

Exploration du trou noir au centre de la Galaxie avec GRAVITY

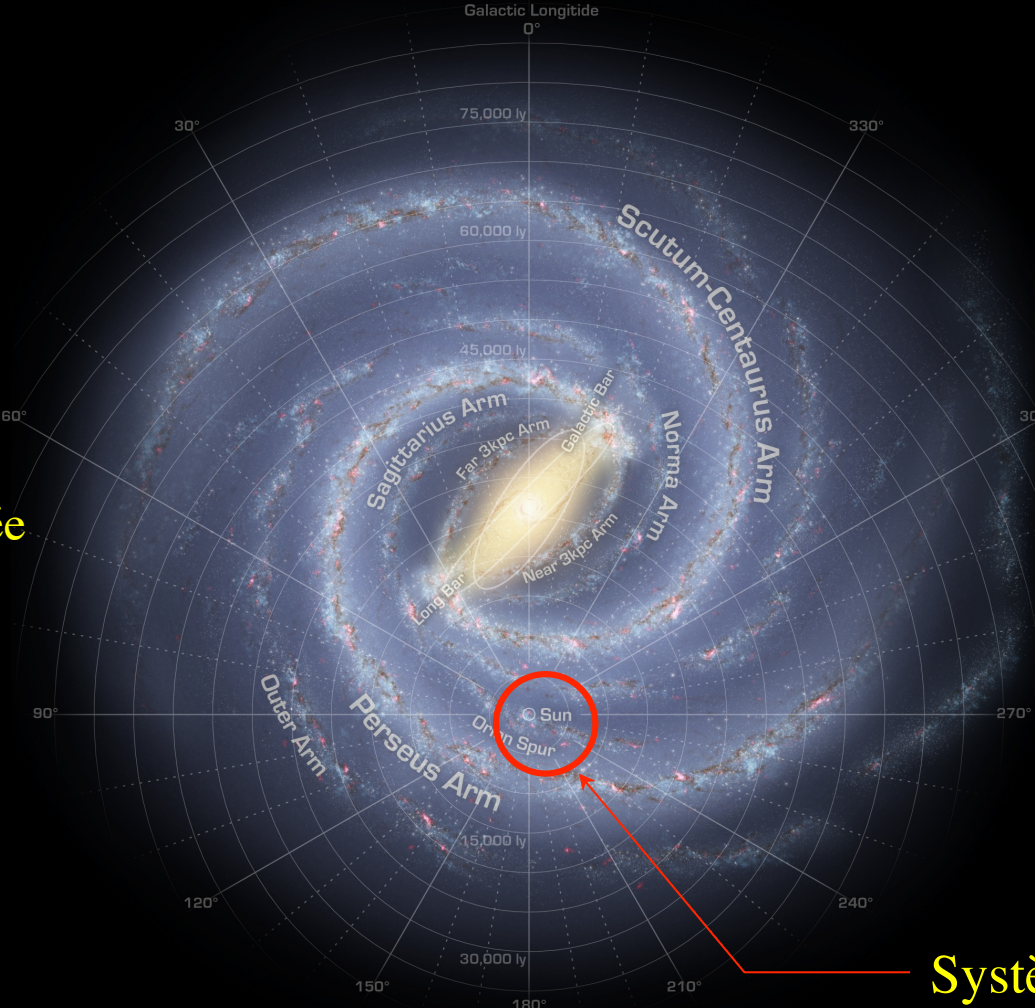
Guy Perrin



Mardi 30 novembre 2010

La Galaxie

Diàmetre : 25 kpc
Galaxie spirale barrée



Voie Lactée

Système solaire

L'environnement de Sgr A*

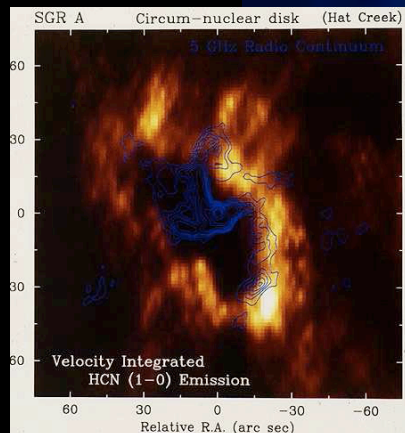
Sgr A*
10 μ as

Mini spirale
(50'')

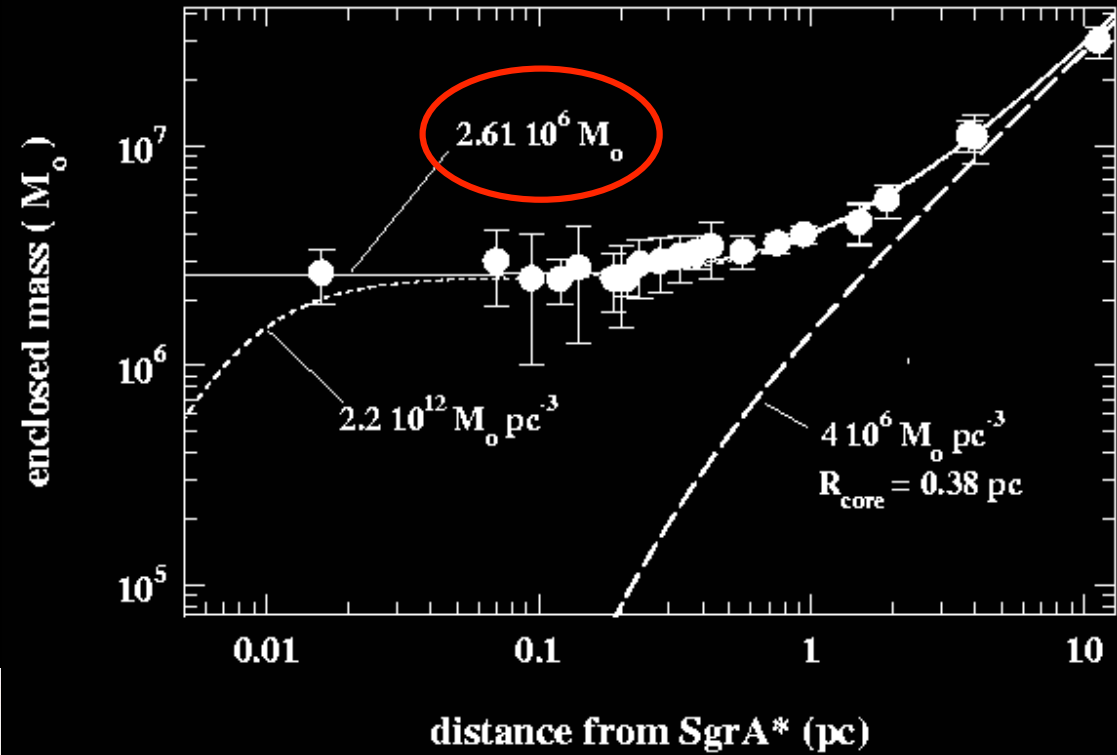
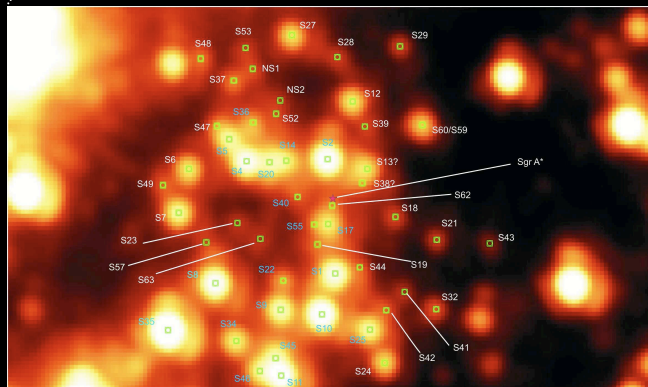
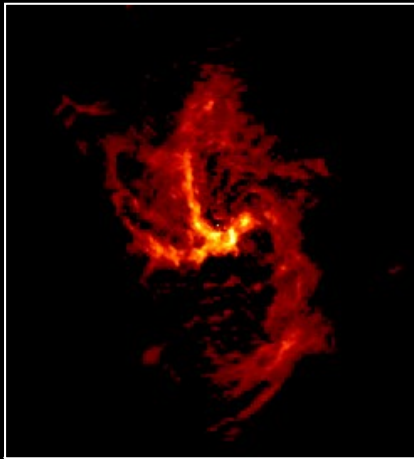
Amas central
(2 disques)
(0.5 pc-12.5'')

Amas des étoiles S
(12-400 mas)

Disque circumnucléaire
(120'')



La masse de Sgr A*



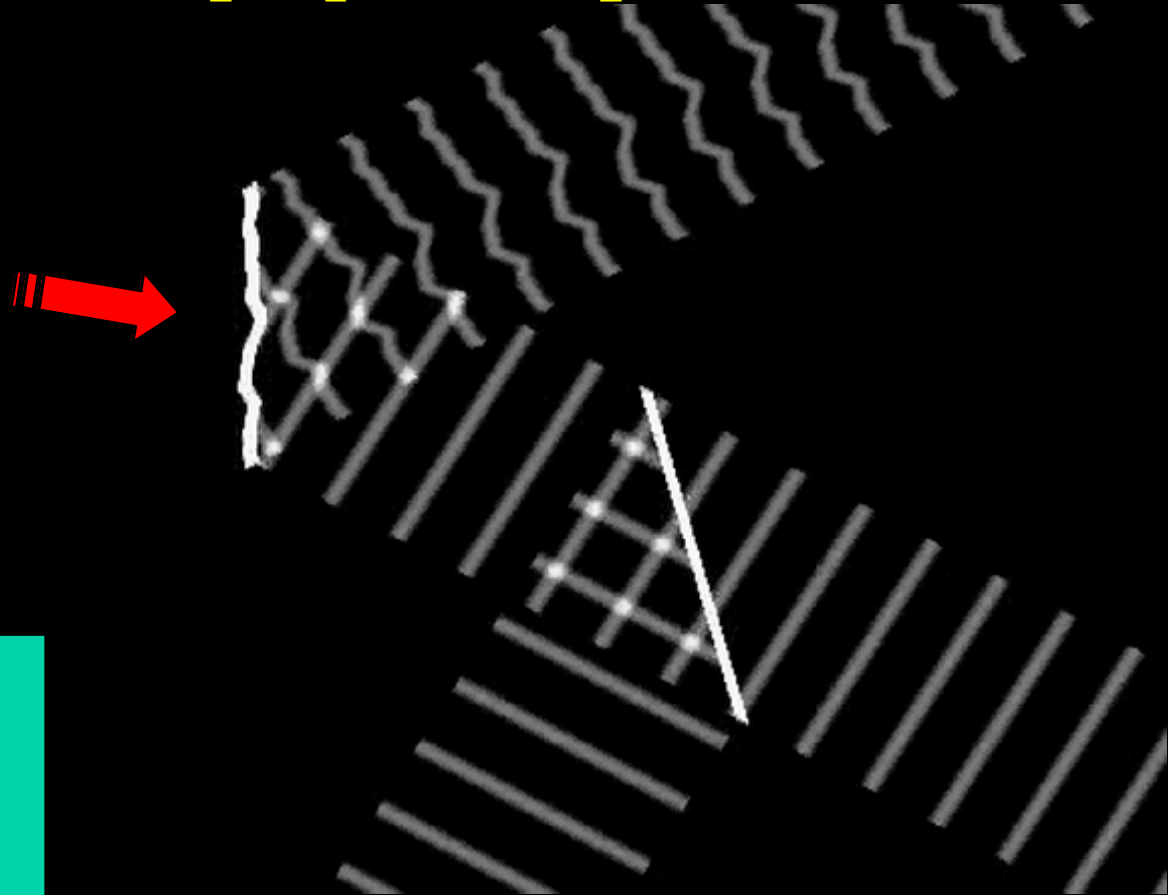
La boucle d'Optique Adaptative

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

Un calculateur spécialisé optimise la correction

Un capteur analyse les erreurs résiduelles

Le front d'onde corrigé peut être focalisé



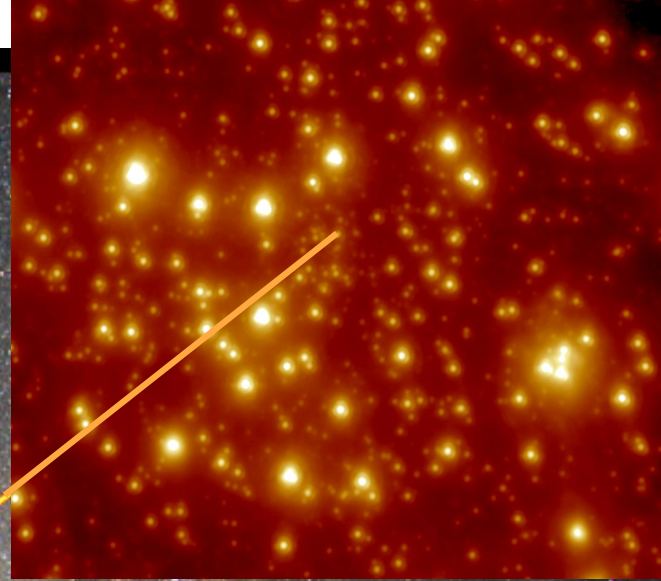
Le VLT, Very Large Telescope
4 télescopes européens de 8 m au Mont Paranal au Chili



Sgr A* est très atténué

$A_V=32$

Observations dans
l'infrarouge



Calcul précis de la masse de Sgr A* (orbites 3D, imagerie et spectroscopie)

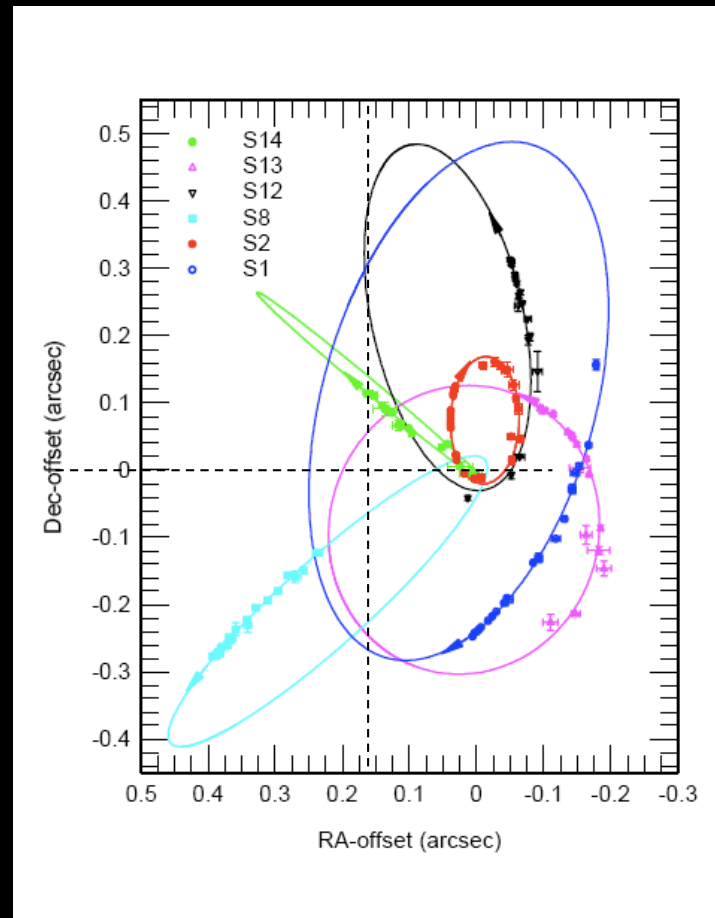
Application de la
3^{ème} loi de Kepler :

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



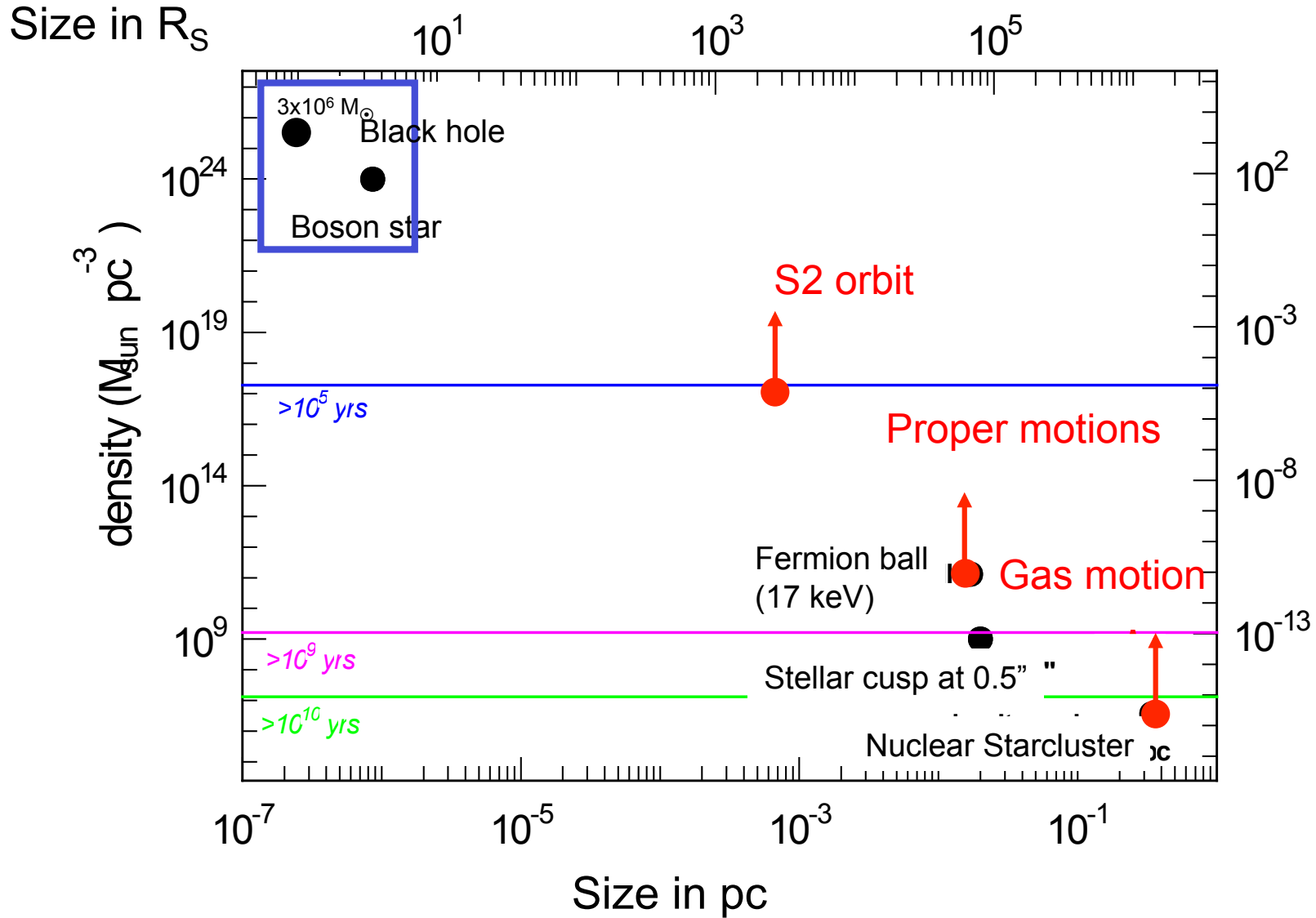
$$M_{Sgr A^*} = 3,61 \pm 0,32 \times 10^6 M_{Soleil}$$

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

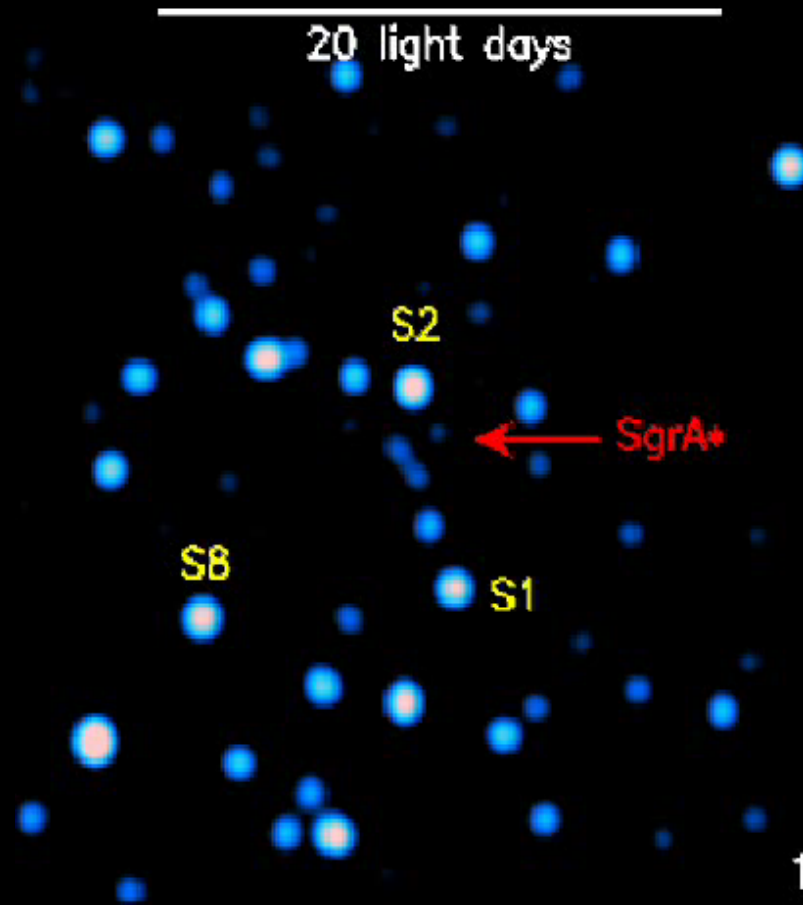


Eisenhauer et al. (2005)

La nature de Sgr A*

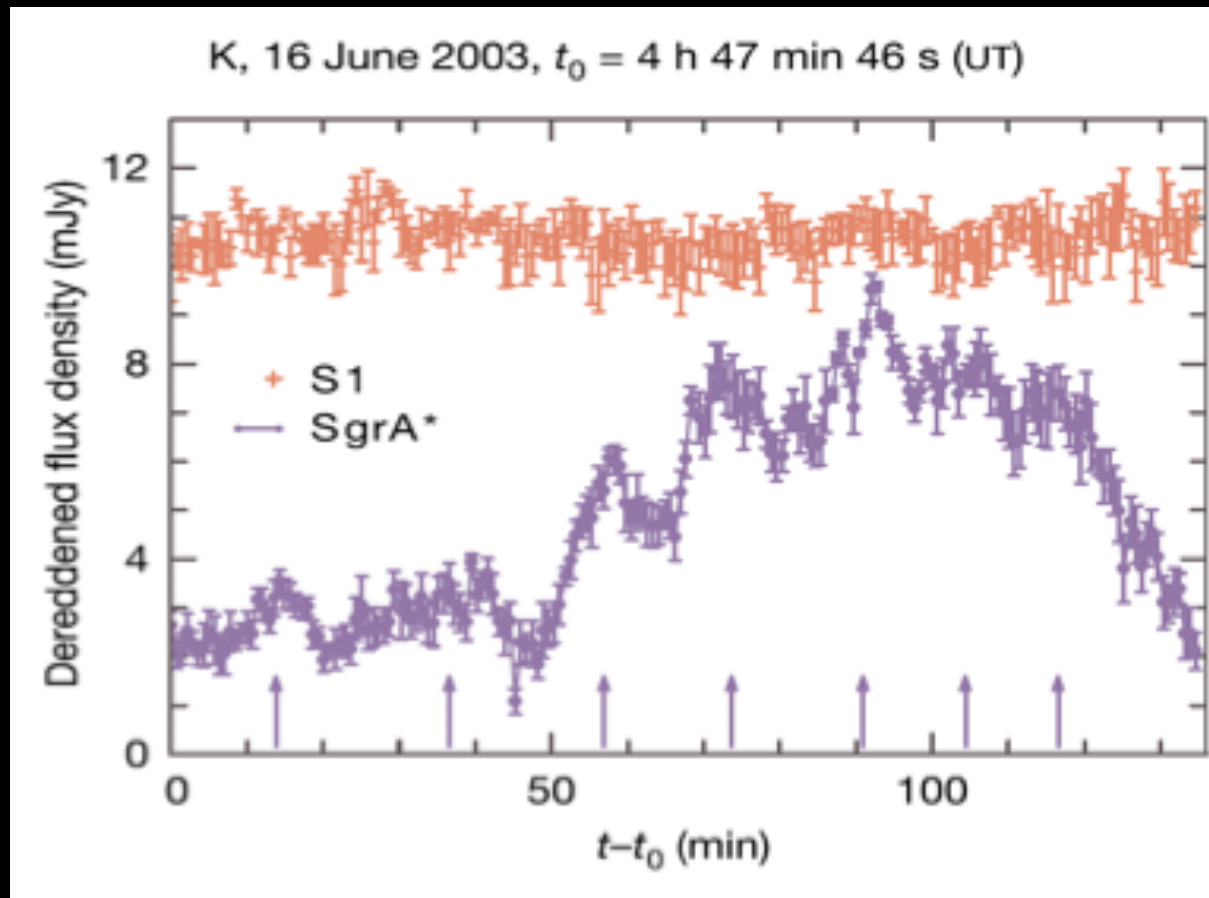


Les sursauts de Sgr A*



Sursauts en fonction du temps

- Trou noir central actif ~ 1 fois par nuit
- Période minimum de ~ 20 minutes



Genzel et al. (2003)

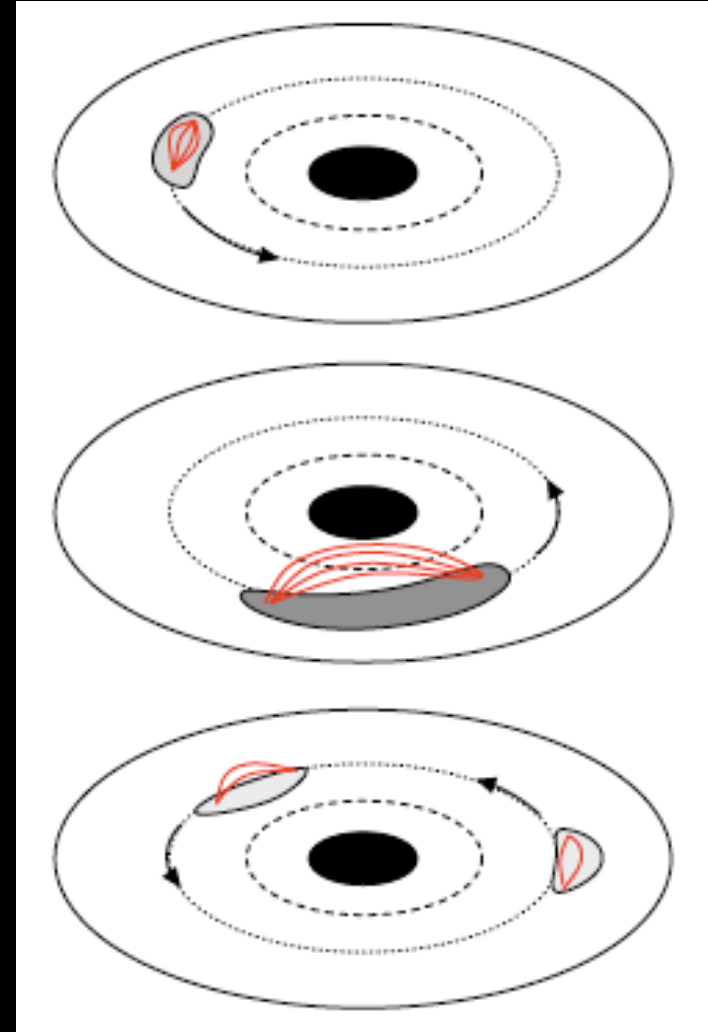
Vers la compréhension des sursauts

Sursaut lumineux : matière chauffée sur une (la dernière) orbite circulaire (stable) ($30 \mu\text{as}$ avec $J=0$)

Période du sursaut : période de l'orbite

Outil *fantastique* pour l'étude de la théorie de la relativité générale en champ fort.

Le *point chaud* joue le rôle de particule test et révèle l'espace-temps autour de Sgr A*.



Eckart et al. A&A 500, 935 (2009)

Aller plus loin grâce à l'information spatiale

- Apporter définitivement la preuve du trou noir : montrer que la masse est contenue dans 1 Rayon de Schwarzschild
- Comprendre la nature des sursauts
- Utiliser le trou noir comme un laboratoire unique pour la relativité générale en champ fort

Échelle $\sim 1 R_s$

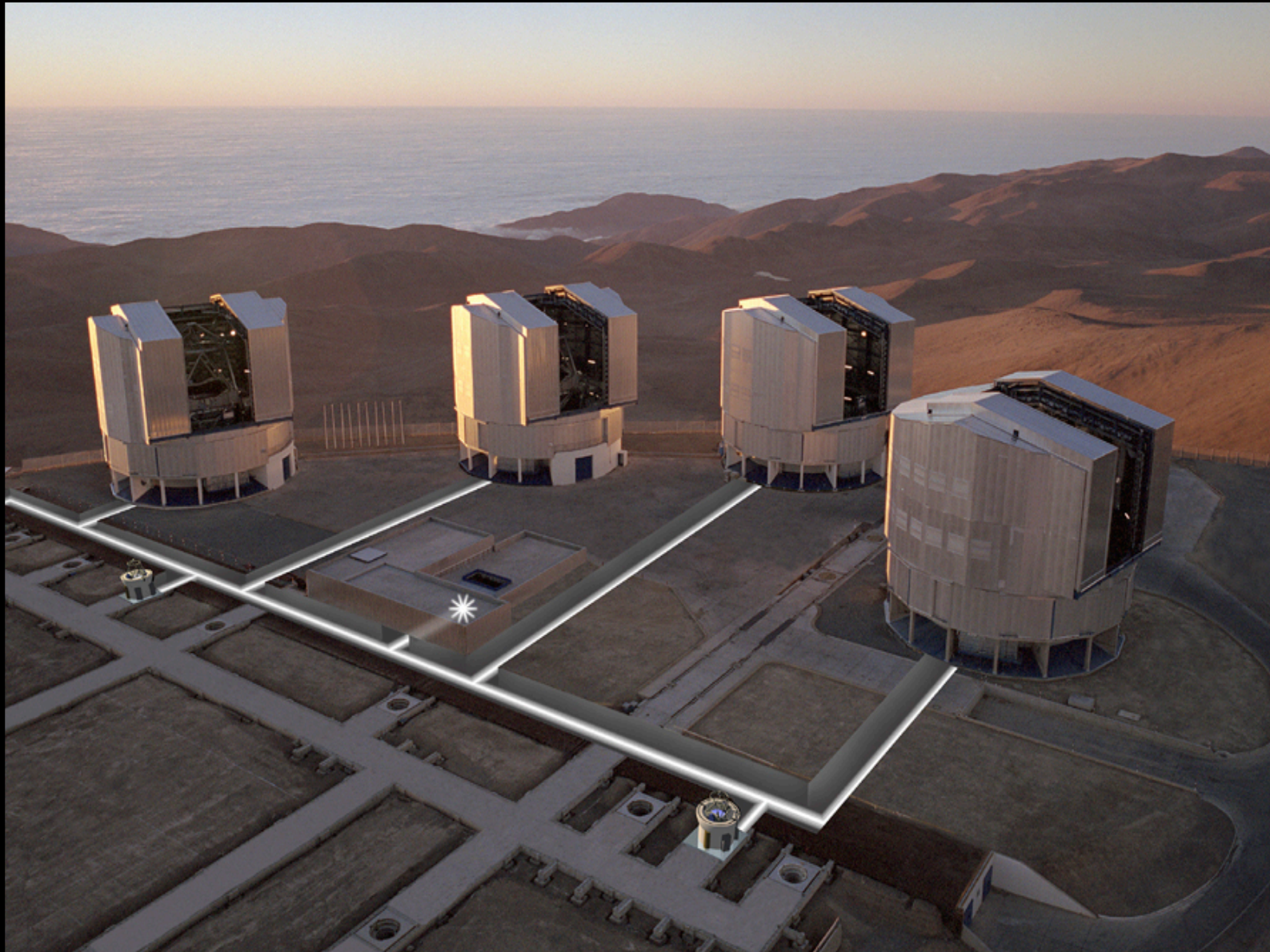
10 μas

- 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

GRAVITY – interféromètre à 4 télescopes géants
(*General Relativity via Vlt InterferomeTrY*)

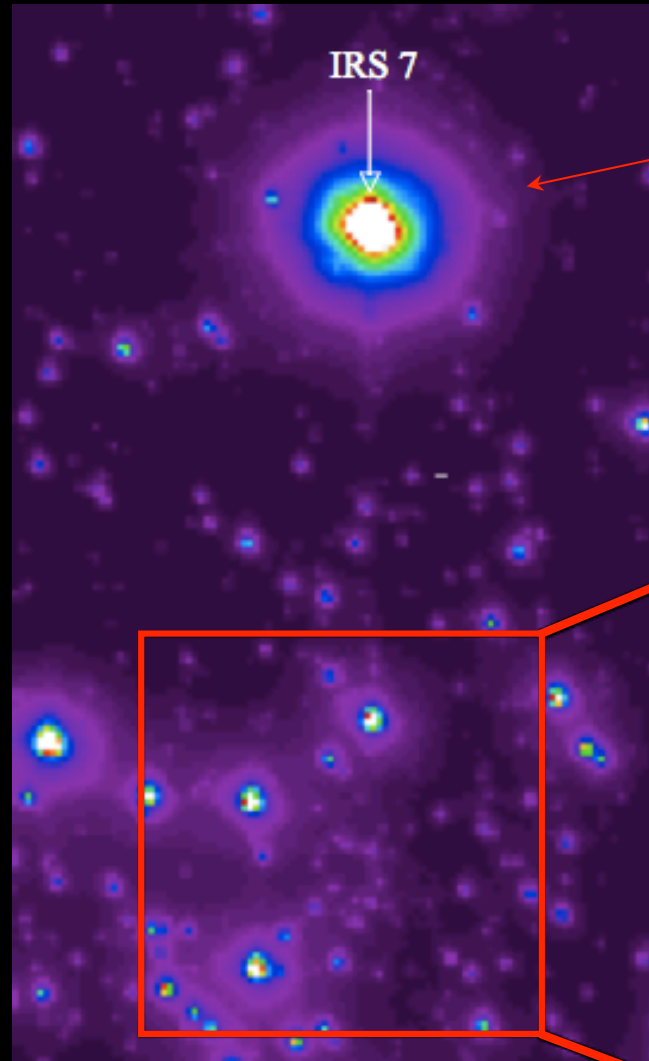


Consortium GRAVITY



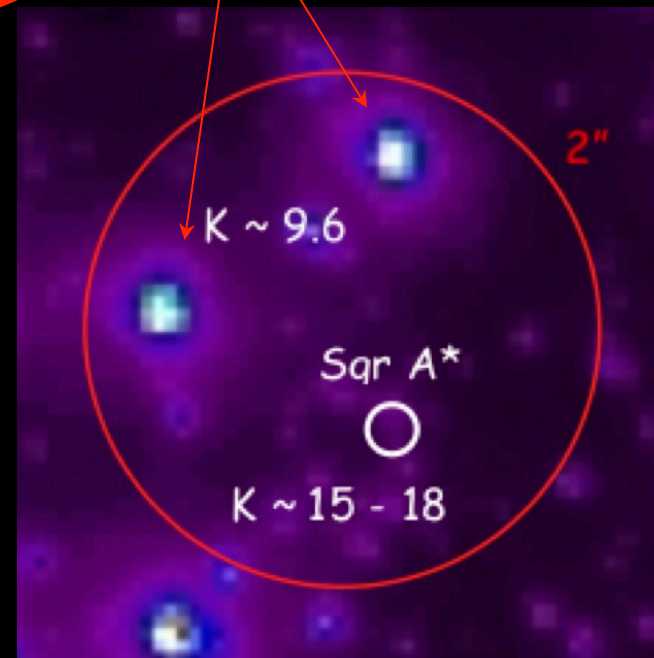
Amorim, Araujo-Hauck, Bartko, Baumeister, Berger, Brandner, Carvas, Cassaing, Chapron, Choquet, Clénet, Collin, Dodds-Eden, Eckart, Eisenhauer, Fédou, Fischer, Gendron, Genzel, Gillessen, Gräter, Hamaus, Haubois, Haug, Hippler, Hofmann, Hormuth, Houairi, Ihle, Jocu, Kellner, Kervella, Klein, Kolmeder, Lacour, Lapeyrère, Laun, Lenzen, Lima, Moratschke, Moulin, Naranjo, Neumann, Patru, Paumard, Perraut, Perrin, Pfuhl, Rabien, Ramos, Reess, Rohloff, Rousset, Sevin, Sturm, Straubmeier, Thiel, Vincent, Wiest, Zanker-Smith, Ziegleder, Ziegler

Principe de la mesure GRAVITY



Source de référence pour
l'optique adaptative infrarouge

Sources de référence pour
l'imagerie et l'astrométrie
interférométriques

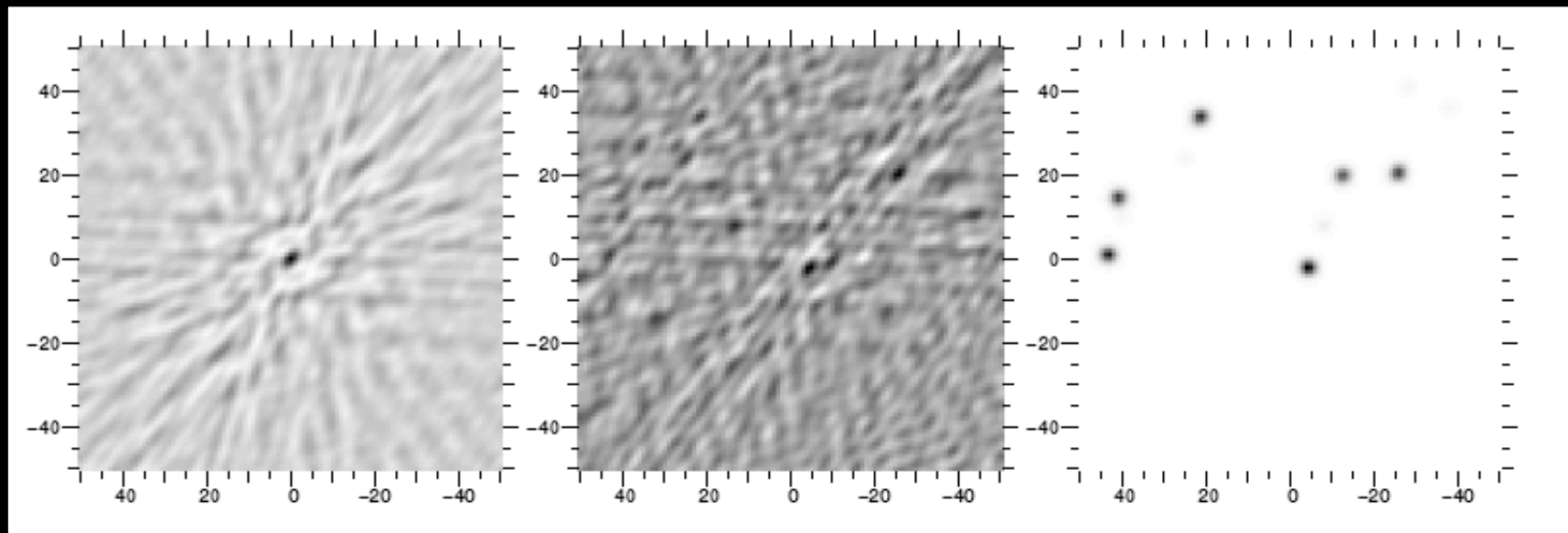


Étude des orbites des étoiles les plus proches (*pas trop difficile*)

L'amas central (60 mas) est résolu à une échelle de 1 mas = 100 R_g

1 nuit d'observation

Paumard et al. (2005)



Réponse impulsionnelle

Image brute

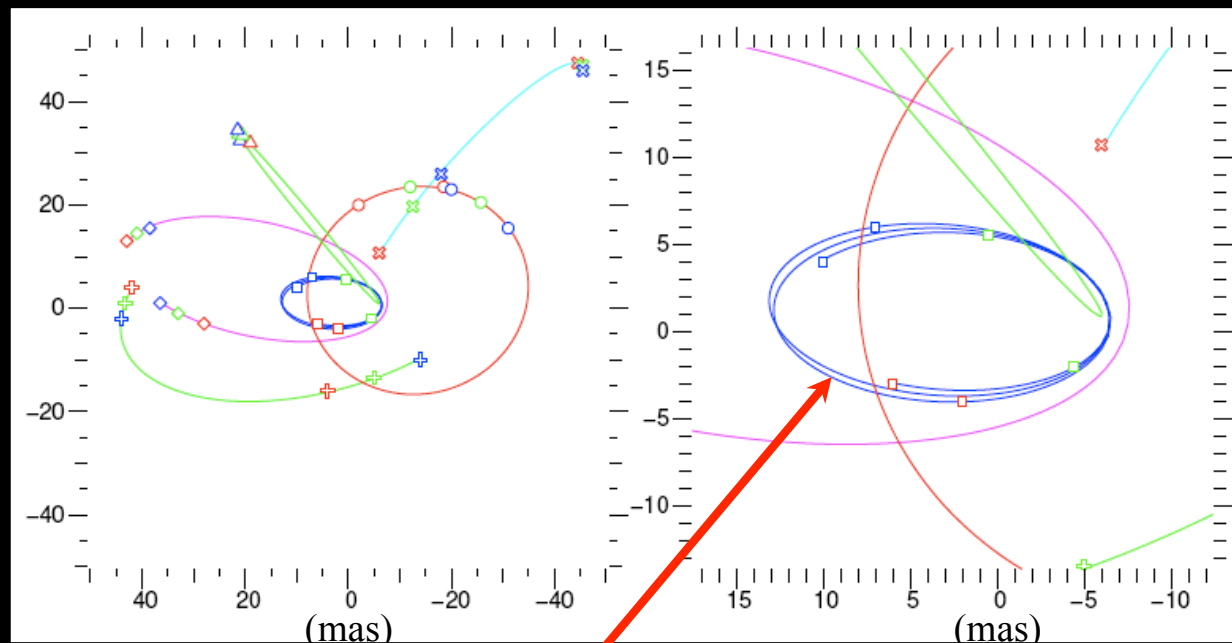
Après déconvolution

Étude des orbites des étoiles les plus proches (*pas trop difficile*)

L'amas central (60 mas) est résolu à une échelle de 1 mas = 100 R_g

Après 15 mois d'observation

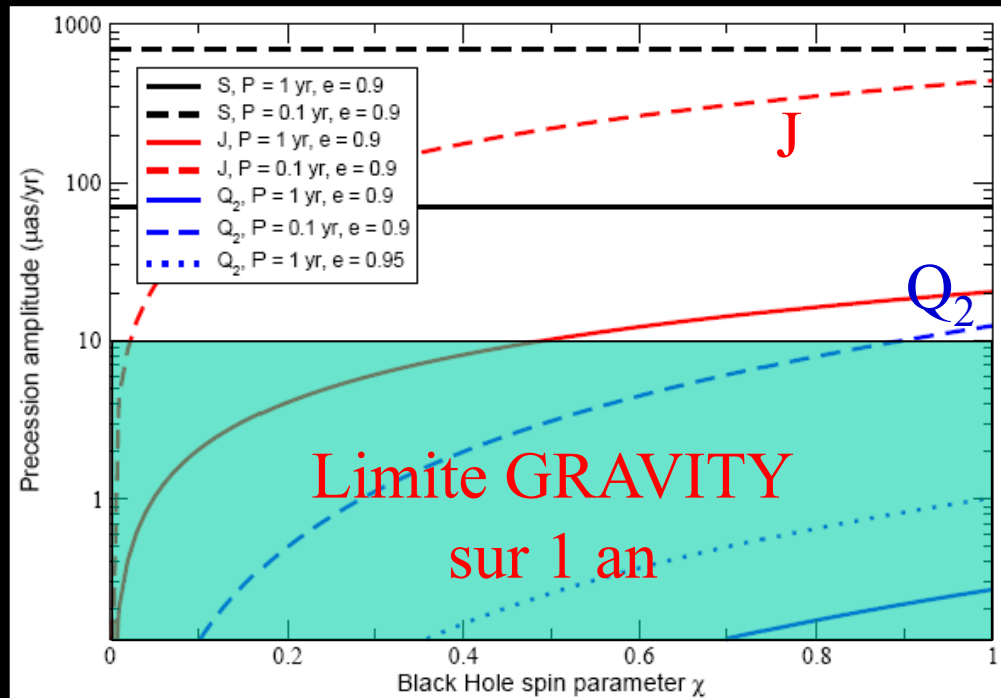
Paumard et al. (2005)



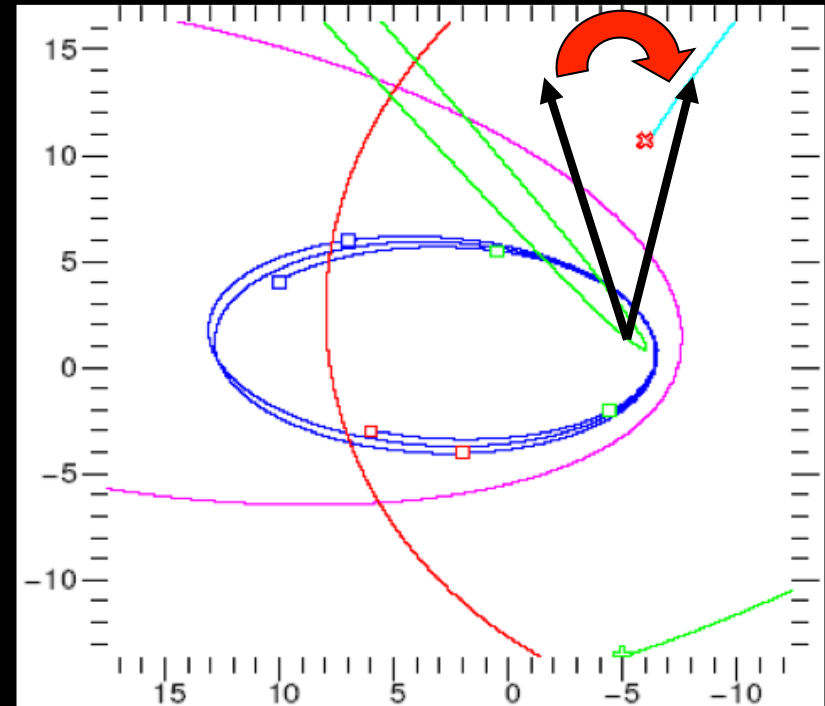
Précession relativiste dans la métrique de Schwarzschild

Le test de la calvitie des trous noirs

Trou noir en rotation → précession de l'orbite accrue (effet Lense-Thirring) et précession du plan orbital (J et Q_2)



Will (2008)



Théorème de calvitie des trous noirs de Wheeler : un trou noir est déterminé par 3 paramètres : **Masse M**, **Spin J**, **Charge**
Moment quadripolaire $Q_2 = -J^2 / M$

Astrométrie interférométrique

La distance entre les interférogrammes vaut :

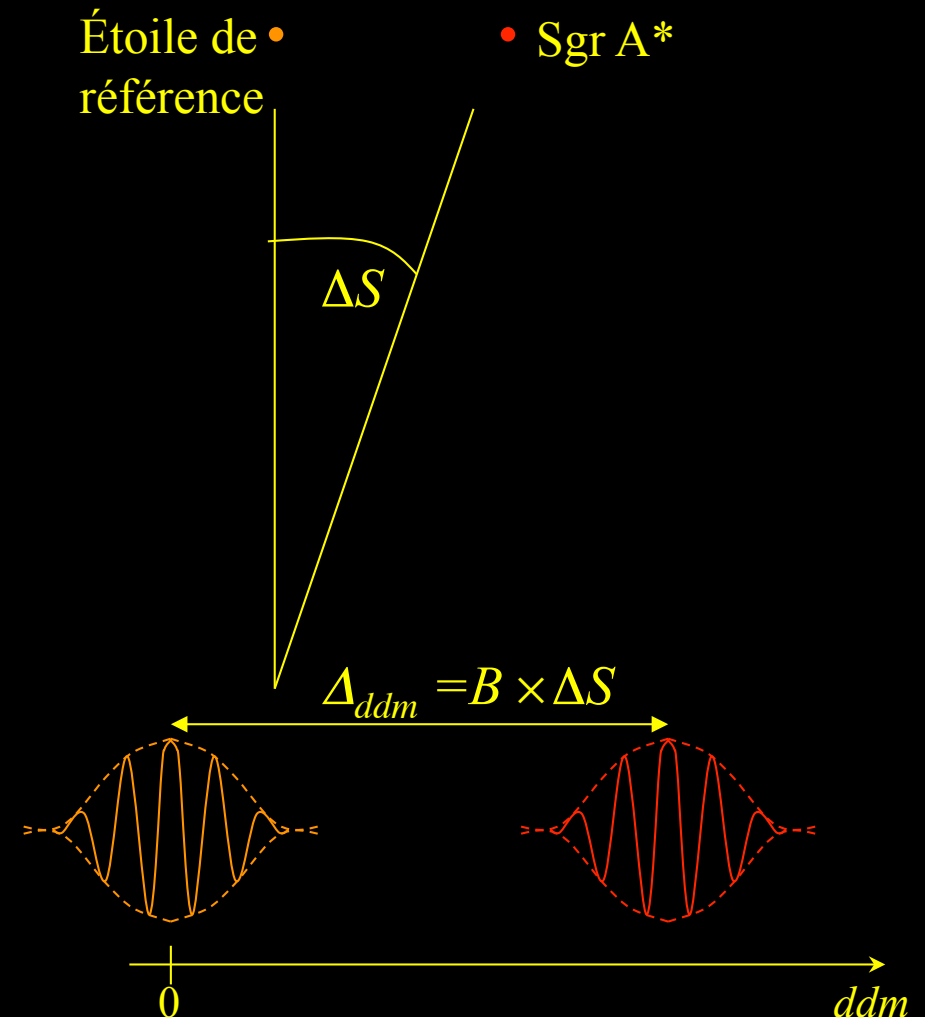
$$\Delta_{ddm} = B \times \Delta S$$

D'où :

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

Avec une précision de 5 nm sur Δ_{ddm} pour une base de 100 m, la précision sur ΔS est de 10 μ as.

Soit une pièce d'un € sur la Lune.



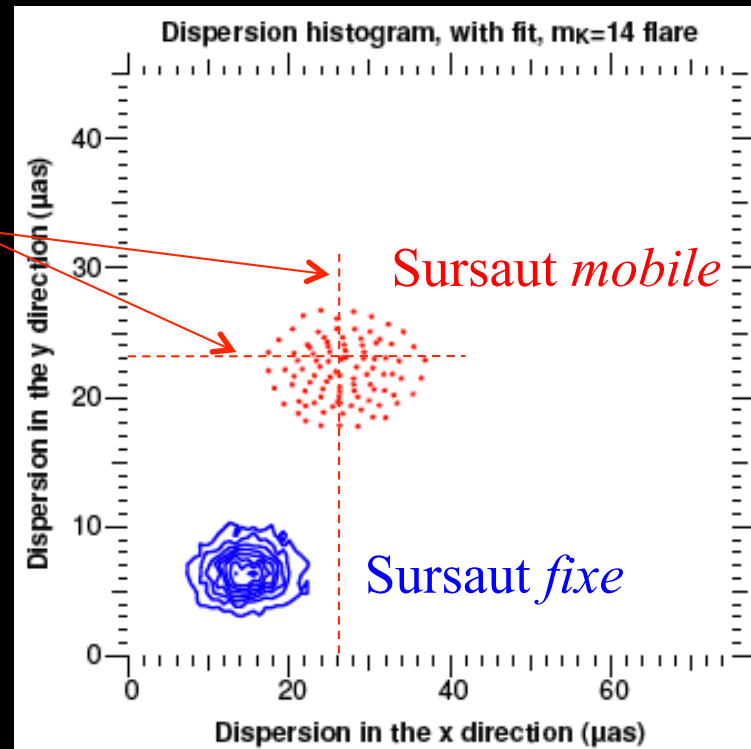
Contrainte de la dernière orbite circulaire stable par astrométrie (*plus difficile*)

Dispersion des positions
mesurées par astrométrie

Dispersion attendue
Pour une orbite
de $30 \mu\text{as}$

Diamètre de l'orbite
dépend de J

→ mesure de J



Vincent et al. (2010)

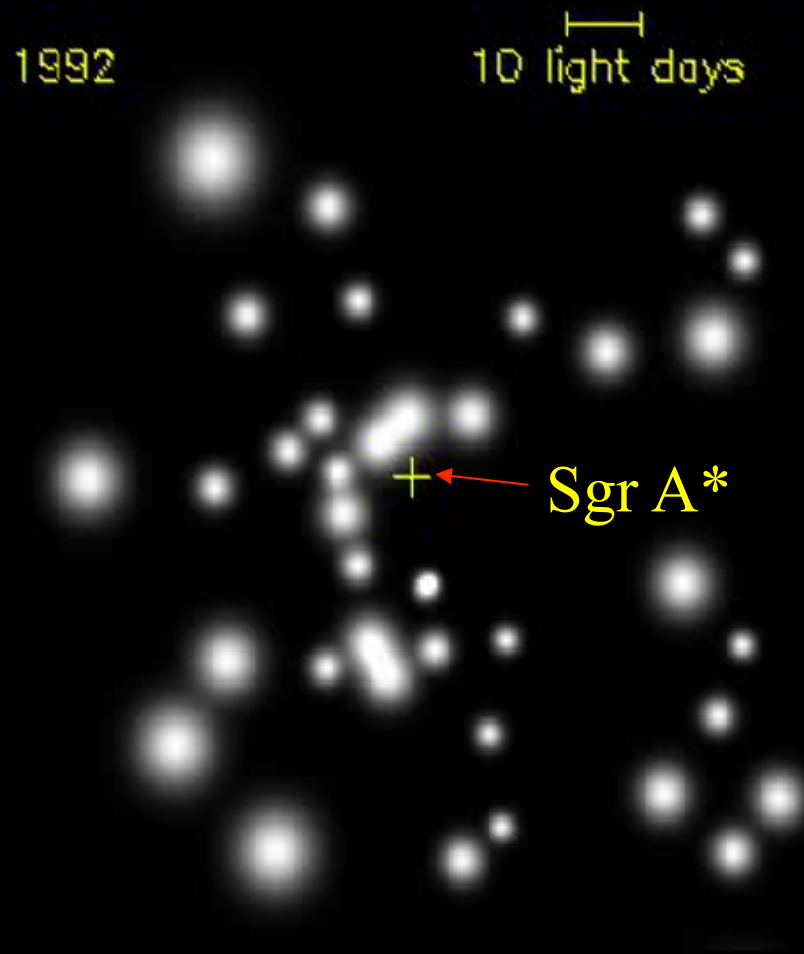
En guise de conclusion, où en est-on ?

Concept Design Review :	Décembre 2007
Preliminary Design Review :	Décembre 2009
Final Design Review :	Septembre 2011
Premiers tests à Paranal :	2014

De premiers résultats sur Sgr A* dans 5 ans.

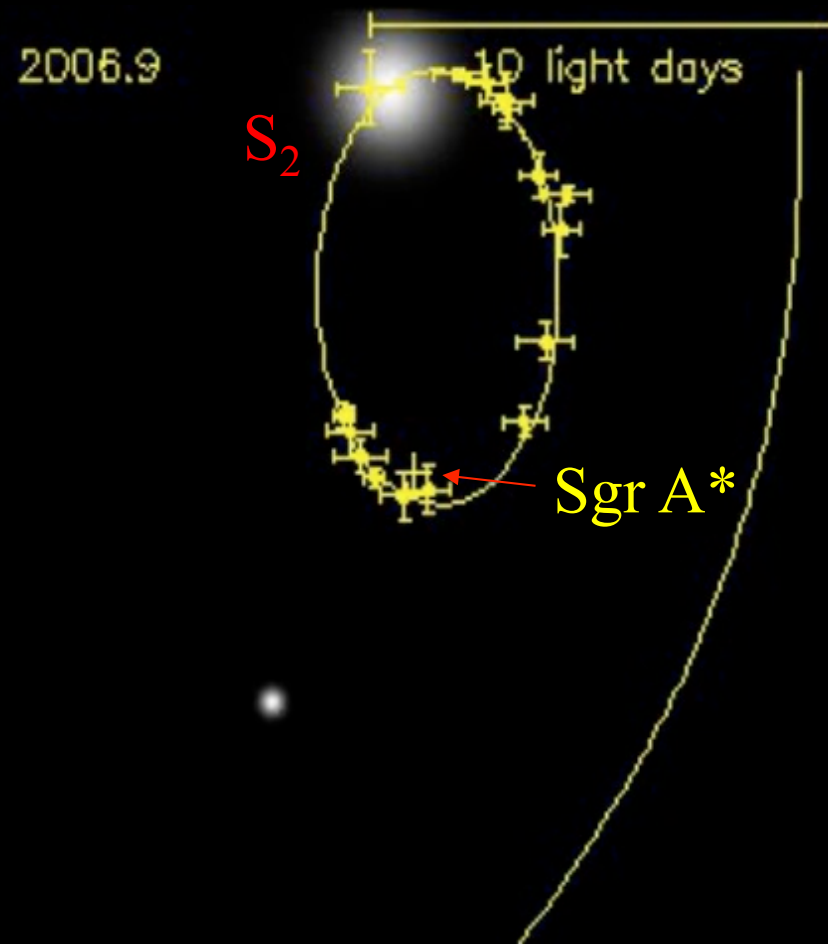


Orbites d'étoiles S observées par le VLT autour de Sgr A*

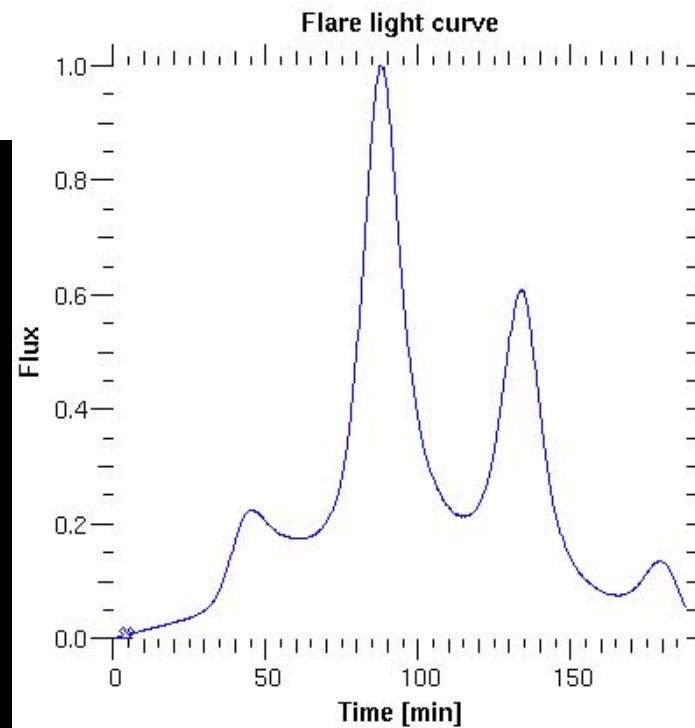
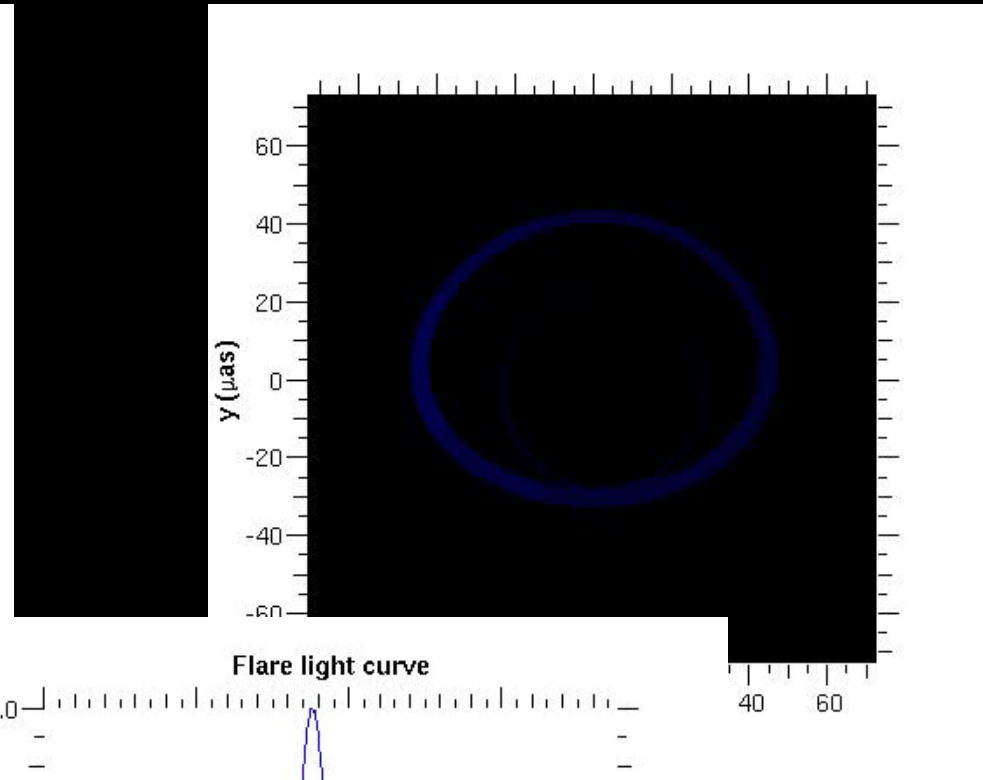
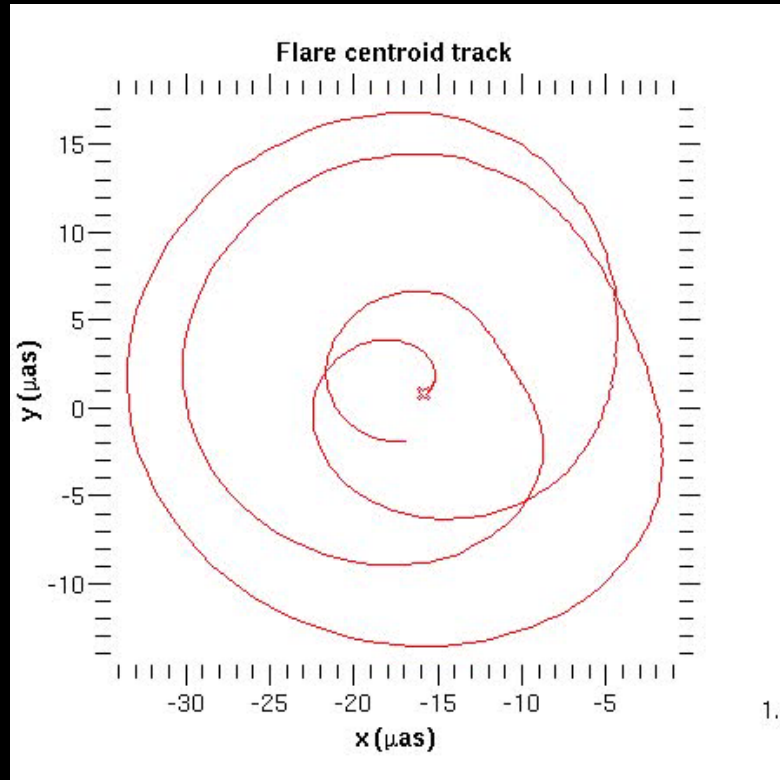


Schödel et al. (2002)

Orbites d'étoiles S observées par le VLT autour de Sgr A*



Schödel et al. (2002)



Sursaut calculé par Frédéric Vincent avec GYOTO (1200 h de calcul)
 Inclinaison de l'orbite = 70°
 Trou noir statique.
 Dernière orbite circulaire stable.
 Distance observateur = $50 R_s$