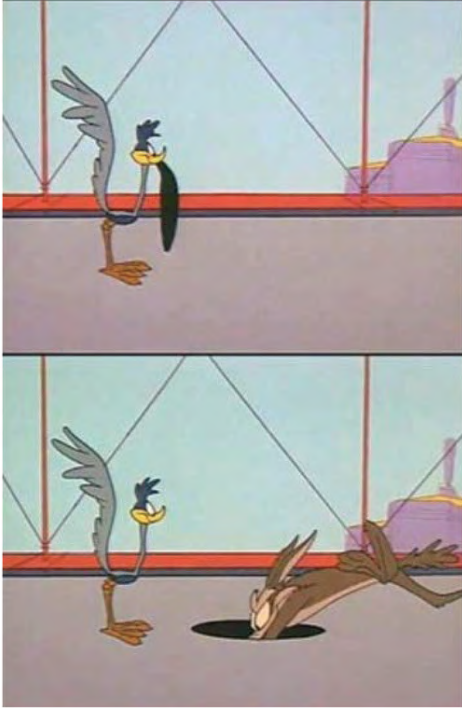


Agujeros negros: los límites del tiempo y el espacio



© Warner Brothers

Eduardo Ros (MPI für Radioastronomie)

Parque de las Ciencias, Granada

10 de Octubre de 2018

Agujeros negros: los límites del tiempo y el espacio



Eduardo Ros (MPI für Radioastronomie)

Parque de las Ciencias, Granada

10 de Octubre de 2018

© Warner Brothers





A.L. Cauchy
(1789-1857)

¿Qué es un agujero negro?

- Un agujero negro es cada parte conexa en la superficie de Cauchy S del complementario en S del pasado causal de la hipersuperficie luz futura

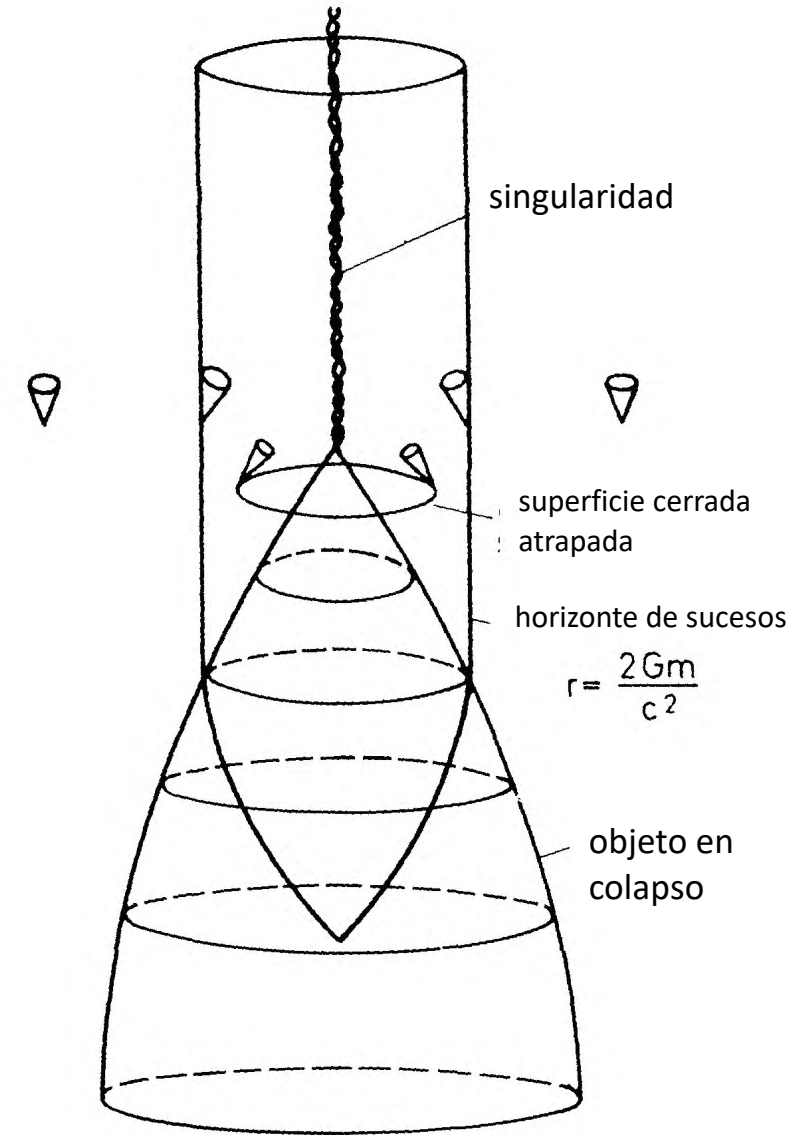


Fig. 1. Colapso esférico

- Bueno... vamos a hacerlo más fácil

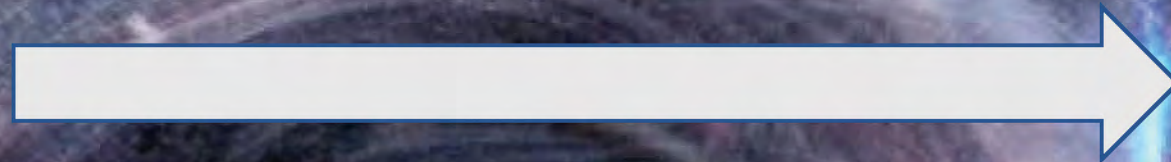
S. Hawking
(1942-2018)



10-X-2018

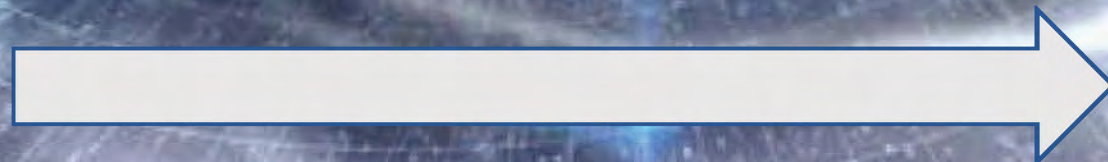
Agujero negro – ¿cómo? ¿mande?

Velocidad de escape c



negro

Curvatura extrema (singularidad) del espaciotiempo



agujero

La cosa ya viene de largo

- 1793: Michell estudia sistemas de estrellas dobles o multiples unidas por la gravedad, postula que si la luz tenía peso, una gran concentración de masa podría retenerla
- 1796: Simon Laplace recupera la idea
- 1915: Albert Einstein formula la TrG
- 1916: Karl Schwarzschild resuelve las ecuaciones de Einstein, se cumple la prevision de Michell
- 1968: John A. Wheeler acuña el concepto de AN



Rev. John Michell (1724-93)



John A. Wheeler (1911-2008)

La T^a de la Relatividad de Einstein



AE en 1921 (año del Nóbel)

- La masa actúa en el espaciotiempo, diciéndole como curvarse
- El espaciotiempo curvo actúa en la masa, diciéndole como moverse
- El tiempo avanza más lentamente en el espaciotiempo curvo

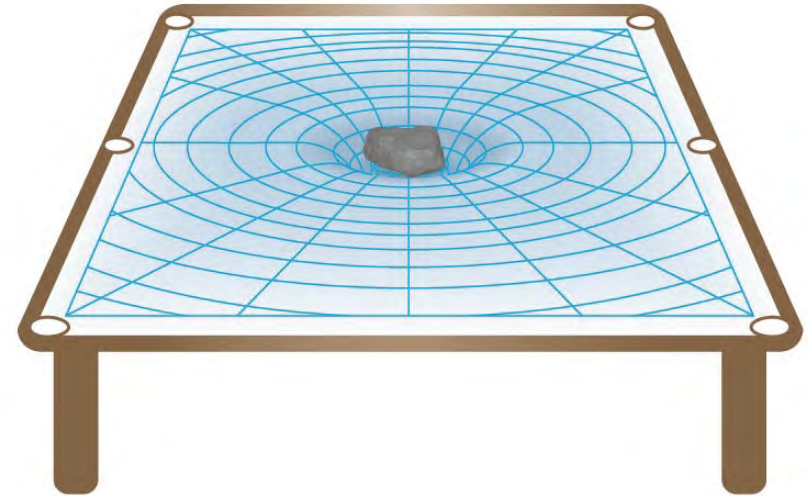
A handwritten signature of Albert Einstein in cursive script, written in black ink.

Teoría de la relatividad

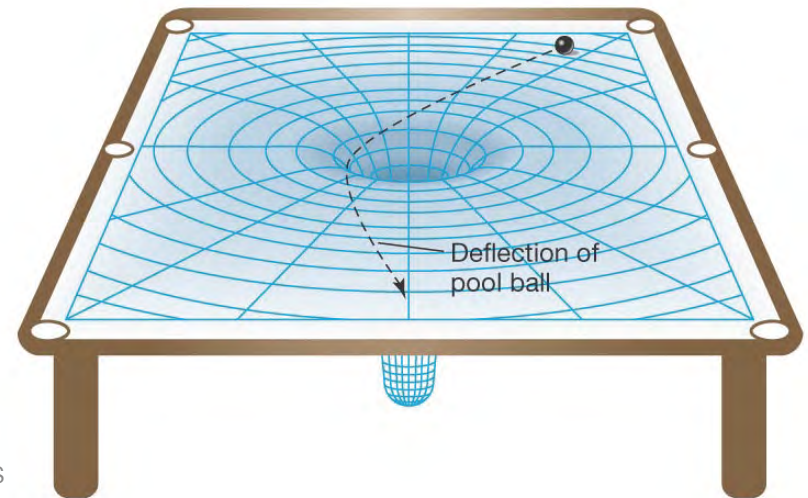
- La materia deforma el espaciotiempo y redefine las líneas rectas (el camino de un rayo de luz)
- Un AN ocurre cuando la deformación causada por la masa es infinitamente profunda



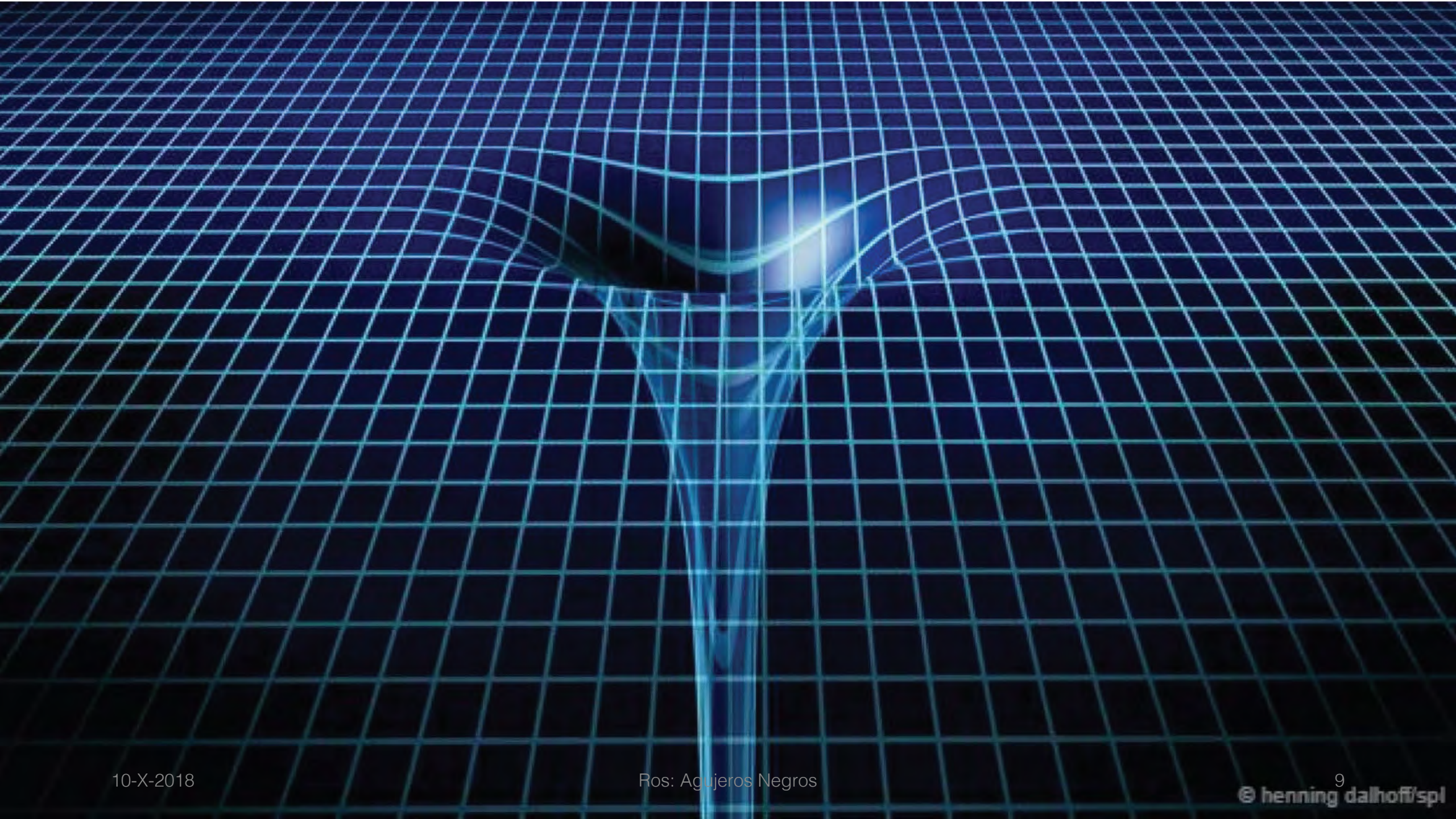
AE en 1916
© ETH Zürich

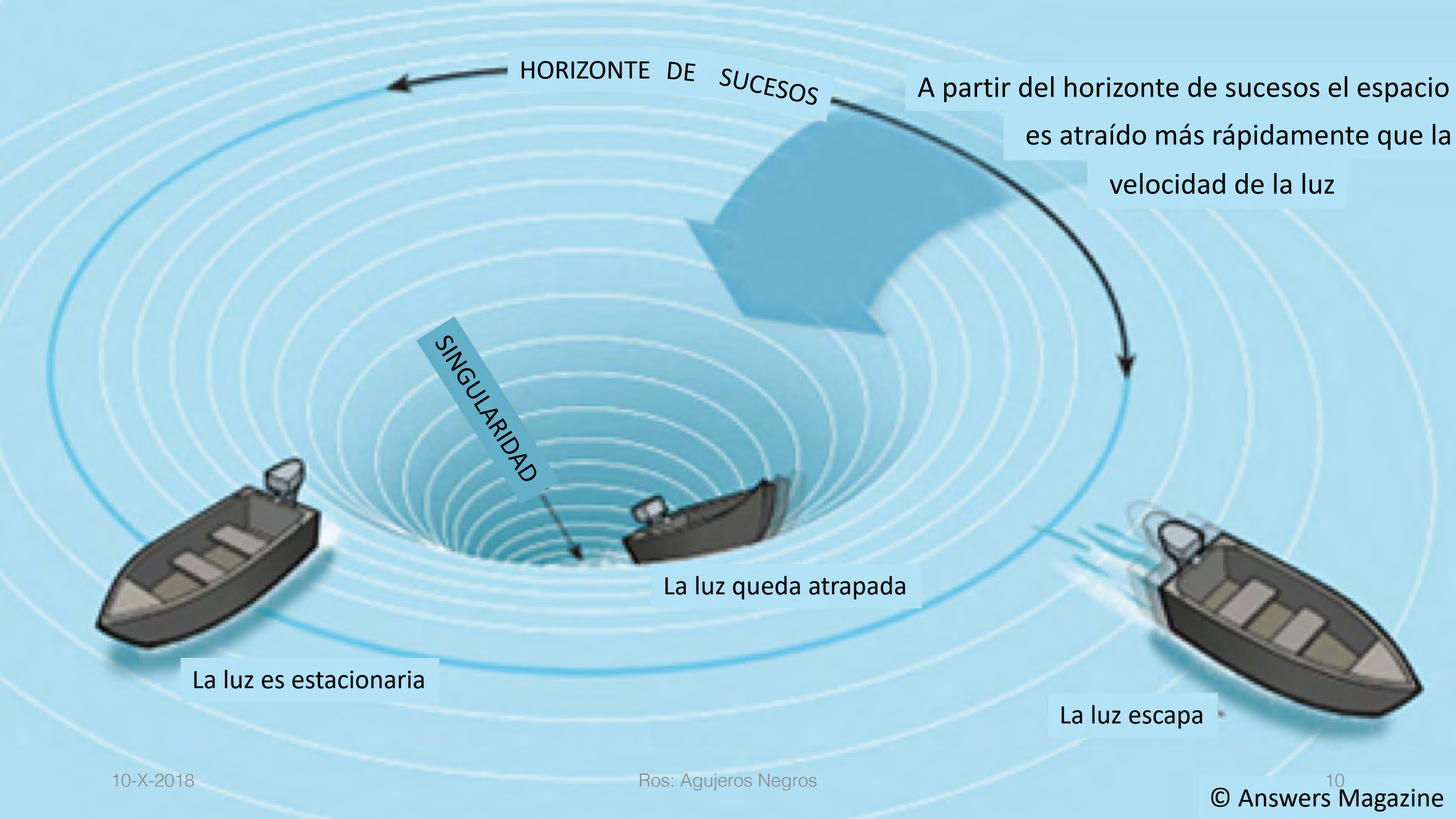


(a)



(b)





HORIZONTE DE SUCESOS

A partir del horizonte de sucesos el espacio es atraído más rápidamente que la velocidad de la luz

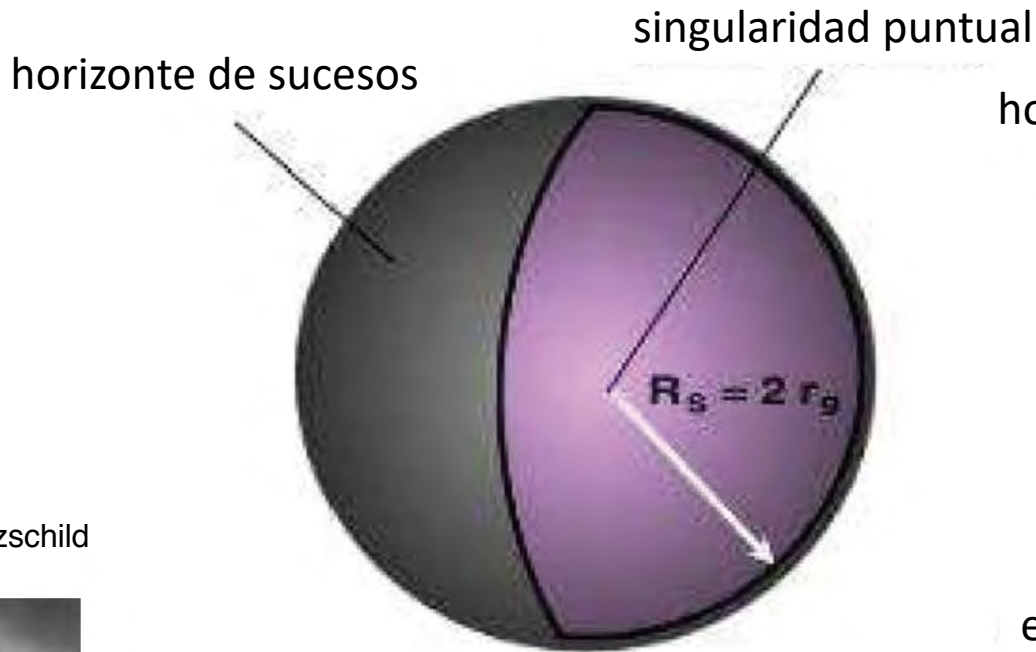
SINGULARIDAD

La luz queda atrapada

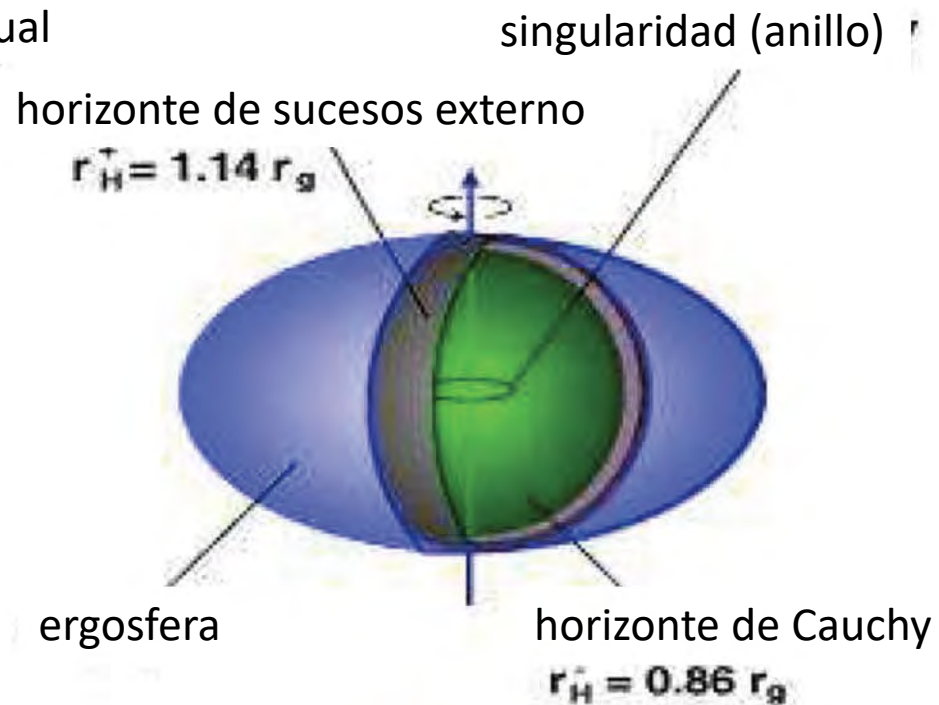
La luz es estacionaria

La luz escapa

Agujeros negros, giren o no



Schwarzschild
 $a = 0$



Kerr
 $a = 0.99 M$

Karl Schwarzschild
(1873-1916)



Roy Kerr (n. 1934)

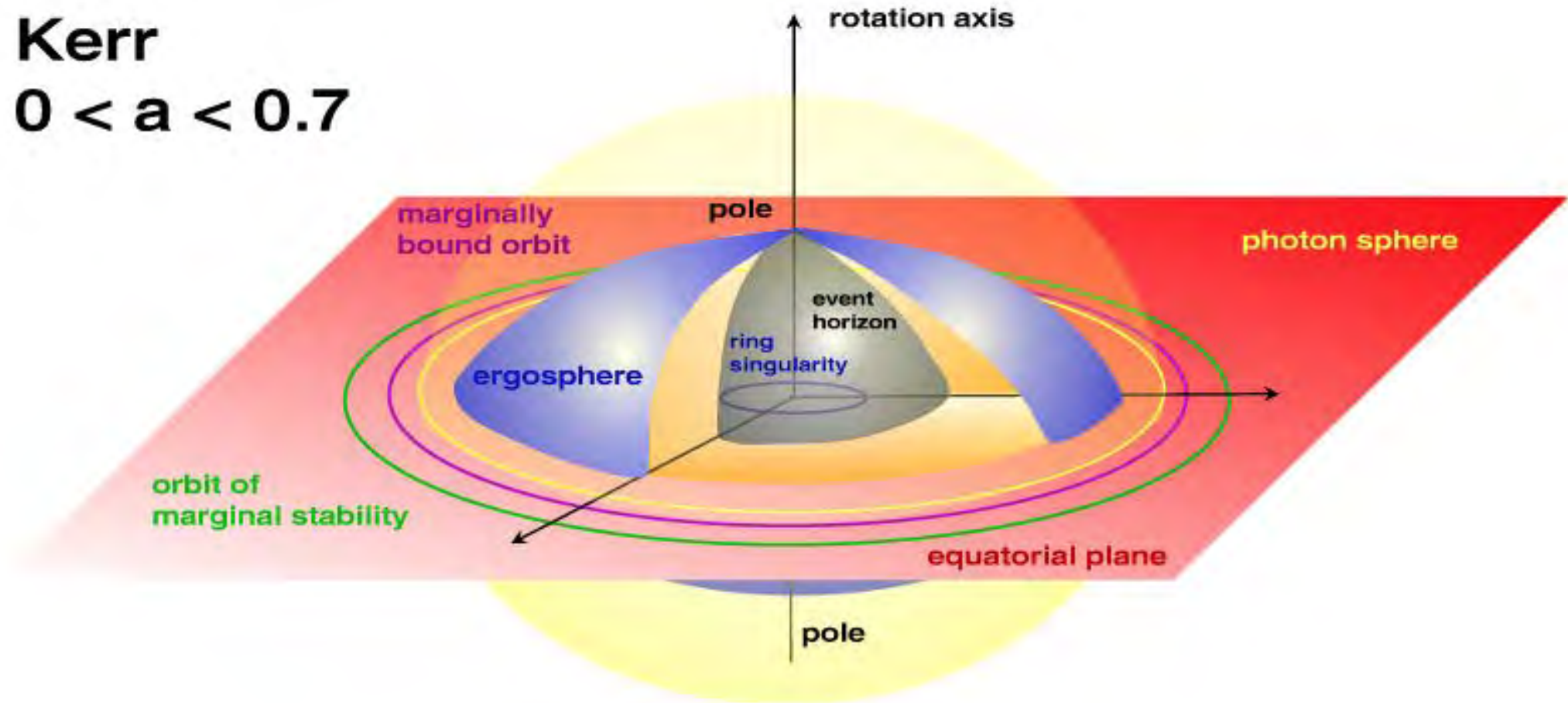


Ilustración: A. Müller (MPIA)

10-X-2018

Topología de un AN

Kerr
 $0 < a < 0.7$



Tipos: ¿Cuánto pesan?

1 billón de toneladas

© Edgy Labs



PRIMIGENIO

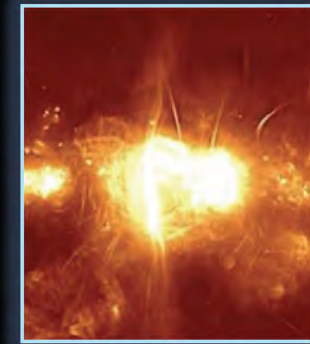
Tierra



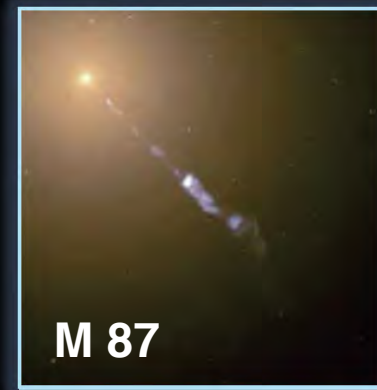
ESTELAR



INTERMEDIO

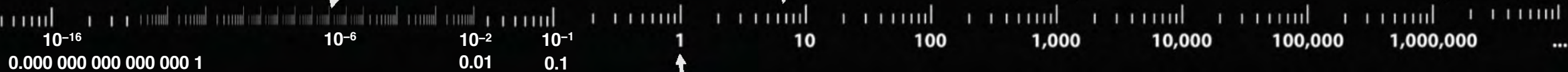


CENTRO DE LA VÍA LÁCTEA

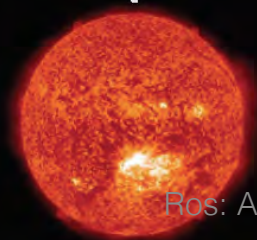


M 87

SUPER-MASIVO



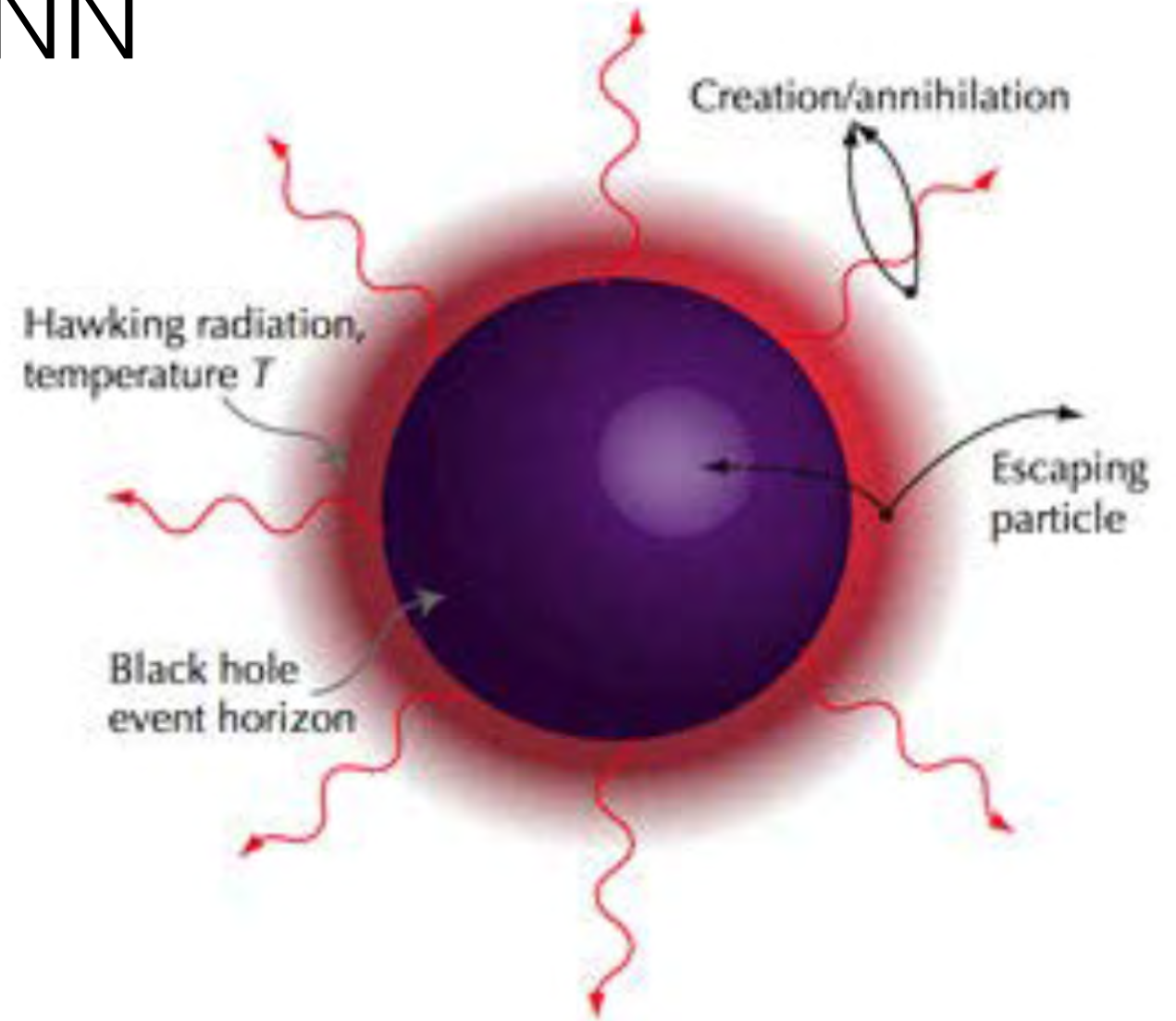
Masa (relativa al sol)



Ros: Agujeros Negros

Evaporación de AANN

- Radiación de Hawking
- Creación de pares de partículas en el vacío
- Una queda atrapada y otra escapa: el agujero negro 'pierde' energía y se 'evapora'



Mecanismos de formación de AANN

- Primordiales

- Ondas de Brill
- Defectos topológicos tras ruptura de la simetría

- Estelares (colapso de estrellas masivas)

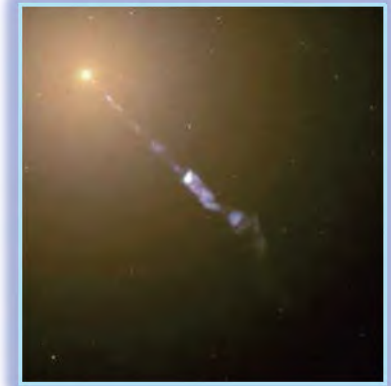
- Supernovas tipo II
- Explosión de enanas blancas (SN Ia)
- Fusión de estrellas de neutrones

- Intermedios (acrecimiento)

- Aglomeración en el centro de cúmulos
- Restos de estrellas supermasivas

- Supermasivos (acrecimiento)

- Aglomeración de cúmulos estelares
- Fusión de galaxias



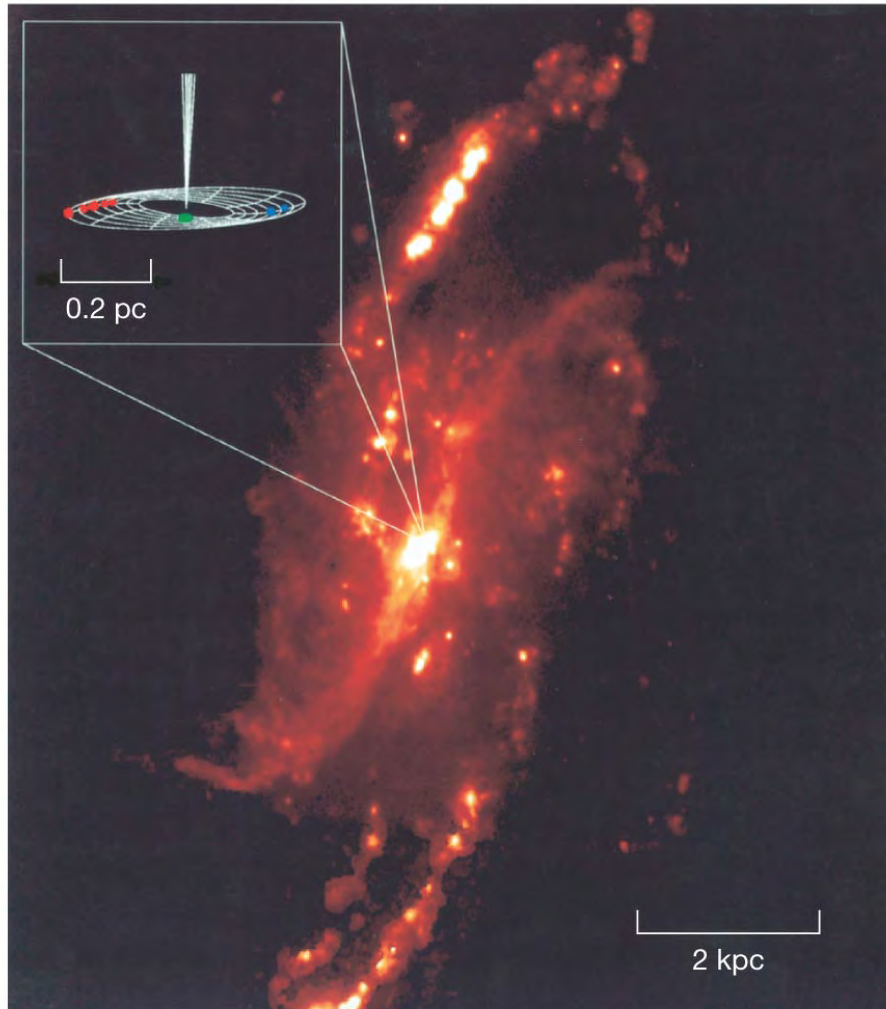
¿Existen los AANN?

Cómo diagnosticar un AN: métodos

Miyoshi+'94 - NGC 4258

- Cinemático: **estrellas o gas en órbita**, destellos, oscilaciones cuasiperiódicas, relación $M-\sigma$
- Obscurativo: reducción de la emisión por desplazamiento al rojo relativista (gran mancha negra)
- Espectro-relativista: líneas de emisión
- Acretivo: AANN activos, actividad típica, variabilidad
- Eruptivo: disrupción estelar por fuerzas de marea, destellos, supernova estelar, hipernova, salvas de rayos gamma
- Ondas gravitatorias: **detección directa** tras fusión de AANN
- Experimental: detección de radiación de Hawking en un mini-AN en un acelerador de partículas
- Aberrativo: efecto lente gravitatorio, **imagen directa**, micro-lente

Agujeros negros en galaxias



- Galaxia NGC 4258
- Movimientos en torno al núcleo: se deduce una masa central de miles de millones de masas solares
- Agujero negro supermasivo

Miyoshi et al. Nature 373, 127 (1995)

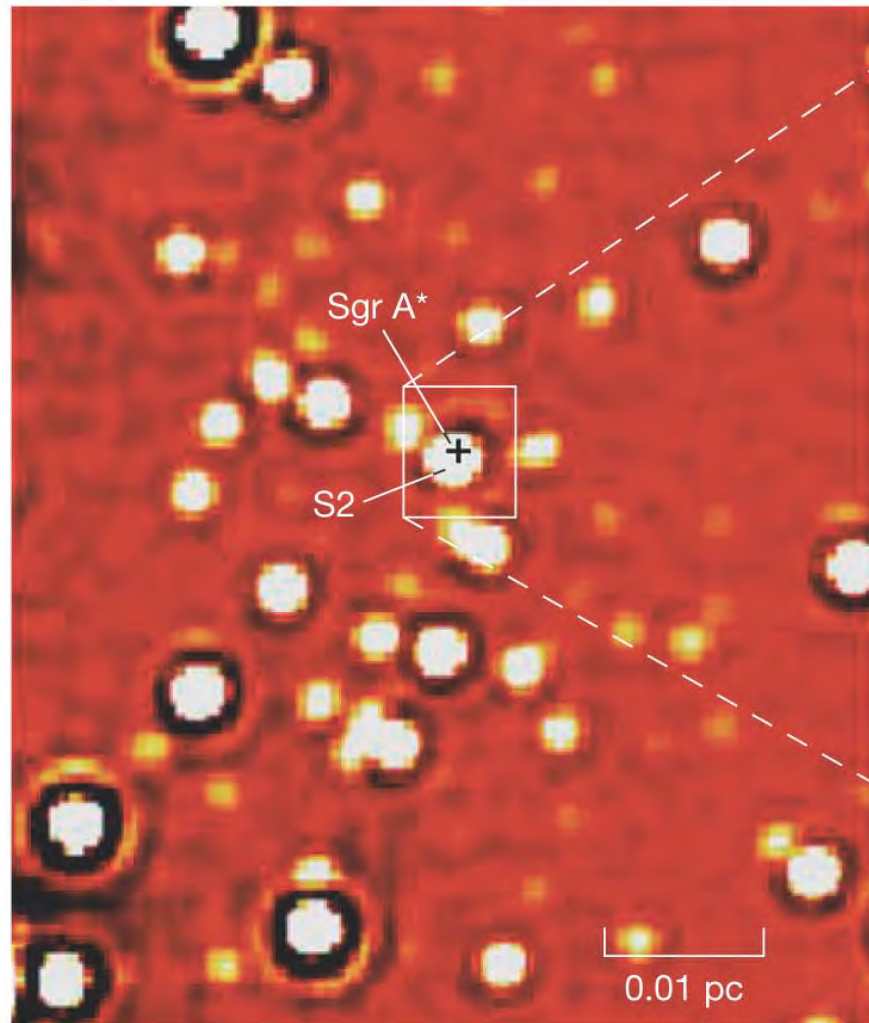
Cómo diagnosticar un AN: métodos

Genzel (MPE)- Centro galáctico

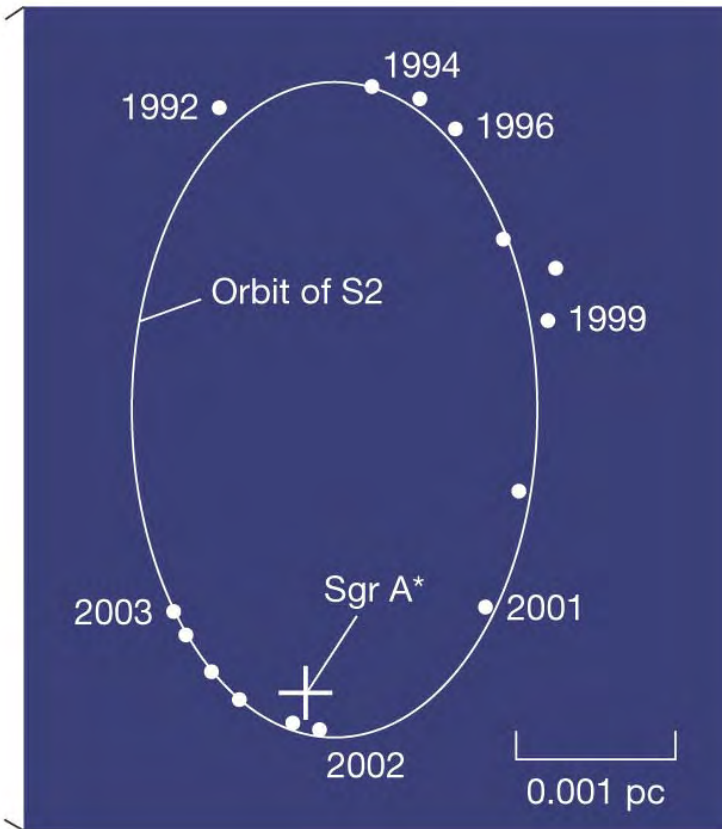
- Cinemático: **estrellas o gas en órbita**, destellos, oscilaciones cuasiperiódicas, relación $M-\sigma$
- Obscurativo: reducción de la emisión por desplazamiento al rojo relativista (gran mancha negra)
- Espectro-relativista: líneas de emisión
- Acretivo: AANN activos, actividad típica, variabilidad
- Eruptivo: disrupción estelar por fuerzas de marea, destellos, supernova estelar, hipernova, salvas de rayos gamma
- Ondas gravitatorias: **detección directa** tras fusión de AANN
- Experimental: detección de radiación de Hawking en un mini-AN en un acelerador de partículas
- Aberrativo: efecto lente gravitatorio, **imagen directa**, micro-lente

El centro galáctico

- Las órbitas estelares cercanas al centro de la Vía Láctea indicant una masa central de $3.7 \times 10^6 M_{\odot}$ → ¡AN!



Ros: Agujeros Negros



Órbitas en torno a Sgr A* (ESO)



Cómo diagnosticar un AN: métodos

- Cinemático: **estrellas o gas en órbita**, destellos, oscilaciones cuasiperiódicas, relación $M-\sigma$
- Obscurativo: reducción de la emisión por desplazamiento al rojo relativista (gran mancha negra)
- Espectro-relativista: líneas de emisión
- Acretivo: AANN activos, actividad típica, variabilidad
- Eruptivo: disrupción estelar por fuerzas de marea, destellos, supernova estelar, hipernova, salvas de rayos gamma
- Ondas gravitatorias: **detección directa** tras fusión de AANN
- Experimental: detección de radiación de Hawking en un mini-AN en un acelerador de partículas
- Aberrativo: efecto lente gravitatorio, imagen directa, micro-lente

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne

"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

ONDAS GRAVITATORIAS DE COLISION DE AGUJEROS NEGROS EN COLISION

GRAVITATIONAL WAVES FROM COLLIDING BLACK HOLES

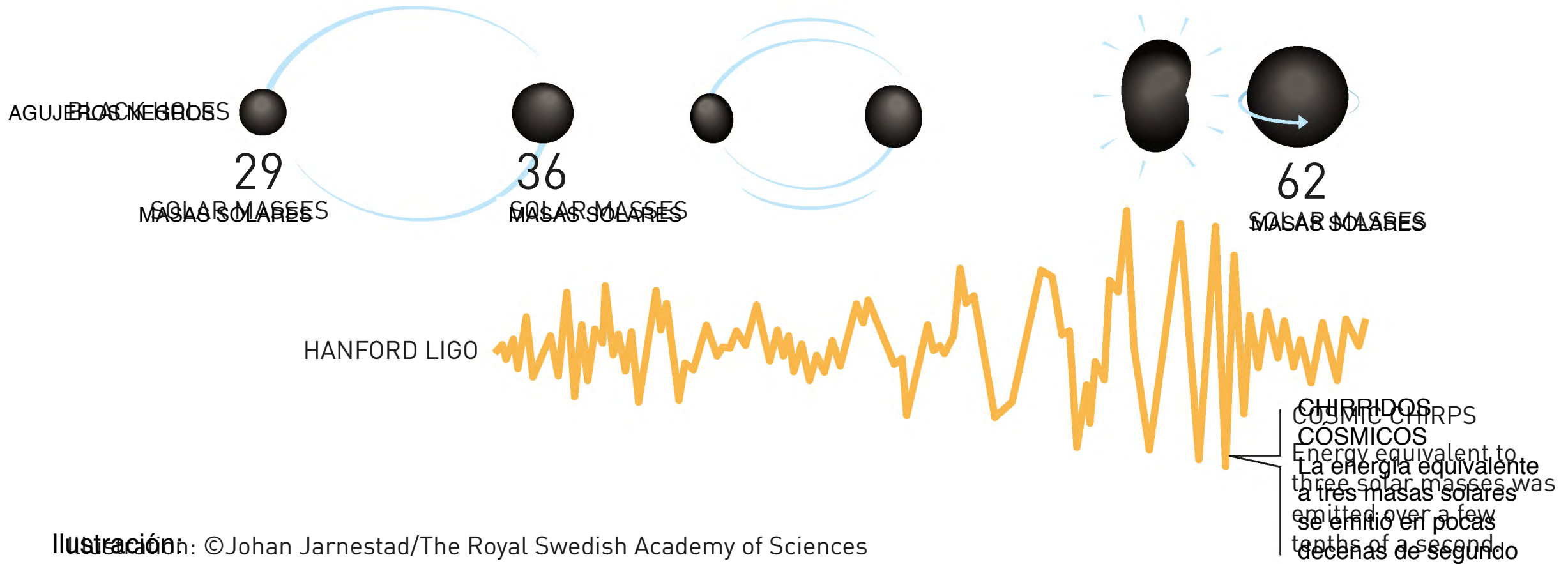
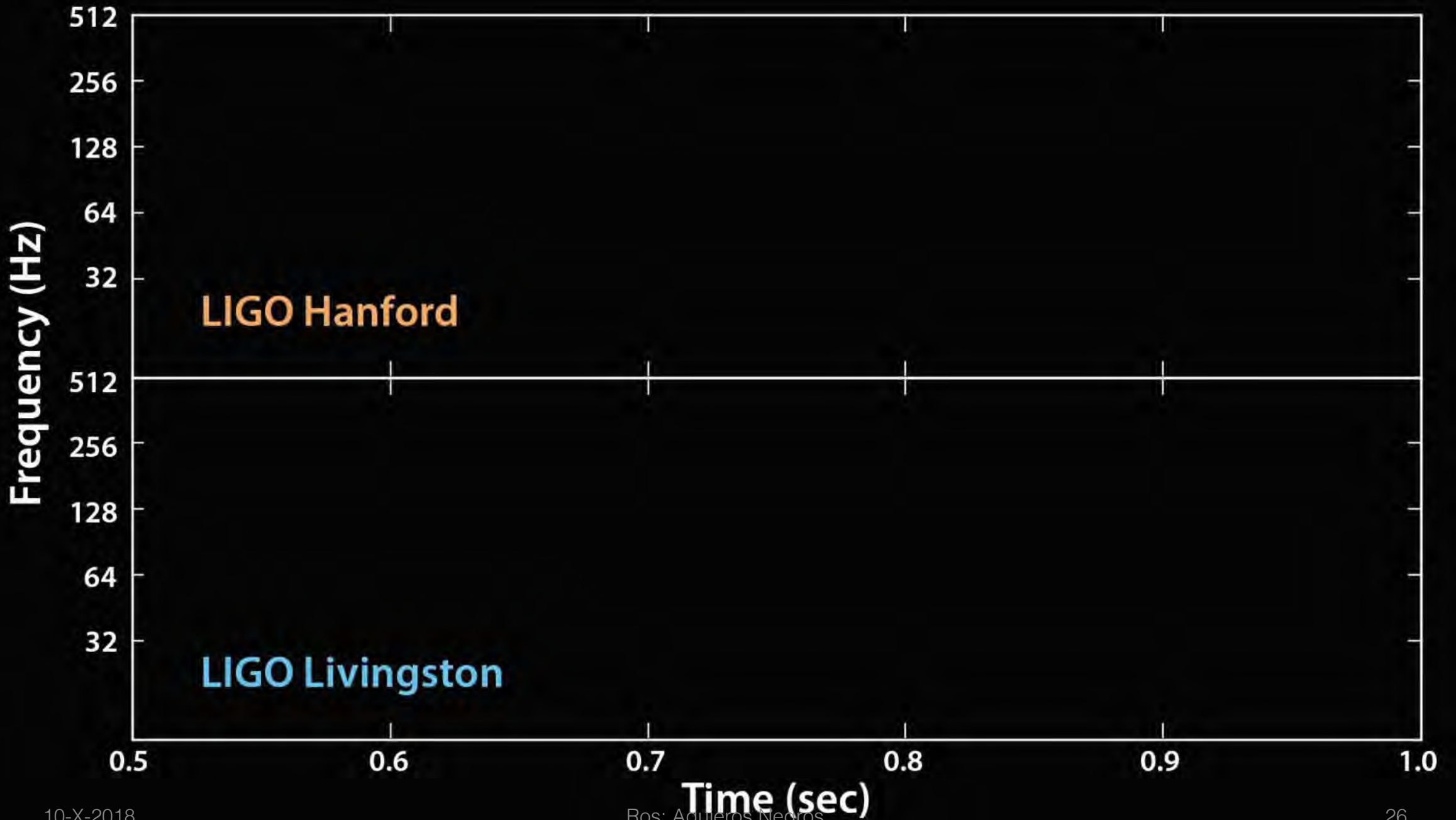


Ilustración: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences



Cómo diagnosticar un AN: métodos

- Cinemático: **estrellas o gas en órbita**, destellos, oscilaciones cuasiperiódicas, relación $M-\sigma$
- Obscurativo: reducción de la emisión por desplazamiento al rojo relativista (gran mancha negra)
- Espectro-relativista: líneas de emisión
- Acretivo: AANN activos, actividad típica, variabilidad
- Eruptivo: disrupción estelar por fuerzas de marea, destellos, supernova estelar, hipernova, salvas de rayos gamma
- Ondas gravitatorias: **detección directa** tras fusión de AANN
- Experimental: detección de radiación de Hawking en un mini-AN en un acelerador de partículas
- Aberrativo: efecto lente gravitatorio, **imagen directa**, micro-lente

AANN supermasivos: en el corazón de las galaxias

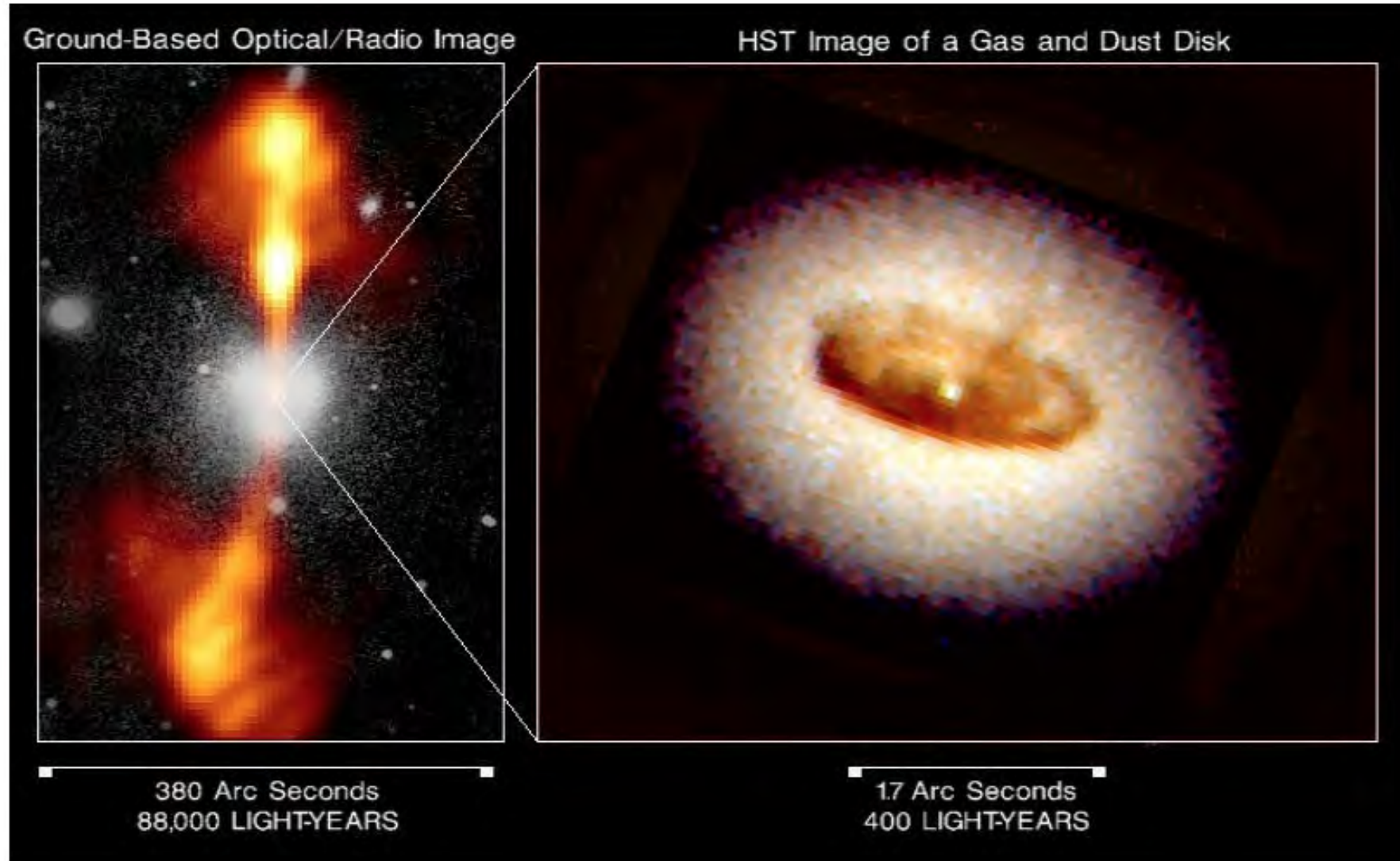
Núcleos activos de galaxias

- El 20-25% de las galaxias no tiene la luminosidad “habitual” – son demasiado brillantes
- Se llaman galaxias activas
- Su luz no es estelar
 - Proveniente del entorno del centro galáctico



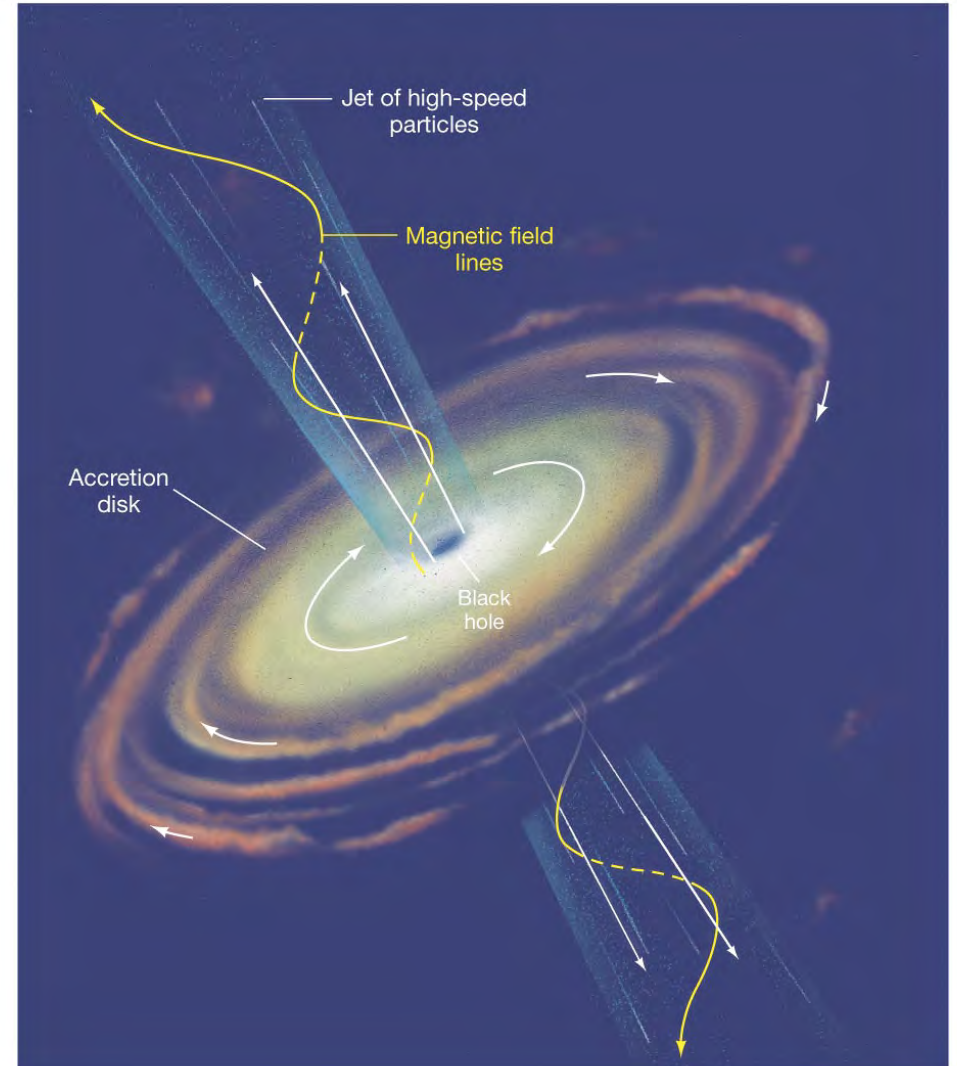
NGC7752 con un núcleo rodeado de anillos luminosos (formación estelar y agujero negro central)

Cuásares y agujeros negros



El motor central de una galaxia activa

- Ingredientes de una galaxia activa: **agujero negro** rodeado de un **disco de acrecimiento**, que produce fuertes **campos magnéticos** y genera un **jet** perpendicular al disco

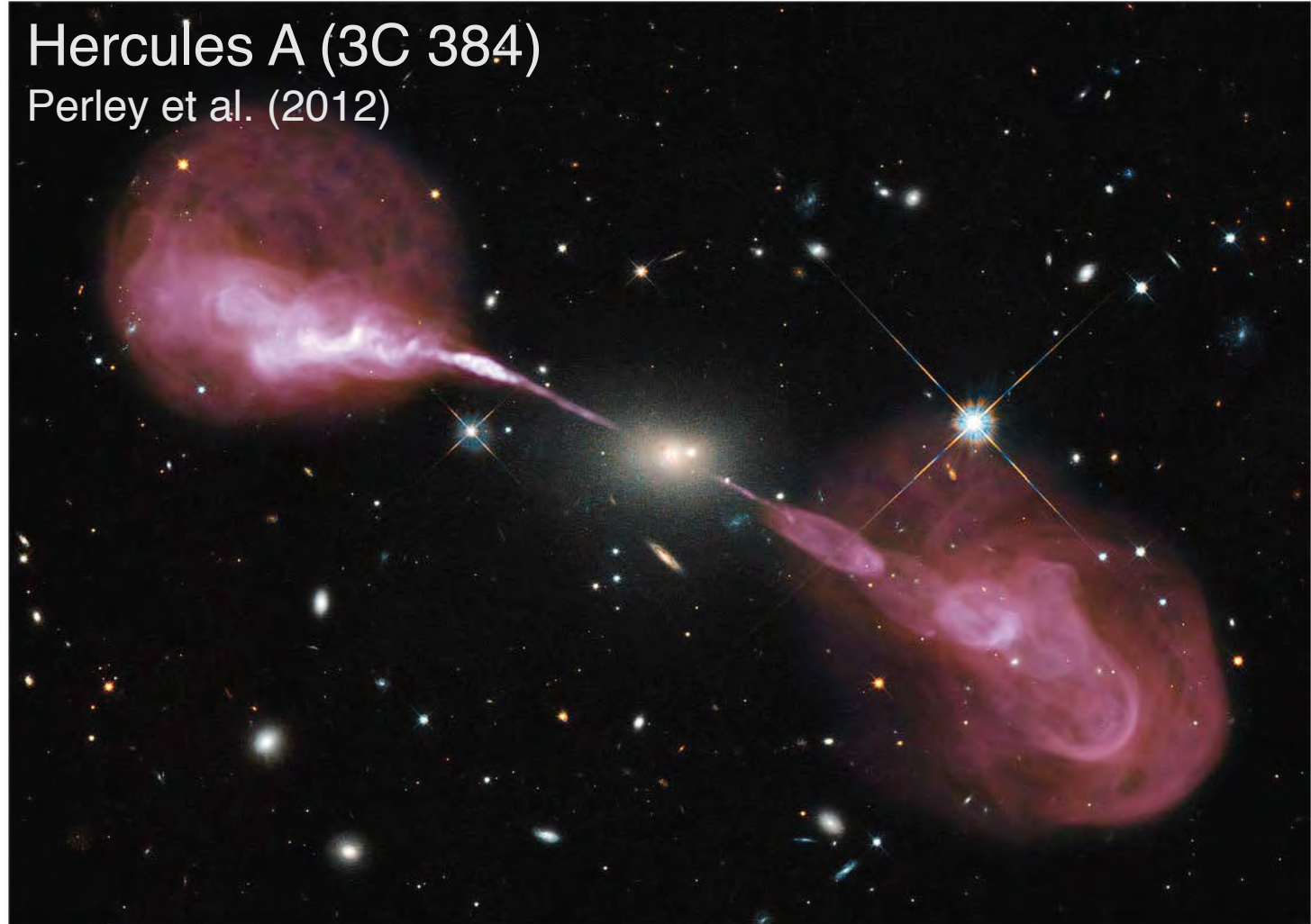


Ver <http://www.youtube.com/watch?v=mnj-X0bn9BA>

Jets en galaxias activas

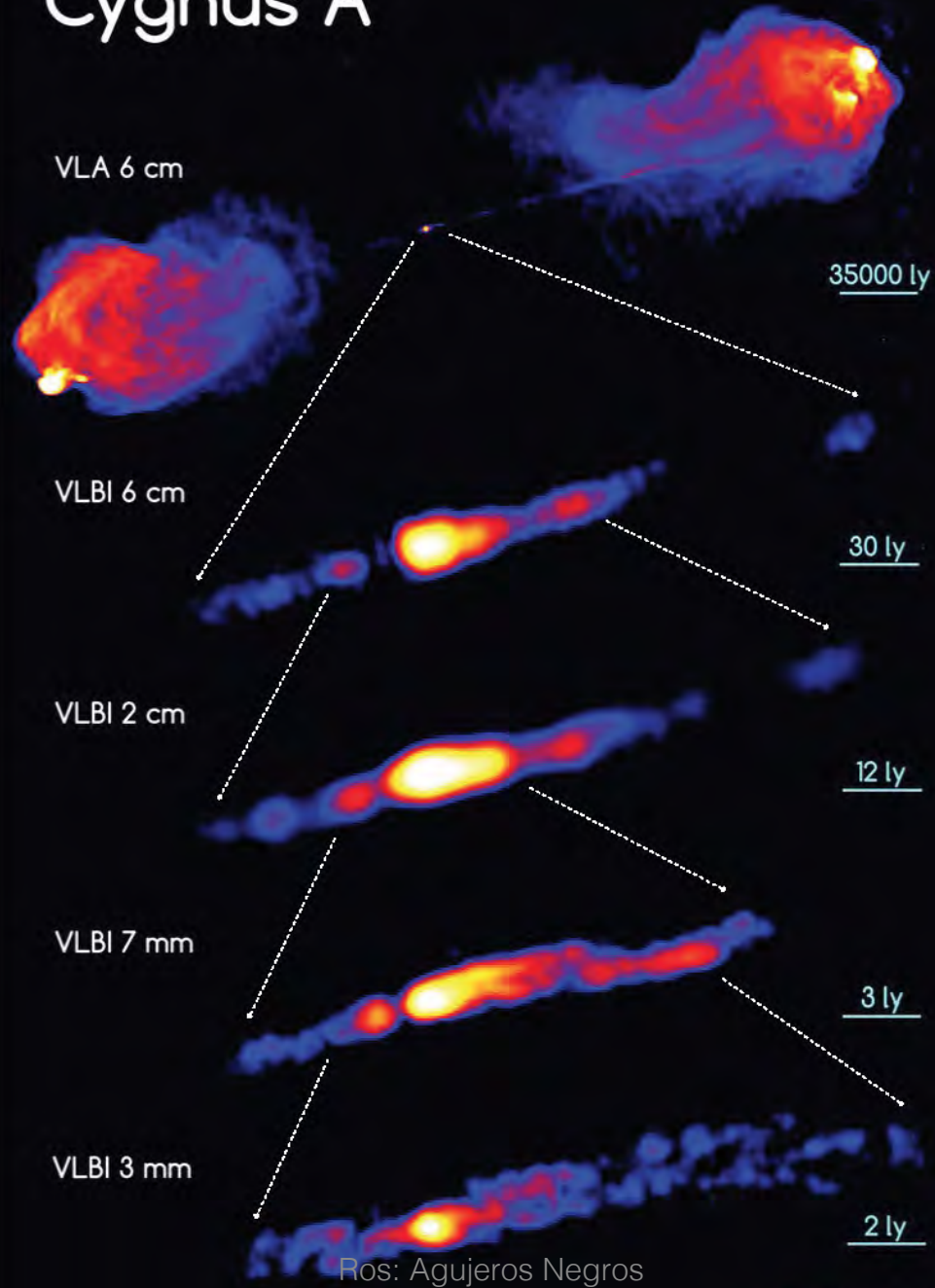
- Jets que emergen de los AANN supermasivos en **galaxias activas** son una prueba importante
- Hercules A con jets de cientos de miles de años luz de tamaño

Hercules A (3C 384)
Perley et al. (2012)



Zooming

Cygnus A



B. Boccardi et al.,
Astronomy &
Astrophysics Rev.,
submitted



Fotografiando un AN

Die Grundlagen der Physik.

(Zweite Mitteilung.)

Hilbert (1916)

Von

David Hilbert.

Vorgelegt in der Sitzung vom 23. Dezember 1916.

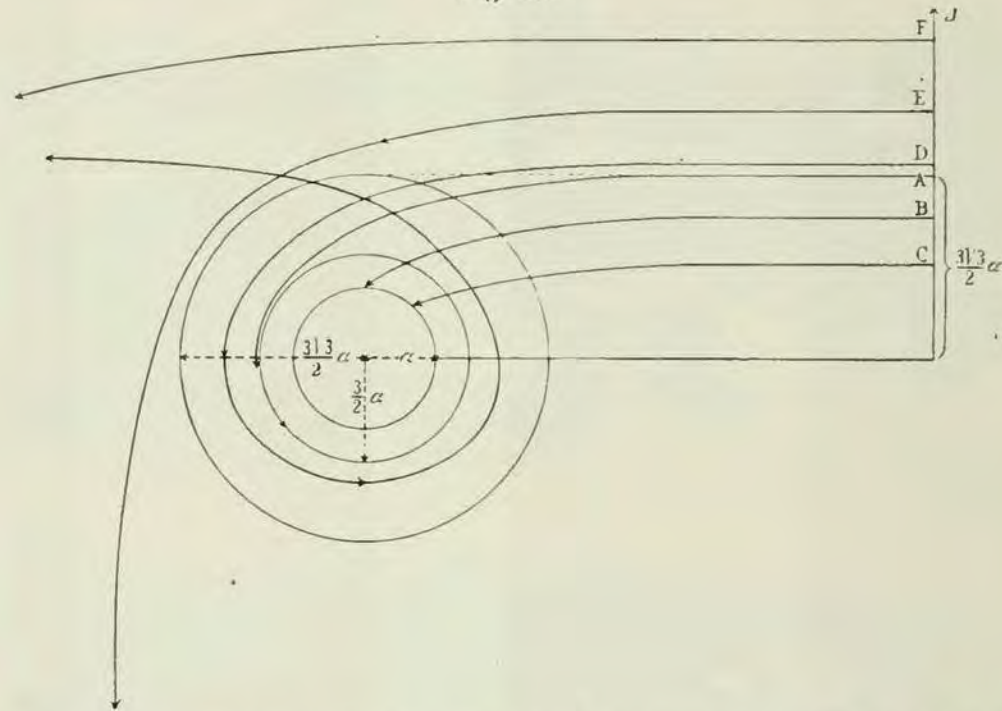
Allgemein erhalten wir für die Lichtbahn aus (56) wegen $A = 0$ die Differentialgleichung

$$(62) \quad \left(\frac{d\varrho}{d\varphi} \right)^2 = \frac{1}{B^2} - \varrho^2 + \alpha\varrho^3;$$

dieselbe besitzt für $B = \frac{3\sqrt{3}}{2}\alpha$ den Kreis $r = \frac{3\alpha}{2}$ als Poincaréschen

Daraus ziehen wir in Anlehnung an Poincarés Zykeltheorie den überdies recht anschaulichen Schluß: Der Lichtstrahl, der im Unendlichen auf den Abstand $\Delta = \frac{3\sqrt{3}}{2}\alpha$ hinzielt, biegt sich nach innen und nähert sich auf einer Spirale asymptotisch dem Kreise $r = \frac{3}{2}\alpha$. Dann ergibt sich für die Gesamtheit der betrachteten Strahlen die Fig. 23. Sie zeigt uns die Kreise $r = \alpha$,

Fig. 23.



an welchem jeder herankommende Lichtstrahl endigt (ist doch dort die Lichtgeschwindigkeit 0), ferner $r = \frac{3}{2}\alpha$ und $r = \frac{3\sqrt{3}}{2}\alpha$.

Max von
Laue (1921)

The BH vicinity

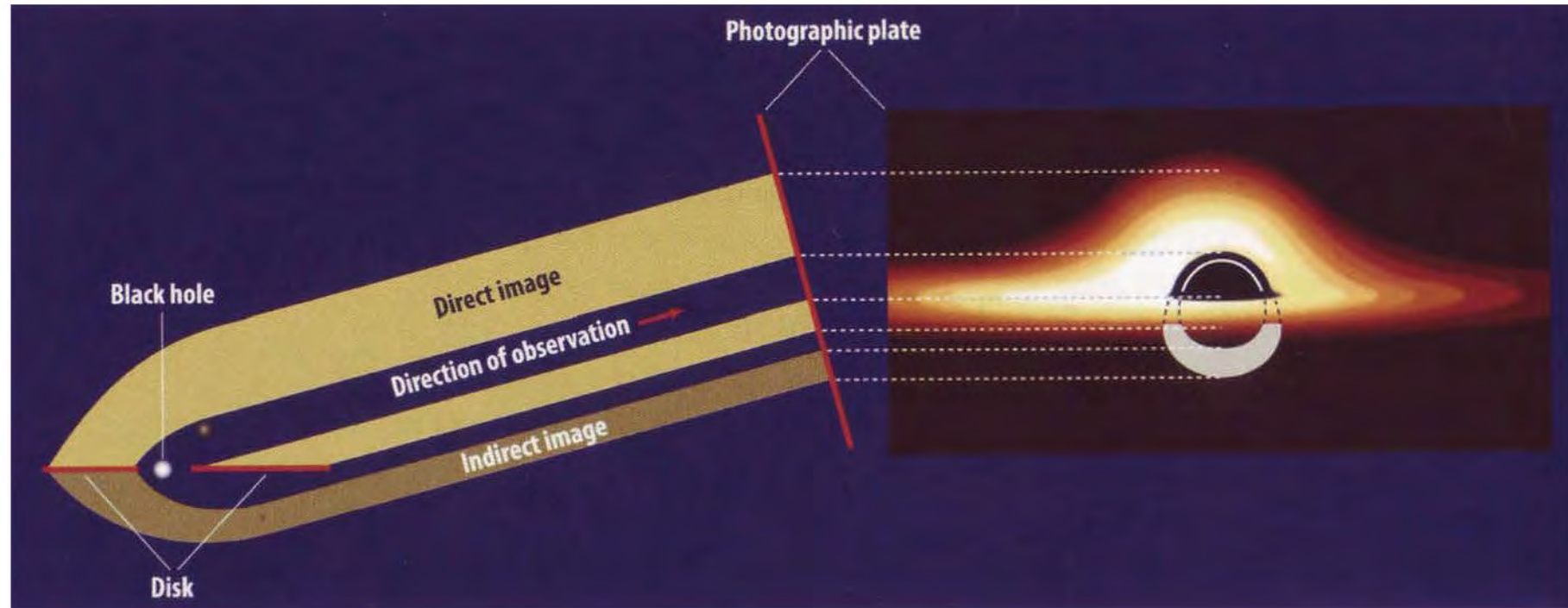
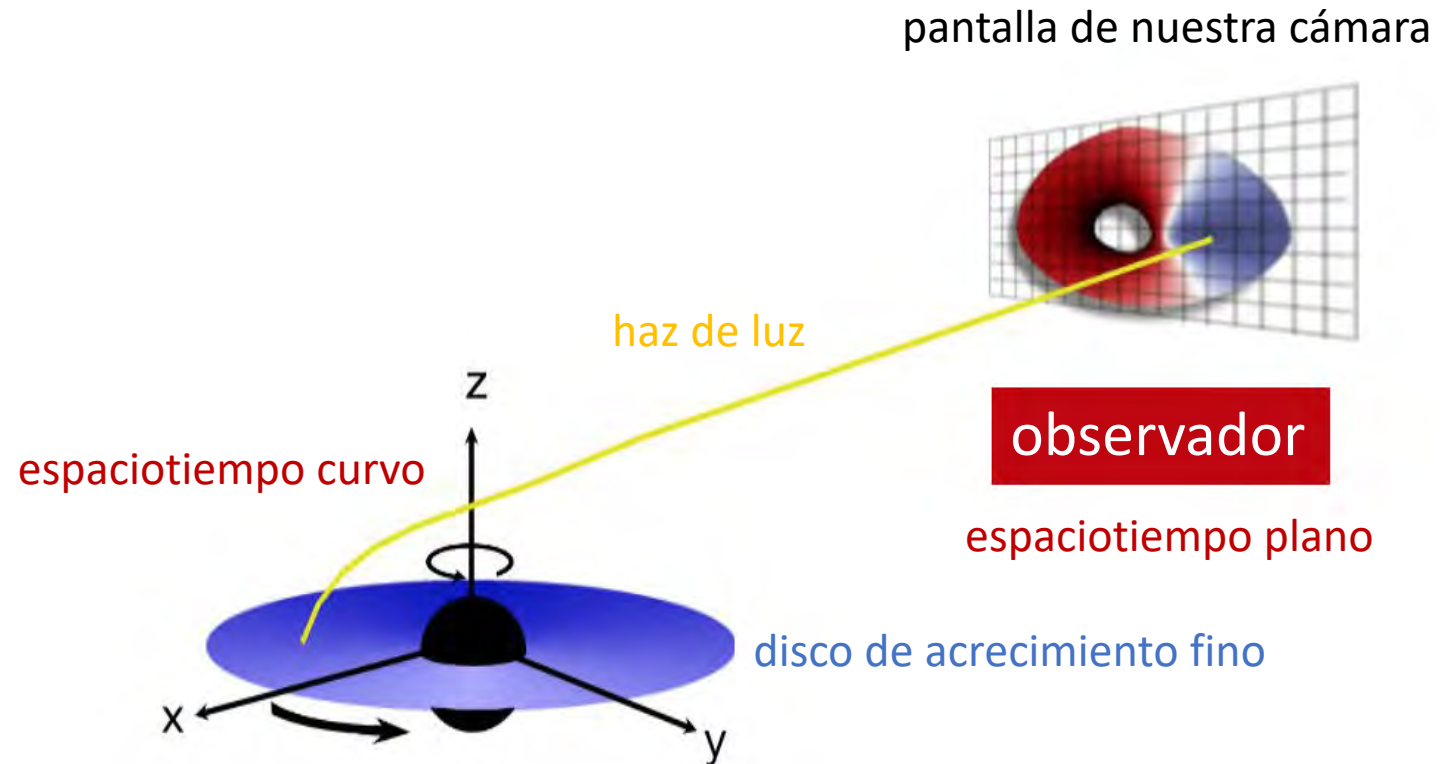


Image taken from Doeleman et al. (2013)

Trazado de rayos – fotografiando un AN

- Resolviendo las ecuaciones de Einstein (geometría de Kerr)
- Cálculo de la trayectoria de fotones



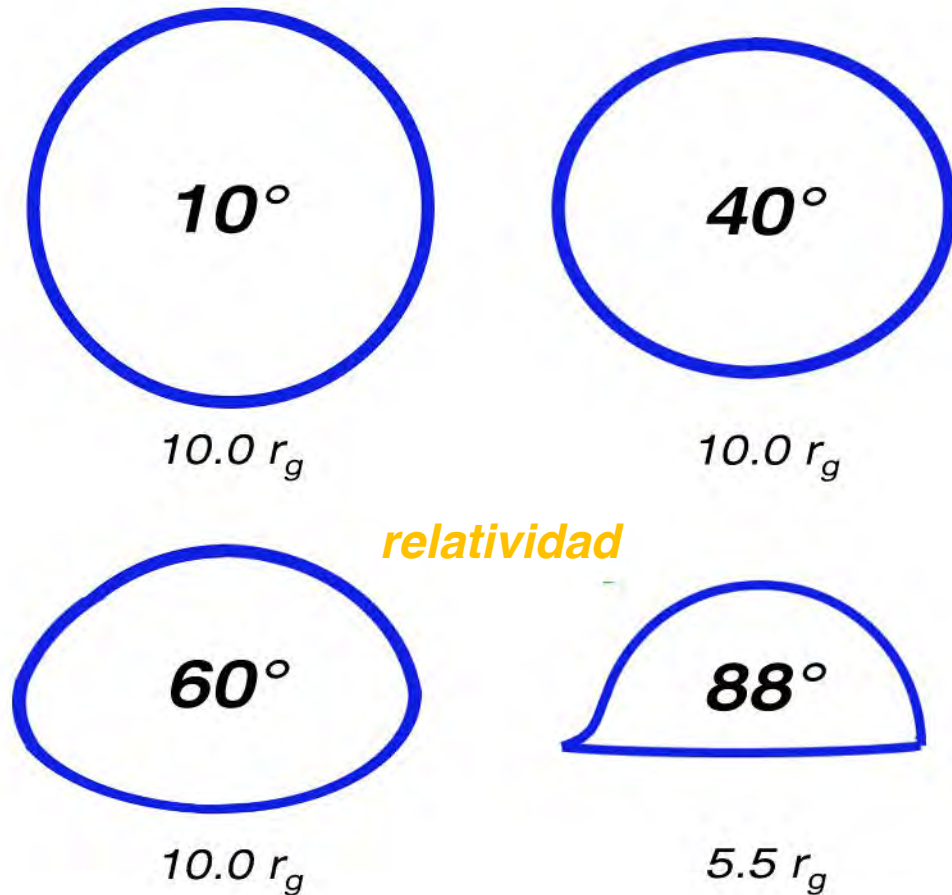
sistema agujero negro – disco

A Müller (MPA 2000)

AN como lente gravitatoria

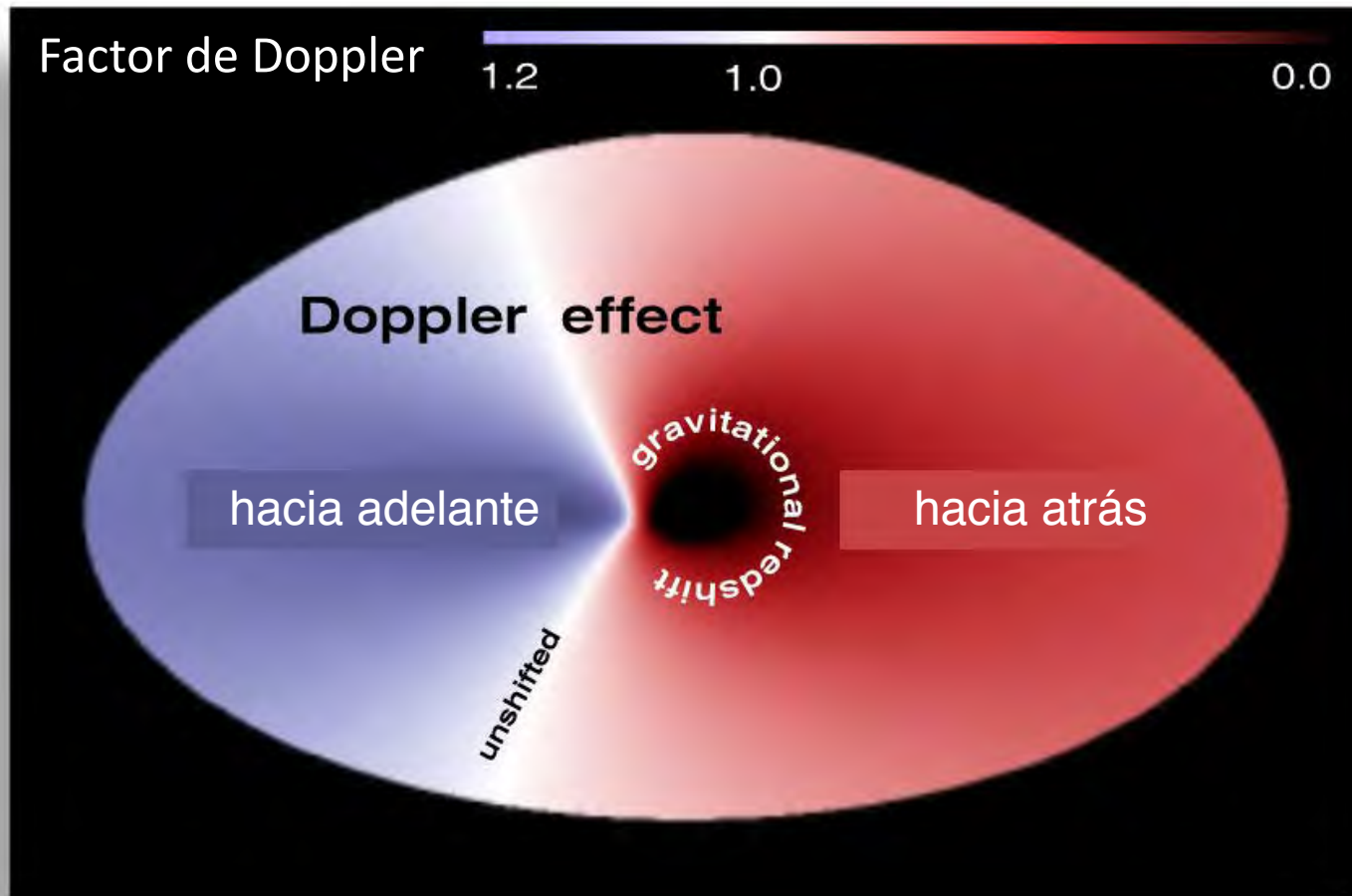
Efecto lente en un AN de Kerr

en órbitas circulares



- Deformación de las elipses clásicas
- Distorsión relativista
- Dependiente del ángulo de inclinación
- Aberración óptica

Imagen de AN y efecto Doppler



$$i = 60^\circ$$

$$a = 0.99$$

$$r_{\text{int}} = r_{\text{H}}$$

$$r_{\text{ext}} = 30.0$$

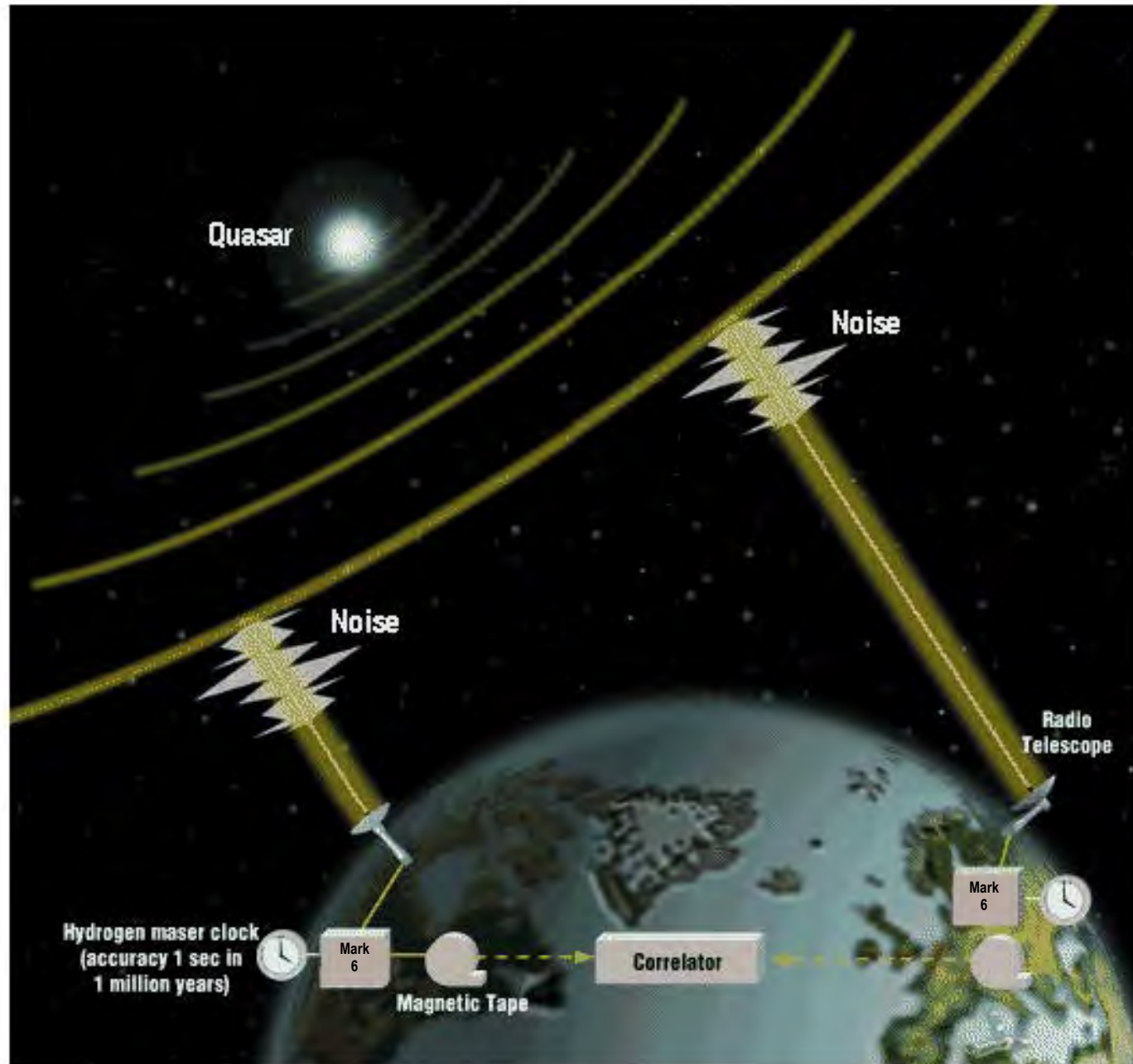
Cinemática kepleriana

- Efecto Doppler clásico
- Relativista: reforzamiento (“beaming”) y desplazamiento al rojo relativista
- Efecto Doppler relativista generalizado
- Este efecto ha de estar presente en cualquier AN



Observando...
que es gerundio

VLBI





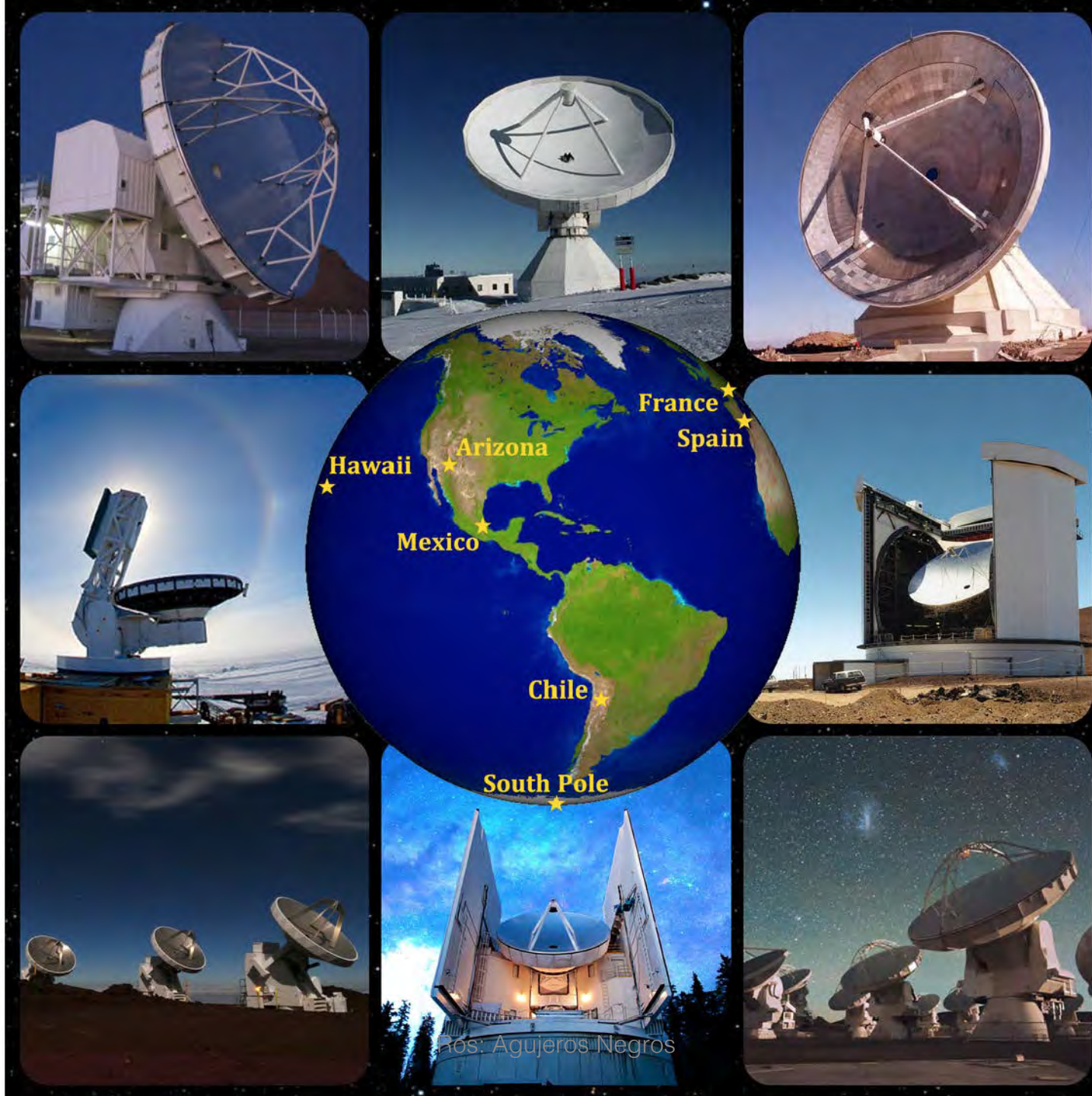
10-X-2018

Ros: Agujeros Negros

45



Event Horizon Telescope



ALMA durante las observaciones de 2017



SMA bajo la luz de la luna – Hawaii



Picture: J. Weintraub (CfA)

SMT bajo la luz de la luna - Arizona



Fotografía: J.H. Kim

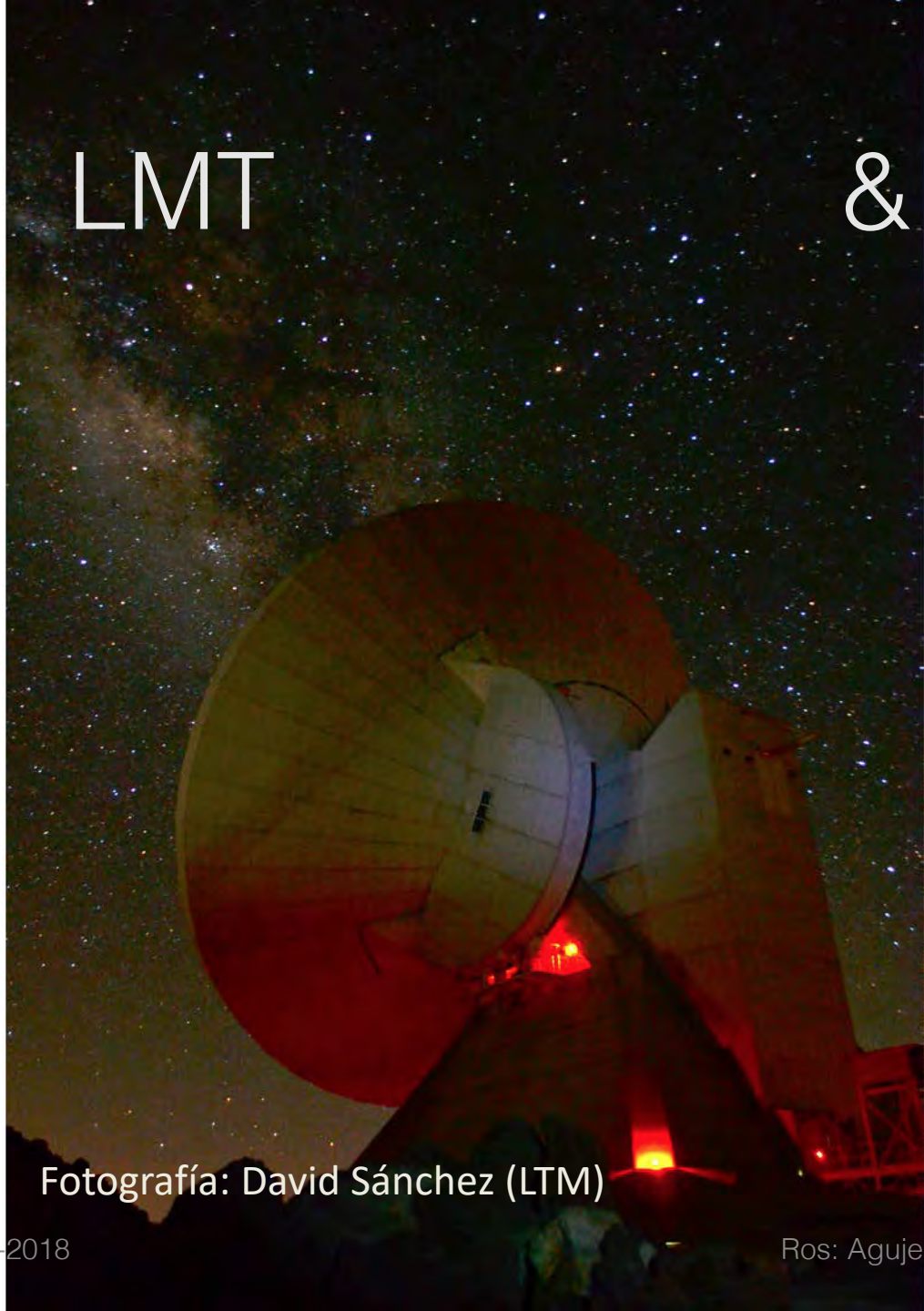
Pico Veleta en las observaciones previas



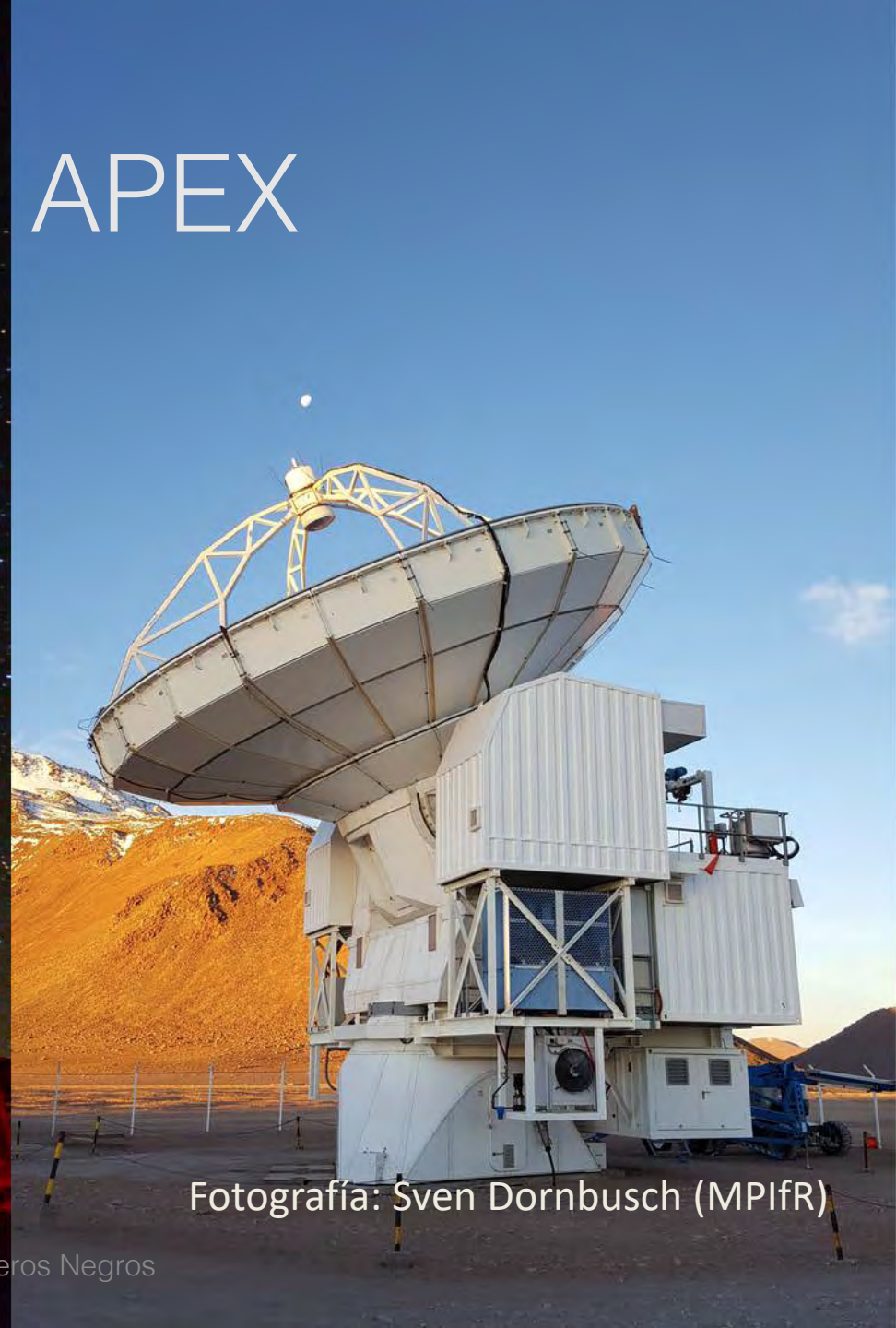
Fotografía:
Helge
Rottmann

LMT

& APEX



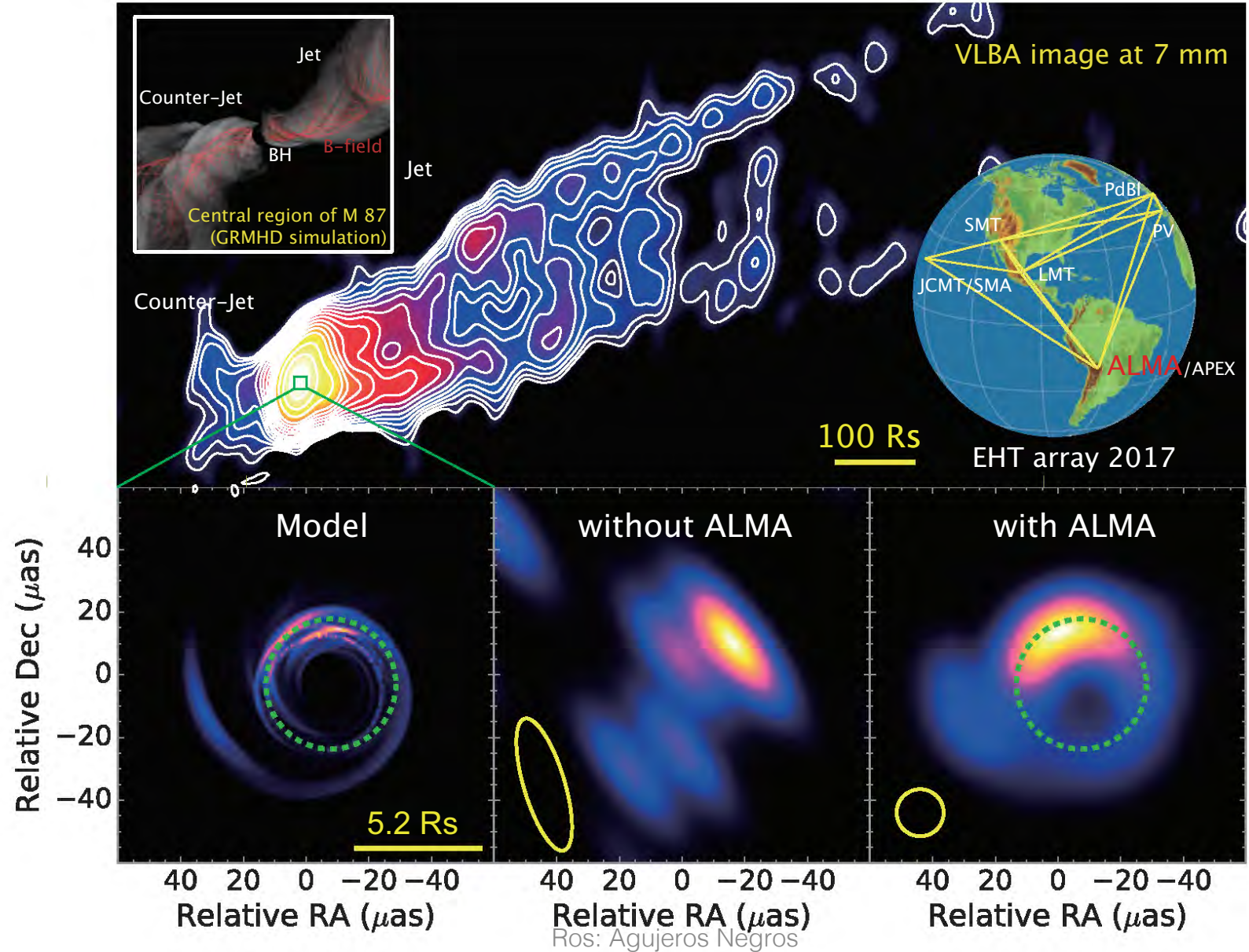
Fotografía: David Sánchez (LTM)



Fotografía: Sven Dornbusch (MPIfR)

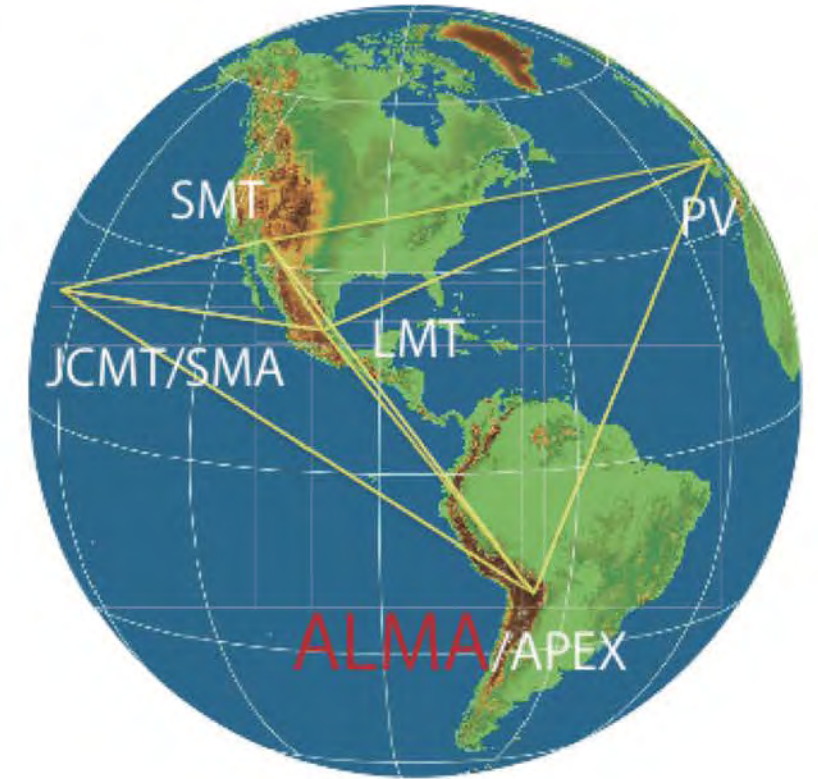
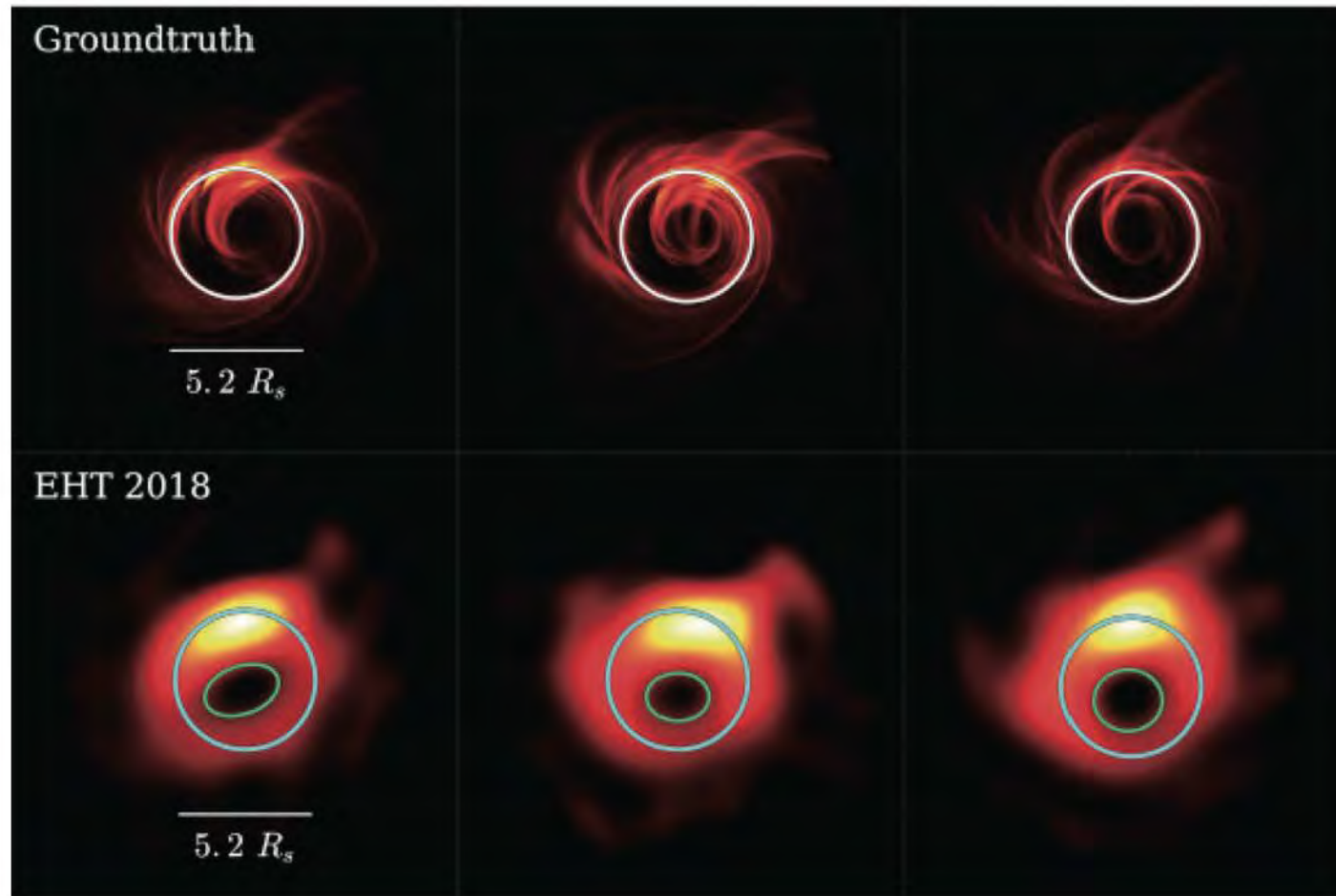
Qué esperamos ver

Ilustraciones::
 BU blazar project
 Walker et al (datos)
 Moscibrodzka et al (2016)
 Honma et al. (2015)
 Dexter et al. (2016)
 Bouman et al. (2016)



EHT/ALMA Proposal 2016.1.011154.V

Imágenes esperadas



El EHT visto desde M 87

Cálculos utilizando magnetohidrodinámica relativista
Mościbrodzka et al. (2017)

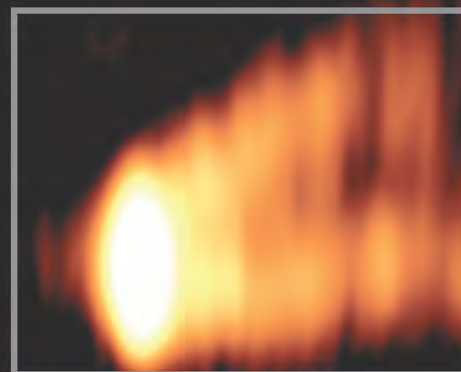
Nos acercamos...

- Resolución de 7 radios gravitatorios
- Estructura con espina central y corteza externa
- Datos de 2014-15

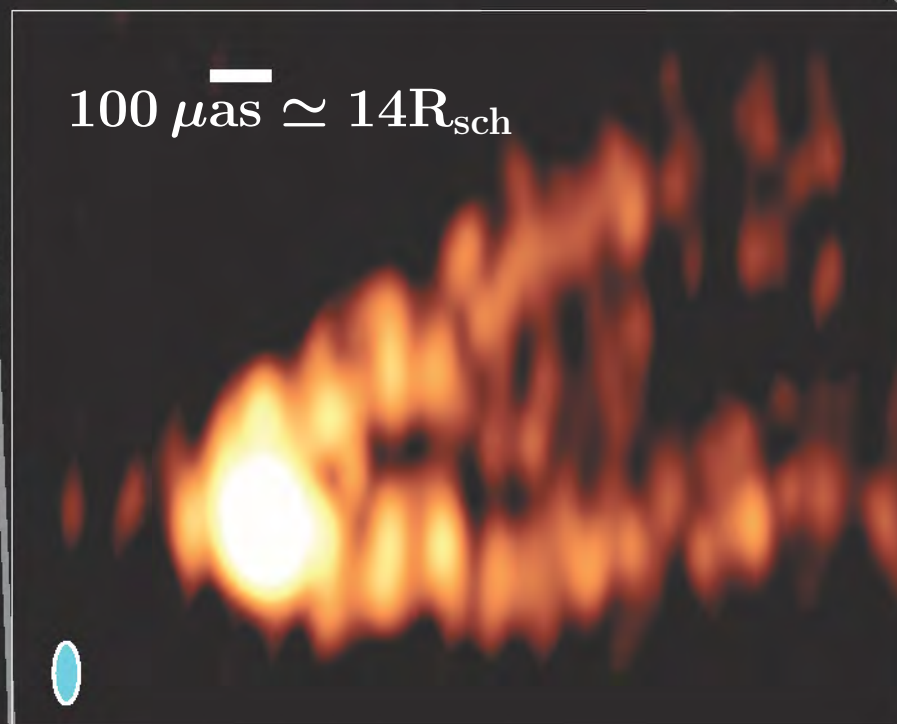
Kim et al. (2018)

10-X-2018

$500 \mu\text{as} \simeq 70 R_{\text{sch}}$



$100 \mu\text{as} \simeq 14 R_{\text{sch}}$



M 87

GMVA 86 GHz



Ros: Agujeros Negros

J.-Y. Kim et al. 2018



Imagen sintética con el código numérico RAPTOR (Bronzwaer et al.)



Keine noch so große Zahl von Experimenten kann beweisen, dass ich recht habe, ein einziges Experiment kann beweisen, dass ich unrecht habe.

Incontables experimentos podrán probar que tengo razón, pero un único experimento bastará para demostrar que estoy equivocado.

Atribuido a Albert Einstein

Película del EHT (webpage)