

# L'exploration de Sagittarius A\*, le trou noir super massif de notre galaxie

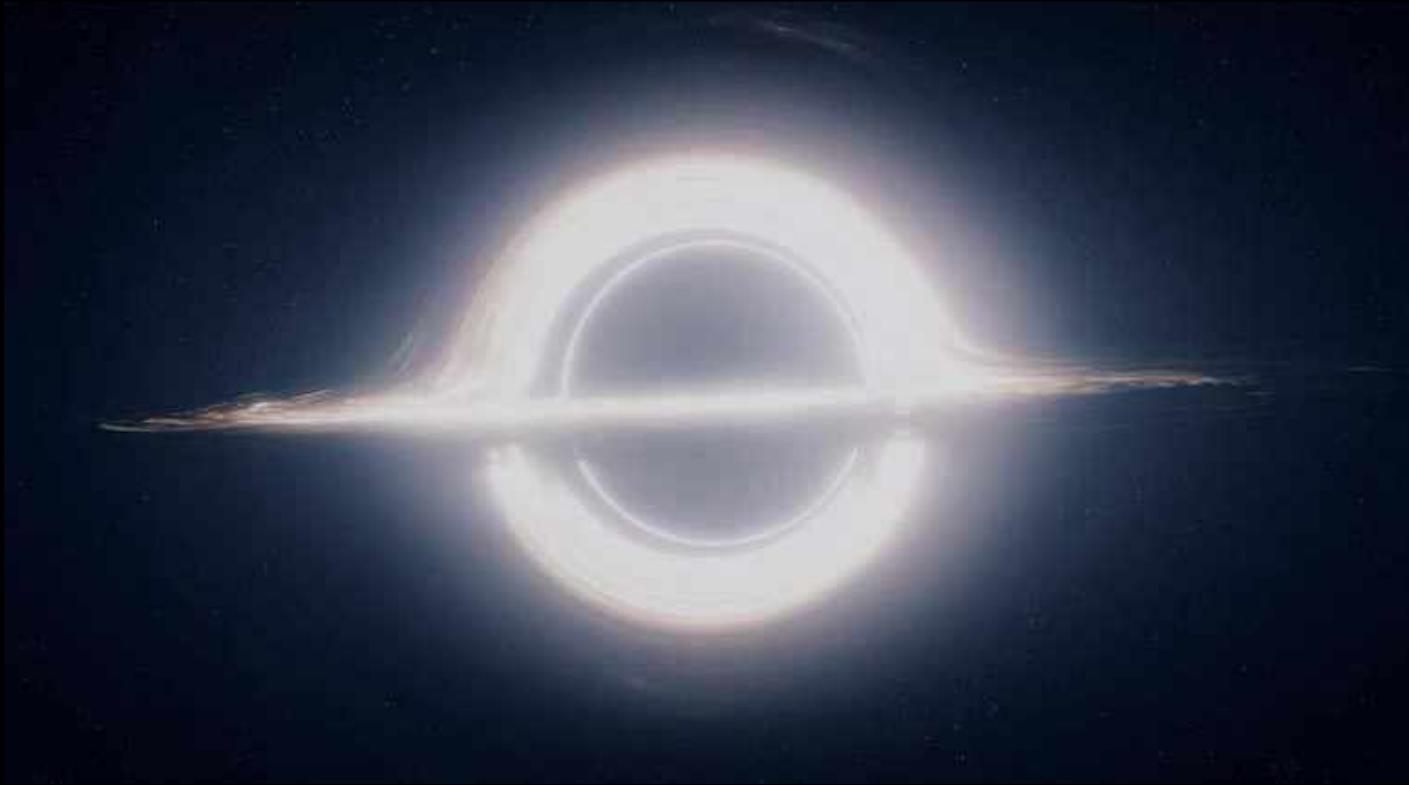
**Société Philomathique de Paris**

**Guy Perrin**



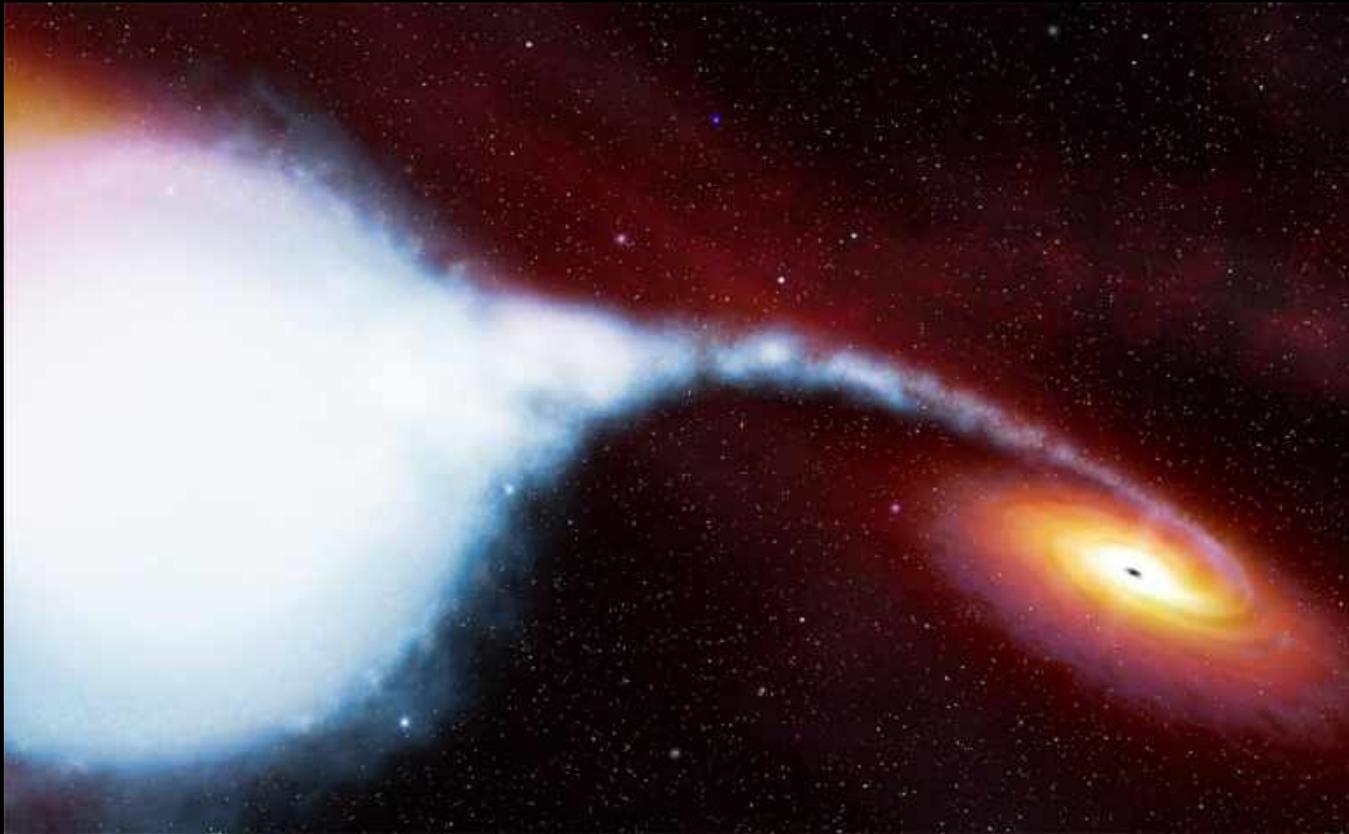
**Mardi 2 avril 2024**

# Le trou noir : objet de l'imaginaire commun



Le trou noir d'*Interstellar* (2014)

# Le premier suspect *trou noir* : Cygnus X-1 (1965)



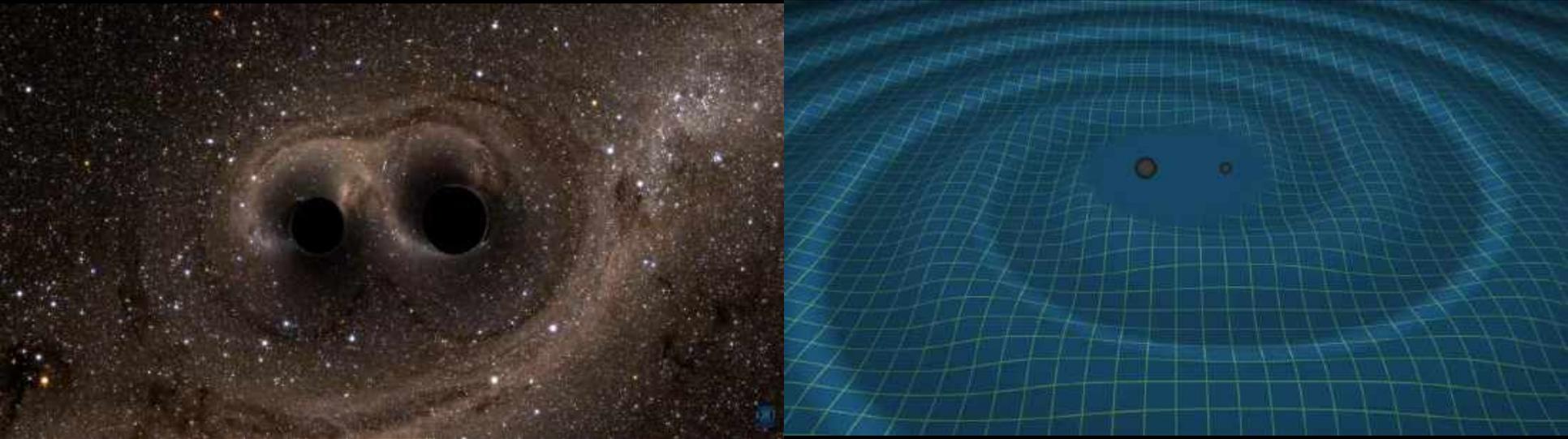
Détection en rayons X et mesure de la masse par  
l'orbite du compagnon ( $\sim 10 M_{\odot}$ )

# Détection de trous noirs par ondes gravitationnelles



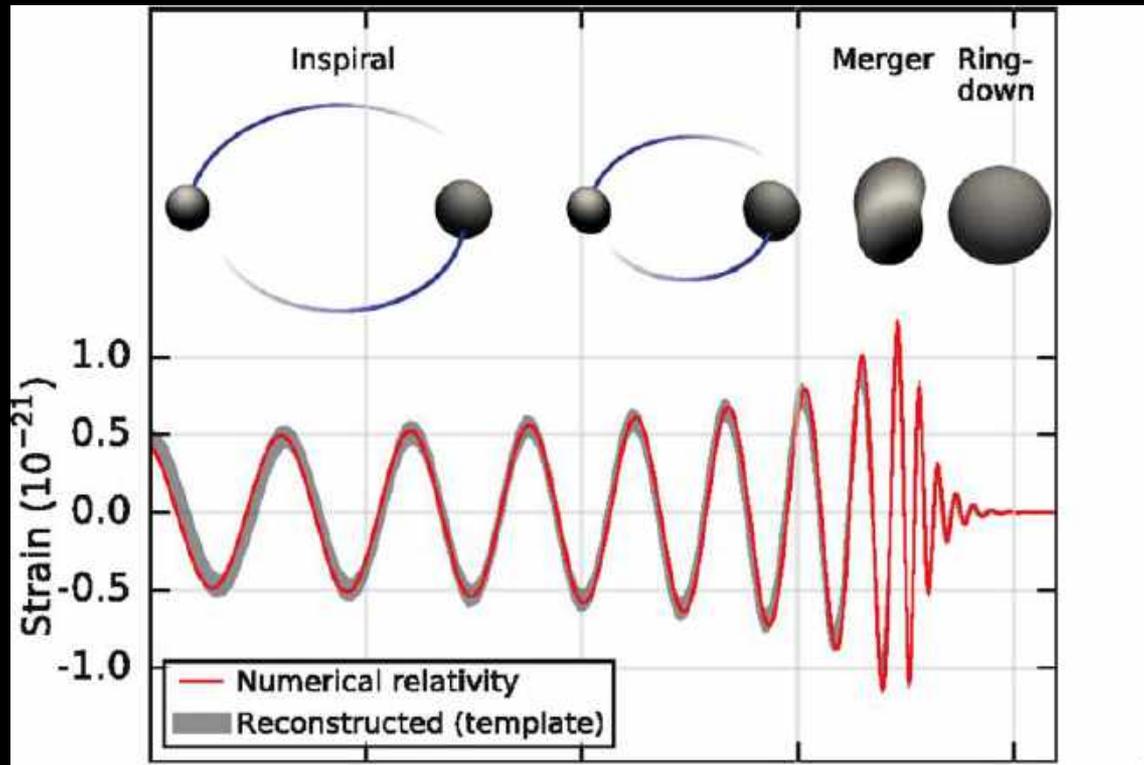
Interféromètre franco-italien VIRGO

# Détection de trous noirs par ondes gravitationnelles



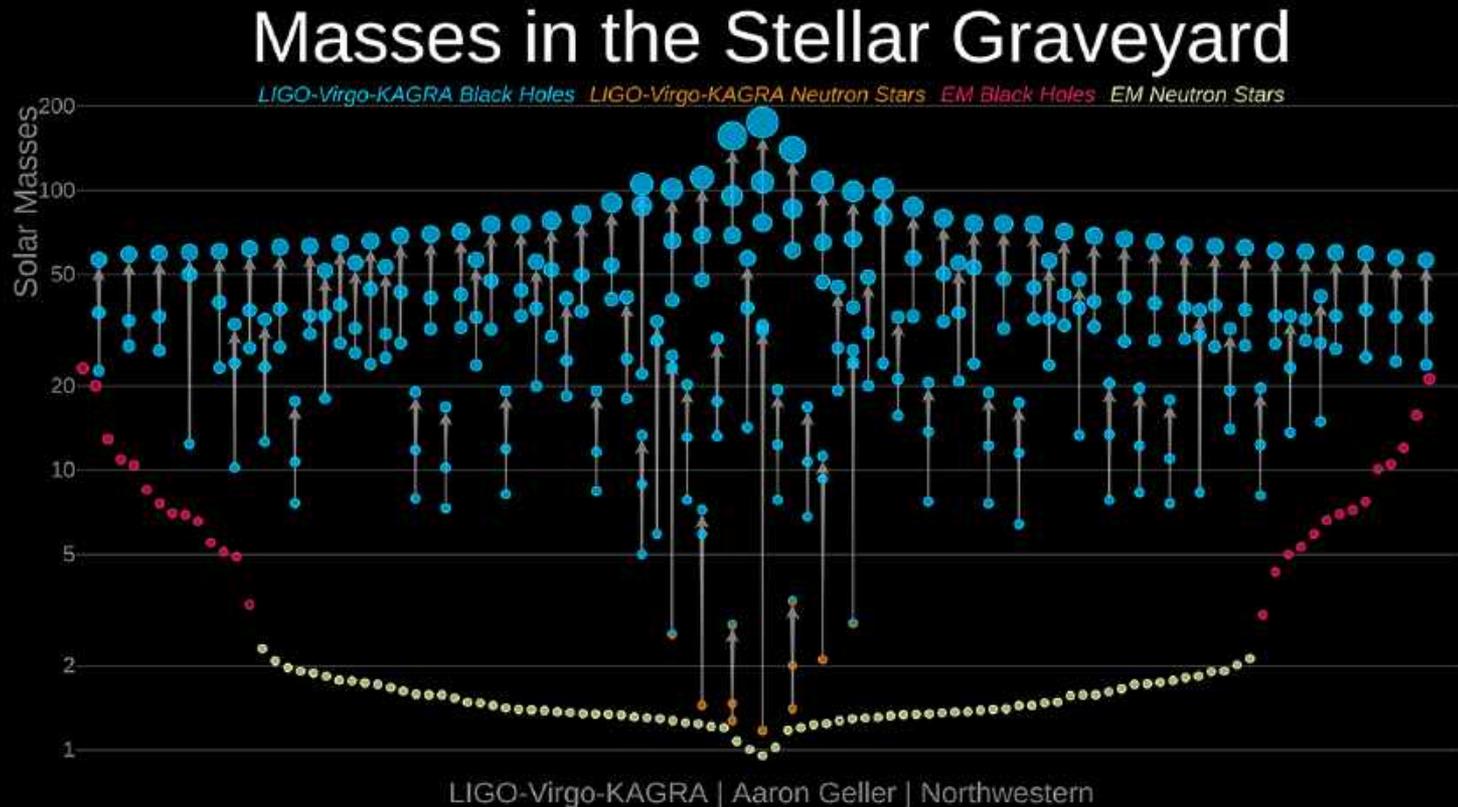
Fusion de deux trous noirs stellaires

# Détection d'ondes gravitationnelles



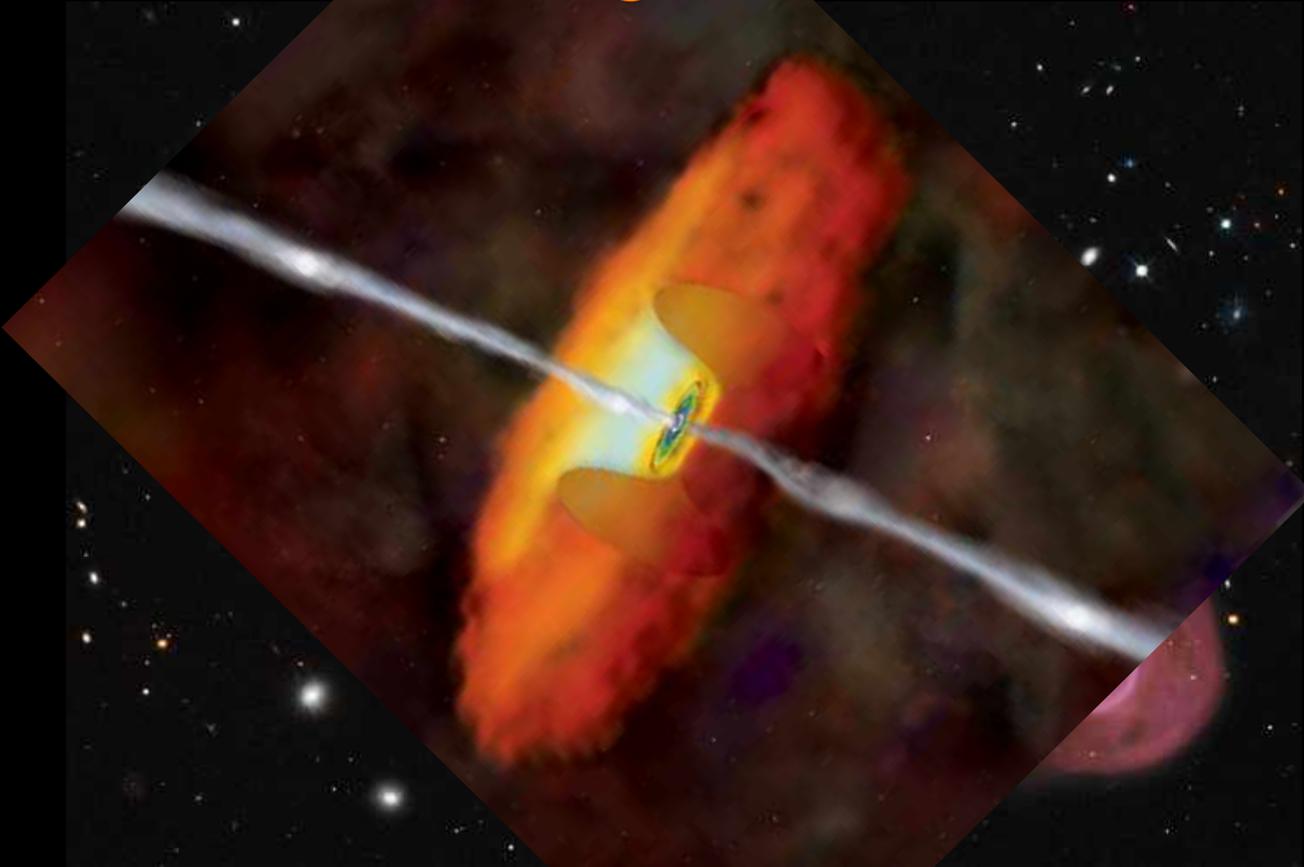
Fusion de deux trous noirs stellaires

# Le zoo de trous noirs stellaires (2021)



Catalogues des fusions de trous noirs mesurées par ondes gravitationnelles (novembre 2021)

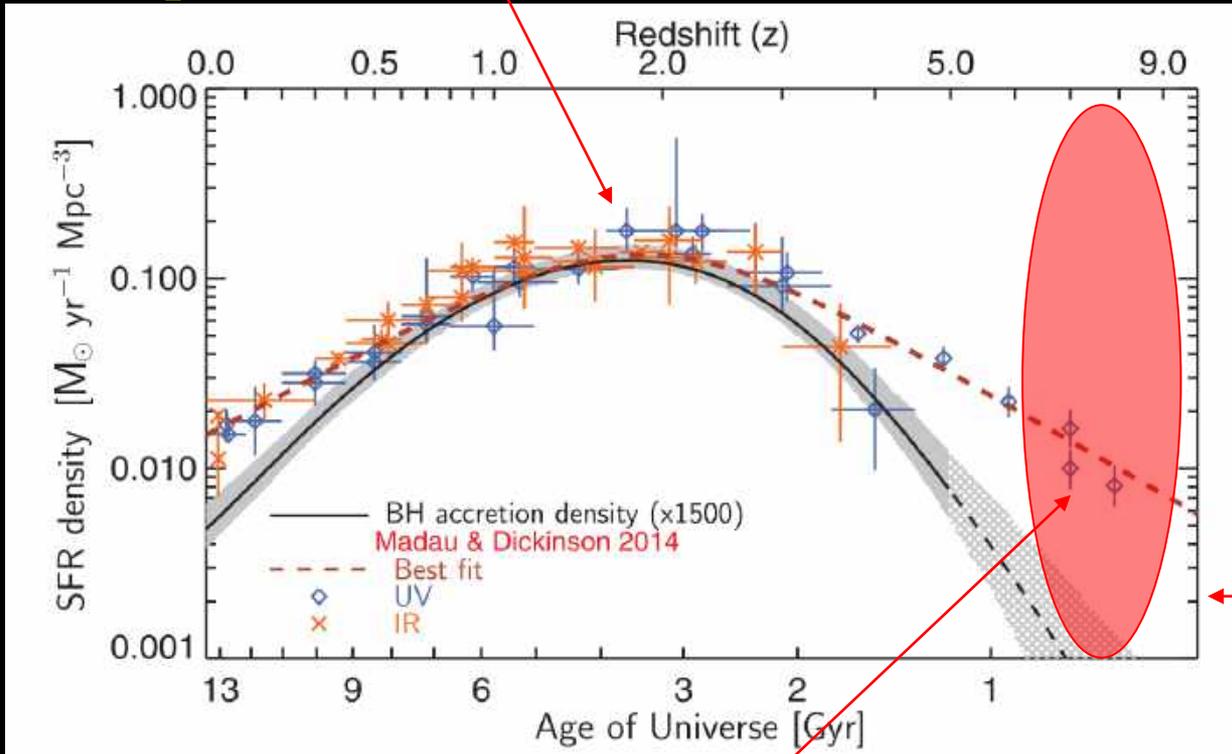
# Les suspicions de trous noirs super-massifs au cœur des galaxies



Radio galaxie Hercules A  
( $\sim 4 \times 10^9 M_{\odot}$ )

# Une réalité très ancienne

Pic d'accrétion de matière sur les trous noirs super-massifs

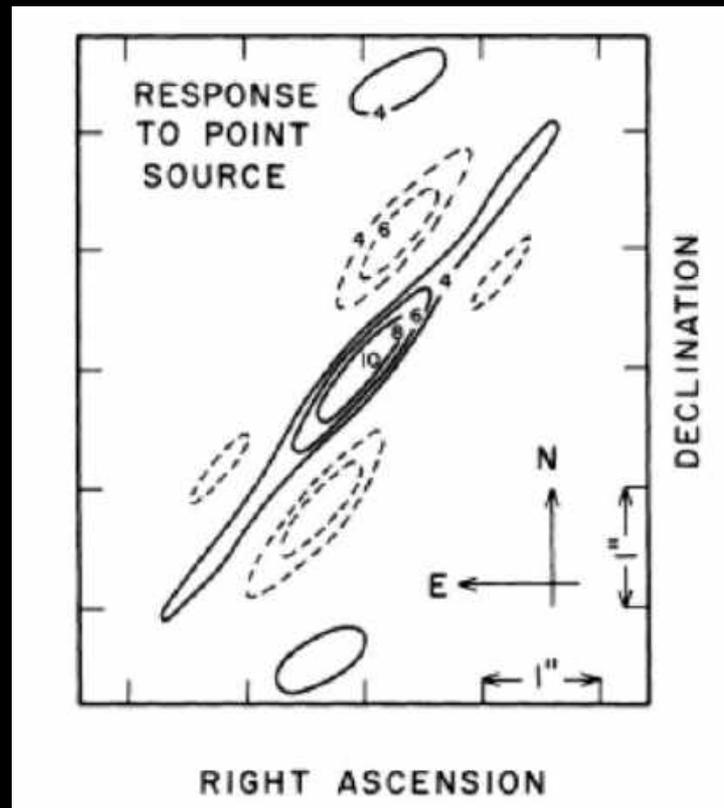


~ 400.10<sup>6</sup> années  
z = 10,6  
1,6-3,2.10<sup>6</sup> M<sub>⊙</sub>  
Maiolino et al. (2024)  
JWST

Des quasars très précoces sont détectés peu de temps après le Big Bang (100-1000x10<sup>6</sup> M<sub>⊙</sub>)

# 1<sup>ers</sup> soupçons d'un objet compact super massif au centre de la galaxie : naissance de Sagittarius A\*

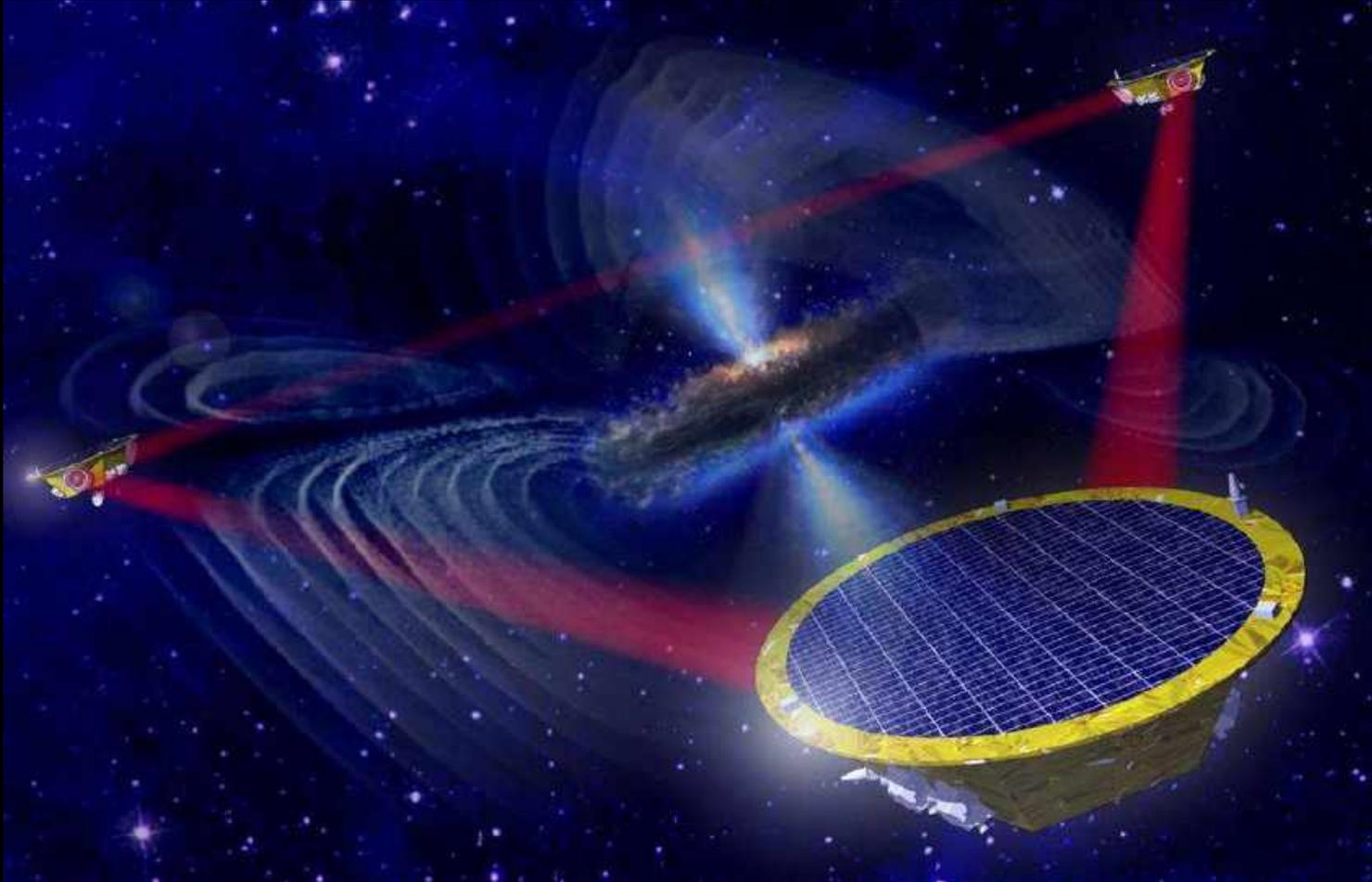
Détection d'une source compacte et brillante au centre de la galaxie en radio (2,7 GHz, 11cm)



Tailles en u.a. :  
1"  $\Leftrightarrow$  8100 u.a.  
0,1"  $\Leftrightarrow$  810 u.a.

1 u.a. =  $\sim 150 \cdot 10^6$  km  
1 unité astronomique  
Distance Terre-Soleil

# La mesure des fusions de trous noirs super-massifs par LISA



Interféromètre spatial à ondes gravitationnelles  
aux bras de plusieurs millions de km

# Trous noirs et relativité générale



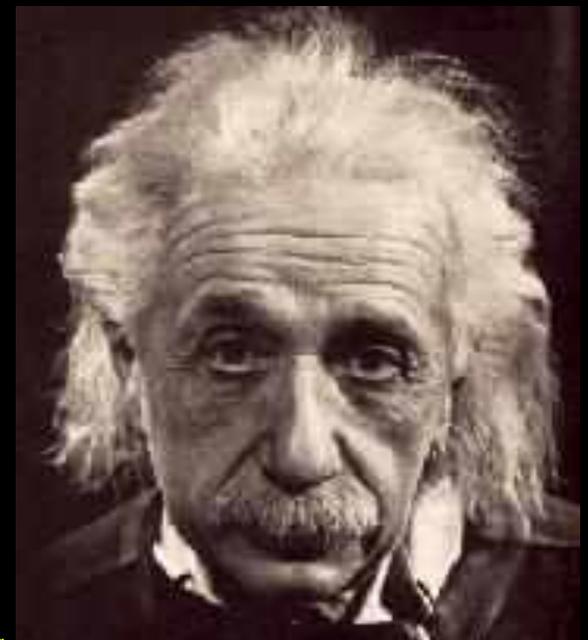
1783 – J. Michell et 1798 - P.-S. de Laplace :  
intuition des *étoiles* noires (théorie corpusculaire  
et vitesse finie de la lumière).

1905 - Einstein : Relativité *restreinte* :

- espace-temps
- durées et longueurs dépendent de la vitesse de l'observateur (temps élastique)

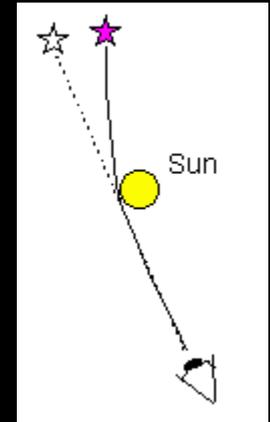
1915 - Einstein : Relativité *générale* :

- mariage de la relativité et de la gravitation
- bon cadre pour la description des trous noirs

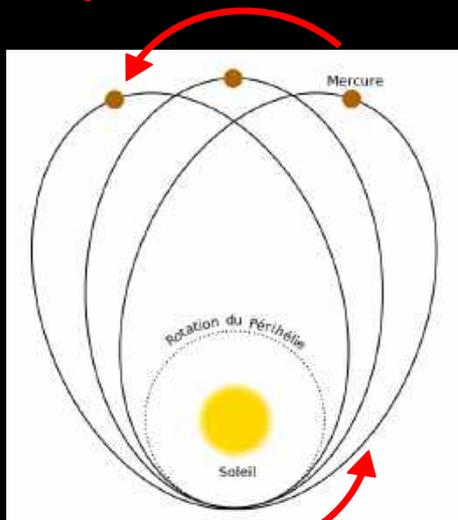


# Manifestations d'effets de relativité générale

Déviations des rayons lumineux par le Soleil  
(1<sup>ère</sup> preuve de la relativité générale en champ faible par Eddington dès 1919)

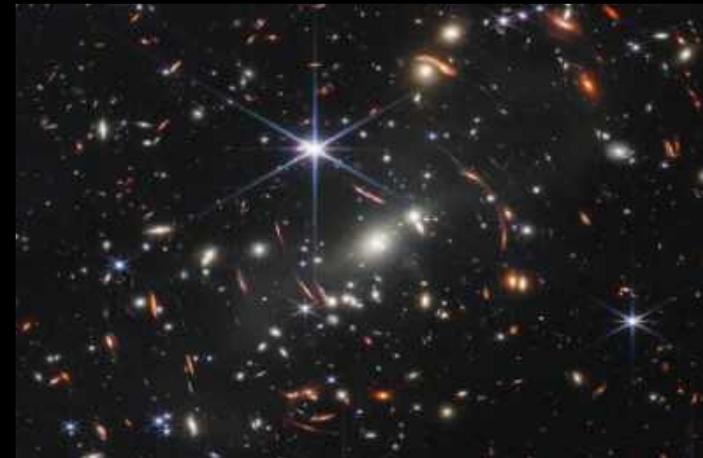


Sens de la précession



Avance du périhélie de Mercure

Sens de l'orbite



Mirages gravitationnels

# Comment forme-t-on un trou noir ?

$$R_{\text{Schwarzschild}} = R_{\text{trou noir}} = \frac{2GM}{c^2}$$

Le Soleil serait un trou noir s'il avait la taille du Paris de 1789 ( $2 \times \frac{2GM_{\text{Soleil}}}{c^2} = 6 \text{ km}$ ) !

La Terre serait un trou noir si elle avait la taille d'un dé à coudre ( $2 \times \frac{2GM_{\text{Terre}}}{c^2} = 2 \text{ cm}$ ) !

Par quels processus peut-on arriver à de telles densités ?



$2 \times 10^{30} \text{ kg}$   
1 392 000 km



Paris  
Mur des fermiers généraux  
6 km



$6 \times 10^{24} \text{ kg}$   
12 800 km

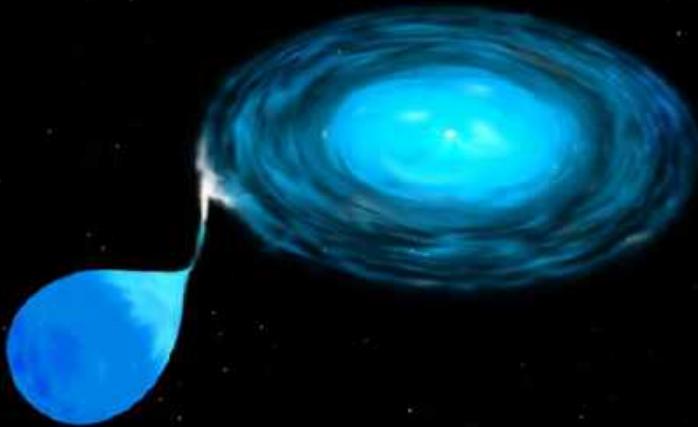


2 cm

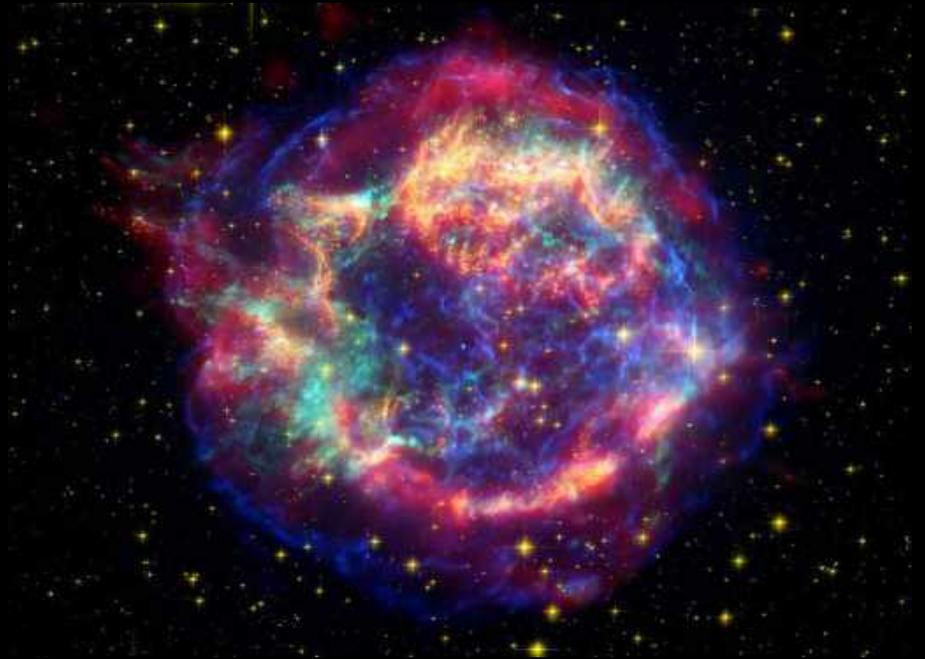
# Trous noirs stellaires

Cassiopee A

Exemple type : Cygnus X-1



Par accrétion de la masse  
d'un compagnon  
(étoiles de masse  
faible ou intermédiaire)



Par effondrement d'une étoile  
massive et explosion en supernova

# Formation des structures de l'univers

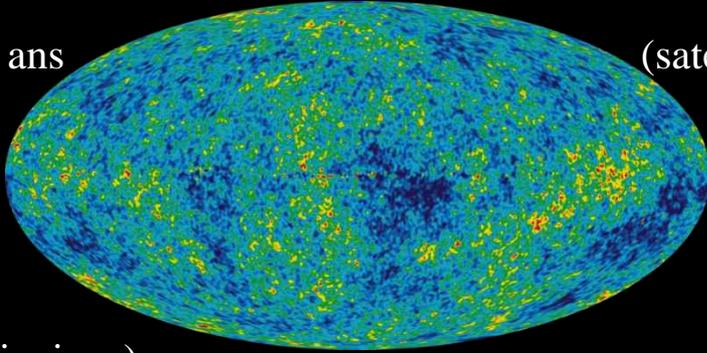
## Trous noirs supermassifs ( $10^6 - 10^9 M_{\text{soleil}}$ )

Âge Univers :

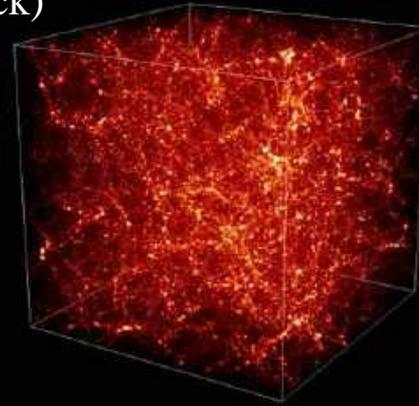
380 000 ans

Fond diffus cosmologique

(satellite Planck)



(recombinaison)



# Les trous noirs n'ont pas de cheveux (Carter, Hawking, Israël, 1973)

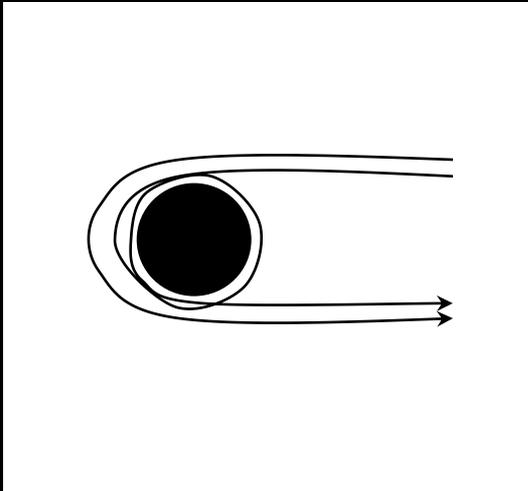


Un trou noir est entièrement déterminé par trois paramètres :

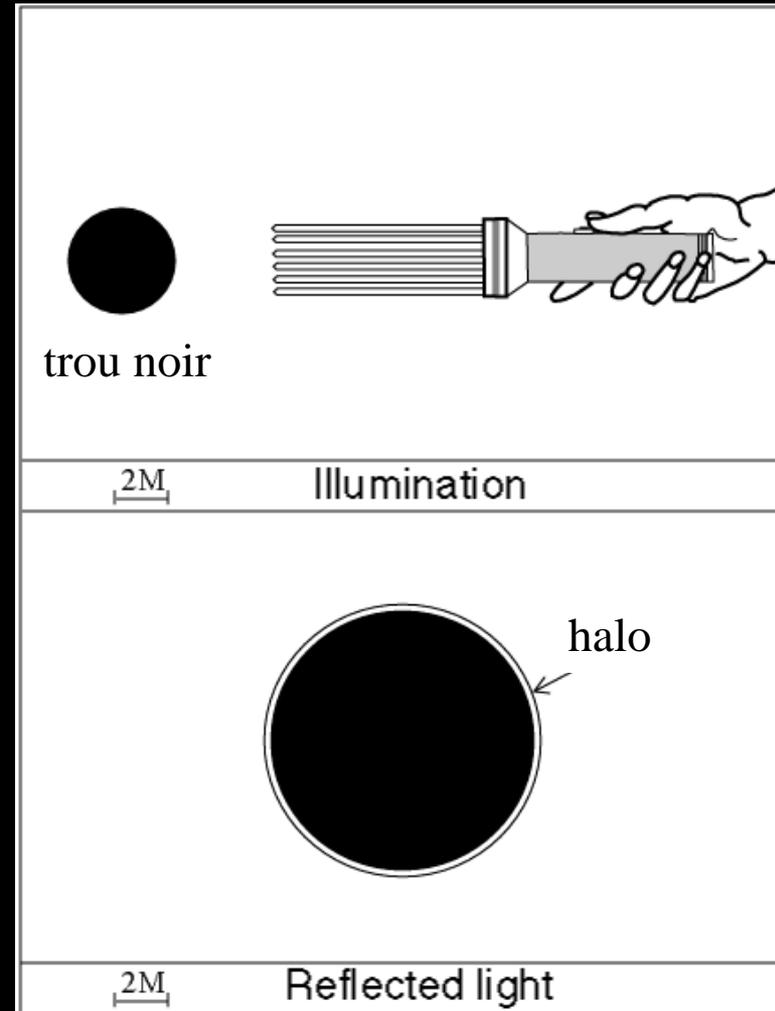
- sa masse
- son taux de rotation
- ~~sa charge électrique~~

Comment voir les trous noirs ?

C'est très simple : il suffit de les éclairer !

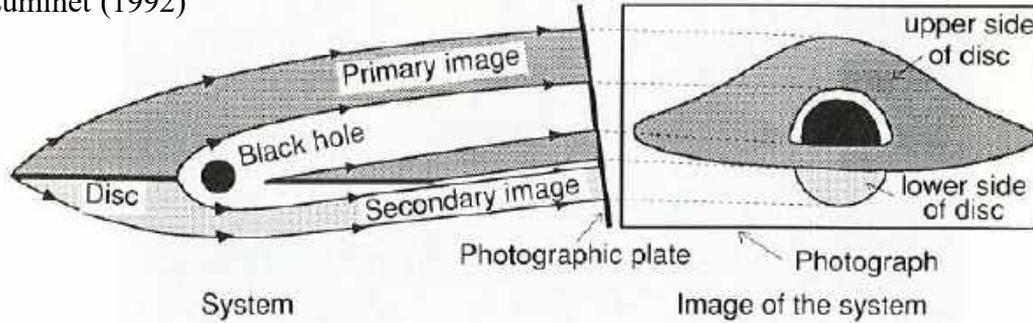


Le halo marque la *sphère des photons* à  $1,5 \times$  l'horizon du trou noir



# Un disque autour d'un trou noir

Luminet (1992)



Luminet (1979)



Marck (1989)



# Quelle est la dimension apparente d'un trou noir ?

## Trous noirs stellaires

très petits :  $R_{\text{trou noir}} \sim$  quelques km

à 1 parsec :  $10^{-10}$  seconde d'angle (plus petit qu'une cellule humaine sur la Lune vue depuis la Terre)

## Trous noirs super-massifs

très gros :  $R_{\text{trou noir}} \sim$  quelques  $10^6$ - $10^9$  km

mais galaxies très lointaines

Le plus grand angulairement c'est Sgr A\*

Taille apparente de l'horizon (2 rayons de Schwarzschild) :

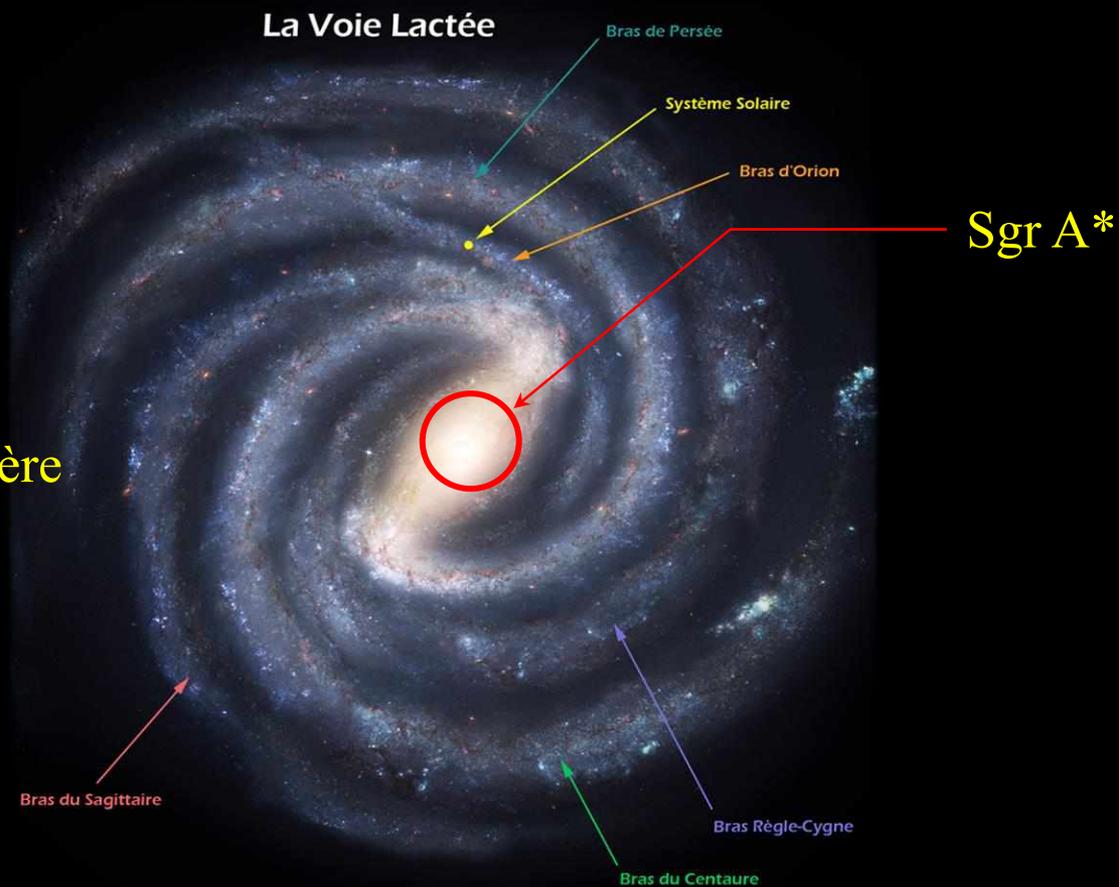
53 micro-secondes d'angle = 5x1€ sur la Lune

Ou encore deux cheveux à Lyon vus depuis Paris !



Sagittarius A\* (Sgr A\*) au cœur de notre galaxie

# Modèle de la Voie Lactée



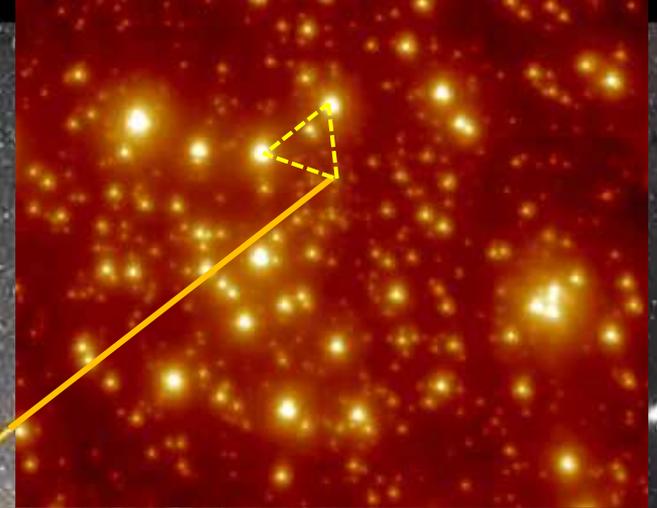
Diamètre :  $\geq 25$  kpc  
ou 80 000 années-lumière

Galaxie spirale barrée

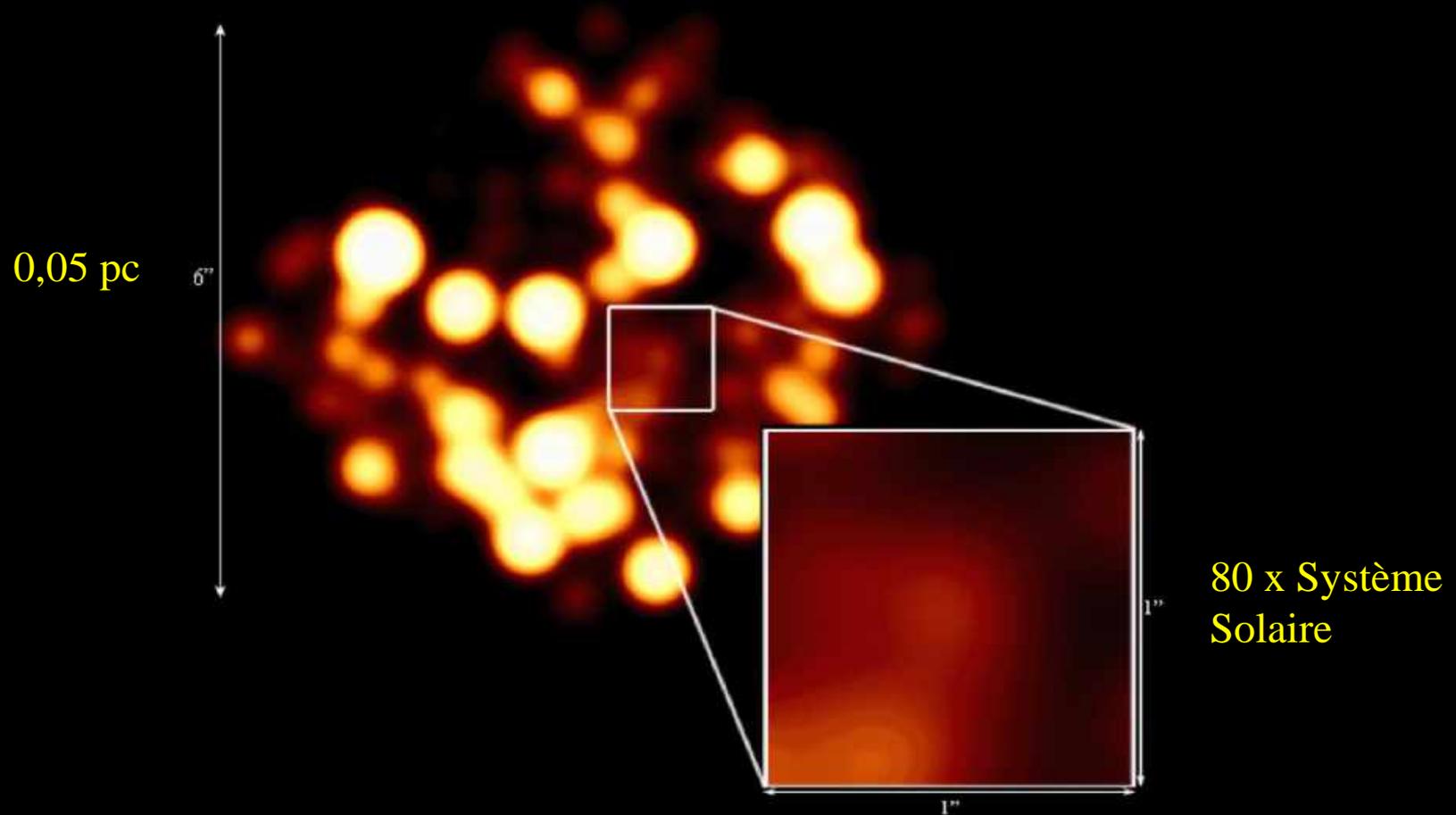
# Le centre de la Galaxie

Opaque à cause de la poussière.

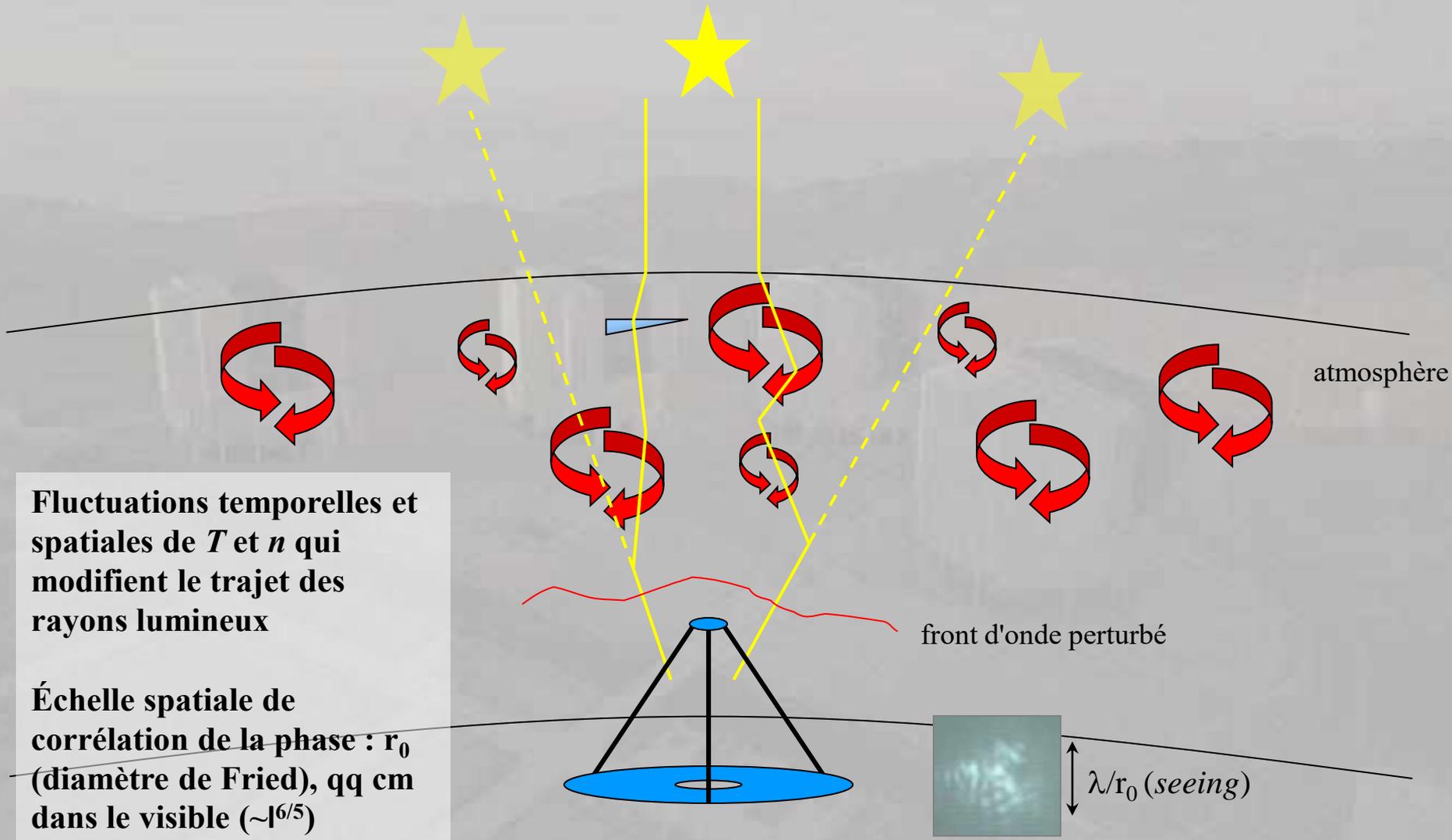
Observations aux longueurs d'onde  
des domaines radio et infrarouge ou X



# Observations dans l'infrarouge proche



# La turbulence atmosphérique



**Fluctuations temporelles et spatiales de  $T$  et  $n$  qui modifient le trajet des rayons lumineux**

**Échelle spatiale de corrélation de la phase :  $r_0$  (diamètre de Fried), qq cm dans le visible ( $\sim \lambda^{6/5}$ )**

# Observation d'une source ponctuelle à travers l'atmosphère terrestre turbulente (étoile non résolue par le télescope)



tache image turbulente  
longue pose



résolution angulaire du  
télescope

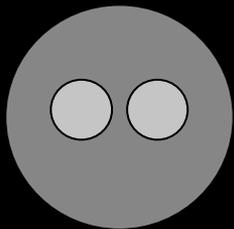


Image d'une étoile double serrée

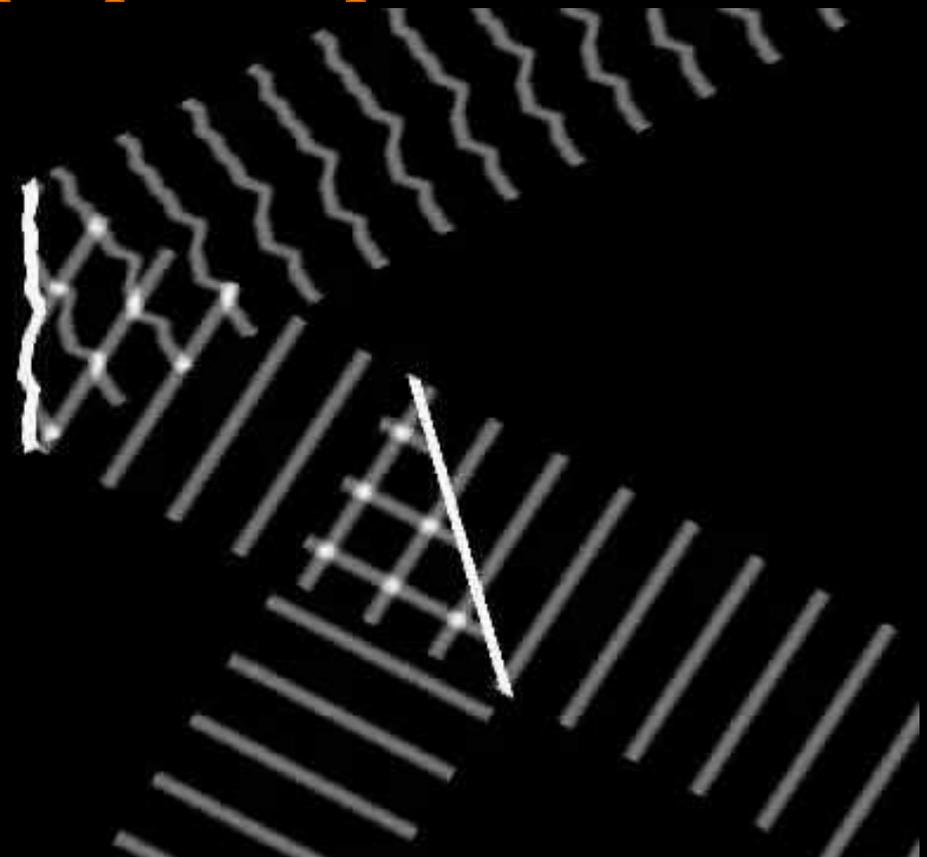
# La boucle d'optique adaptative

Un miroir déformable corrige à tout instant le front d'onde incident

Un ordinateur spécialisé optimise la correction

Un capteur analyse les erreurs résiduelles

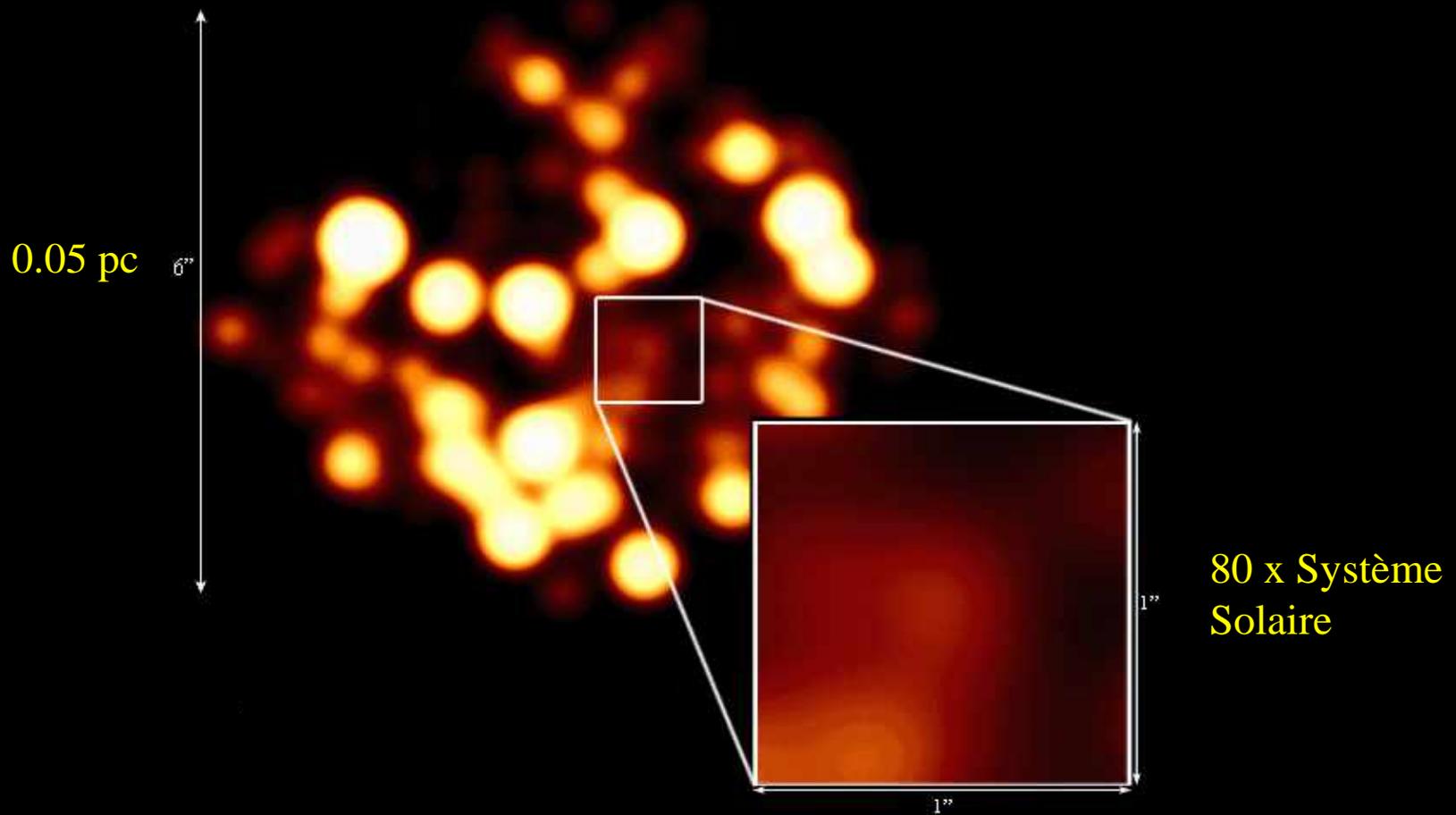
Le front d'onde corrigé peut être focalisé

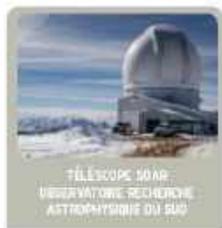


# Le miracle de l'optique adaptative (séquence réelle, NAOS, VLT)



# Observations du Centre Galactique dans l'infrarouge proche avec optique adaptative

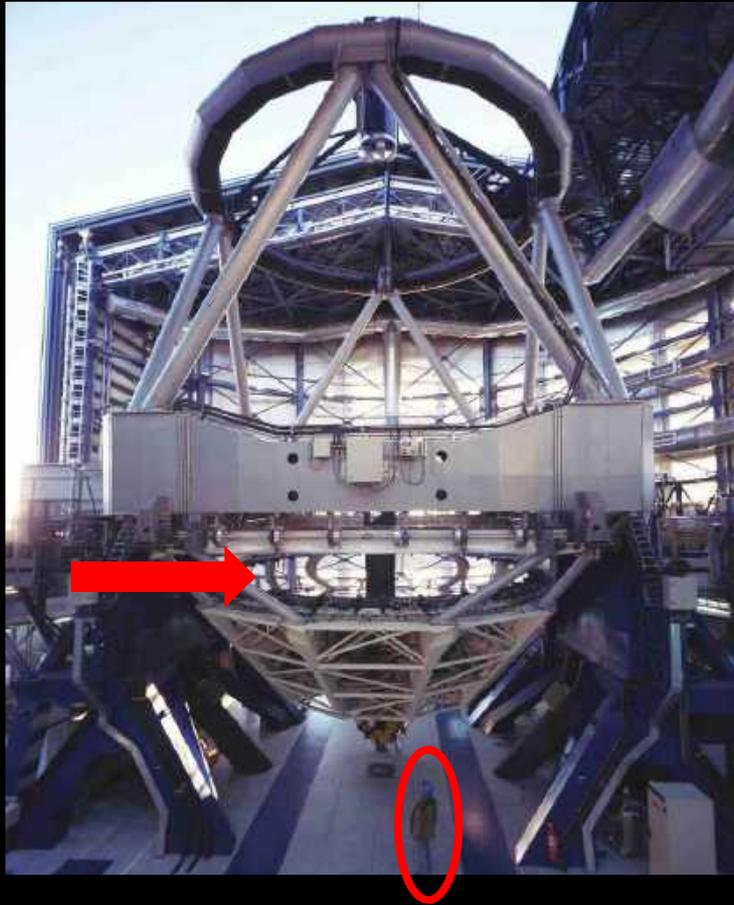




*Le VLT, Very Large Telescope*  
4 télescopes européens de 8,20 m au Mont Paranal au Chili

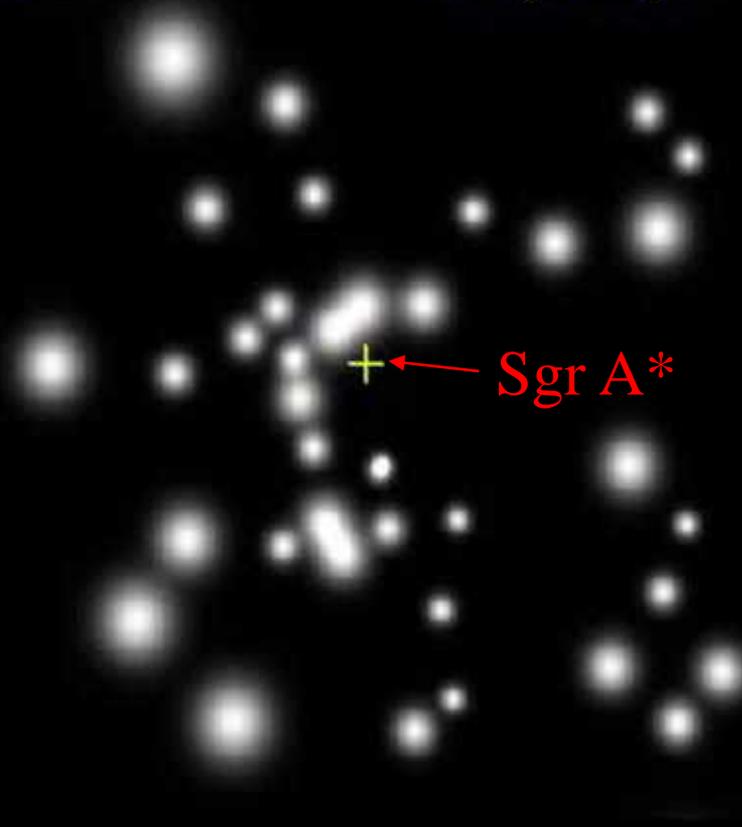


# Un des télescopes de 8,20 m du VLT

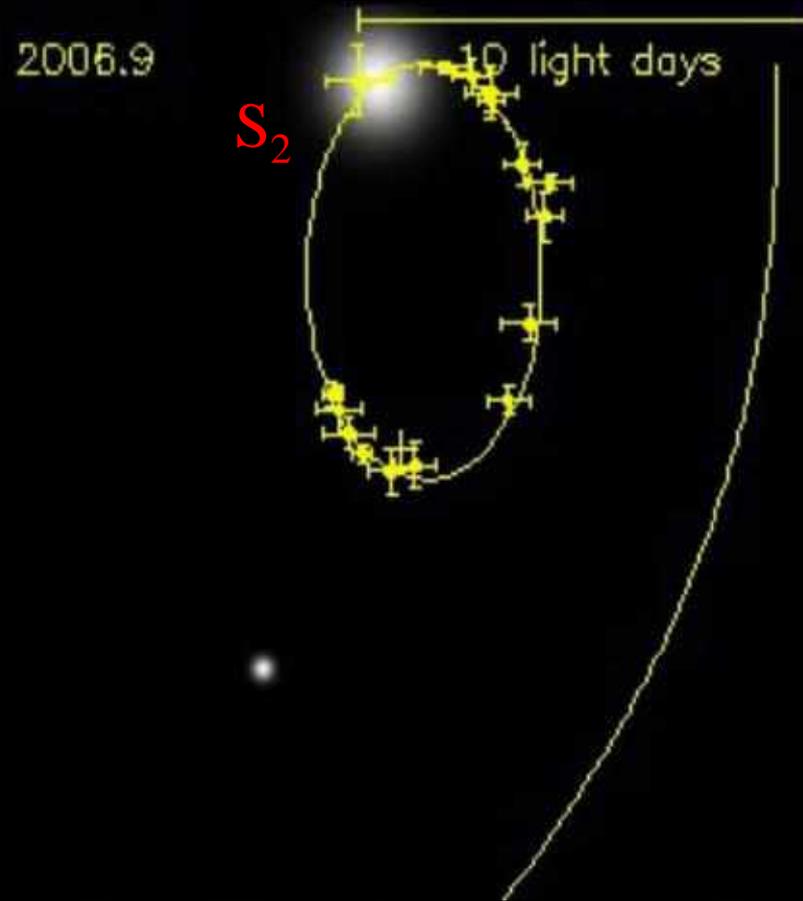


# Orbite de l'étoile S2 observée par l'optique adaptative du VLT NAOS

1992 |—|  
10 light days



# Orbite de l'étoile $S_2$ observée par l'optique adaptative du VLT NACO



# 1<sup>er</sup> calcul précis de la masse de Sgr A\*

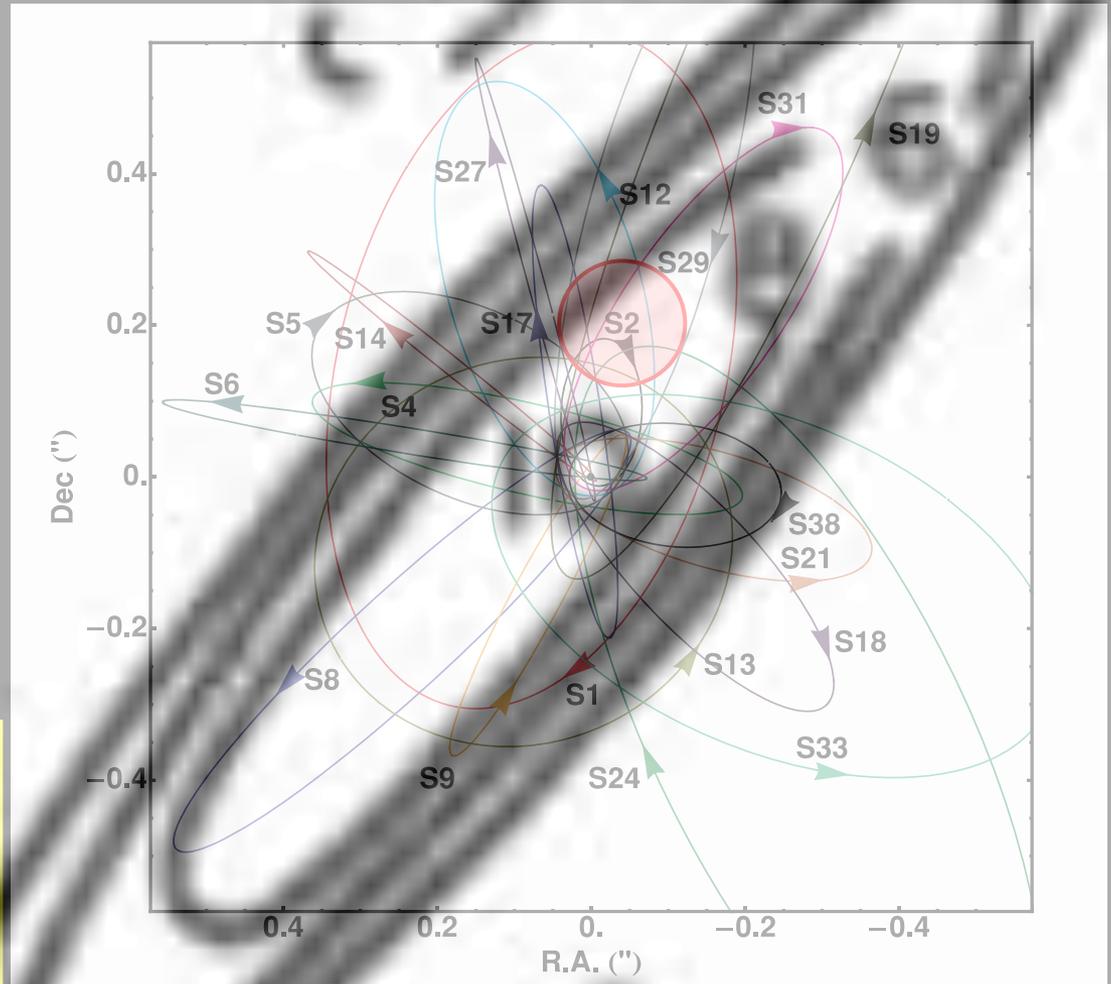
Application de la  
3<sup>ème</sup> loi de Kepler :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM_{\text{Sgr A}^*}}{4\rho^2}$$



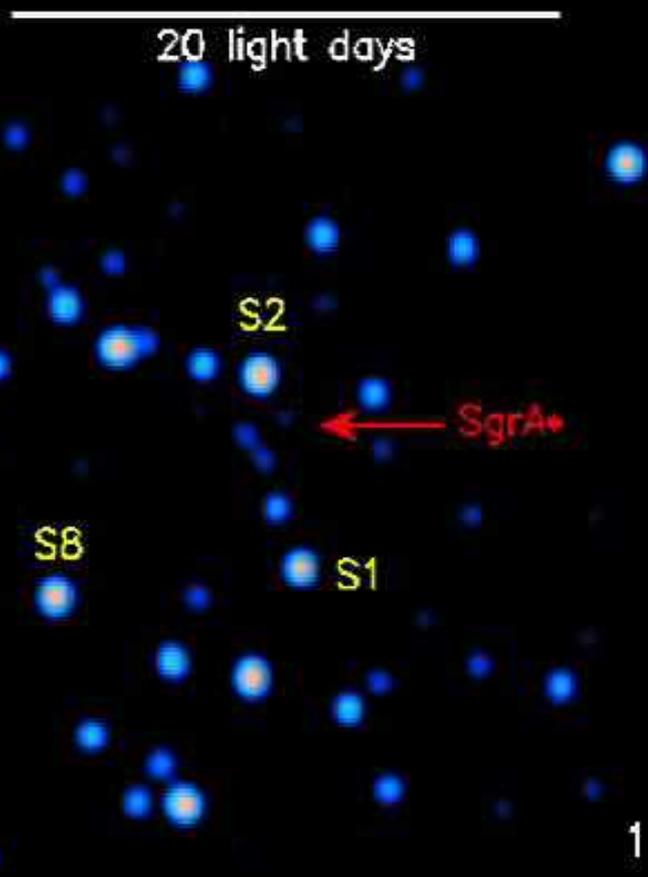
$$M_{\text{Sgr A}^*} = 4,31 \pm 0,42 \cdot 10^6 M_{\text{Soleil}}$$

$$(d = 7,62 \pm 0,32 \text{ kpc})$$



Gillessen et al. (2009)

# Des sursauts lumineux près de la dernière orbite circulaire stable



Genzel et al. (2003)

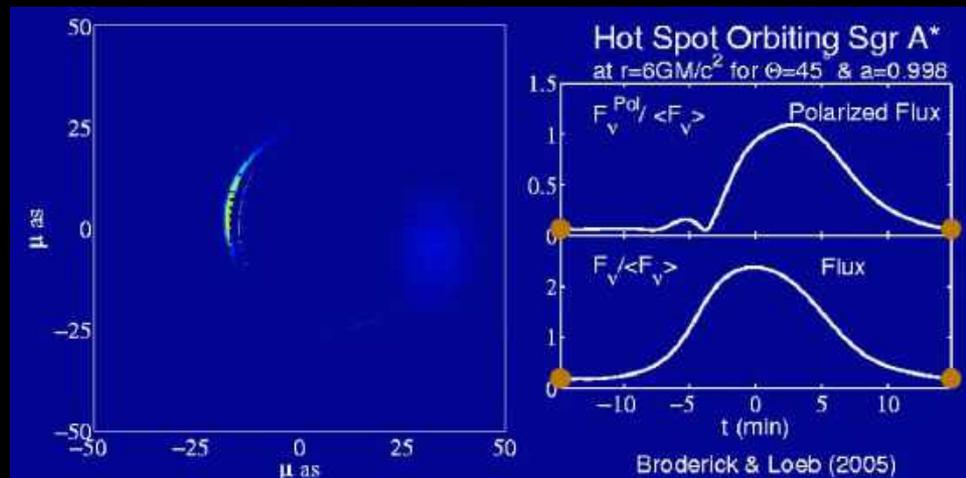


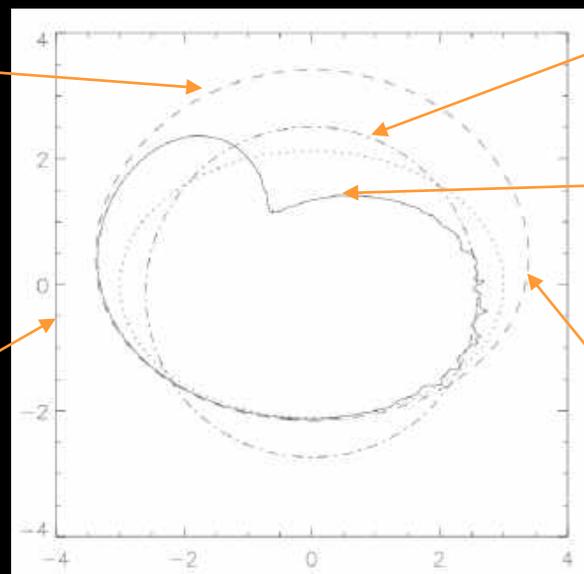
Image  
primaire

Image  
2<sup>nd</sup>aire

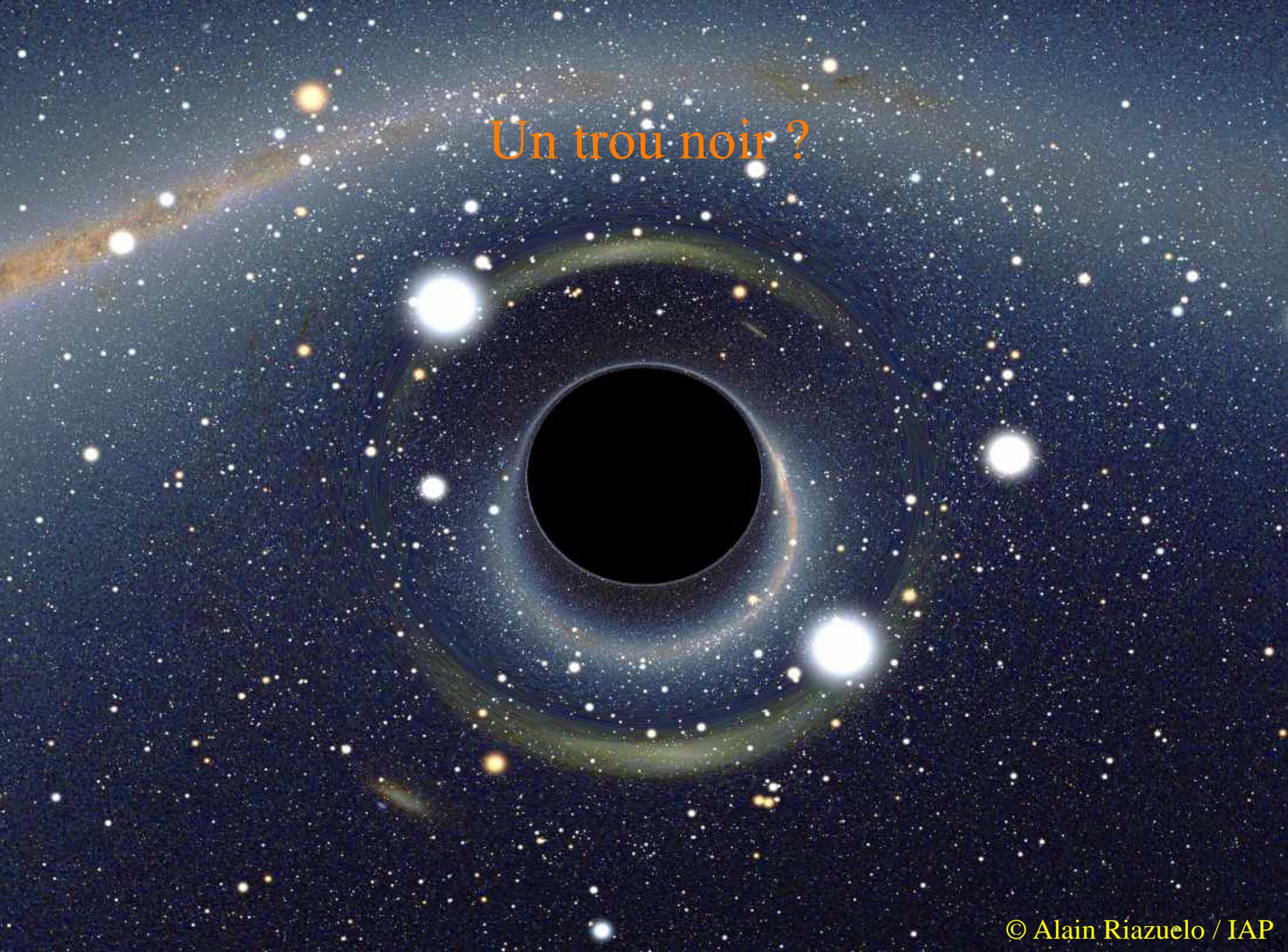
Orbite  
relativiste

Image  
totale

Orbite  
inclinée  
à  $45^\circ$



Un trou noir ?



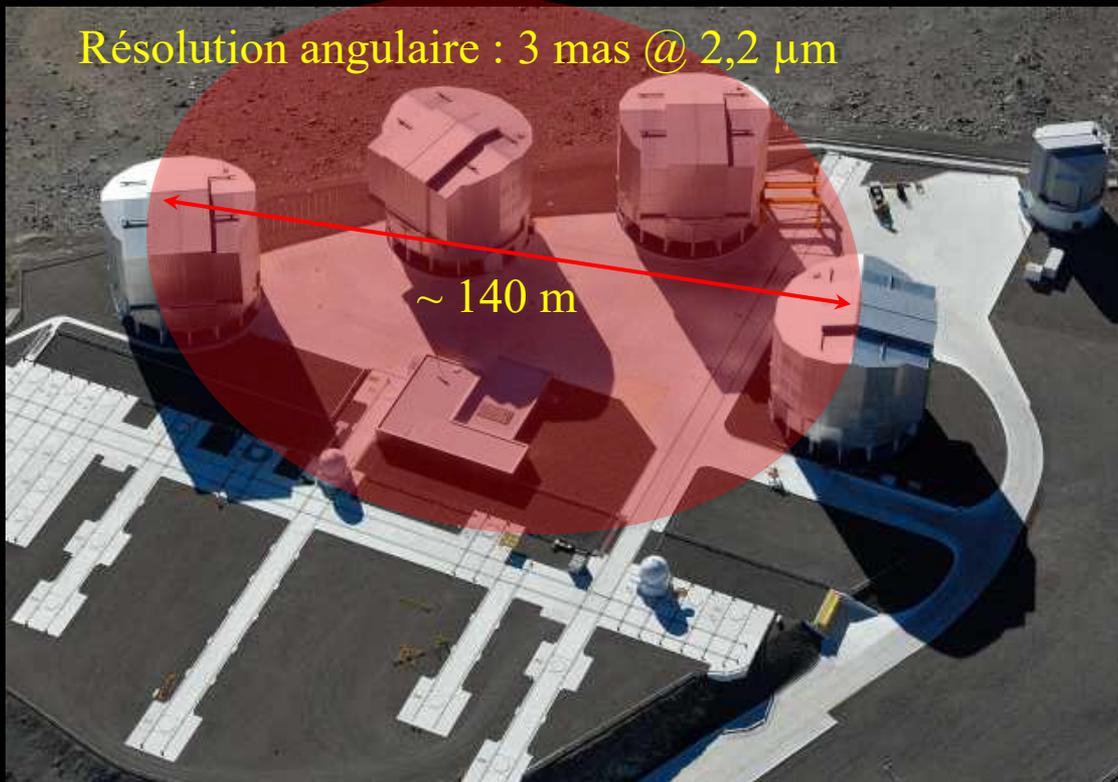
L'instrument GRAVITY

# GRAVITY combine les 4 UT (8,20 m) ainsi que les 4 AT (1,80 m) du VLT depuis début 2016 (idée : 2005)

1 seconde d'angle =  $4,85 \cdot 10^{-6}$  rad = 1 personne à Lyon

1 mas = 1 milli-seconde d'angle = 1 personne sur la Lune

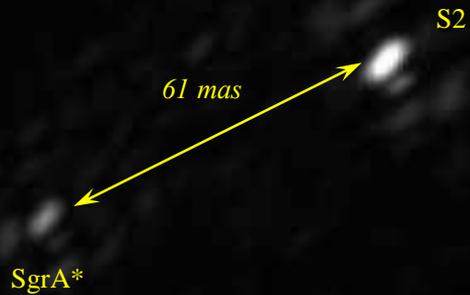
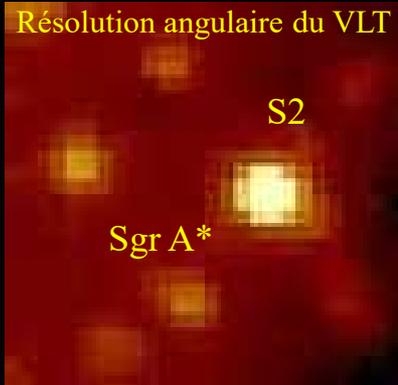
50  $\mu$ as = 50 micro-secondes d'angle = 2 cheveux à Lyon



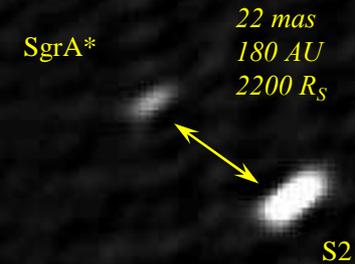
# Le consortium GRAVITY



# Des images à très haute résolution angulaire



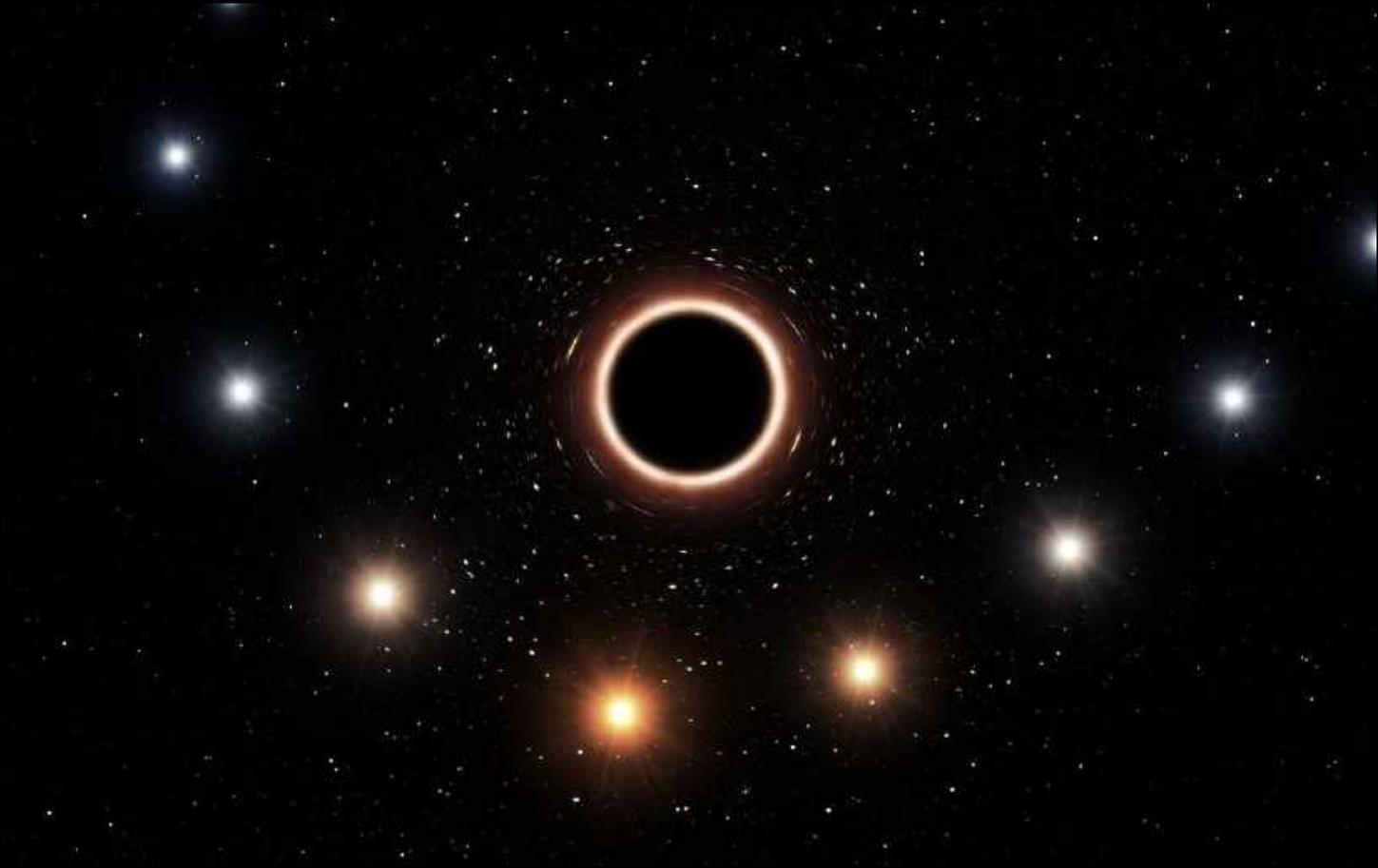
*co-add early summer 2017*



*resolution  
2.2 x 4.7 mas*

*March 2018*

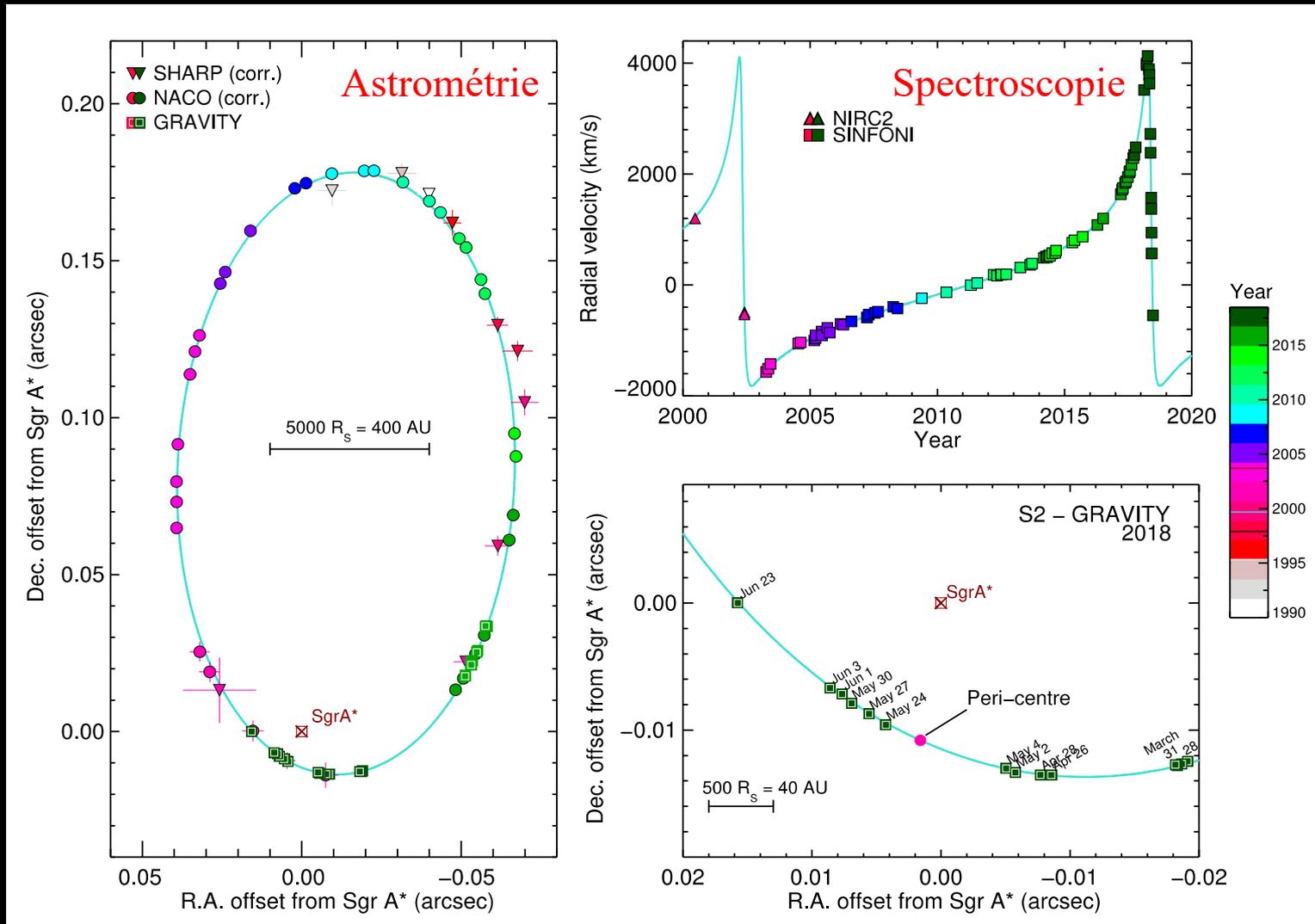
# Détection du rougissement gravitationnel avec S2



Dilatation du temps

⇔ diminution de la fréquence  
⇔ augmentation de la longueur d'onde  
⇔ rougissement

# Les données de l'étoile S2

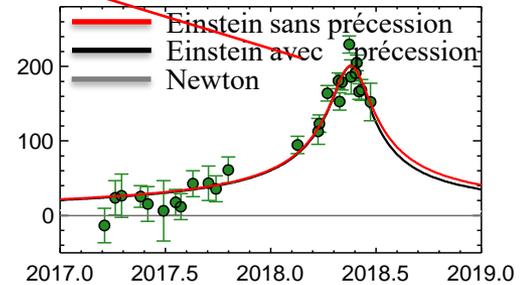
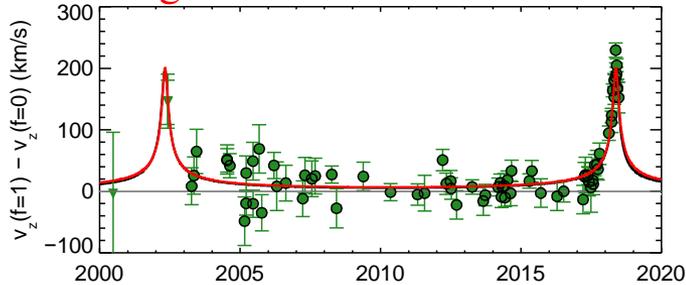


# Orbite képlérienne vs. orbite relativiste

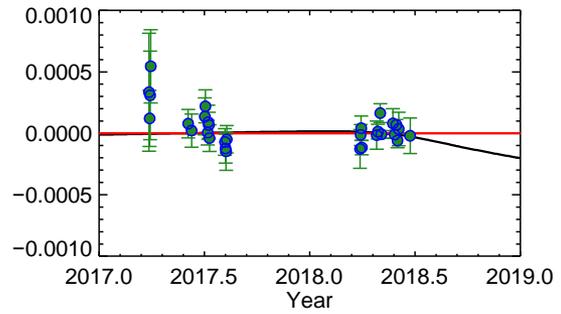
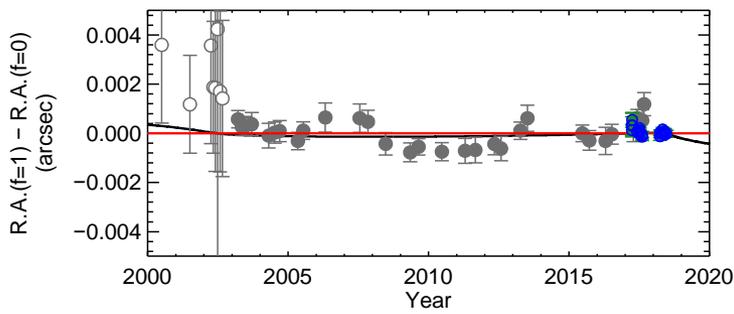
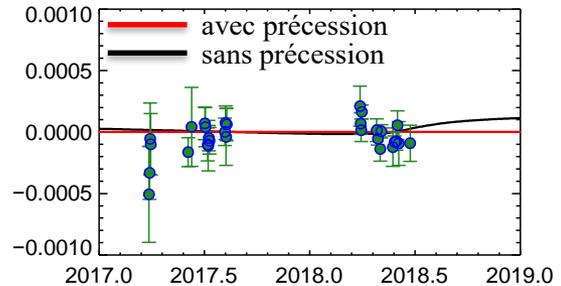
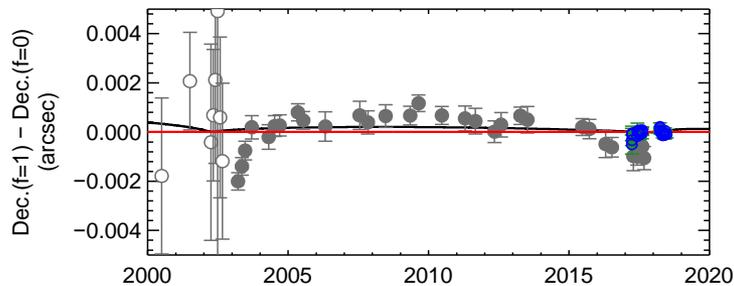
PPN (1) terms:  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = B_0 + B_{0,5}\beta + B_1\beta^2 + O(\beta^3)$

$B_1 = B_{1,tD} + B_{1,gr}$

Rougisement – vitesse de fuite



Astrométrie



$f_{RG} = 0$  : Newton

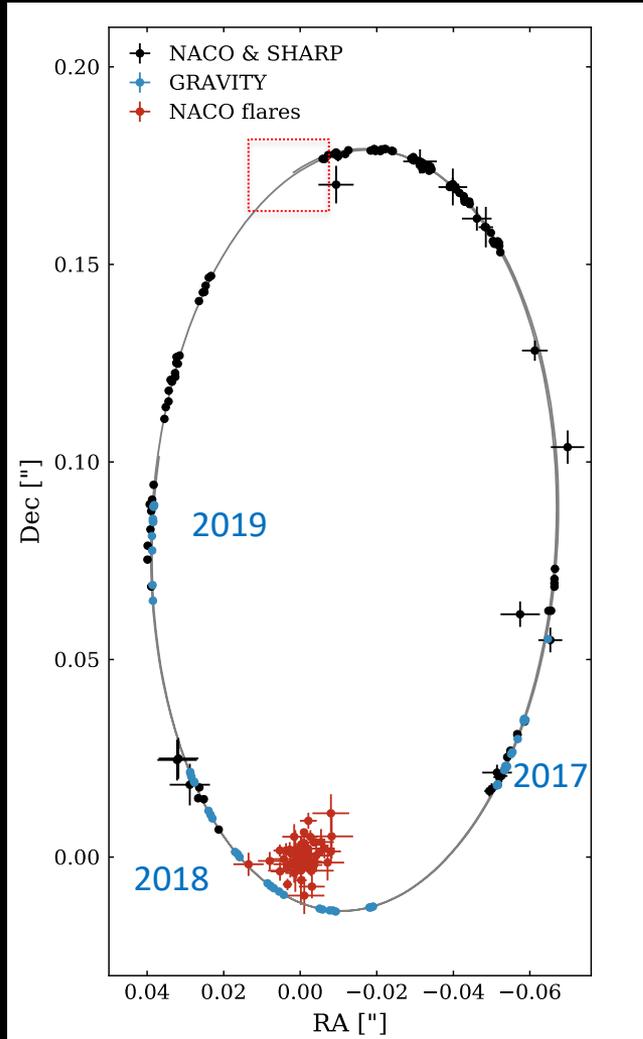
$f_{RG} = 1$  : Einstein

Résultat GRAVITY :  
 $f_{RG} = 1,04 \pm 0,04$   
 (avec précession)

Masse de Sgr A\* :  
 $4,11 \pm 0,03 \times 10^6 M_{\odot}$   
 (précision de 0,6%)

Distance à Sgr A\* :  
 $8127 \pm 31$  pc  
 (précision de 0,4%)

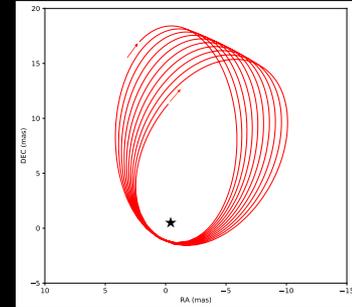
# La précession relativiste de S2



$$\Delta\Phi_{per\ orbit} = f_{SP} \times 3\pi \left( \frac{R_s}{a(1-e^2)} \right) + f_{LT} \times 2\chi \left( \frac{R_s}{a(1-e^2)} \right)^{3/2}$$

$PPN(1)_\Phi$  : Schwarzschild Precession

S2:11.9'



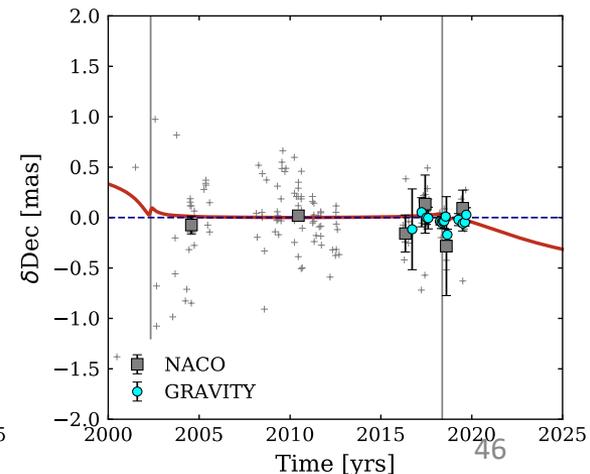
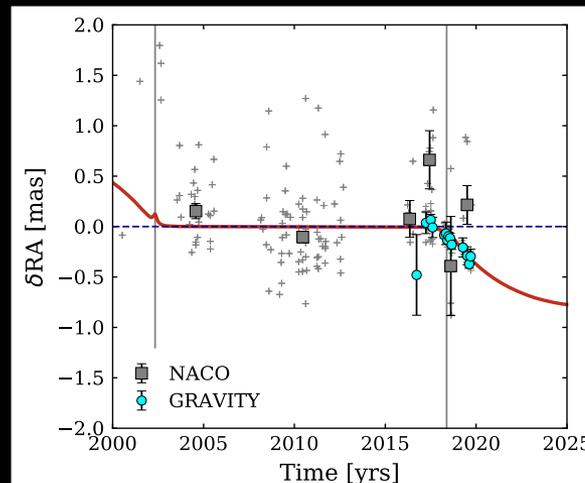
Orbite S2/10

Test de la pression relativiste :

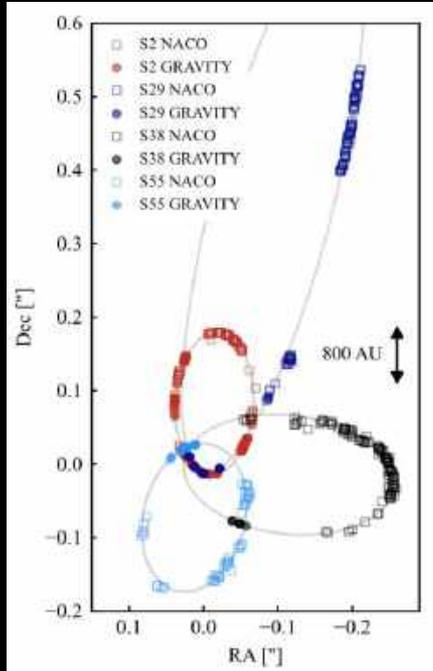
$$f_{SP} = 1,10 \pm 0,19$$

Einstein confirmé à  $5\sigma$

Masse étendue inférieure à 0,1% ou  $4000 M_\odot$



# Nouvelle mesure de la précession relativiste de S2

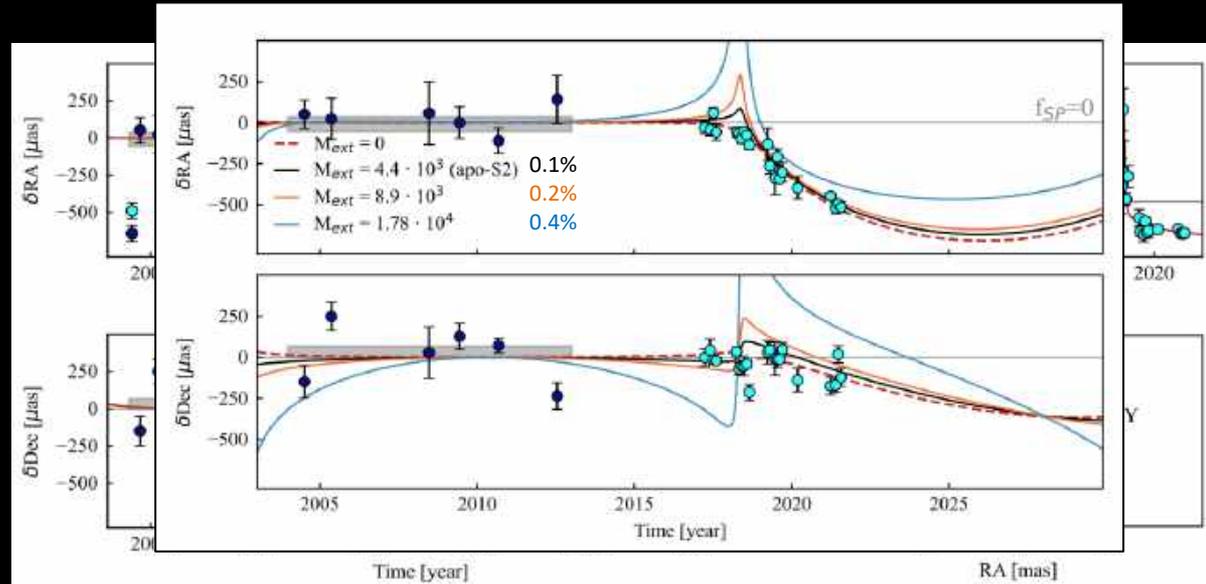
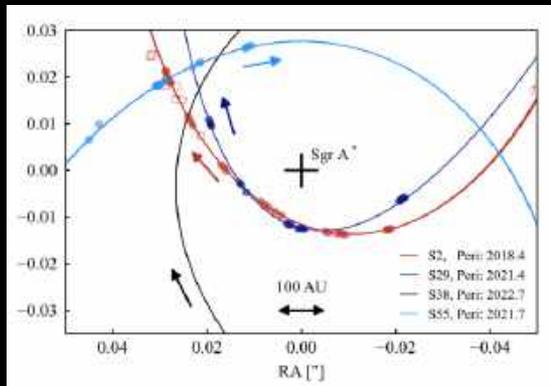


Nouveau test avec S2, S29, S38 et S55

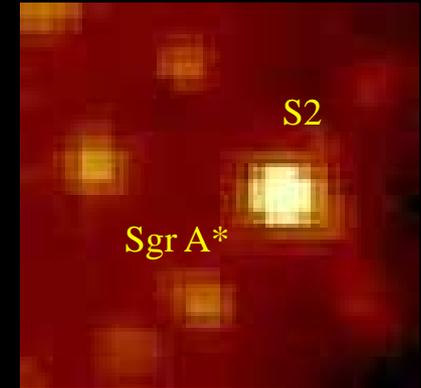
Test de la pression relativiste :

$$f_{SP} = 0,997 \pm 0,144 \quad \text{Einstein confirmé à } 7\sigma$$

Masse étendue inférieure à 0.1% ou 4000  $M_{\odot}$  à l'intérieur de l'apocentre : confirmée (profil de Plummer)



# Des sursauts lumineux près de la dernière orbite circulaire stable



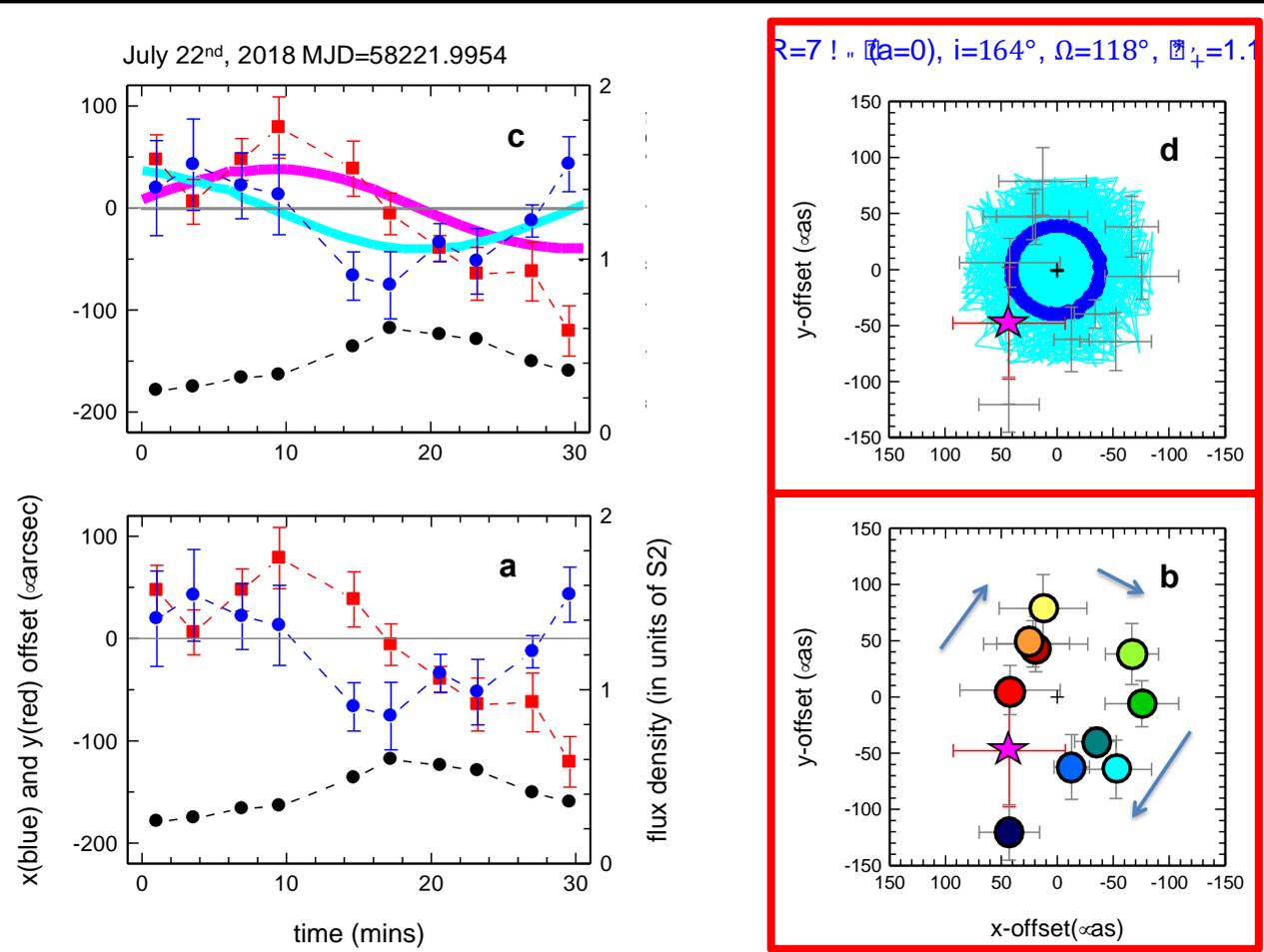
3 sursauts observés les 27 mai, 22 et 28 juillet 2018

Ajustement avec un modèle relativiste de point chaud:

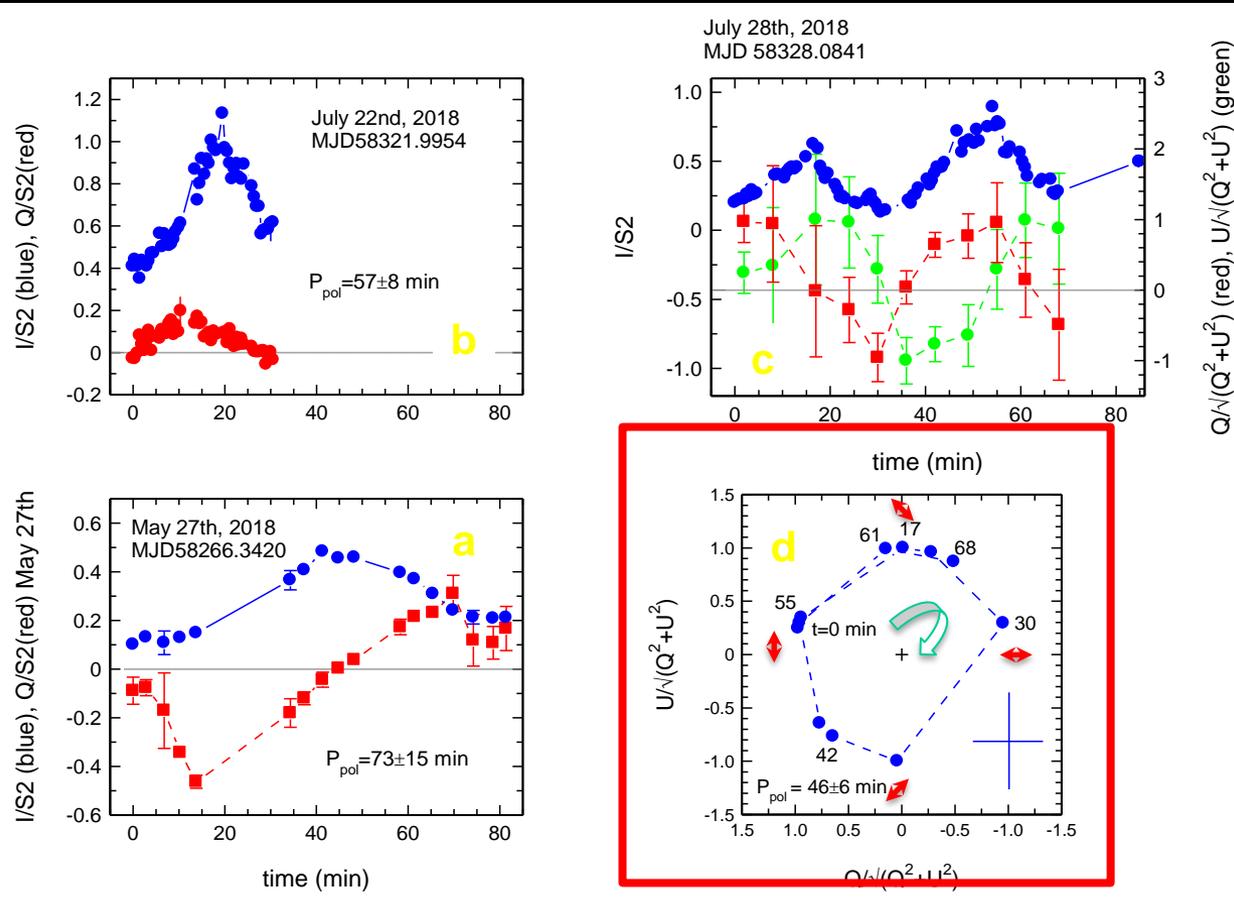
$$R = 3,6 \pm 0,25 R_{\text{trou noir}}$$

$$P = 40 \pm 8 \text{ min}$$

$$\Rightarrow v_{\text{orb}} \sim 0,3 c$$



# Boucle de polarisation

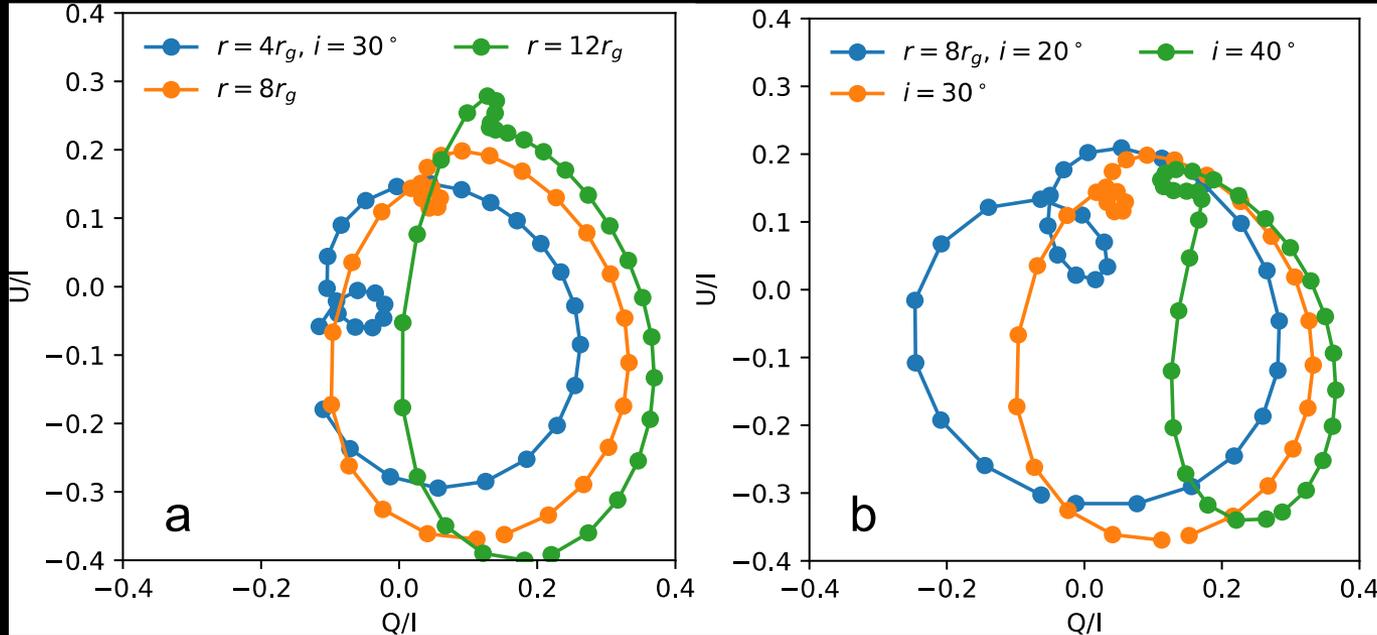


Fort degré de polarisation  
linéaire (qq 10%)

(émission synchrotron)

Boucle de polarisation du 28  
juillet avec  $P_{pol} \sim P_{orb}$

# Modélisation des boucles de polarisation

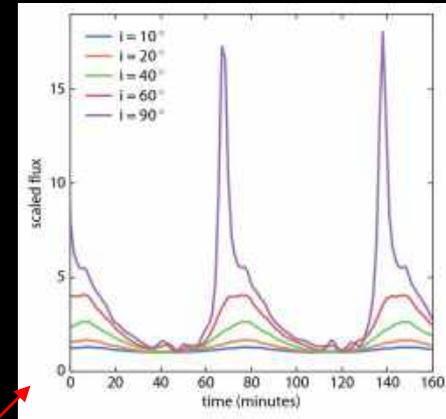
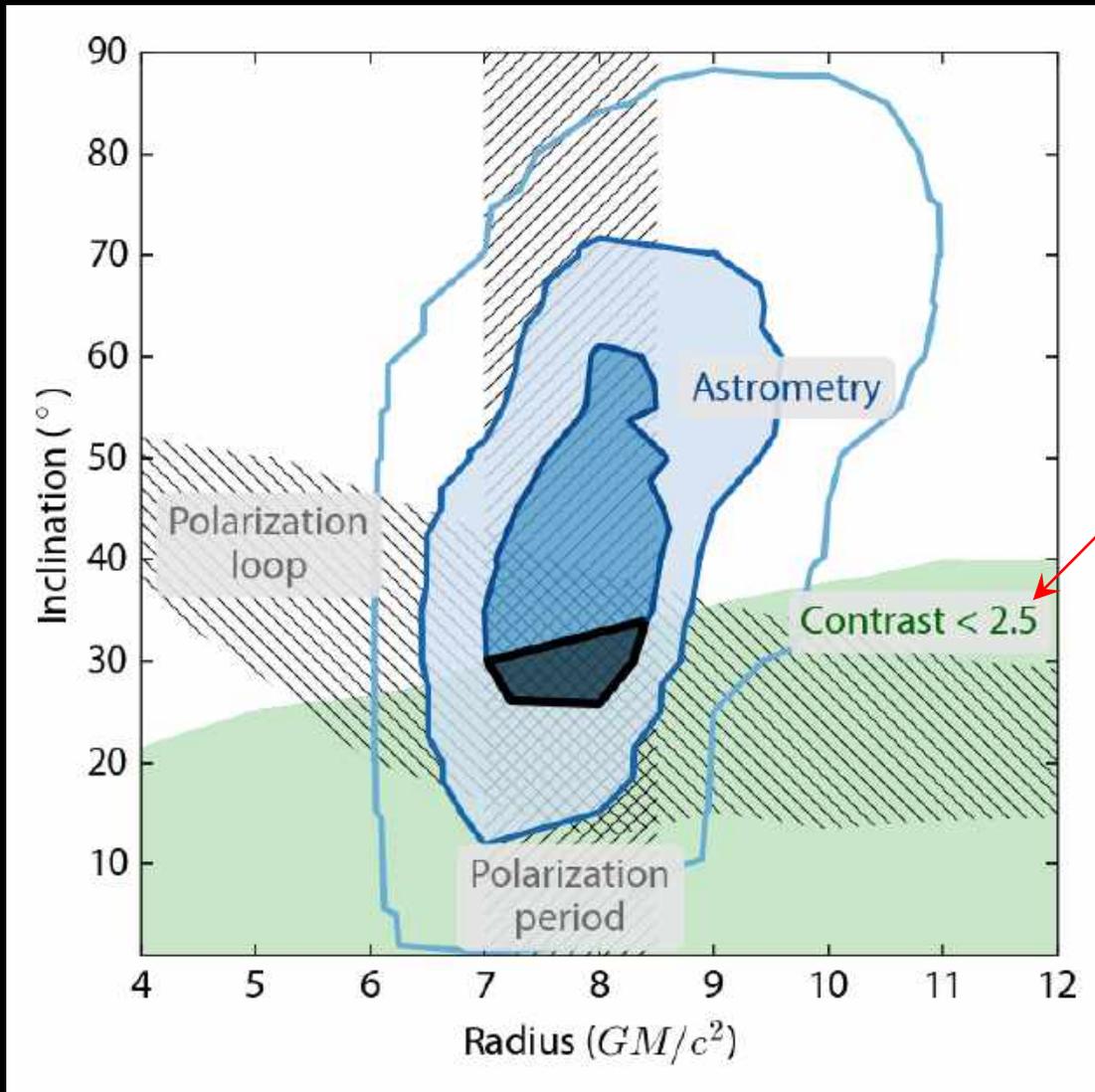


Champ magnétique poloidal pour obtenir des boucles avec  $P_{\text{pol}} \sim P_{\text{orb}}$   
( $P_{\text{pol}} \sim 0,5 \times P_{\text{orb}}$  avec un champ toroidal)

Boucles : courbure des géodésiques

Géométrie avec un pôle fortement incliné pour des boucles centrées dans le plan (Q,U) avec un rayon de quelques  $R_{\text{Sch}}$

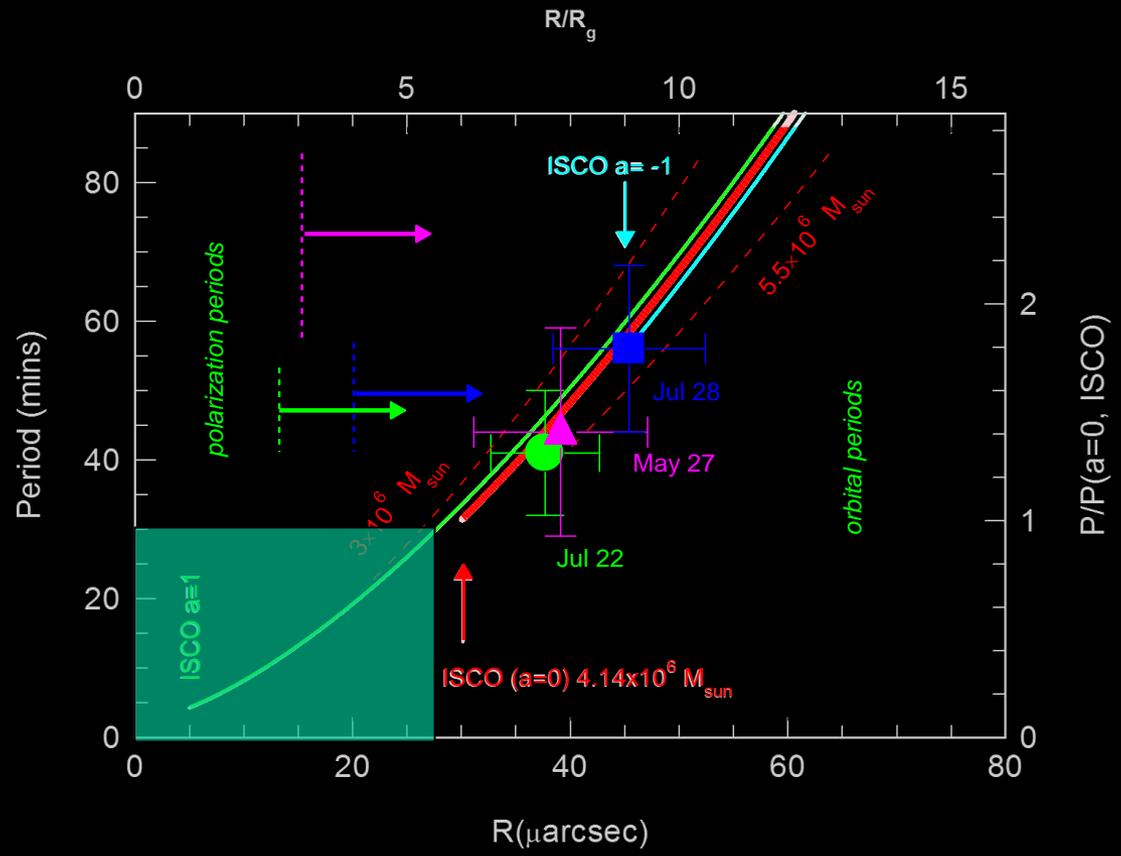
# Contraintes sur l'inclinaison de l'orbite



$R = 3,75 \pm 0,25 R_{Sch}$  et  
inclinaison  $i \leq 30^{\circ}$

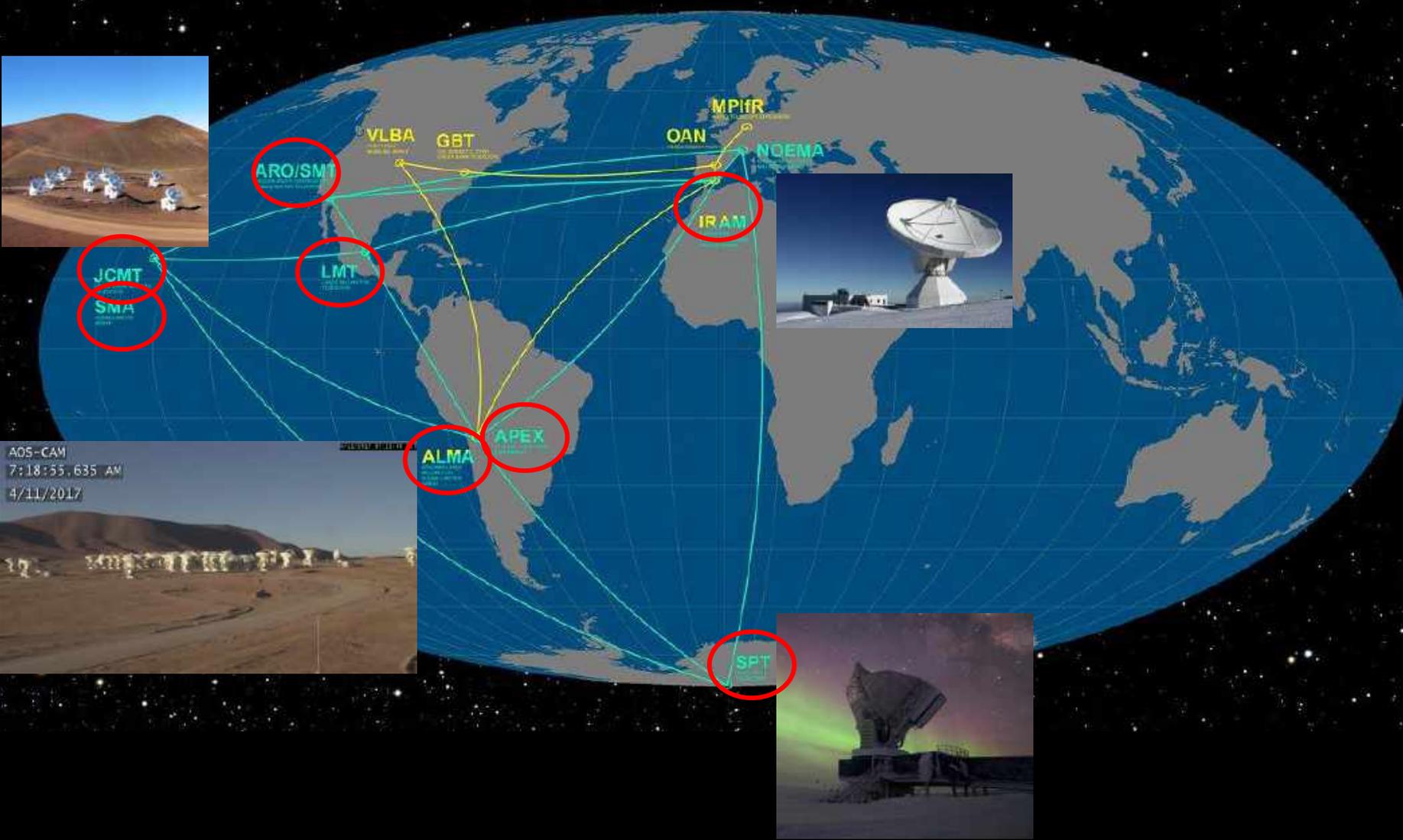
Le trou noir est vu par l'un  
de ses pôles ☹️

# Les 3 orbites sont totalement compatibles avec un trou noir de 4 millions de masses solaires

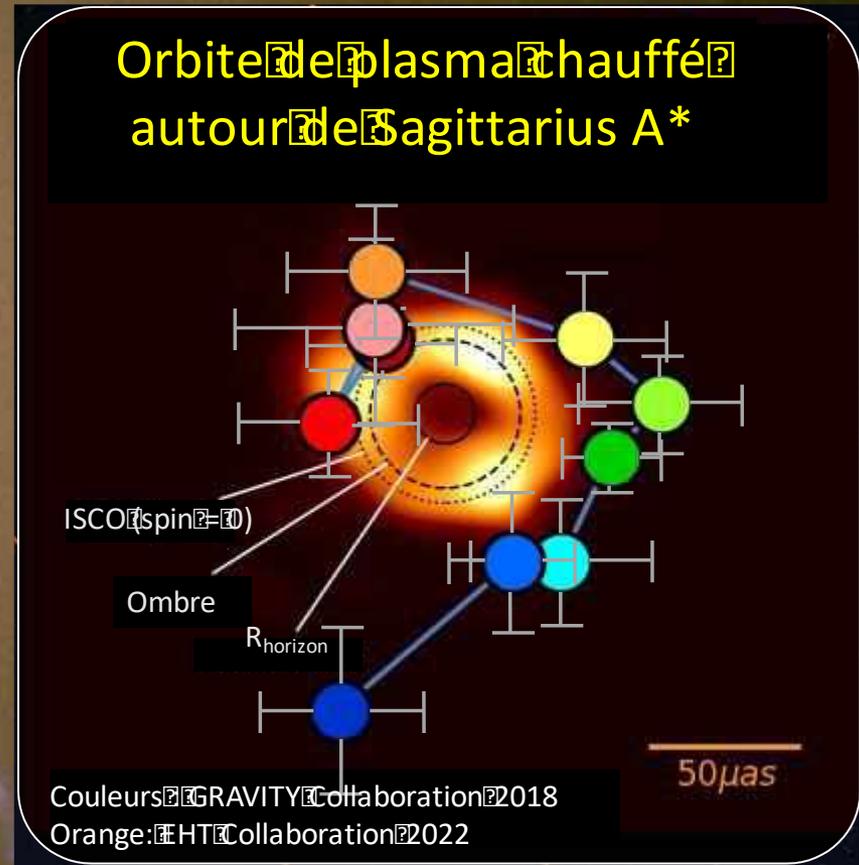
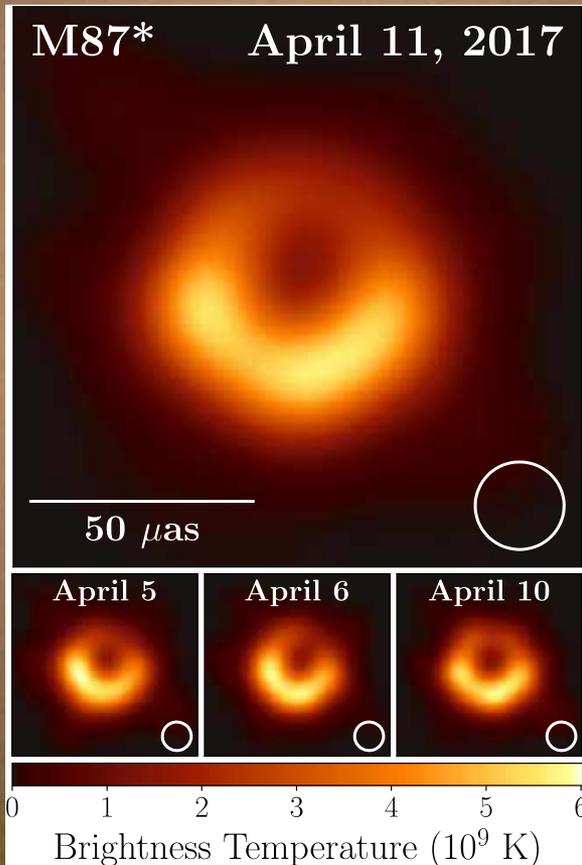


# *Le Event Horizon Telescope*

# Interféromètre intercontinental aux longueurs d'onde millimétriques



# M87\* et Sgr A\* vus par l'EHT



Les deux trous noirs sont vus par leurs pôles ! 🤖



# Boucles de polarisation à 229 GHz (1,3 mm)

Acquisition pendant un sursaut en X le 11 avril 2017

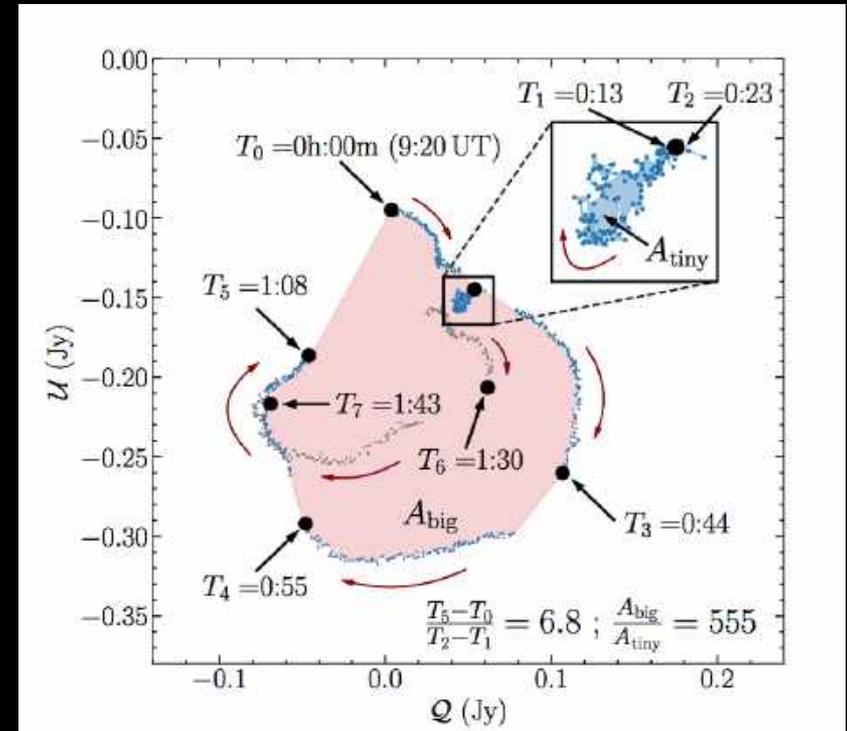
Période  $\sim 70$  minutes

Inclinaison du disque de plasma :  $\sim 20^\circ$

Rayon de l'orbite :  $5 R_{\text{Sch}}$

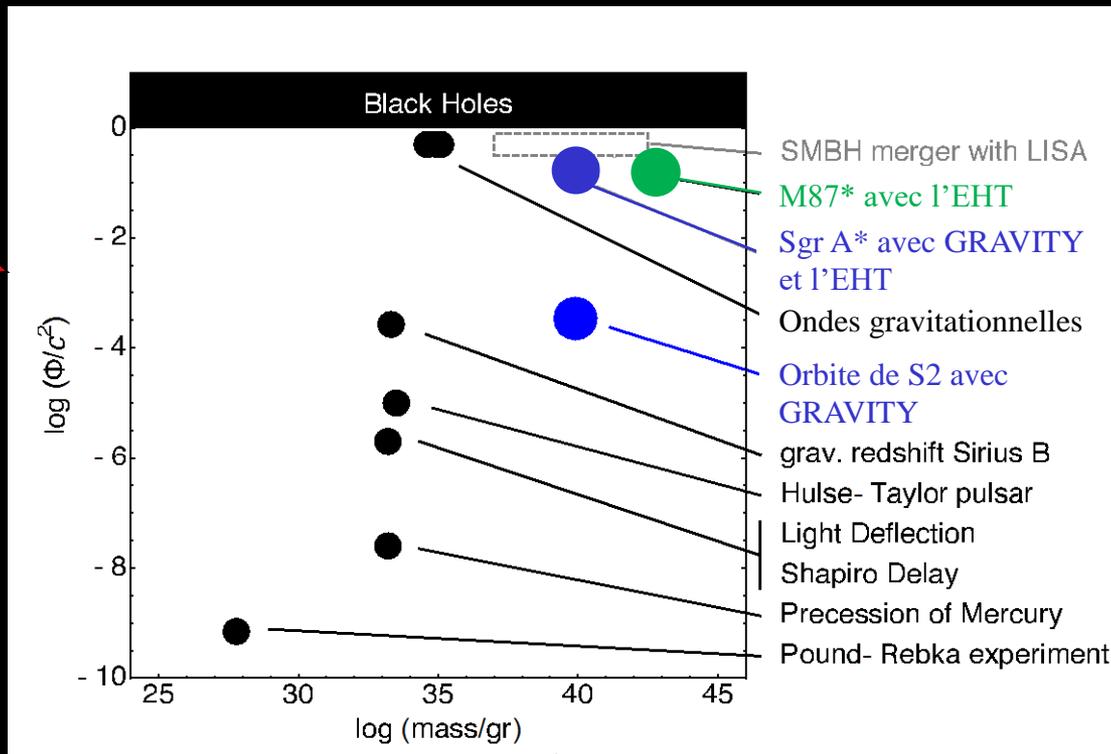
Sens horaire

Champ magnétique poloidal



Wielgus et al., A&A 665, L6 (2022)

# Contributions de GRAVITY et l'EHT aux tests de la relativité générale

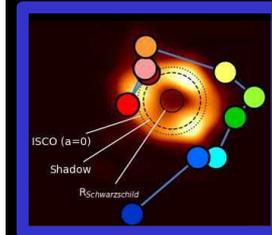


Potentiel



Masse centrale

Inspired by Psaltis (2004)



# L'objet super-massif et compact au centre de la Voie Lactée

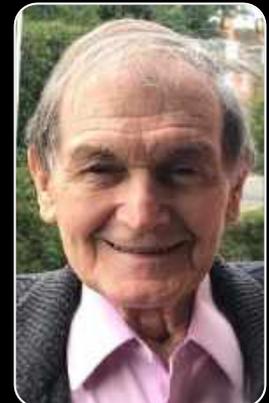
Prix Nobel de physique 2020



Reinhard Genzel



Andrea Ghez



Roger Penrose



GRAVITY

Merci de votre attention !