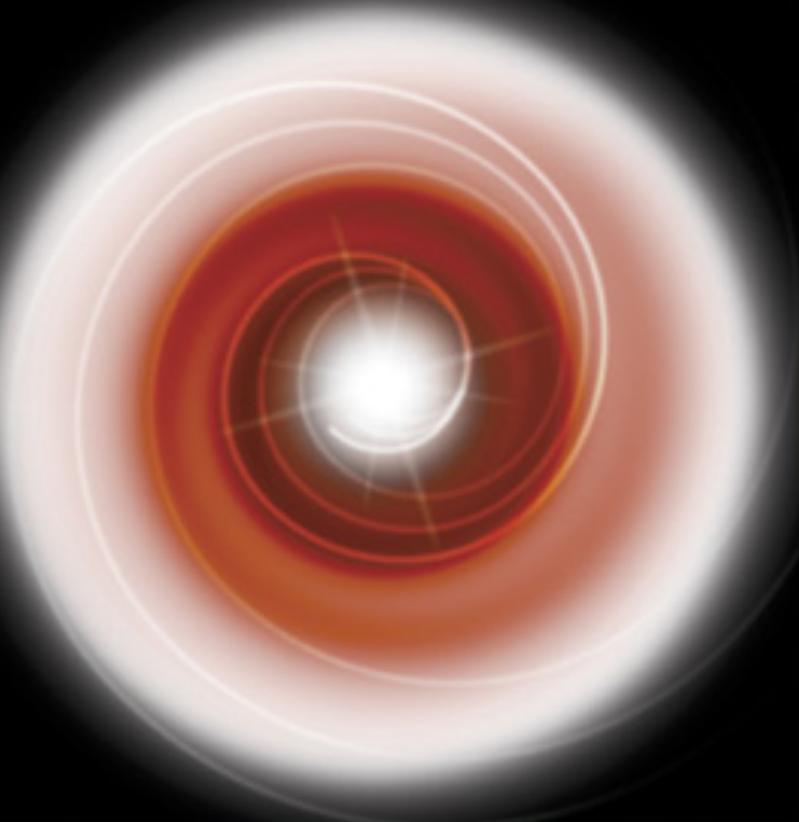
¿Cómo podemos
estar seguros de que
estos objetos son
hoyos negros?



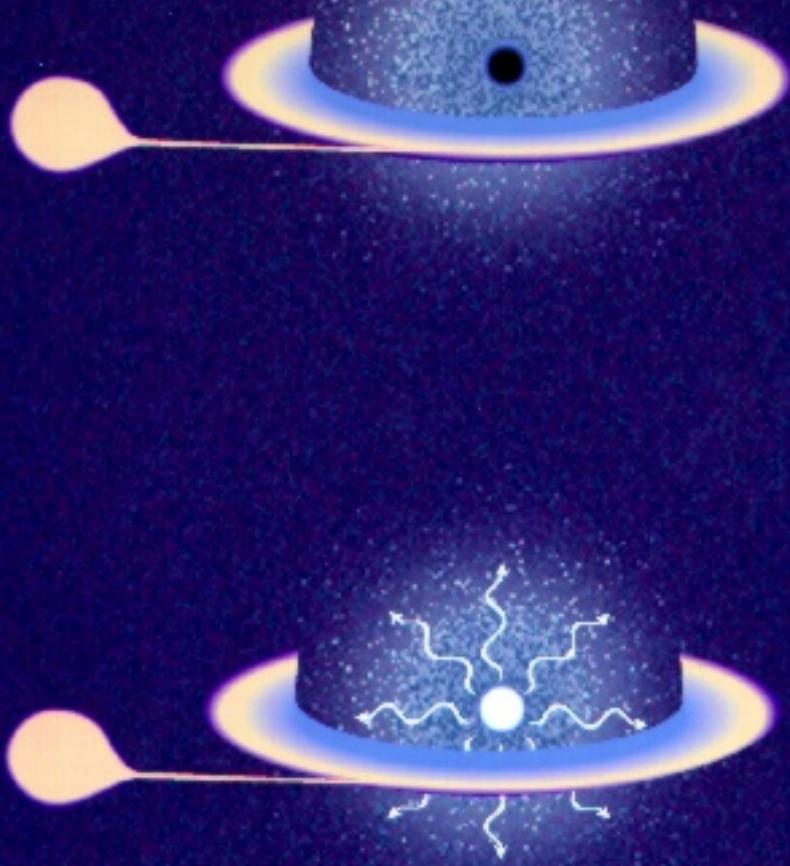
Black Hole X-ray Nova



Neutron Star X-ray Nova



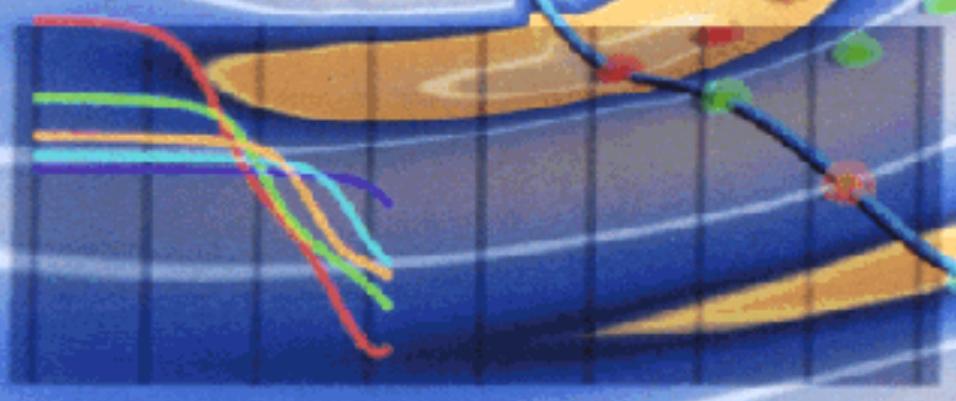
Black Hole X-Ray Nova



Neutron Star X-Ray Nova

39 M

zer2 detectors

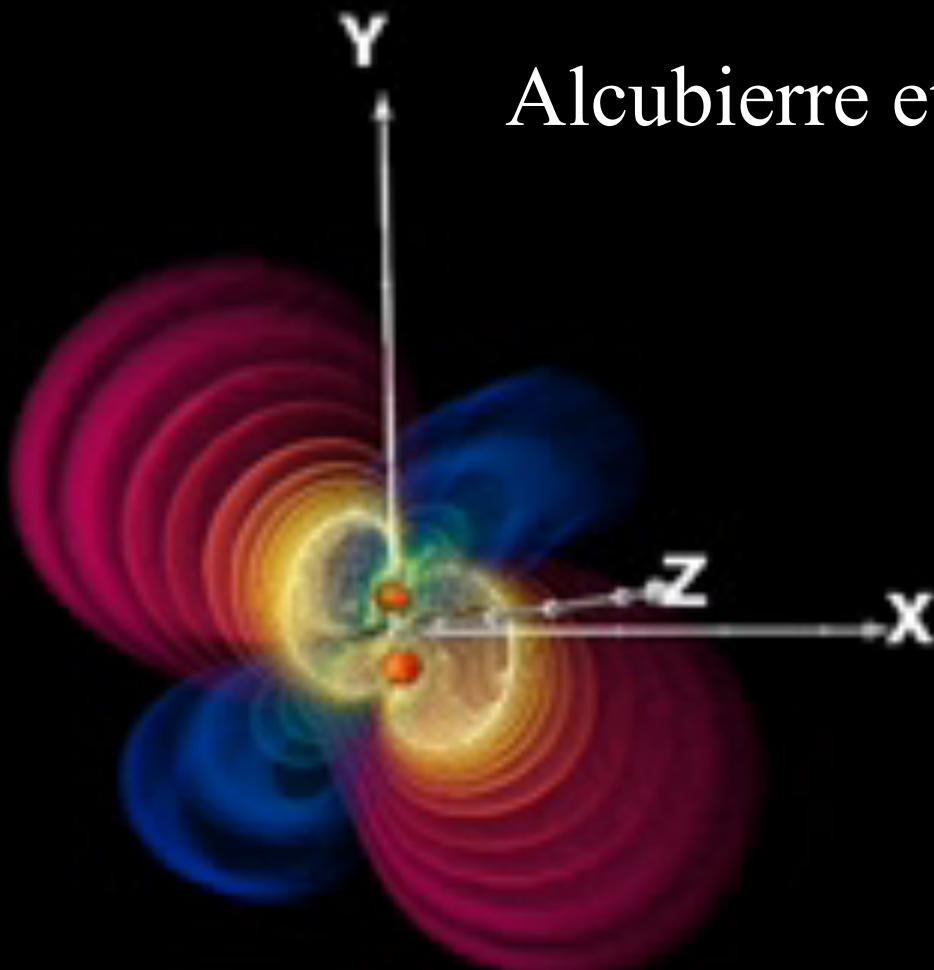


zer2

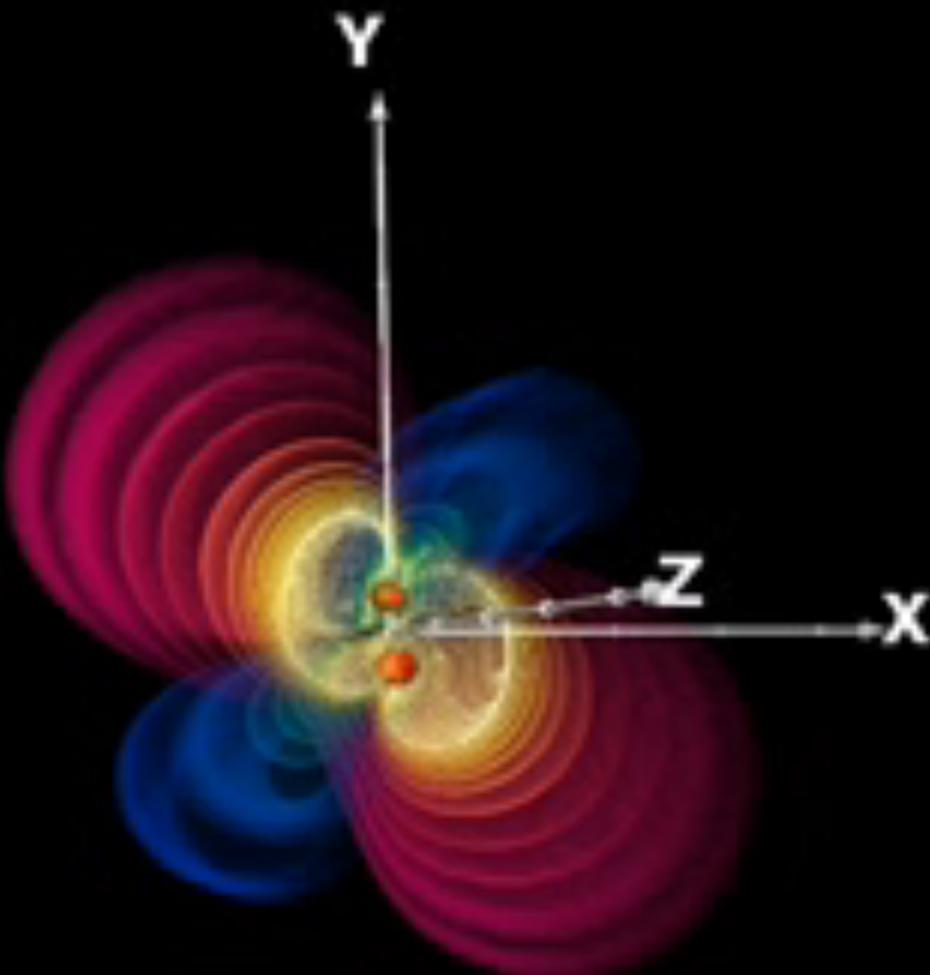


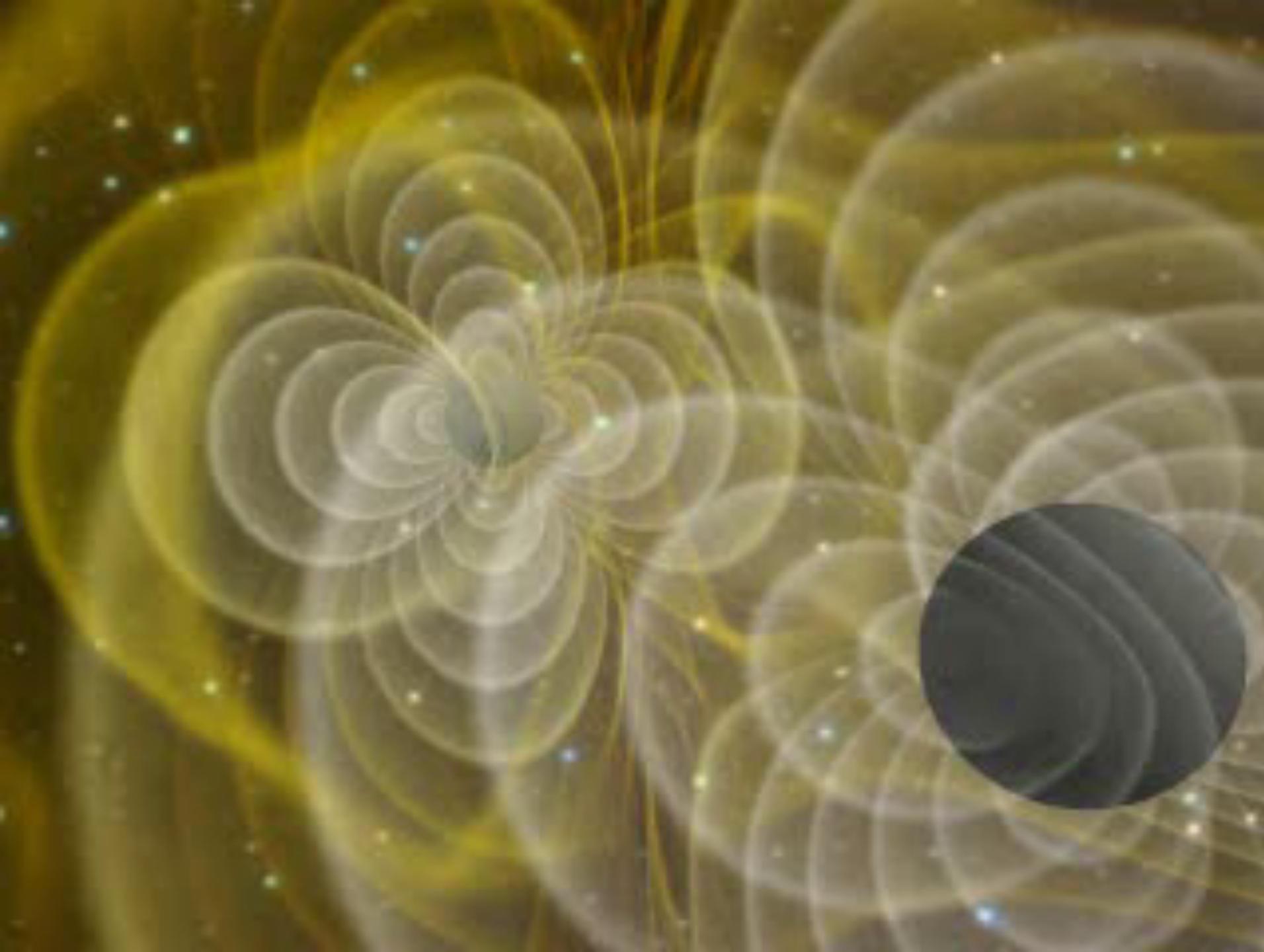
$T = 0.0$

Alcubierre et al.



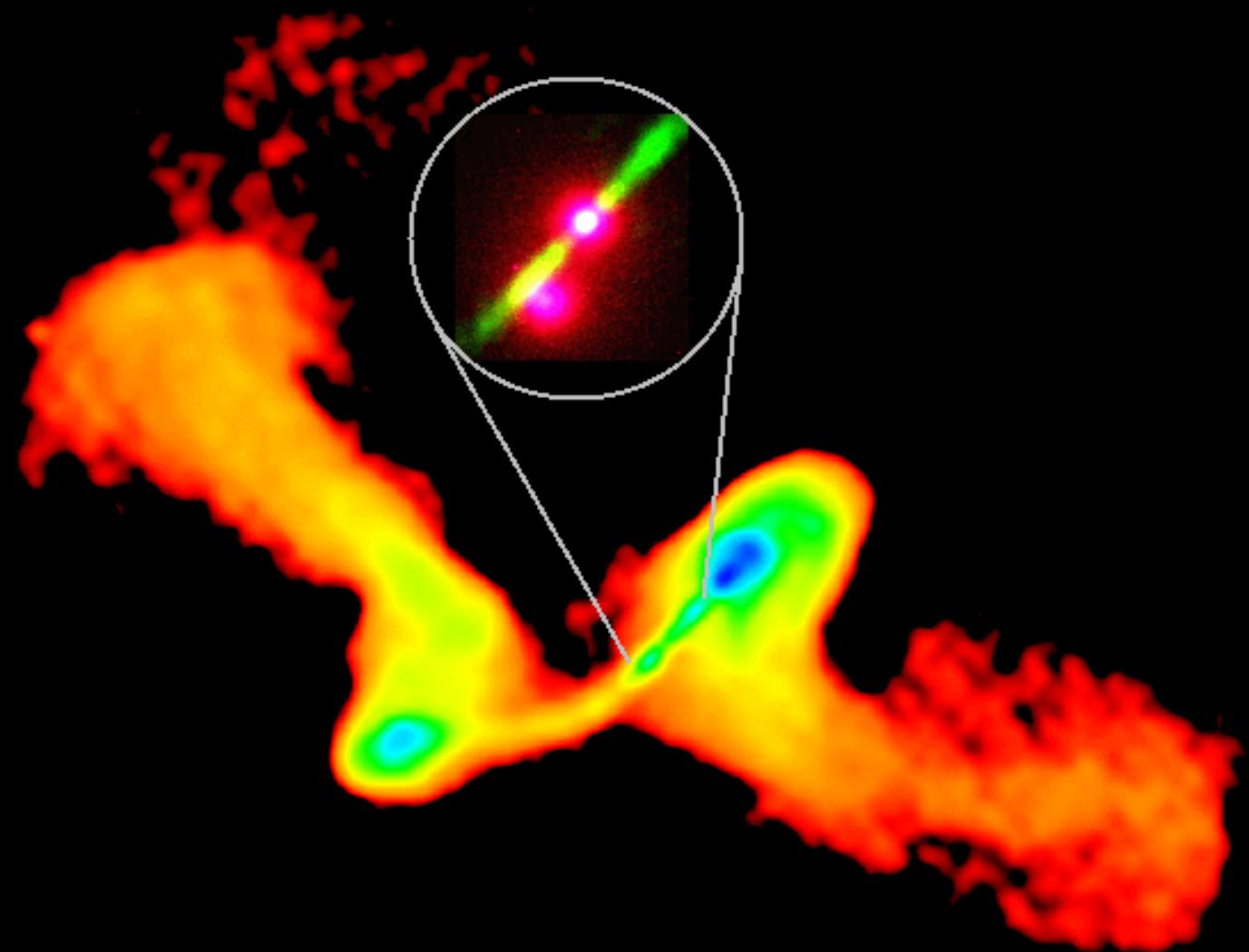
$T = 0.0$

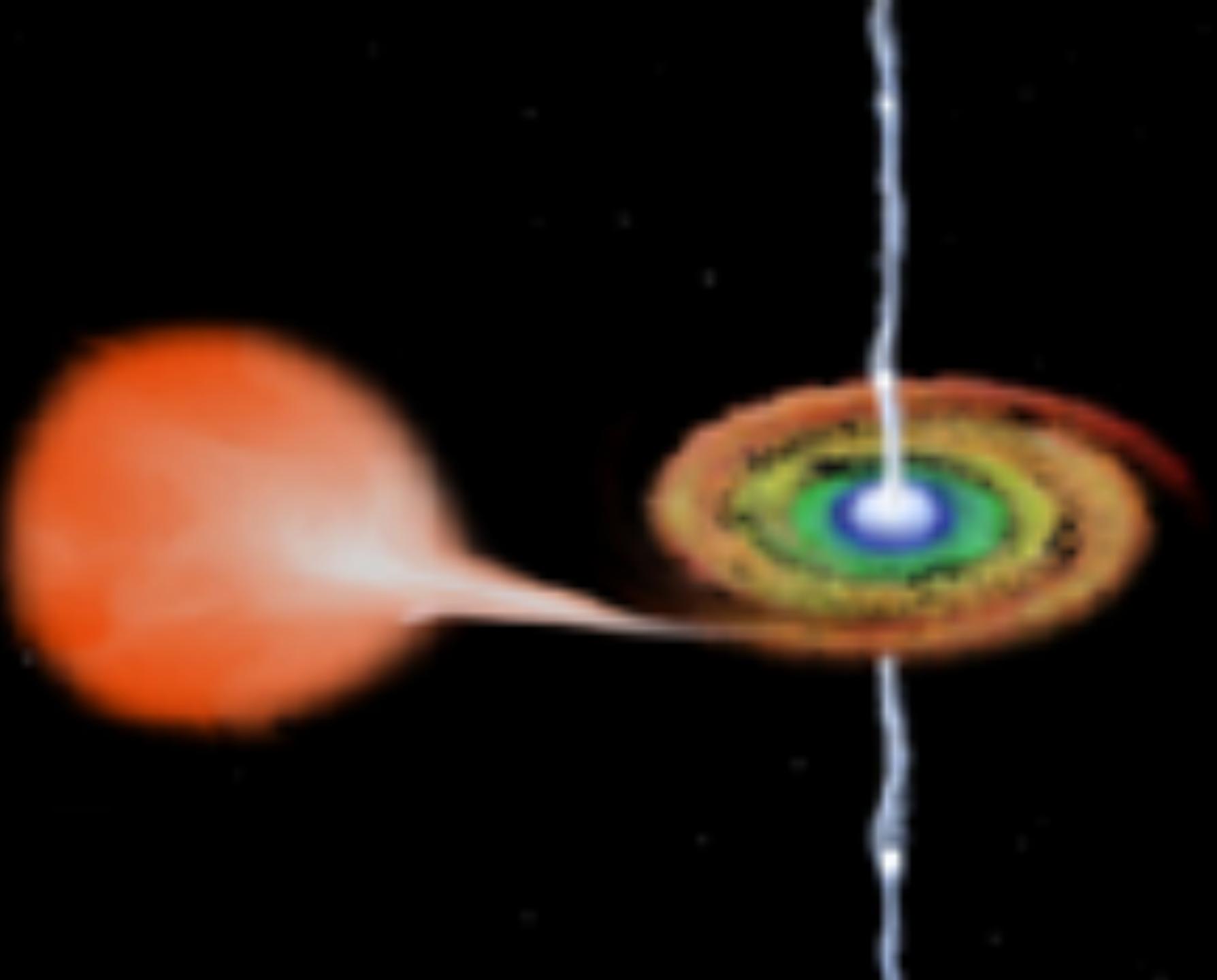




Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory = LIGO







Formación de chorros relativistas

Evidencia del “horizonte” del hoyo negro

Búsqueda de hoyos negros de masa intermedia

Gravitación Cuántica