

# Exploring the supermassive black hole at the galactic center and testing general relativity with GRAVITY

Laboratoire Louis Leprince-Ringuet

Guy Perrin



Monday 19 November 2018

# La Galaxie telle que nous la voyons

*DIRBE 1.25, 2.2, 3.5  $\mu\text{m}$  Composite*



# Sgr A\* et le centre galactique

Sgr A\*

$R_s = 10 \mu\text{as} = 0,1 \text{ ua}$

Dist. 8 k pc

Mini spirale,  
région III

(2 pc/~ 50'')

Amas central à deux disques  
90 étoiles massives OB et  
Wolf-Rayet

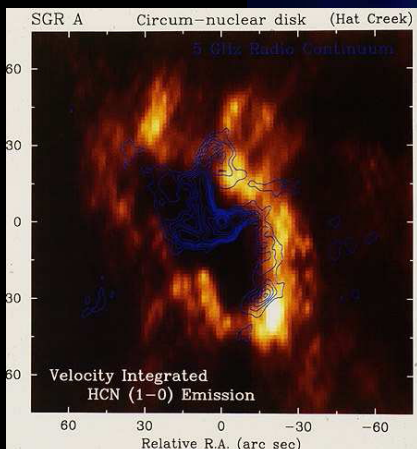
(0,5 pc/12,5'')

Amas des étoiles S  
50 étoiles massives séquence  
principale

(0,5-20 mpc/12-400 mas)

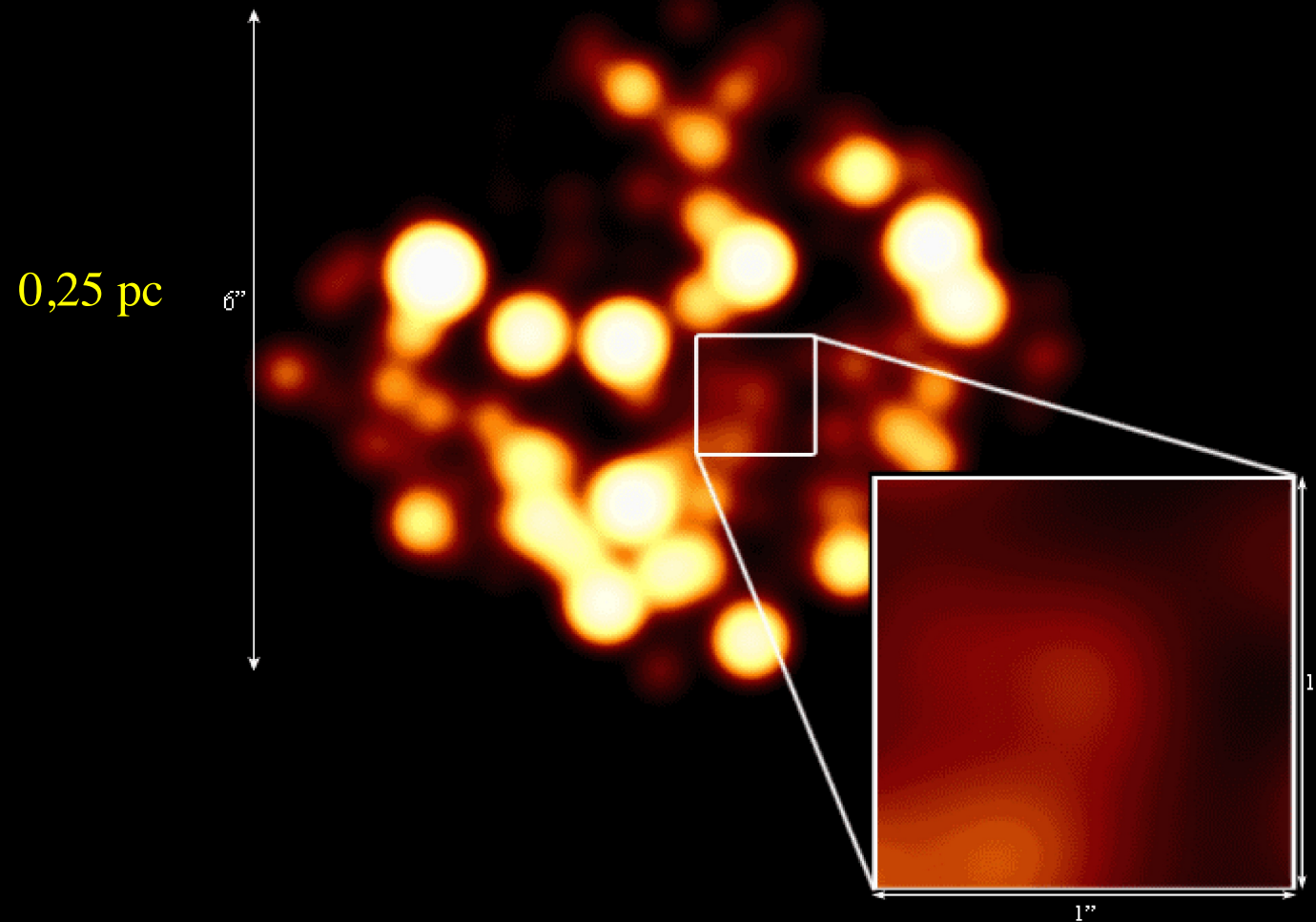
Disque circumnucléaire  
gaz moléculaire et poussière

(1,5-7 pc/~100'')



(Balick & Brown 1974, Becklin et al. 1982, Roberts, Yusef-Zadeh & Goss 1992, Eckart et al. 1995, Paumard et al. 2004, 2006)

# Observations dans l'infrarouge proche





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



# Le miracle de l'optique adaptative NACO (VLT)

Off

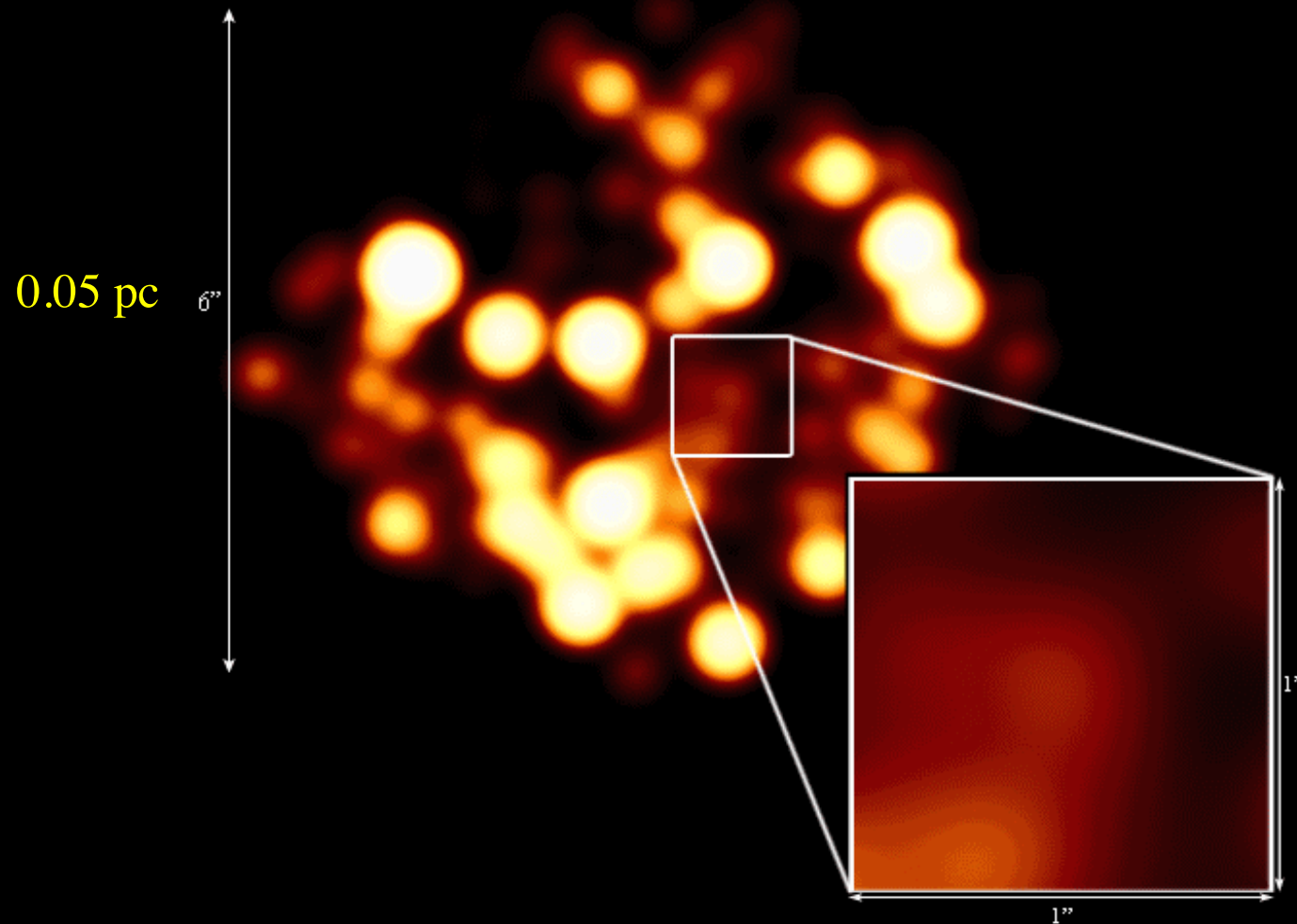


● résolution angulaire du  
télescope



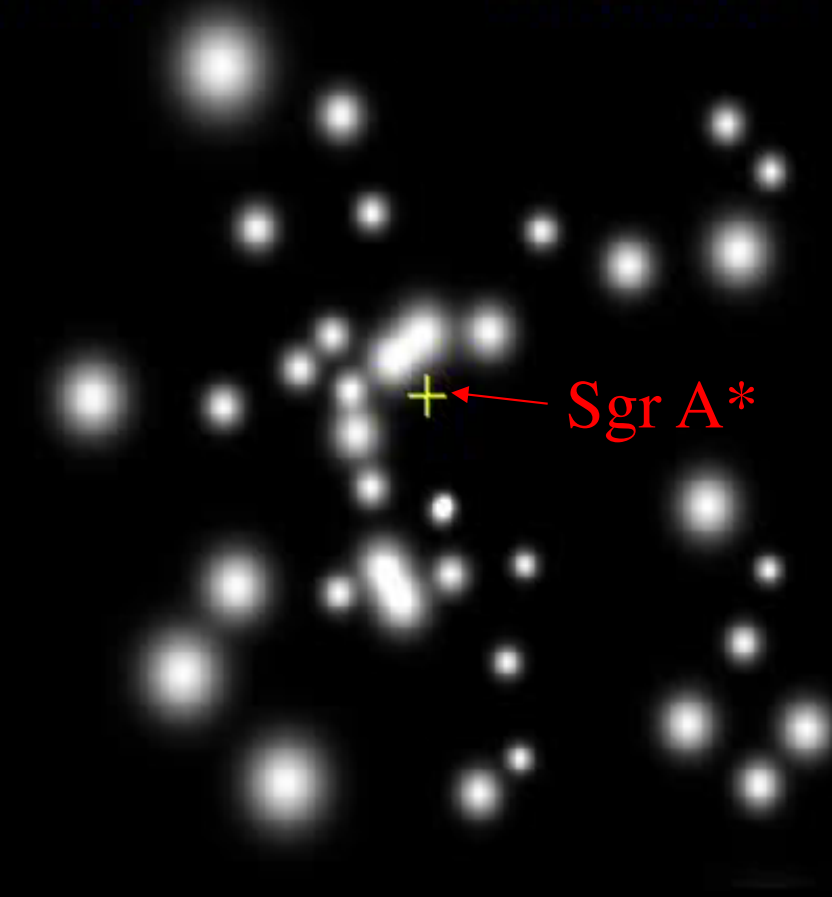
Image d'une étoile double serrée

# Avec une optique adaptative infrarouge pour le Centre Galactique



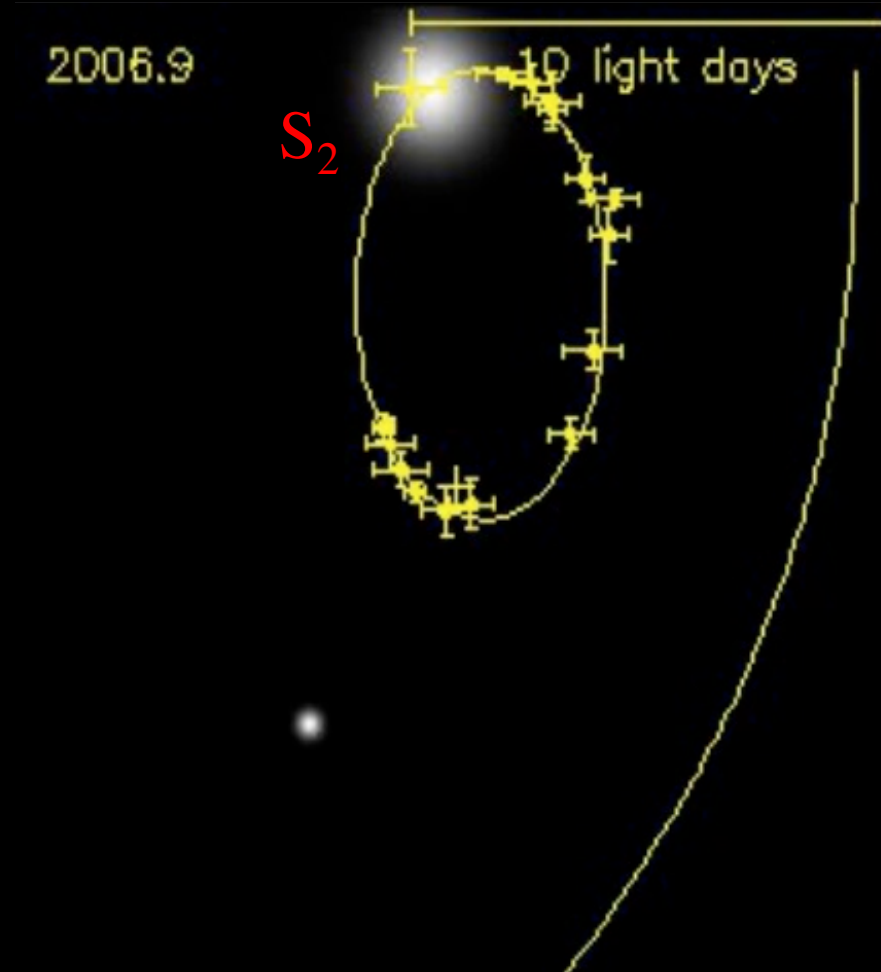
# Orbite de l'étoile $S_2$ observée par l'optique adaptative du VLT NAOS

1992 10 light days



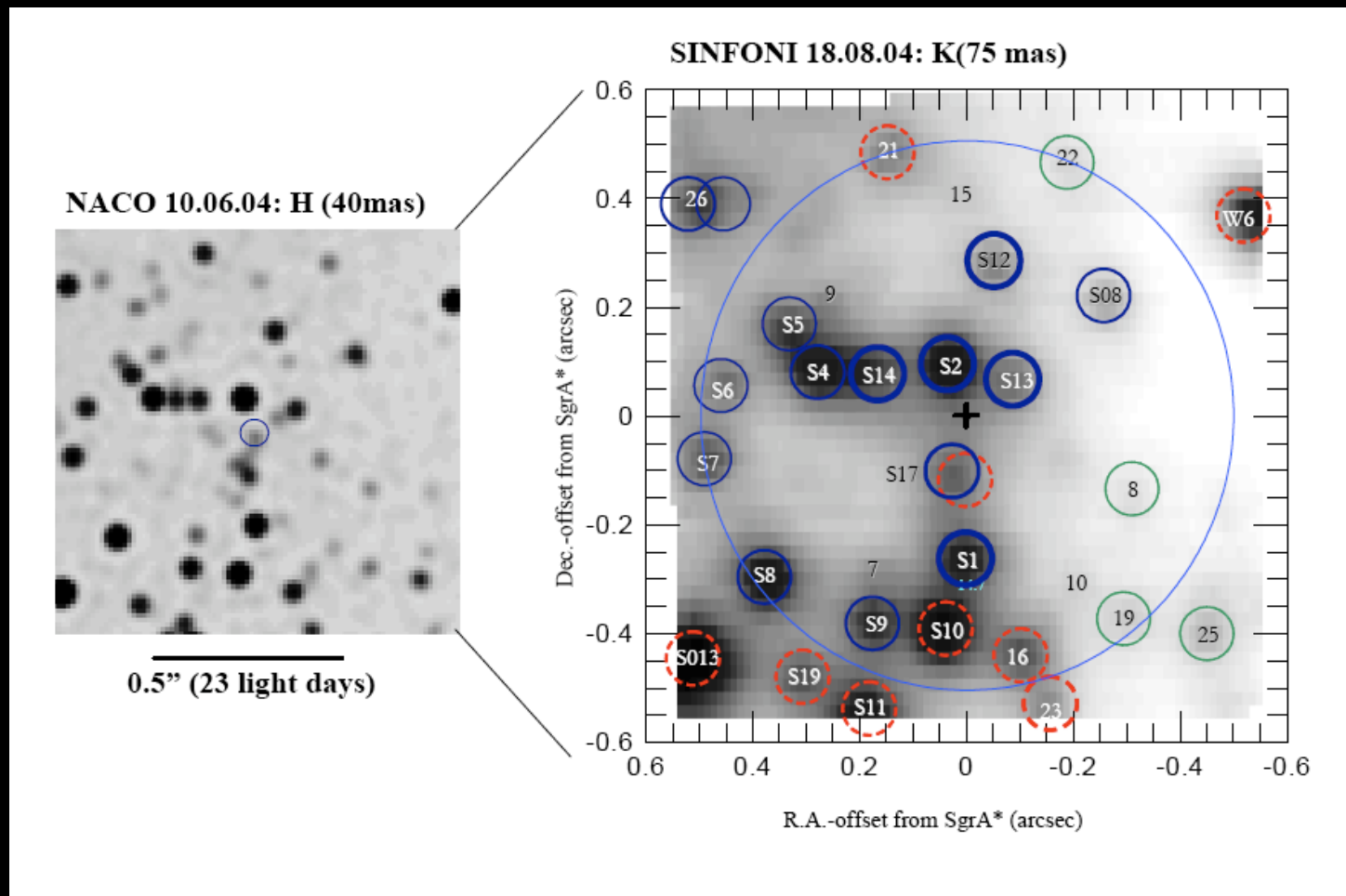
Schödel et al. (2002)

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



Schödel et al. (2002)

# Orbites des étoiles S par optique adaptative et spectroscopie au VLT

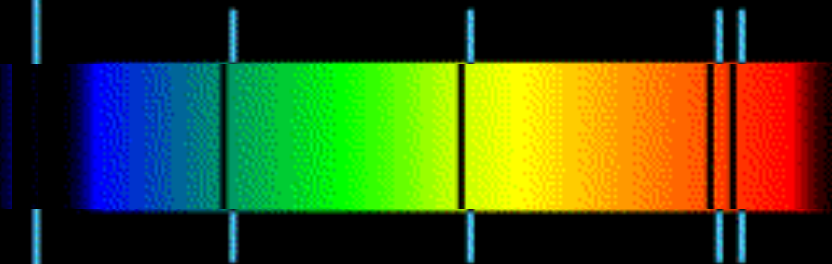
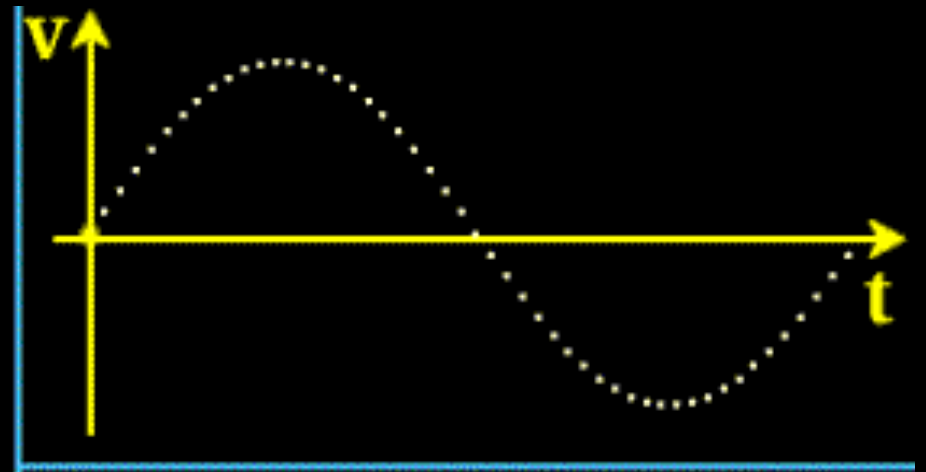
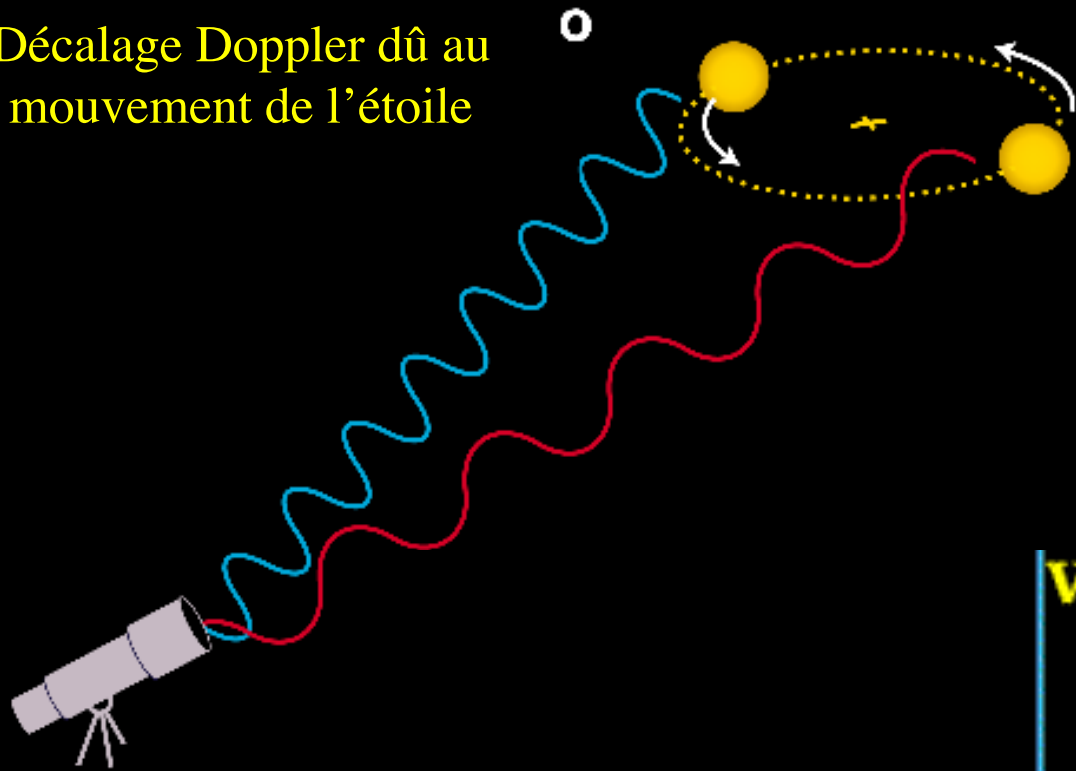


Eisenhauer et al. (2005)

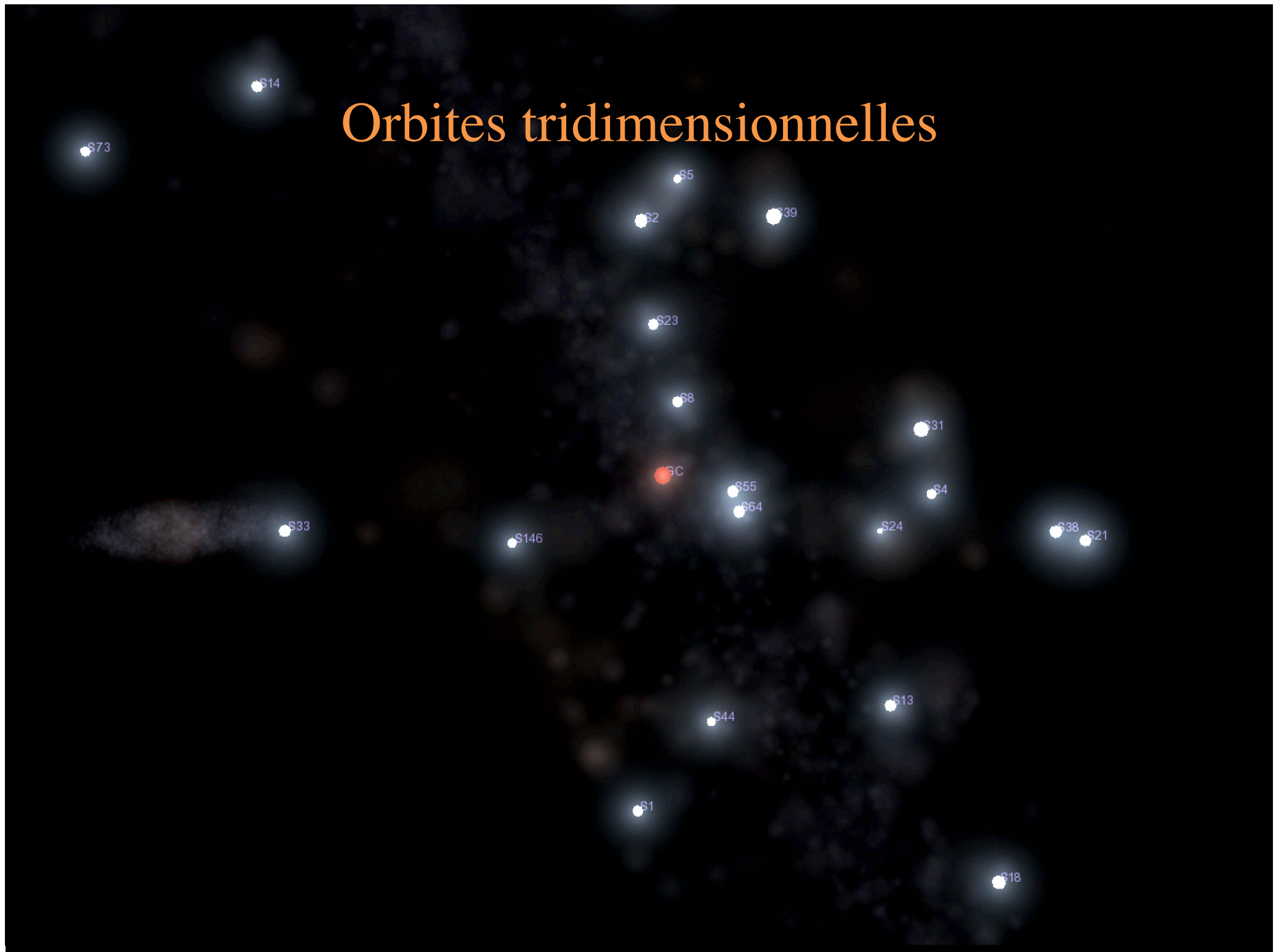


Décalage Doppler dû au mouvement de l'étoile

→ *Vitesse de l'étoile sur la ligne de visée en km/s*



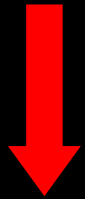
# Orbites tridimensionnelles



# Calcul précis de la masse de Sgr A\*

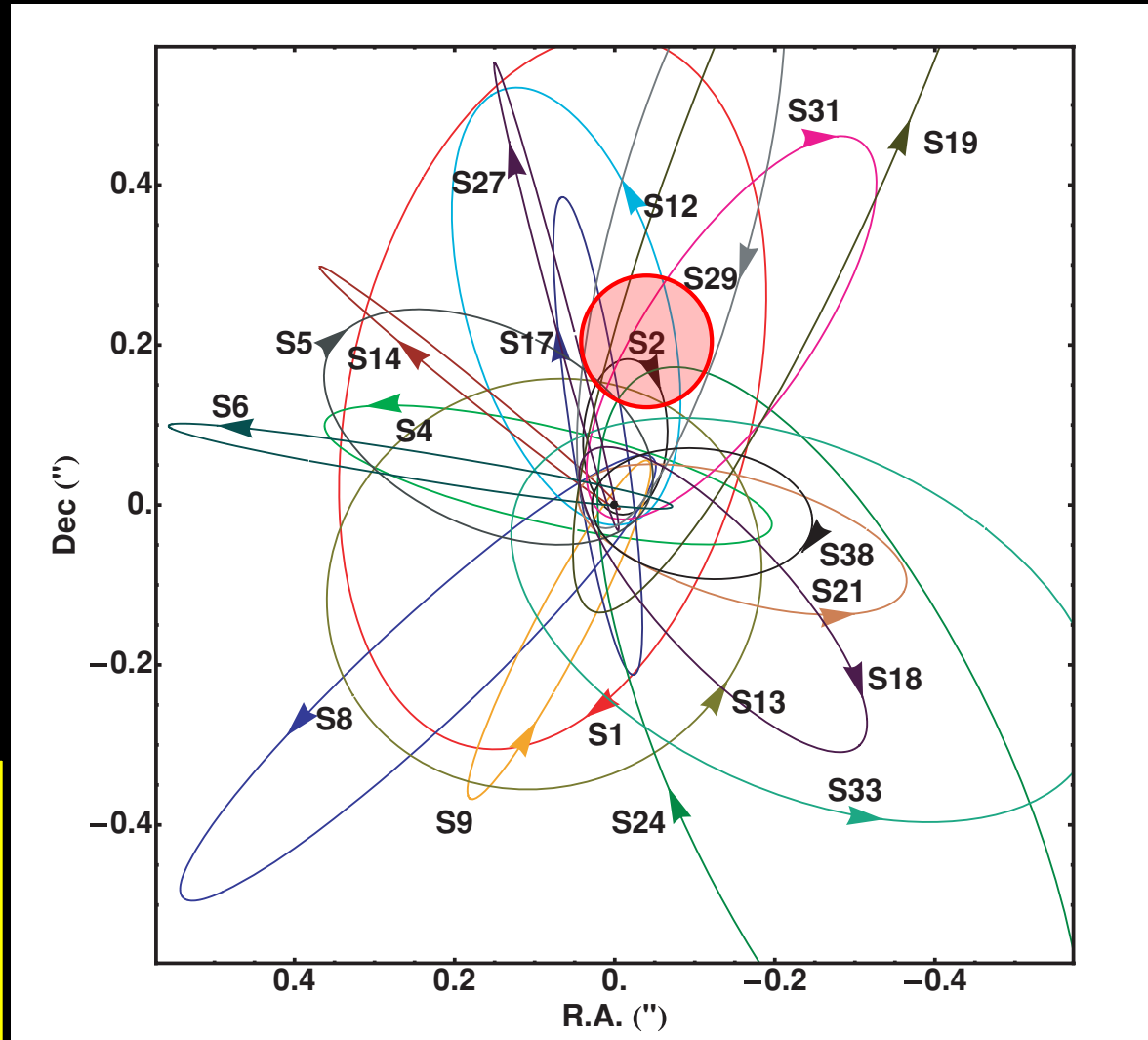
Application de la  
3<sup>ème</sup> loi de Kepler :

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



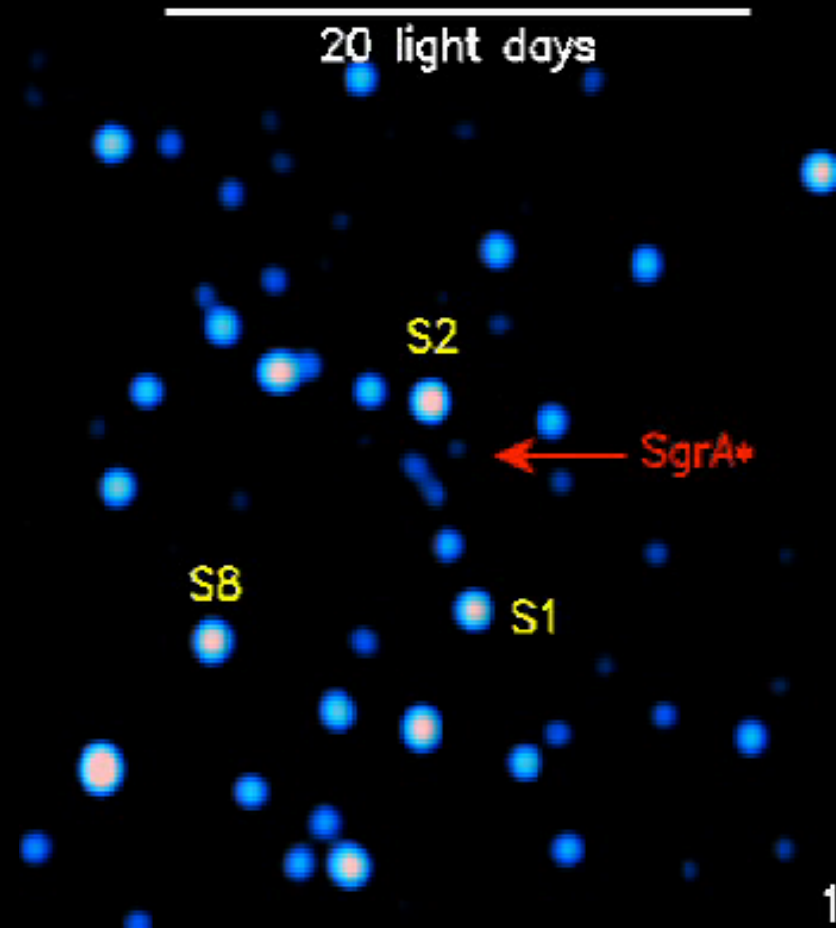
$$M_{Sgr A^*} = 4,31 \pm 0,42 \times 10^6 M_{Soleil}$$

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

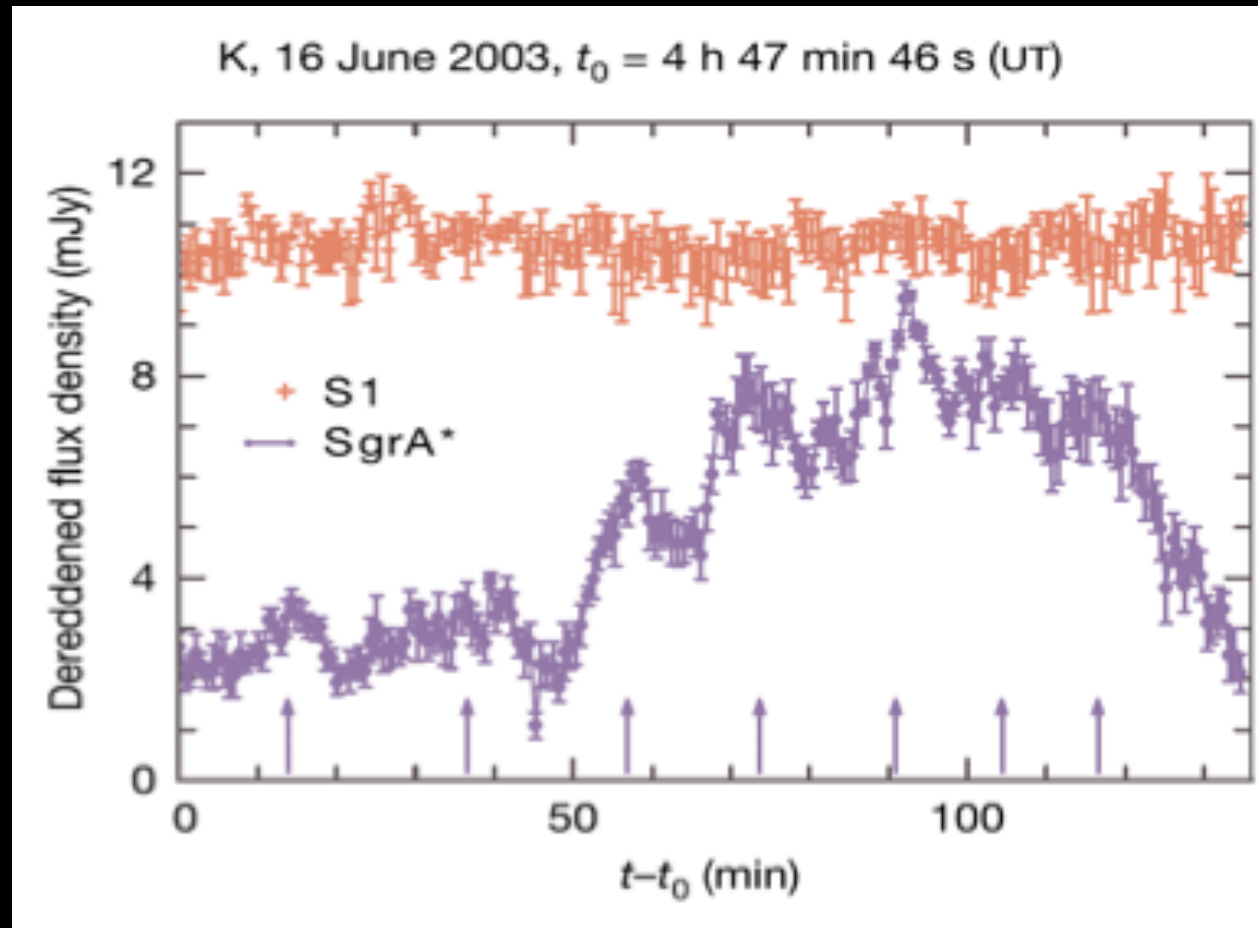


Gillessen et al. (2009)

# Les sursauts au Centre Galactique



# Luminosité du sursaut de 2003 en fonction du temps



# Aller plus loin en augmentant la résolution angulaire

Étudier les effets relativistes sur les orbites d'étoiles proches

Comprendre la nature des étoiles S et leur distribution

Échelle  $\sim 100 R_s$       1 mas      (x50)

Aller vers une preuve définitive que Sgr A\* est un trou noir

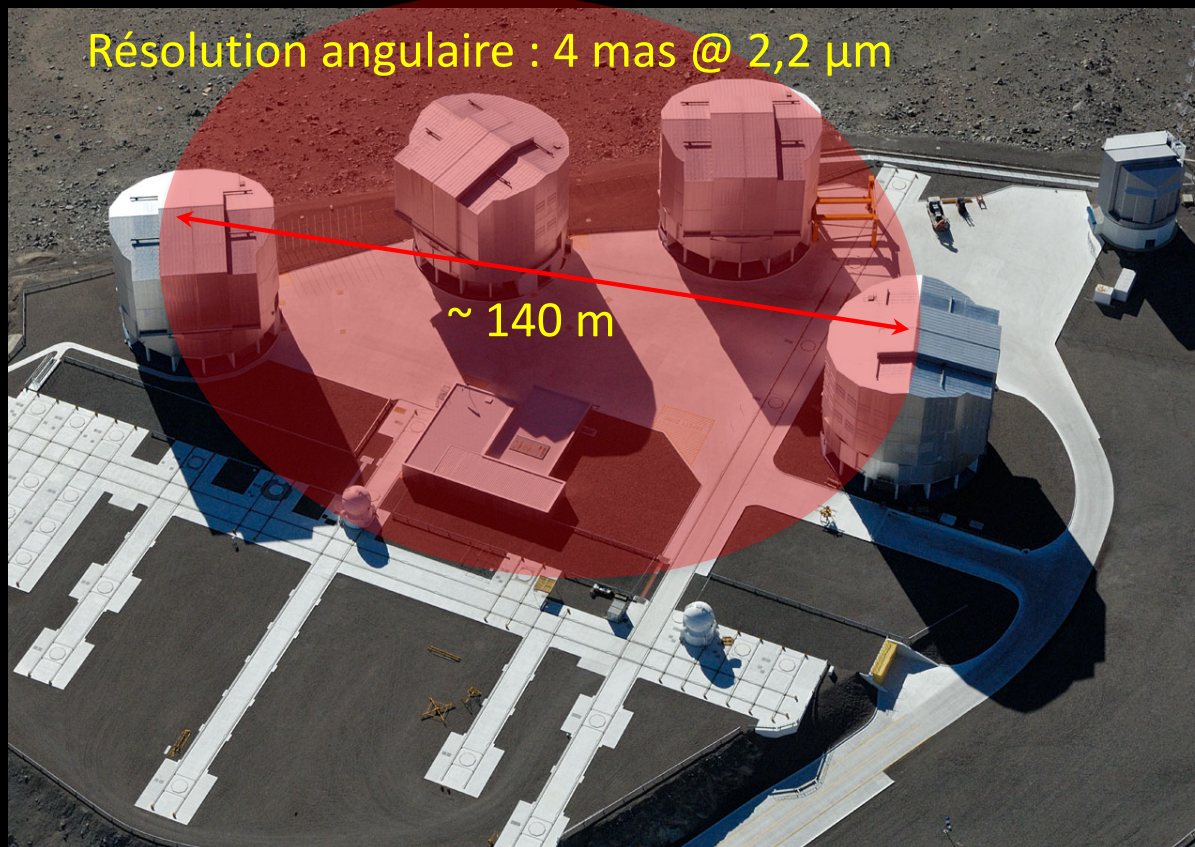
Comprendre la nature des sursauts

Utiliser le trou noir comme un laboratoire unique pour la relativité générale en champ fort

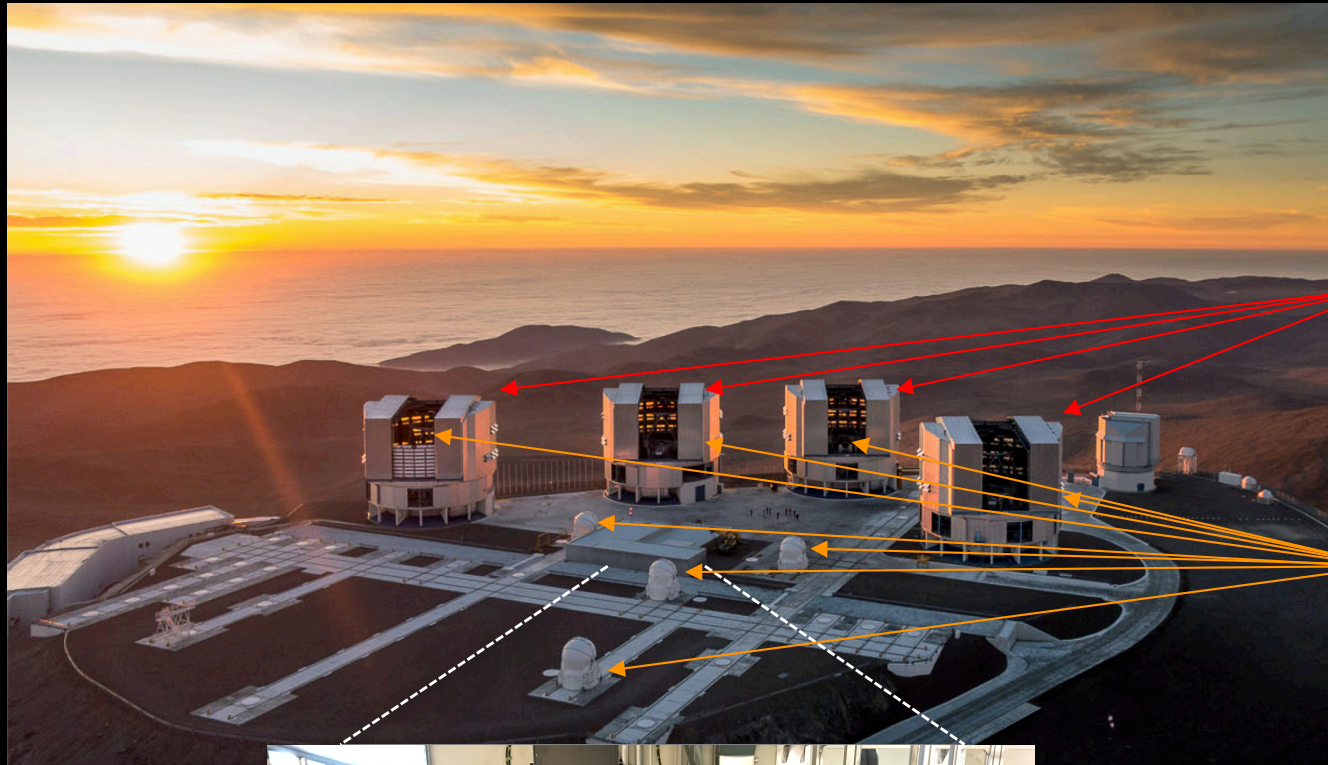
Échelle  $\sim 1 R_s$       10  $\mu$ as      (x5000)



GRAVITY combine les 4 UT (8 m)  
ainsi que les 4 AT (1,80 m) du VLTI

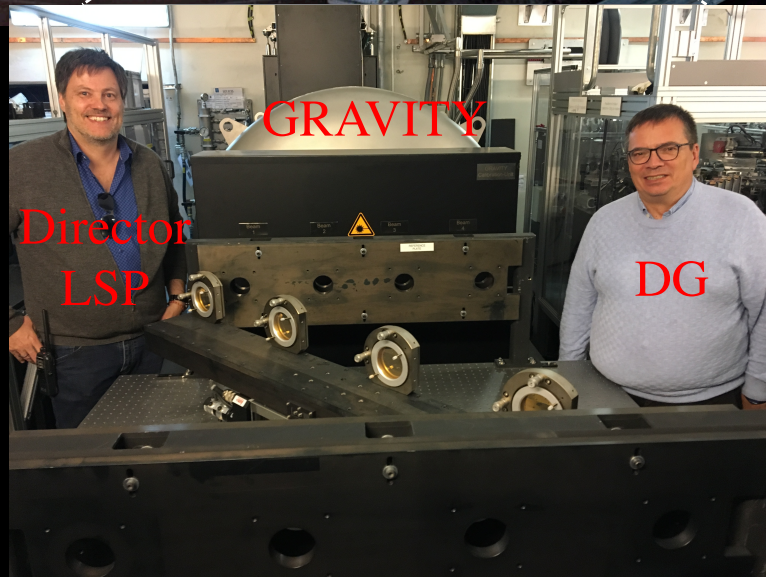


# GRAVITY : instrument distribué sur le VLTI



Au recombineur viennent s'ajouter :

- les 4 optiques adaptatives infrarouges (UT)
- les capteurs métrologiques sur les télescopes (UT et AT) pour l'astrométrie très haute précision





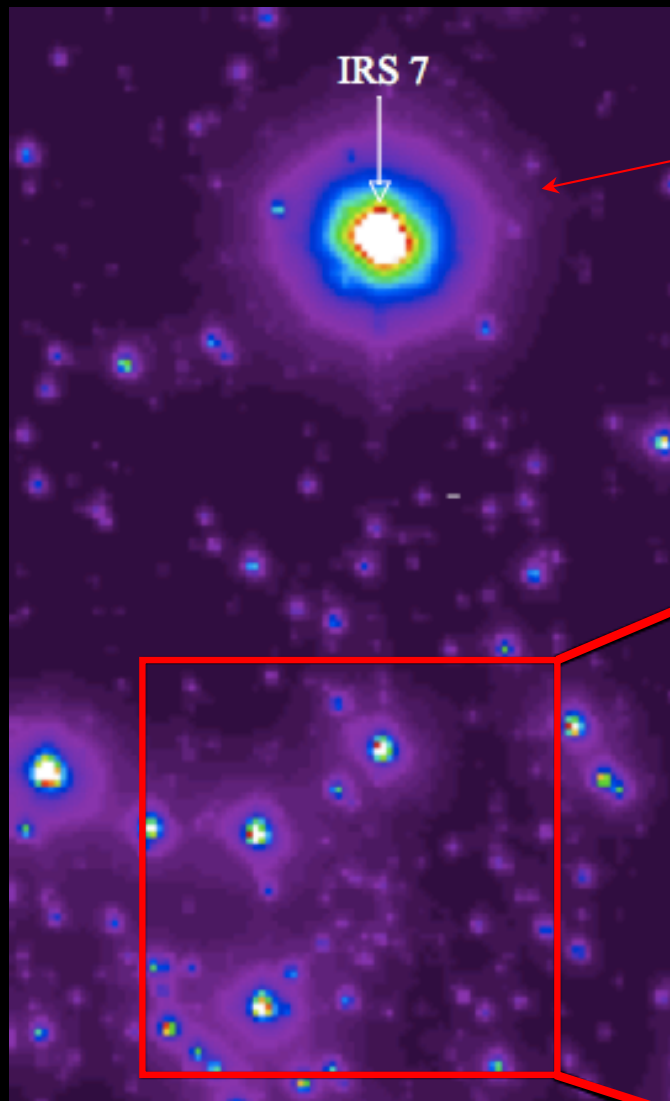
# Le consortium GRAVITY

Frank Eisenhauer, **Guy Perrin**, Wolfgang Brandner, Christian Straubmeier, **Karine Perraut**, Antonio Amorim, Markus Schöller, Reinhard Genzel, **Pierre Kervella**, **Myriam Benisty**, Sebastian Fischer, **Laurent Jocou**, Paulo Garcia, Gerd Jakob, Stefan Gillessen, **Yann Clénet**, Armin Boehm, Constanza Araujo-Hauck, Jean-Philippe Berger, Jorge Lima, Roberto Abuter, Oliver Pfuhl, **Thibaut Paumard**, Casey P. Deen, Michael Wiest, **Thibaut Moulin**, Jaime Villate, Gerardo Avila, Marcus Haug, **Sylvestre Lacour**, Thomas Henning, Senol Yazici, Axelle Nolot, Pedro Carvas, Reinhold Dorn, Stefan Kellner, **Eric Gendron**, Stefan Hippler, Andreas Eckart, Sonia Anton, Yves Jung, Alexander Gräter, **Élodie Choquet**, Armin Huber, Narsireddy Anugu, Philippe Gitton, Eckhard Sturm, **Frédéric Vincent**, Sarah Kendrew, Stefan Ströbele, Clemens Kister, **Pierre Fédou**, Ralf Klein, Paul Jolley, Magdalena Lippa, **Vincent Lapeyrère**, Natalia Kudryavtseva, Christian Lucuix, Ekkehard Wieprecht, **Frédéric Chapron**, Werner Laun, Leander Mehrgan, Thomas Ott, **Gérard Rousset**, Rainer Lenzen, Marcos Suarez, Reiner Hofmann, **Jean-Michel Reess**, Vianak Naranjo, Pierre Haguenuer, Oliver Hans, **Arnaud Sevin**, Udo Neumann, Jean-Louis Lizon, Markus Thiel, **Claude Collin**, Jose Ricardo Ramos, Gert Finger, David Moch, **Daniel Rouan**, Ralf-Rainer Rohloff, Markus Wittkowski, Richard Davies, **Denis Ziegler**, Karl Wagner, Henri Bonnet, Katie Dodds-Eden, **Frédéric Cassaing**, Pengqian Yang, Florian Kerber, Sebastian Rabien, **Nabih Azouaoui**, Frederic Gonte, Josef Eder, **Vartan Arslanian**, Willem-Jan de Wit, Frank Hausmann, **Roderick Dombet**, Luca Pasquini, Harald Weisz, **Pierre Lena**, Mark Casali, **Bernard Lazareff**, **Zoltan Hubert**, **Jean-Baptiste Le Bouquin**



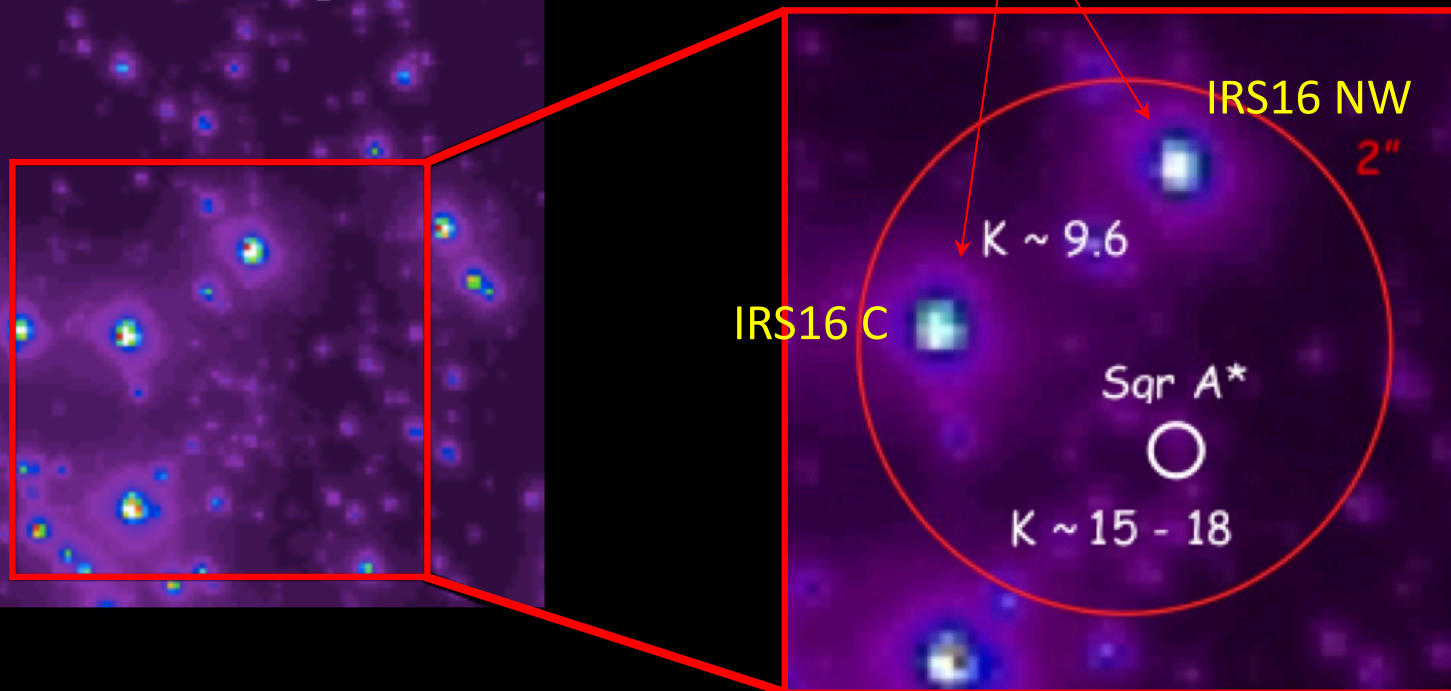


# Principe de la mesure GRAVITY



Source de référence pour  
l'optique adaptative infrarouge

Sources de référence pour la  
stabilisation des franges, l'imagerie  
et l'astrométrie interférométriques



IRS16 C

IRS16 NW

2''

K ~ 9.6

Sqr A\*

K ~ 15 - 18

# Astrométrie interférométrique

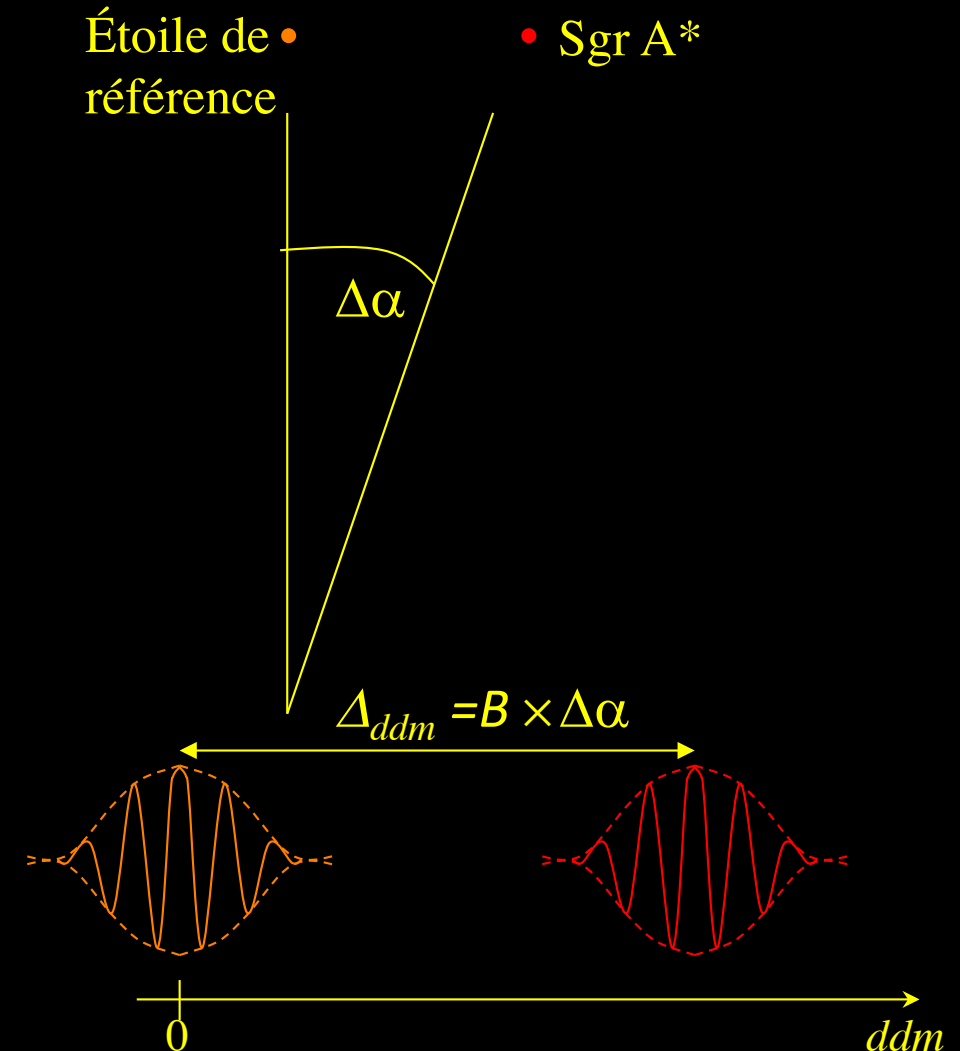
La distance entre les interférogrammes vaut :

$$\Delta_{ddm} = B \times \Delta\alpha$$

D'où :

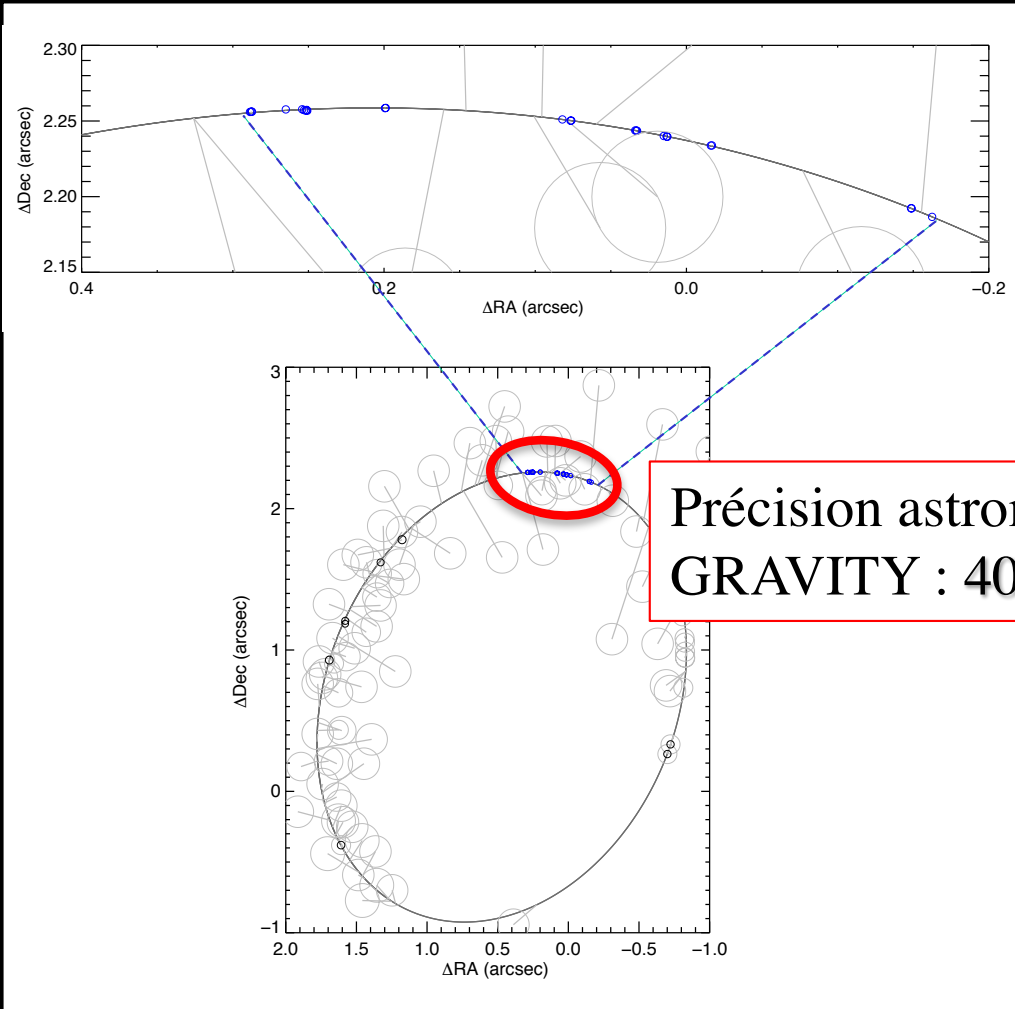
$$\Delta\alpha = \Delta_{ddm} / B$$

Avec une précision de 5 nm sur  $\Delta_{ddm}$  pour une base de 100 m, la précision sur  $\Delta\alpha$  est de 10  $\mu$ as.

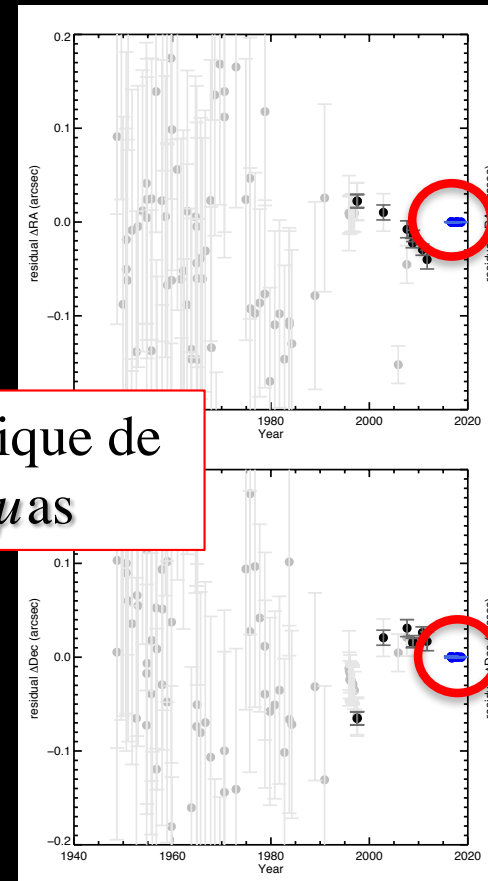




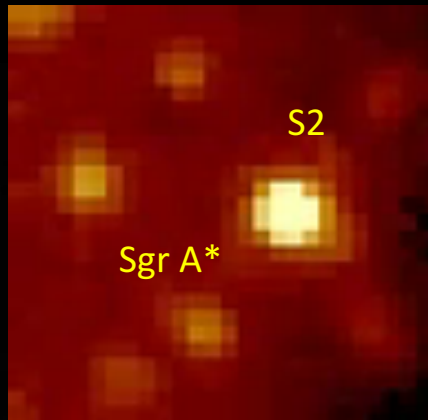
# Gliese 65AB



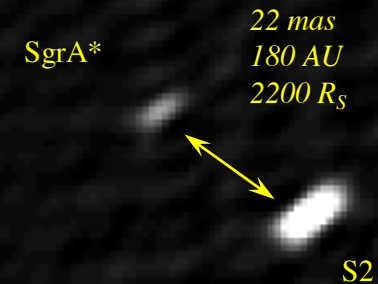
Précision astrométrique de  
GRAVITY : 40-60  $\mu\text{as}$



# Images reconstruites de S2 et Sgr A\*



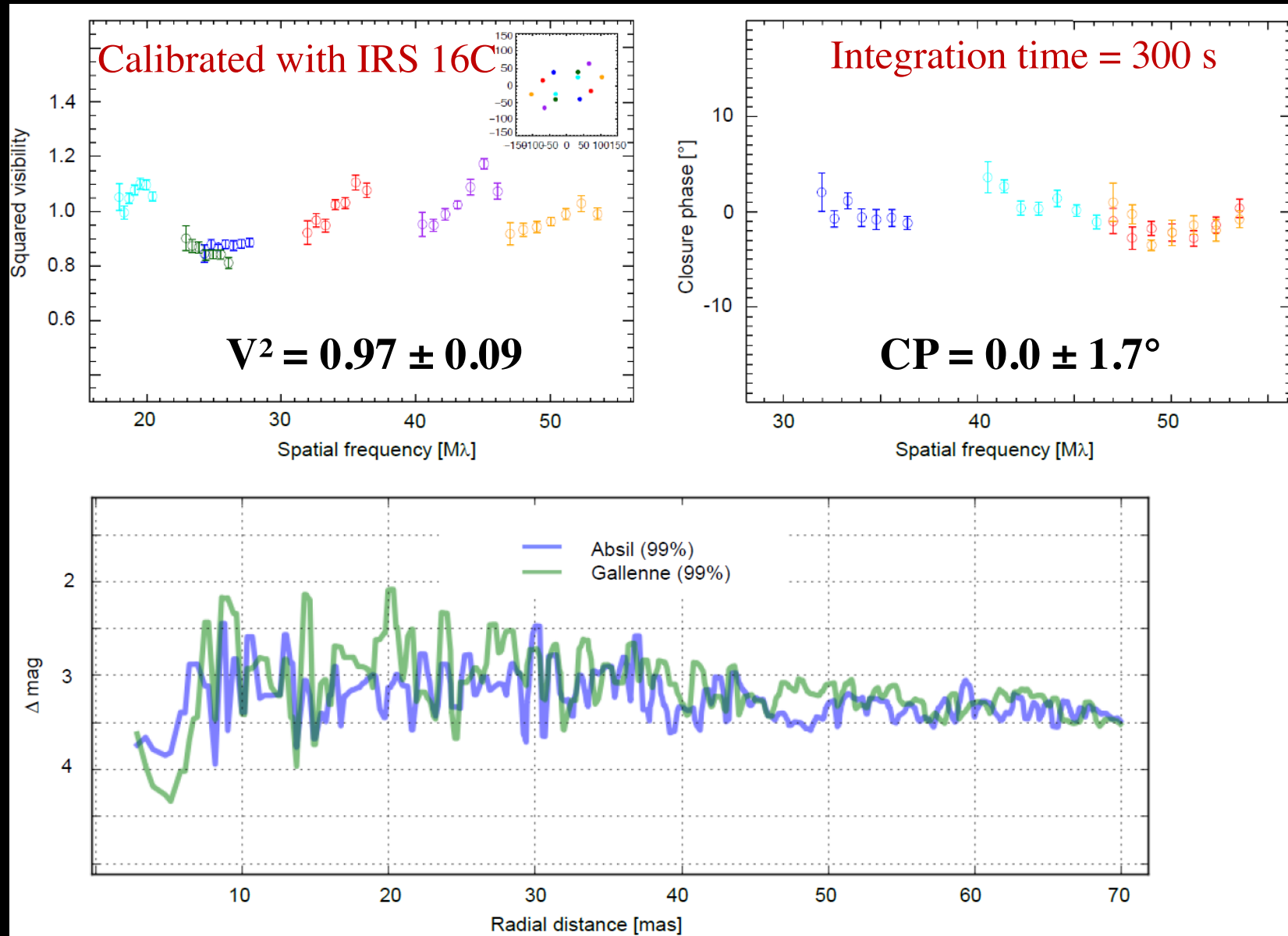
*co-add early summer 2017*



*resolution  
2.2 x 4.7 mas*

*March 2018*

# Pas d'étoile plus brillante que $K = 17,1$ près de S2 et Sgr A\*



# Détection du rougissement gravitationnel avec S2

A&A 615, L15 (2018)  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718>  
© ESO 2018

**Astronomy  
&  
Astrophysics**

LETTER TO THE EDITOR

## Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole<sup>★</sup>

GRAVITY Collaboration<sup>★★</sup>: R. Abuter<sup>8</sup>, A. Amorim<sup>6,14</sup>, N. Anugu<sup>7</sup>, M. Bauböck<sup>1</sup>, M. Benisty<sup>5</sup>, J. P. Berger<sup>5,8</sup>, N. Blind<sup>10</sup>, H. Bonnet<sup>8</sup>, W. Brandner<sup>3</sup>, A. Buron<sup>1</sup>, C. Collin<sup>2</sup>, F. Chapron<sup>2</sup>, Y. Clénet<sup>2</sup>, V. Coudé du Foresto<sup>2</sup>, P. T. de Zeeuw<sup>12,1</sup>, C. Deen<sup>1</sup>, F. Delplancke-Ströbele<sup>8</sup>, R. Dembet<sup>8,2</sup>, J. Dexter<sup>1</sup>, G. Duvert<sup>5</sup>, A. Eckart<sup>4,11</sup>, F. Eisenhauer<sup>1,\*\*\*</sup>, G. Finger<sup>8</sup>, N. M. Förster Schreiber<sup>1</sup>, P. Fédou<sup>2</sup>, P. Garcia<sup>7,14</sup>, R. Garcia Lopez<sup>15,3</sup>, F. Gao<sup>1</sup>, E. Gendron<sup>2</sup>, R. Genzel<sup>1,13</sup>, S. Gillessen<sup>1</sup>, P. Gordo<sup>6,14</sup>, M. Habibi<sup>1</sup>, X. Haubois<sup>9</sup>, M. Haug<sup>8</sup>, F. Haußmann<sup>1</sup>, Th. Henning<sup>3</sup>, S. Hippler<sup>3</sup>, M. Horrobin<sup>4</sup>, Z. Hubert<sup>2,3</sup>, N. Hubin<sup>8</sup>, A. Jimenez Rosales<sup>1</sup>, L. Jochum<sup>8</sup>, L. Jocou<sup>5</sup>, A. Kaufer<sup>9</sup>, S. Kellner<sup>11</sup>, S. Kendrew<sup>16,3</sup>, P. Kervella<sup>2</sup>, Y. Kok<sup>1</sup>, M. Kulas<sup>3</sup>, S. Lacour<sup>2</sup>, V. Lapeyrère<sup>2</sup>, B. Lazareff<sup>5</sup>, J.-B. Le Bouquin<sup>5</sup>, P. Léna<sup>2</sup>, M. Lippa<sup>1</sup>, R. Lenzen<sup>3</sup>, A. Mérand<sup>8</sup>, E. Müller<sup>8,3</sup>, U. Neumann<sup>3</sup>, T. Ott<sup>1</sup>, L. Palanca<sup>9</sup>, T. Paumard<sup>2</sup>, L. Pasquini<sup>8</sup>, K. Perraut<sup>5</sup>, G. Perrin<sup>2</sup>, O. Pfuhl<sup>1</sup>, P. M. Plewa<sup>1</sup>, S. Rabien<sup>1</sup>, A. Ramírez<sup>9</sup>, J. Ramos<sup>3</sup>, C. Rau<sup>1</sup>, G. Rodríguez-Coira<sup>2</sup>, R.-R. Rohloff<sup>3</sup>, G. Rousset<sup>2</sup>, J. Sanchez-Bermudez<sup>9,3</sup>, S. Scheithauer<sup>3</sup>, M. Schöller<sup>8</sup>, N. Schuler<sup>9</sup>, J. Spyromilio<sup>8</sup>, O. Straub<sup>2</sup>, C. Straubmeier<sup>4</sup>, E. Sturm<sup>1</sup>, L. J. Tacconi<sup>1</sup>, K. R. W. Tristram<sup>9</sup>, F. Vincent<sup>2</sup>, S. von Fellenberg<sup>1</sup>, I. Wank<sup>4</sup>, I. Waisberg<sup>1</sup>, F. Widmann<sup>1</sup>, E. Wieprecht<sup>1</sup>, M. Wiest<sup>4</sup>, E. Wiezorrek<sup>1</sup>, J. Woillez<sup>8</sup>, S. Yazici<sup>1,4</sup>, D. Ziegler<sup>2</sup>, and G. Zins<sup>9</sup>

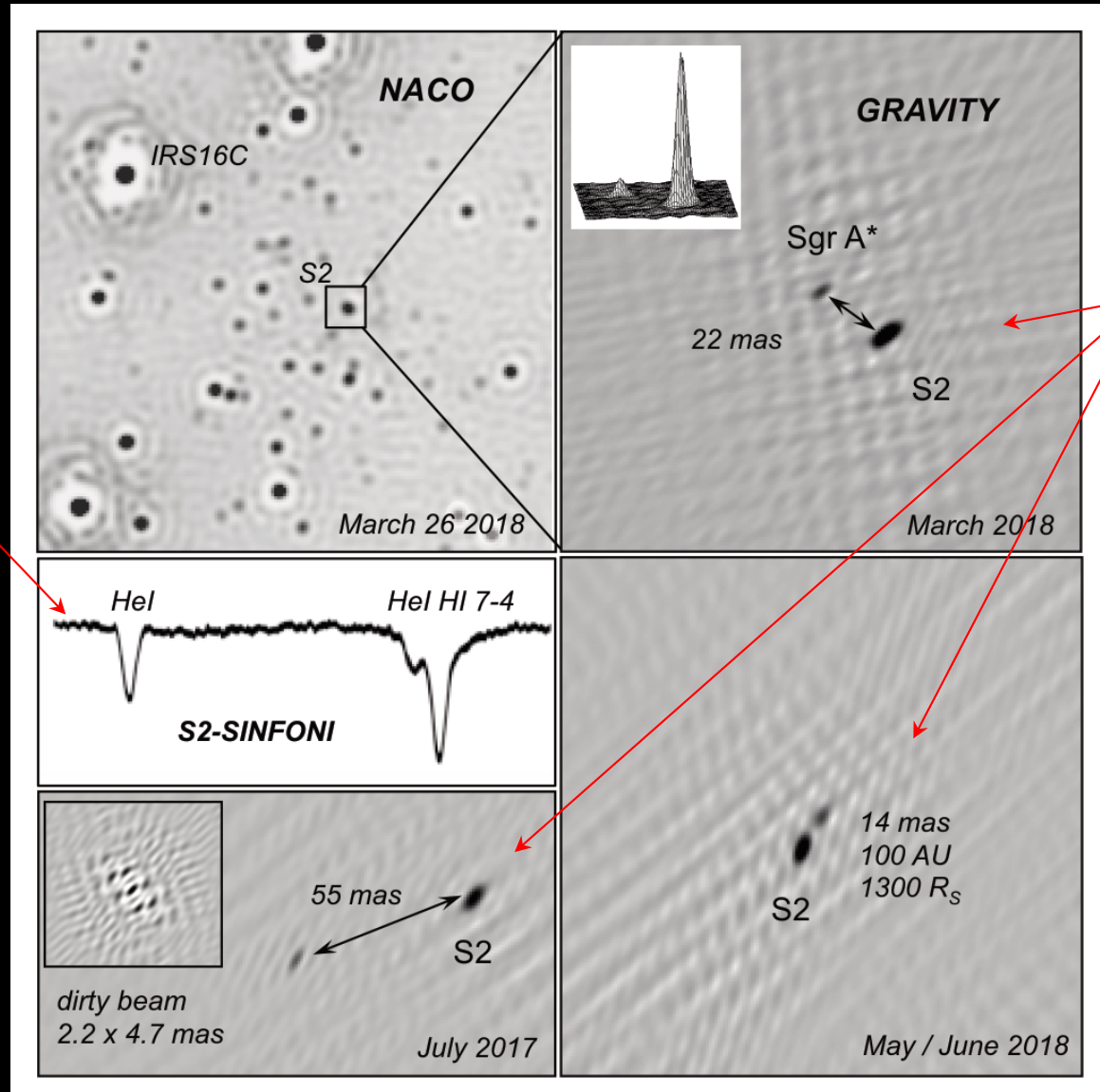
*(Affiliations can be found after the references)*

Received 26 June 2018 / Accepted 29 June 2018

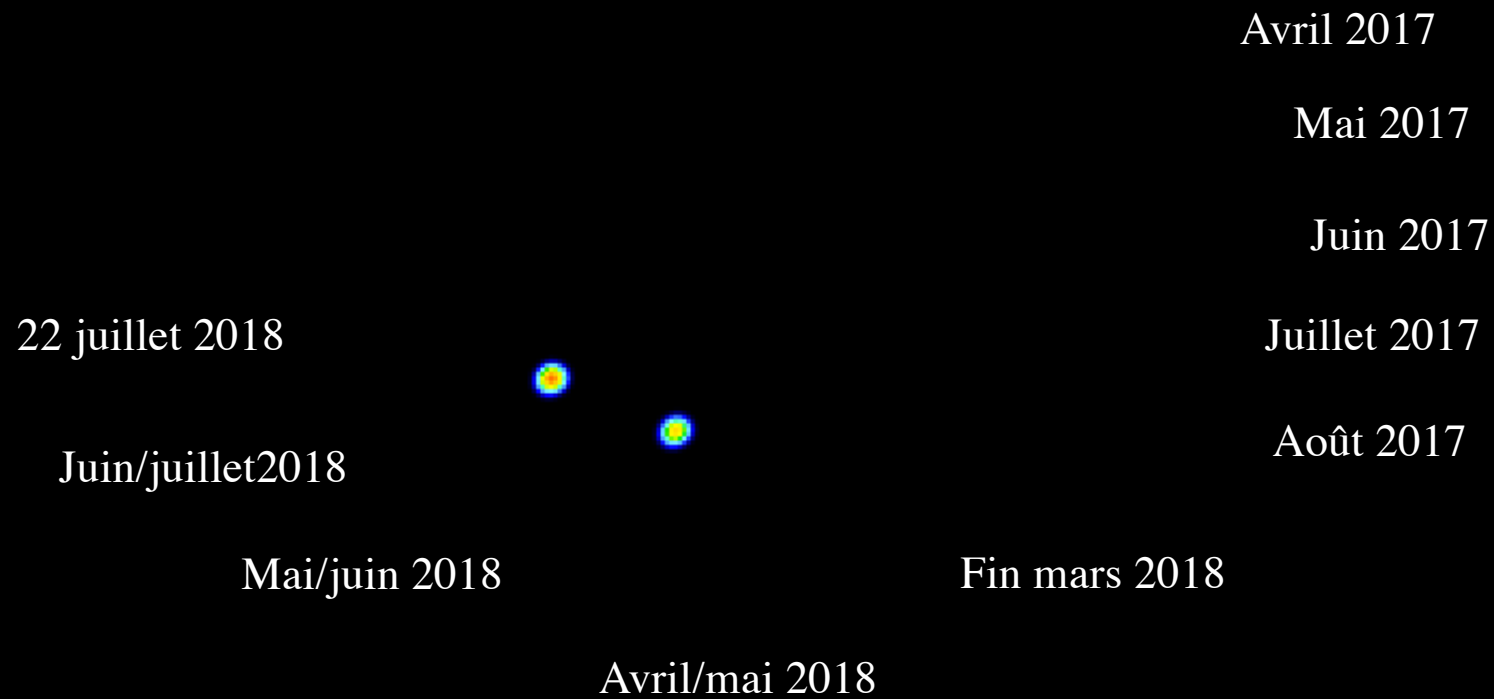
# Détection du rougissement gravitationnel avec S2

Mesures spectroscopiques (vitesses)

Imagerie et astrométrie relative à Sgr A\*



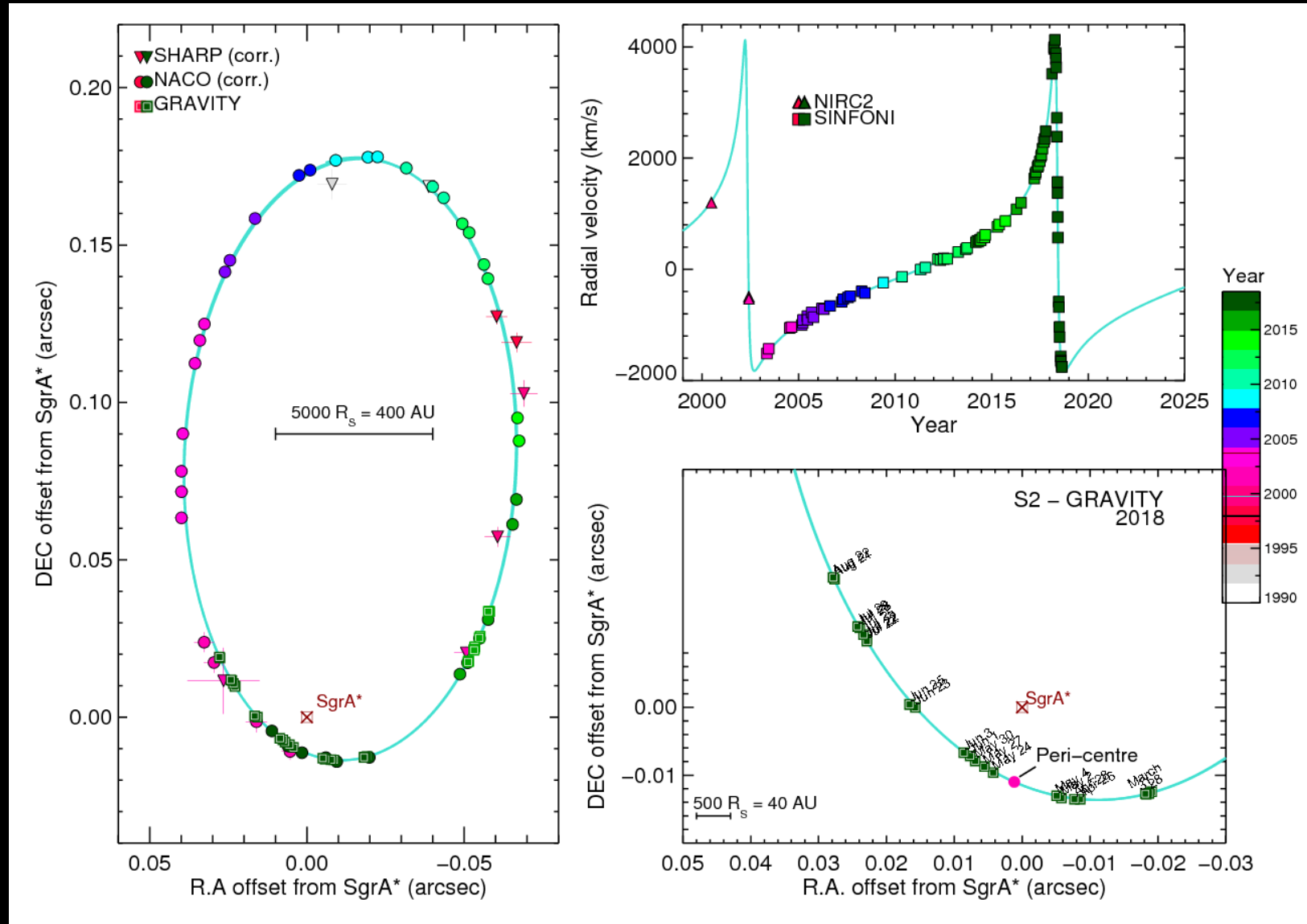
# Le suivi régulier de S2 en imagerie interférométrique



50 mas

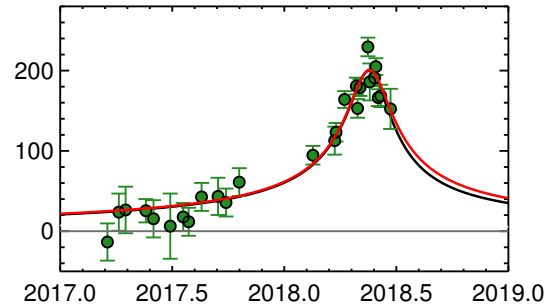
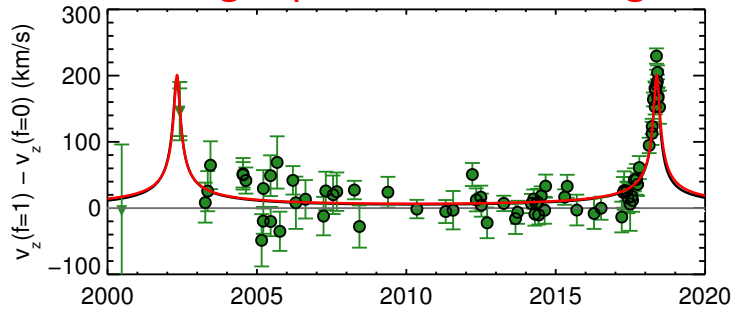


# Détection du rougissement gravitationnel avec S2

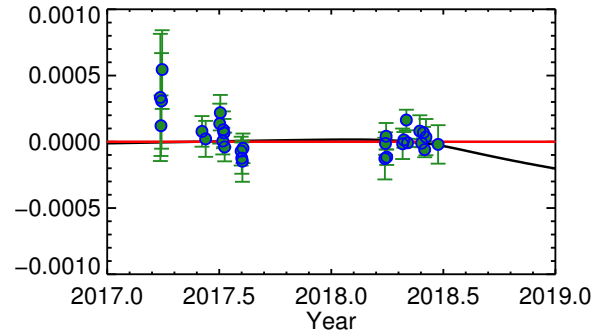
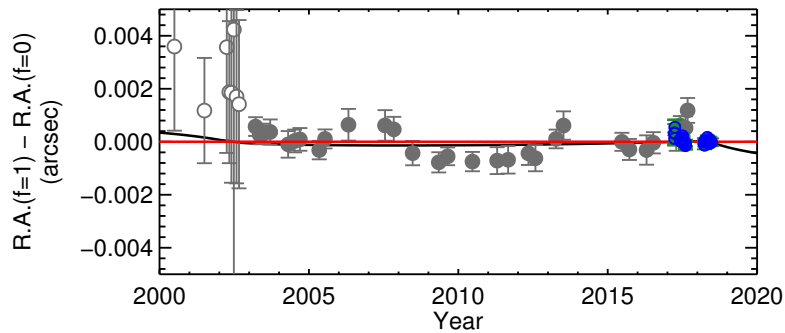
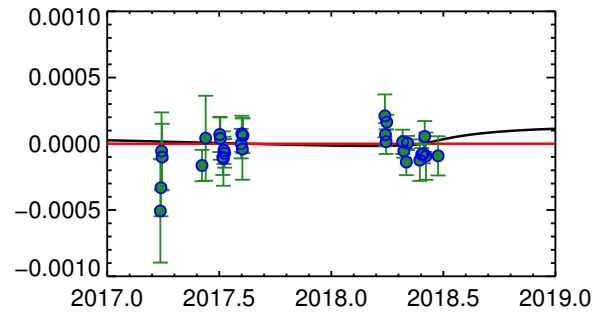
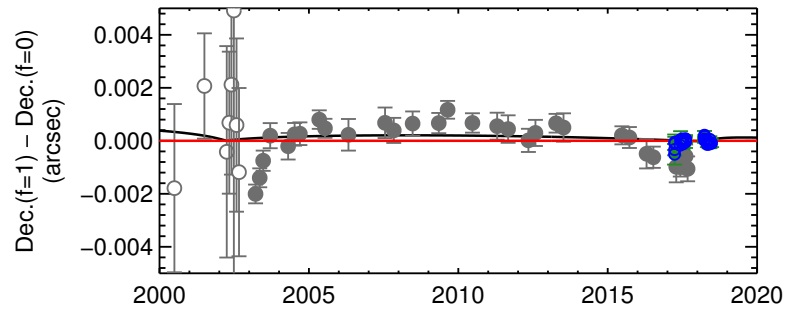


# Ajustement par une orbite relativiste

## Décalage spectral vers le rouge – vitesses radiales



## Astrométrie

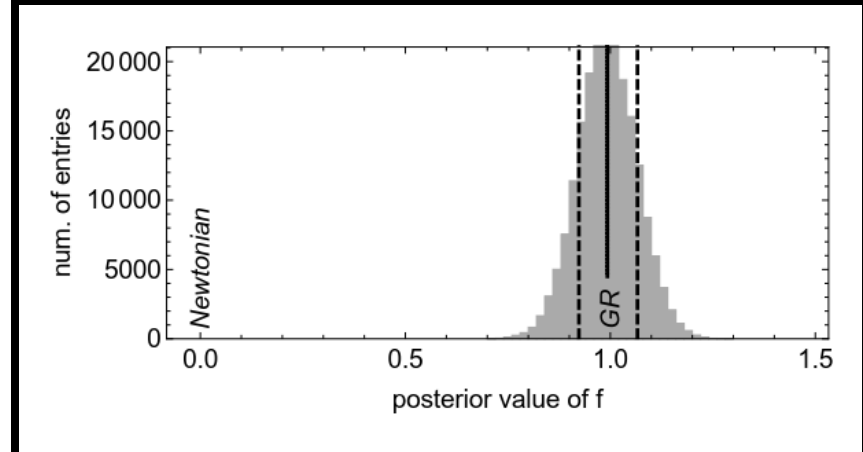
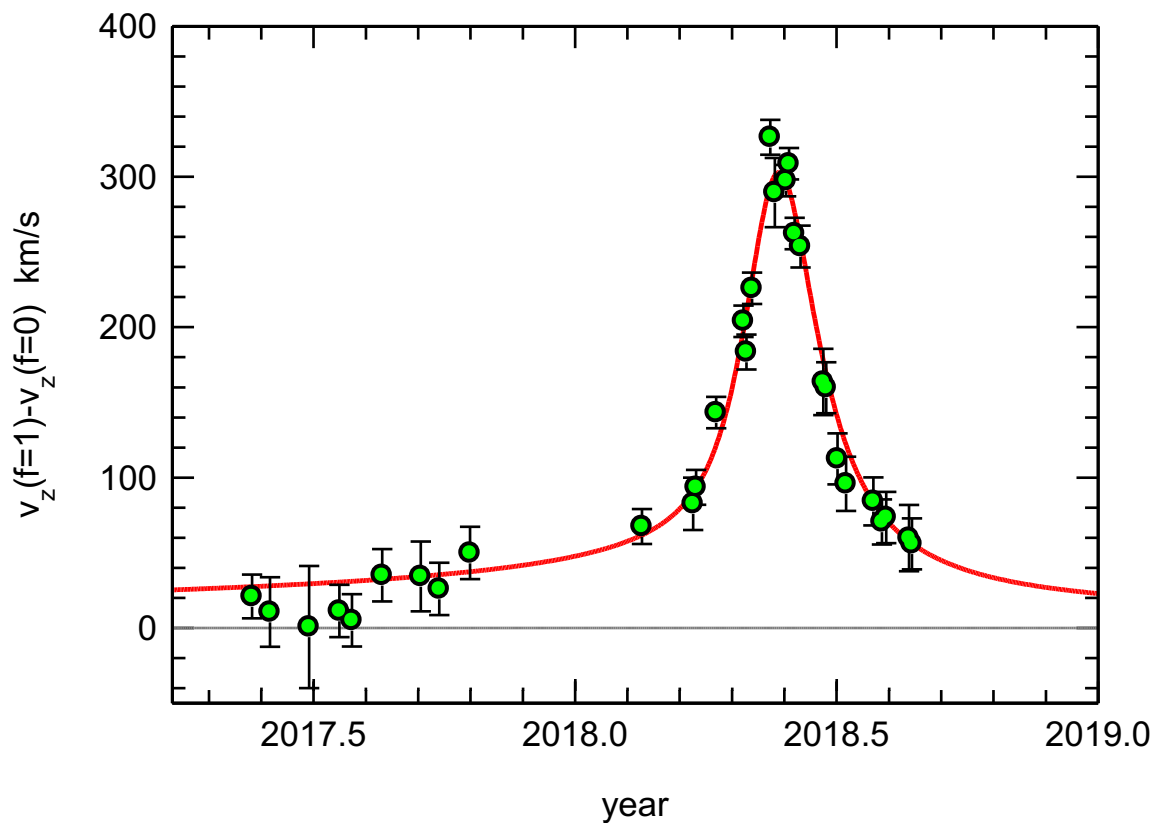


$f = 0$  : Newton

$f = 1$  : Einstein  
(approximation post-newtonienne)

Résultat GRAVITY :  
 $f = 0,94 \pm 0,09$

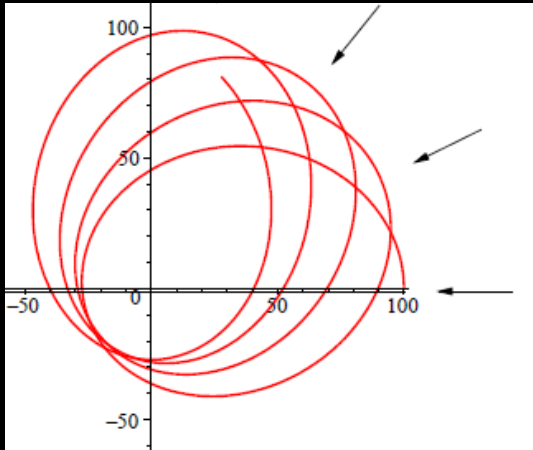
# Ajustement avec l'intégralité des données actuelles



Masse Sgr A\* :  $4,144 \pm 0,023 \times 10^6 M_{\text{sol}}$   
(précision de  $6 \times 10^{-3}$ )  
Distance Sgr A\* :  $8174 \pm 20$  pc  
(précision de  $2 \times 10^{-3}$ )

$f = 1,04 \pm 0,06$   
Newton exclu à  $16 \sigma$

# Mesure de la précession relativiste avec S2

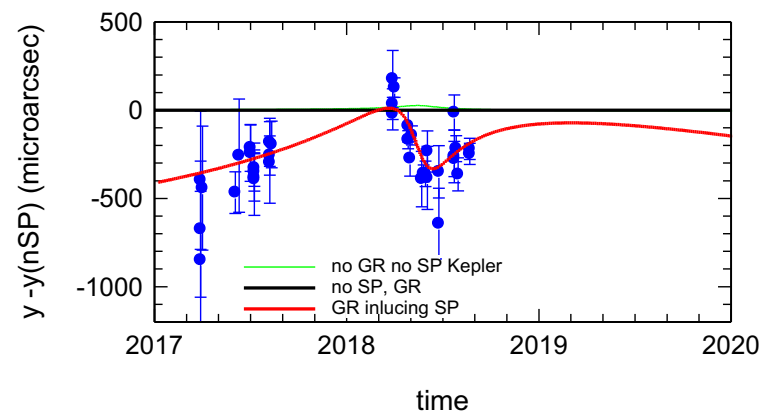
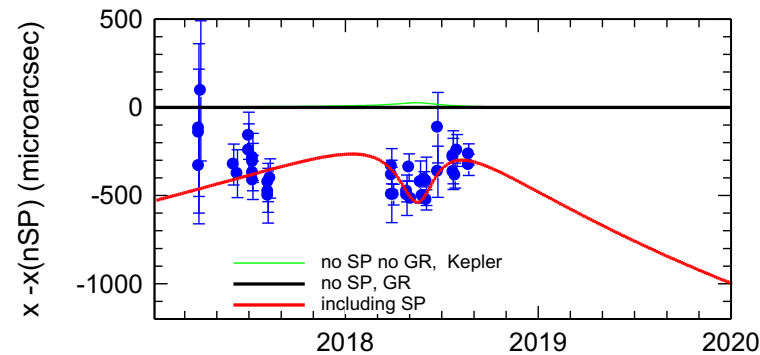


Jaroszynski 98

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

PPN(1)<sub>φ</sub> : Schwarzschild Precession

S2:11.9'



Avec les données actuelles :

$$f_{SP} = 1,3 \pm 0,8$$

Détection robuste à partir de 2019

# Détection de mouvements orbitaux près de la dernière orbite circulaire stable de Sgr A\*

A&A 618, L10 (2018)

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834294>

© ESO 2018

**Astronomy  
&  
Astrophysics**

LETTER TO THE EDITOR

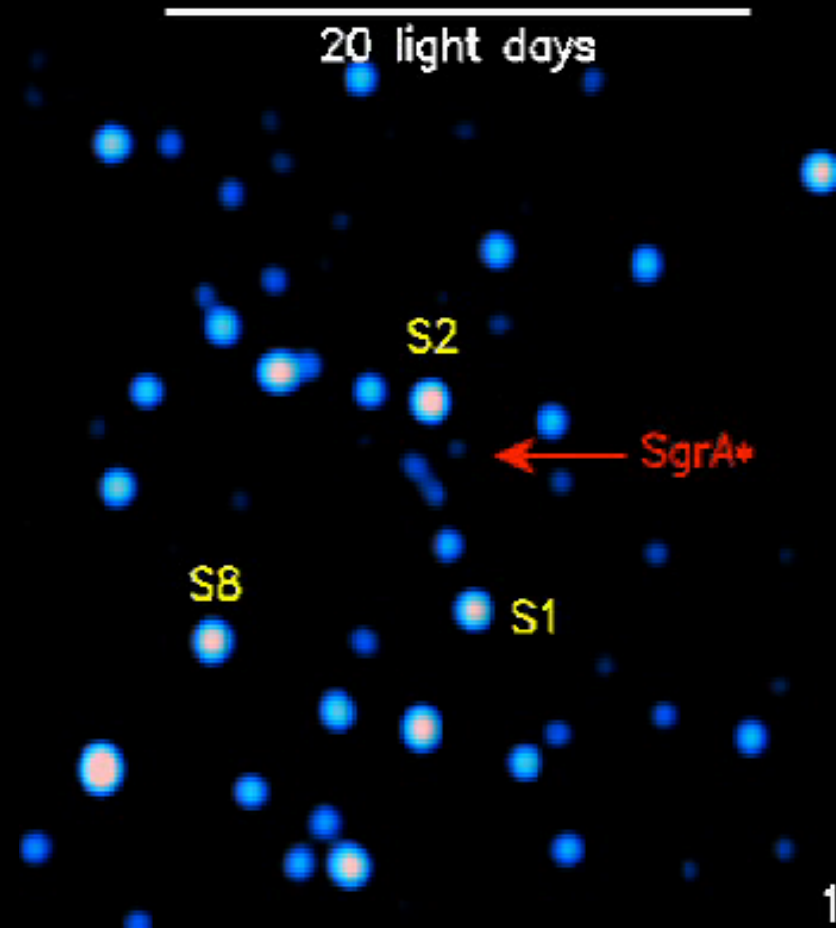
## Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole SgrA\*★

GRAVITY Collaboration★★: R. Abuter<sup>8</sup>, A. Amorim<sup>6,14</sup>, M. Bauböck<sup>1</sup>, J. P. Berger<sup>5</sup>, H. Bonnet<sup>8</sup>, W. Brandner<sup>3</sup>, Y. Clénet<sup>2</sup>, V. Coudé du Foresto<sup>2</sup>, P. T. de Zeeuw<sup>10,1</sup>, C. Deen<sup>1</sup>, J. Dexter<sup>1,★★★</sup>, G. Duvert<sup>5</sup>, A. Eckart<sup>4,13</sup>, F. Eisenhauer<sup>1</sup>, N. M. Förster Schreiber<sup>1</sup>, P. Garcia<sup>7,9,14</sup>, F. Gao<sup>1</sup>, E. Gendron<sup>2</sup>, R. Genzel<sup>1,11</sup>, S. Gillessen<sup>1</sup>, P. Guajardo<sup>9</sup>, M. Habibi<sup>1</sup>, X. Haubois<sup>9</sup>, Th. Henning<sup>3</sup>, S. Hippler<sup>3</sup>, M. Horrobin<sup>4</sup>, A. Huber<sup>3</sup>, A. Jiménez-Rosales<sup>1</sup>, L. Jocou<sup>5</sup>, P. Kervella<sup>2</sup>, S. Lacour<sup>2,1</sup>, V. Lapeyrère<sup>2</sup>, B. Lazareff<sup>5</sup>, J.-B. Le Bouquin<sup>5</sup>, P. Léna<sup>2</sup>, M. Lippa<sup>1</sup>, T. Ott<sup>1</sup>, J. Panduro<sup>3</sup>, T. Paumard<sup>2,★★★</sup>, K. Perraut<sup>5</sup>, G. Perrin<sup>2</sup>, O. Pfuhl<sup>1,★★★</sup>, P. M. Plewa<sup>1</sup>, S. Rabien<sup>1</sup>, G. Rodríguez-Coira<sup>2</sup>, G. Rousset<sup>2</sup>, A. Sternberg<sup>12,15</sup>, O. Straub<sup>2</sup>, C. Straubmeier<sup>4</sup>, E. Sturm<sup>1</sup>, L. J. Tacconi<sup>1</sup>, F. Vincent<sup>2</sup>, S. von Fellenberg<sup>1</sup>, I. Waisberg<sup>1</sup>, F. Widmann<sup>1</sup>, E. Wieprecht<sup>1</sup>, E. Wiezorrek<sup>1</sup>, J. Woillez<sup>8</sup>, and S. Yazici<sup>1,4</sup>

*(Affiliations can be found after the references)*

Received 21 September 2018 / Accepted 5 October 2018

# Les sursauts au Centre Galactique

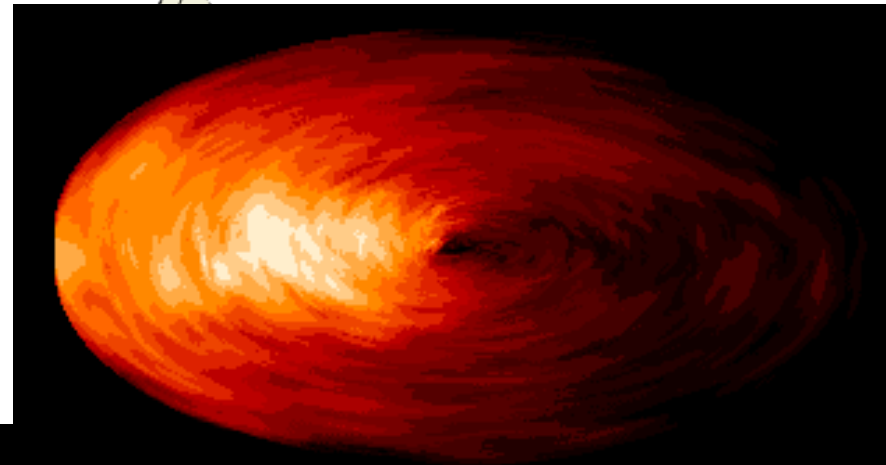
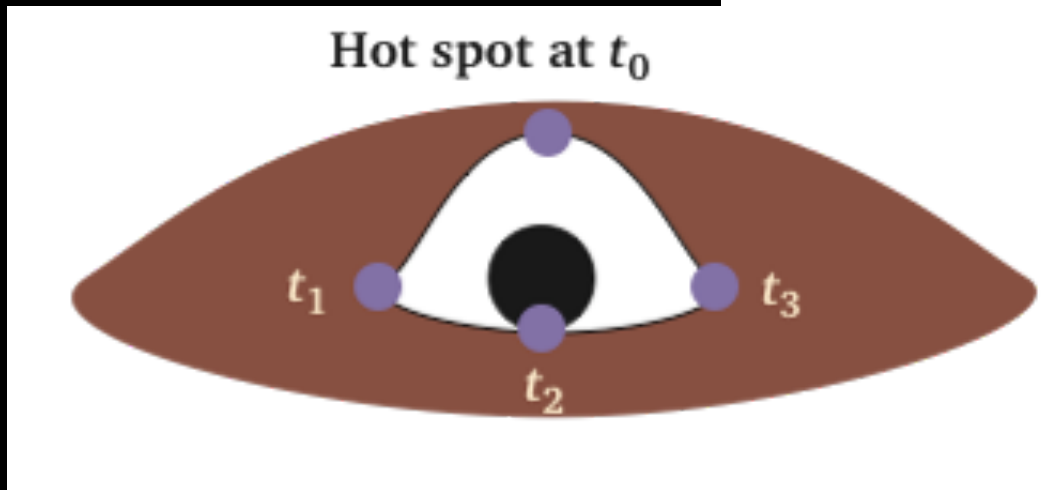
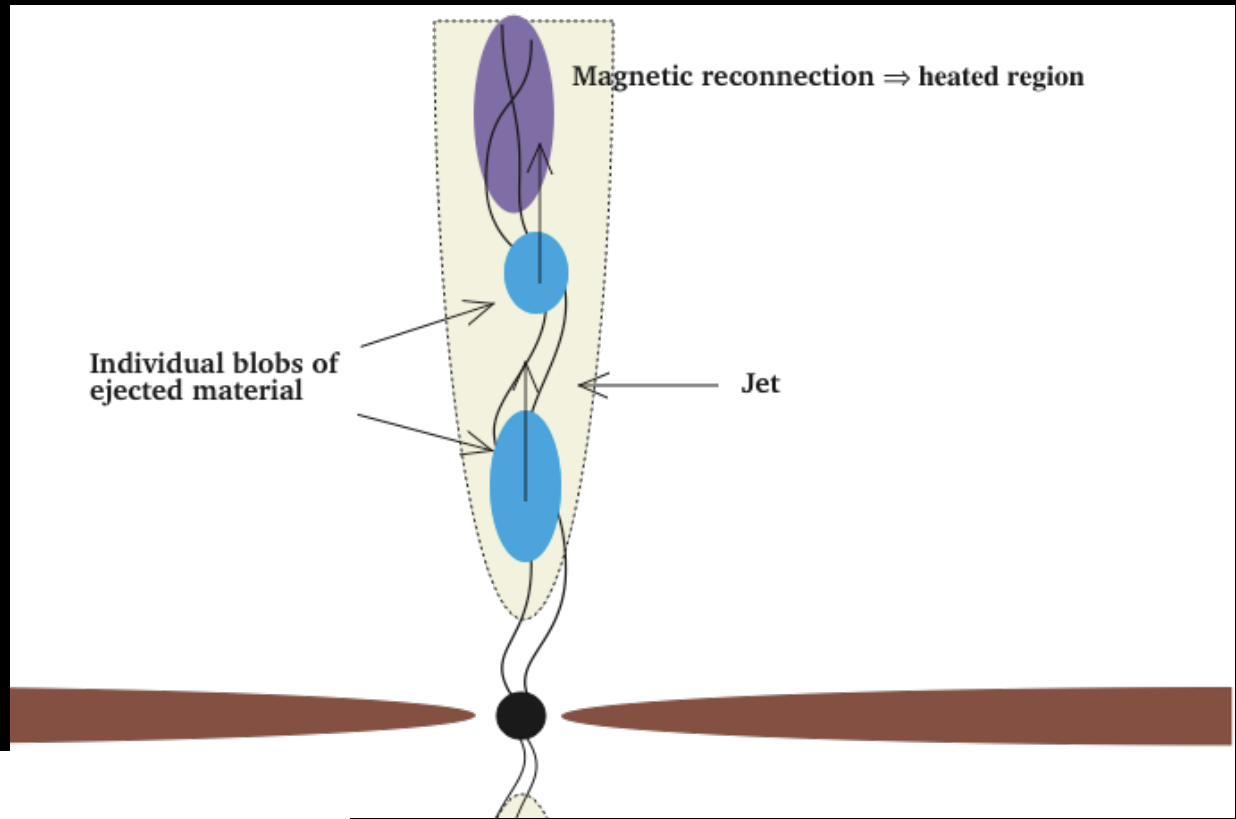


# Les sursauts au Centre Galactique

Trois exemples de scenarios :

- reconnexion magnétique dans les jets
- points chauds sur la dernière orbite circulaire stable
- fluctuations statistiques

Échelle caractéristique :  
quelques  $10 \mu\text{as}$

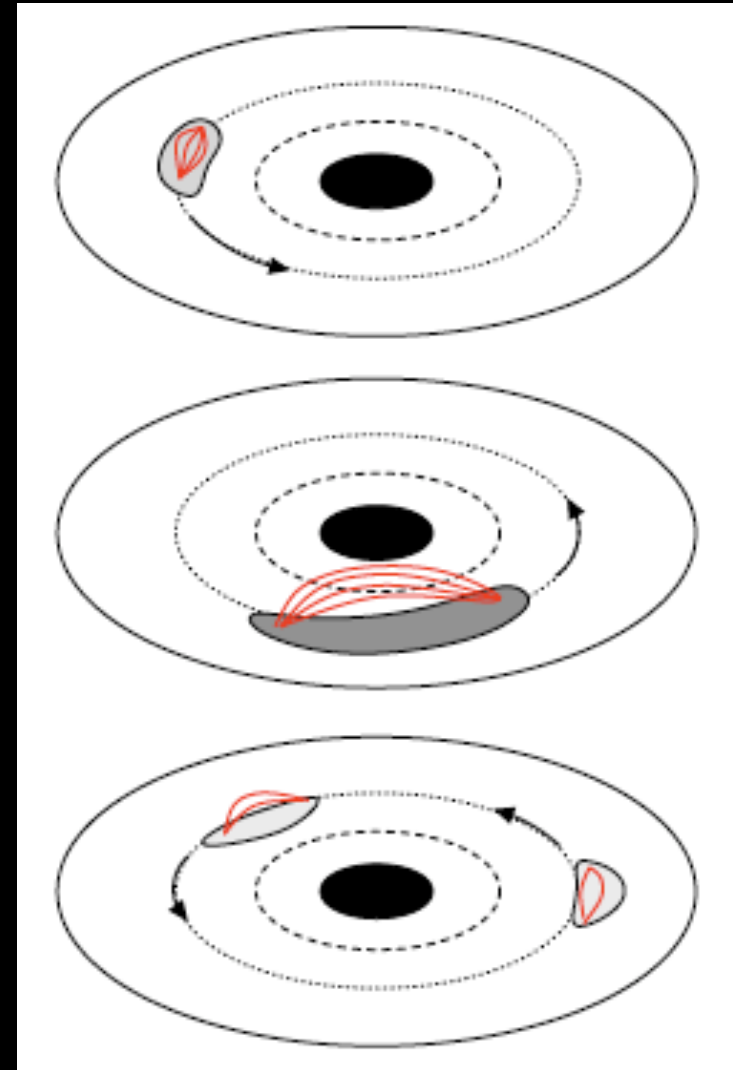


# Utilisation des sursauts pour tester la relativité générale

**Sursaut lumineux** : matière chauffée sur une (la dernière) orbite circulaire (stable)

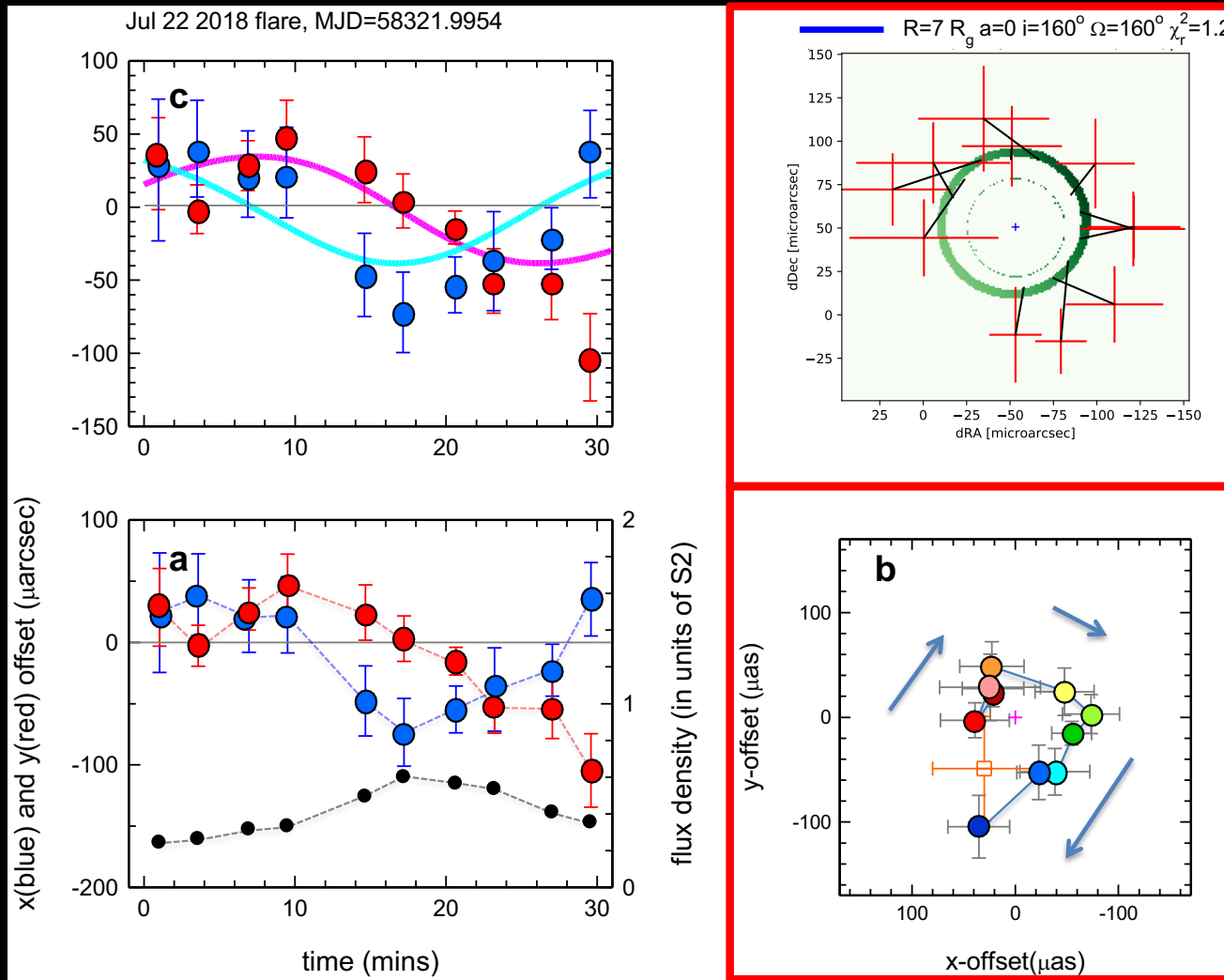
**Période du sursaut** : période de l'orbite (20-40 minutes)

Le *point chaud* joue le rôle de particule test et permet l'étude de l'espace-temps autour de Sgr A\*





# Détection de mouvements orbitaux près de la dernière orbite circulaire stable de Sgr A\*

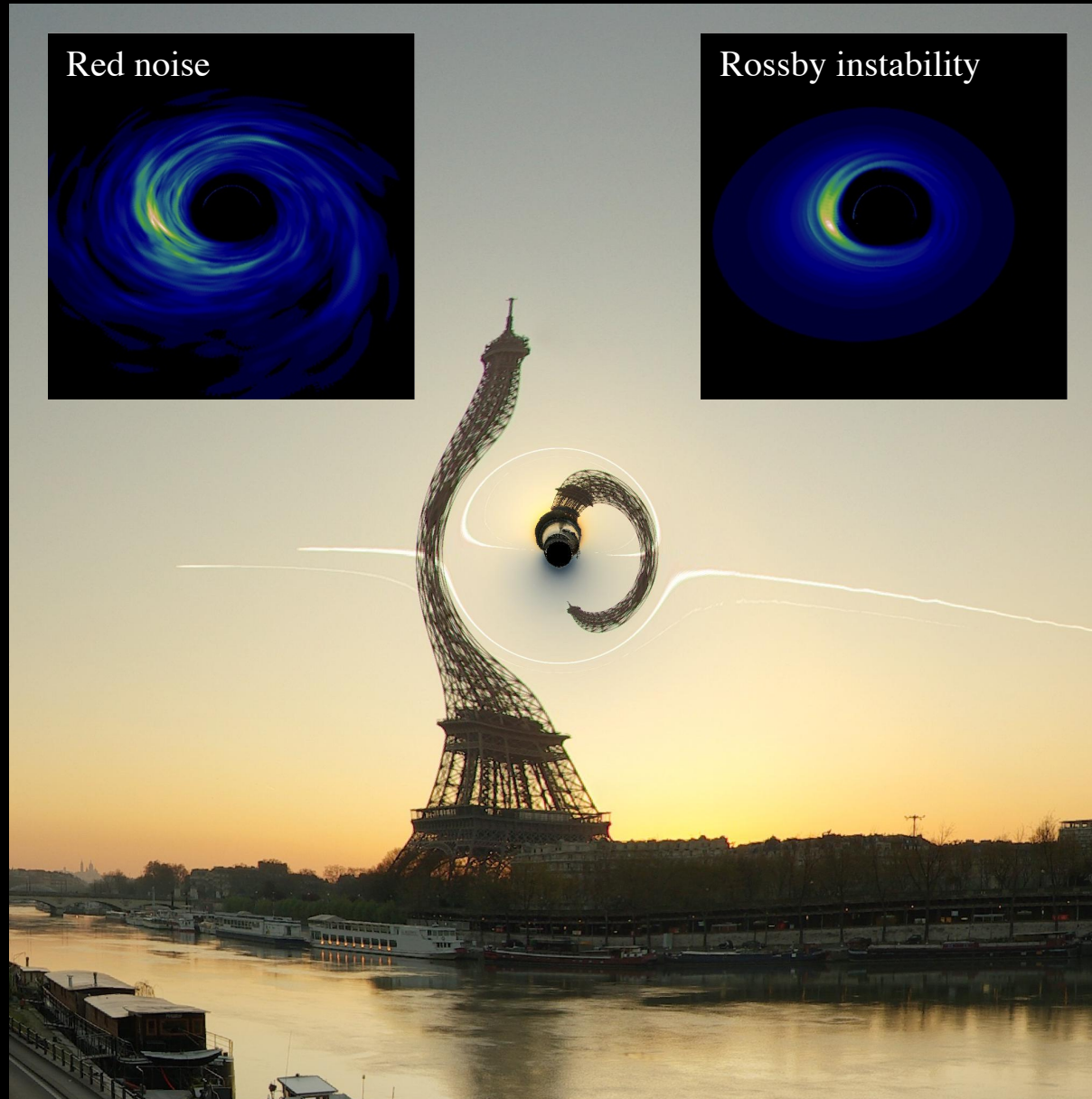


3 sursauts observés les 27 mai, 22 et 28 juillet 2018

Ajustement par un modèle relativiste de sursaut (GYOTO, Vincent et al. 2011)

Cas Schwarzschild ( $a=0$ ):  
 $R = 7,3 \pm 0,5 R_s$   
 $P = 40 \pm 8 \text{ min}$   
 $\Rightarrow v_{\text{orb}} \sim 0,3 c$

# Relativistic ray tracing code GYOTO

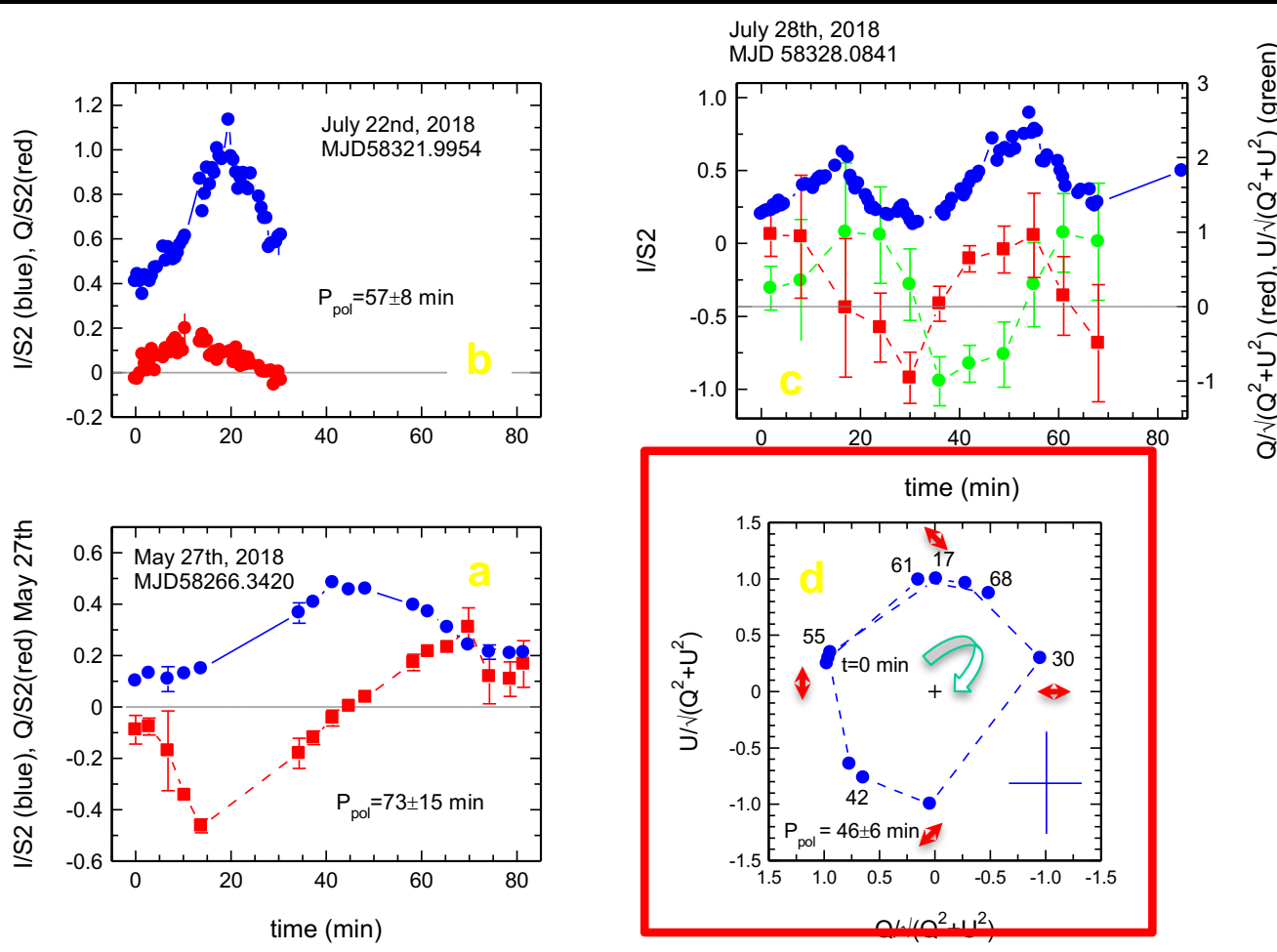


Red noise

Rossby instability

1 Earth mass black hole  
in the direction of the  
Eiffel Tower

# Boucles de polarisation



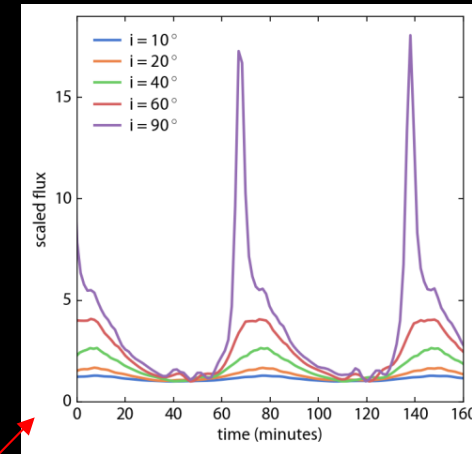
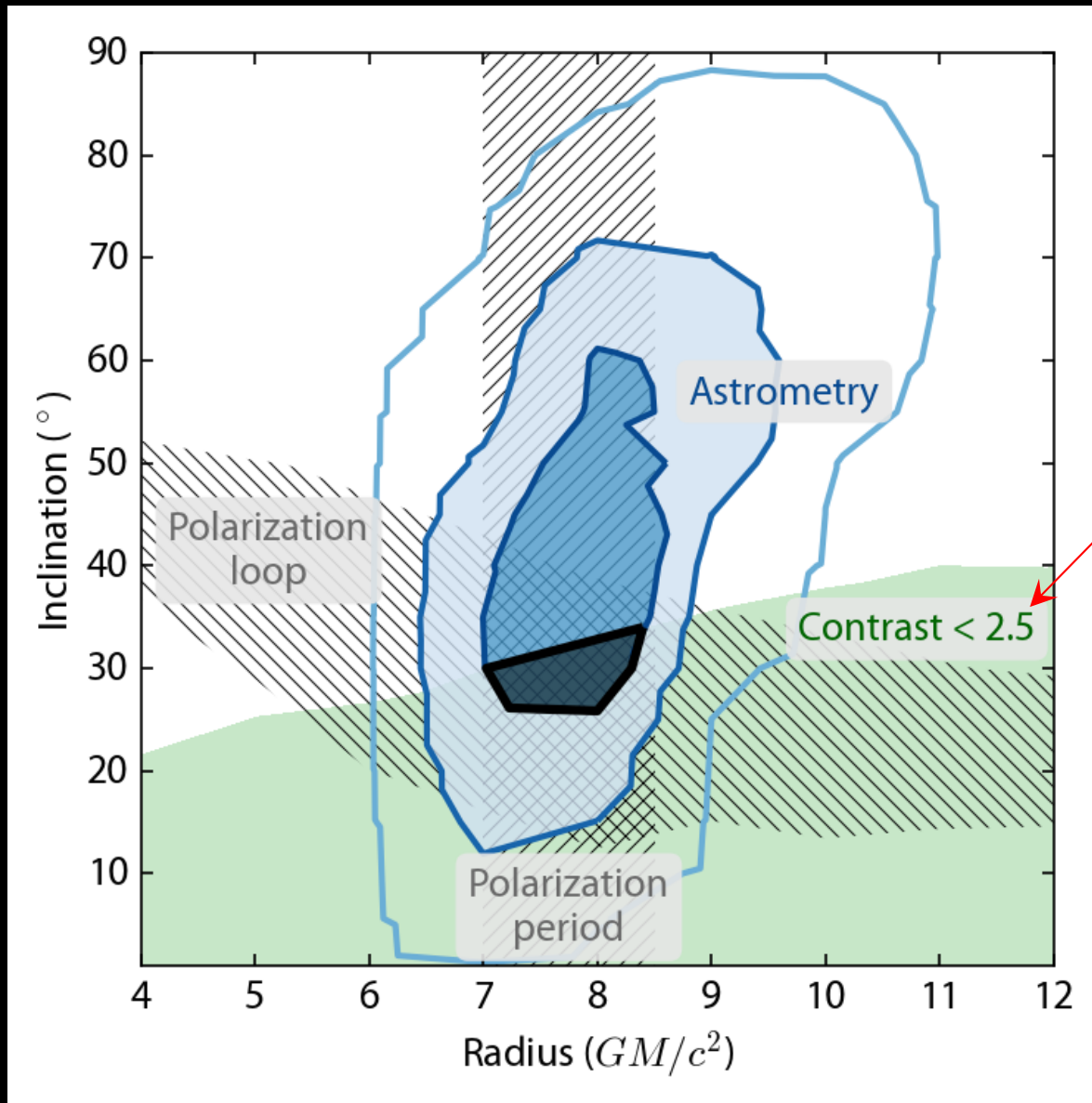
Champ magnétique perpendiculaire au plan de l'orbite.

Sgr A\* a pour effet de rajouter une composante azimuthale à la polarisation qui tourne avec le point chaud.

Sursaut du 28 juillet 2018  
 $P_{\text{pol}} = 48 \pm 6$  min

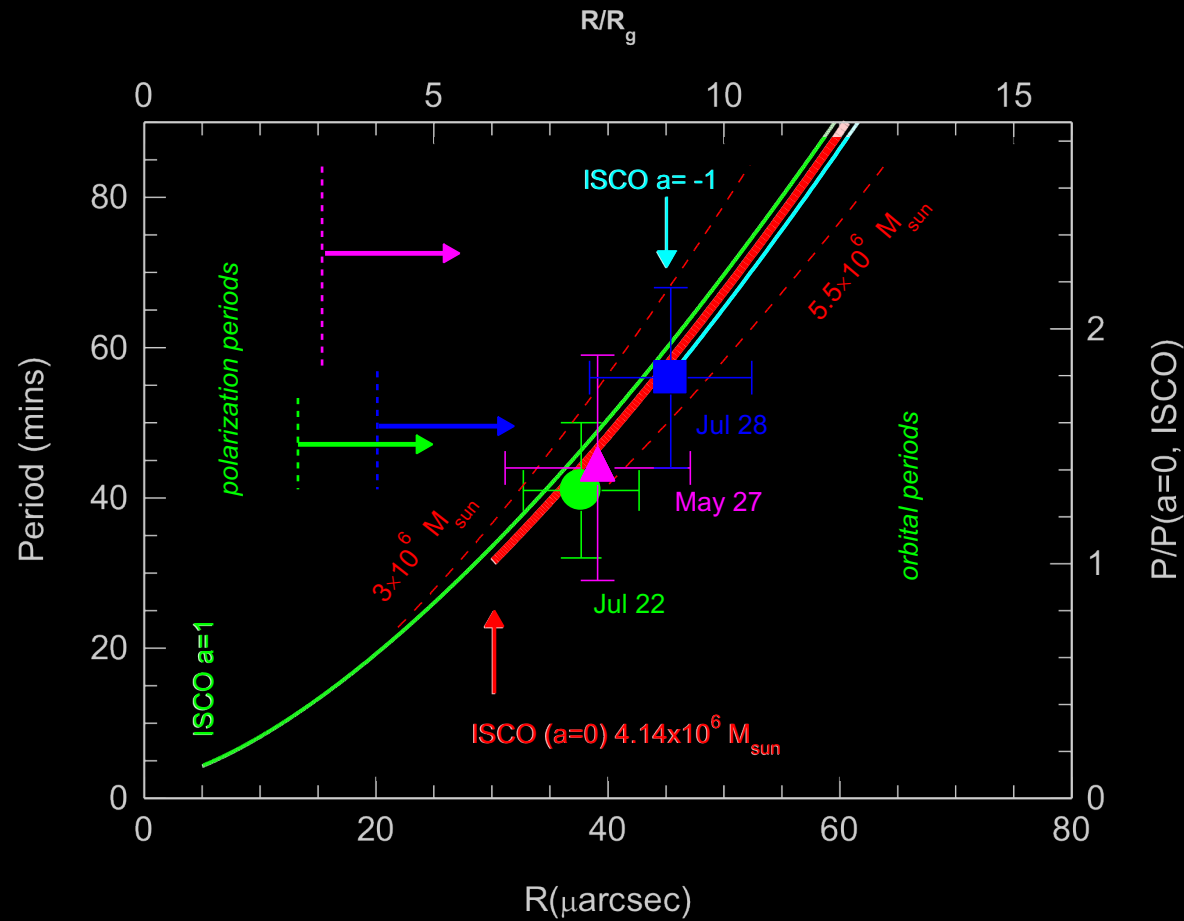
Compatible avec une inclinaison faible ( $15-30^\circ$ ) et un rayon de  $7-8 R_g$ .

# Contraintes sur l'inclinaison et le rayon de l'orbite

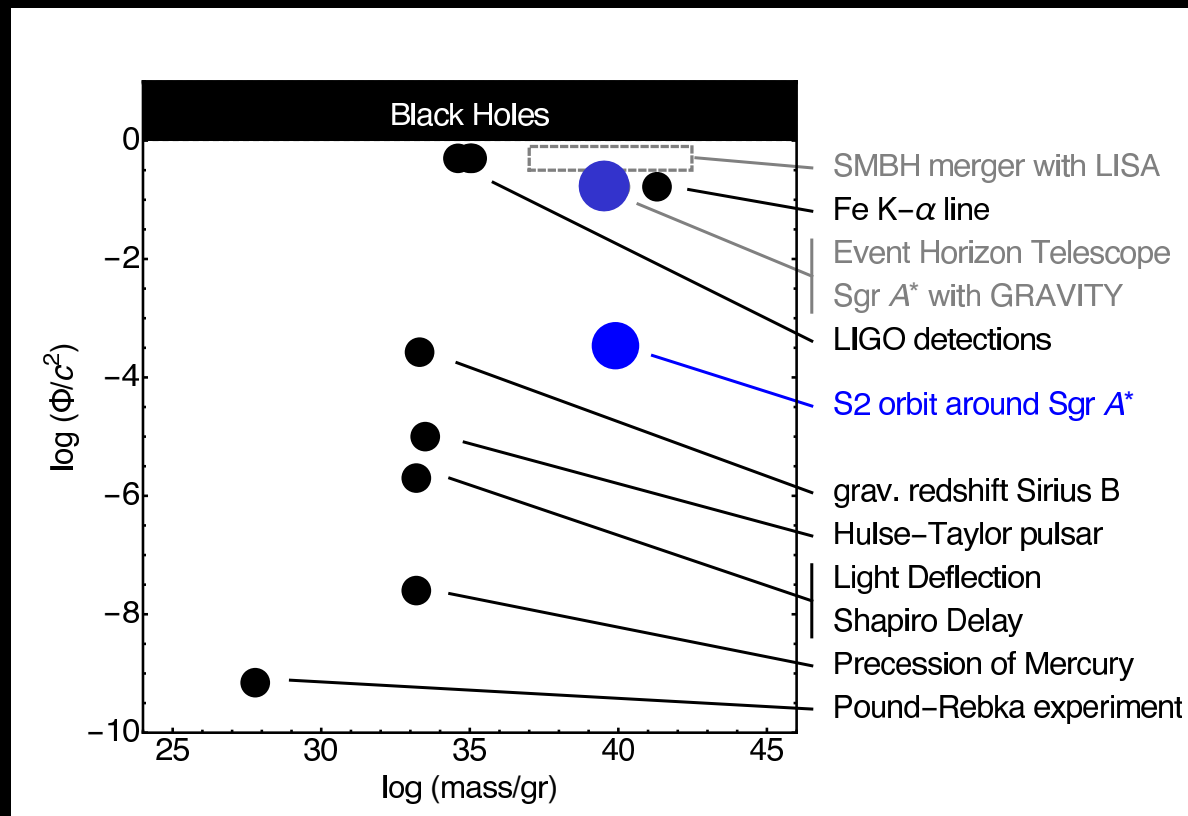


$R = 7,6 \pm 0,5 R_g$  et inclinaison  $i \leq 30^{\circ}$

# Les mouvements orbitaux près de l'horizon sont totalement compatibles avec l'hypothèse d'un trou noir de 4 millions de masses solaires



# Contributions GRAVITY dans le schéma global des tests relativistes



Et ensuite ?

# Orbites d'étoiles proches

Imagerie des 100 mas centrales en une nuit : besoin de 4 UT et de  $\sim 100$  m de base

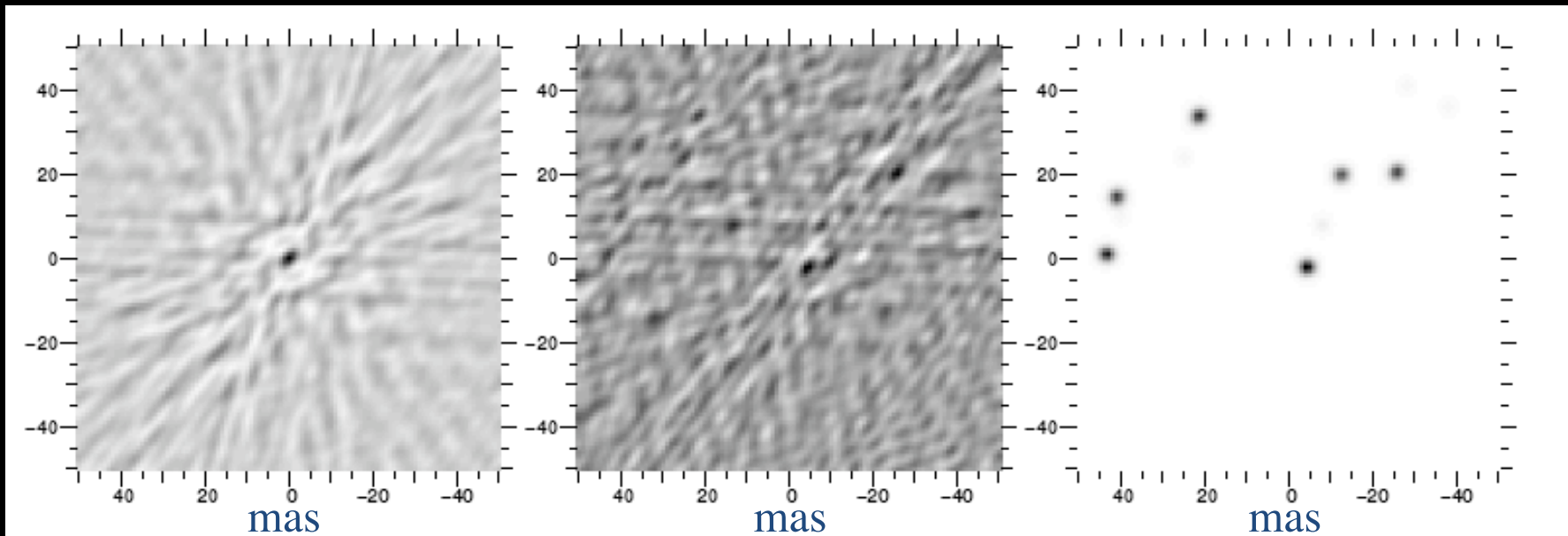


Image d'étoile de  
référence  
(dirty beam)

Image d'un champ de 6 étoiles  
(dirty image)

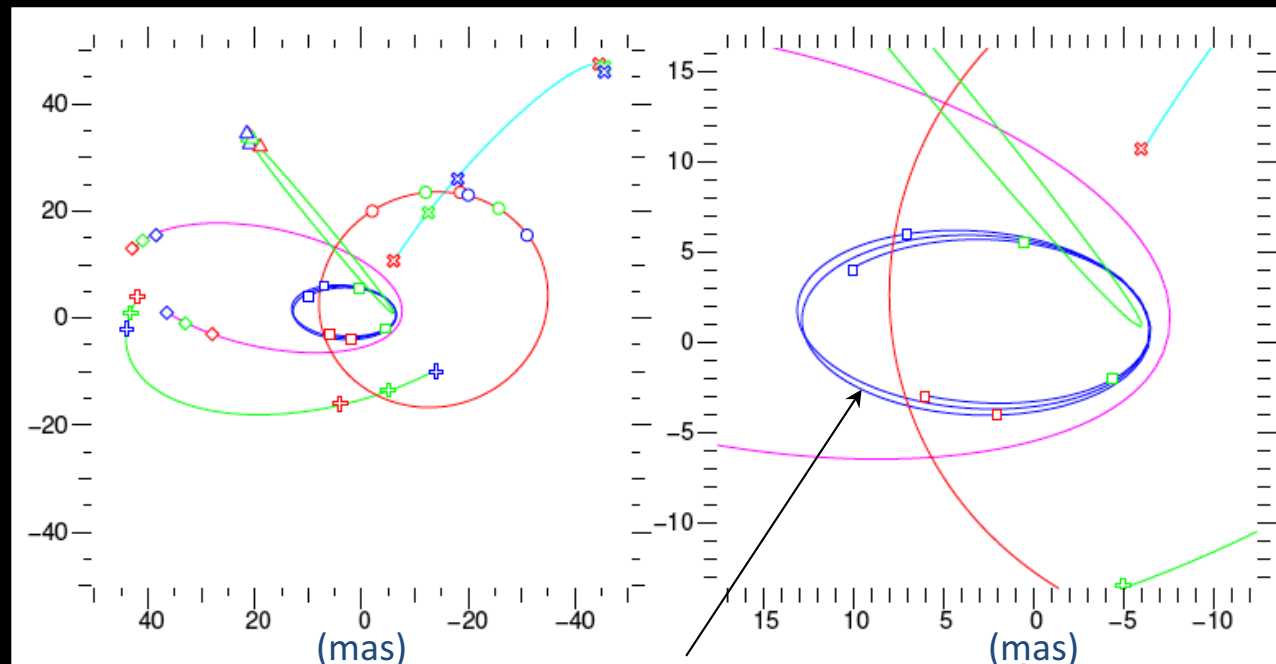
Après déconvolution



# Orbites d'étoiles proches

Imagerie des 100 mas centrales en une nuit : besoin de 4 UT et de  $\sim 100$  m de base

Après 15 mois d'observation

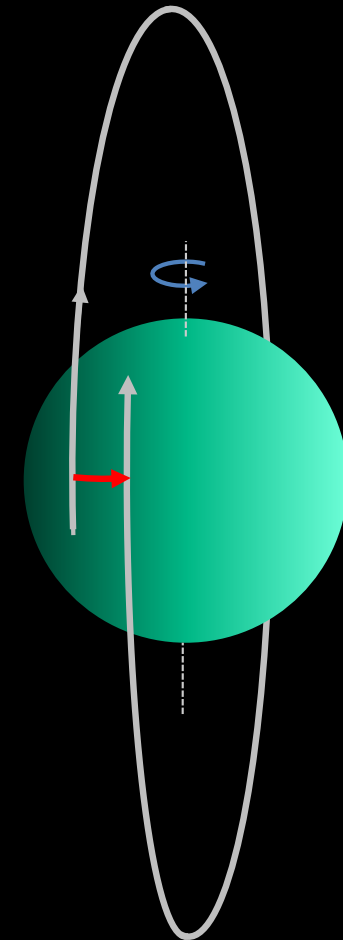
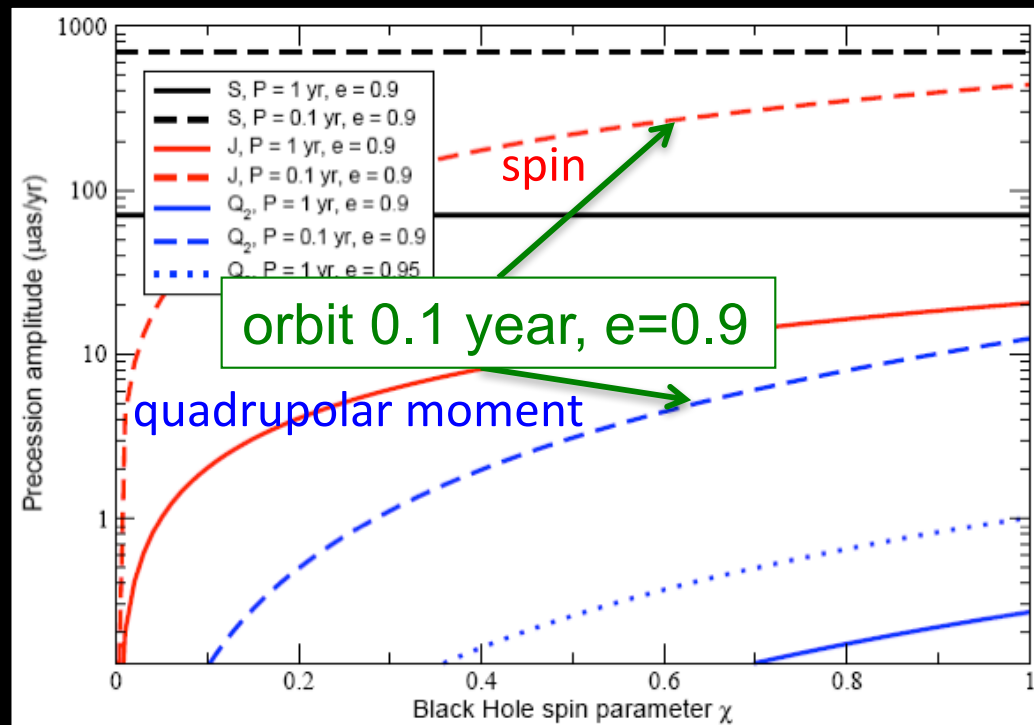


Système des étoiles S ramené à 100 mas

Précession relativiste dans la métrique de Schwarzschild  
Mesure du spin dans la métrique de Kerr  
Mesure du moment quadrupolaire ?

# Lense-Thirring effects and precession of the quadrupolar moment

Precession of the orbital plane (precession of the angular momentum vector around the BH spin vector)



No-hair theorem of Wheeler: only 3 parameters describe a black hole: mass  $M$ , spin  $J$ , electric charge

Quadrupolar moment:  $Q_2 = -J^2 / M$

The measurement of precession due to frame dragging in a few years with orbits of size 0,2 - 1 mpc (5 - 25 mas)

# Exploration de la dernière orbite circulaire stable

$10 \mu\text{as} = 1 R_s$

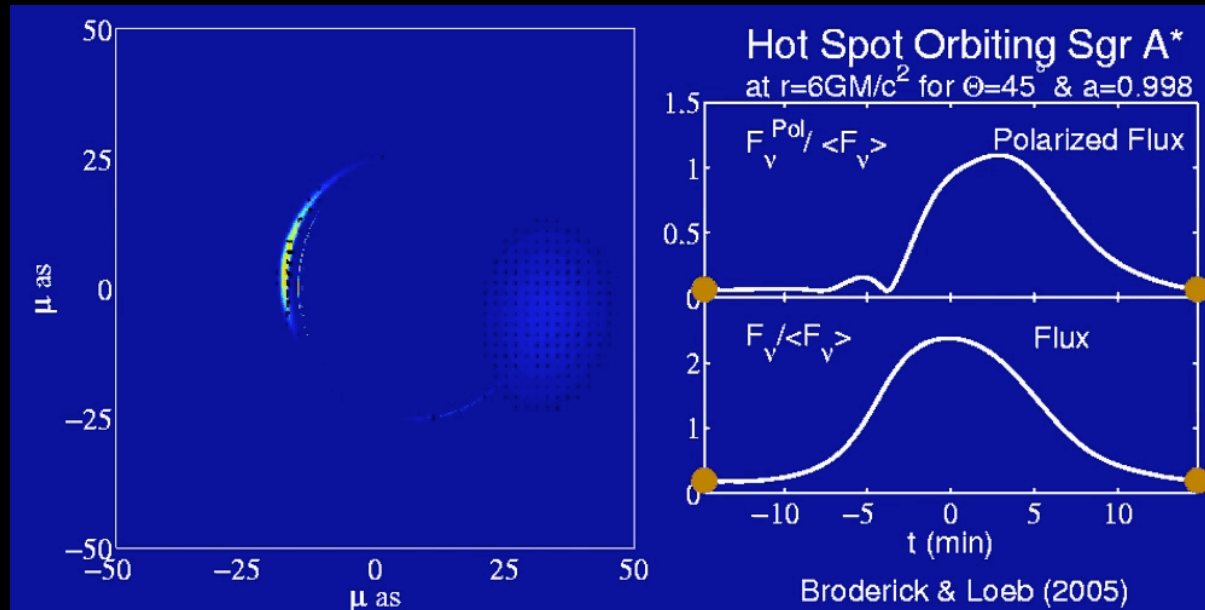
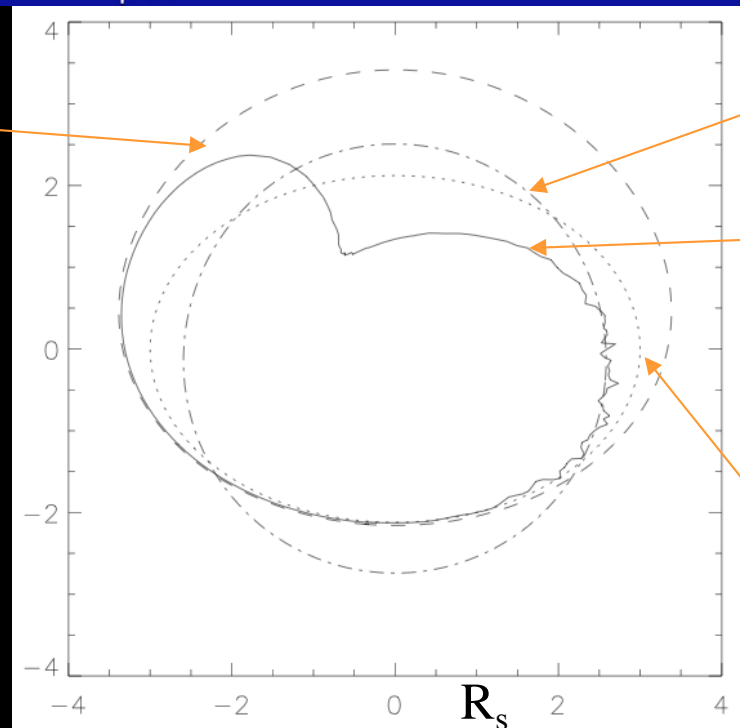


Image primaire

Image secondaire

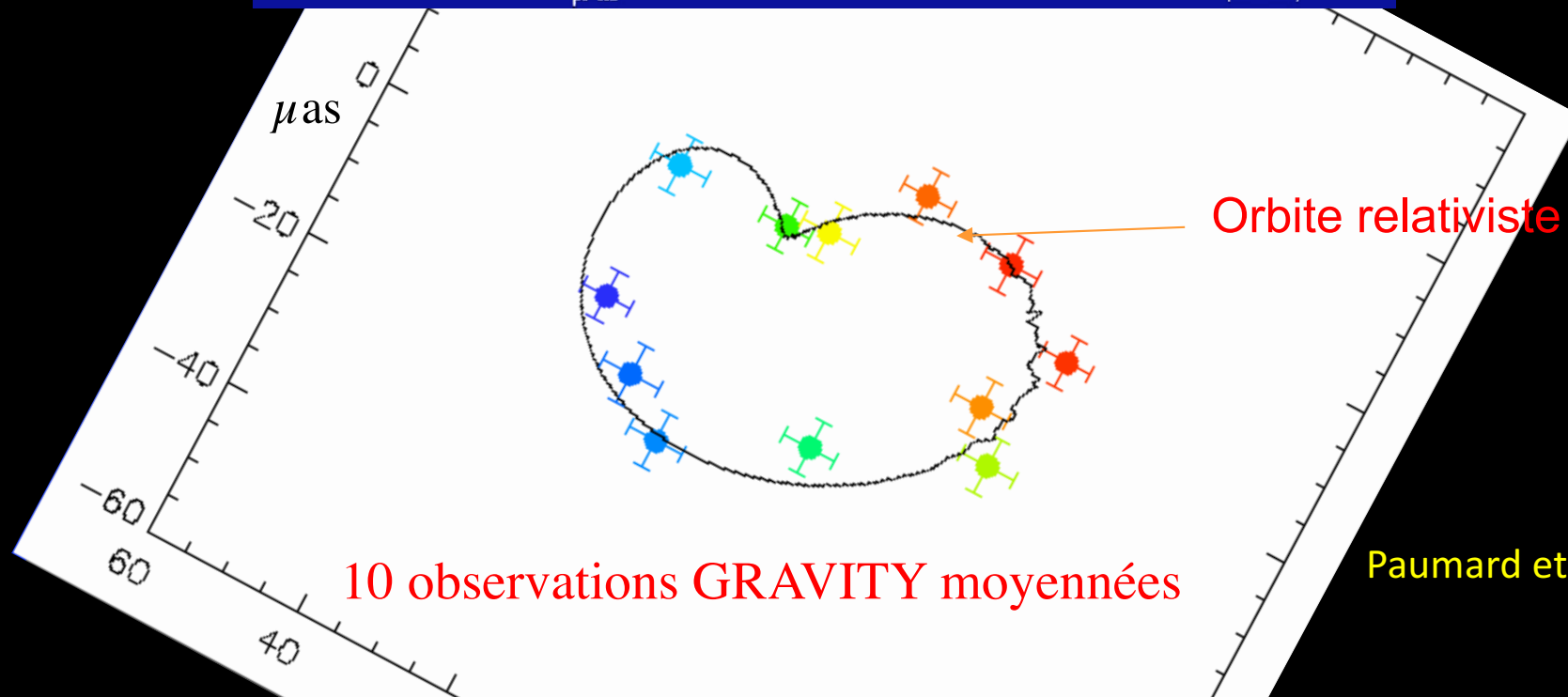
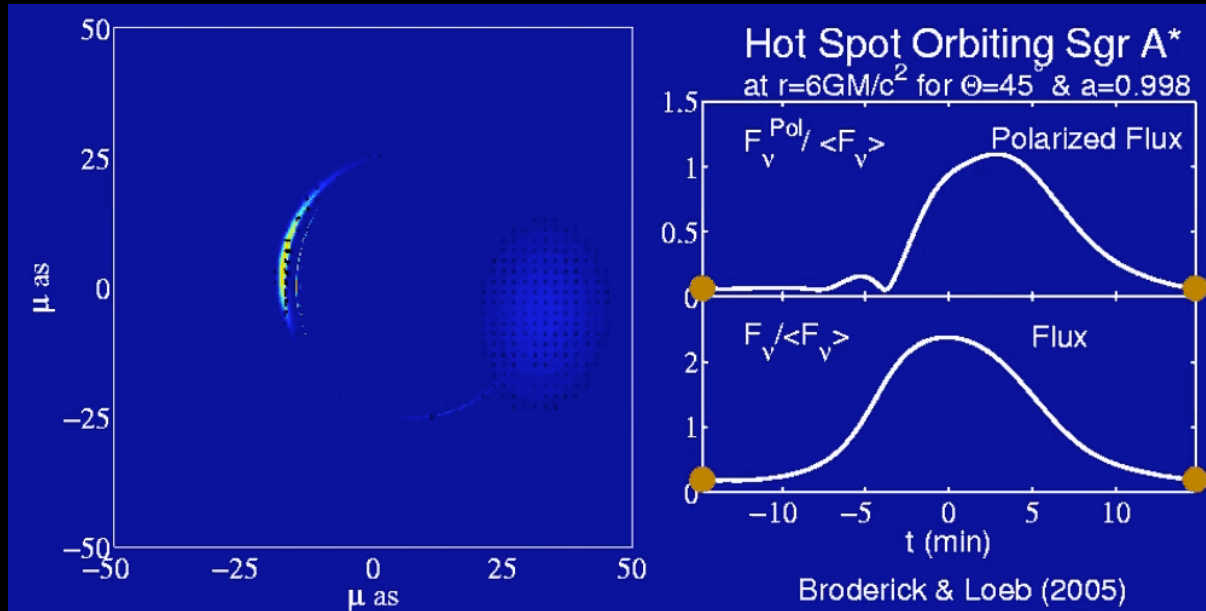
Orbite relativiste

Orbite newtonienne  
inclinée à  $45^\circ$

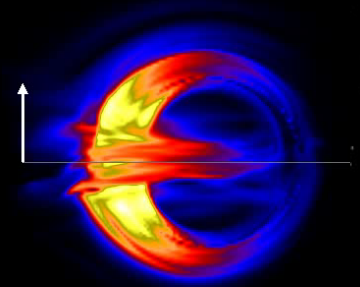
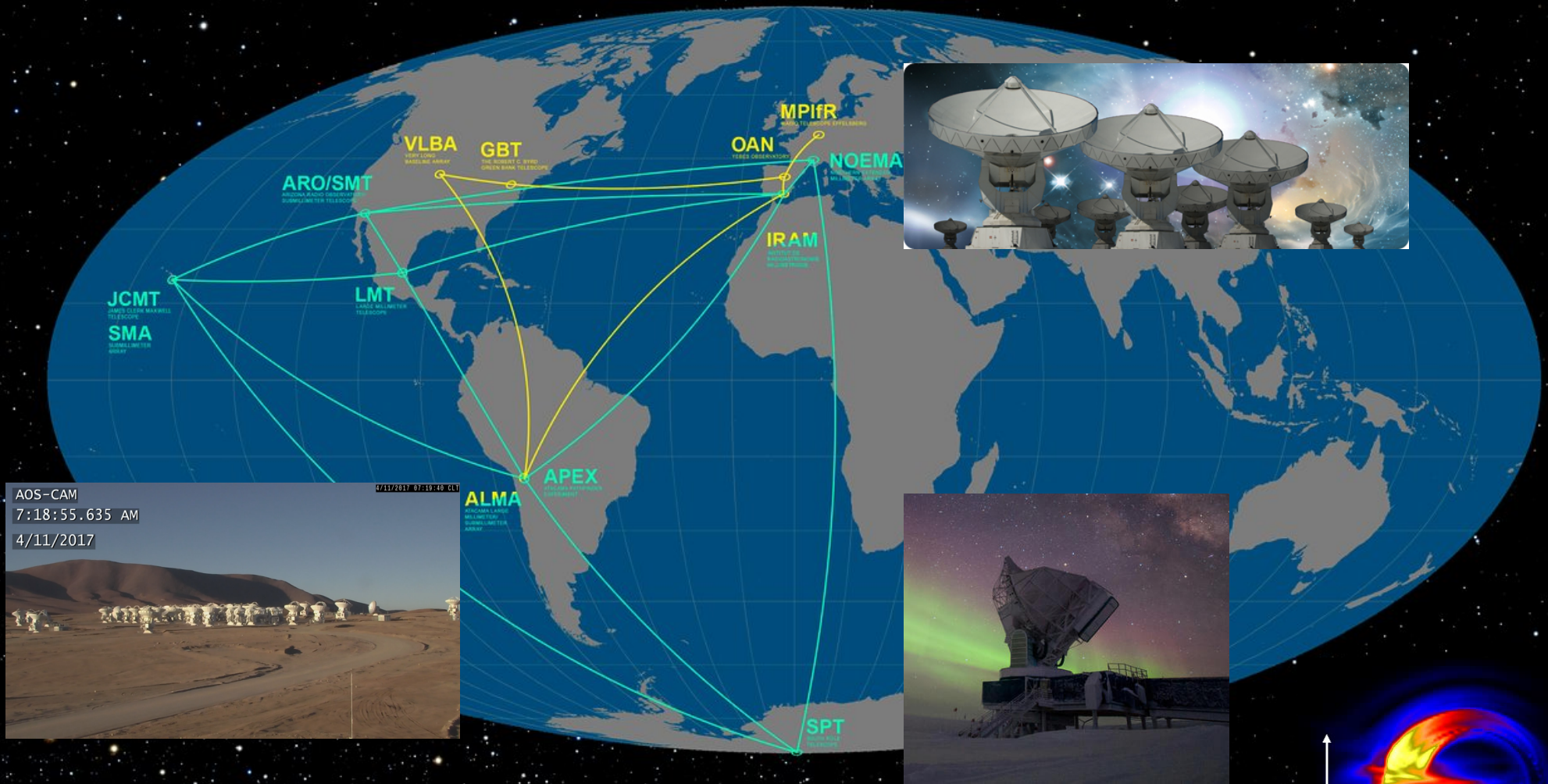


# Exploration de la dernière orbite circulaire stable

$10 \mu\text{as} = 1 R_s$



# Event Horizon Telescope



Premières observations en avril 2017  
... en attente des résultats officiels ...

Merci de votre attention !

Et merci à Thibaut Paumard, Frédéric Vincent, Reinhard Genzel, Oliver Pfuhl et tous les autres membres de GRAVITY !