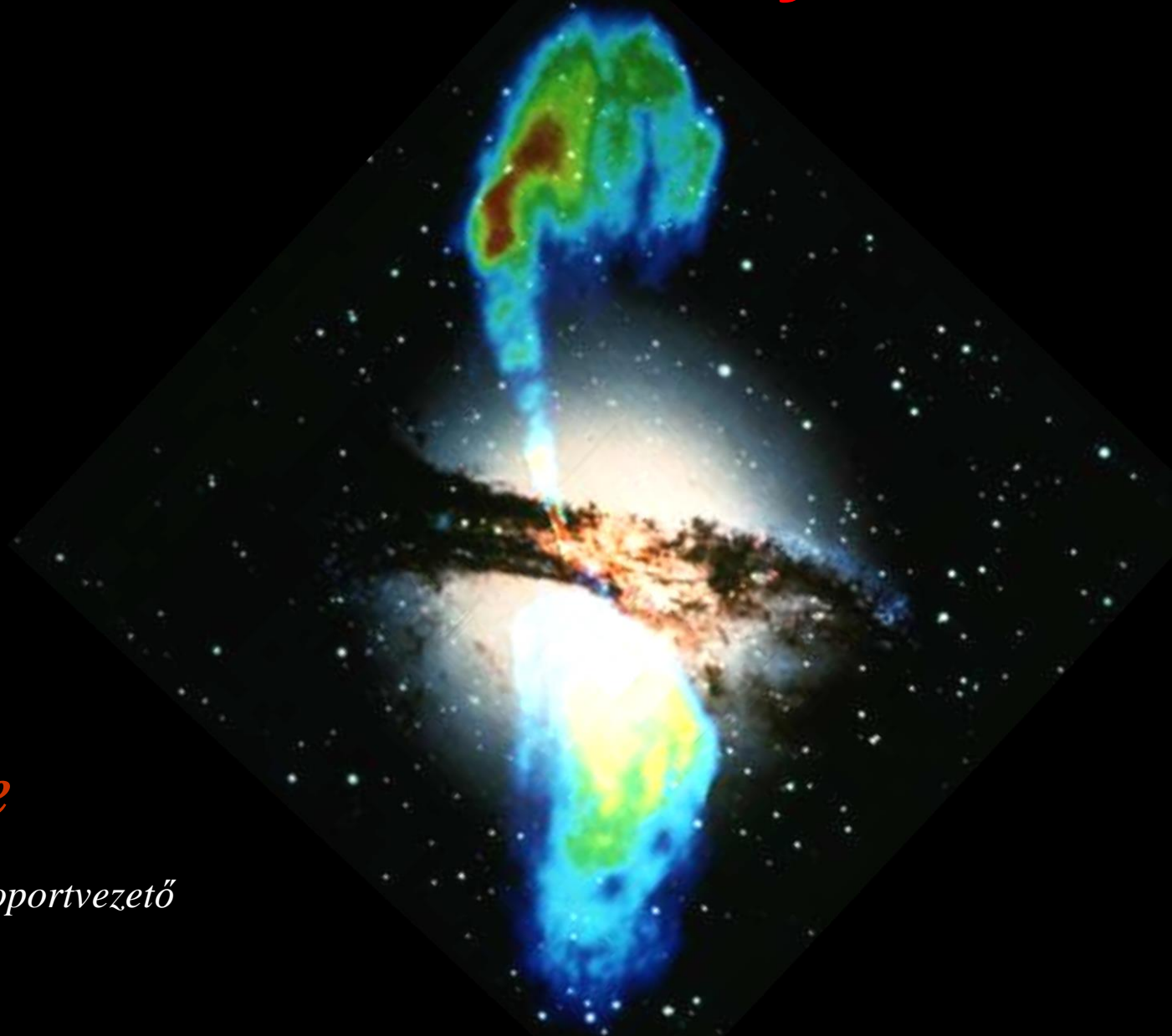


# Szupermasszív fekete lyukak

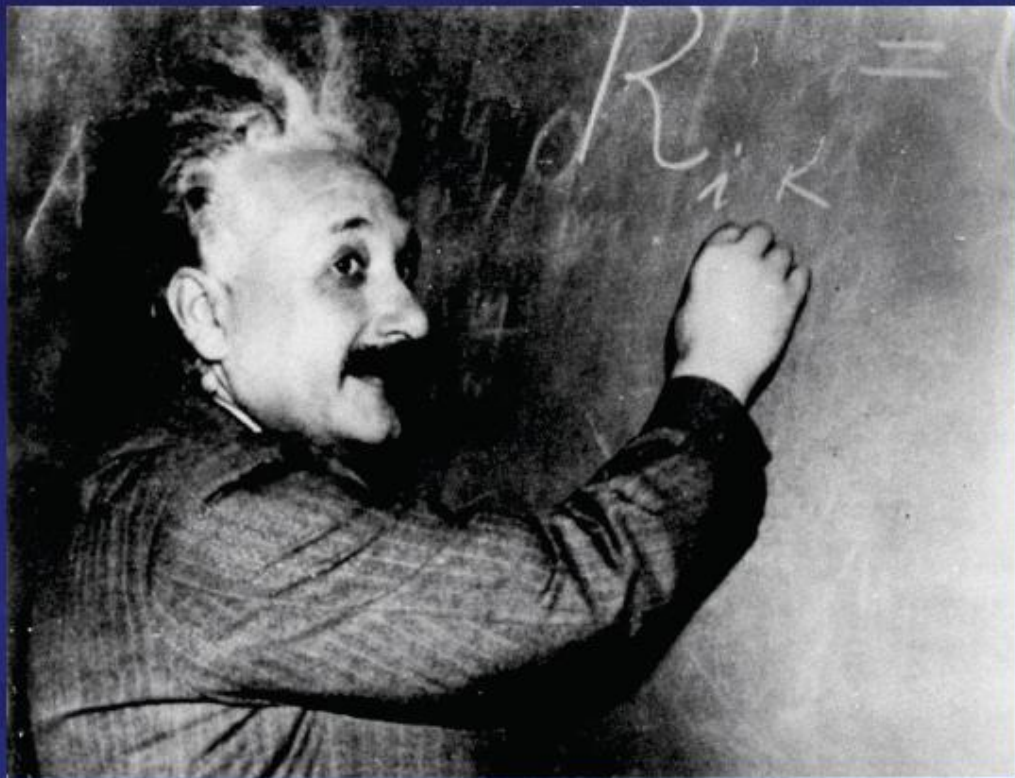


***Kocsis Bence***

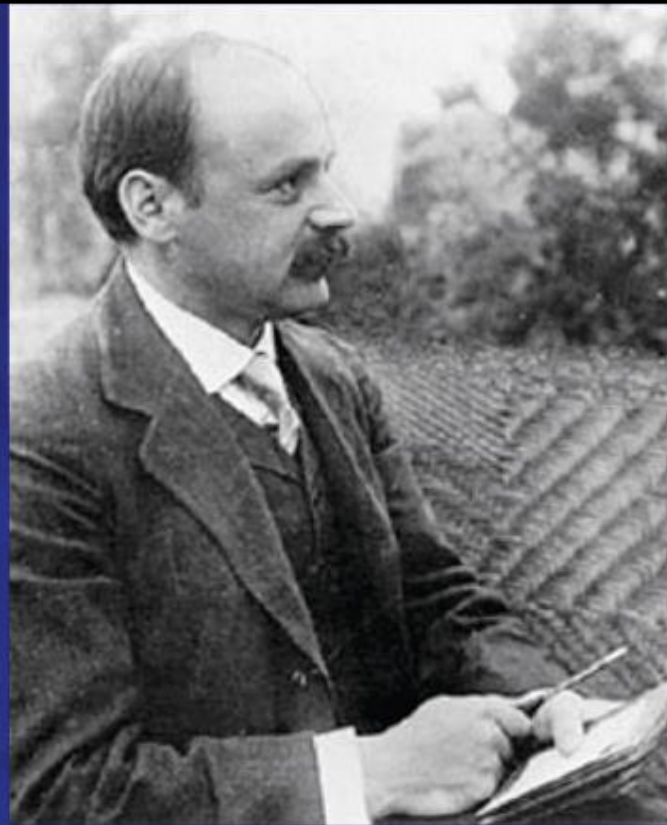
*ELTE Atomfizikai Tsz.*

*ERC Starting Grant csoportvezető*

# *100 évvel ezelőtt...*

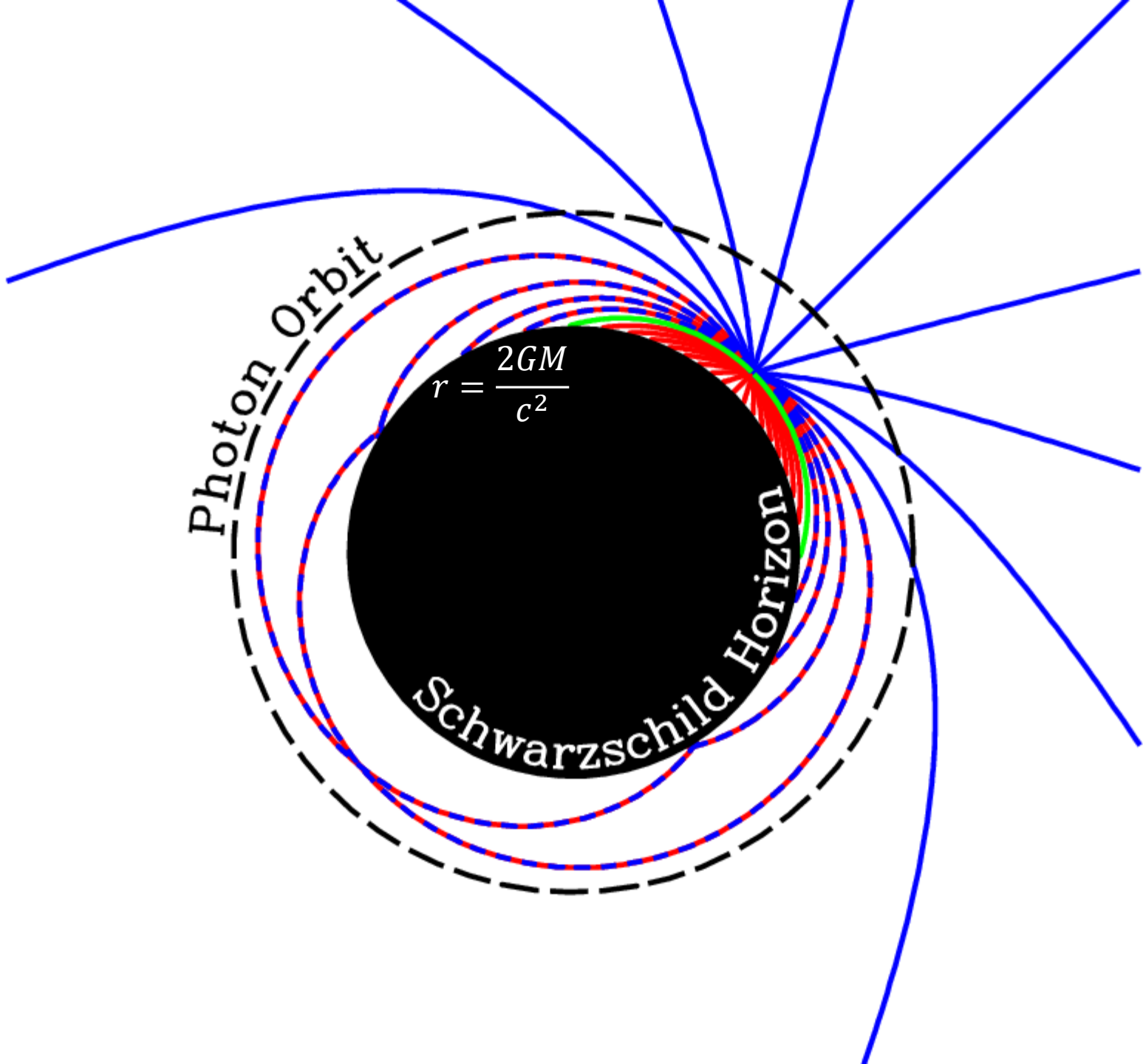


Albert Einstein



Karl Schwarzschild

*Egy elmélet jóslatainak kidolgozásához jobban megéri pacifistának lenni.*



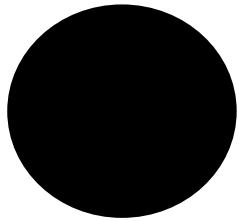
# Gravitational Lensing by Spinning Black Holes in Astrophysics, and in the Movie *Interstellar*

Oliver James<sup>1</sup>, Eugénie von Tunzelmann<sup>1</sup>, Paul Franklin<sup>1</sup> and  
Kip S Thorne<sup>2</sup> *arXiv:1502.03808*



# Miért vizsgáljuk a fekete lyukakat

- **Mindenség elmélete (theory of everything)**
  - Utolsó lépés: gravitáció + kvantumfizika
- **Asztrofizika**
  - Galaxisfejlődés
  - Legnagyobb energiájú jelenségek
  - Új frontvonal: gravitációs hullámok
- **Lenyűgöző tudomány**
  - görbült téridő
  - időutazás?

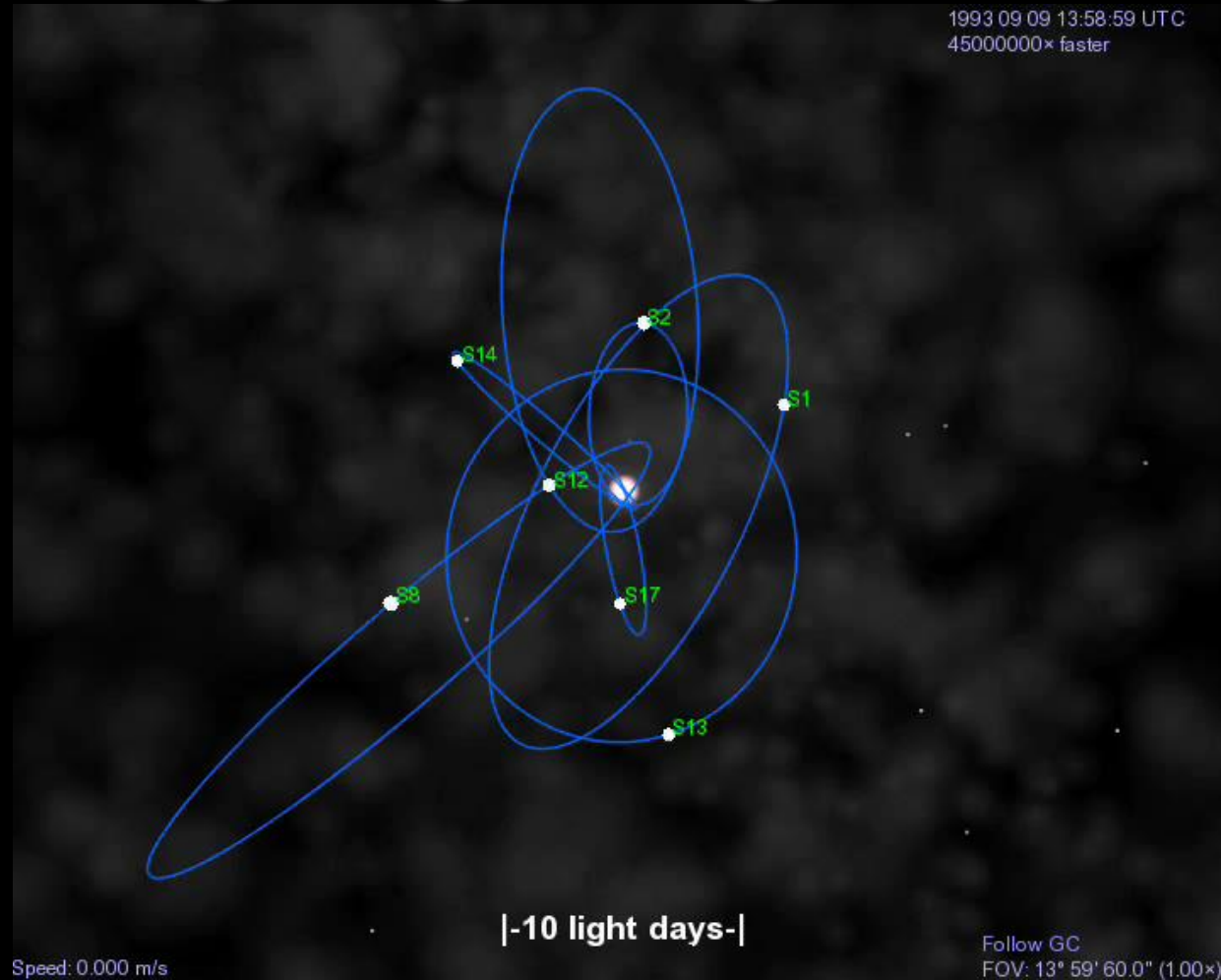


“A fekete lyukak a természet **legtökéletesebb** makroszkópikus objektumai az univerzumban: konstrukciójukhoz csak a térről és az időről alkotott elképzelésünket használjuk” – S. Chandrasekhar

“Az összes vizsgált kultúrában az **emberi szépség** és az ellentétes nemhez való vonzódás **legfőbb kritériuma az arci vonások szimmetriája.**” – Jones et al, *Nature* 2003



# Csillagmozgás a SgrA\* körül



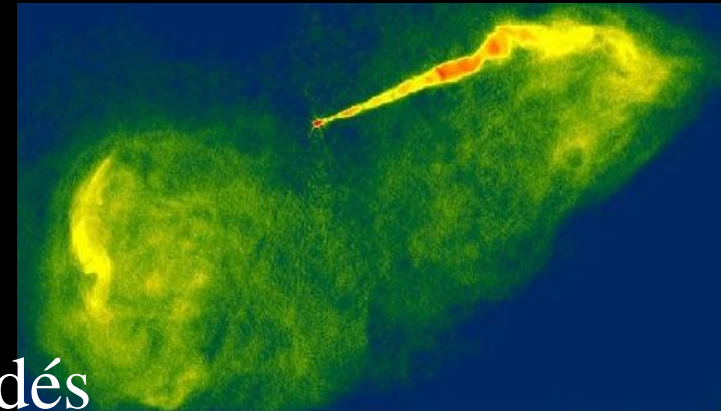
$$M_{\text{BH}} = (4.5 \pm 0.4) \times 10^6 M_{\odot}$$

*Ghez et al. 2008; Genzel et al. 2008*

# További evidencia

- **Aktív galaxismag**

- Nagyon kis tértartomány túlragyogja a galaxist
- hónapos időközönként változik
- relativisztikus jetek  $0.999c$
- Gáz keringési sebesség  $0.1c$
- relativisztikus vonalkiszélesedés



- **Fekete lyuk kettősök (naptömegű)**

- csillag + fekete lyuk
- változó röntgen emisszió
- spektrum arra utal, hogy nincs felszín

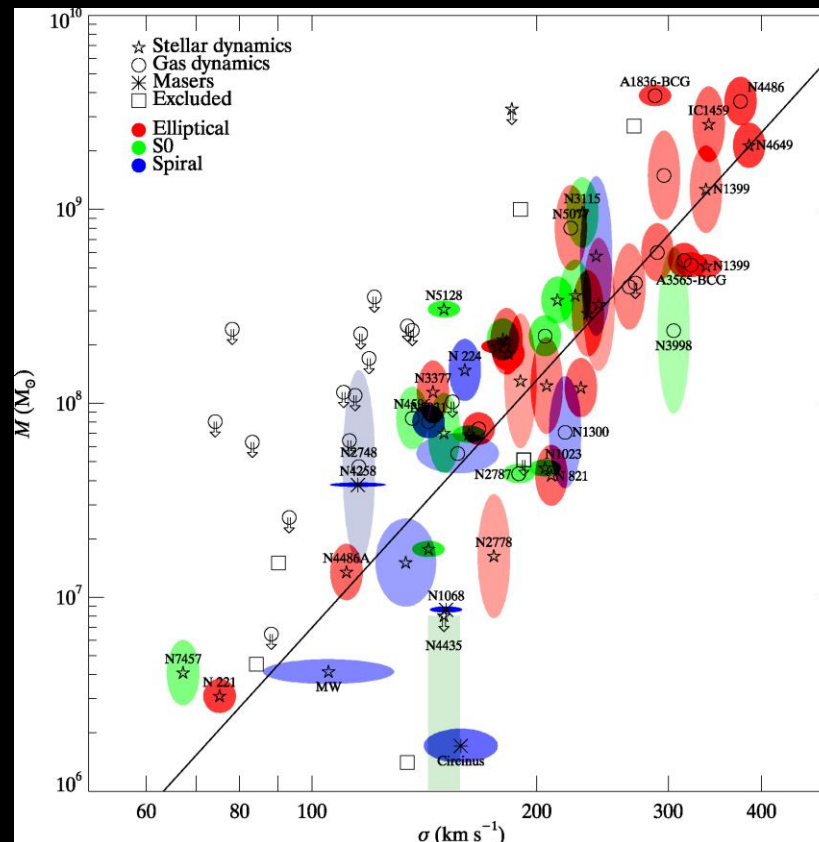




# Szupermasszív fekete lyukak (SMBH) és galaxisaik

0.2% galaxismag tömeg = SMBH fekete lyuk

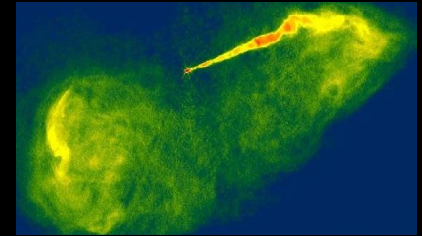
Fekete lyuk tömeg



Csillagok random sebessége

# Fekete lyuk fizika

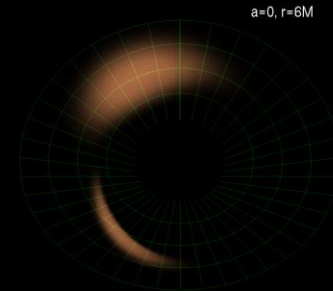
- Gáz akkréció elmélete:  
akkréciós korong, kiáramlás, jetek



- Általános relativitáselmélet ellenőrzése:  
erős gravitációs tér, horizont letézése

Kvantum effektusok a horizont körül (tűzfal?)

Általános relativitáselmélet érvénytelen a szingularitásnál

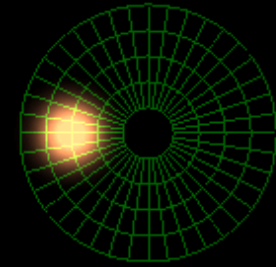
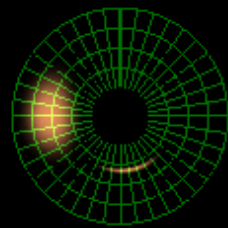


*SgrA\* a legnagyobb  
fekete lyuk az égen*

**10  $\mu$ as** [4 millió naptömeg @ 26,000 lyr]

# *Hőfolt keringése egy nem forgó fekete lyuk körül*

$a=0, r=6M$



$F_{LP}$

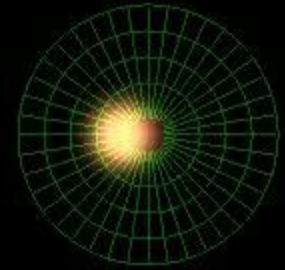
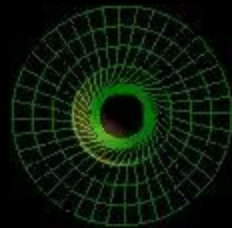


$F_{tot}$



# *Hőfolt keringése egy forgó fekete lyuk körül*

$a=0.95, r=ISCO$



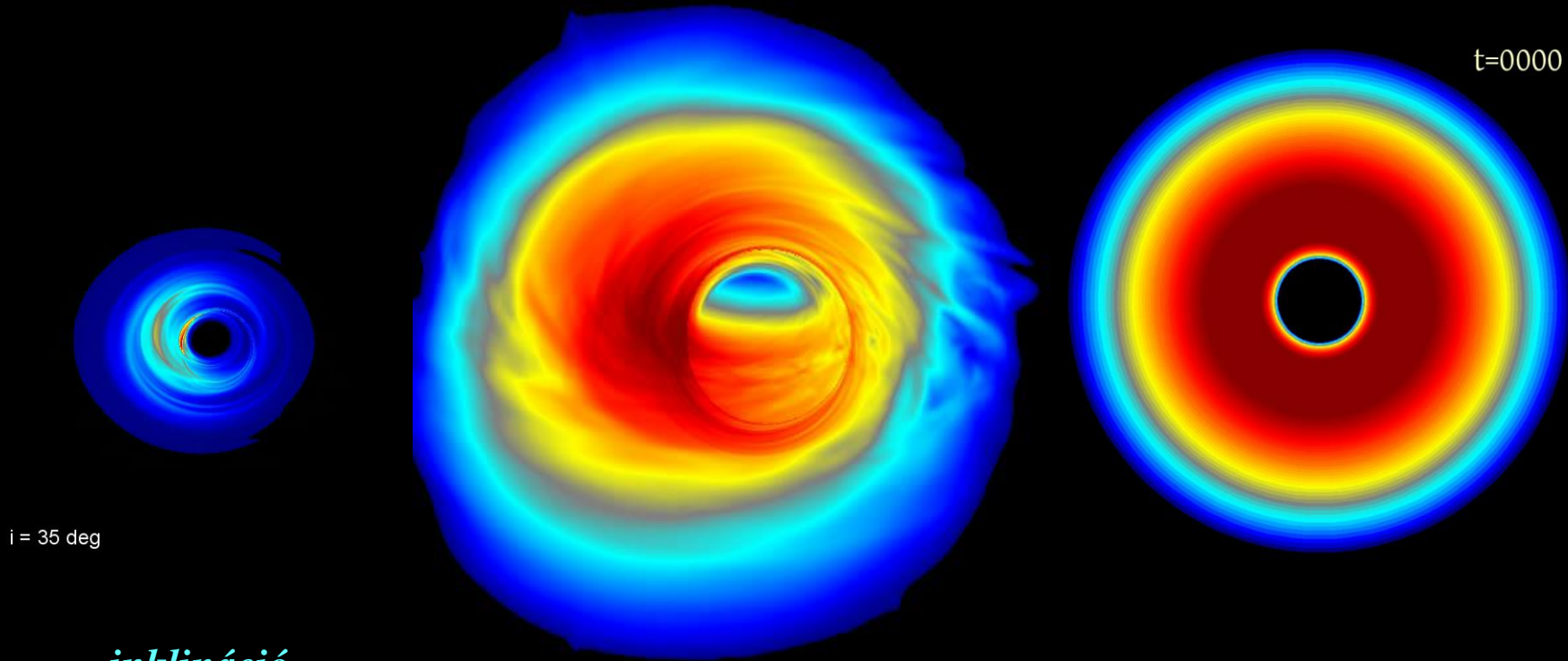
$F_{LP}$



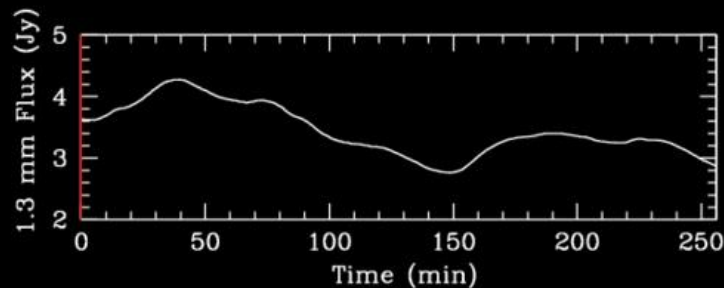
$F_{tot}$



# Numerikus szimulációk (GRMHD)



*inklináció*



*setup*

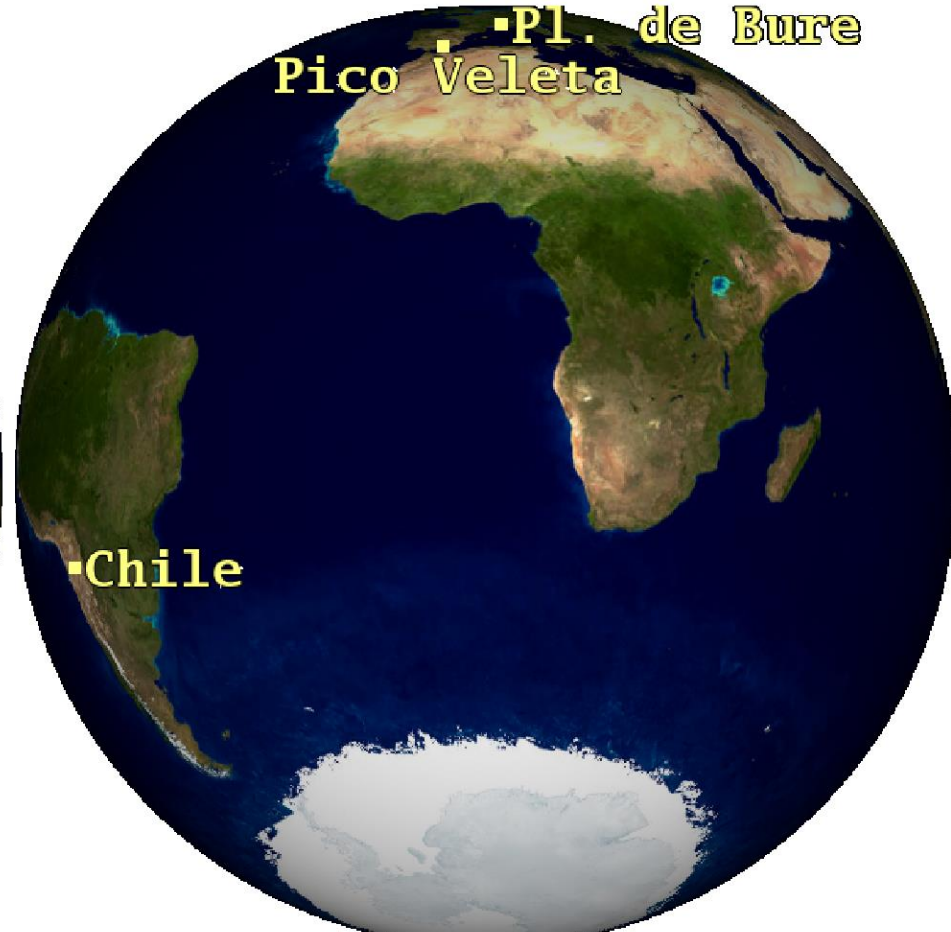
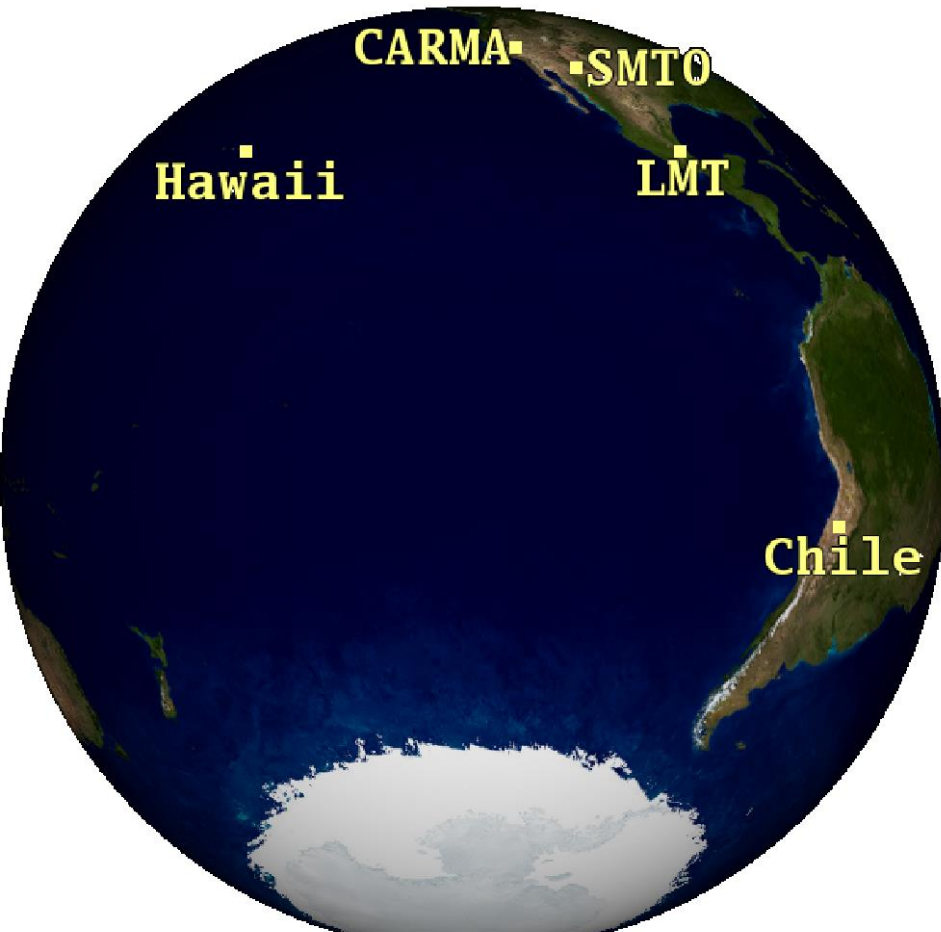
*C. Gammie, J. Dolence, M. Moscibrodzka, H. Shiokawa, P. Leung (2009)*



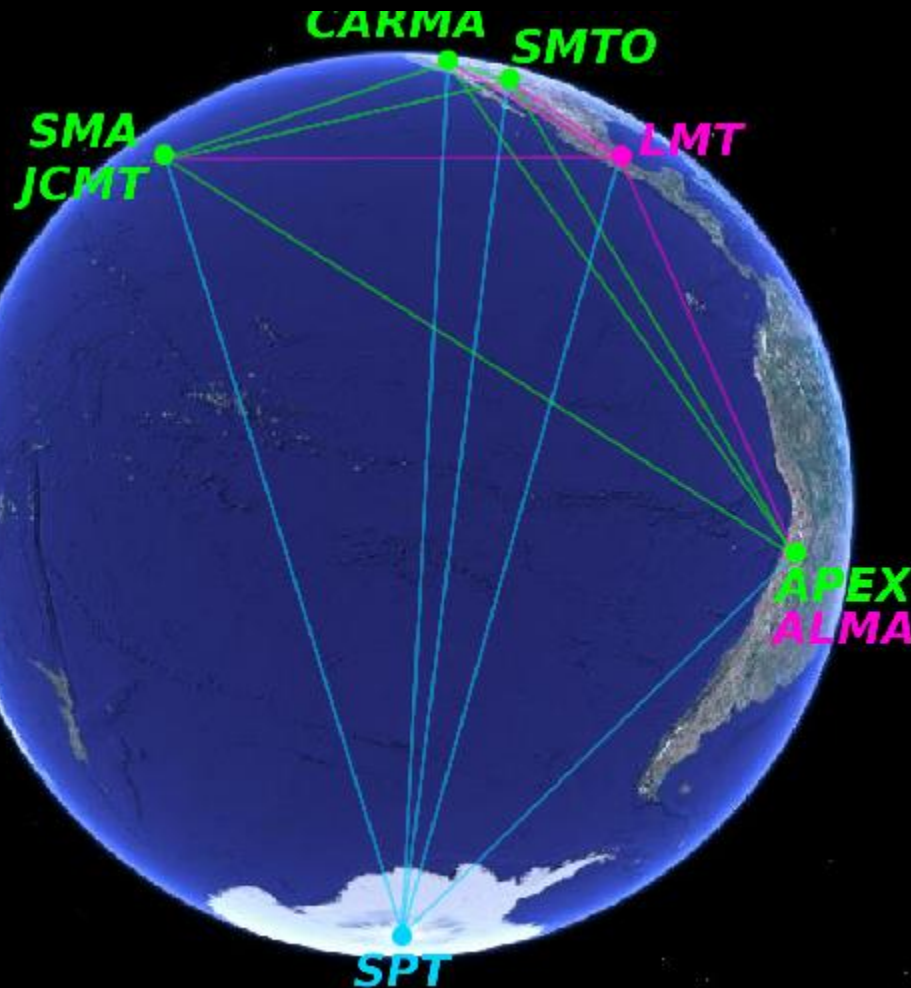
# *Very Long Baseline Interferometry (VLBI) szub-mm hullámhosszon*

**Föld méretű antenna**  
(11  $\mu\text{as}$ )  $\times$  ( $\lambda / 0.9 \text{ mm}$ )

Sgr A\* **10  $\mu\text{as}$**  [ $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$  @ 26k lyr]



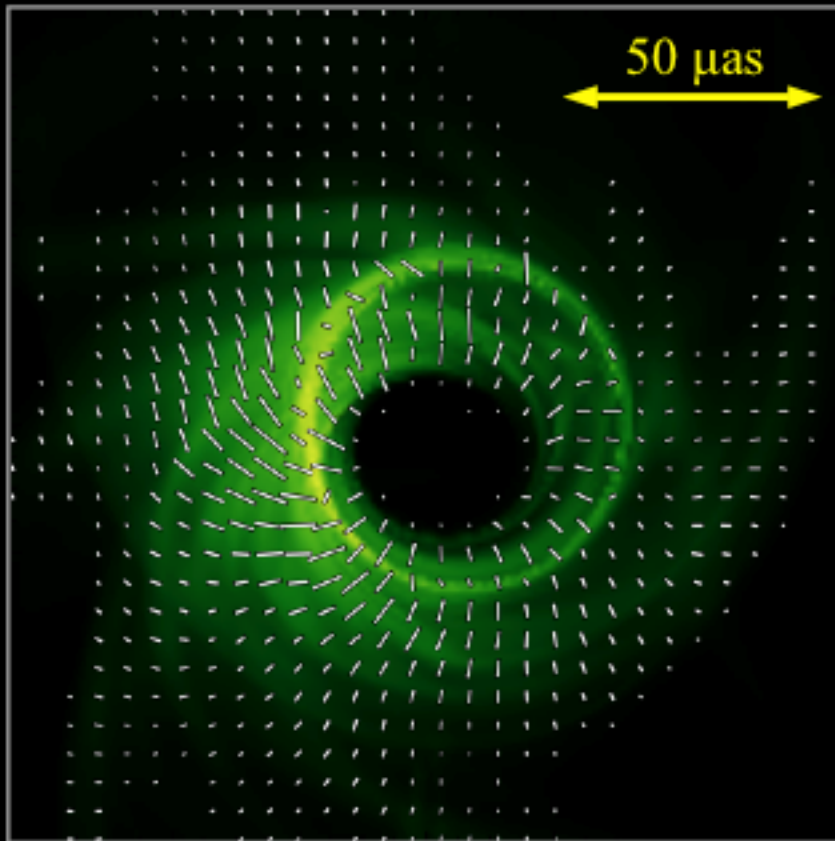
# *Very Long Baseline Interferometry (VLBI) szub-mm hullámhosszon*



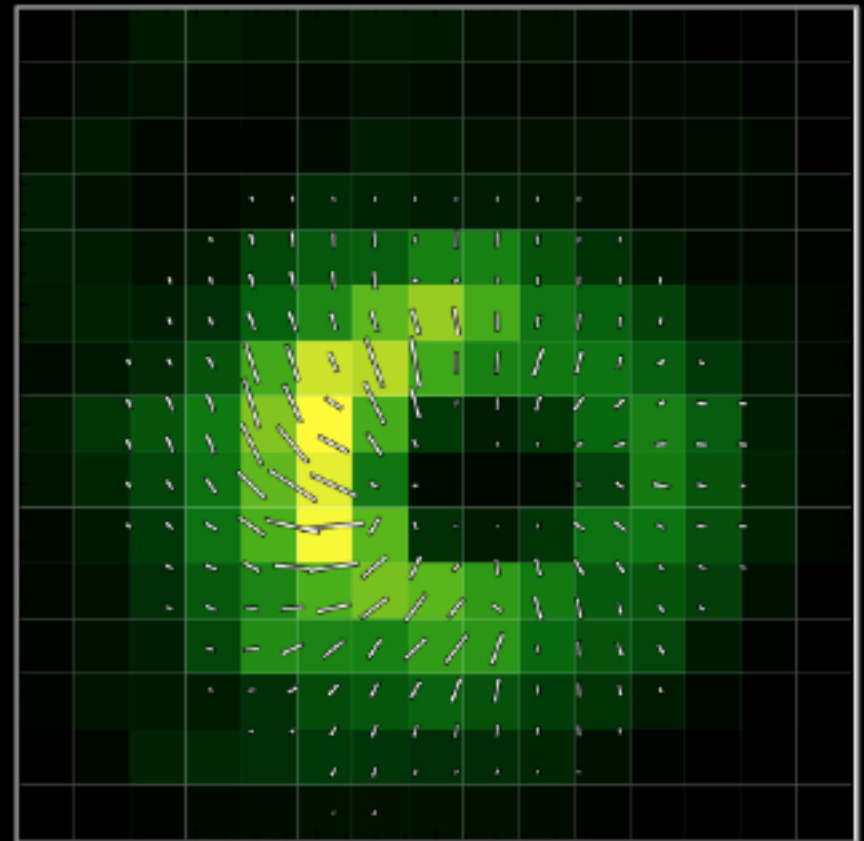
# Polarimetric Imaging

What can we hope to learn with the full EHT?

Simulated Image



Reconstructed Image

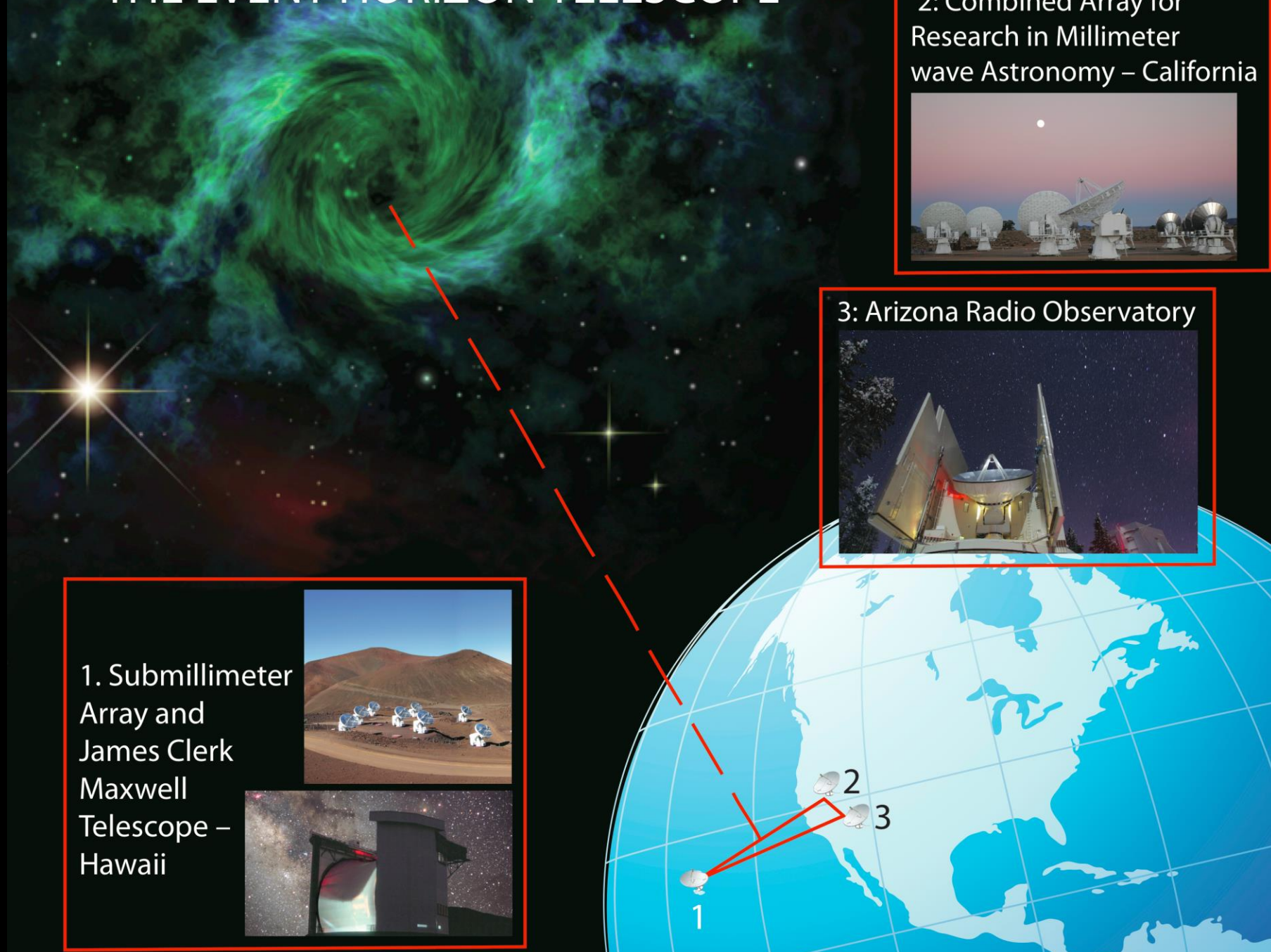


*Michael Johnson, et al. (2015)*

Simulated Data: Jason Dexter  
Polarimetric Imaging: Andrew Chael



# THE EVENT HORIZON TELESCOPE



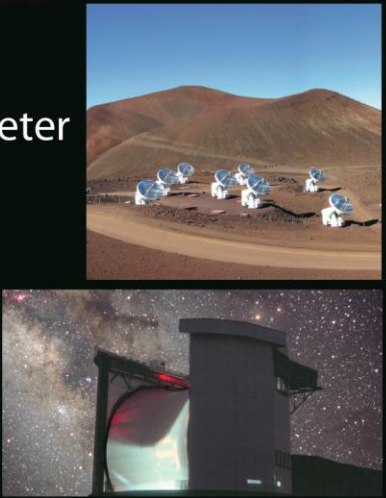
2: Combined Array for Research in Millimeter wave Astronomy – California



3: Arizona Radio Observatory



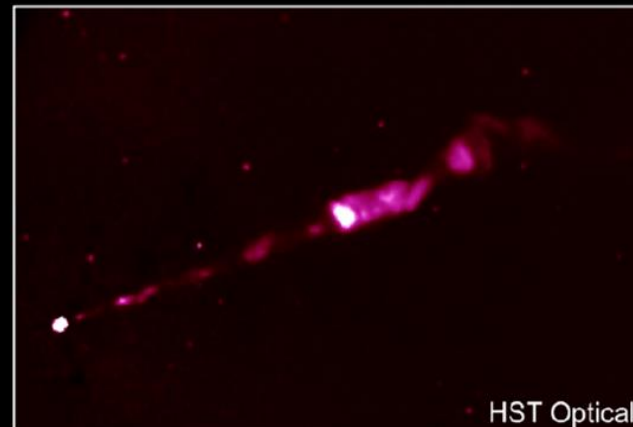
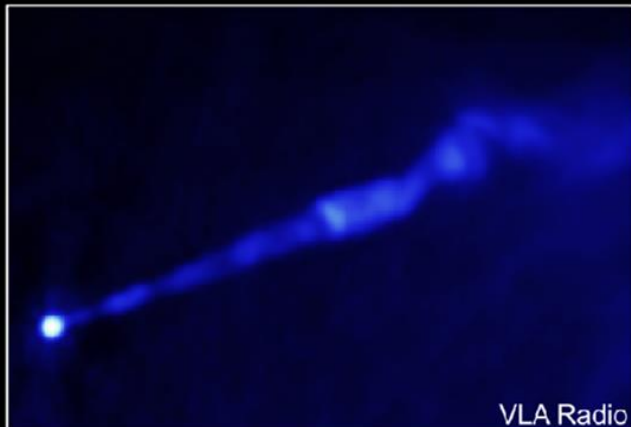
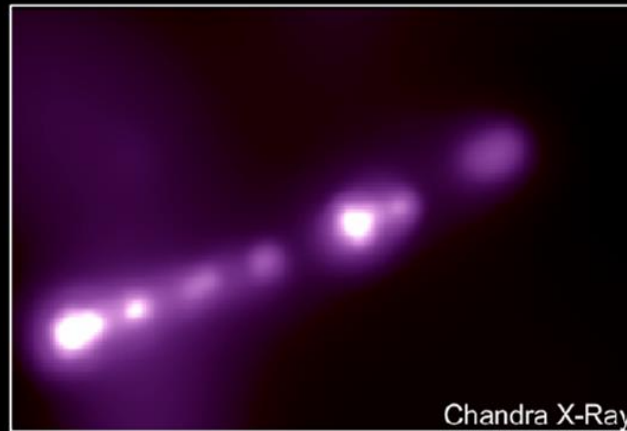
1. Submillimeter Array and James Clerk Maxwell Telescope – Hawaii



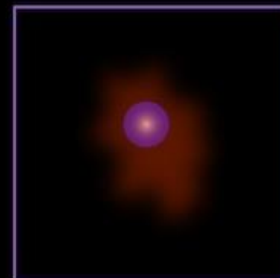
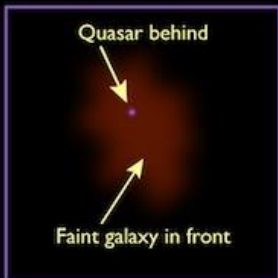
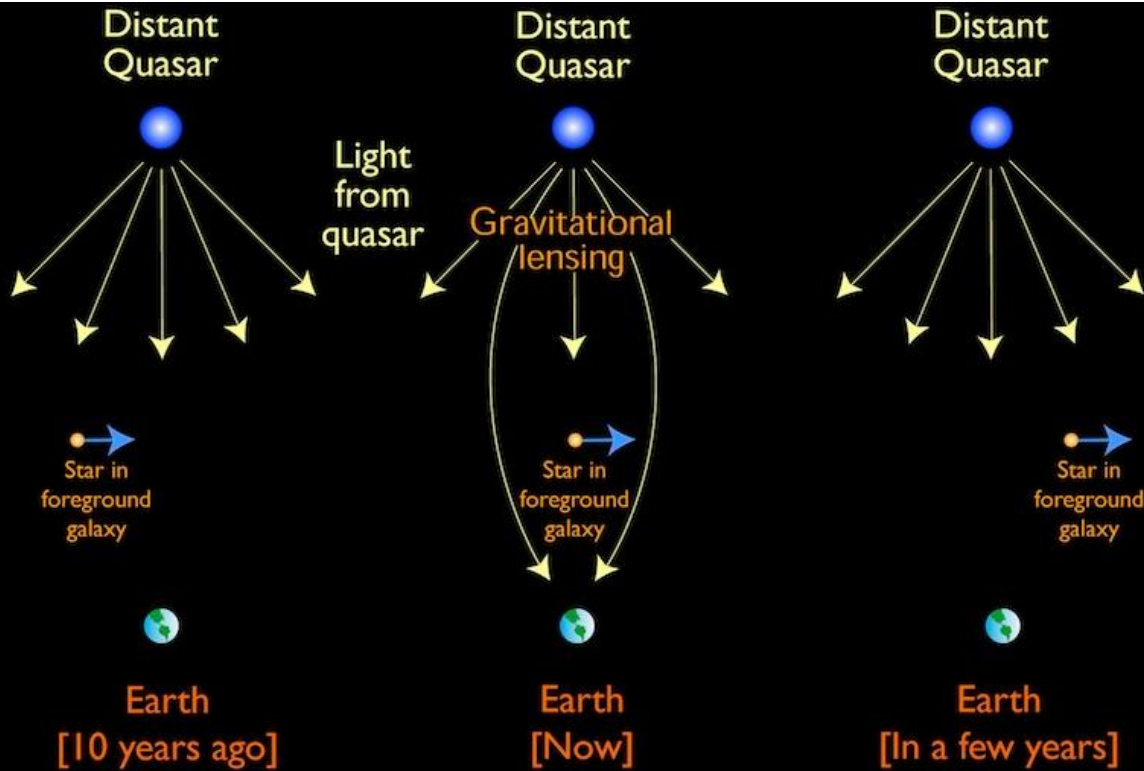
# M87

$M_{\text{BH}} = 6.4 \times 10^9 M_{\odot}$  *1400-szor nagyobb tömegű mint SgrA\**

*de 2000-szer messzebb*

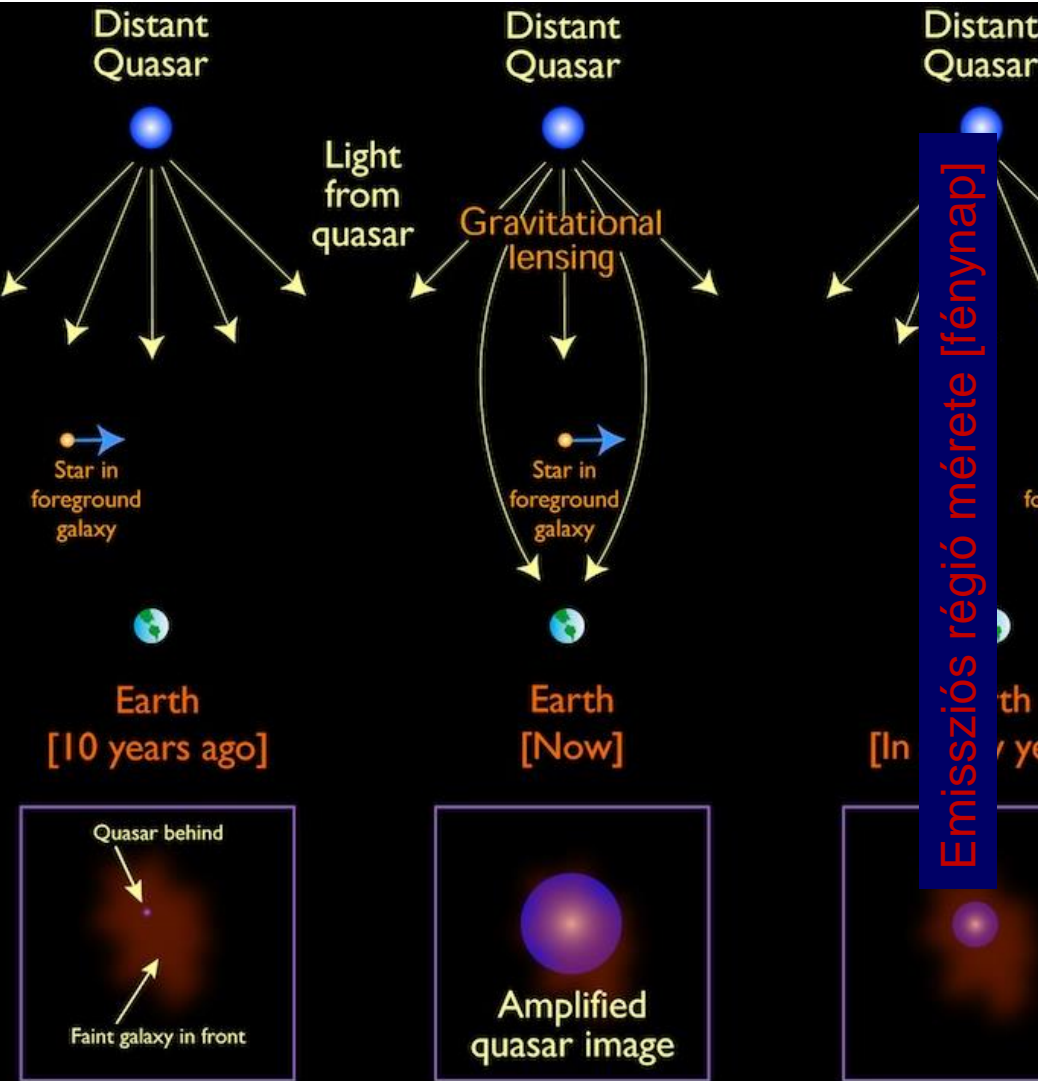


# Fekete lyuk képképzés II. – mikrolencsésítés



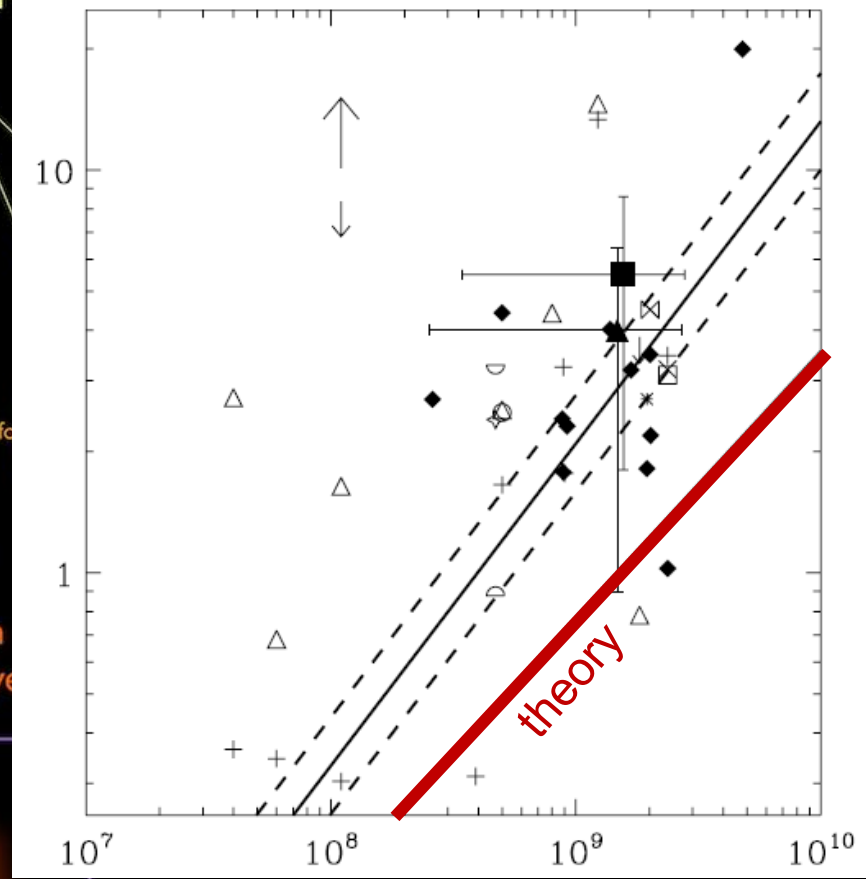


# Fekete lyuk képződés II. – mikrolencsésítés

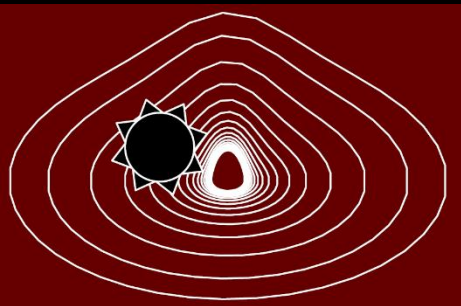


Emissziós régió mérete [fénynap]

Jimenez-Vicente+ (2012)



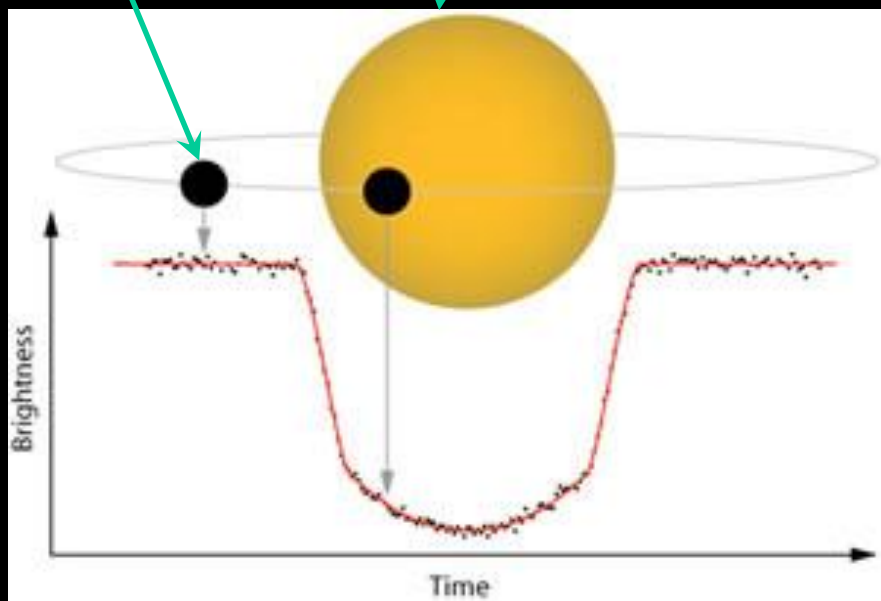
Fekete lyuk tömege



## Fekete lyuk képalkotás III. – csillagtranzit

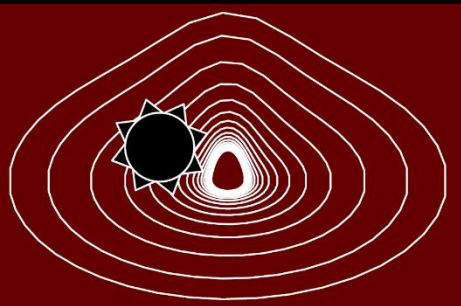
Gázkorong a fekete lyuk körül

Csillag



Szerencsés egybeesés:

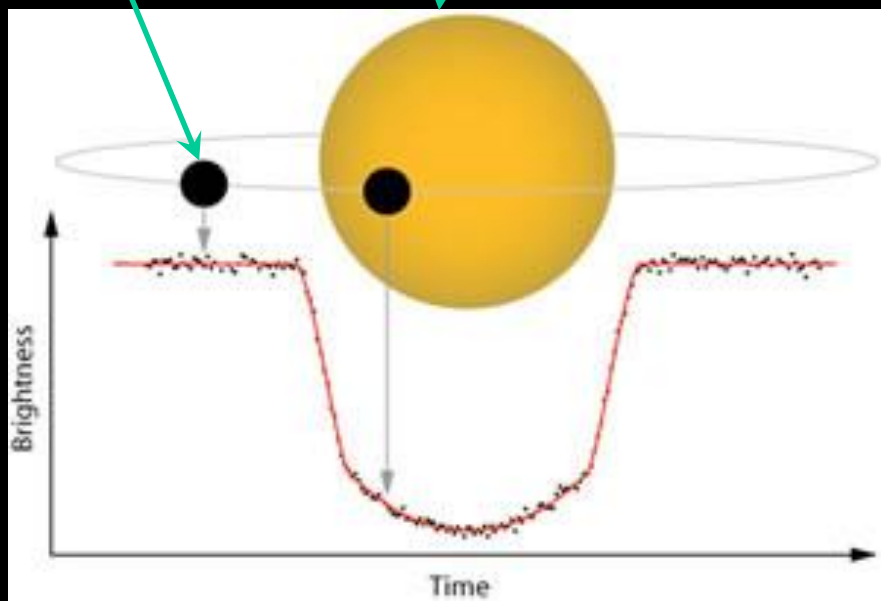
- Sűrű csillaghalmaz a szuper masszív fekete lyuk körül
- A szupermasszív fekete lyuk mérete összemérhető a csillagok méretével



## Fekete lyuk képalkotás III. – csillagtranzit

Gázkorong a fekete lyuk körül

Csillag



Szerencsés egybeesés:

- Sűrű csillaghalmaz a szuper masszív fekete lyuk körül
- A szupermasszív fekete lyuk mérete összemérhető a csillagok méretével

**Jóslat:**

- tranzithossz óra – hetek
- valószínűség  $10^{-4}$
- Tranzitmélység  $10^{-3}$  to 1

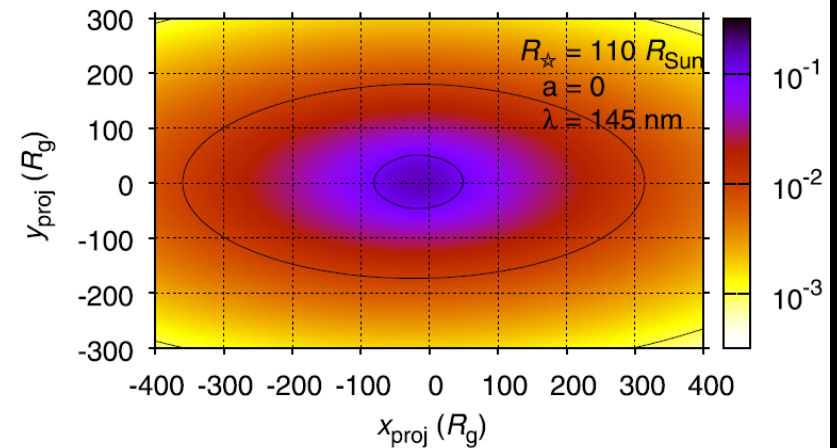
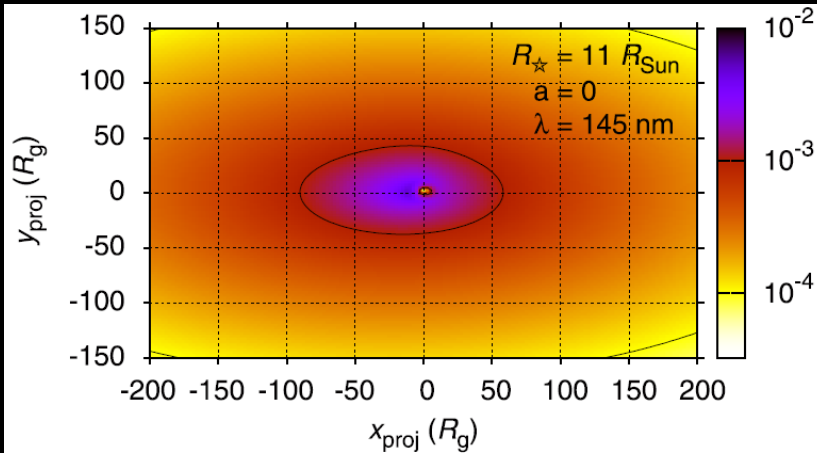
Bence Beky & Bence Kocsis (2013)

# Fekete lyuk képképzés III. – csillagtranzit

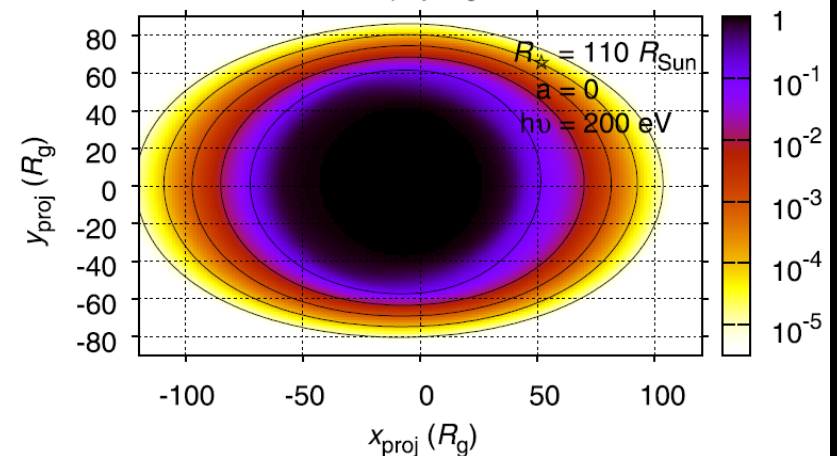
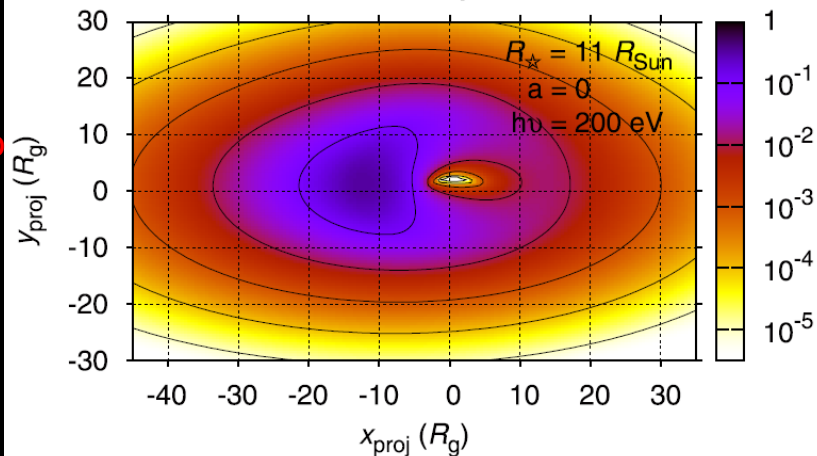
Főágú O csillag

Vörös óriás

UV



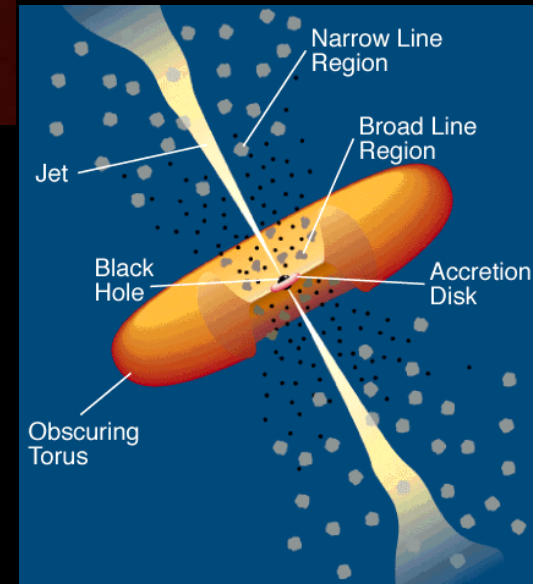
Röntgen



# Elektromágneses megfigyelhetők

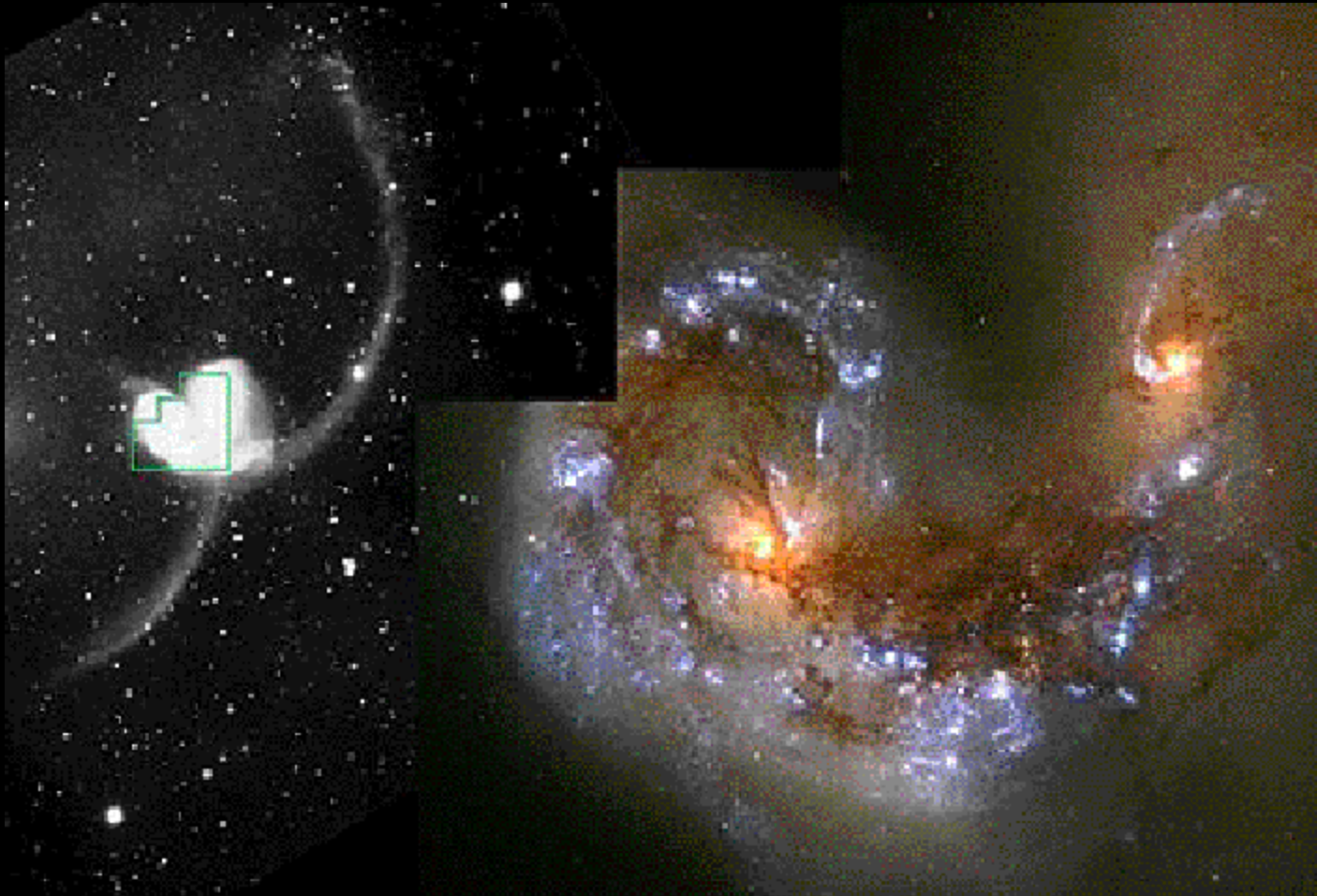


- **Diszk:** UV/optikai/IR, **Korona:** röntgen
- **Jet:** rádió, röntgen
- **Felhő:** széles és vékony vonalak





# *Fekete lyuk kettősök a galaxisütközéseknél*



B. Whitmore (STScI), F. Schweizer (Carnegie Institute),



# *Aktív galaxismag kettős: 1-10kpc szeparáció ( $z < 0.3$ vöröseltolódásnál)*

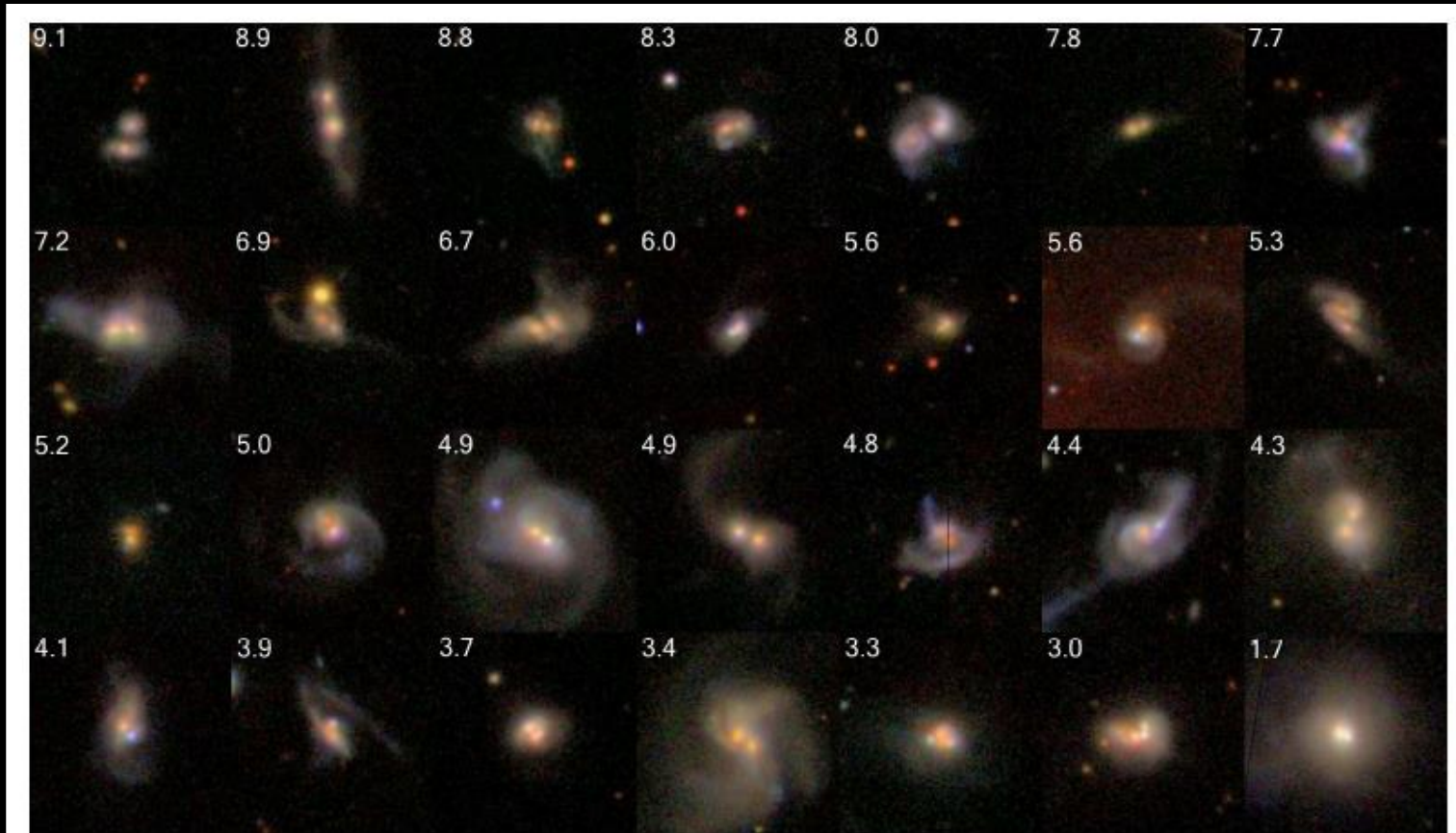
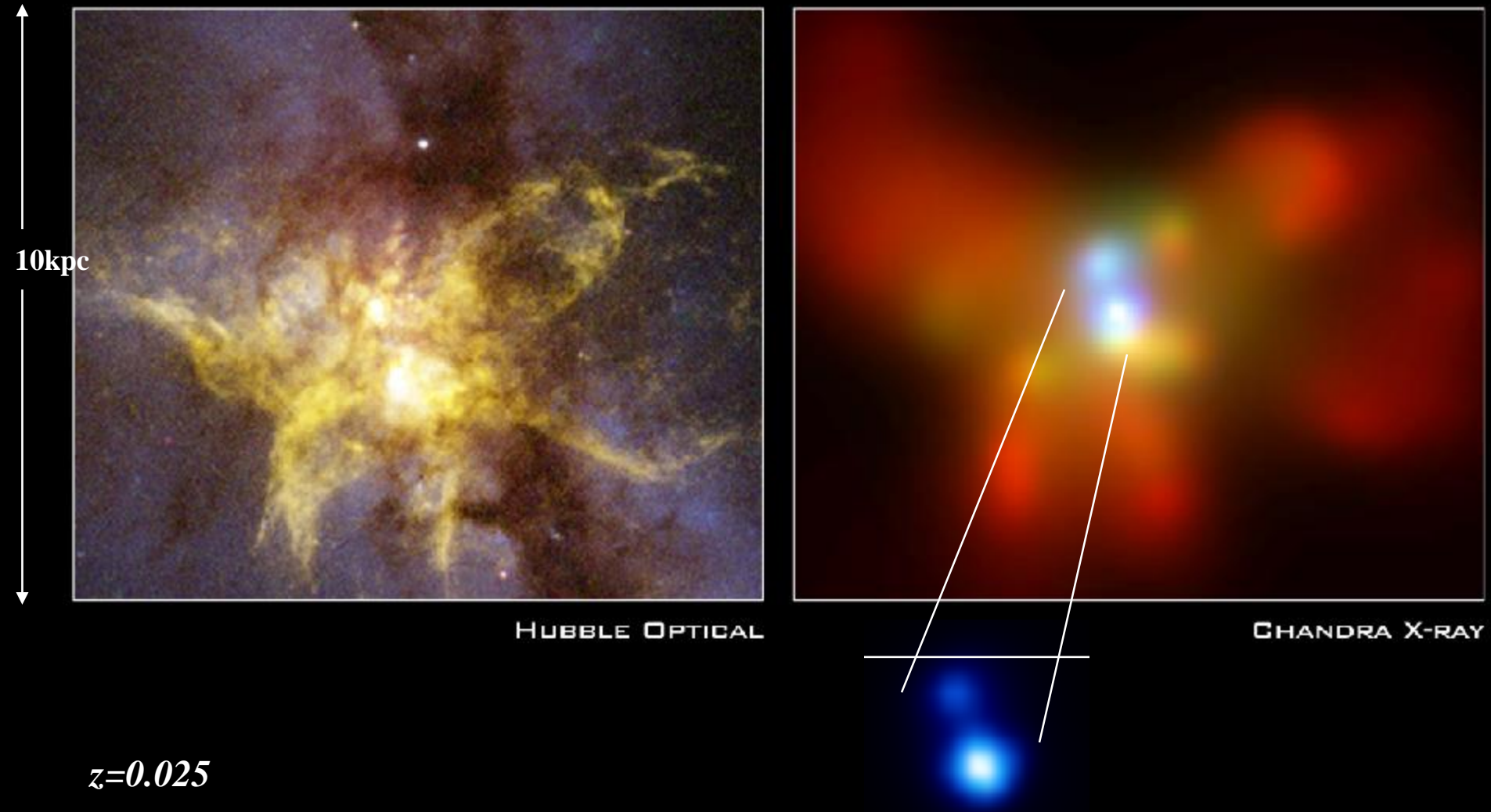


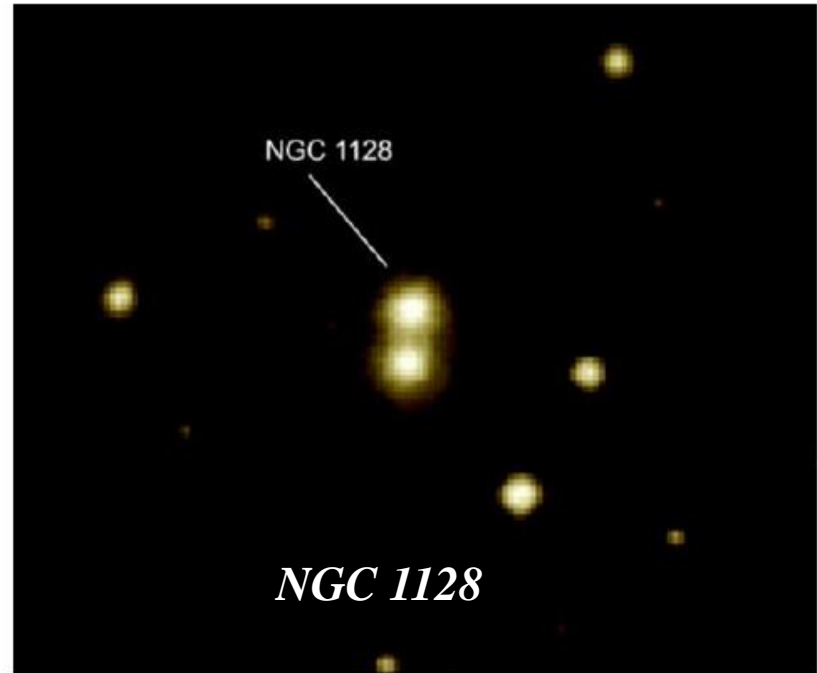
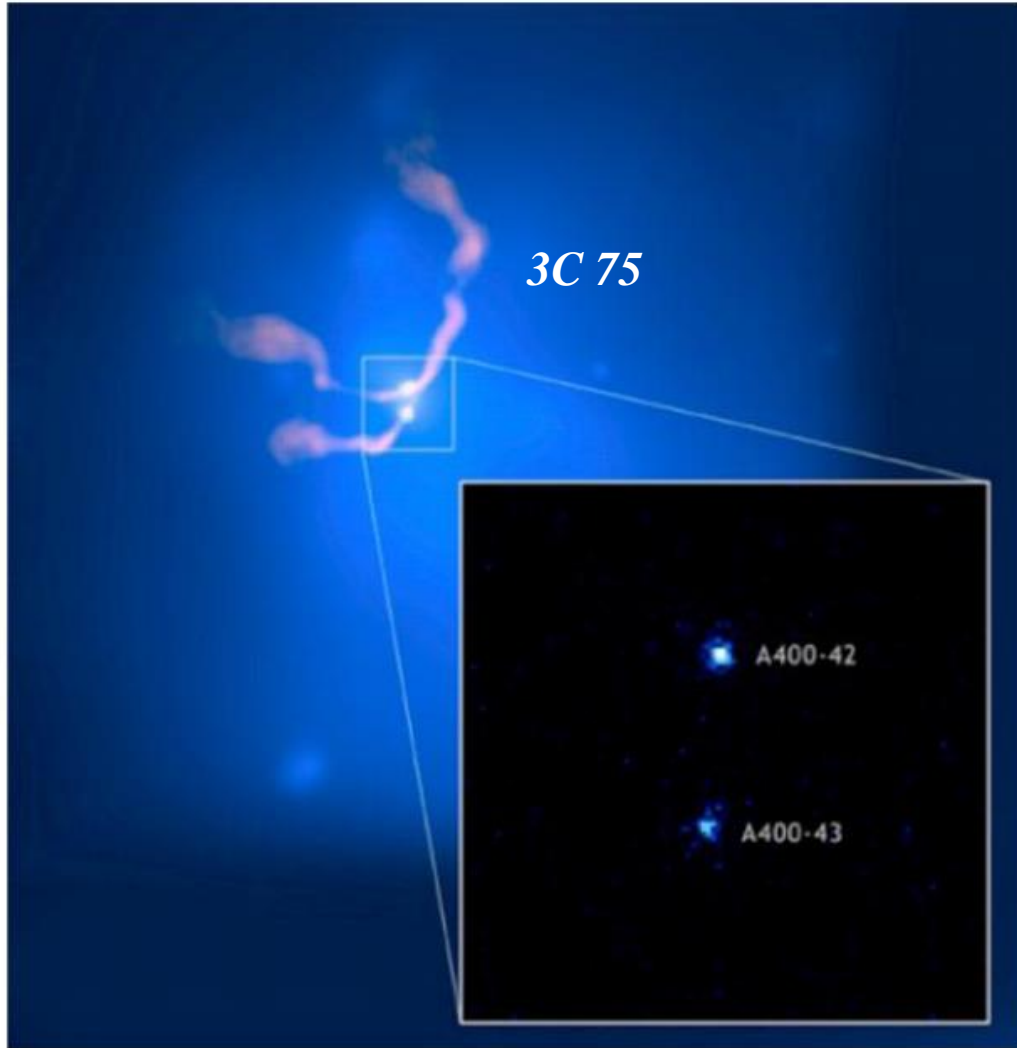
Figure 1: SDSS *gri*-color composite images of some binary AGNs selected from SDSS. North is up and east is to the left. Each panel is  $50 \times 50''$ . We order the targets with decreasing projected separation  $r_p$ , ranging from  $r_p = 9.1$  kpc to 1.7 kpc as labeled on each panel.

# *SMBH kettős röntgen képe NGC 6240-ben*

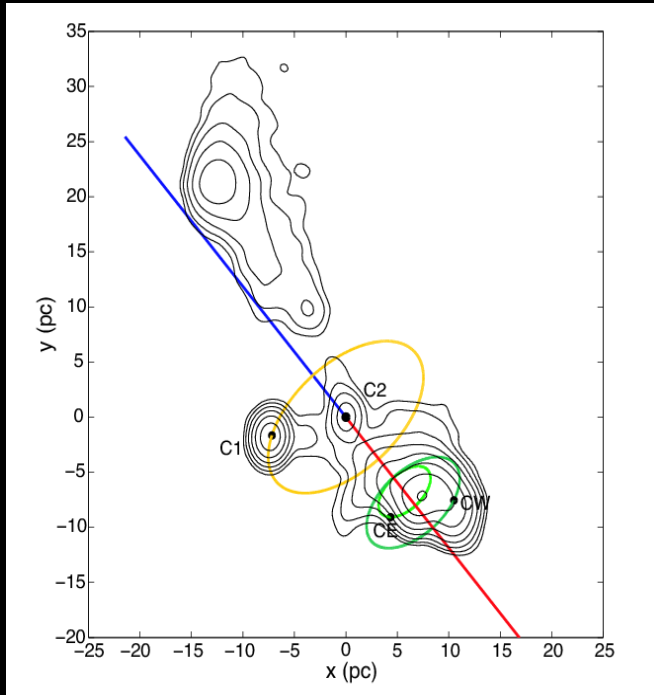


*Komossa et al. 2002*

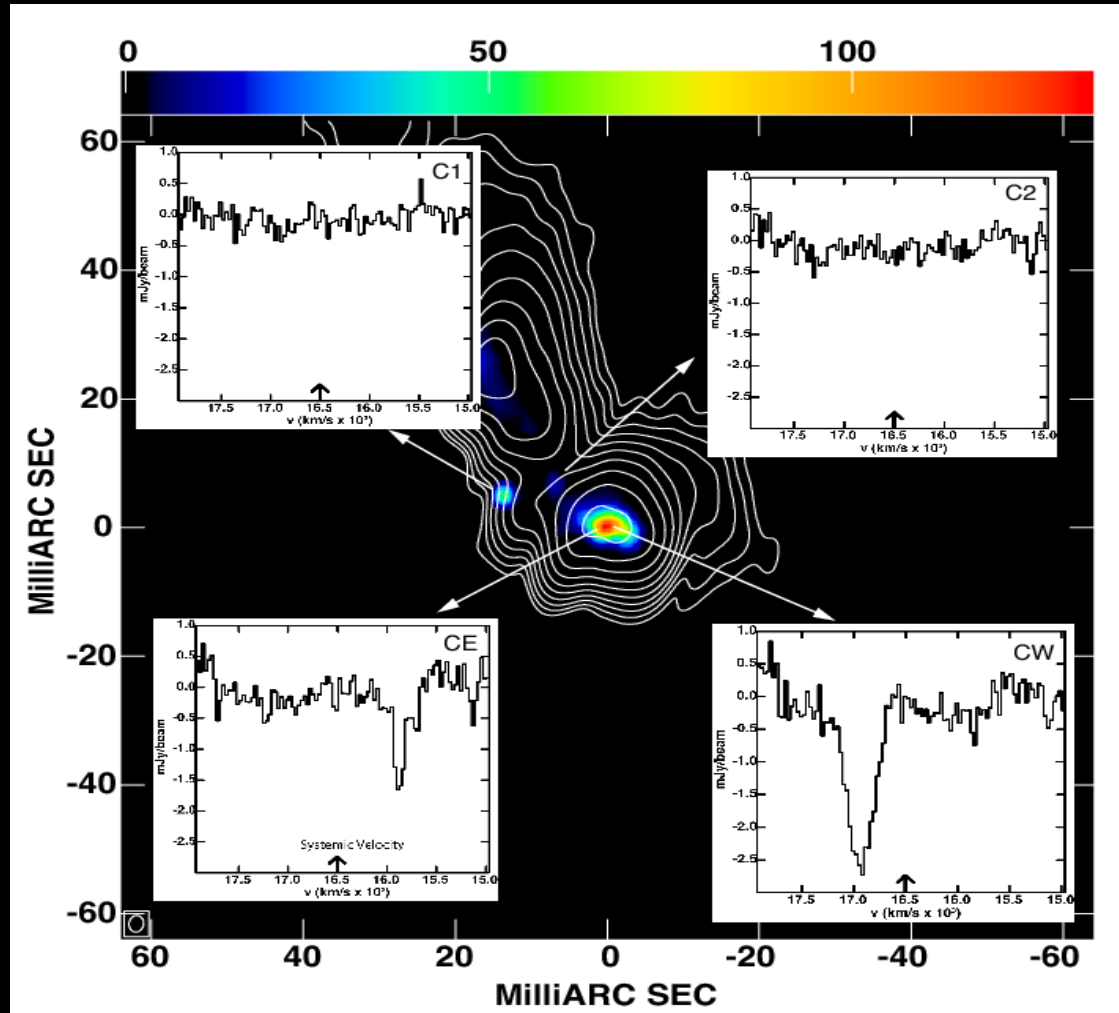
*Röntgen klaszter Abell 400*



# 0402+379 (Rodriguez et al. 2006-9)

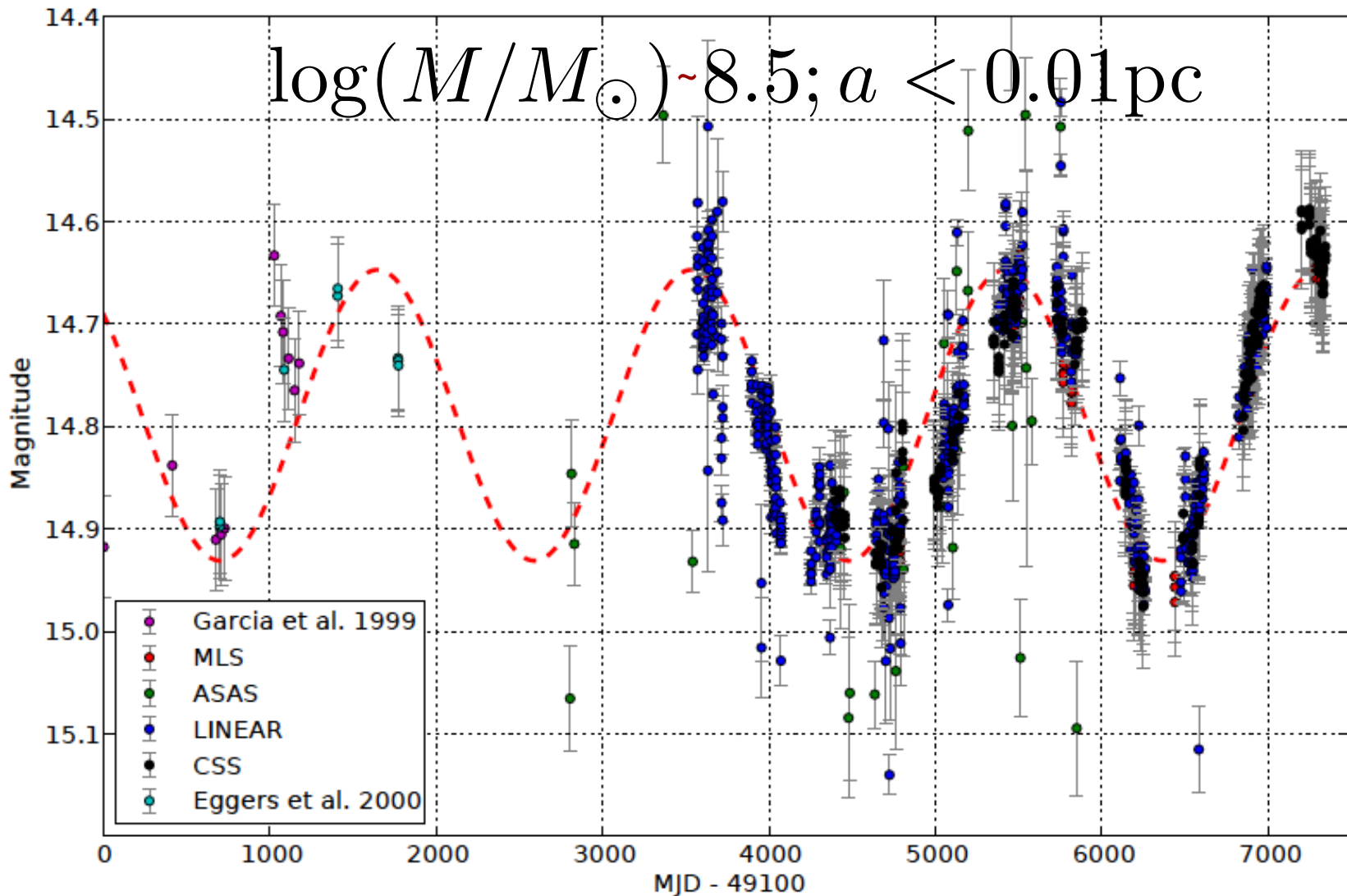


VLBI at 1.35 GHz



- Projektált szeparáció: 7.3 pc,
- Becsült össztömeg:  $\sim 10^9 M_{\odot}$

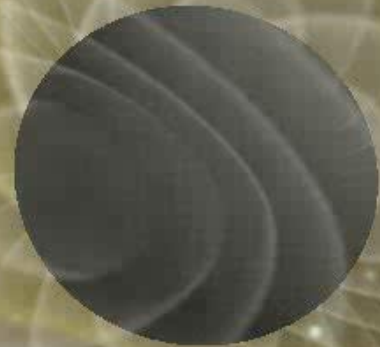
# PG 1302-102: periódus 5.2 év





# Gravitációs hullámok

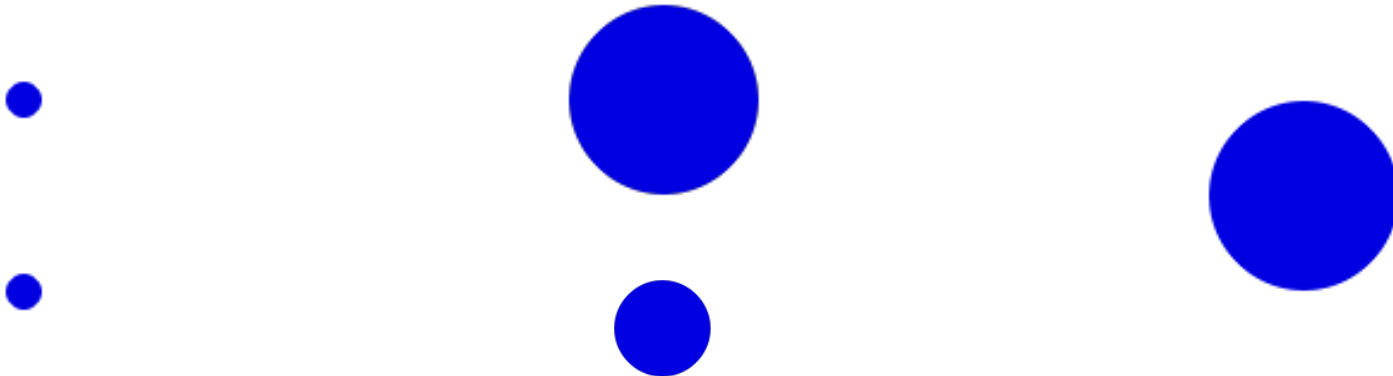
(Centrella et al. 2007)





# Gravitációs hullámok

- Gravitációs hullámok = téridő disztorzio
- Fénysebességgel terjed
- Relatív megnyúlás
- Távolsággal  $1/r$  szerint csökken
- Két polarizáció



# Gravitációshullám detektorok



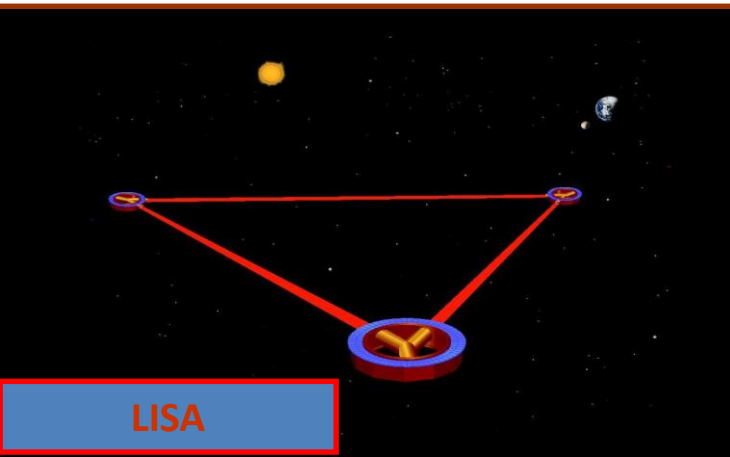
LIGO

Laser Interferometric Gravitational wave Obs.

Pulzár időmérő rendszerek



PTA



LISA

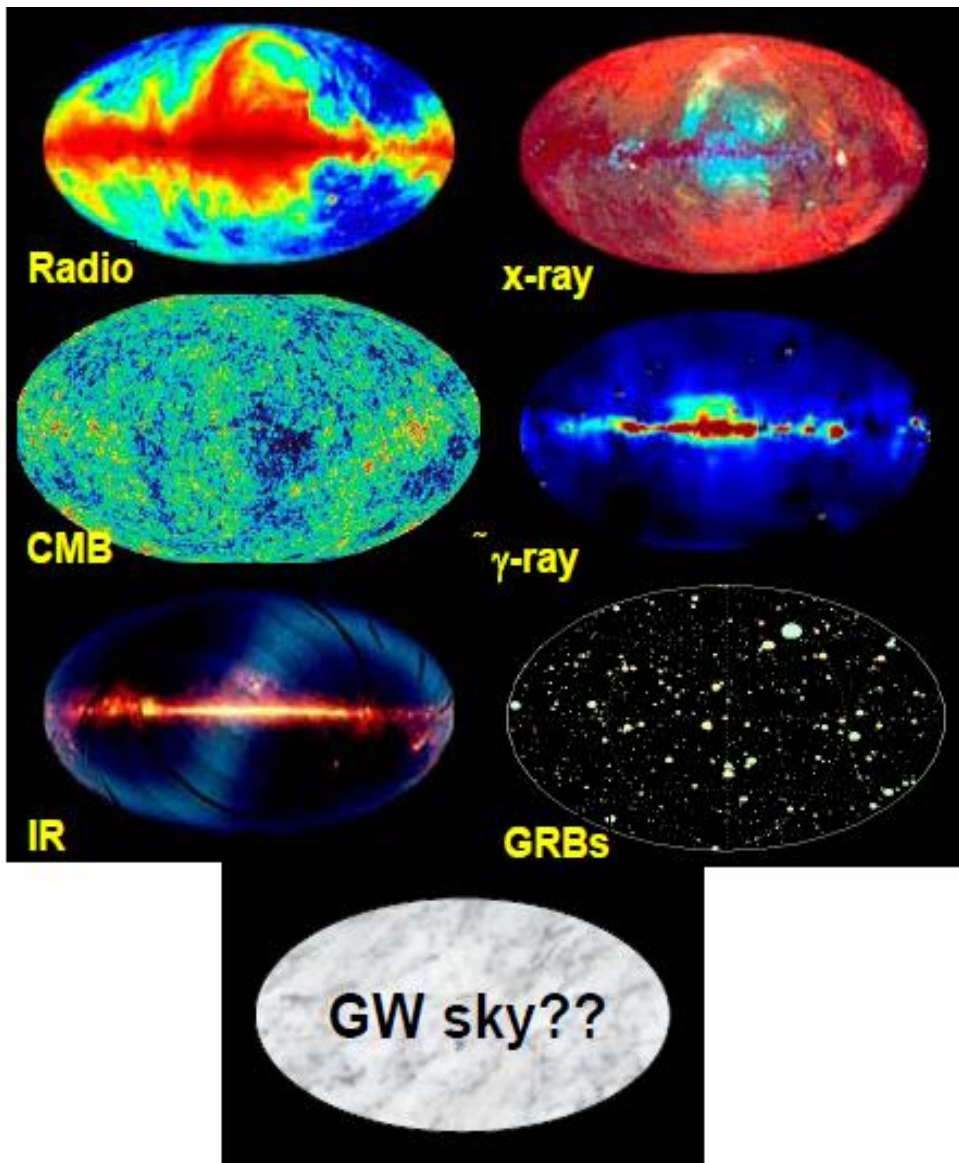


# Ma hajnalban



LISA pathfinder

# Az univerzumra egy új ablak



- Várjuk a váratlant!



# Leggyakoribb események

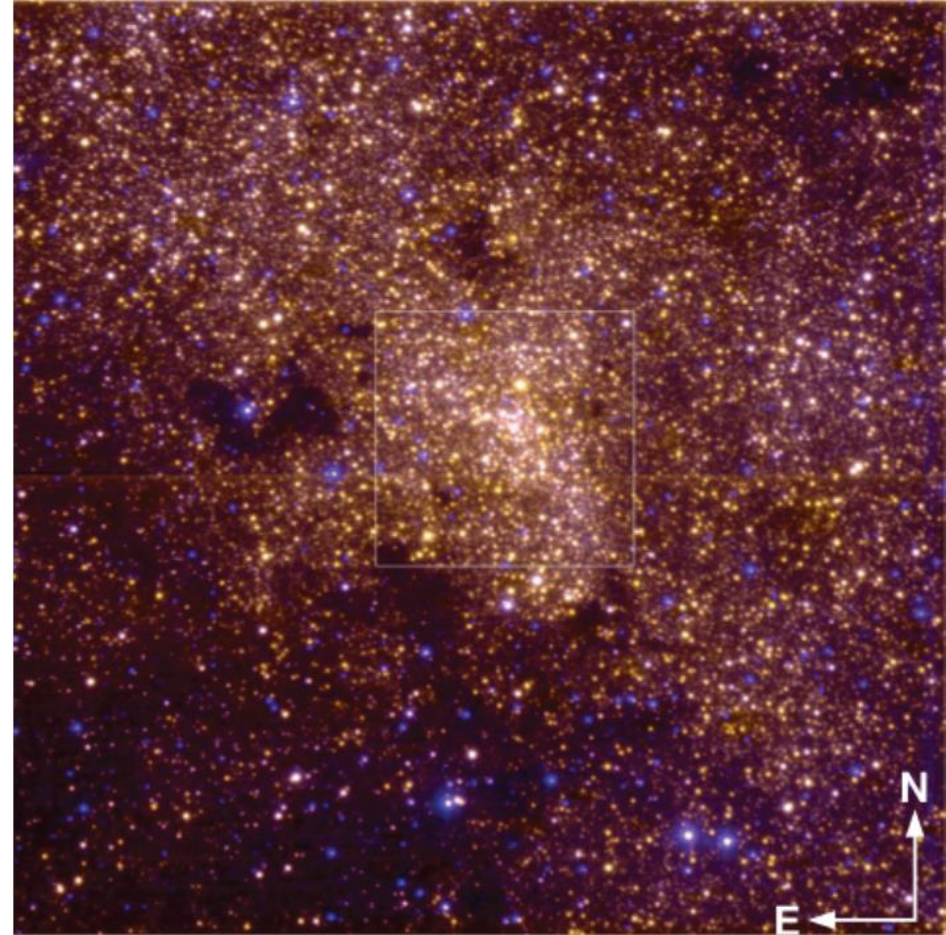
## Galaxismag

### A legsűrűbb csillaghalmazok

- $10^6 - 9 M_{\text{sun}}$  szupermasszív fekete lyuk
- $10^6 - 9$  csillag
- $10^4 - 7$  naptömegű fekete lyuk
- Méret: 1 pc – 1 kpc

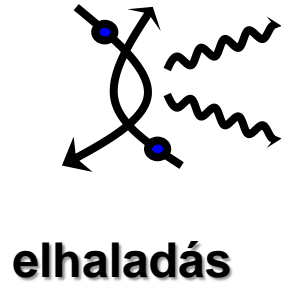
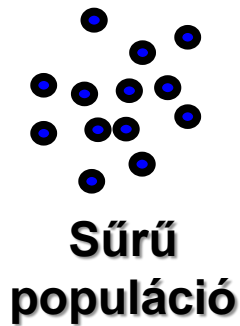
## Gömbhalmaz

- 200 darab a Tejút galaxisban
- $10^4 - 6$  csillag,  $10^1 - 3$  fekete lyuk
- Nincs központi fekete lyuk
- Méret: 1 pc – 10 pc

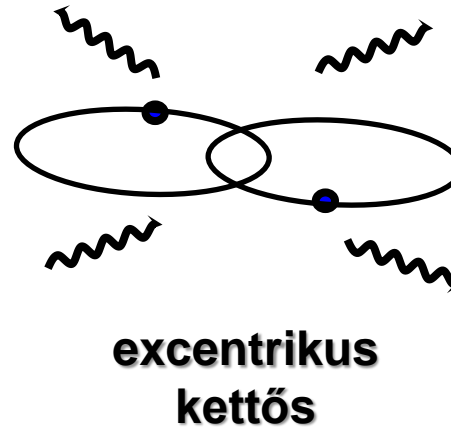


Schoedel et al. 150"x150"

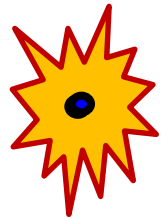
# Ismétlődő LIGO felvillanások



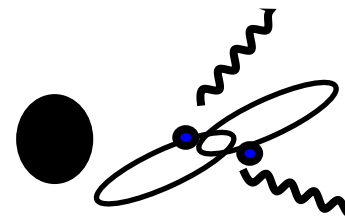
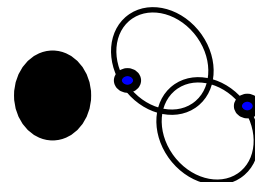
*grav. hull. emisszió*



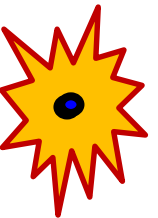
*grav. hull. emisszió*



Kocsis, Gaspar, Marka 2006; O'Leary, Kocsis, Loeb 2009; Kocsis & Levin 2012

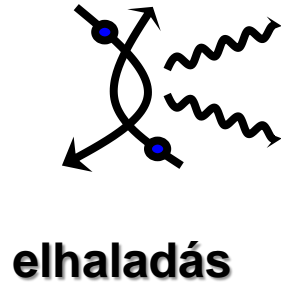
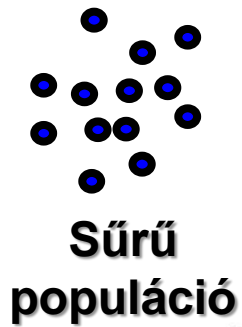


*grav. hull. emisszió*

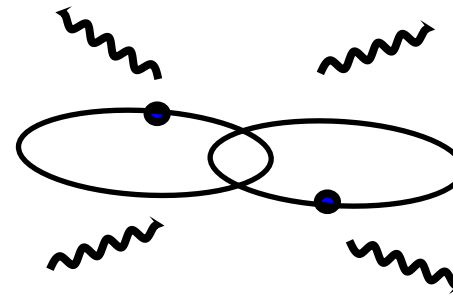


Wen 2003; Antonini & Perets (2012); Naoz, Kocsis, Loeb, Yunes (2012)

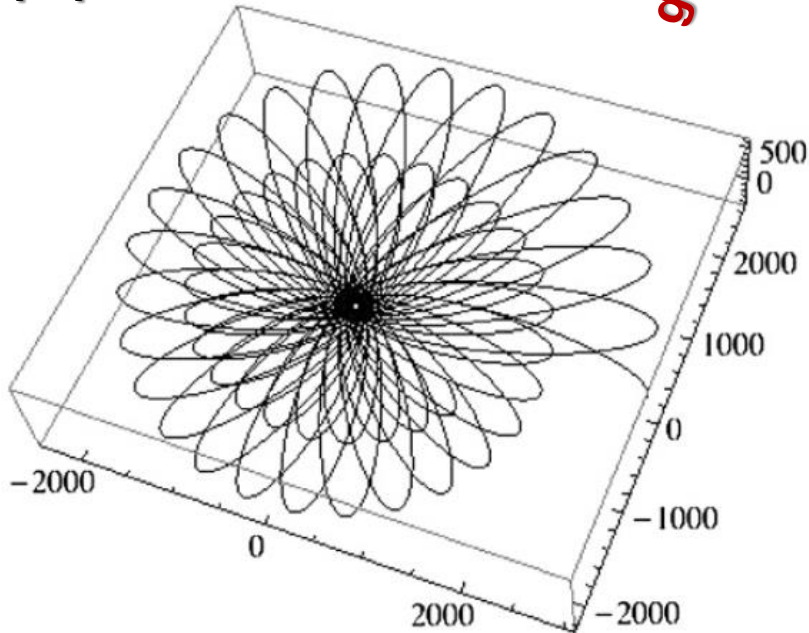
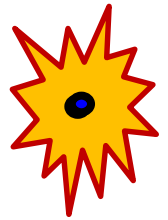
# Ismétlődő LIGO felvillanások



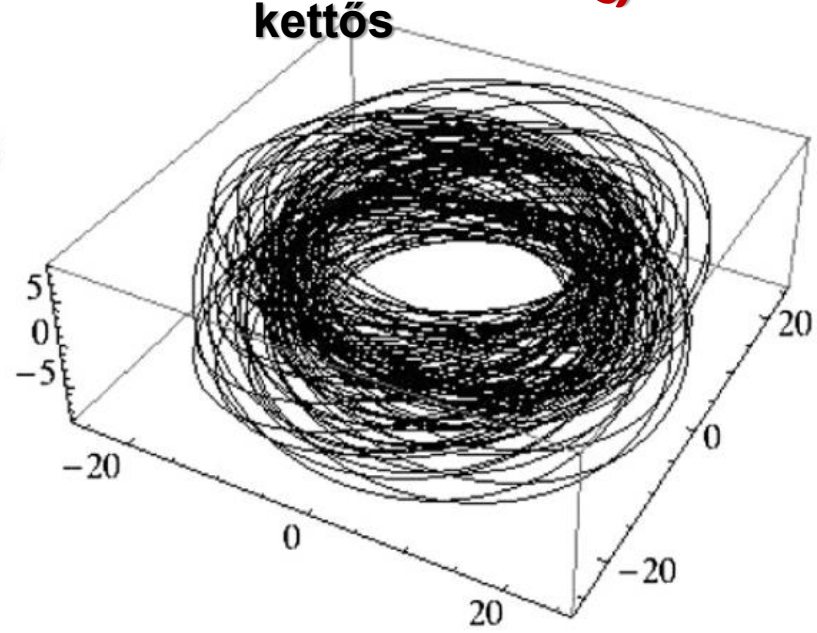
*grav. hull. emisszió*



*grav. hull. emisszió*



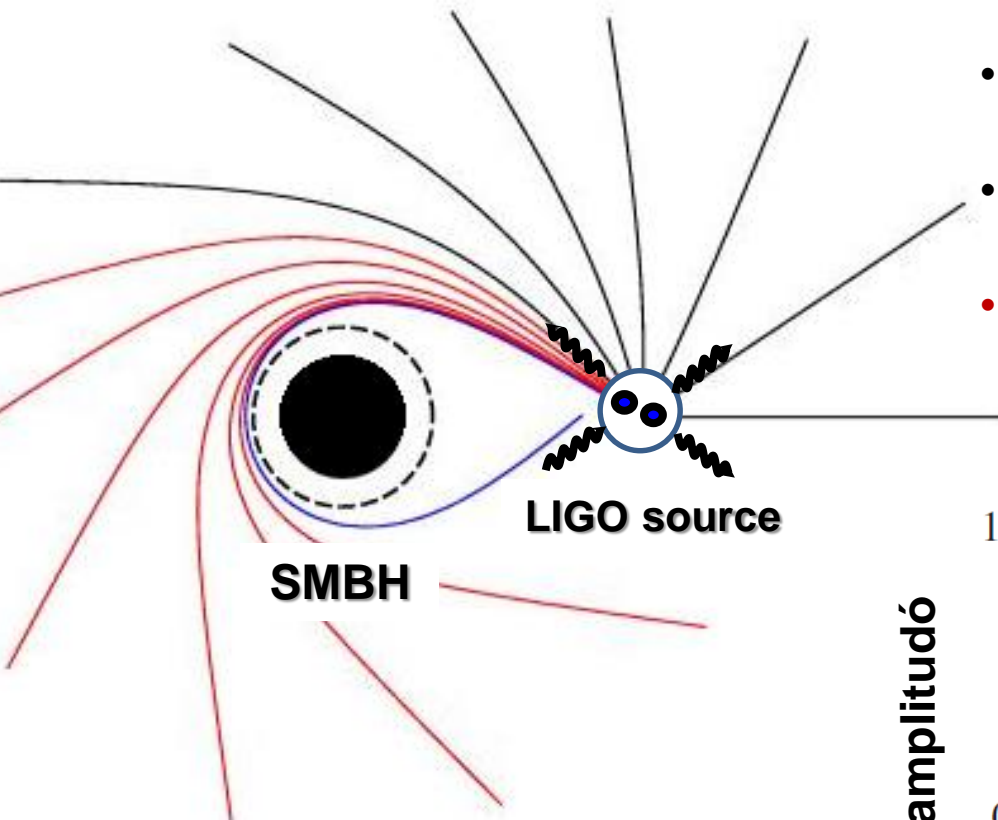
Befogódás után 1 órával



Utolsó 5 másodperc ütközés előtt



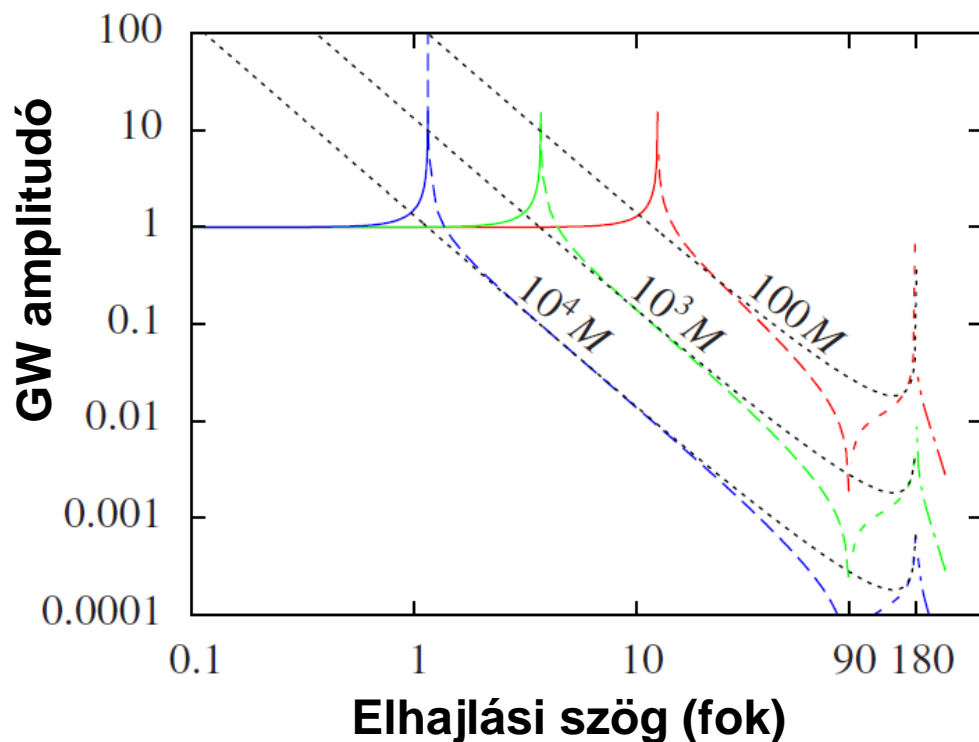
# Gravitációshullám (GW) visszhangok



- Hullámfront elhajlik a szupermasszív fekete lyuk környezetében
- Diszperzió, interferencia
- **Visszhang** amplitúdó függ a fekete lyuktól mért távolságtól és elhajlási szögtől

GW visszhang érkezési ideje

$$14 \text{ h} \times (1 - \cos \alpha) M_6 (r / 10^4 M)$$



# Nagy kérdések

- Valóban fekete lyukak?
- Hogy keletkeznek?
- Hogy nőttek ekkorára?
  - közbülső tömegű ( $10^{2-4} M_{\text{Sun}}$ ) fekete lyukak?
- Hogy hatnak a környezetükre?
  - Hogy akkretálnak anyagot?
  - Hogy lönek ki jeteket?
- Mitől változékony a sugárzás?

# Konklúzió

- Fekete lyukak léteznek
- Szupermasszív fekete lyukak a galaxisok közepén
- Extrém fényes sugárzás hajtóművei
- Árnyékuk megfigyelhető lesz a közeljövőben
- Gravitációs hullámok új megfigyelési lehetőséget adnak
- Sok megoldatlan probléma