

# Astrofísica Relativista y Agujeros Negros: Observando lo invisible

Antxon Alberdi

Instituto de Astrofísica de Andalucía  
(IAA-CSIC)

"La Relatividad General, 100 años después" - IFT - 8/5/2015

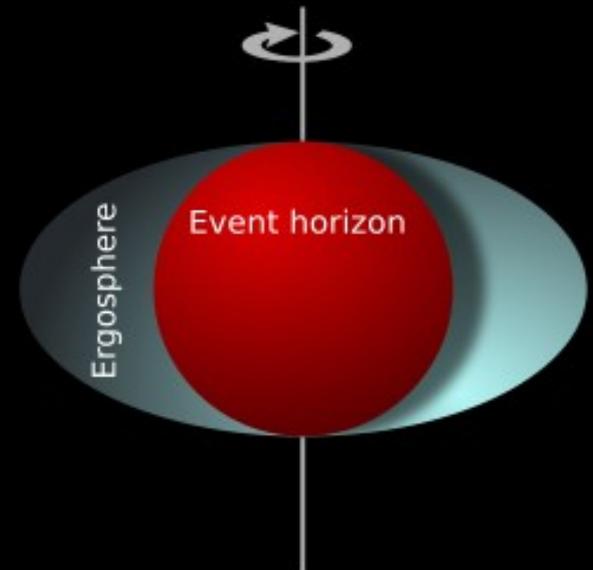
Javier Gorosabel - In Memoriam

# Geometría del Agujero Negro

- Radio de Schwarzschild:  $r_s = \frac{2GM}{c^2}$

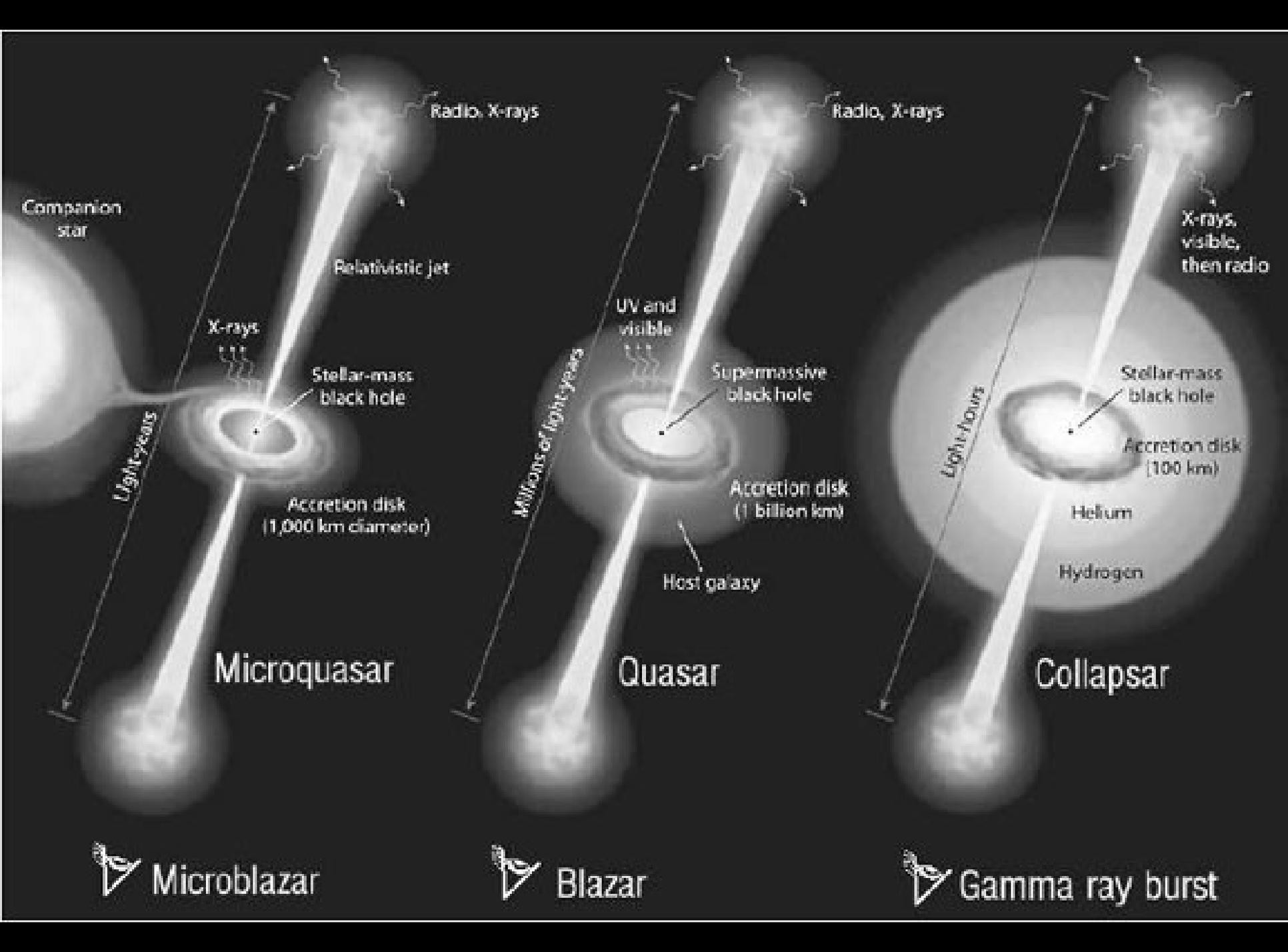
Para la Tierra, sería de 0.9 cm; para el Sol, sería de 3 km

- Para un agujero negro en rotación: ergosfera



# Propiedades de los Agujeros Negros

<u>Objeto</u>	<u>Masa</u>	<u>Radio del Agujero Negro</u>
Tierra	$5.98 \times 10^{27}$ gr	0.9 cm Radio Tierra: 6357 km
Sol	$1.989 \times 10^{33}$ gr	2.9 km Radio Sol: 696.000 km
Enana Blanca	0.8 Masas solares	2.4 km Radio estrella: 10.000 km
SgrA*	$4 \times 10^6$ Masas solares	$9 \times 10^6$ km (0.06 UA)
AGN	$10^9$ Masas solares	$3 \times 10^9$ km (20 UA)



# Propiedades de los Agujeros Negros

□ El origen de la luminosidad resulta de la captura de materia: una fracción de la energía cinética liberada por unidad de tiempo por la materia capturada se transformaría en luminosidad:

$$L \sim \frac{1}{2} \frac{dM}{dt} V^2 = (GM \frac{dM}{dt})/R$$

R: Radio del Objeto Compacto

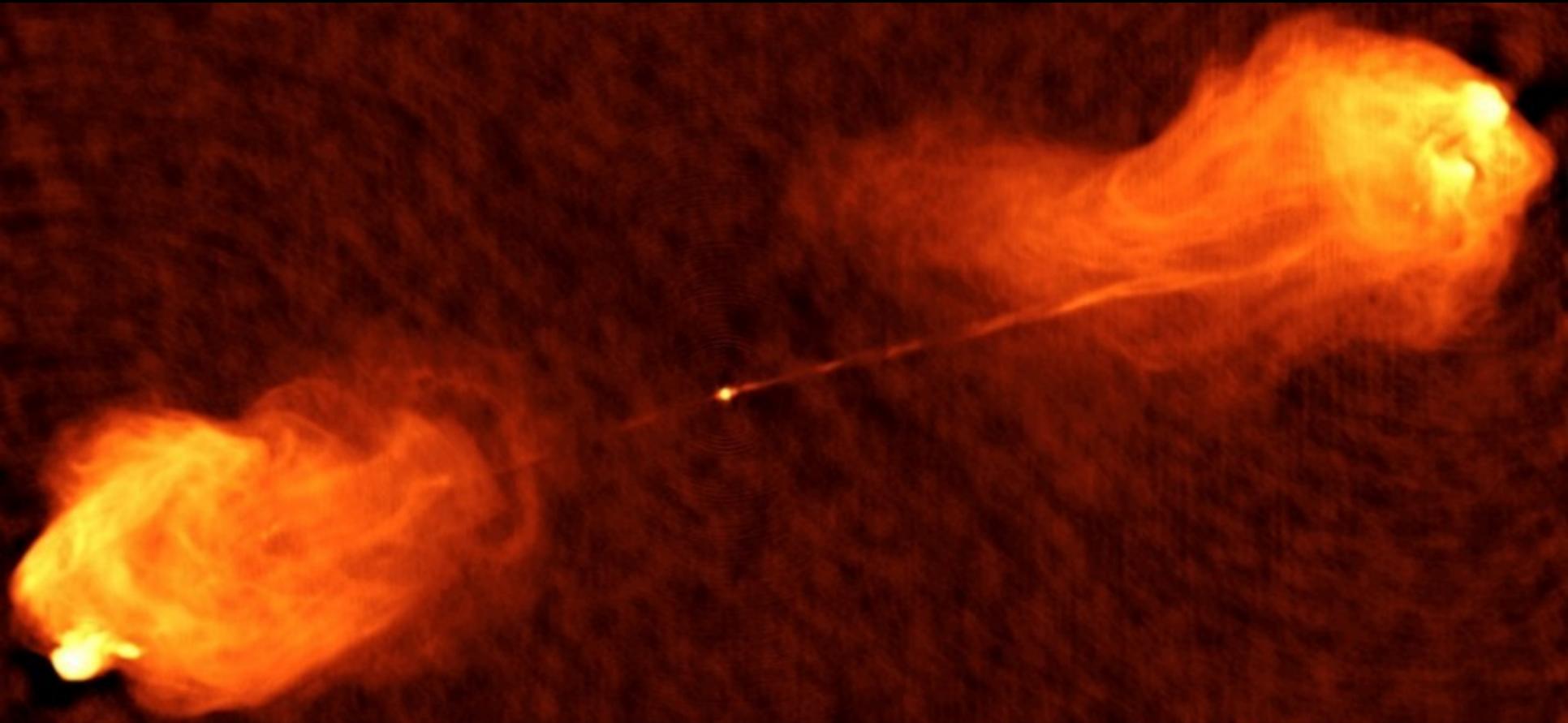
$dM/dt$ : Ritmo de acrecimiento de materia

V: Velocidad de caída de materia  $V^2=2GM/R$

□ La incorporación de materia se realiza a través de un disco de acrecimiento, perpendicularmente al cual se eyectan los chorros de plasma relativista. La temperatura de la última órbita estable es

$$T \sim 2 \times 10^7 M^{-1/4} \text{ con } T \text{ (K) y } M \text{ en masas solares.}$$

	<b>Microcuásar</b>	<b>AGN</b>	<b>GRB</b>
<b>BH (Msol)</b>	<b>Estelar</b>	<b>Supermasivo</b>	<b>Estelar</b>
<b>Disco de acrecimiento</b>	<b>1000 Km</b>	<b>10<sup>9</sup> km</b>	<b>100 km</b>
<b>Chorro relativista</b>	<b>Años-luz</b>	<b>Millones de años-luz</b>	<b>Horas- luz</b>

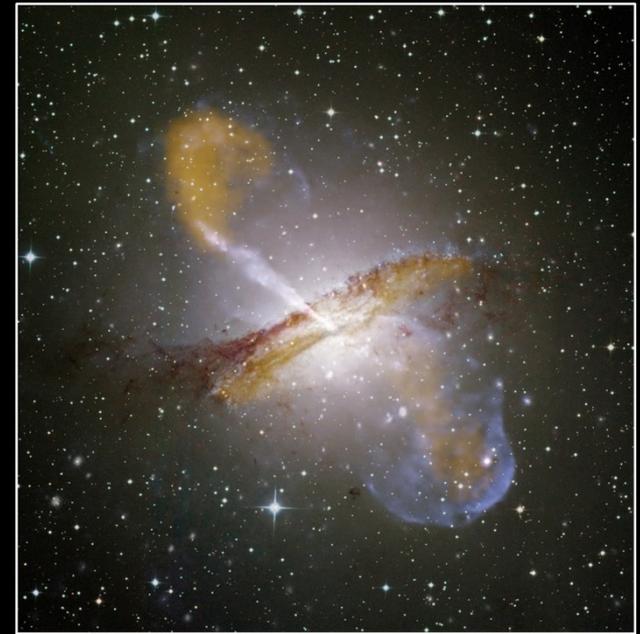


Cyg A → La presencia de un objeto central supermasivo

# Núcleos Activos de Galaxias (AGNs)

Son los objetos más energéticos del universo, y emiten desde longitudes de onda de radio a los rayos Gamma.

Presentan gran variabilidad en escalas de tiempo inferiores a un día, siendo extremadamente compactas



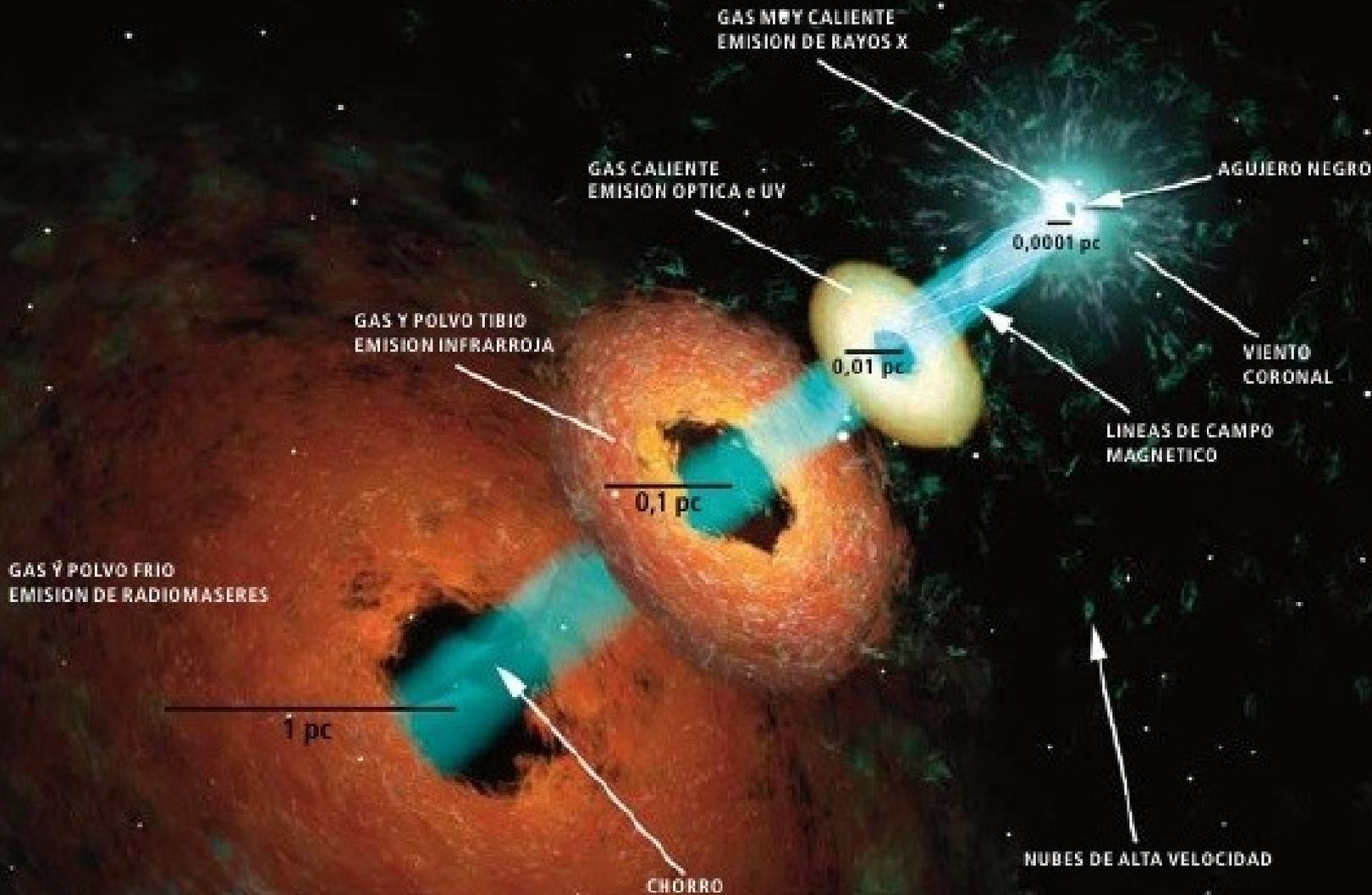
X ray + Optical + Submillimetre + Radio Composition



Main Actor!

Los AGNs emiten su energía debido al acrecimiento de material en agujeros negros supermasivos, del orden de  $10^{8-9} M_{\odot}$ .

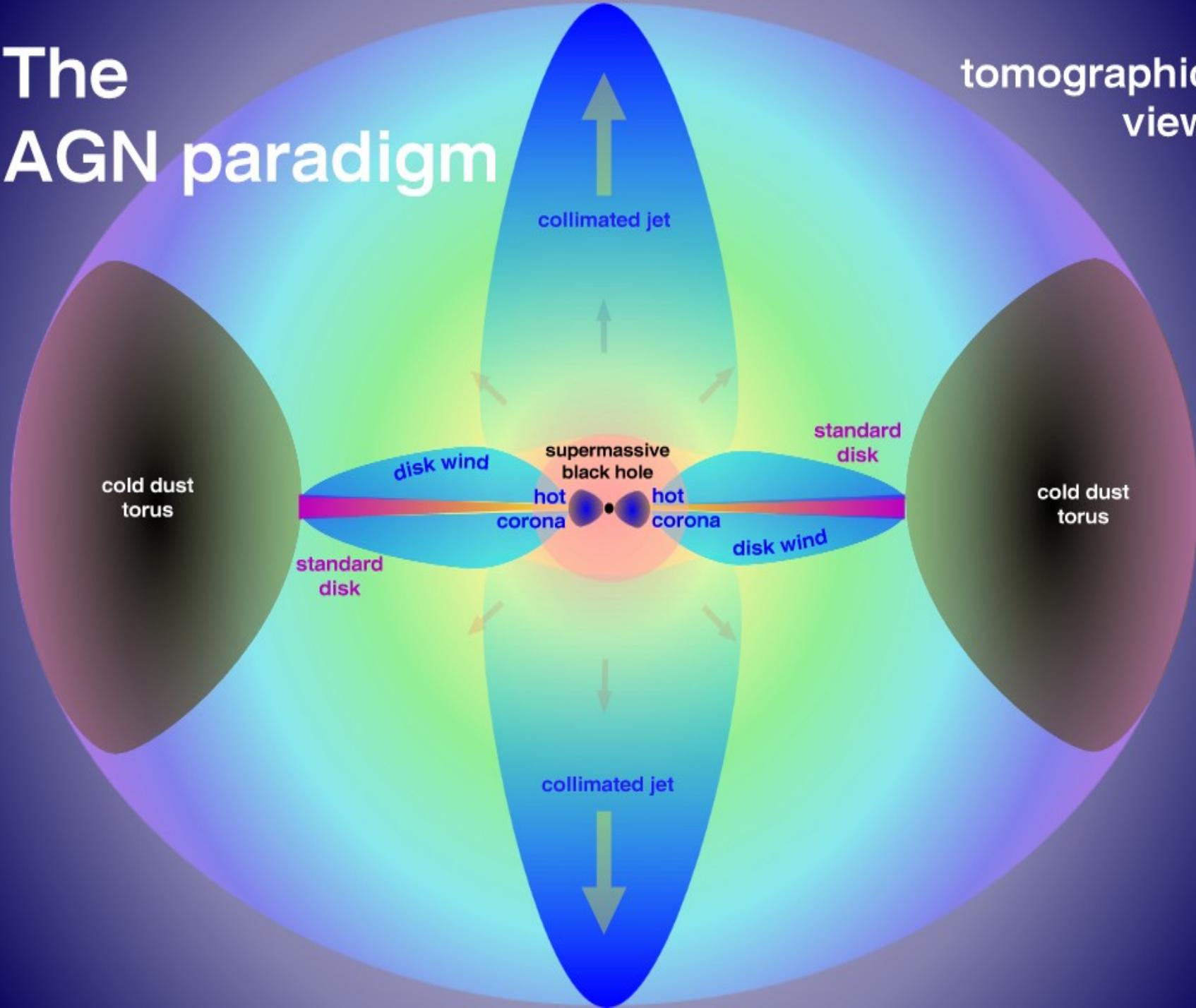
El material del disco es eyectado a velocidades relativistas en forma de chorros bidireccionales colimados.



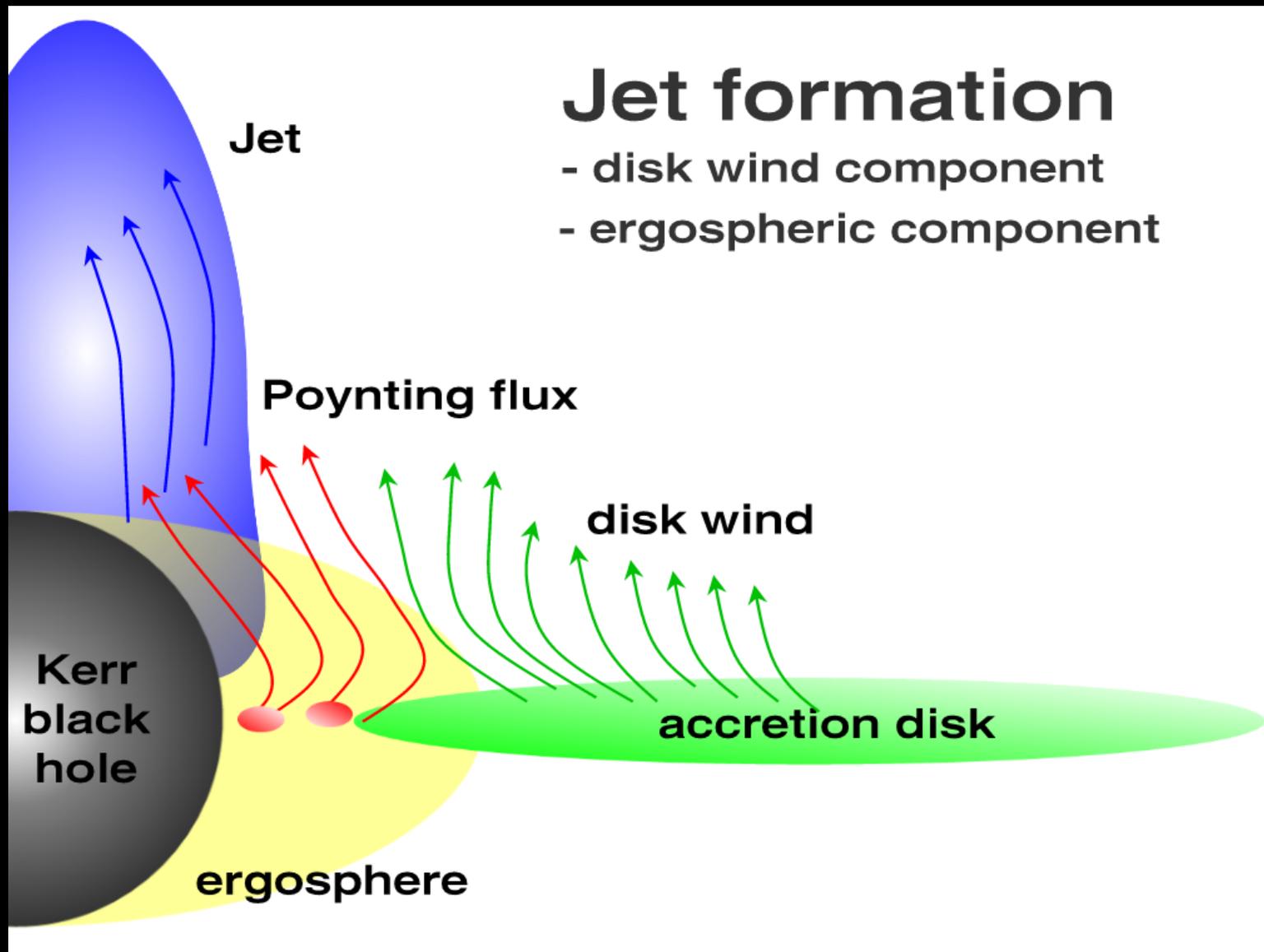
Ingredientes Básicos: Central BH + Disco de Acreción  
(rotación + campo magnético)

# The AGN paradigm

tomographic view



# Simbiosis Jet-Disco



# Evidencias observacionales de la existencia de Agujeros Negros

- Indicios de carácter dinámico: movimiento del gas en torno al objeto central (dinámica del gas) y movimiento de las estrellas (dinámica estelar)
- Aproximaciones al disco de acrecimiento:
  - Imágenes de discos circumnucleares a escalas de kpc
  - Imágenes de discos a escalas de 100 pc
  - Espectros de gas ionizado a escalas de 3-10  $R_{sch}$
- Descubrimiento y detección de la línea de Fe a 6.4 KeV (en el rango de los rayos X)
- Variabilidad a cortas escalas de tiempo (minutos)

# Evidencias observacionales: Dinámica del gas (M87)

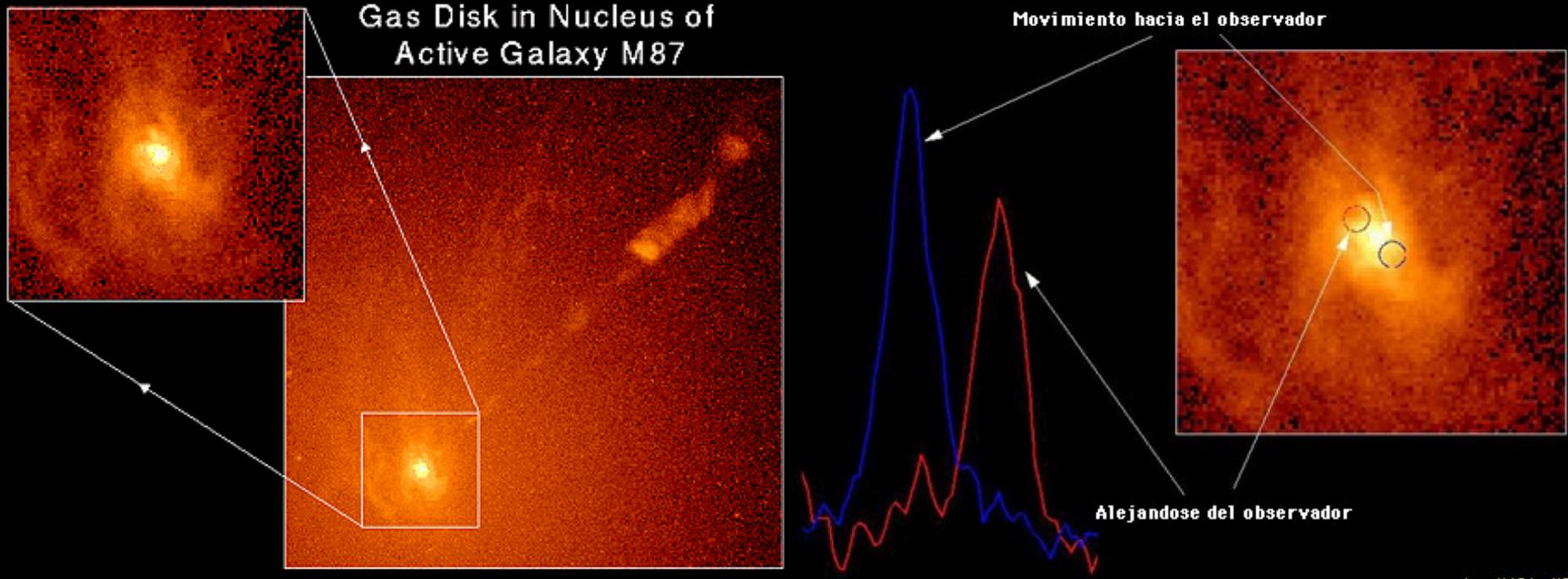
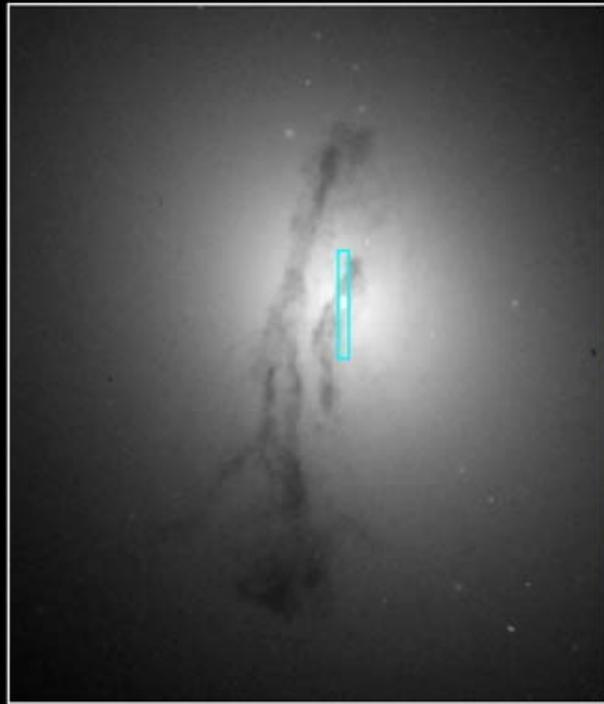


foto NASA - HST

- ❑ Existencia de un jet relativista de 6500 años-luz de longitud
- ❑ Disco perpendicular al chorro en rotación: 550 km/s a unos cientos de parsec
- ❑ Masa del agujero negro: 3000 millones  $M_{\text{sol}}$

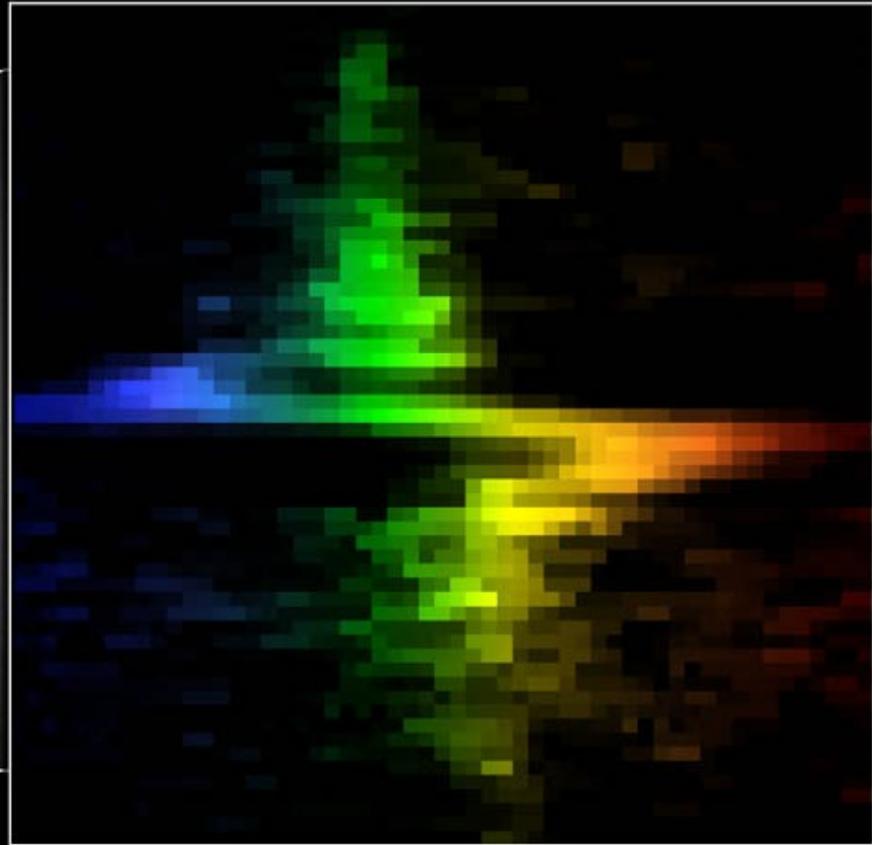
# Evidencias observacionales: Dinámica del gas (M84)

Galaxy M84 Nucleus



WFPC2

Hubble Space Telescope

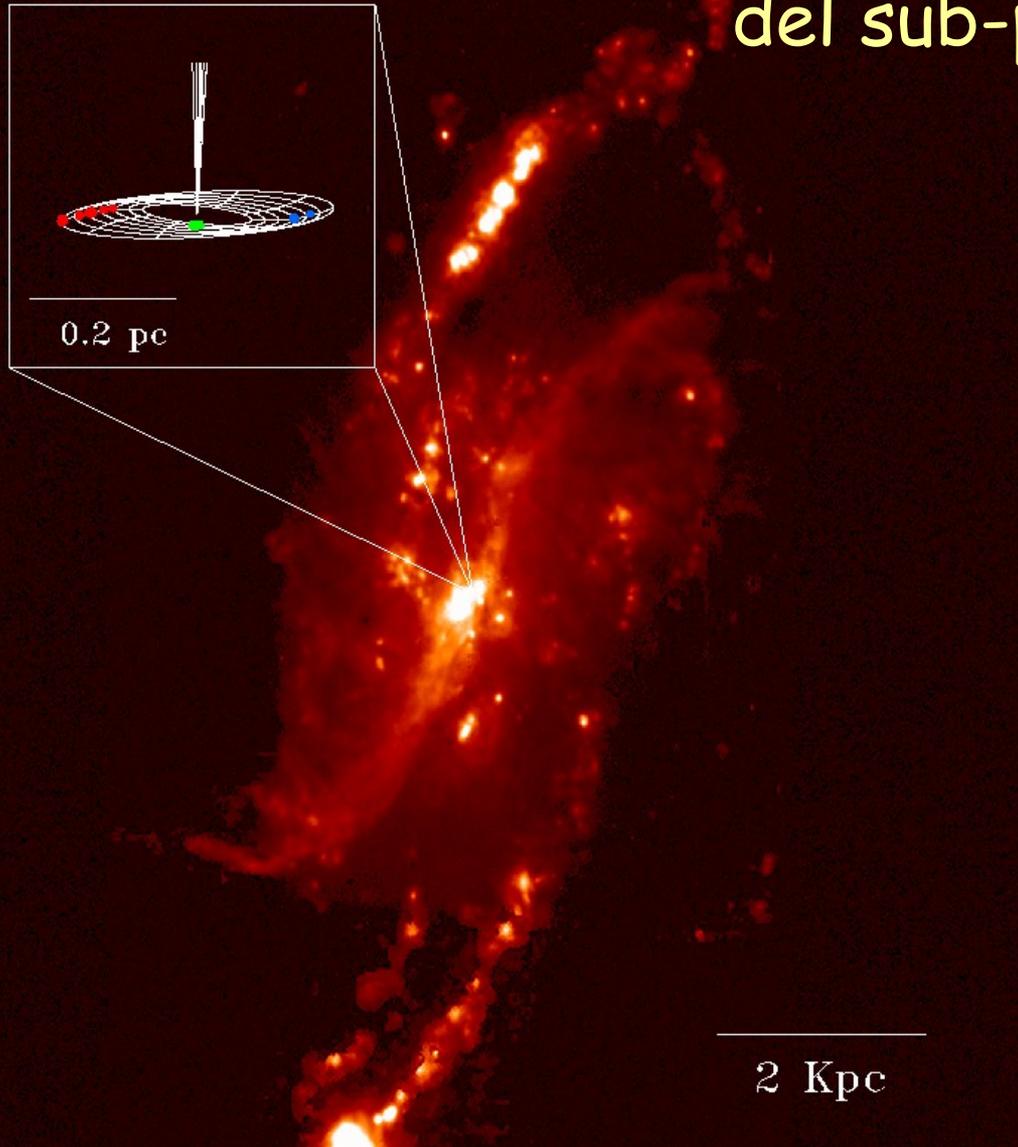


STIS

PRC97-12 • ST Sci OPO • May 12, 1997 • B. Woodgate (GSFC), G. Bower (NOAO) and NASA

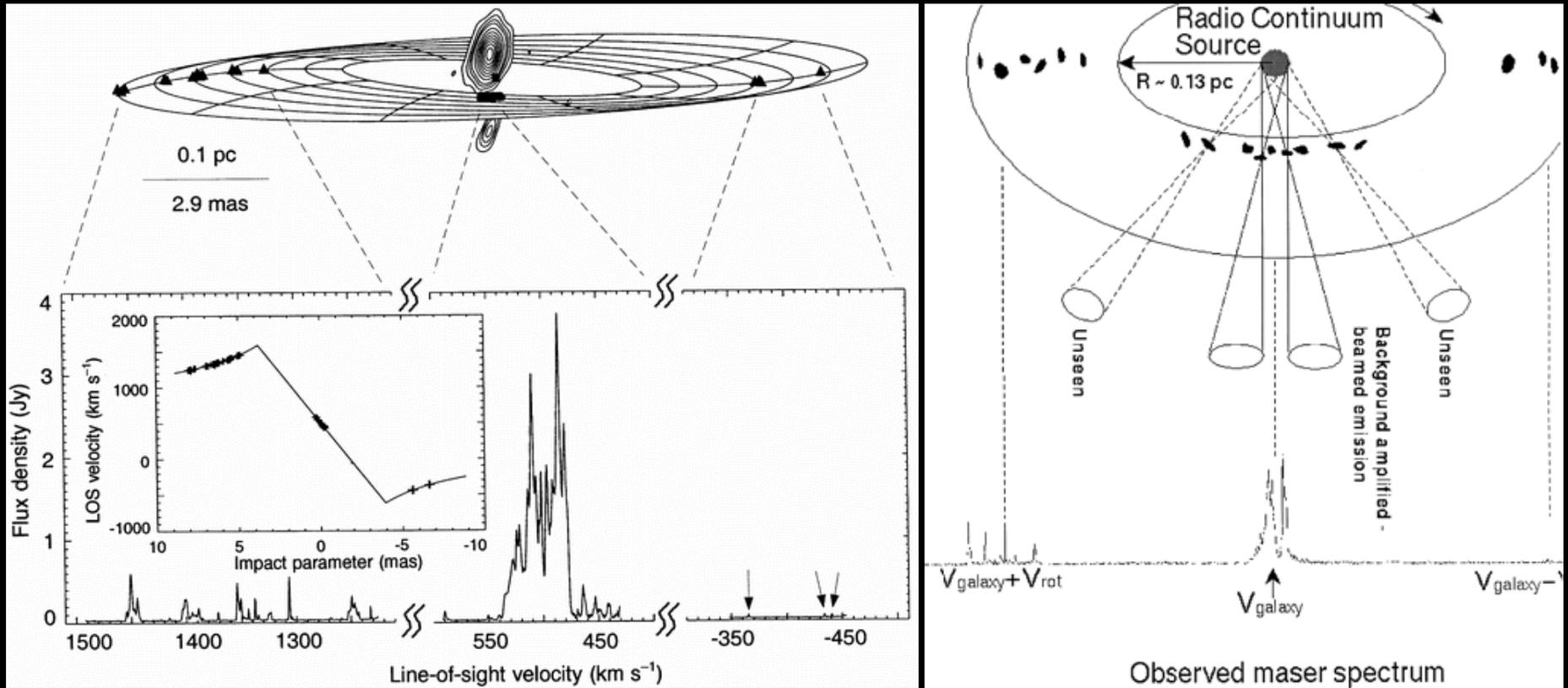
- ❑ M84 está situada en el cúmulo de Virgo, a 50 millones de años-luz
- ❑ Velocidades del gas de 400 km/s a 26 años-luz del centro, cambiando de signo rápidamente → Disco de gas en rotación →  $M_{\text{bh}} = 300$  millones  $M_{\text{sol}}$

# NGC4258: Altas velocidades de rotación a escalas del sub-pc



- Galaxia espiral, tipo Sb
- Presenta un chorro radio, y un chorro óptico que se extiende hasta 5-10 kpc.
- Distancia:  $6.4 \pm 0.9$  Mpc
- Velocidad sistémica:  $472 \pm 4$  km/s

# NGC4258: Altas velocidades de rotación a escalas del sub-pc

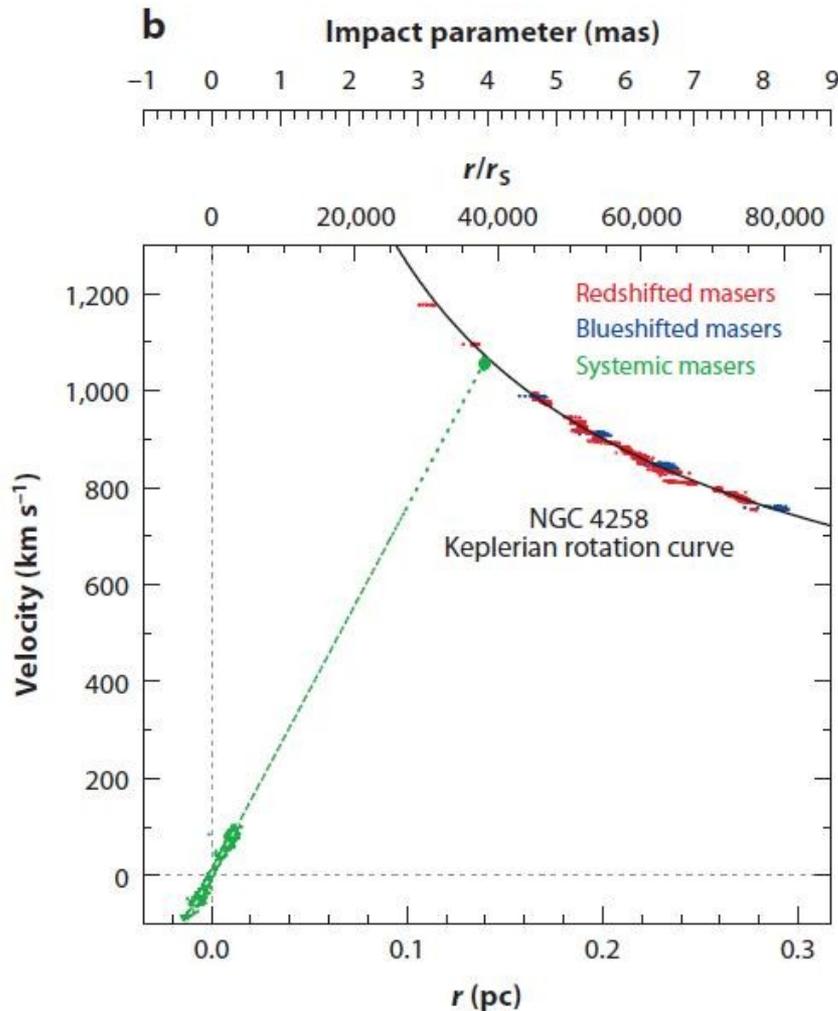
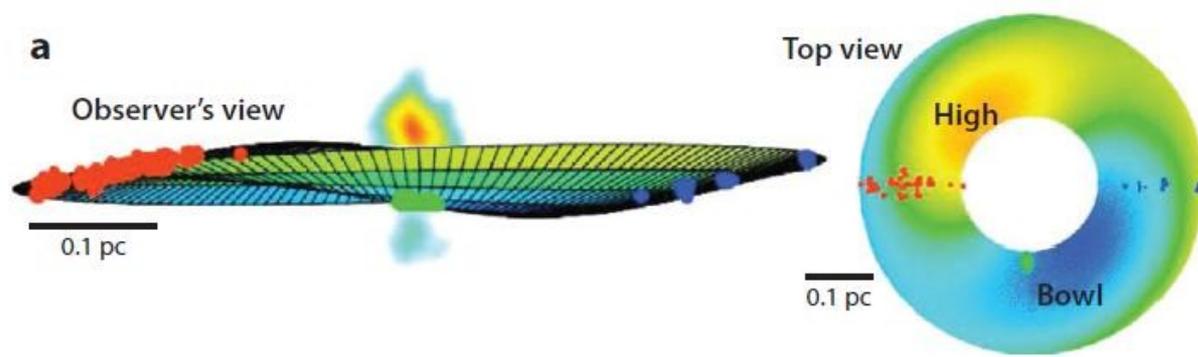


## Parámetros del disco molecular trazados por máseres de vapor de agua:

Radio interno: 0.13 pc Velocidad interna de rotación: 1080 km/s

Radio externo: 0.25 pc Velocidad externa de rotación: 770 km/s Periodo de rotación ext: 2100 yr

Anchura del disco:  $\leq 0.003$  pc  $\rightarrow$  IMPORTANTE: Disco fino, visto de canto "edge-on"



# NGC4258: Altas velocidades de rotación a escalas del sub-pc

Propiedades del disco de acrecimiento:

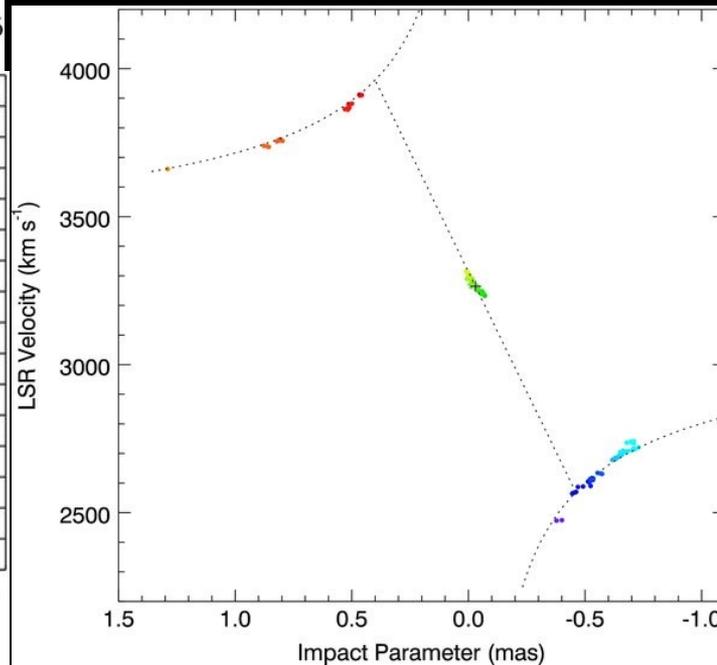
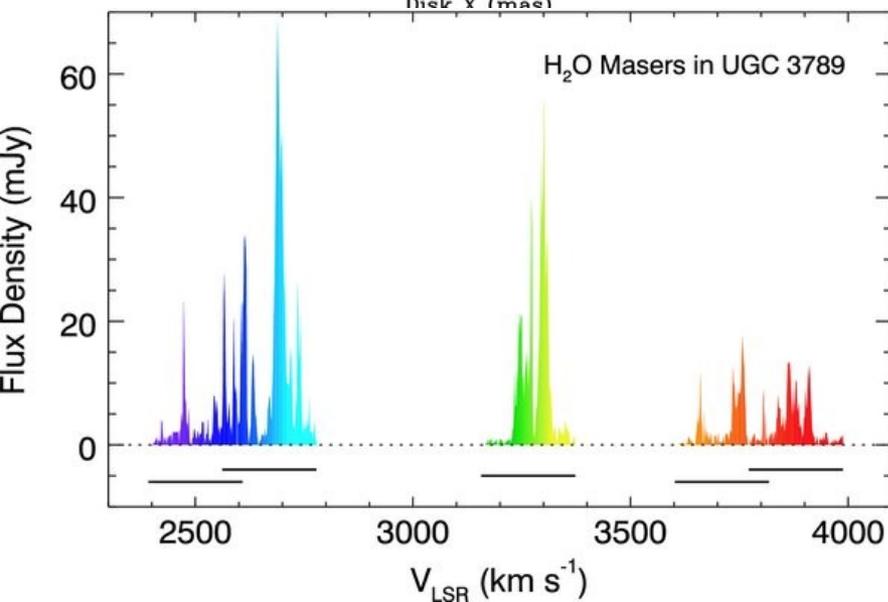
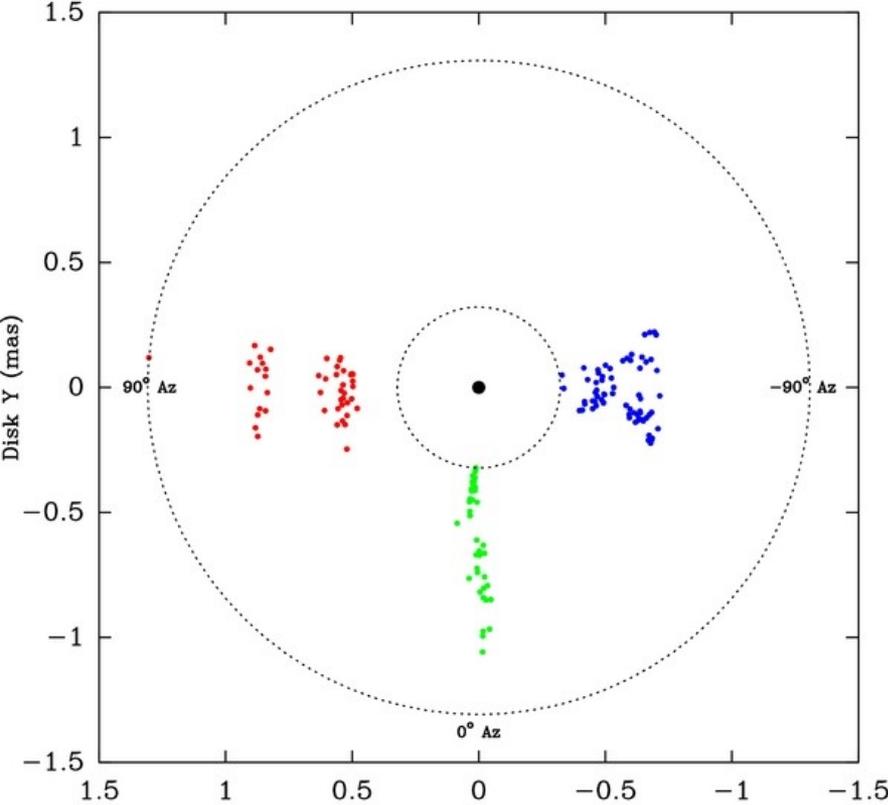
- Disco fino
- Ligeramente alabeado
- Rotación kepleriana  
( $v_{\text{rot}} \propto r^{-1/2}$ )
- Denso ( $\geq 4 \times 10^9 M_{\text{sol}}/\text{pc}^3$ )

Masa central del  
Agujero  
Negro:  $3.9 \times 10^7 M_{\text{sol}}$

# UGC 3789

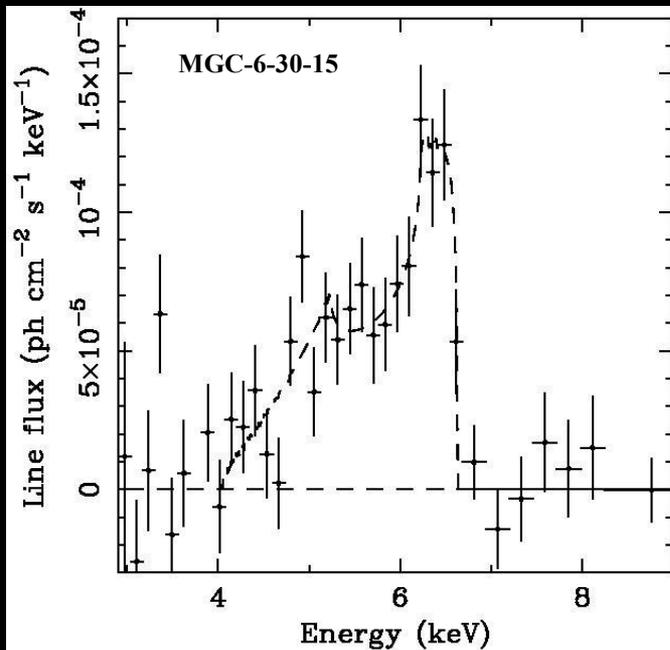
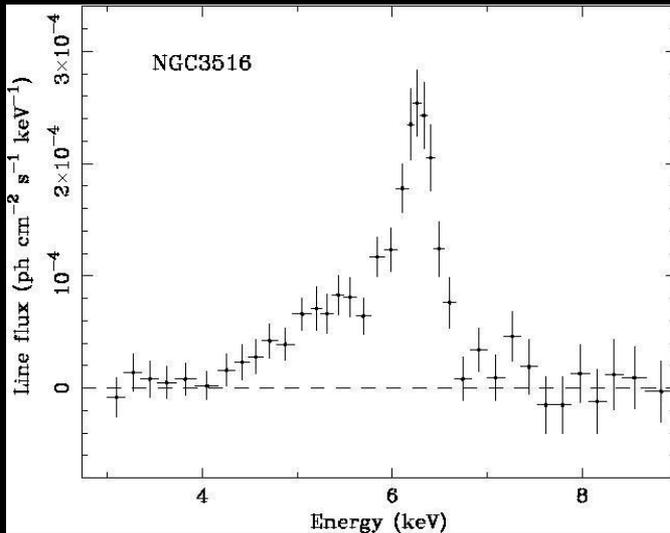
Propiedades del disco de acrecimiento:

- Radio de 0.08 pc
- Velocidad rotacional: 800 km/s
- Velocidad sistémica: 3325 km/s



Masa  
central  
del  
Agujero  
Negro:  
 $1.16 \pm$   
 $0.12 \times$   
 $10^7 M_{\text{sol}}$

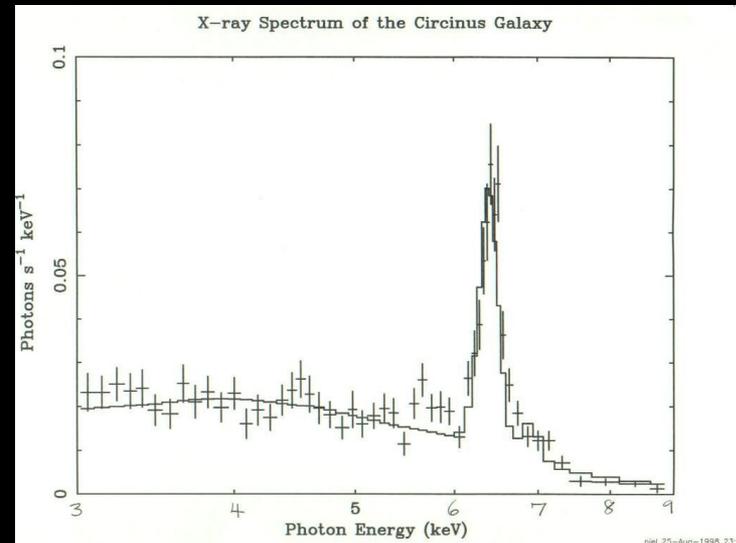
# Evidencias observacionales: Descubrimiento de la línea de Fe a 6.4 keV



□ La línea de Fe (6.4 KeV, Rayos X) es muy ancha (100.000 km/s), desplazada a energías más bajas que la energía en reposo.

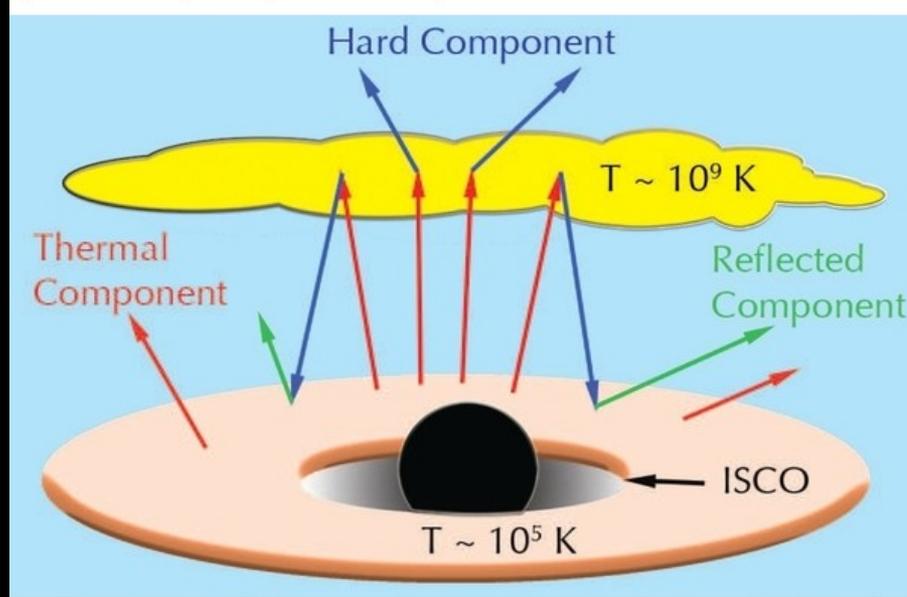
□ Presenta una deformación gravitatoria, que puede explicarse si la línea se origina en las regiones del disco de acrecimiento próximas al agujero negro (desplazamiento en frecuencia).

□ Rápida variabilidad en Rayos X



# Medida del Spin con la línea de Fe - 6.4 keV

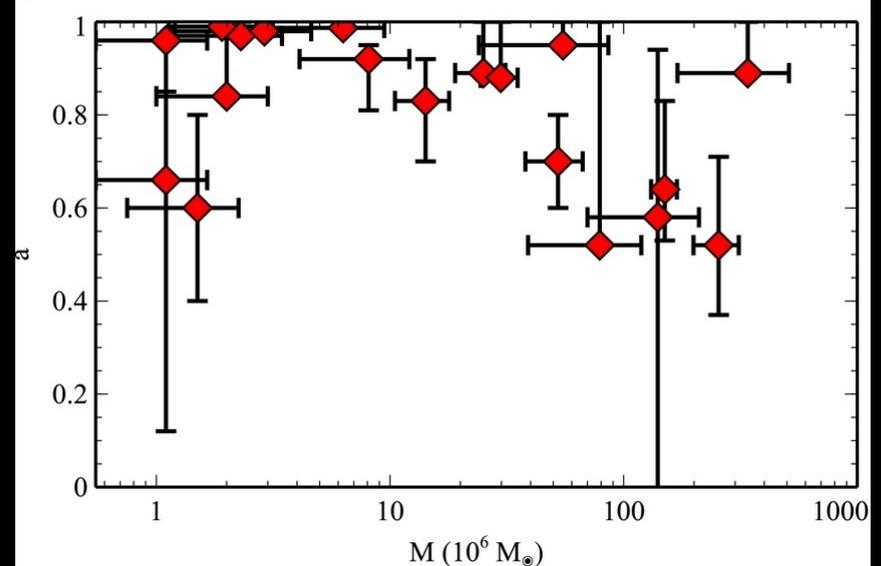
Figure 1 from Christopher S Reynolds 2013 Class. Quantum Grav. 30 244004



Se encuentra un número significativo de BH rotadores rápidos, sobre todo para  $M < 4 \times 10^7 M_{\text{sun}}$

La radiación observada está muy afectada por el "Doppler Boosting" relativista y el corrimiento al rojo gravitacional  $\rightarrow$  modelado: estado de ionización y abundancias del disco, así como la inclinación y el spin (ISCO)

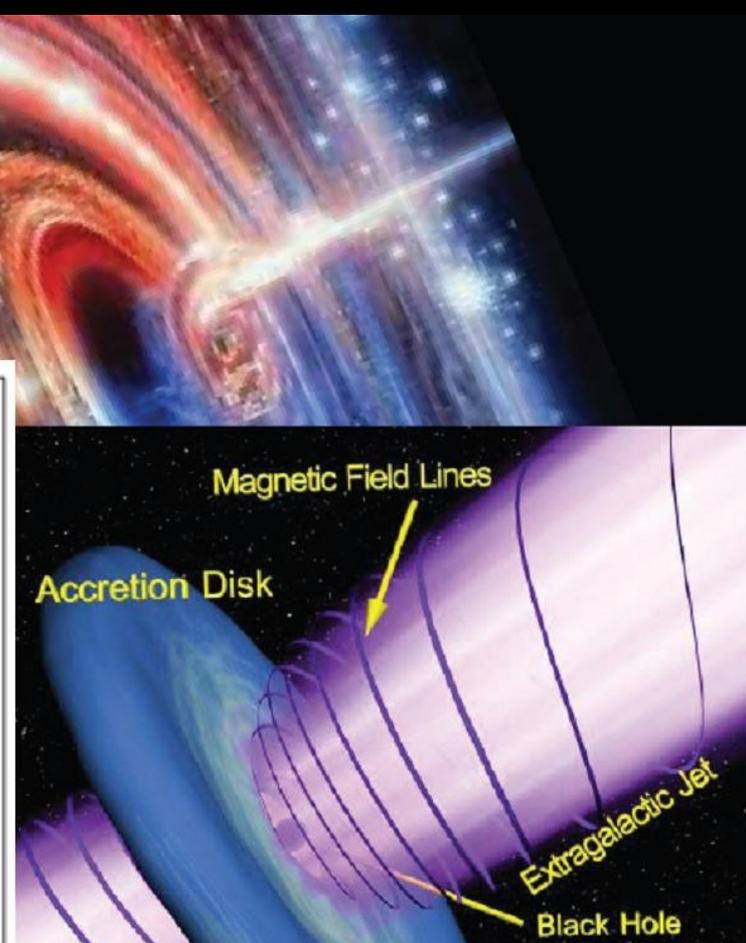
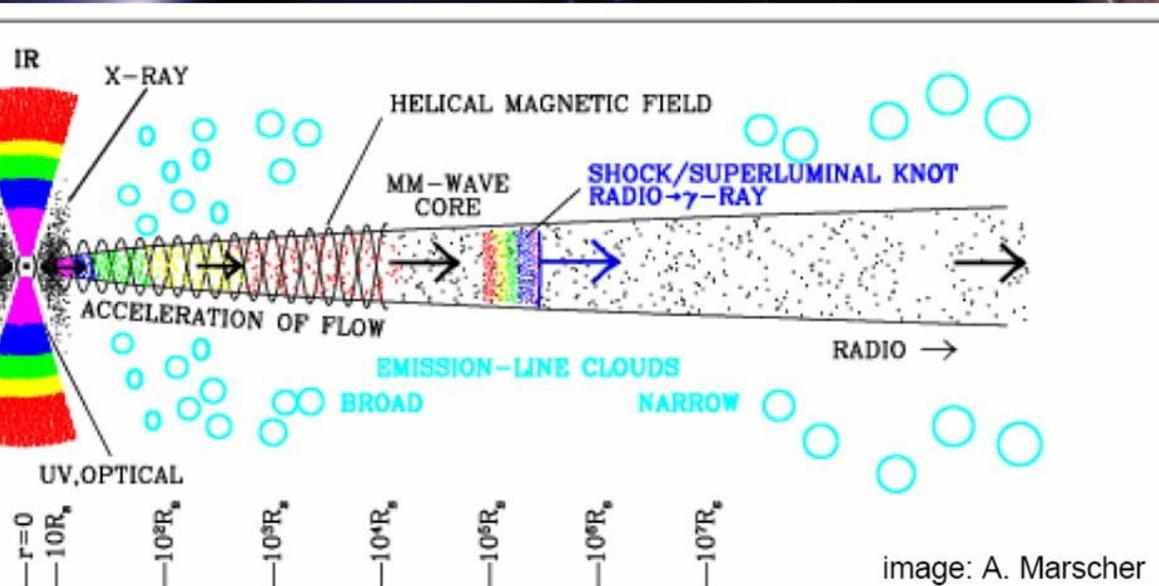
Figure 6 from Christopher S Reynolds 2013 Class. Quantum Grav. 30 244004

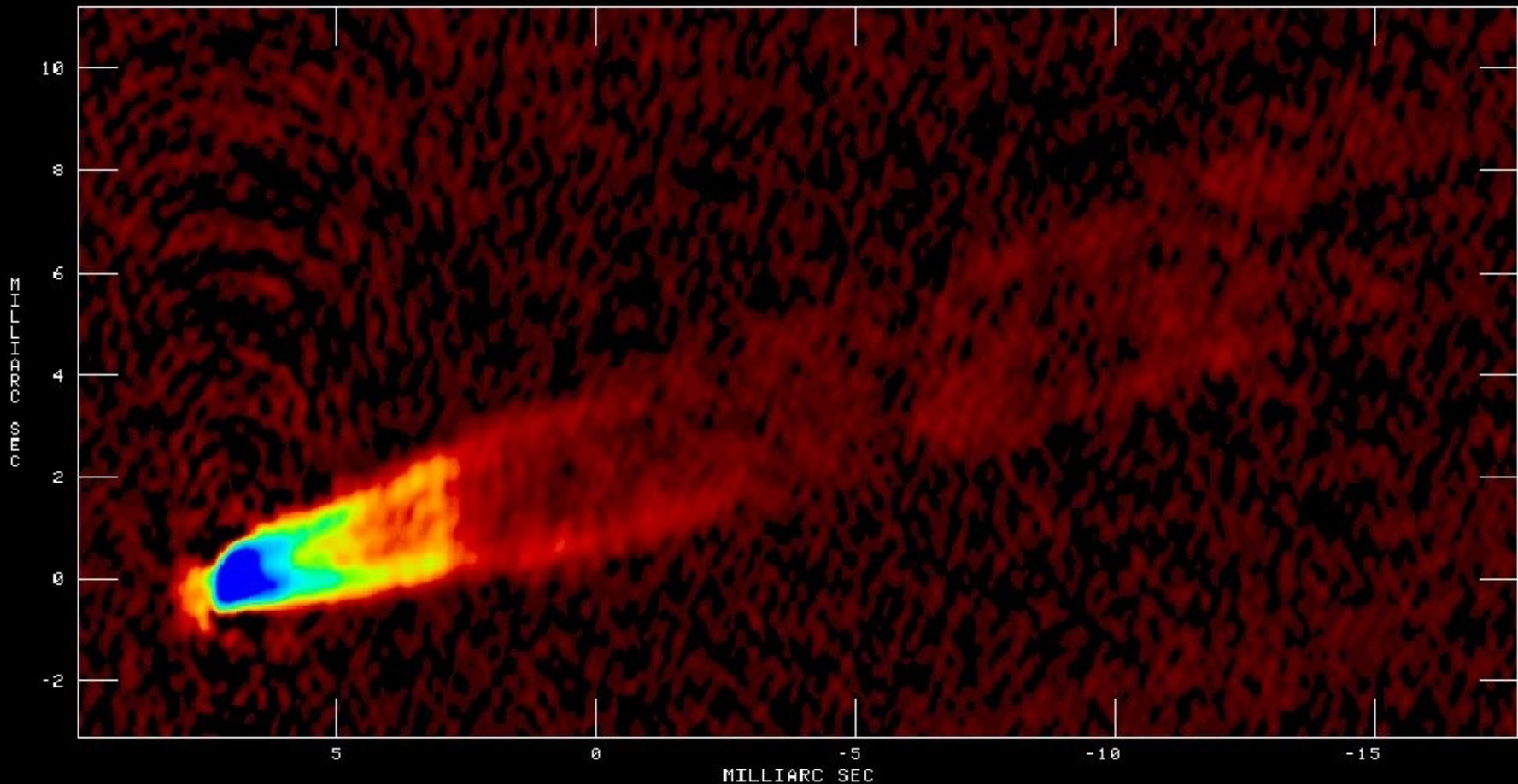


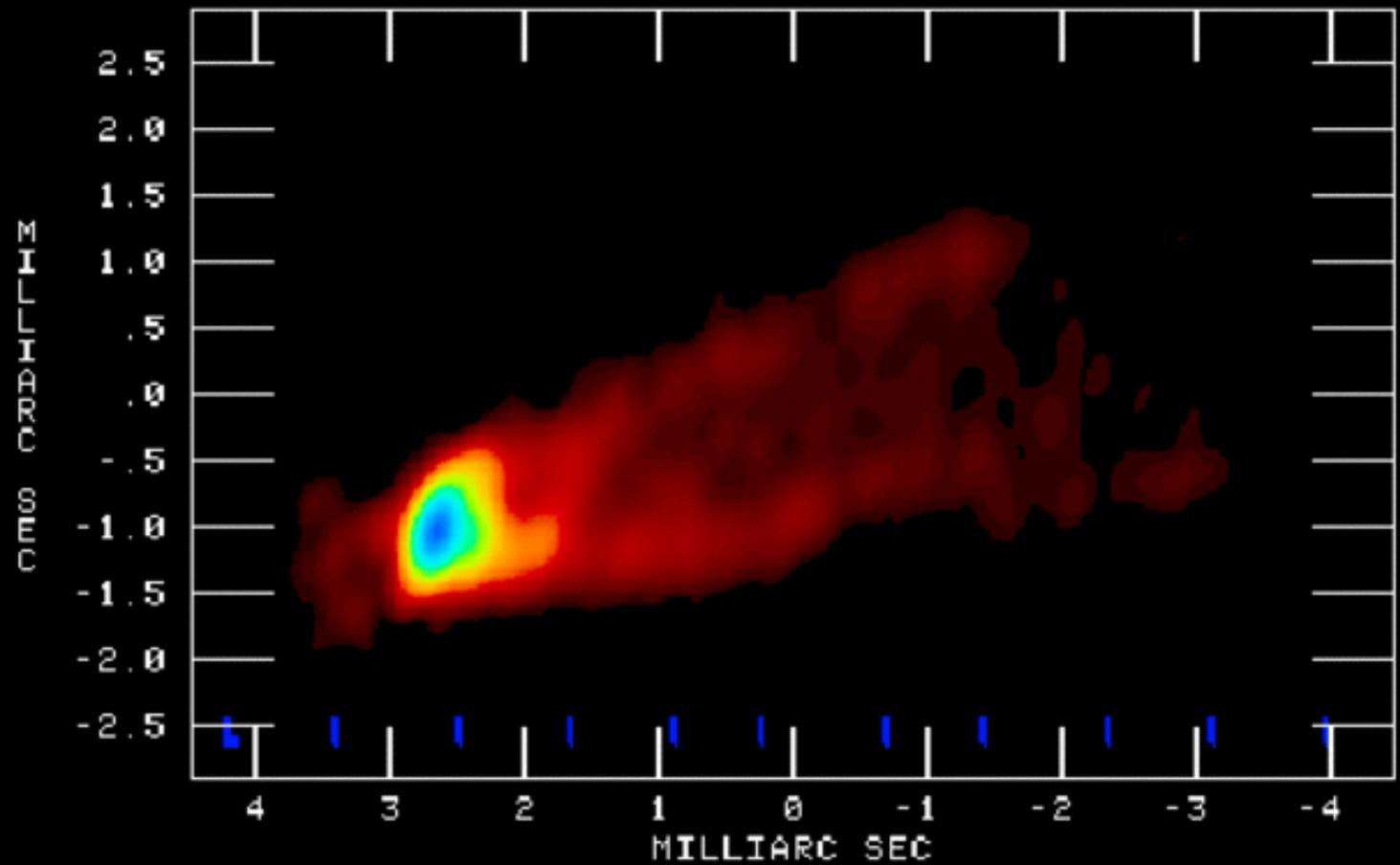
# Los núcleos de los AGN

Objetivo: ¿Cuáles son los procesos físicos que actúan en las regiones nucleares de los AGNs? ¿Cómo se generan y aceleran los chorros relativistas?

Rotating Black Hole







*VLBA 22 GHz Observations*  
*of*  
*3C120*

*José-Luis Gómez*

*IAA (Spain)*

*Alan P. Marscher*

*BU (USA)*

*Antonio Alberdi*

*IAA (Spain)*

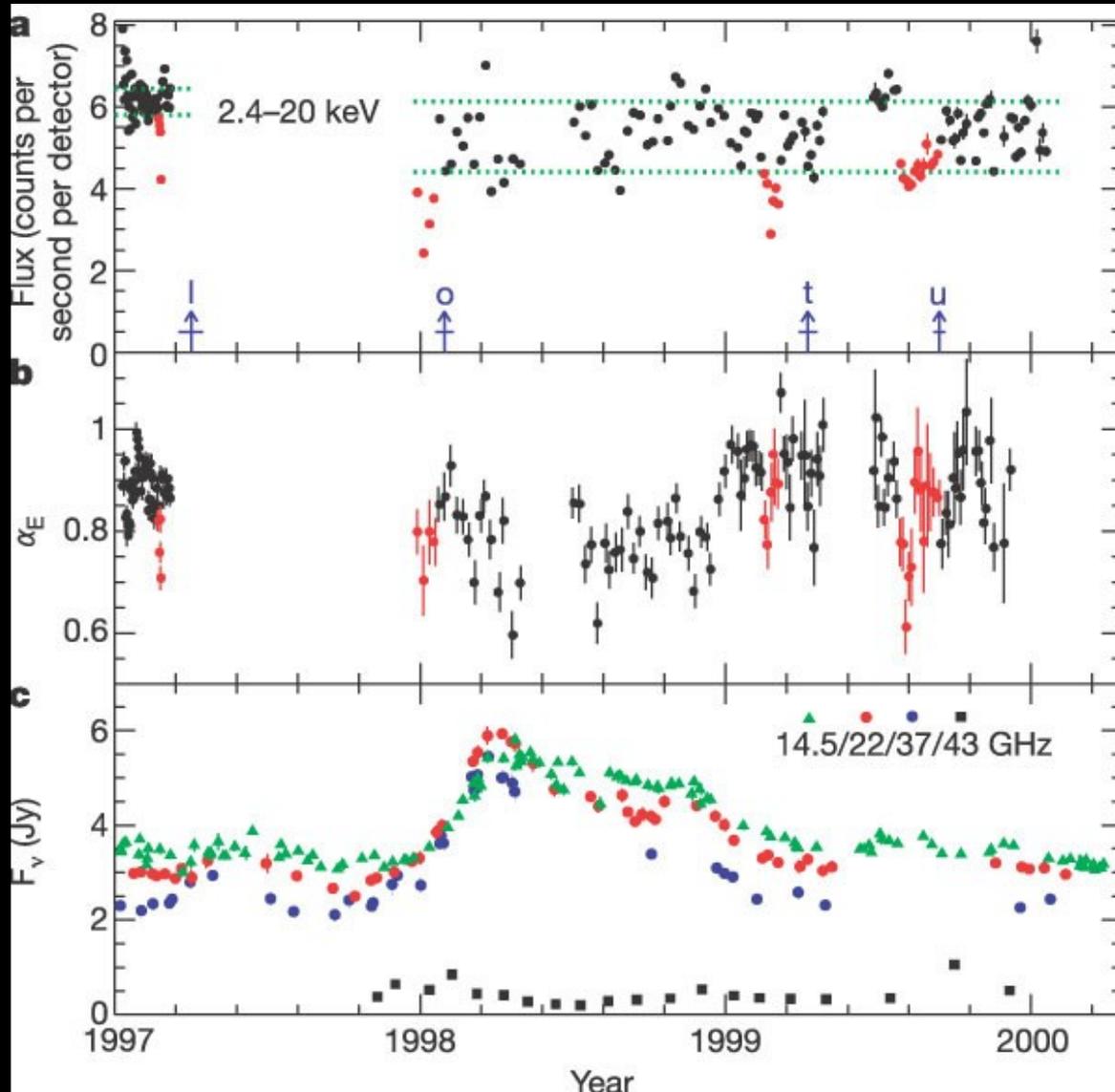
*Svetlana Marchenko-Jorstad*

*BU (USA)*

*Cristina García-Miró*

*IAA (Spain)*

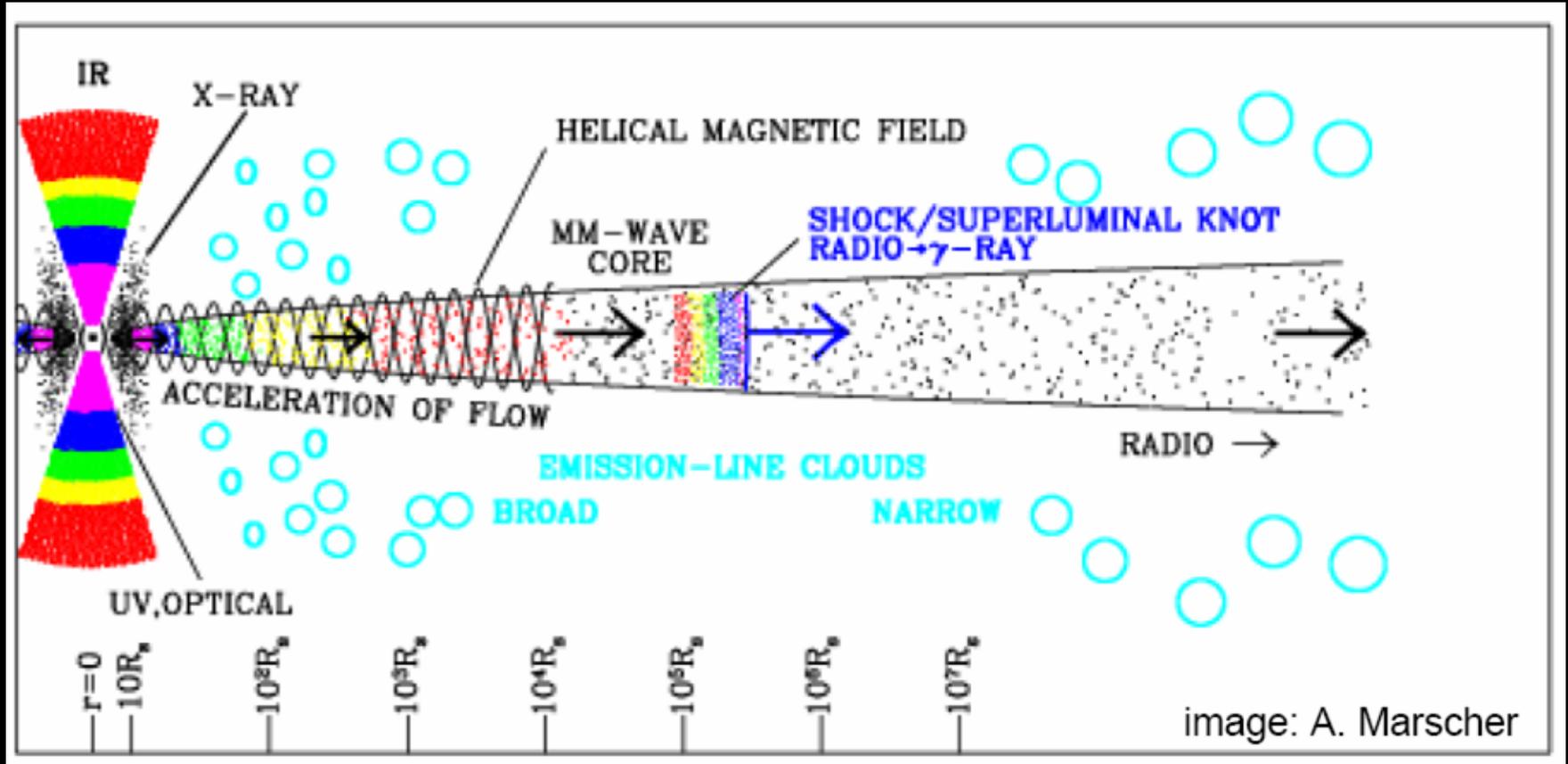
# Evidencias observacionales: chorros relativistas (3C120)



- Anticorrelación entre la emisión radio (chorro) y en rayos X (disco)

- El vaciamiento del disco va acompañado de la emisión de una componente en el jet relativista.

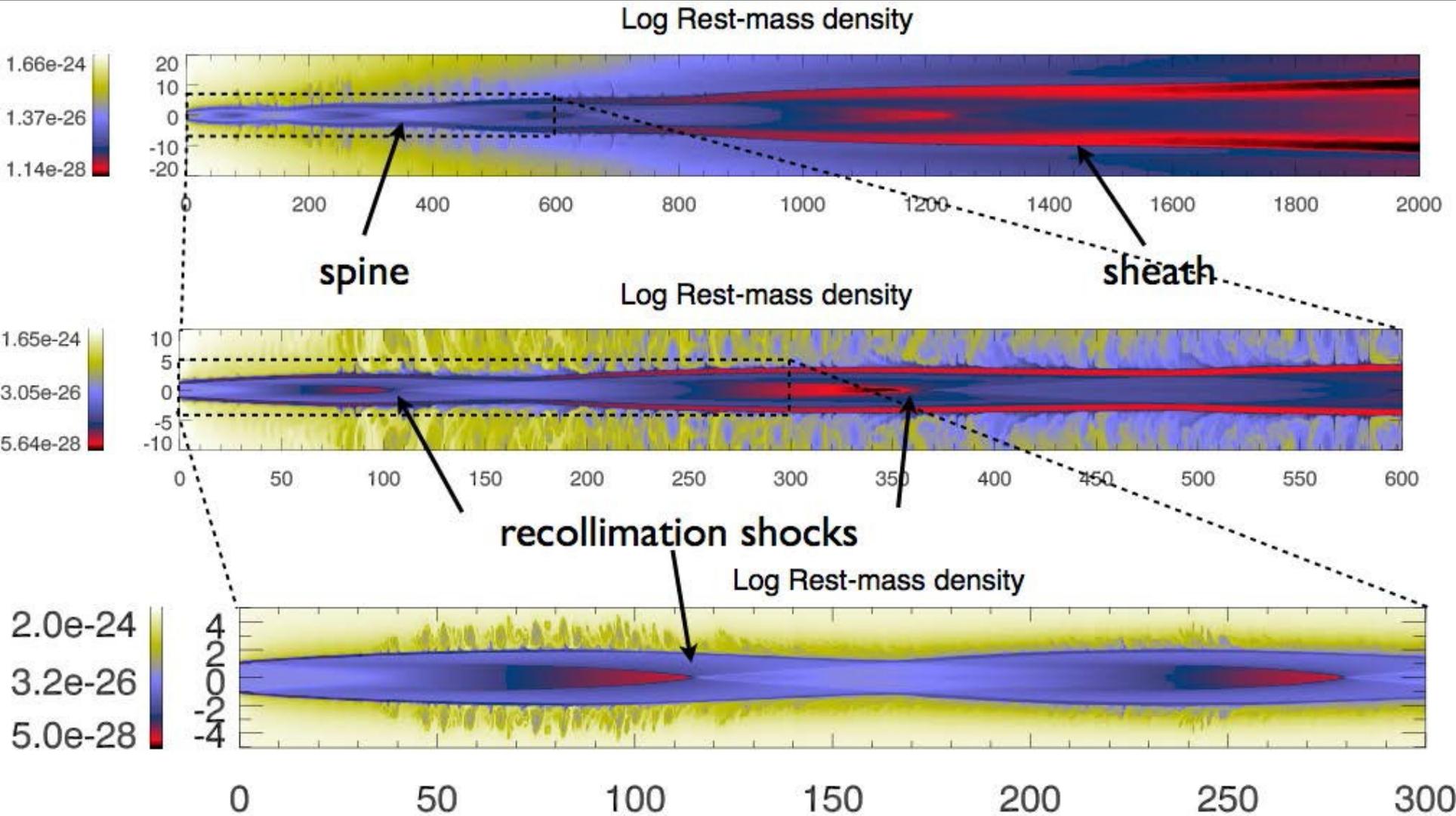
# Física de los Jets Compactos



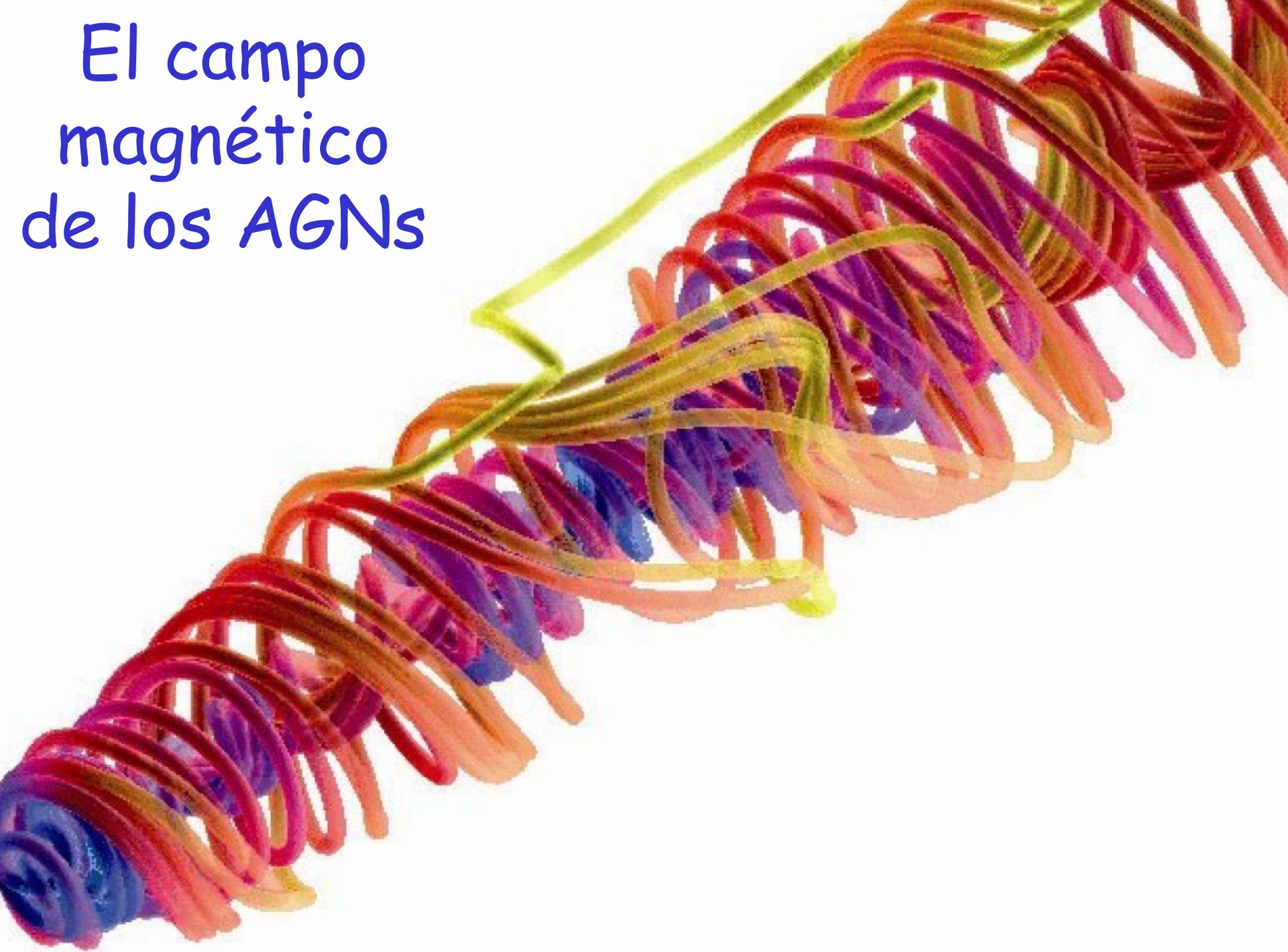
- ❑ Region 1: jet ultracompacto ( $< 1$  pc)  $\rightarrow$  colimación + aceleración
- ❑ Region 2: jet escala-pc ( $\sim 10$  pc)  $\rightarrow$  Choques Relativistas
- ❑ Region 3: jets a gran escala ( $\sim 100$  pc)  $\rightarrow$  inestabilidades

# Física de los Jets Compactos

## Simulaciones



# El campo magnético de los AGNs



# Interferometría en Radio: Cada vez más cerca del Motor Central

$\lambda$	$\nu$	$\theta$	$z=1$	$z=0.01$	$d= 8 \text{ kpc}$
3 mm	86 GHz	45 $\mu\text{as}$	0.36 pc	9.1 mpc	1.75 $\mu\text{pc}$
2 mm	150 GHz	26 $\mu\text{as}$	0.21 pc	5.3 mpc	1.01 $\mu\text{pc}$
1.3 mm	230 GHz	17 $\mu\text{as}$	0.13 pc	3.4 mpc	0.66 $\mu\text{pc}$

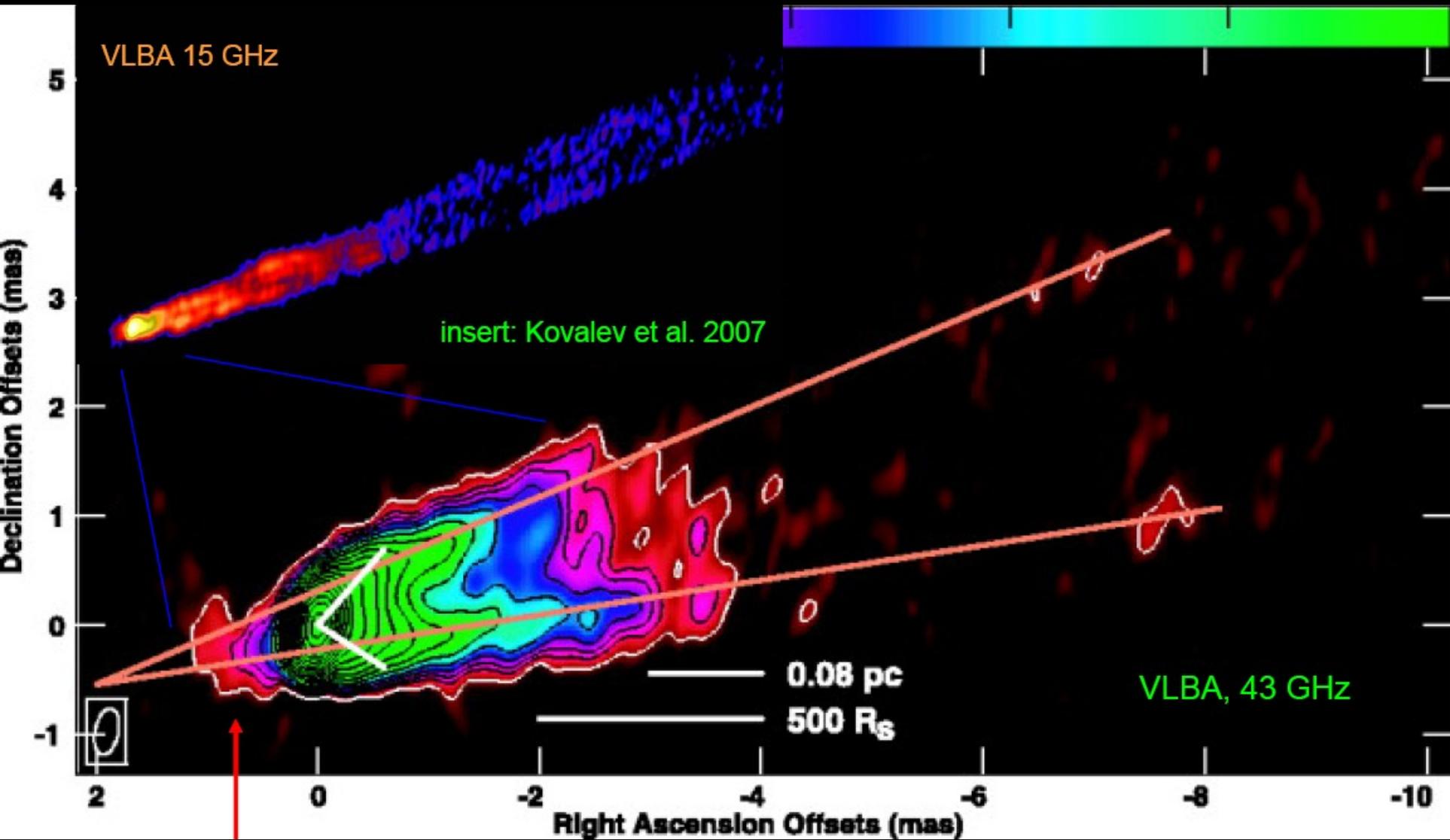
Tamaño Lineal:

$10^3 R_s^9$

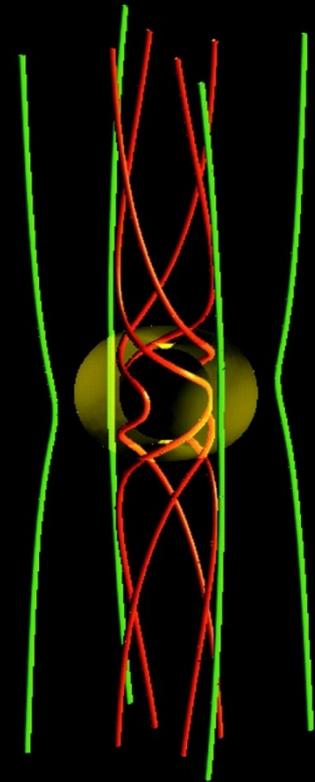
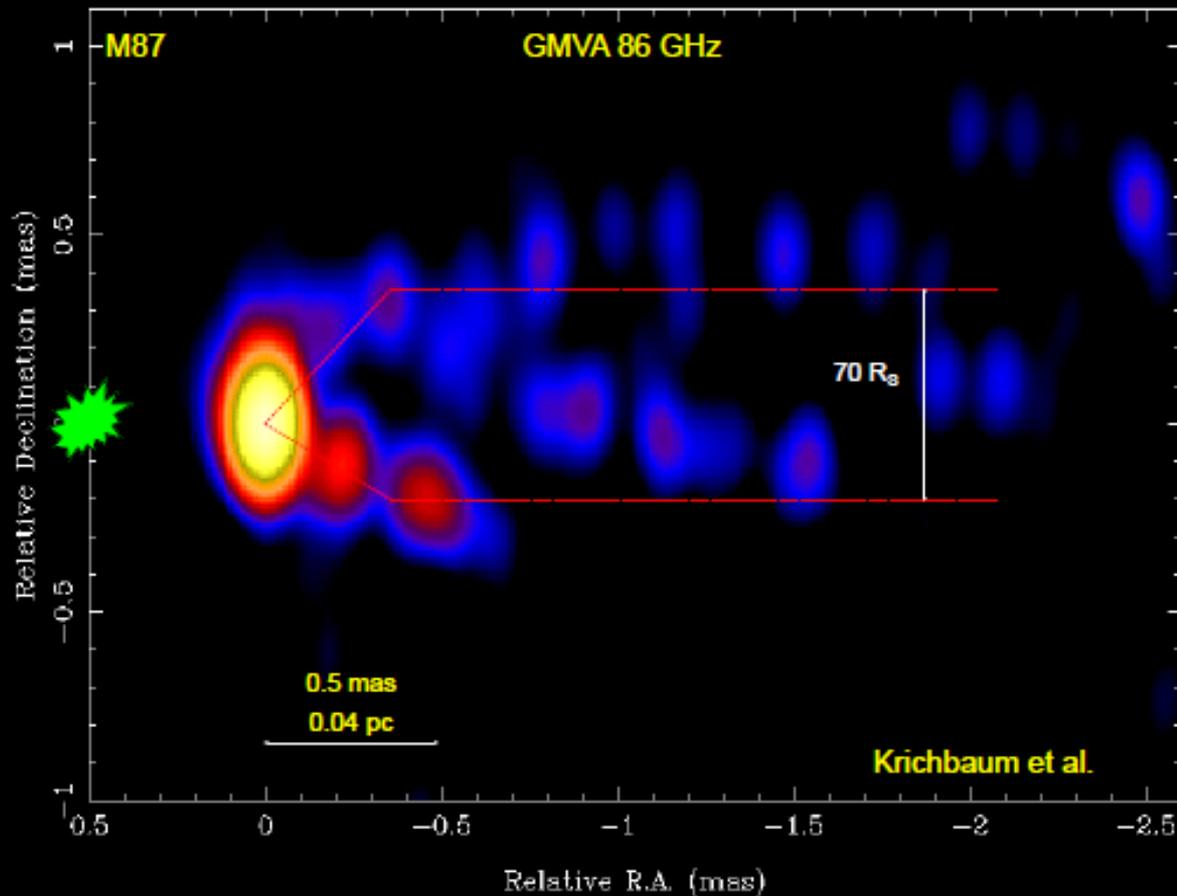
30-100  $R_s^9$

1-5  $R_s^6$

# M87: jet relativista a 86 GHz



# M87: el motor central

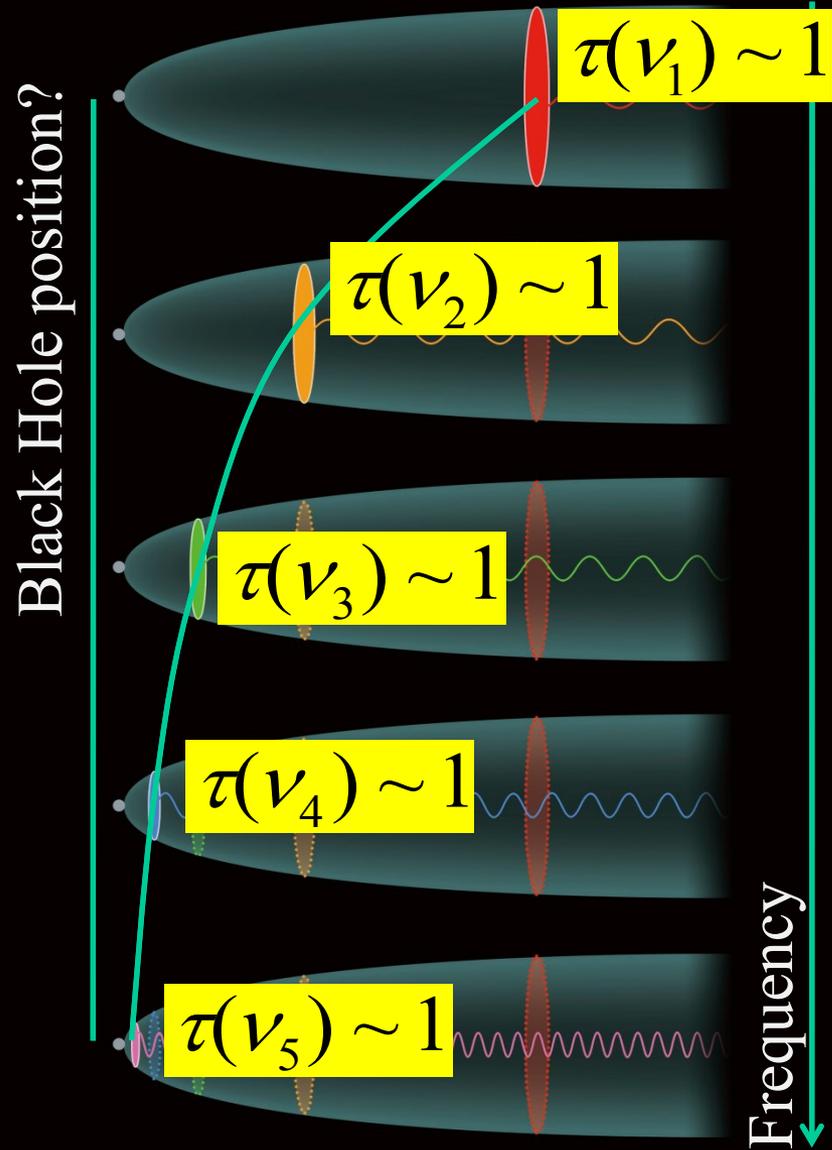


- Tamaño de la base del jet:  $197 \times 54 \mu\text{as} = 21 \times 6 \text{ light days} = 27 \times 8 R_s$
- Bifurcación confirmada: anchura transversal  $\sim 70 R_s$
- Chorro relativista anclado al BH en rotación

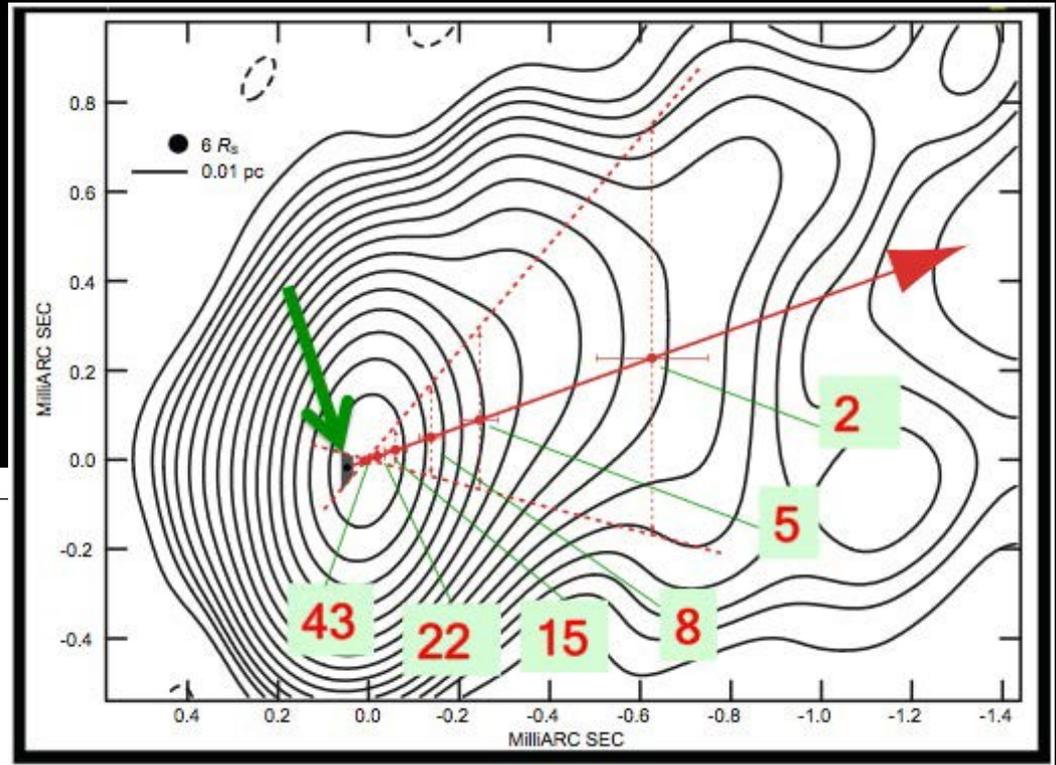
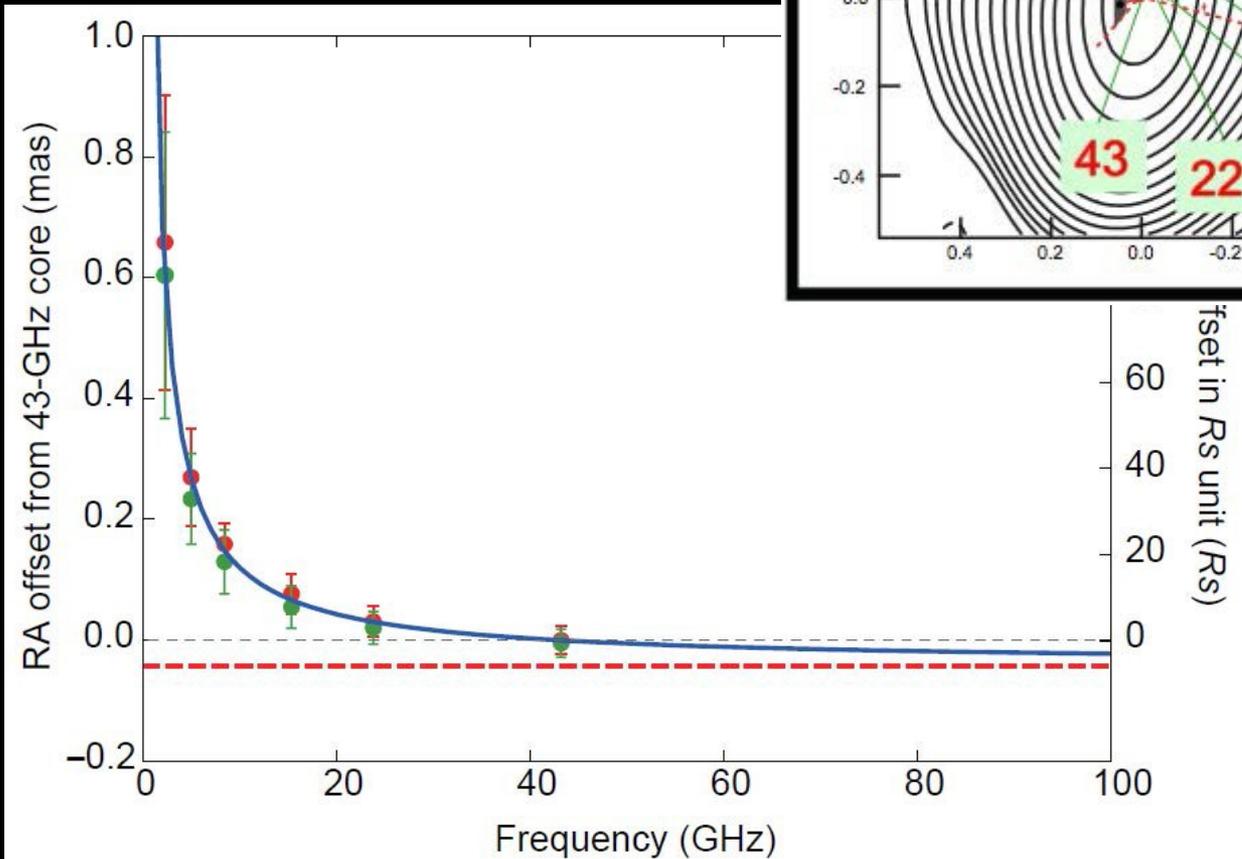
# Core-shift

B y N decrecen con la distancia al origen del jet.  
La posición del VLBI-core depende de la frecuencia  
→  $M_{\text{BH}}$

$$r_{\text{core}}(\tau_{\nu, \text{SSA}}) \propto \nu^{-1/k_r}$$



# M87: Core-Shift



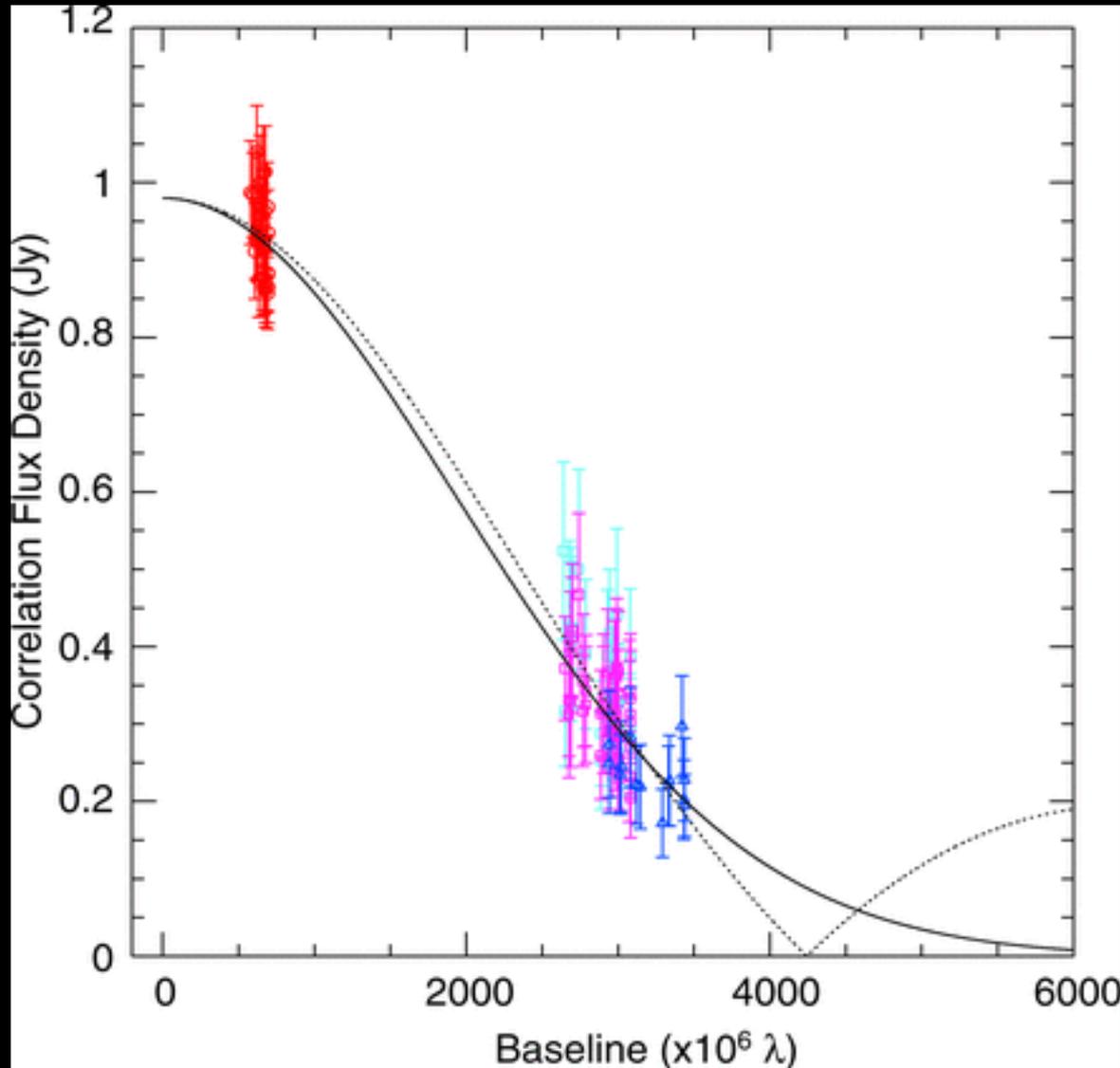
$$r_{\text{RA}}(\nu) \propto \nu^{-0.94 \pm 0.09}$$

Hada et al. Nature 477,  
185 (2011)

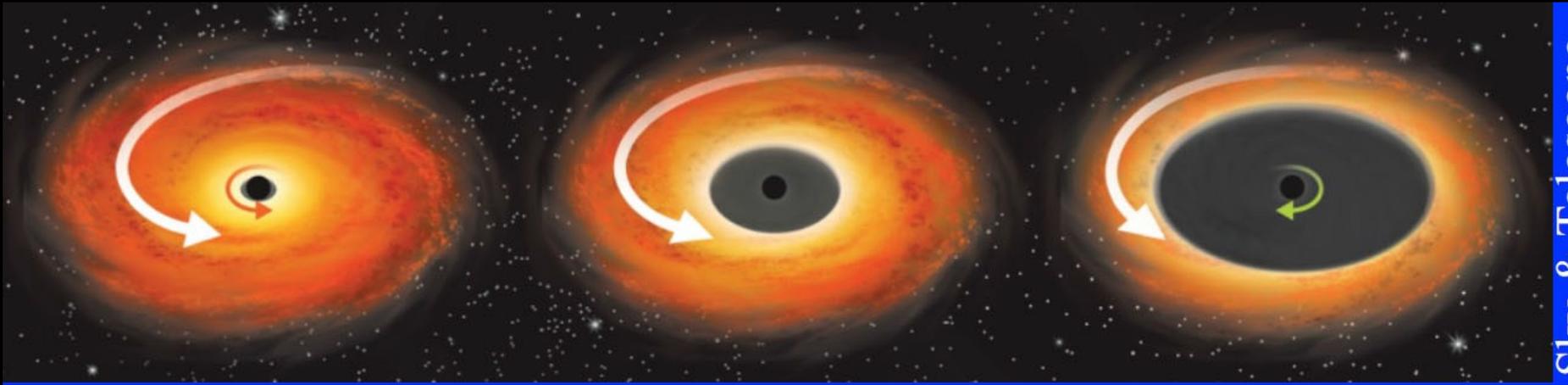
# M87: el jet a 230 GHz

Asumiendo una  
masa para eñ  
SMBH de  
 $6.2 \times 10^9 M_{\text{sun}}$  y  
 $D = 16.7 \pm 0.6 \text{ Mpc} \rightarrow$

Tamaño:  $5.5 \pm 0.4$   
 $R_{\text{SCH}}$ ,  
( $R_{\text{SCH}} = 0.59 \pm 0.04$   
mpc)



# Última Órbita Estable (ISCO)



Prograde BH  
ISCO at  $R=1$   
 $GM/c^2$

Non-spinning BH  
ISCO at  $R=6$   
 $GM/c^2$

Retrograde BH  
ISCO at  $R=9$   
 $GM/c^2$

# La Vía Láctea

- **Diámetro:** 90.000 años luz
- **Estrellas:** 200 mil millones
- **Masa de la Galaxia:** 1 billón masas solares ( $1 M_{\text{sol}} \sim 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ )
- **Barra central:** 25000 años luz
- **Distancia Sol-Centro:** 26000 años luz
- **Periodo de rotación del sol:** 225 millones años



270 pc

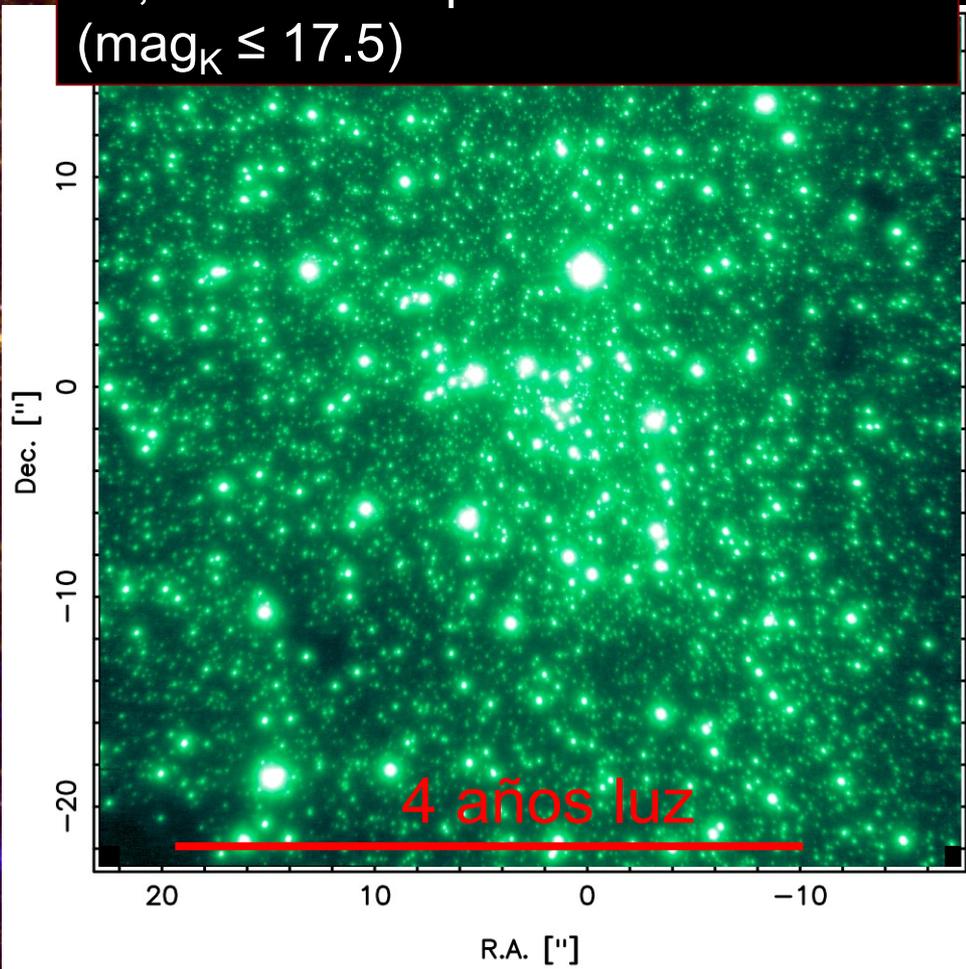
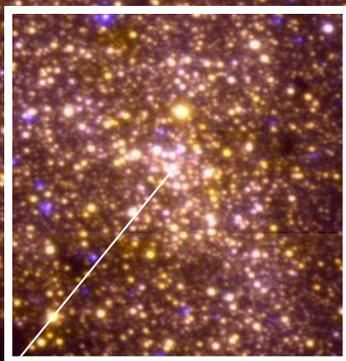
ISAAC/MLT 1.3 + 2.09  $\mu\text{m}$   
20,000 fuentes puntuales  
+ luz difusa

NACO/MLT, 2.2  $\mu\text{m}$   
Óptica adaptiva,  $\sim 0.06''$  FWHM

10,000 fuentes puntuales  
( $\text{mag}_K \leq 17.5$ )

150'' / 18 años luz

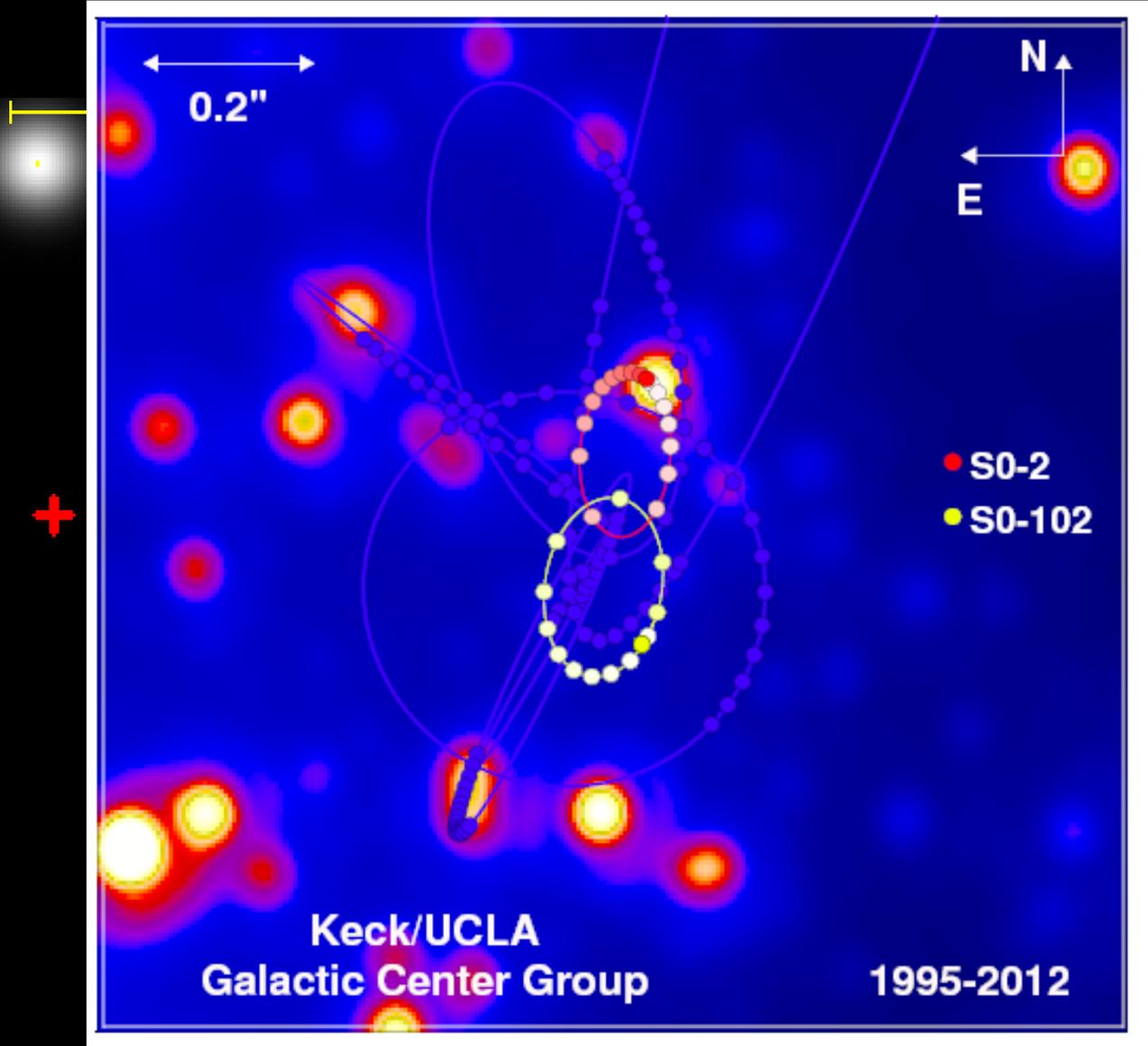
Sgr A\*



ssc2006-02a

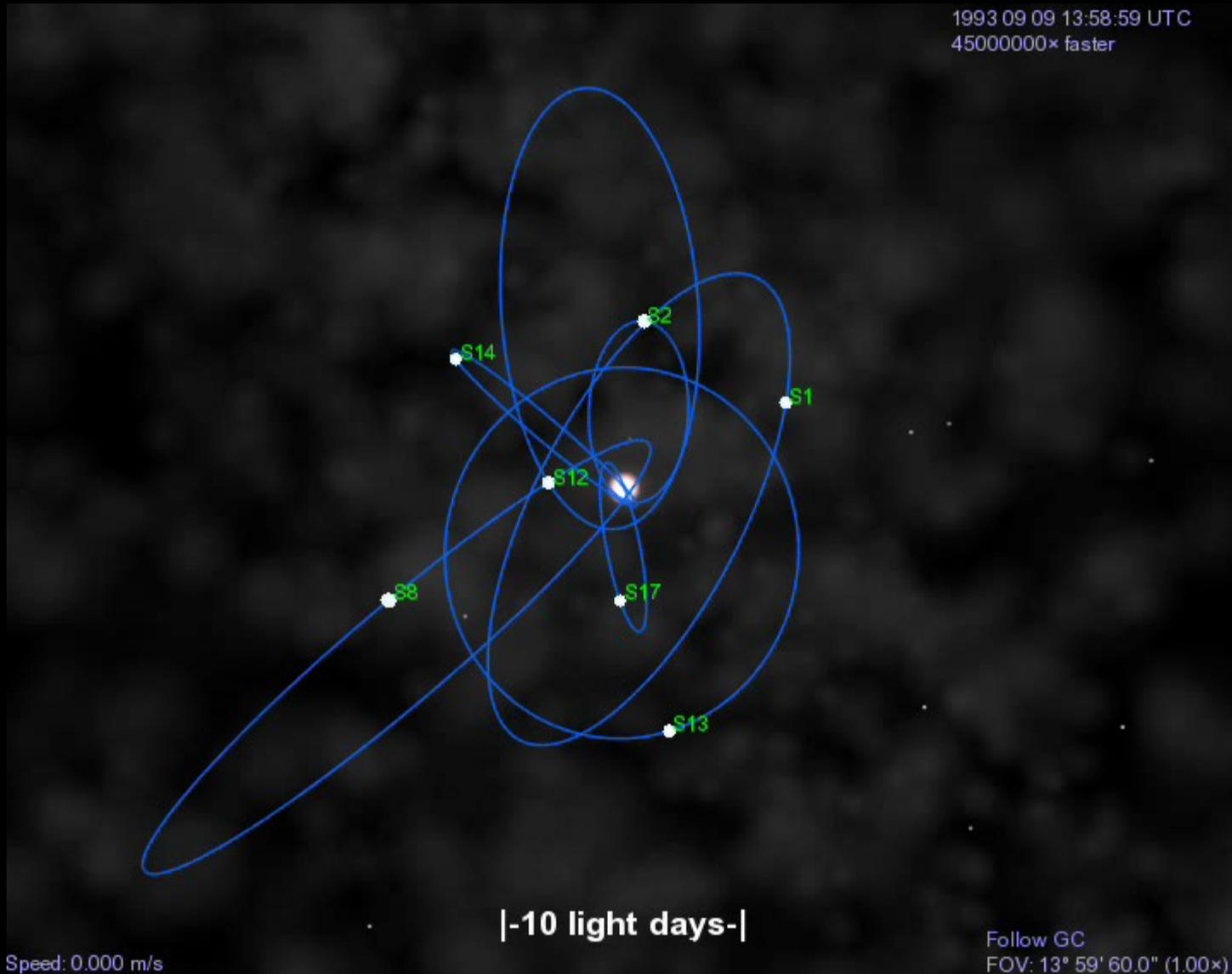
# El Centro de nuestra Galaxia: SgrA\*

1992

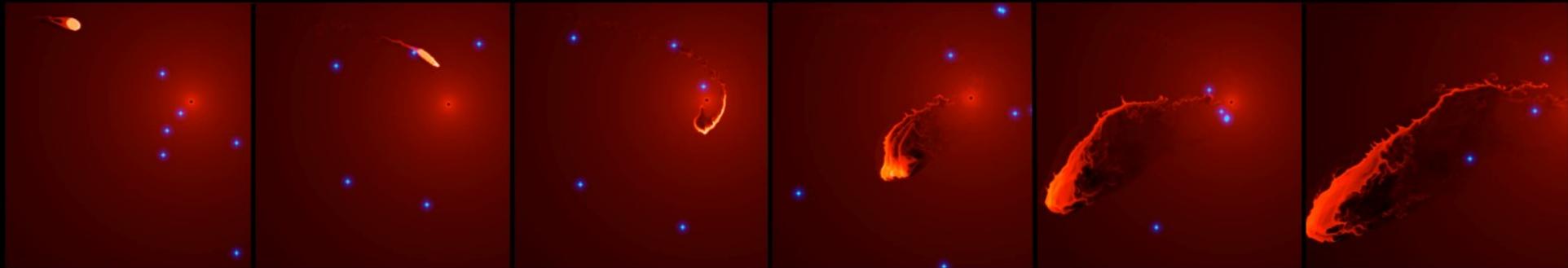
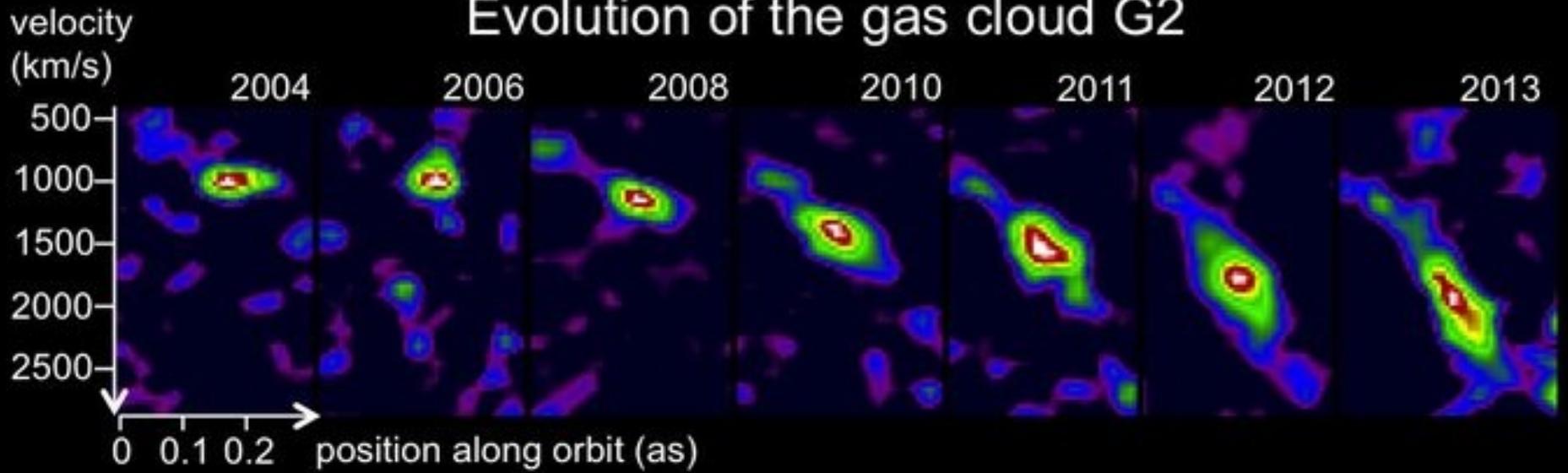


# El Centro de nuestra Galaxia: SgrA\*

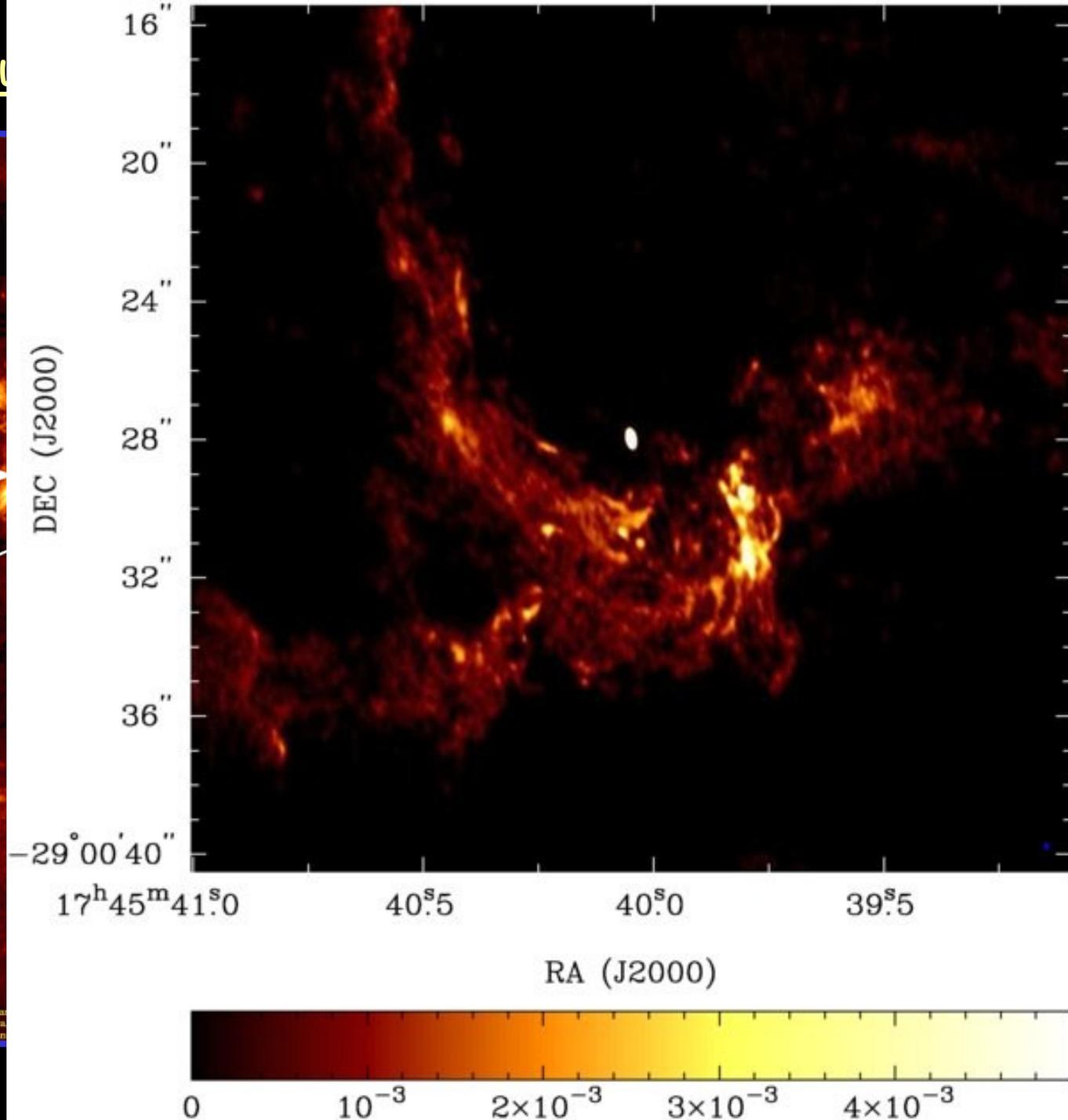
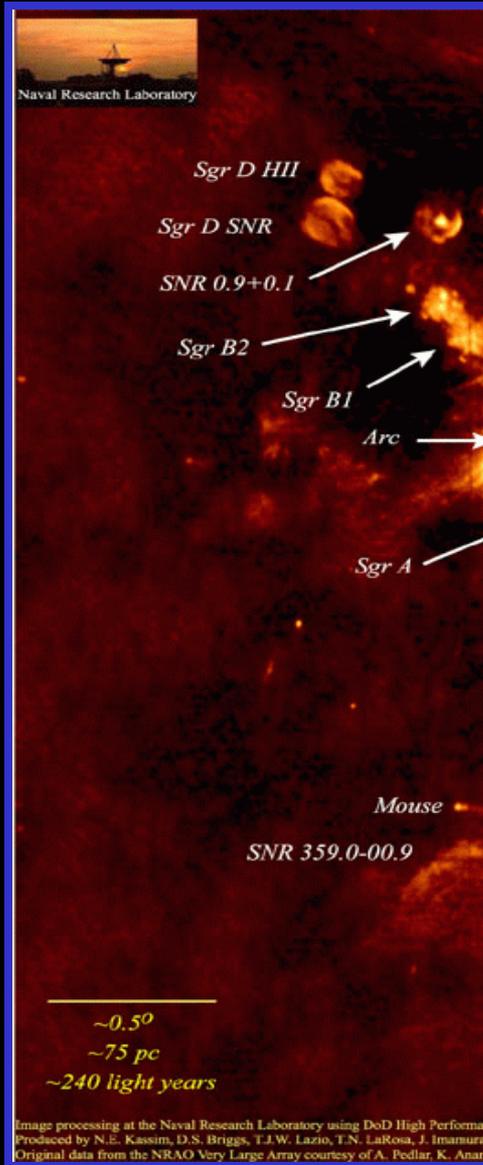
S2 → órbita: 15.2 años; semiejes: 5.5 días luz,  
17 horas luz (124 AU)



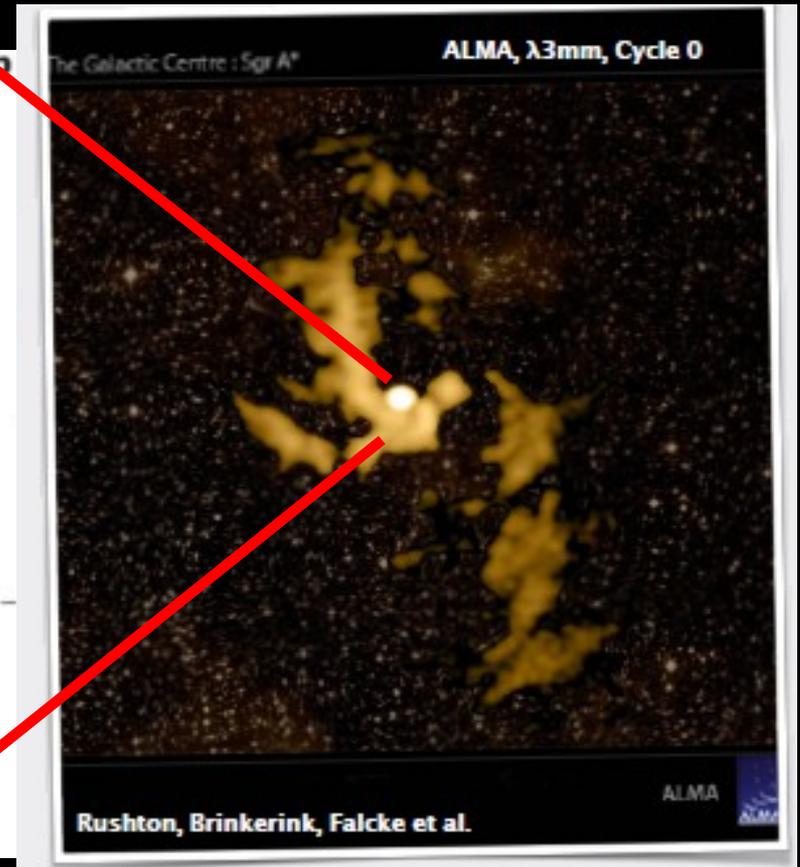
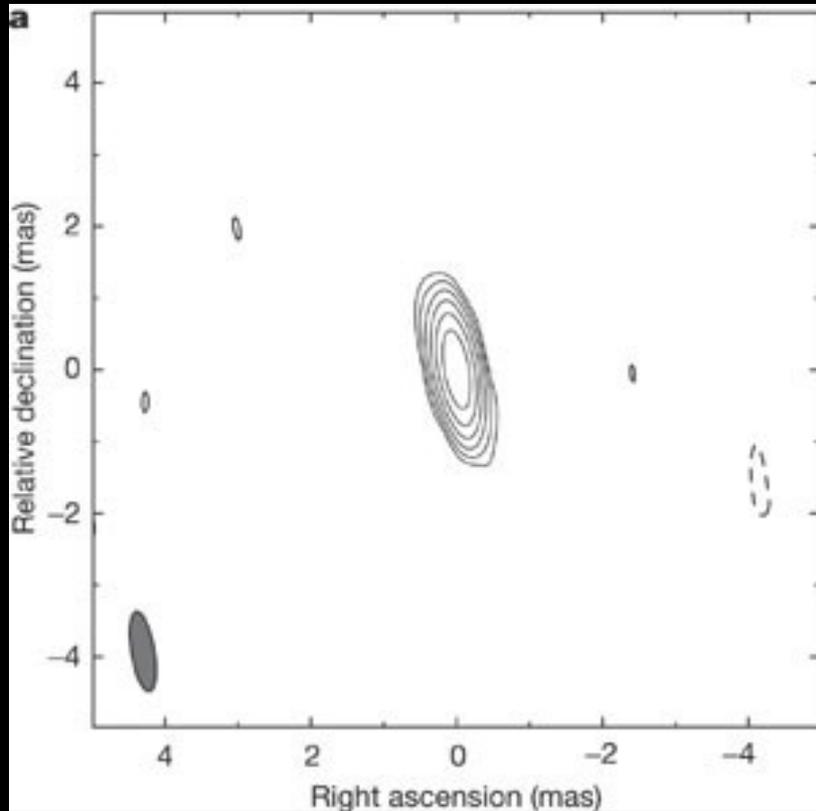
# Evolution of the gas cloud G2



# El Centro de n

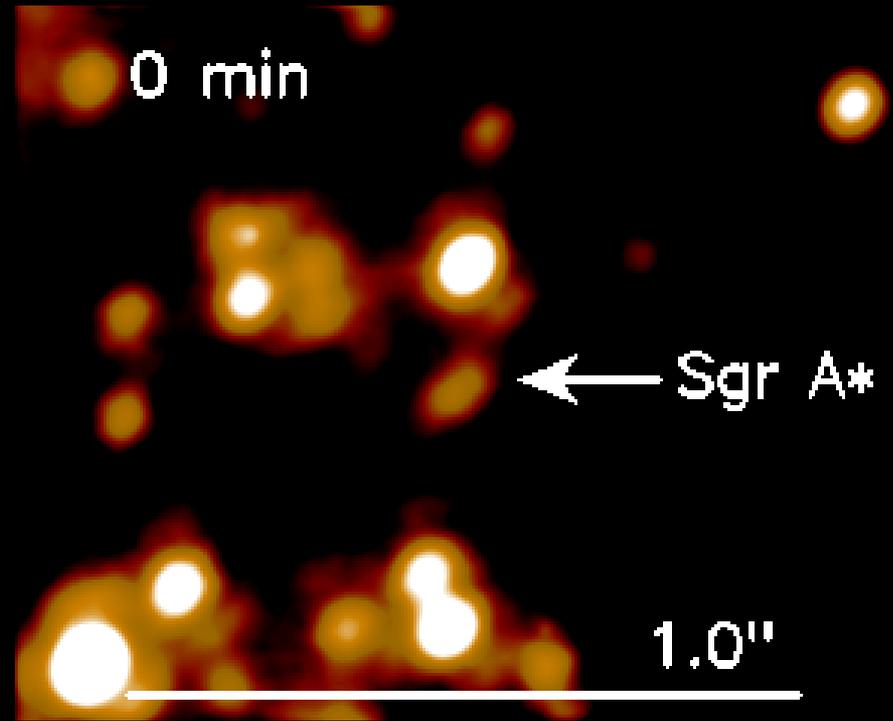
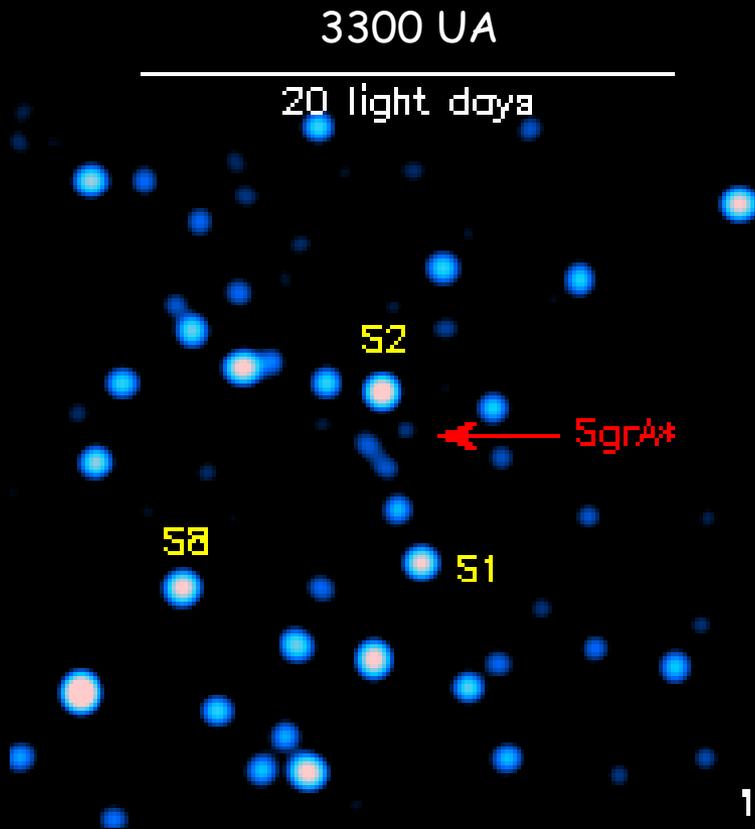


# SgrA\*, el centro de nuestra Galaxia

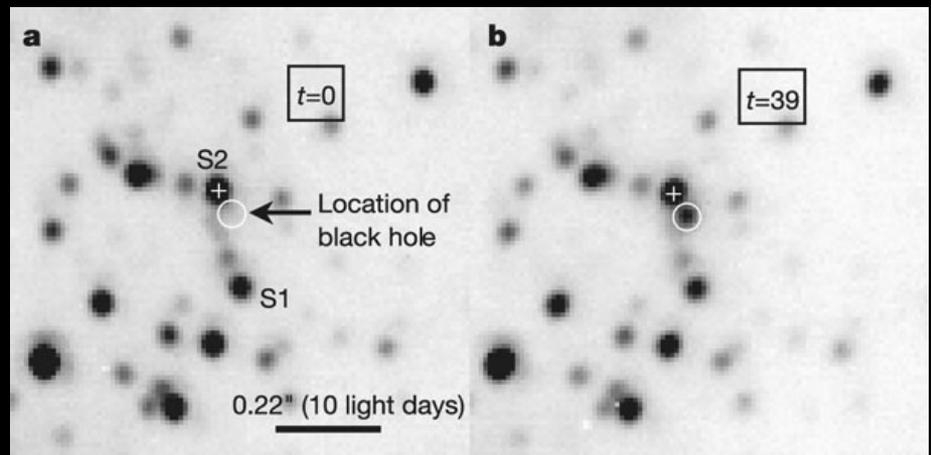


El tamaño de Sgr A\* es de 1.01 AU o  $12.6R_s$ ,  
donde  $R_s$  (0.08 AU)

# SgrA\*: Variabilidad en el Infrarrojo cercano



Variabilidad en el infrarrojo cercano con una periodicidad de 17 min (¿?) → contrapartida de SgrA\*



# CREATING A BLACK HOLE TELESCOPE

230 GHz VLBI of Sgr A\*

10 & 11 April 2007

3.84 Gbit/s (480 MHz)

2: Combined Array for Research in Millimeter wave Astronomy – California



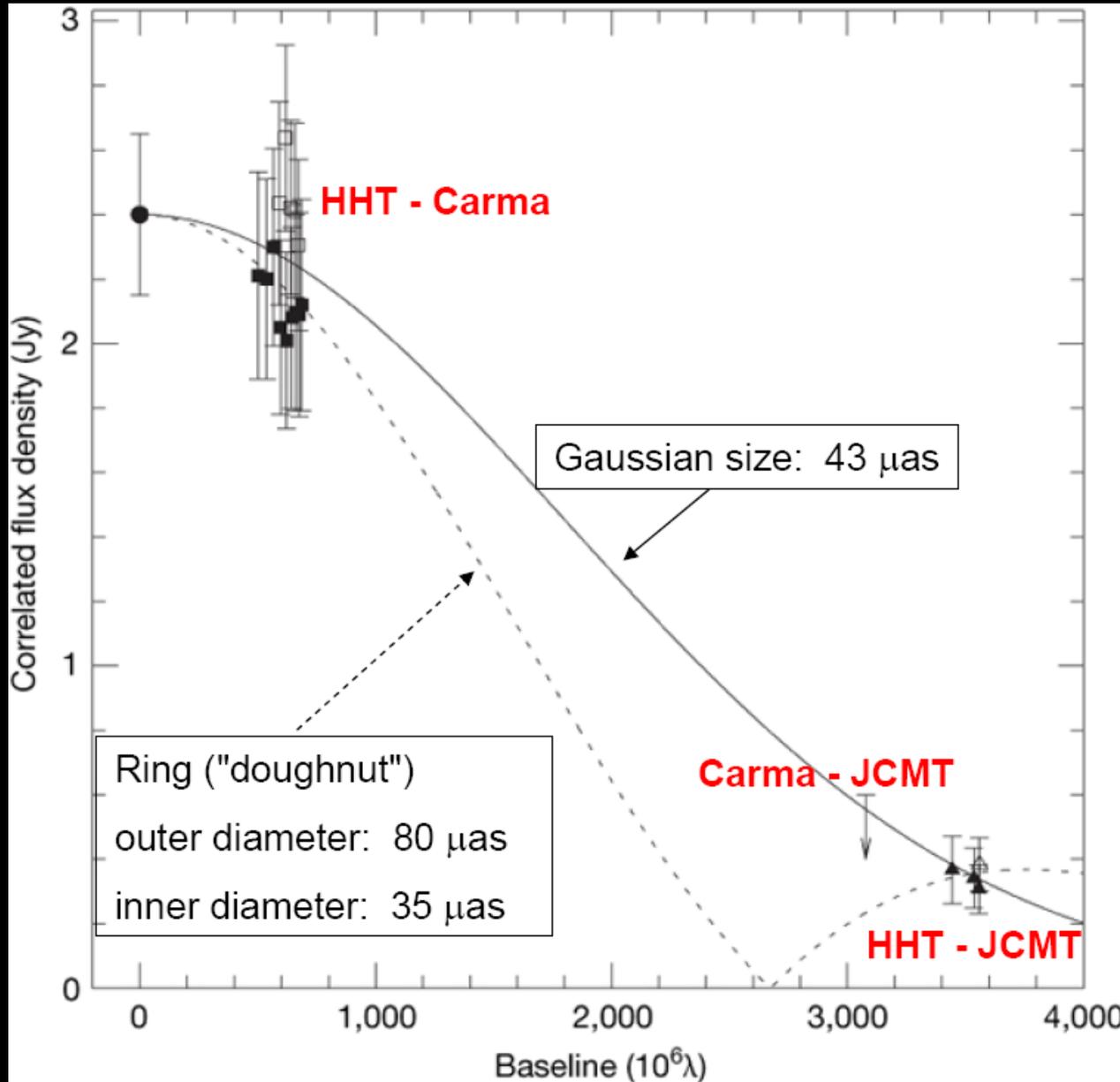
3: Arizona Radio Observatory



1. Submillimeter Array and James Clerk Maxwell Telescope – Hawaii



# SgrA\* at 230 GHz



SgrA\* is smaller than  $3.7 \pm 1.5 R_S$  ( $0.3 \pm 0.12 \text{ AU}$ )

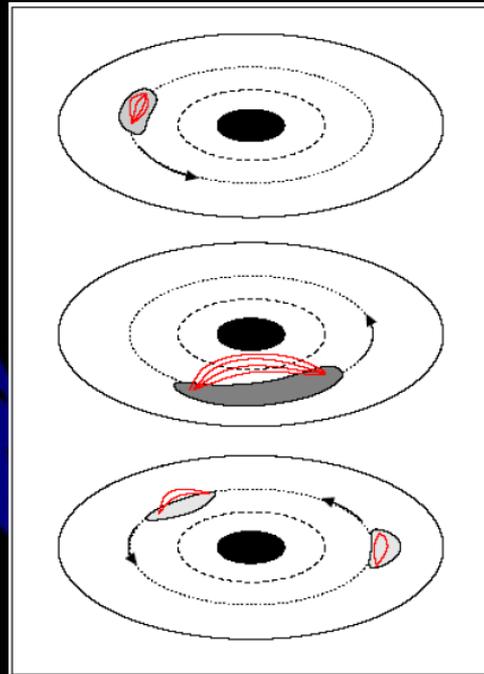
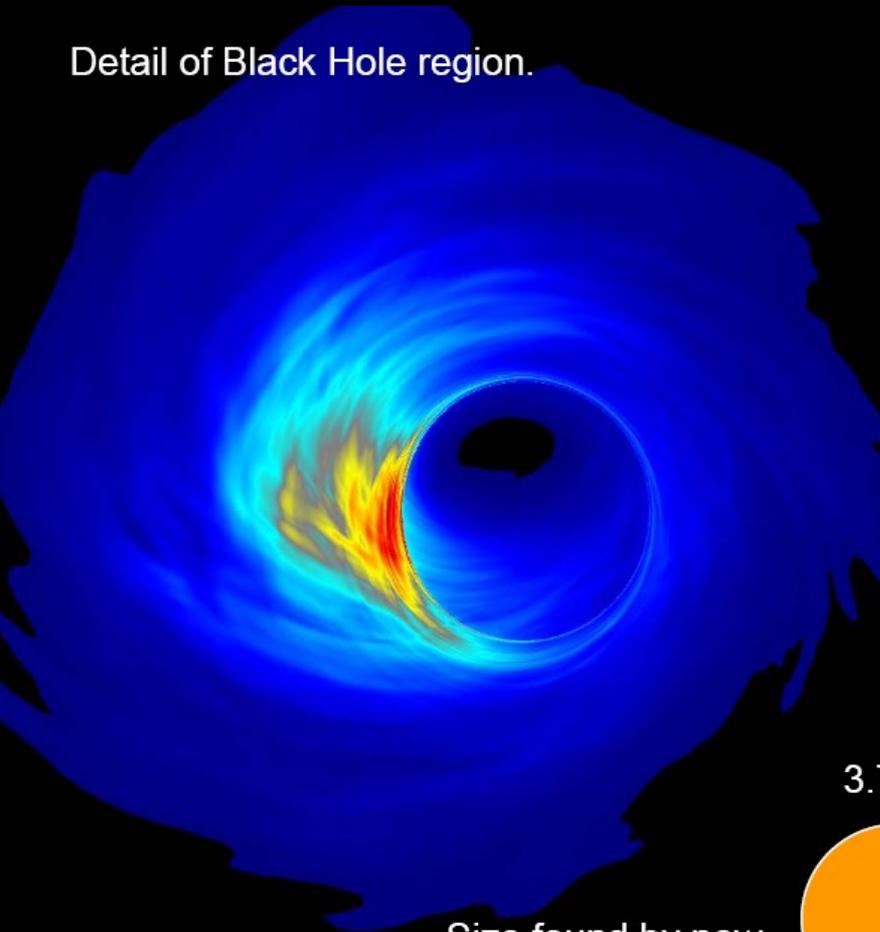
Global  $\leq 1\text{mm}$ -VLBI with transcont. baselines (PV-PdB, + HHT, SMA, CARMA, APEX, ALMA ...) will be required to image GR effects near a SMBH.

Doeleman et al. 2008, Nature 455, 78-80

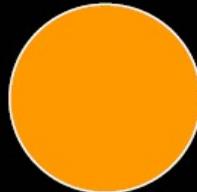
# SgrA\* a 230 GHz

- SgrA\* es menor que  $3.7 \pm 1.5 R_s$  ( $0.3 \pm 0.12$  AU)
- La emisión puede no estar centrada en el BH, sino en el flujo de acrecimiento

Detail of Black Hole region.



$3.7 R_s^6$

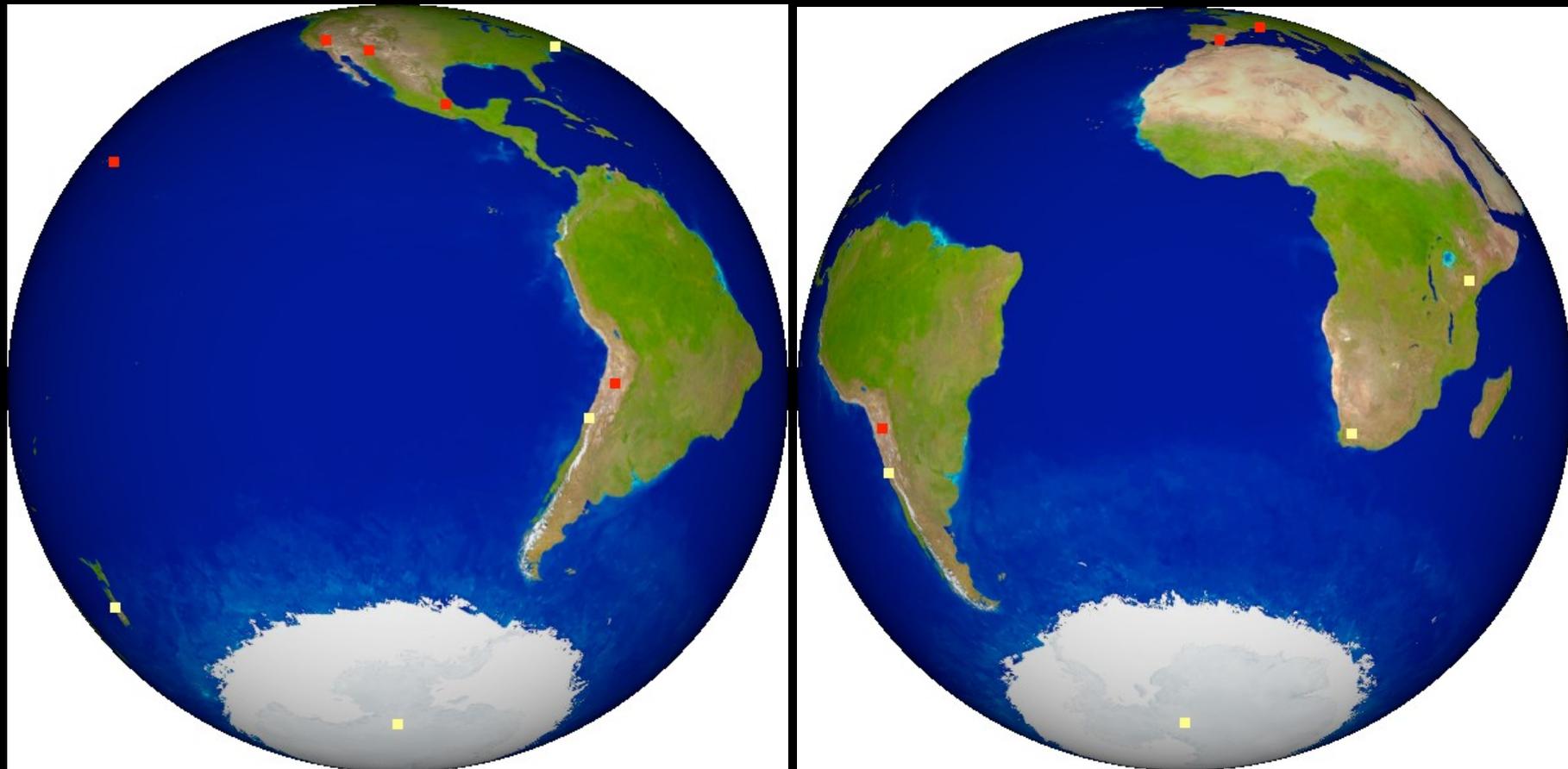


Size found by new  
VLBI observations

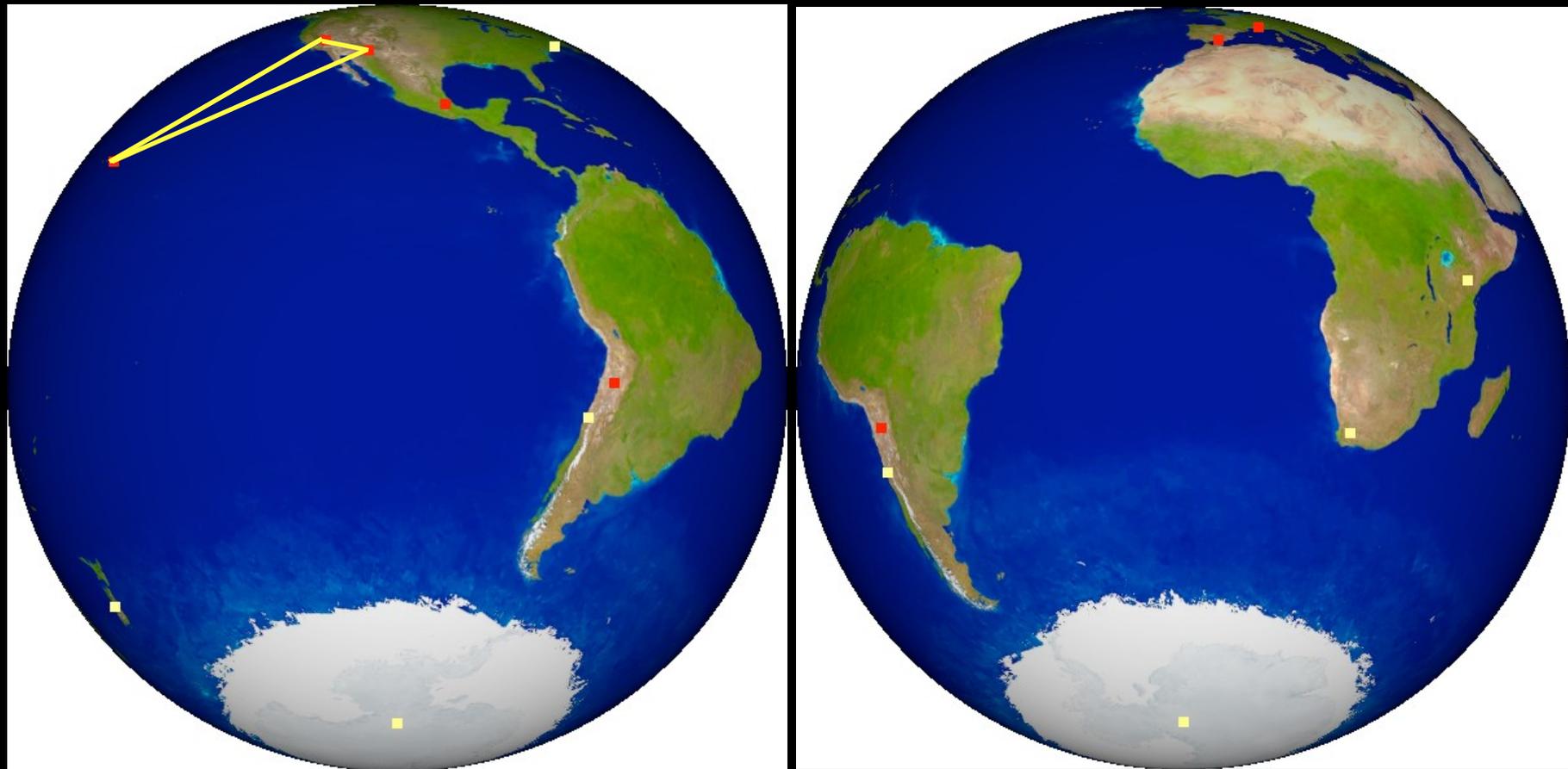
Global  $\leq 1$ mm-  
VLBI con líneas  
de base  
transcontinental  
es se requerirán  
para

Cartografiar los  
efectos de GR  
cerca del  
SMBH.

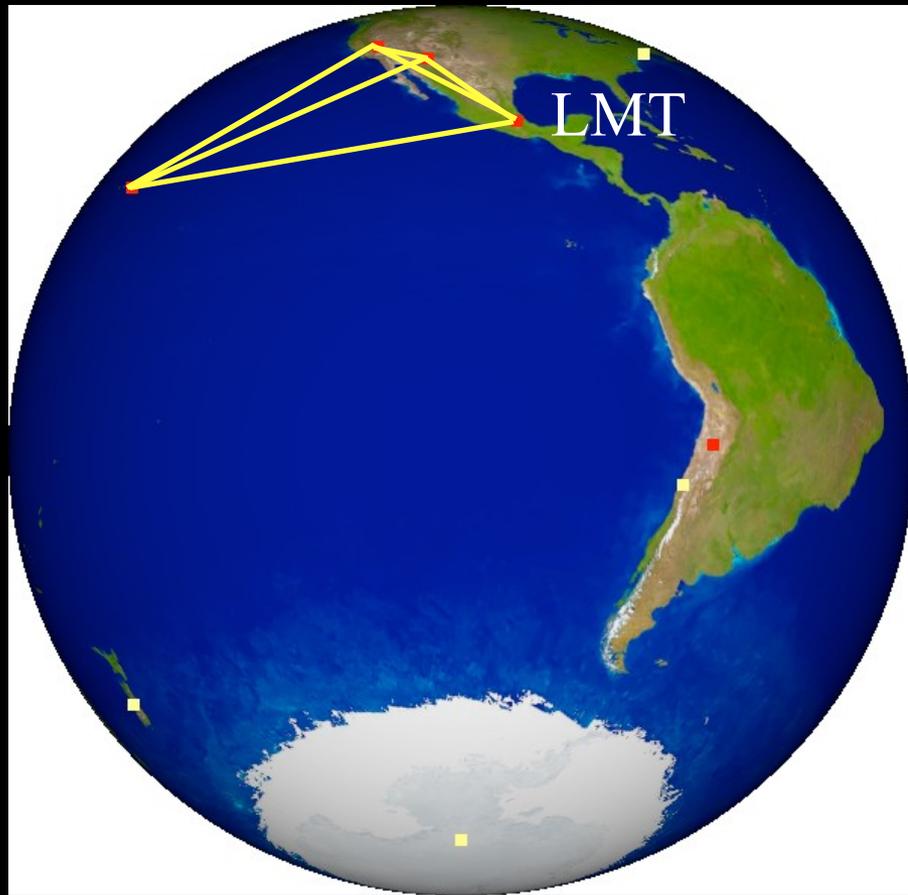
# Vista de SgrA\* con el EHT



# Vista de SgrA\* con el EHT

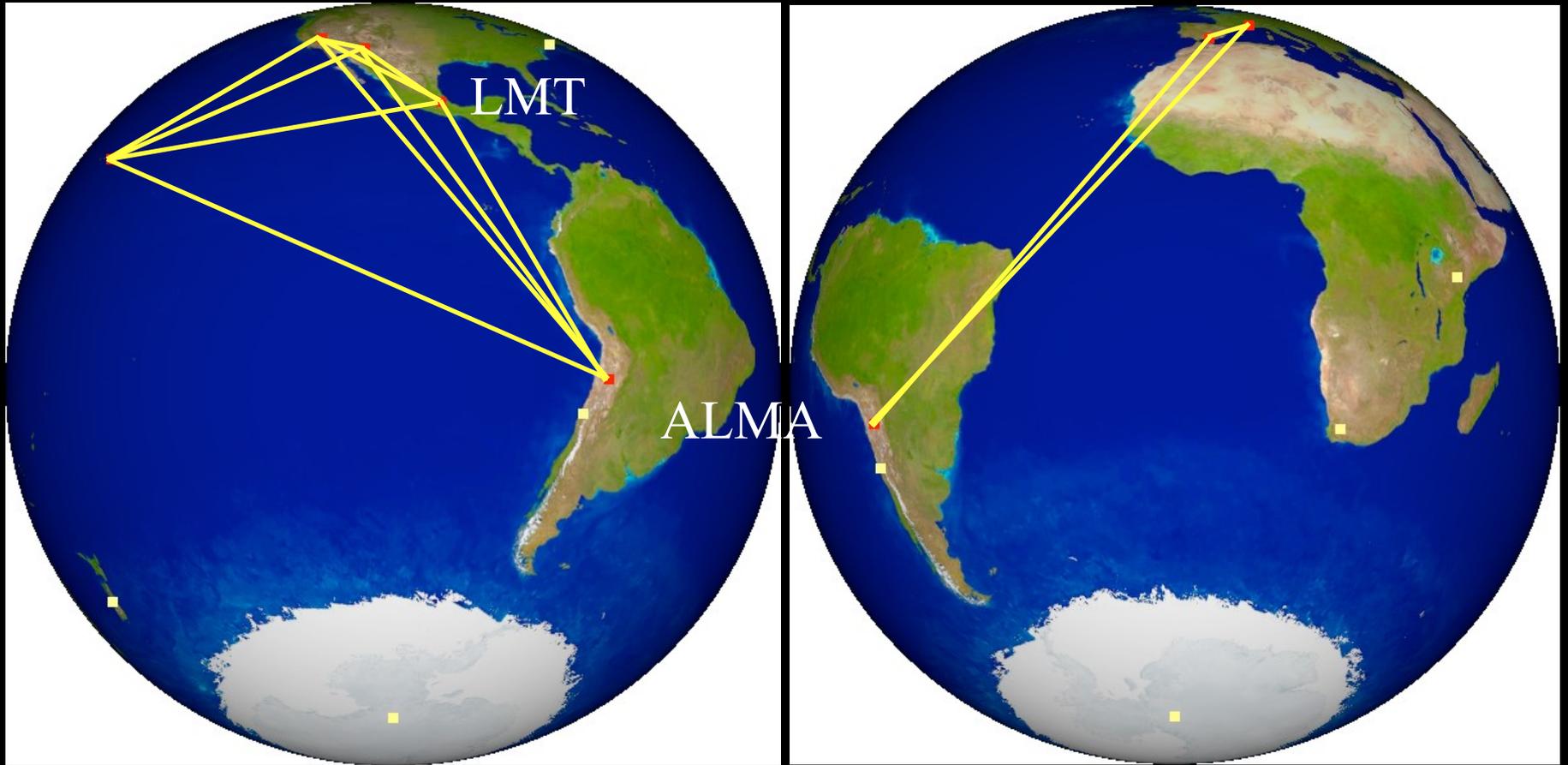


# Vista de SgrA\* con el EHT

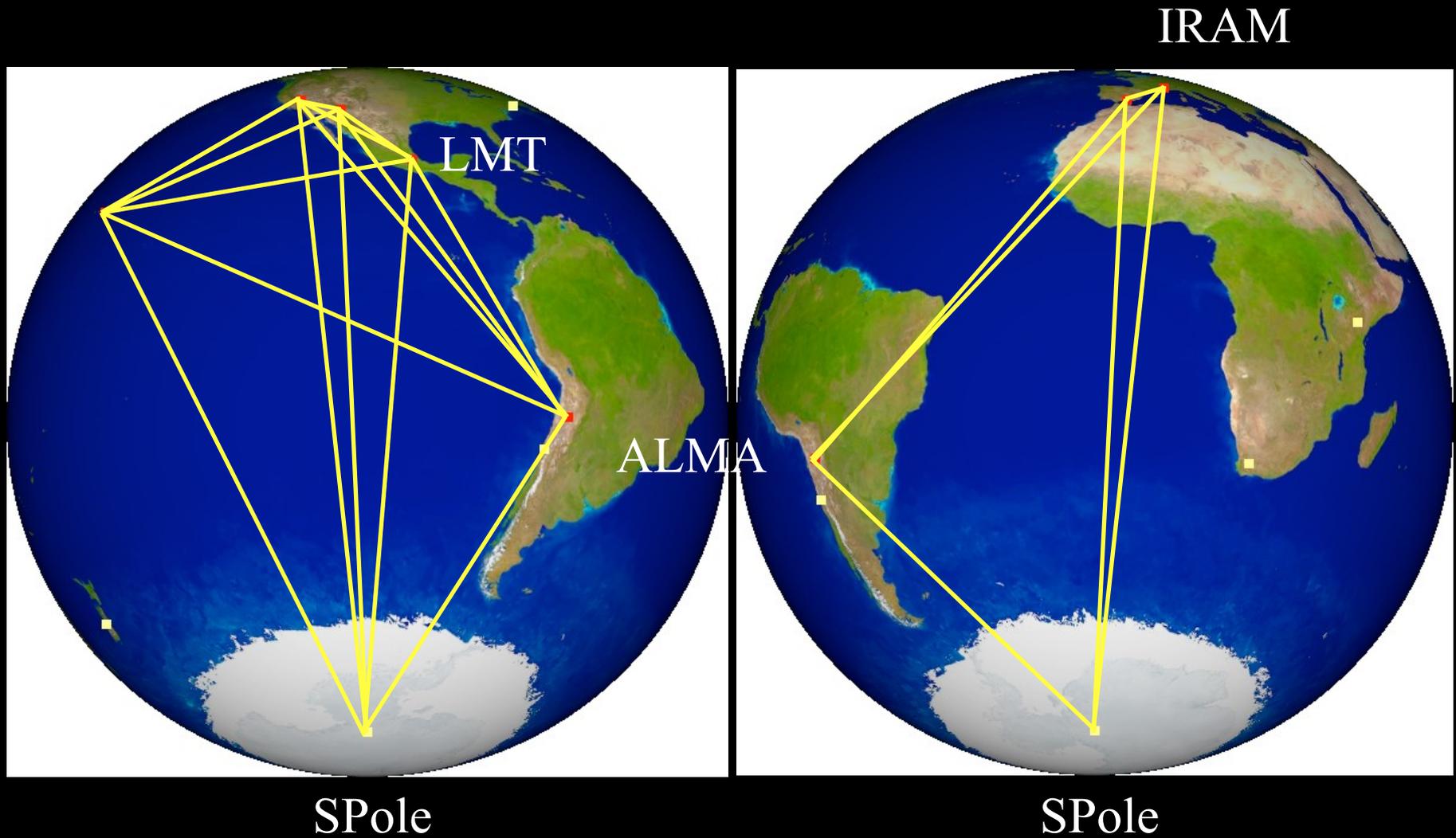


# Vista de SgrA\* con el EHT

IRAM



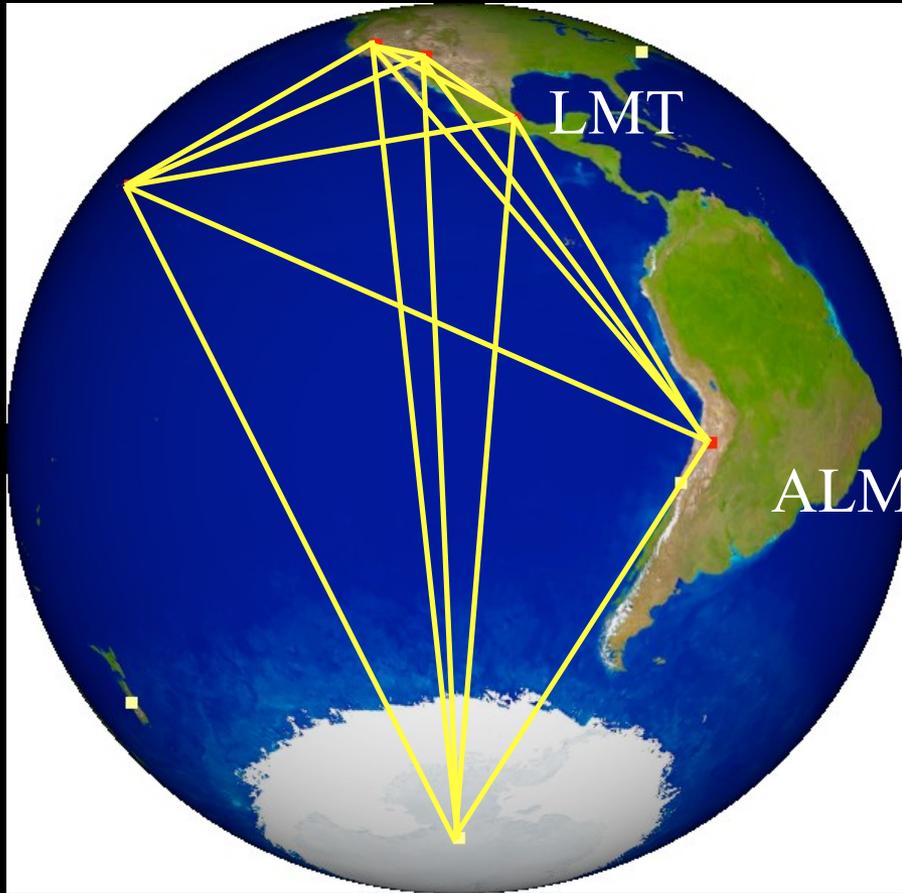
# Vista de SgrA\* con el EHT



# Vista de SgrA\* con el EHT

GLT - Greenland

IRAM

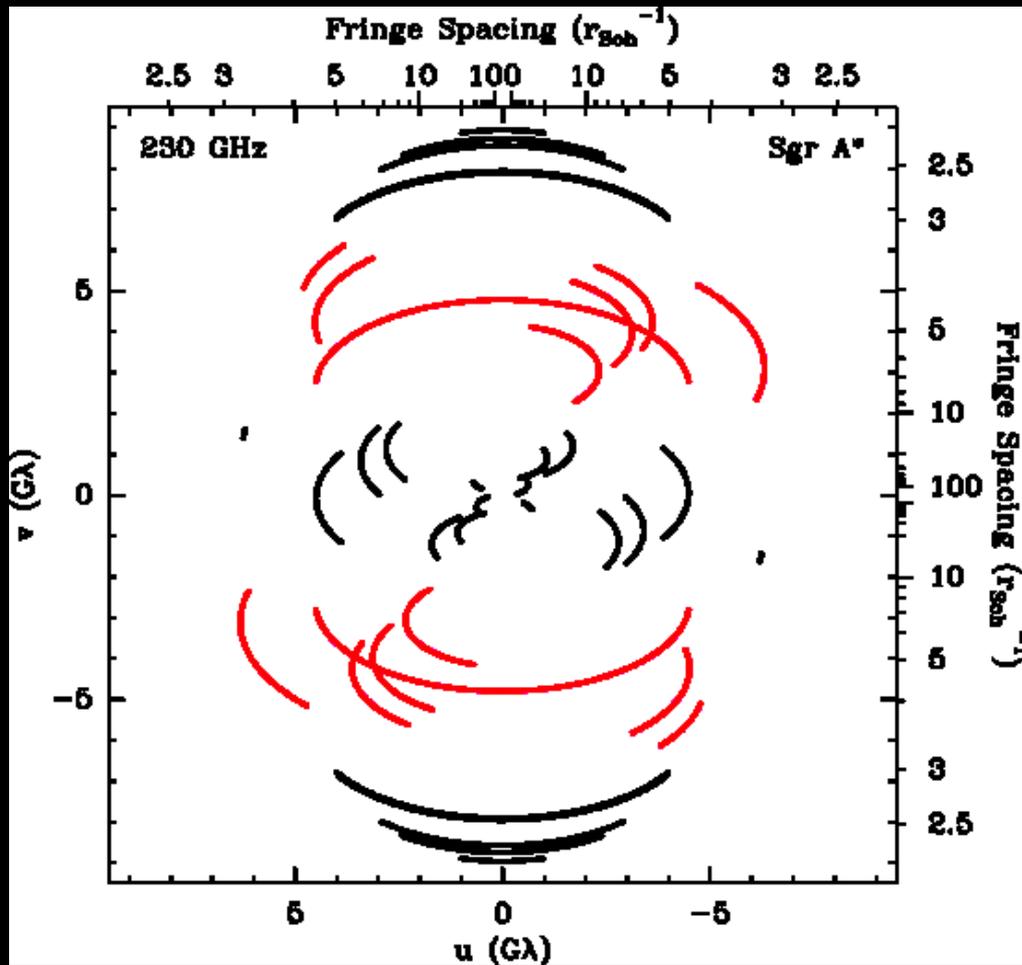
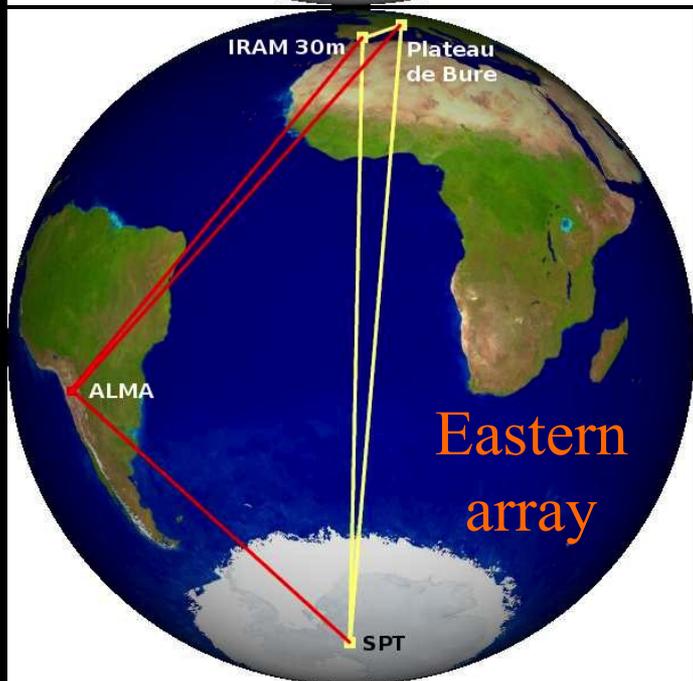
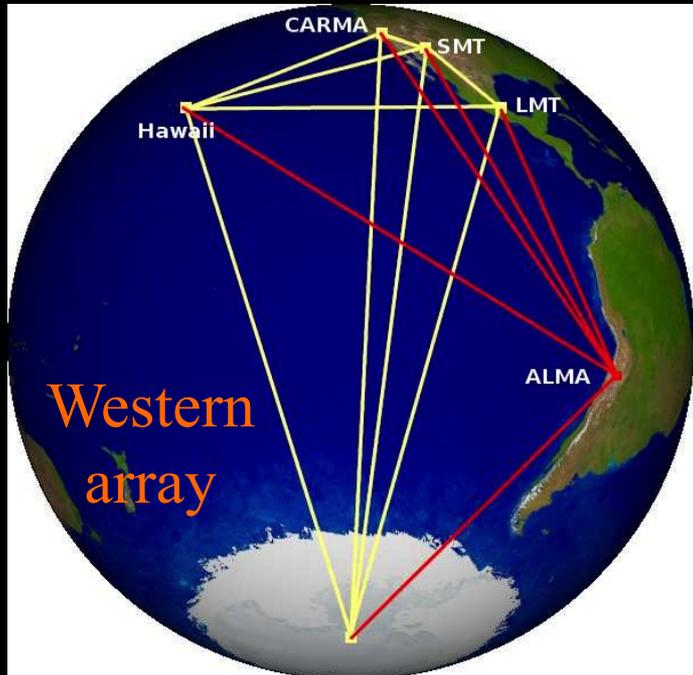


SPole



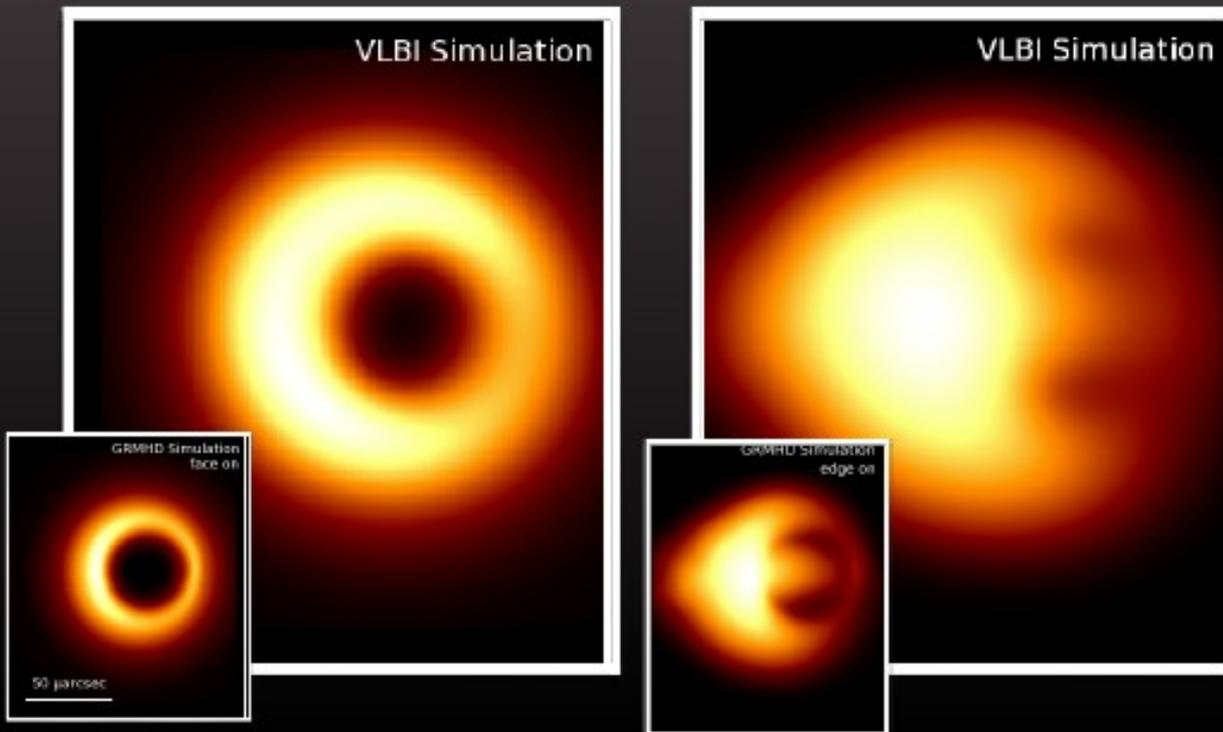
SPole

# Red a $\lambda 1.3\text{mm}$ vista desde Sgr A\*



# Detección de la sombra de SgrA\* a $\nu > 230$ GHz

The event horizon shadow lensed to  $50\mu\text{as}$  in diameter  
submm-wave VLBI resolution  $12\text{-}20\mu\text{as}$



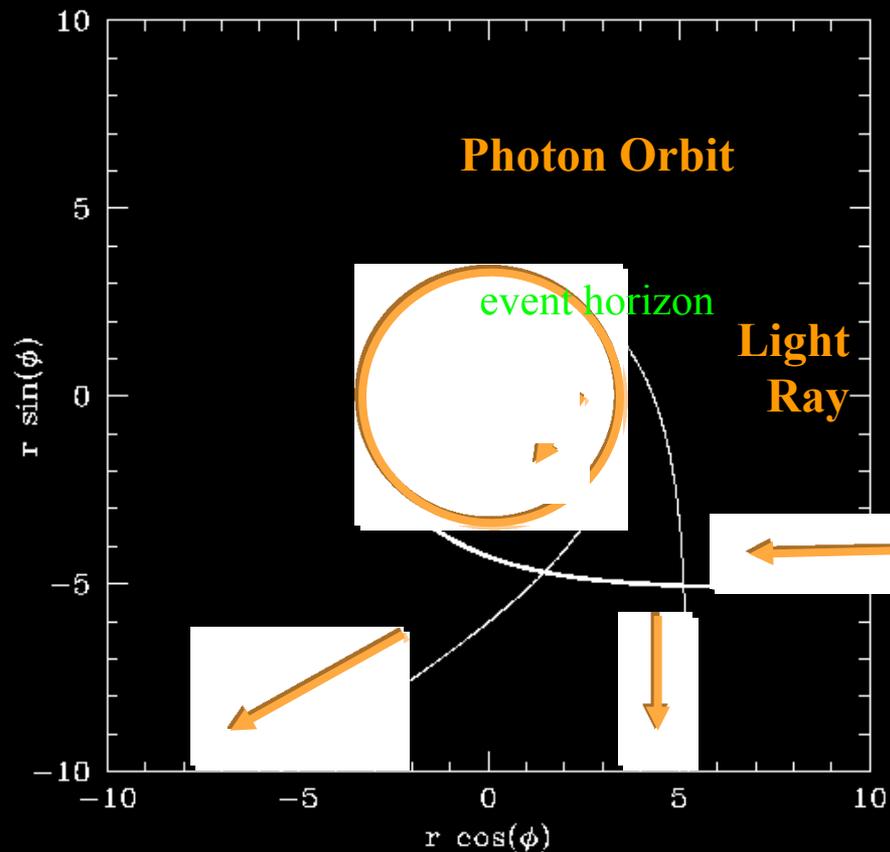
La sombra es producida por "Relativistic Beaming" y "Gravitational Lensing" del material del disco de acreción (y del jet).

Depende de la intensidad, inclinación, estado de actividad y spin.

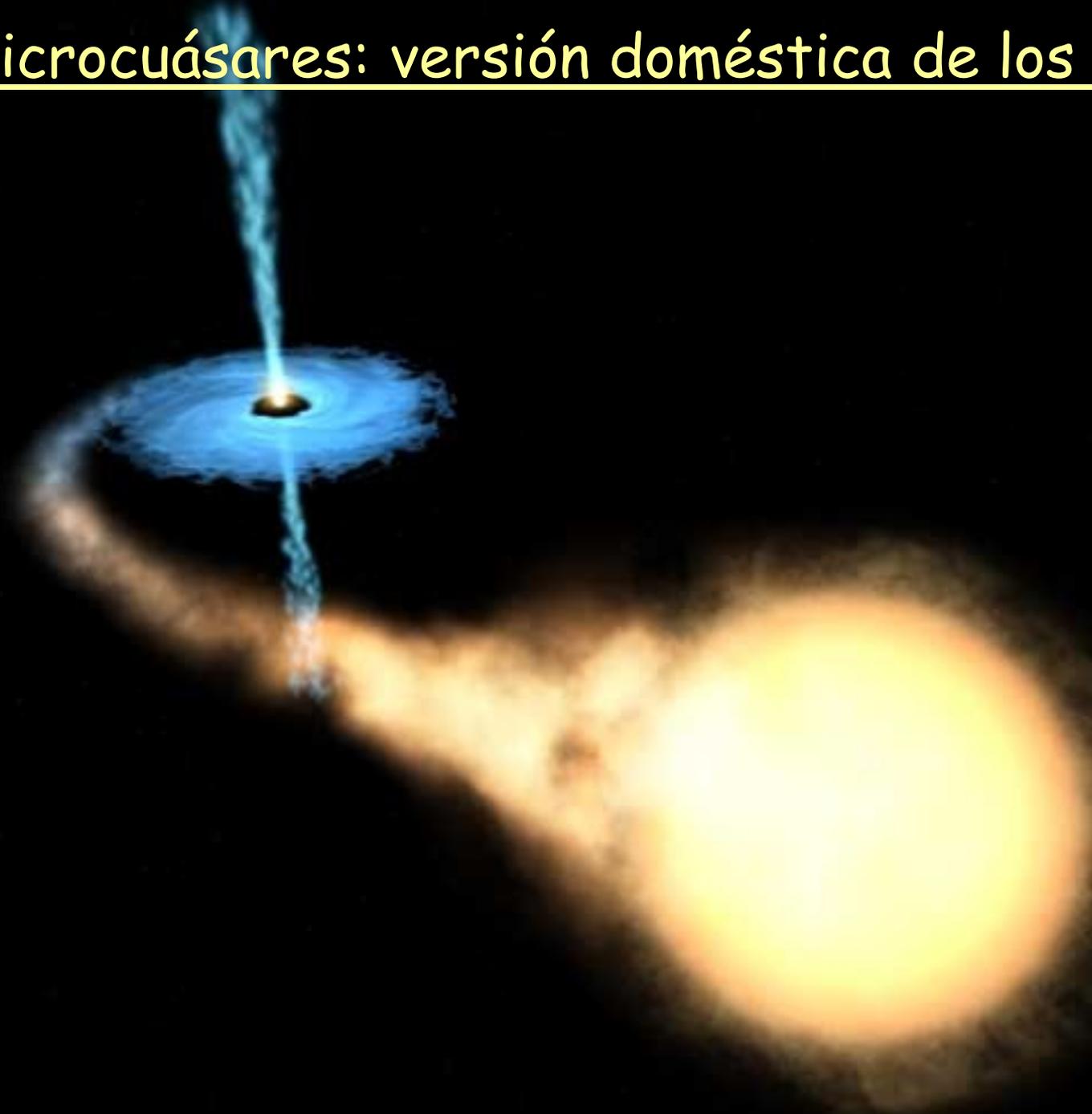
# Trazado de los rayos en la métrica de Kerr

- Las órbitas de los fotones se curvan por el BH
- A  $R \sim 4-5R_g$  las órbitas se hacen circulares - "closed photon orbit".
- Las órbitas más cercanas terminan en el horizonte de sucesos.
- Así se produce una sombra en la región emisora alrededor del BH, rodeado de un anillo circular brillante.

(Bardeen 1973, Falcke et al. 2000, de Vries 2000)



# Los microcuásares: versión doméstica de los AGNs



# Los microcuásares: versión doméstica de los AGNs

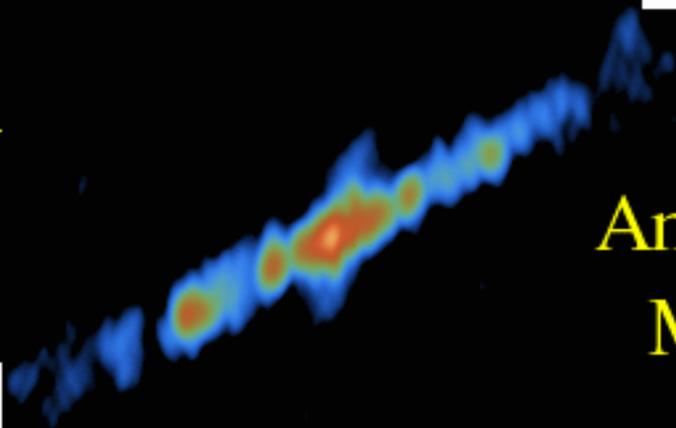
SS433

SS433

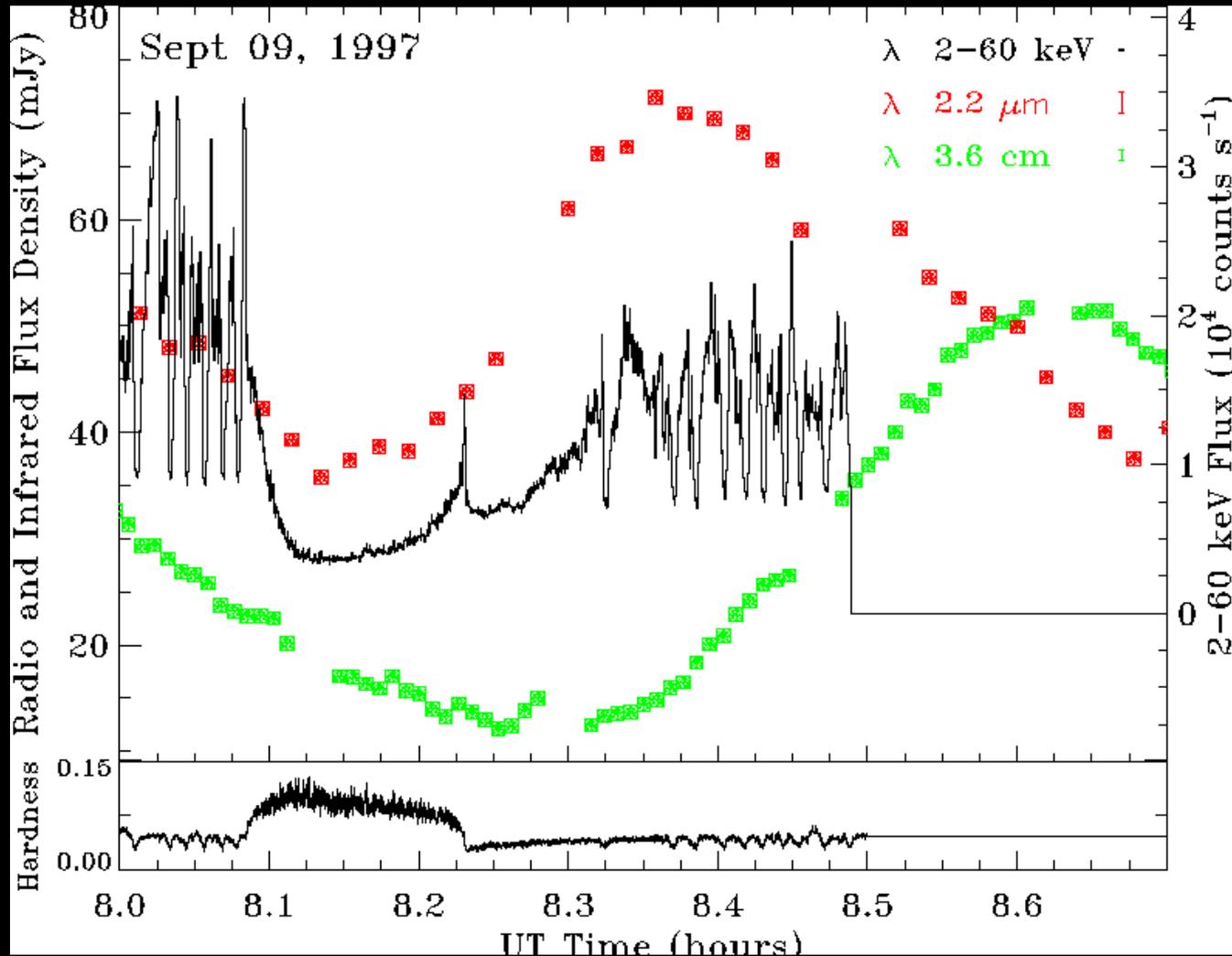
VLBA



Amy Mioduszewski  
Michael Rupen  
Craig Walker  
Greg Taylor

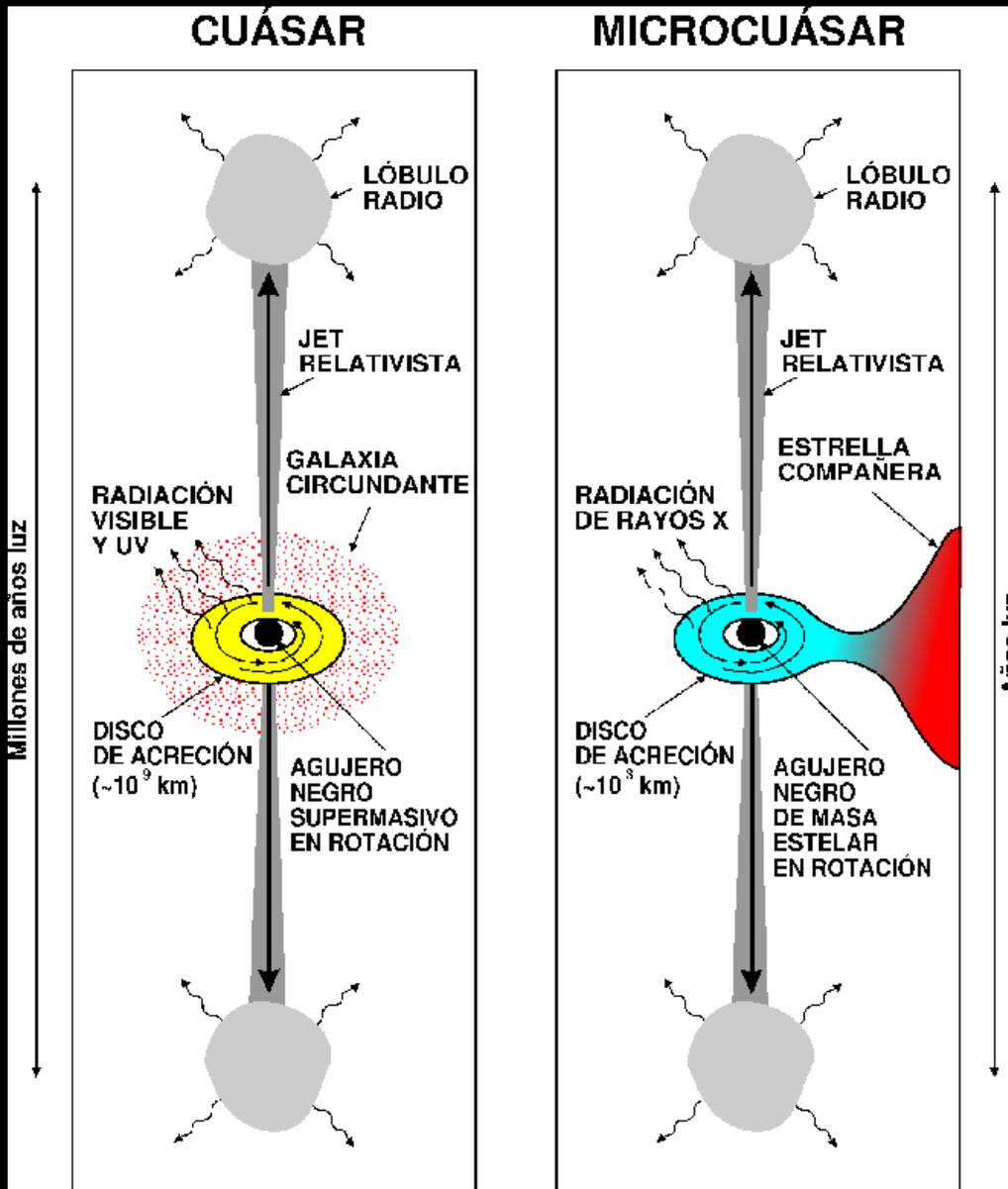


# Los microcuásares: el caso de GRS 1915+105



Conexión entre el vaciado del disco de acrecimiento y la detección de nubes de plasma relativista que se detectan en radio e infrarrojo

# Los microcuásares: versión doméstica de los AGNs



	<u>CUÁSAR</u>	<u>μ-CUÁSAR</u>
Masa Objeto Central	$10^7 - 10^9 M_{\text{sol}}$	$10 M_{\text{sol}}$
Luminosidad	$10^{47}$ erg/s	$10^{37}$ erg/s
Ritmo de Acrecimiento	$10 M_{\text{sol}} / \text{año}$	$10^{-9} M_{\text{sol}} / \text{año}$
Temperatura del disco ( $T \propto M^{-1/4}$ )	$10^5$ K	$10^7$ K

Una analogía sobre 8 órdenes de magnitud

Gracias

