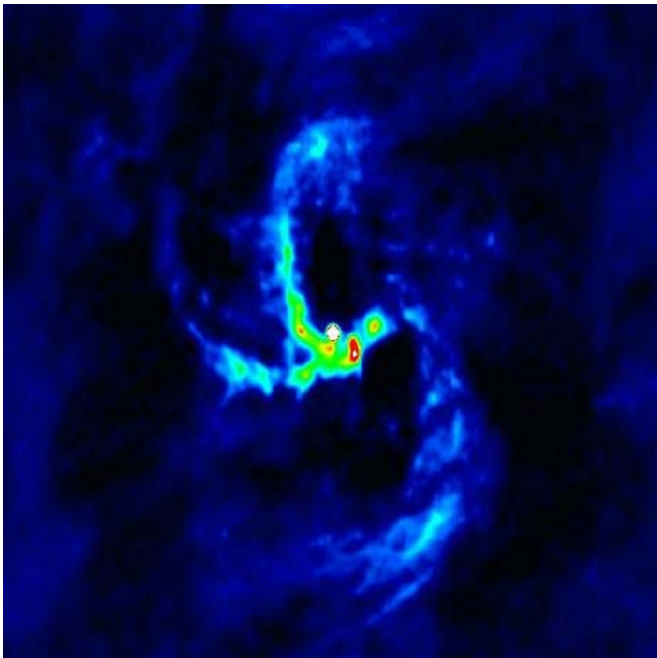




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Le trou noir au centre de notre Galaxie

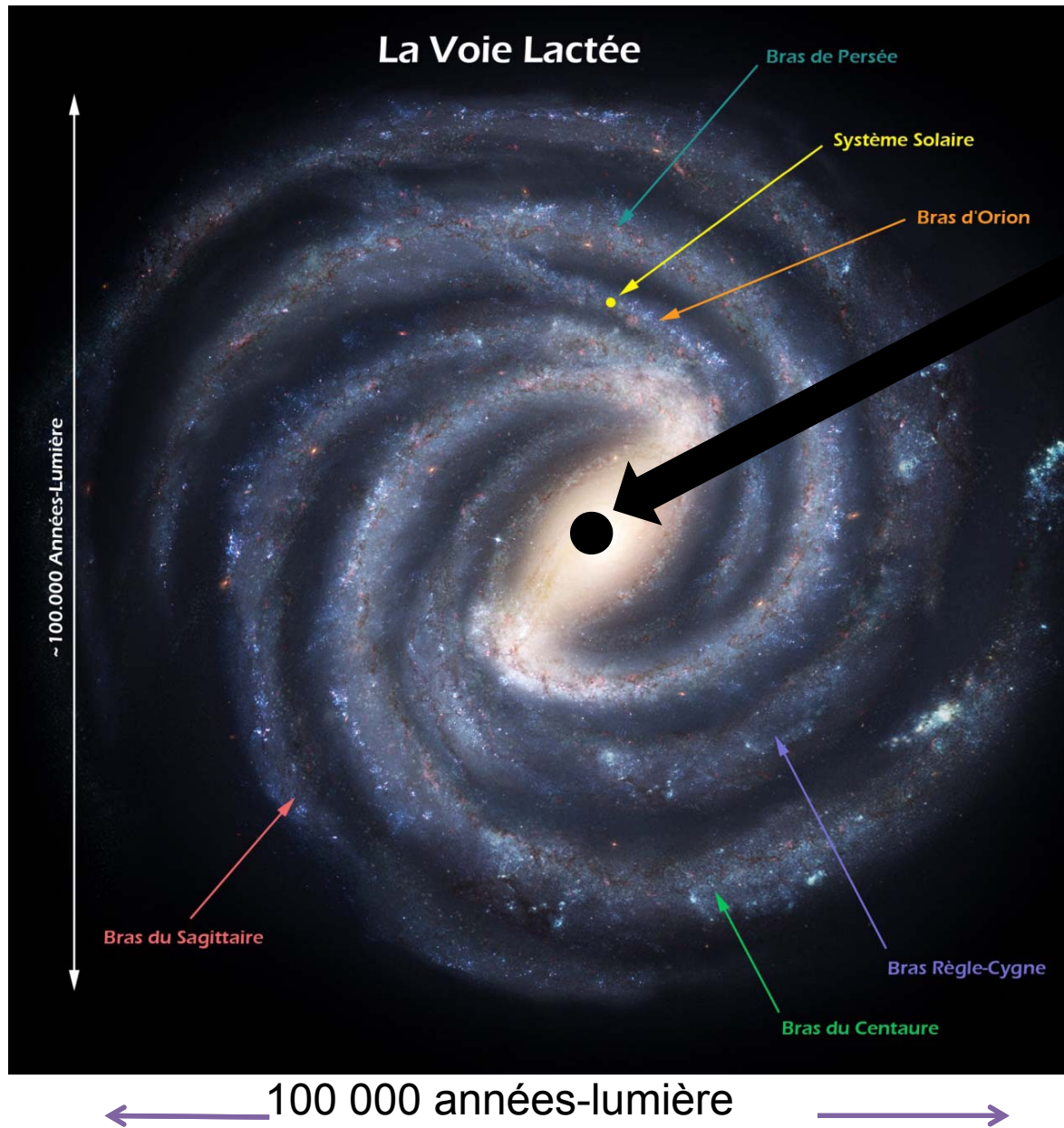


Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Notre galaxie: la Voie Lactée



Images en optique, infra-rouge



Barre

Bulbe en
cacahuète

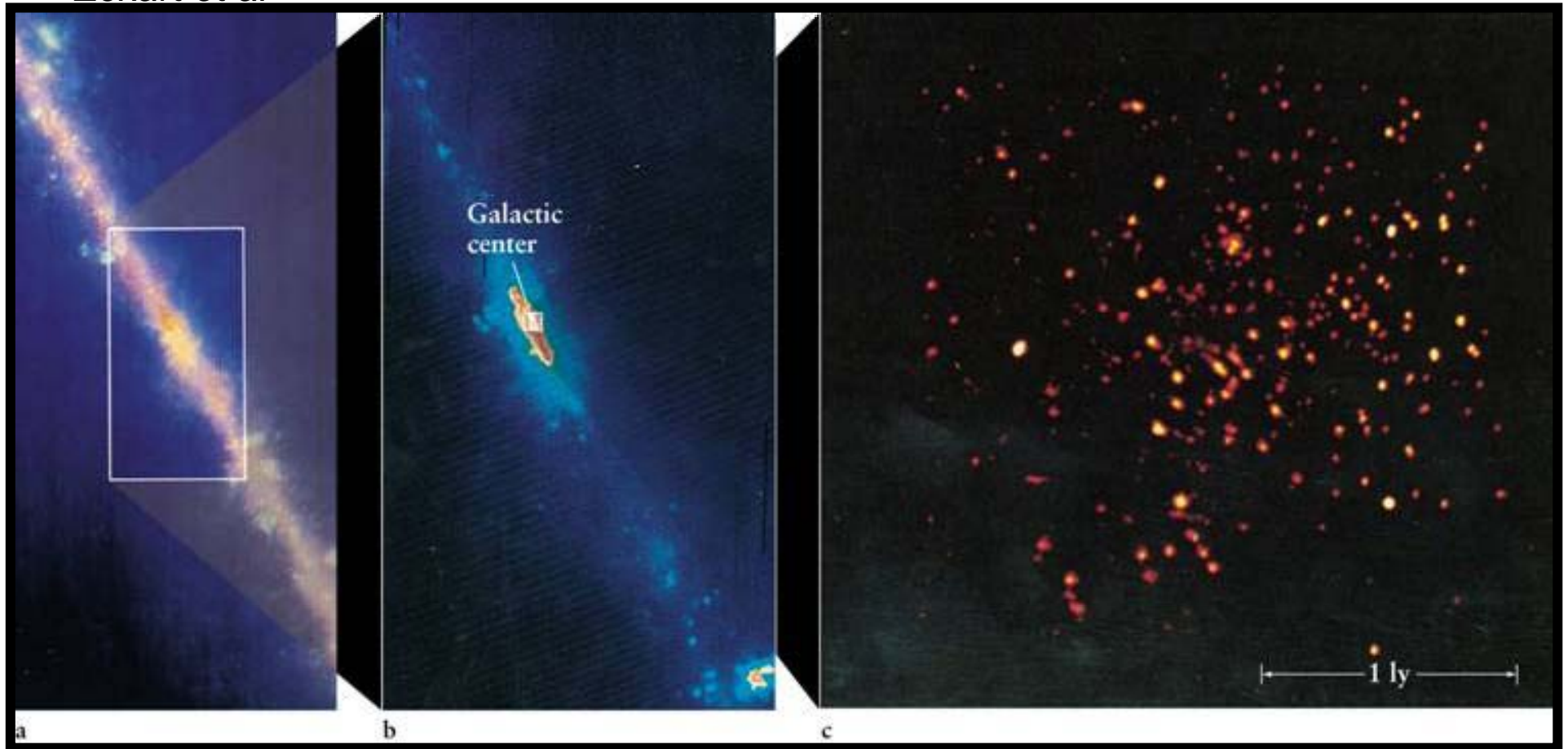
2MASS



Zoom vers le centre galactique, en infrarouge

$3 \cdot 10^7$ étoiles/pc³

Eckart et al



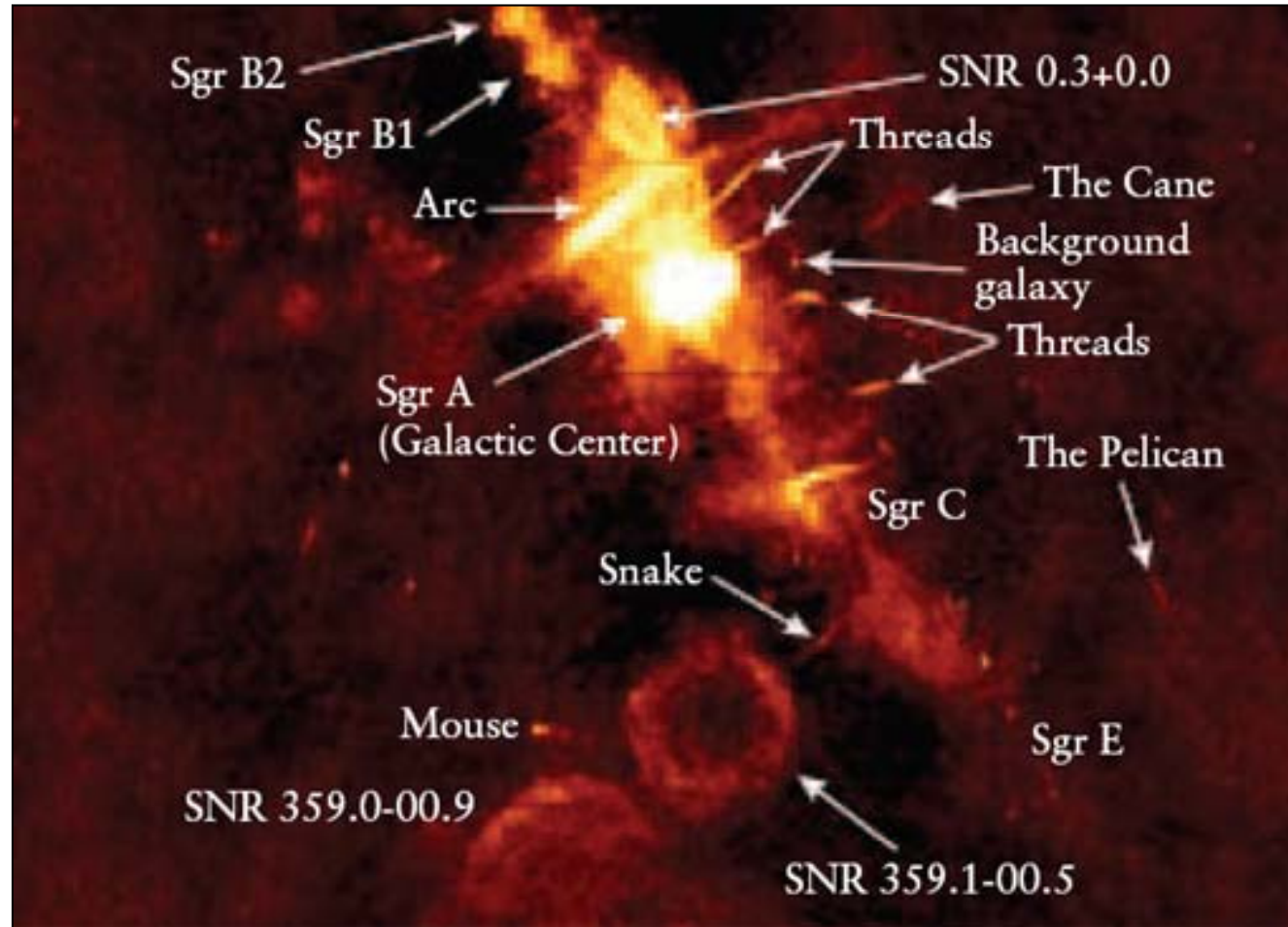
50°, traînée de poussière

300 étoiles brillantes, dans 1 al

Montre un pic de densité vers le Centre

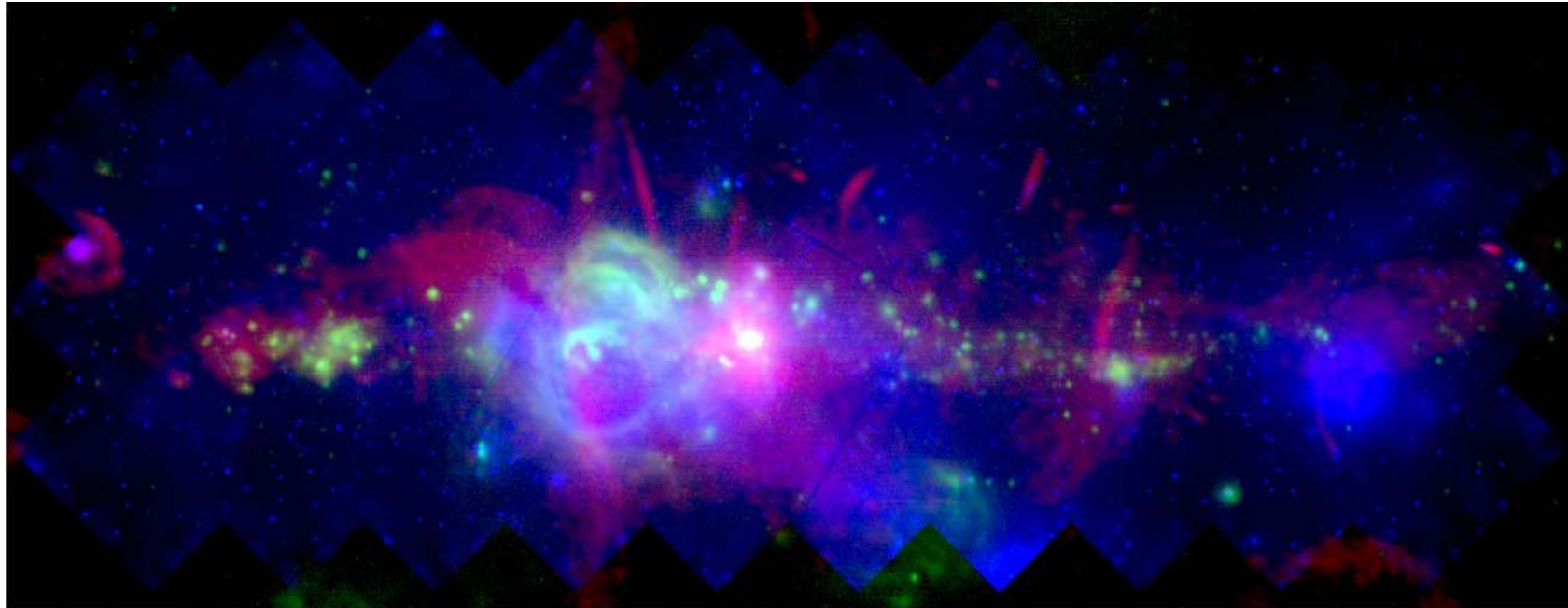
Noyau Galactique – en Radio

Taille 4°
=560pc
=1700al



Sagittarius A (Sgr A) définit le centre Galactique. C'est une radio source brillante (VLA) SNR = reste de Supernova

Centre Galactique – Composite



Le centre Galactique en rayons X, infrarouge, Radio

Structure très complexe, filaments, bulles de supernovae, nuages moléculaires, formation d'étoiles?

Les rayons X viennent des binaires, SNR, mais aussi du gaz diffus

Centre Galactique – en rayons X

Couleur=énergie

Rouge= basse

Bleu= haute

Taille 400 x 900 al

SgrA*



Le centre Galactique en rayons X, vu par le satellite Chandra
Des centaines de naines blanches, étoiles à neutron, trous noirs
stellaires + gas chaud (qq 10^6) qui s'échappe en partie

Astrométrie et mouvements propres au centre galactique

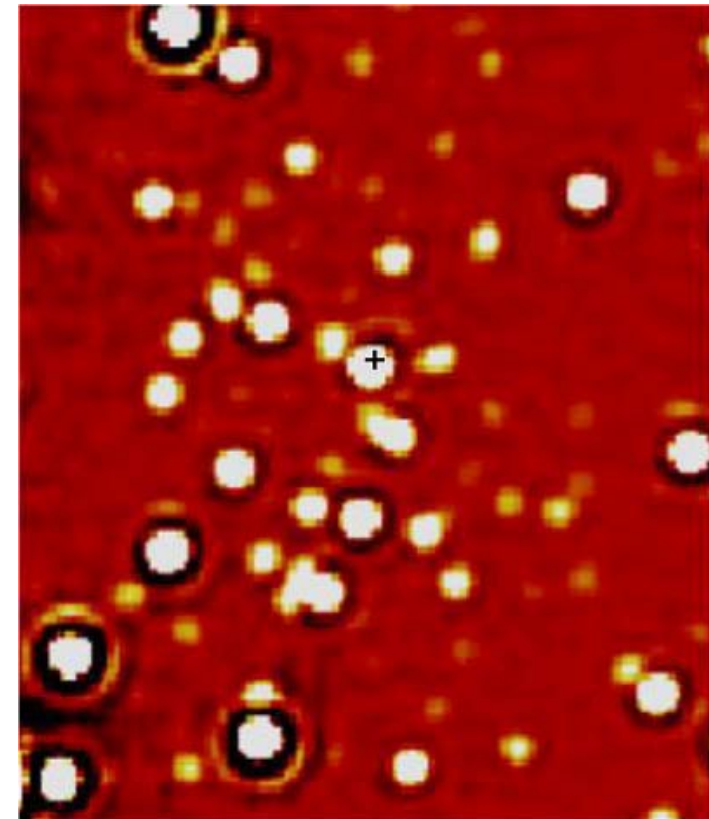


1 année lumière

The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



20 jours lumière

The Centre of the Milky Way (α Centauri)
(VLT YEPUN + NACO)

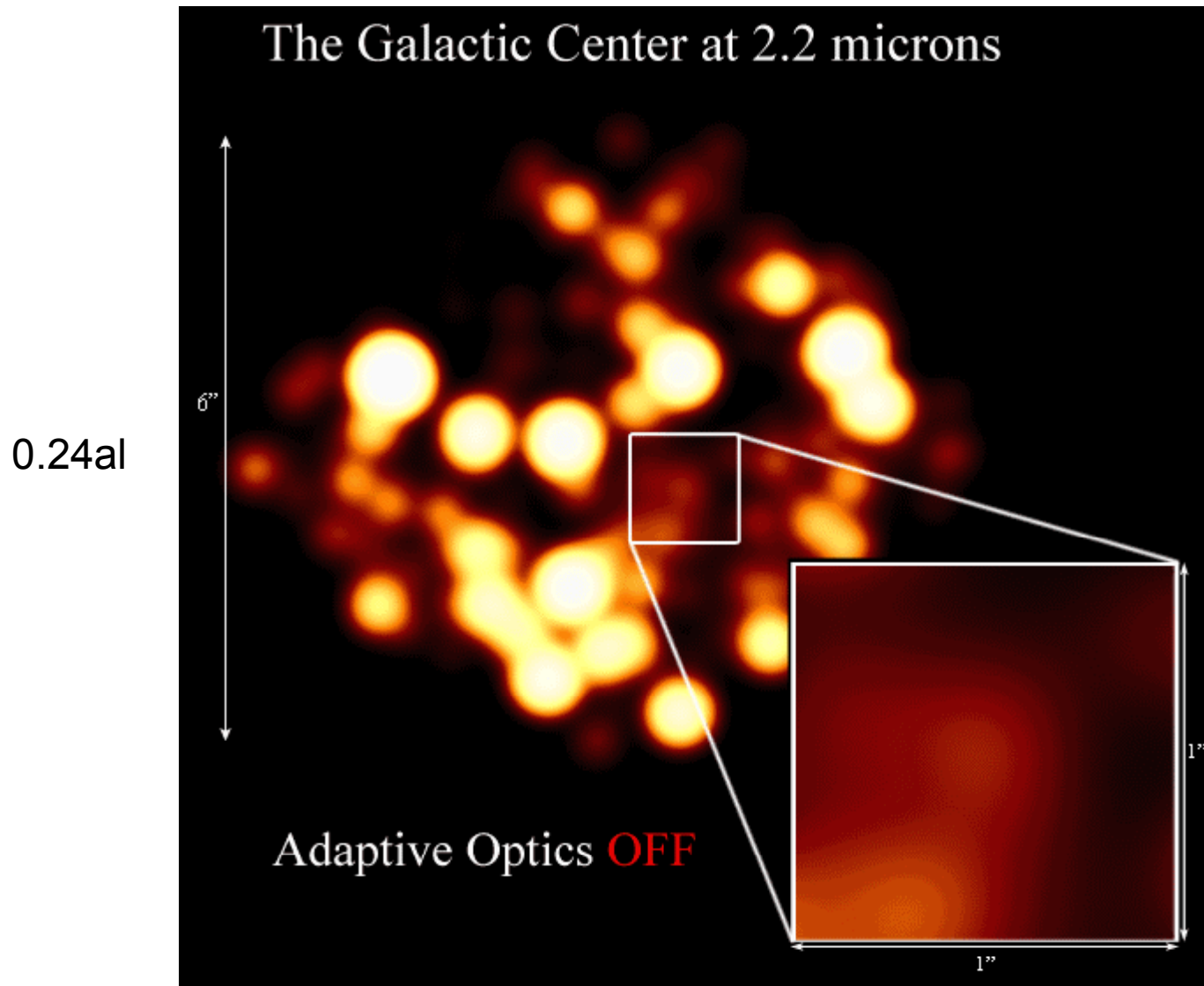
ESO PR Photo 23b/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



VLT-optique adaptative

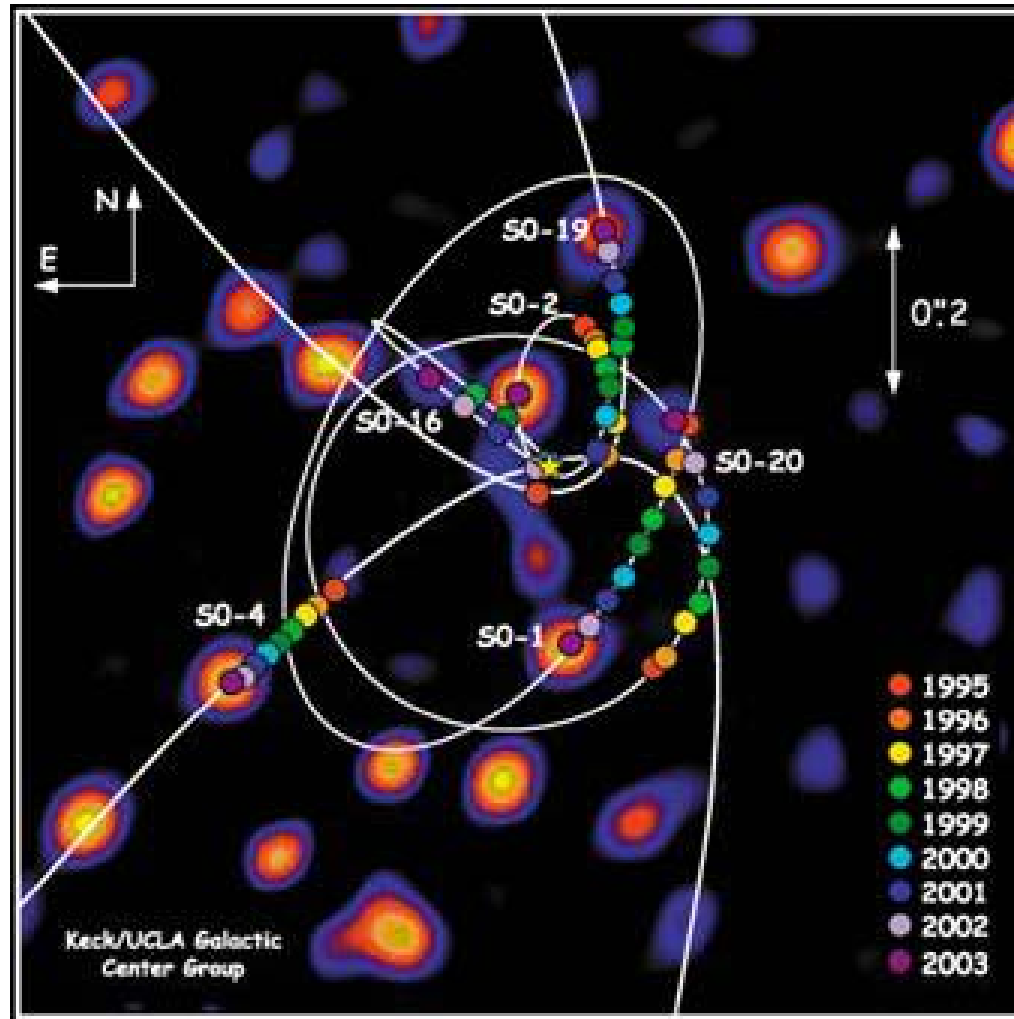
Les effets de l'optique adaptative



Corrige des
turbulences de
l'atmosphère

Noyau Galactique – en Infrarouge

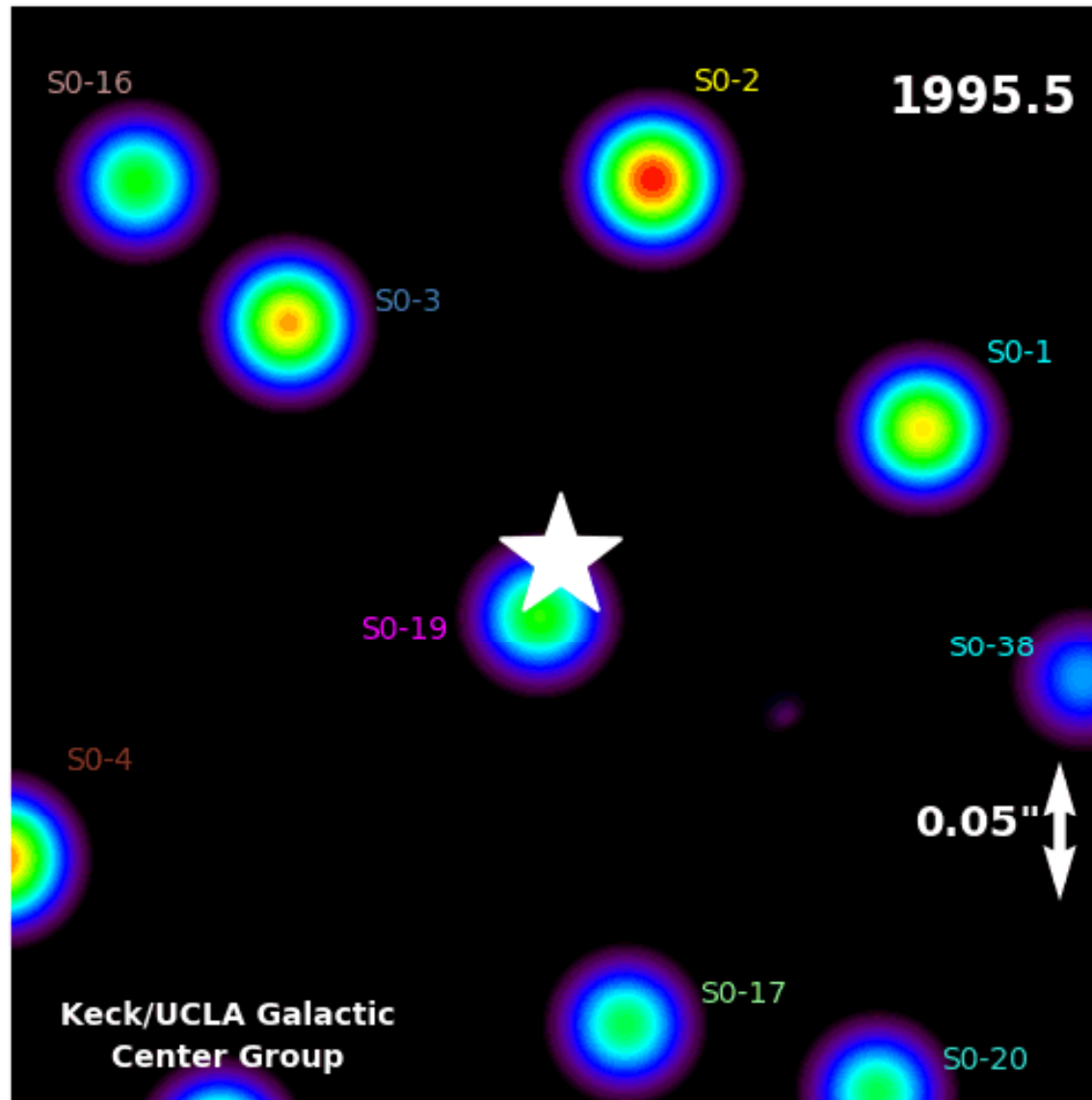
$$R_a = GM/V_b^2 = 0.5 \text{ pc}$$



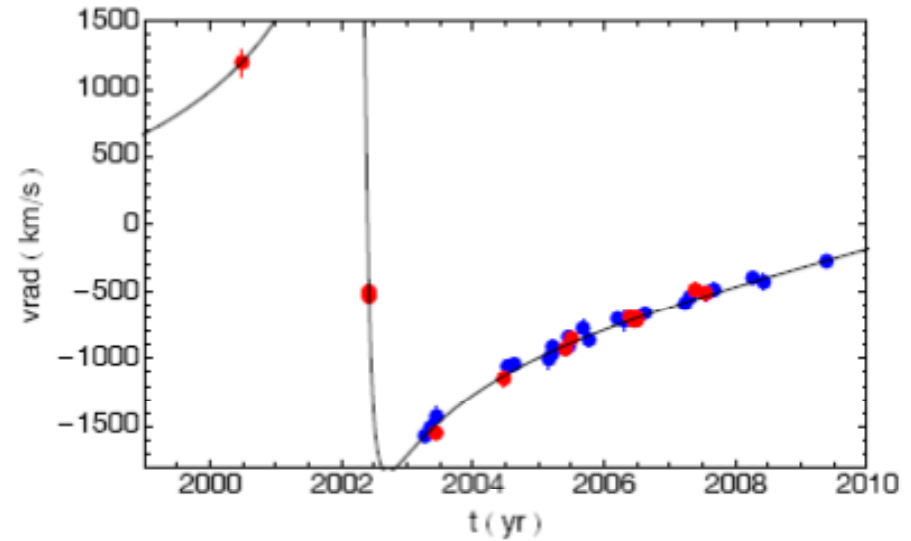
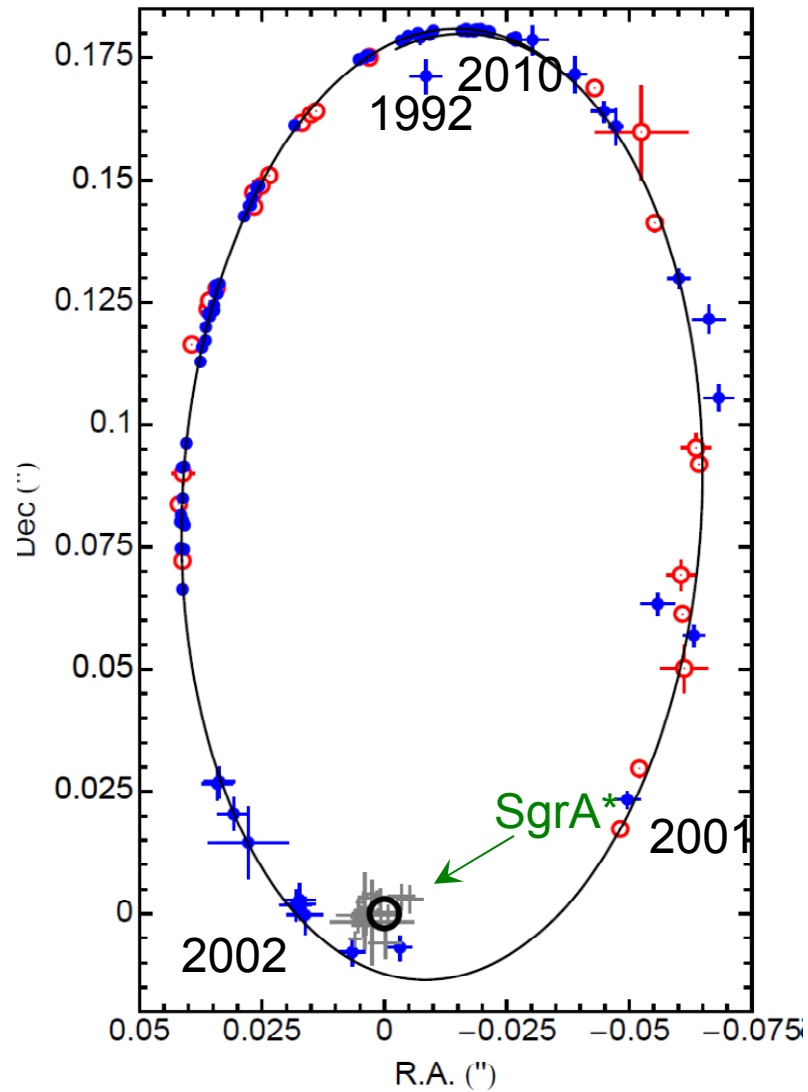
0.05 pc
= 0.15 al
= 55 jours-lum

Les étoiles tournant très rapidement autour d'un point massif, avec des orbites de Kepler. Sagittarius A*

Animation du mouvement des étoiles, dans le centre de la Voie Lactée



Une orbite complète: S2



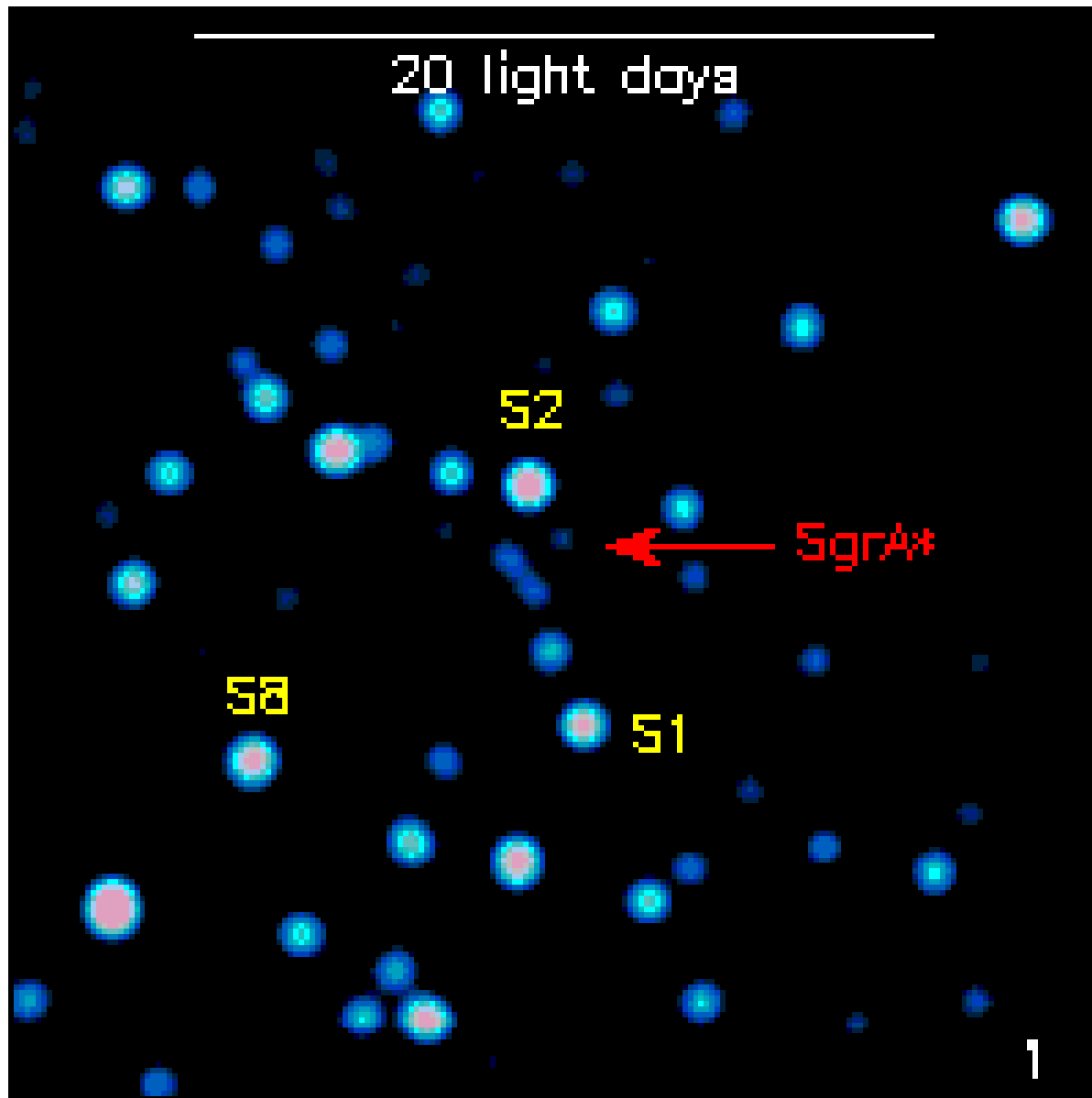
$$M_{\bullet} = 4.30(\pm 0.20)_{\text{stat}}(\pm 0.30)_{\text{sys}} \times 10^6 M_{\odot}$$

$$R_0 = 8.28(\pm 0.15)_{\text{stat}}(\pm 0.29)_{\text{sys}} \text{ kpc}$$

Parameter	Value
a	$0.1246'' \pm 0.0019''$
e	0.8831 ± 0.0034
i	$134.87^{\circ} \pm 0.78^{\circ}$
Ω	$226.53^{\circ} \pm 0.72^{\circ}$
ω	$64.98^{\circ} \pm 0.81^{\circ}$
t_P	2002.3293 ± 0.0066

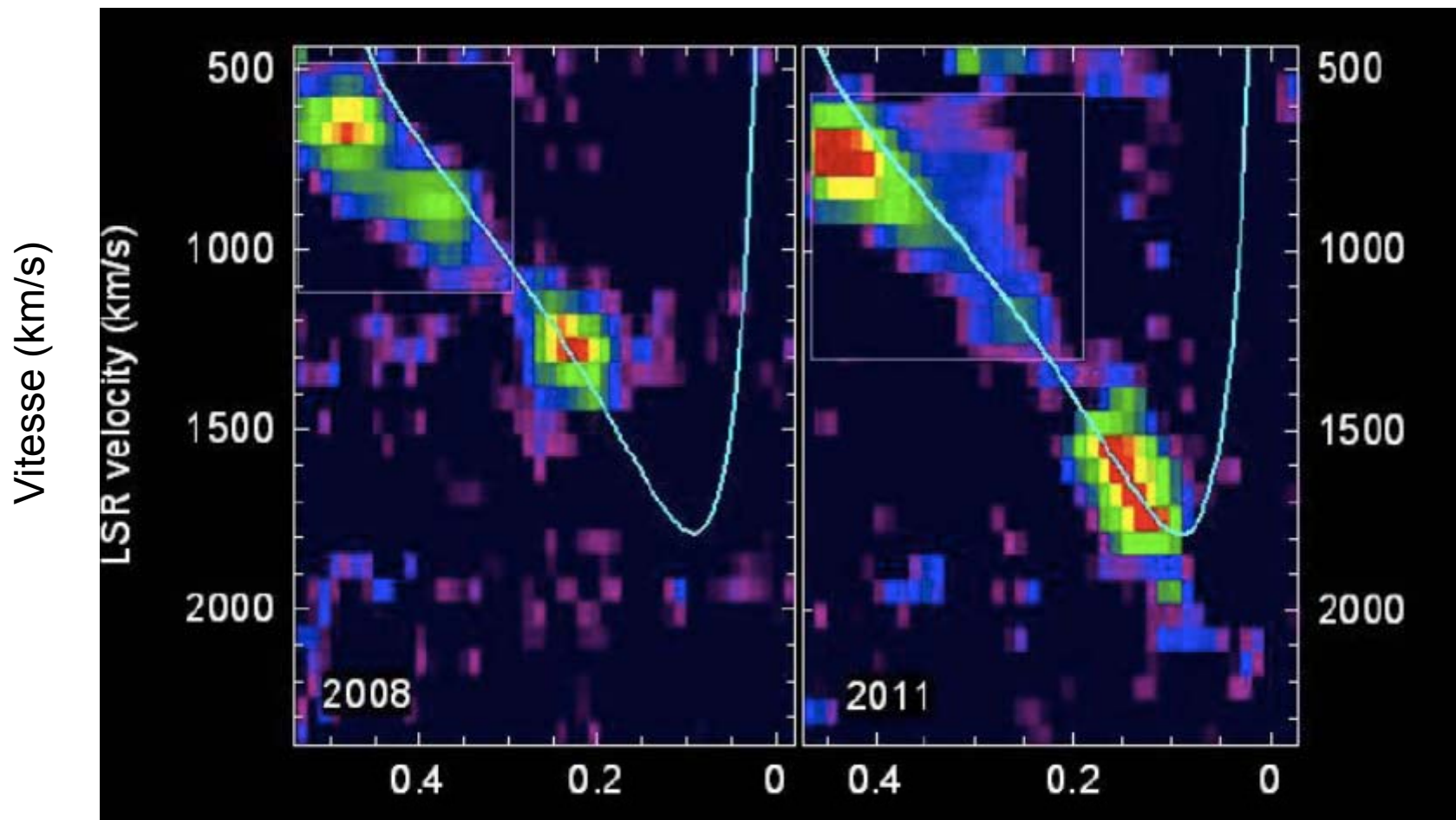
Ghez et al. 2008, Gillessen et al. 2009a,b

Sursaut Infrarouge du trou noir de la Galaxie



1.7microns, NACO, VLT, 30min, May 2003

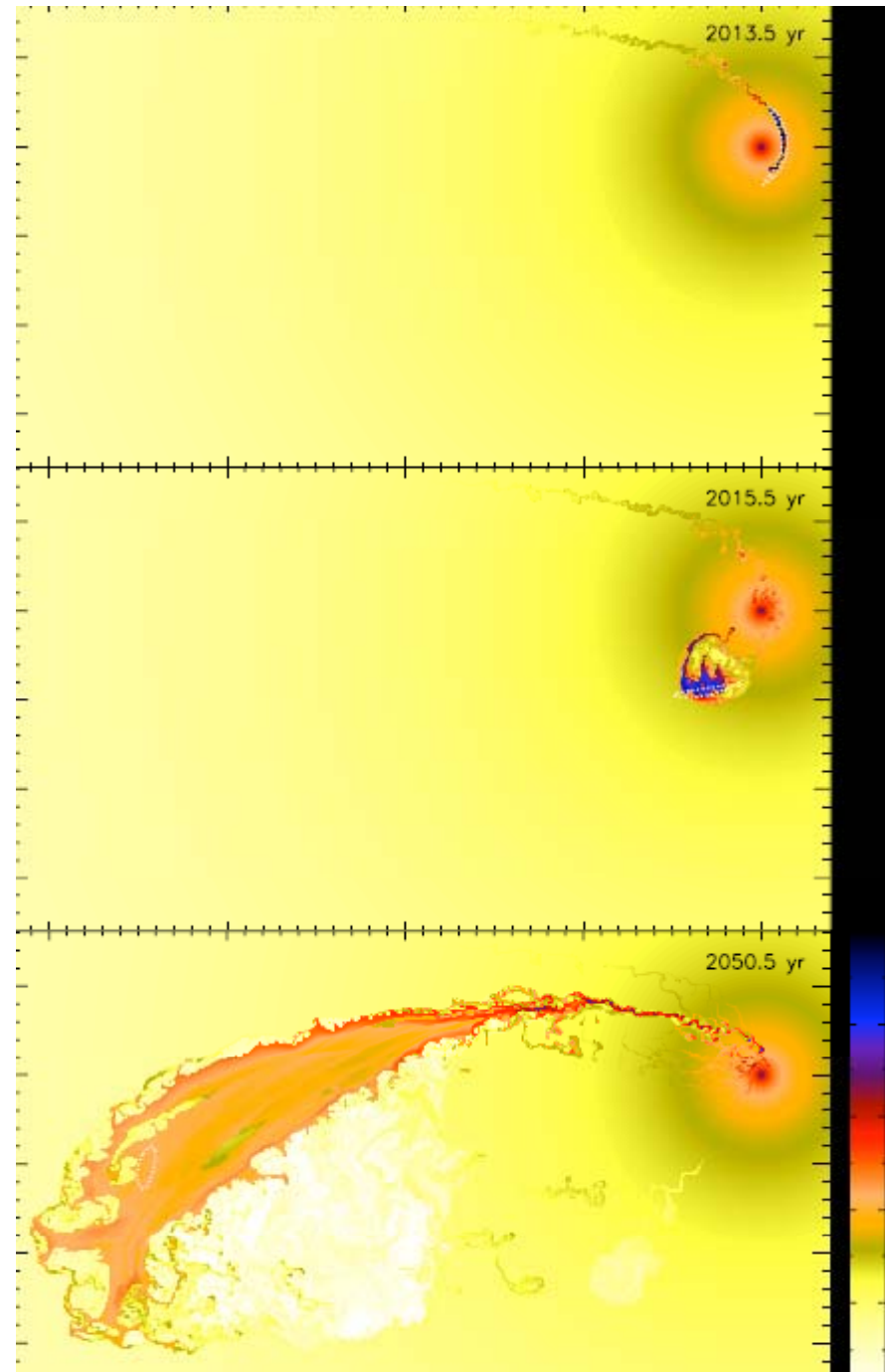
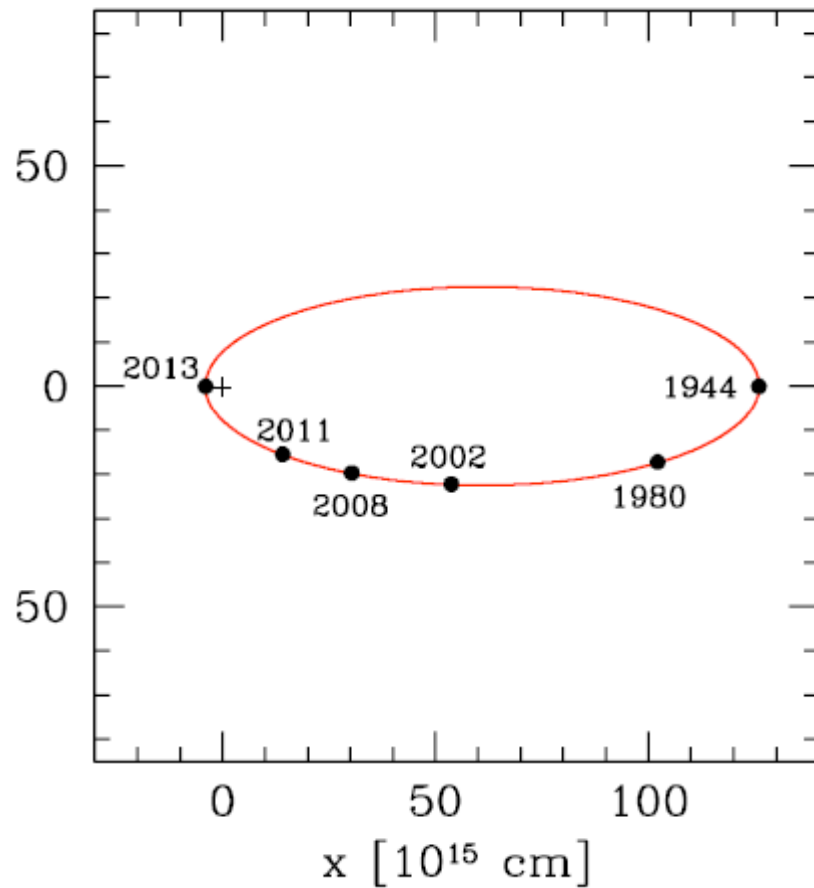
Découverte d'un nuage de gaz en 2011



Distance au trou noir en arcsec (=0.1 al)

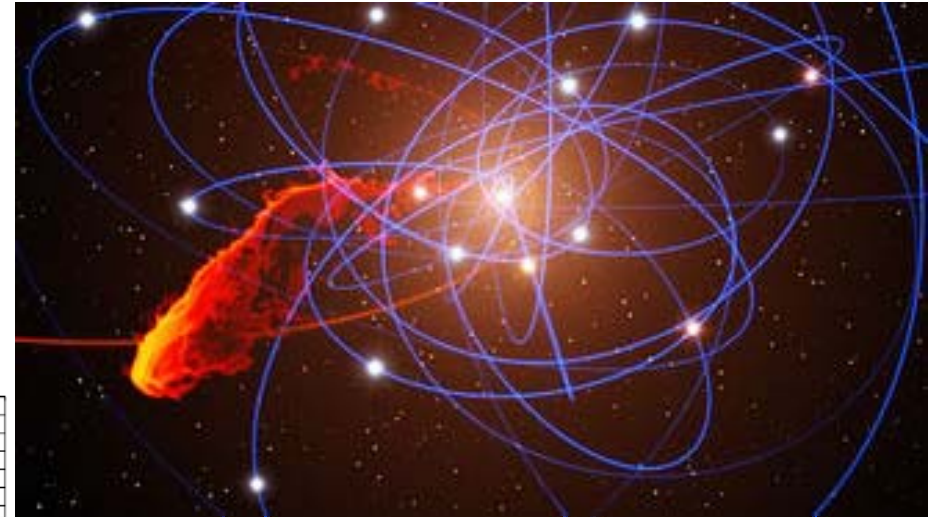
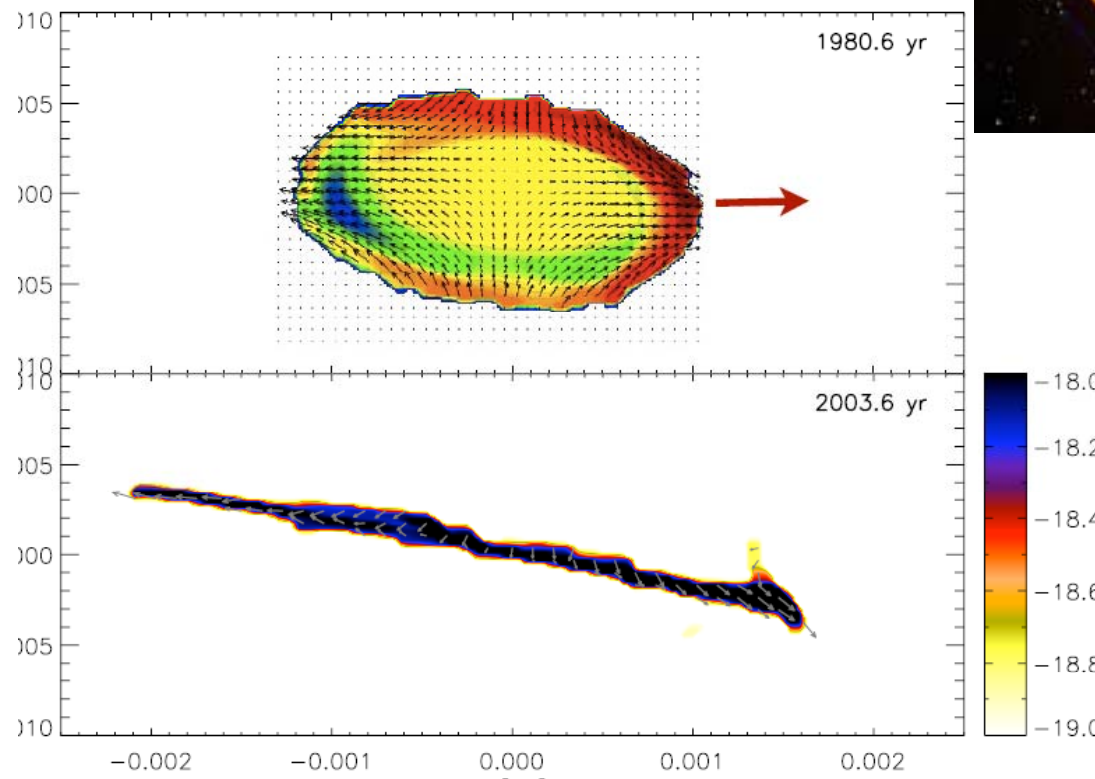
Orbite du nuage de gaz ($10^{-5} M_{\odot}$)

137 ans de période



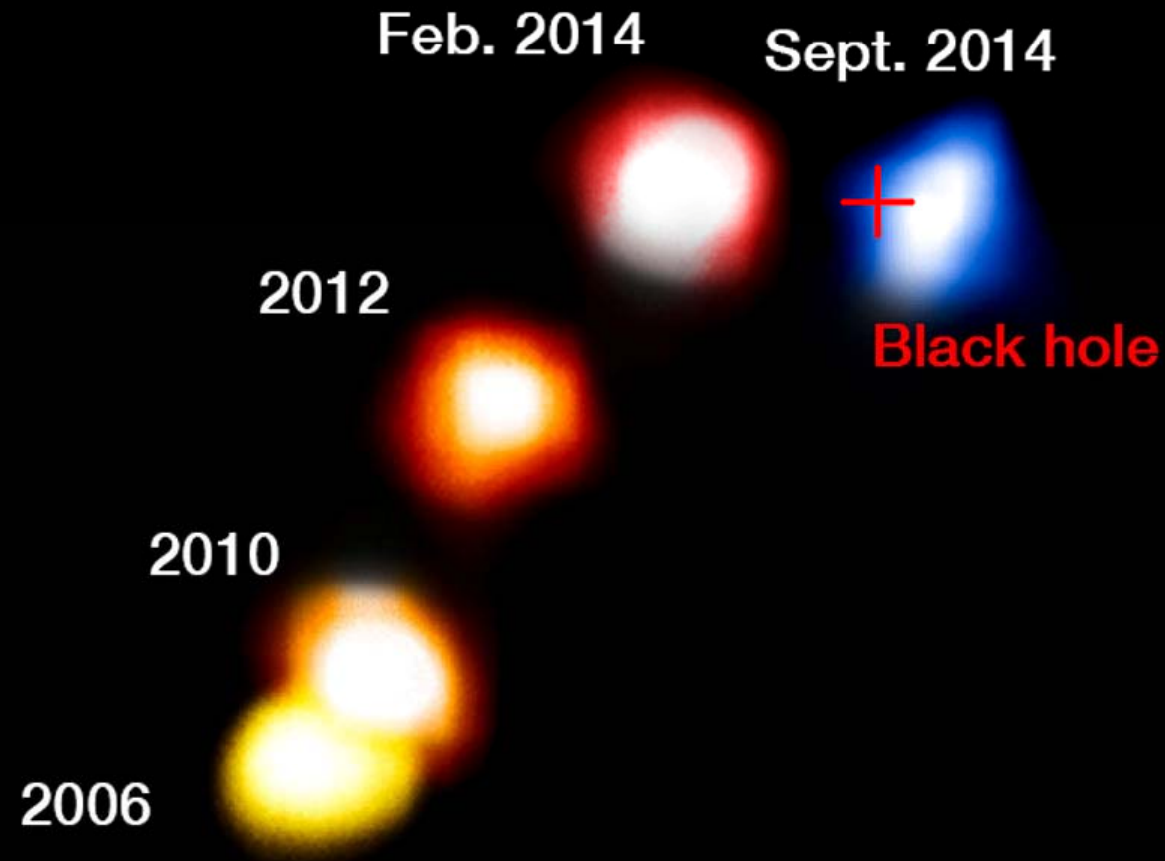
Comment le gaz est arrivé?

Destruction d'une étoile
par les forces de marée?



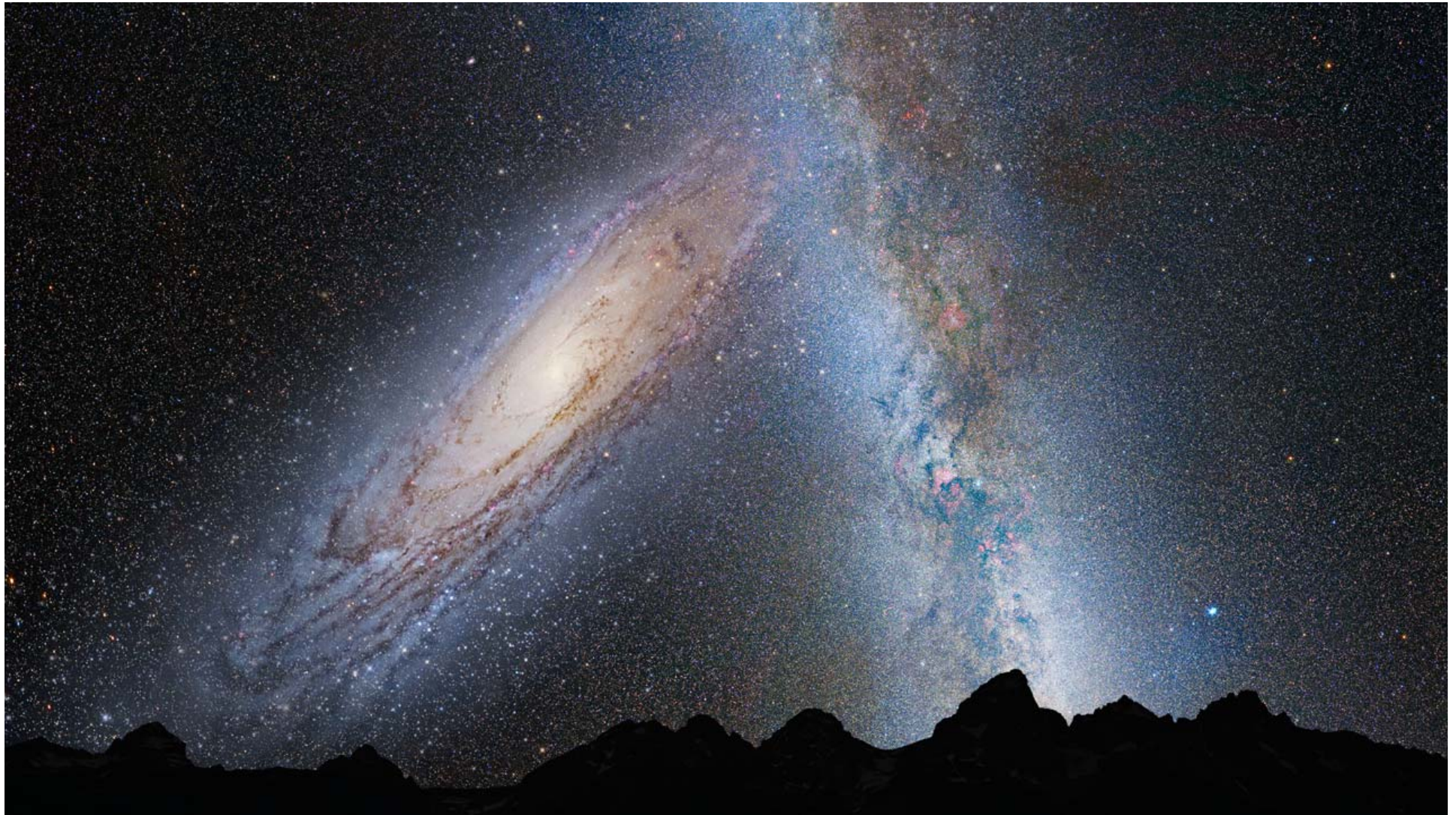
Simulations de
l'étirement du nuage
sur son orbite

Les dernières images (26 Mars 2015)



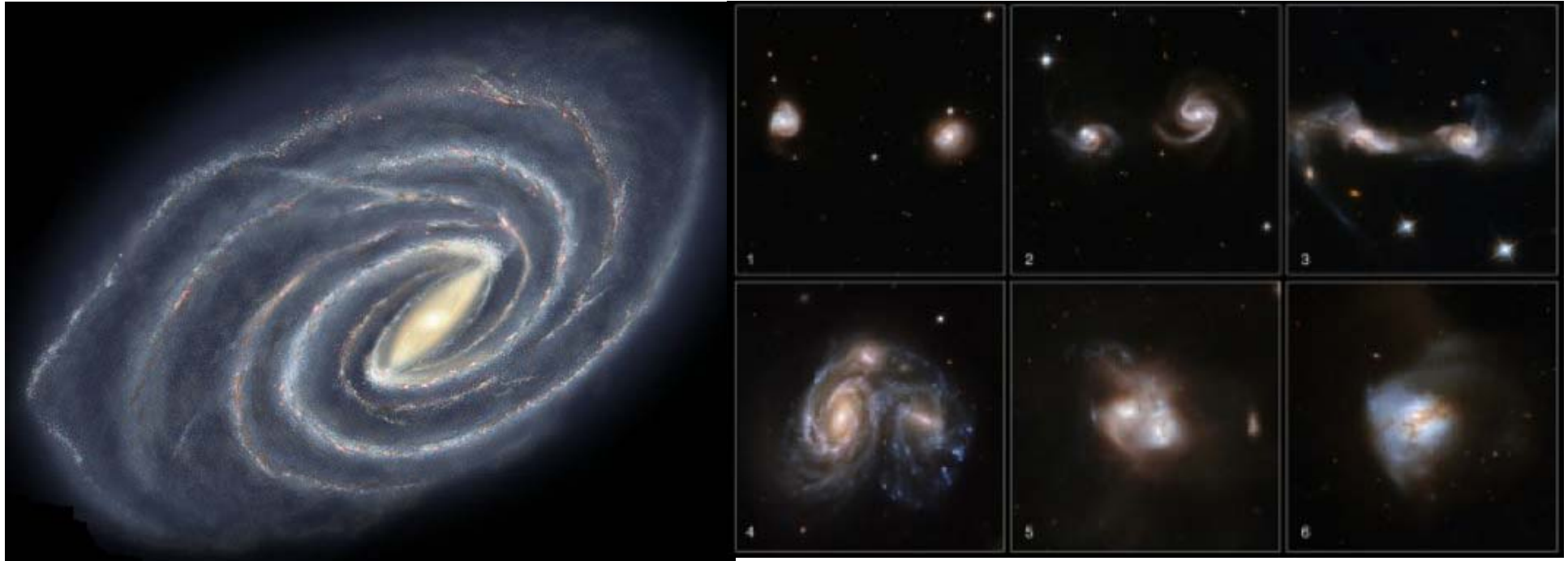
Le nuage a survécu le péricentre en Mai 2014
→ Il existe une étoile au centre

Interaction et fusion avec Andromède

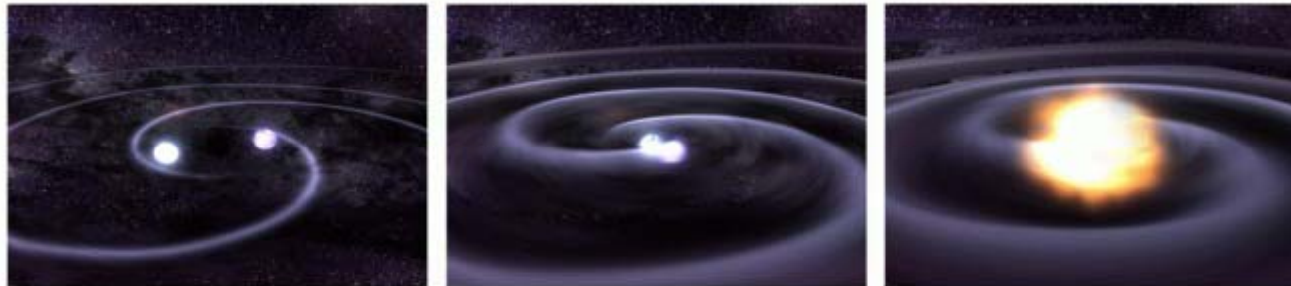


Perspectives pour la Voie lactée...

Dans quelques 3 Ma



Fusion des trous noirs



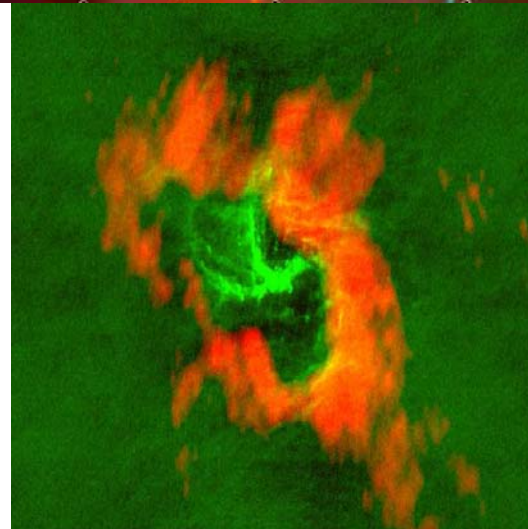
→ Ondes gravitationnelles

Autour de SgrA*, des amas d'étoiles

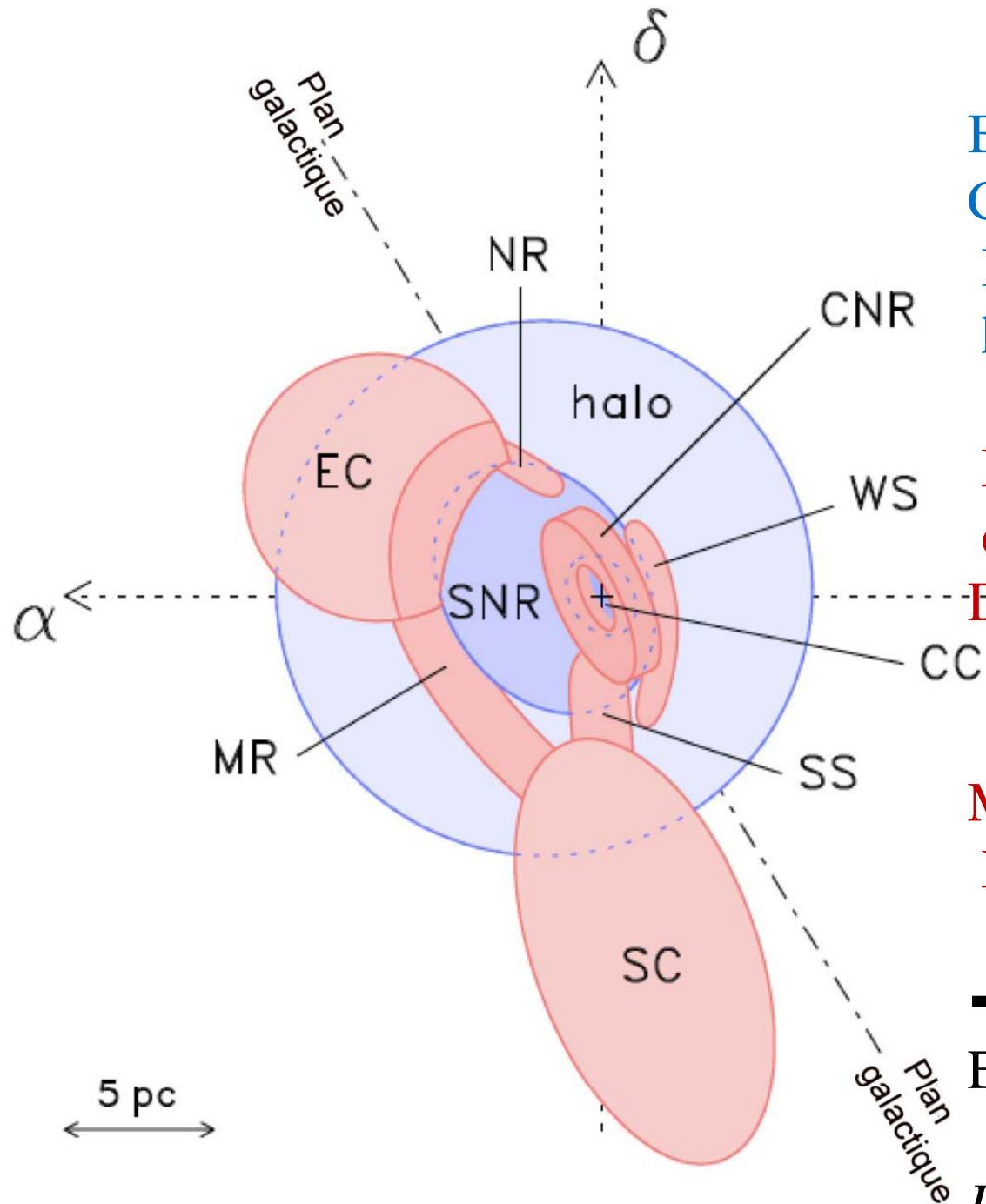
- DBXX-YY Amas d'étoiles dans le centre galactique, vus en X



CNR: circumnuclear ring
2-3pc de rayon
HCN en orange
Gaz ionisé en vert
Inclinaison de 20°/plan



Mini-spirale $60M_{\odot}$
Cavité $200M_{\odot}$
CNR 10^6M_{\odot}
 $7 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$
300K



Bleu gaz ionisé diffus

CC: cavité centrale

Reste de supernova (SNR) et halo

En rouge, le gaz moléculaire dense, dont CNR et une série

De nuages (EC, SC),

MR: Molecular Ridge

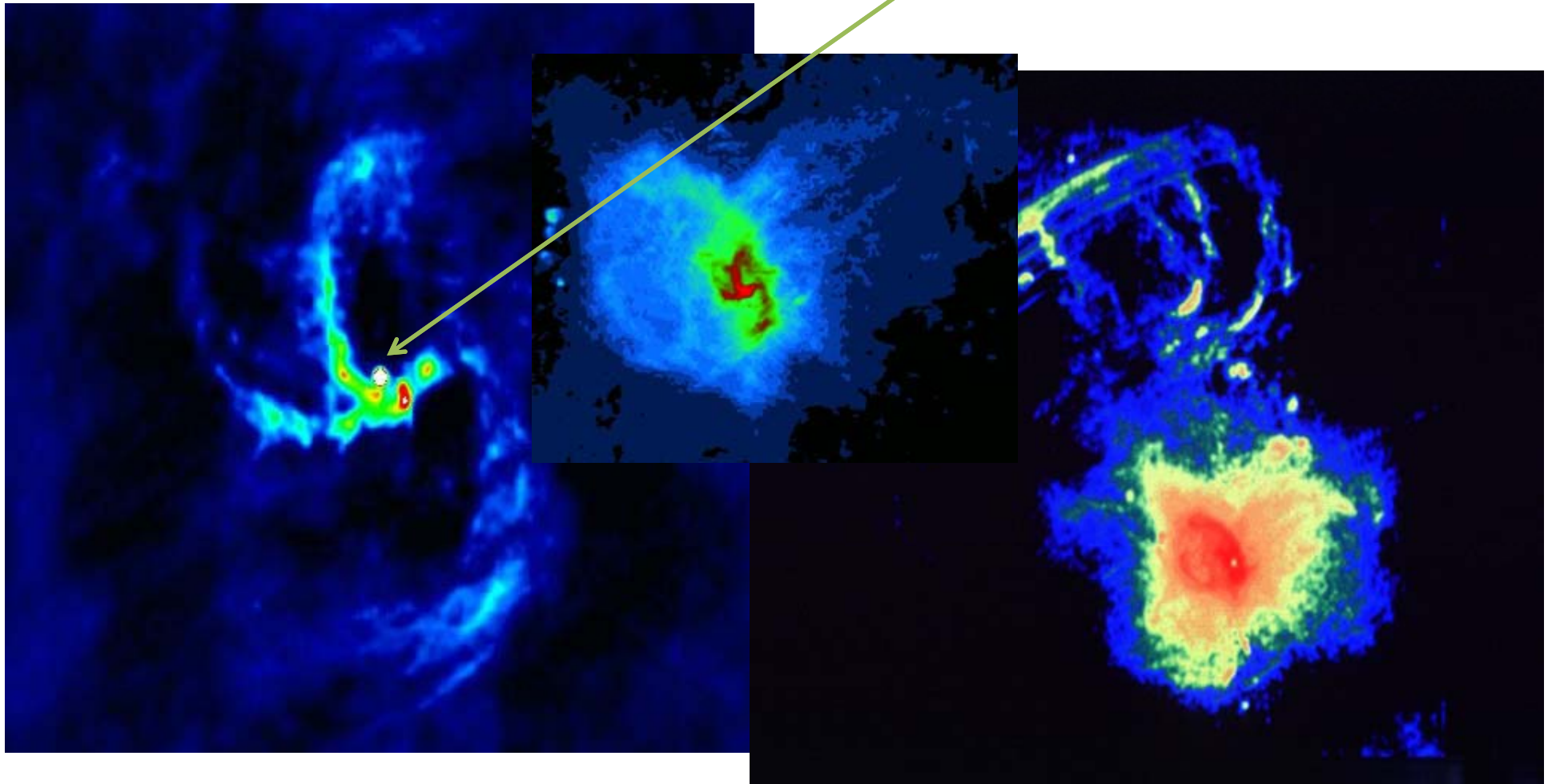
NR North Ridge, etc.

→ Formation d'étoiles
Et rétro-action

D'après Ferrière (2012) ²¹

Emission radio du centre galactique

Bien que $L = 10^{-9} L_{\text{Eddington}}$, SgrA* radio source notable



Mini-spirale de gaz ionisé

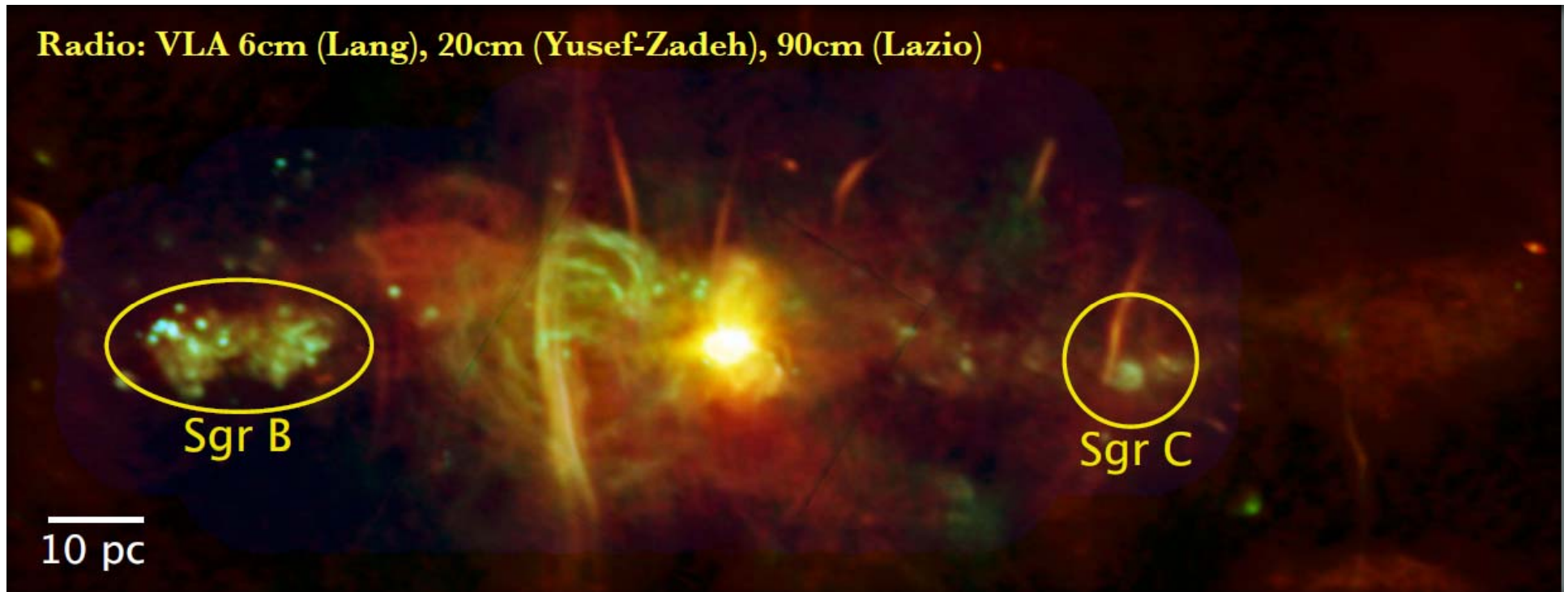
Filaments radio non-thermiques, synchrotron

Filaments pouvant être extrêmement fins, souvent perpendiculaires au plan de la Galaxie, mais pas toujours

Pendant 20 ans, on pensait à un champ galactique poloidal

Mais ce qui domine est la formation des jeunes étoiles

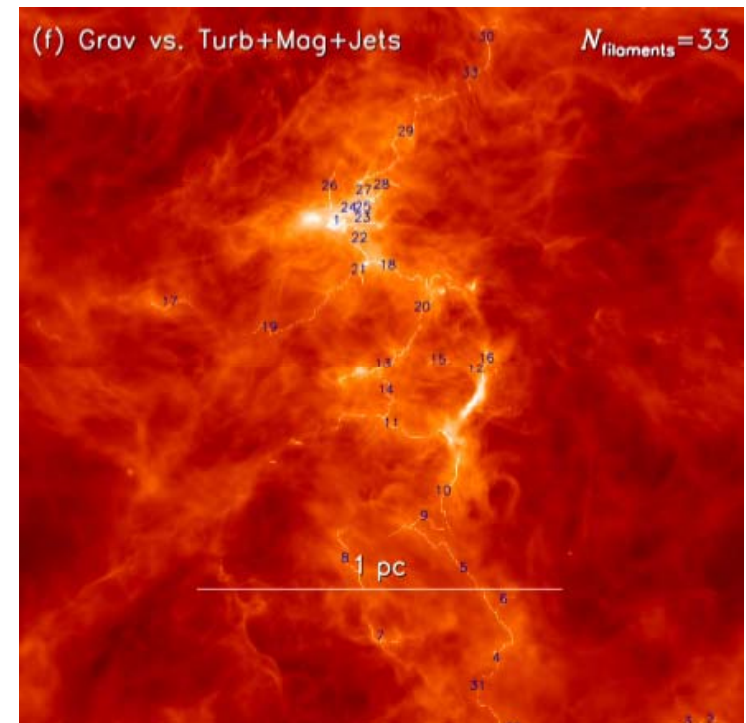
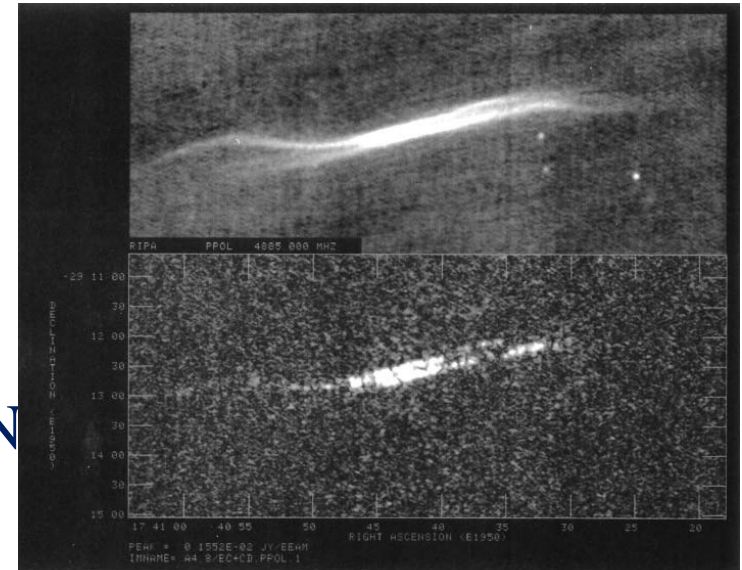
Radio: VLA 6cm (Lang), 20cm (Yusef-Zadeh), 90cm (Lazio)



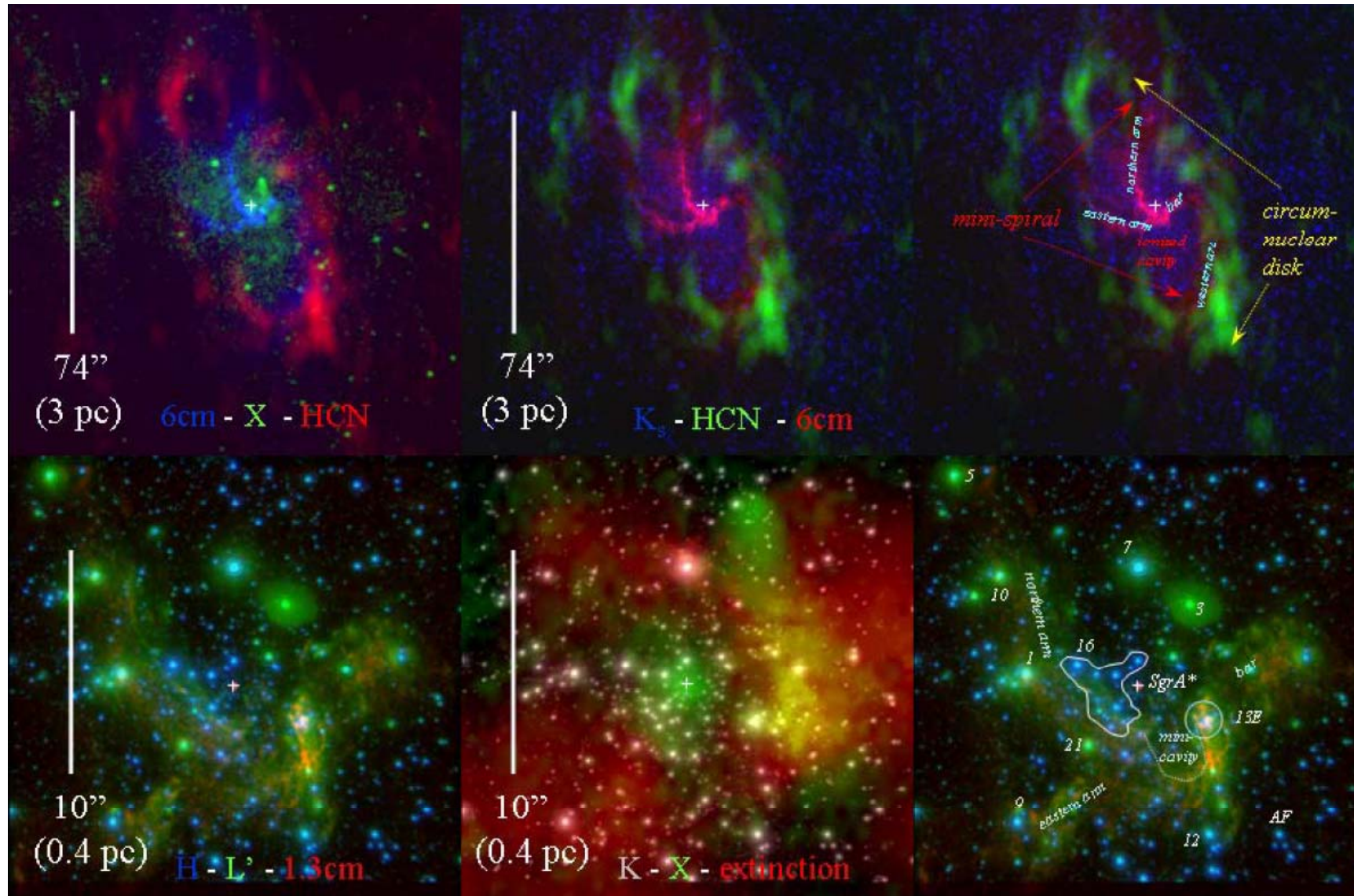
Processus

- Champ B galactique, reconnections
 - Ejection de gaz ionisé, magnétisé par le TN
 - Interactions avec les nuages moléculaires
-
- En fait Champ B moyen faible, mais forte turbulence, forte vorticité
 - Simulations: durée de vie des vortex 10^{6-7} ans, r -amplification du champ B
 - Echelle caractéristique 10pc

Federrath 2015



Zoom à l'intérieur de l'anneau moléculaire

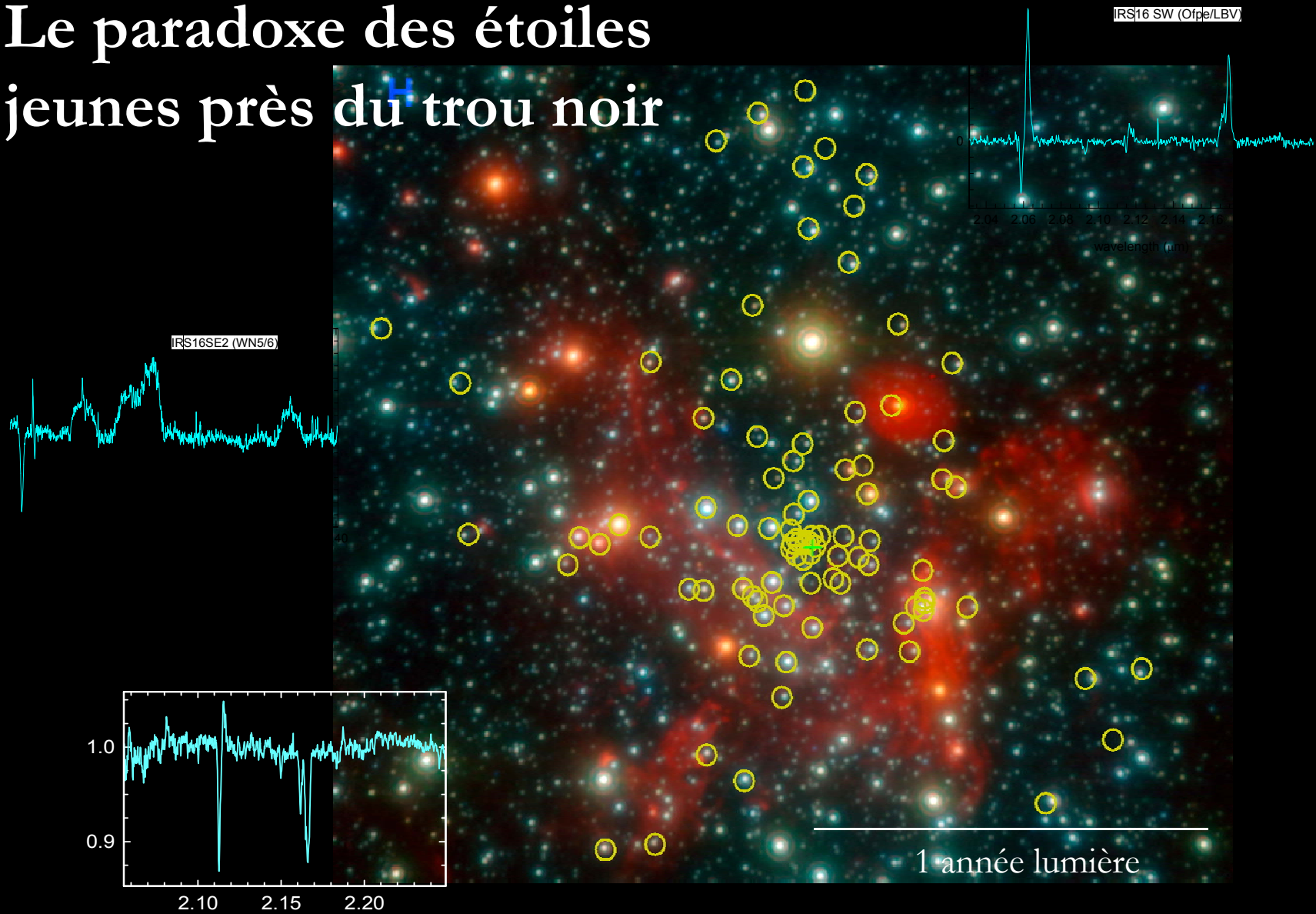


Genzel et al 2010

Le paradoxe des étoiles jeunes près du trou noir



Le paradoxe des étoiles jeunes près du trou noir



Le paradoxe des étoiles jeunes près du trou noir

~180 étoiles OB dans le parsec central !

Elles pourraient rendre compte du flux FIR, UV et EUV du centre Galactique et de l'excitation/ionisation de la région HII de SgrA West



1 année lumière

Le paradoxe des étoiles jeunes près du trou noir

*Montrent un
mouvement
ordonné*



Le paradoxe des étoiles jeunes près du TN

Pour former des étoiles, il faudrait un nuage de gaz qui ne se déchire pas par effet de marée

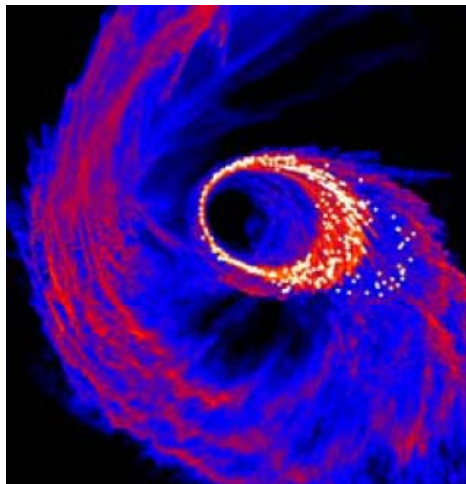
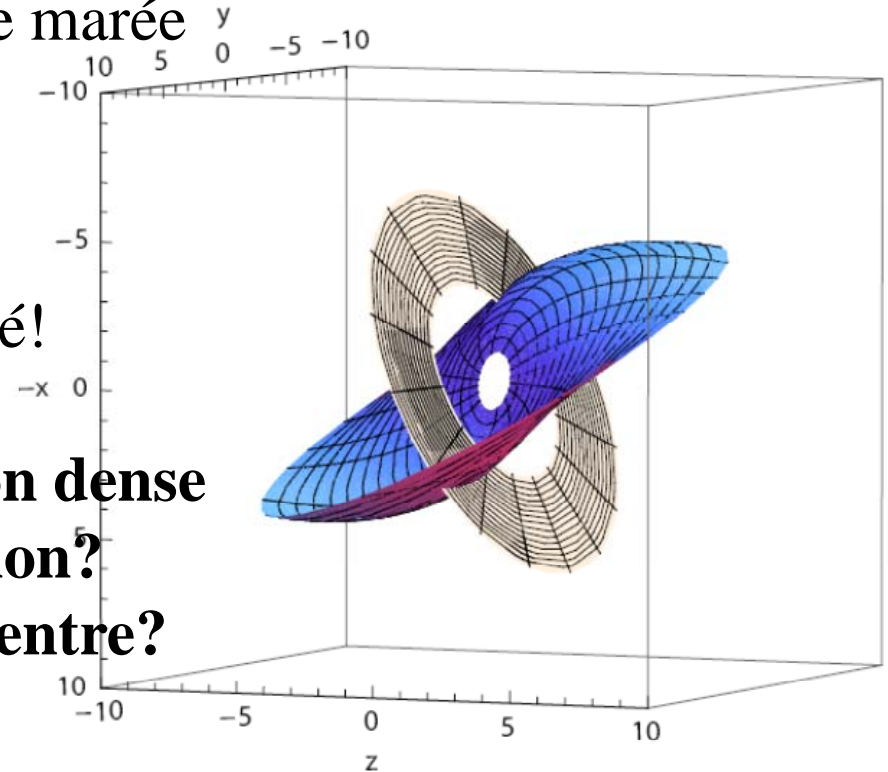
$$n_{\text{Roche}} \sim 6 \cdot 10^{10} (R/0.1\text{pc})^{-3} \text{ cm}^{-3}$$

Mais le gaz est loin d'avoir cette densité!

Formation dans un disque d'accrétion dense

Rajeunissement des étoiles par collision?

Migration, après formation loin du centre?

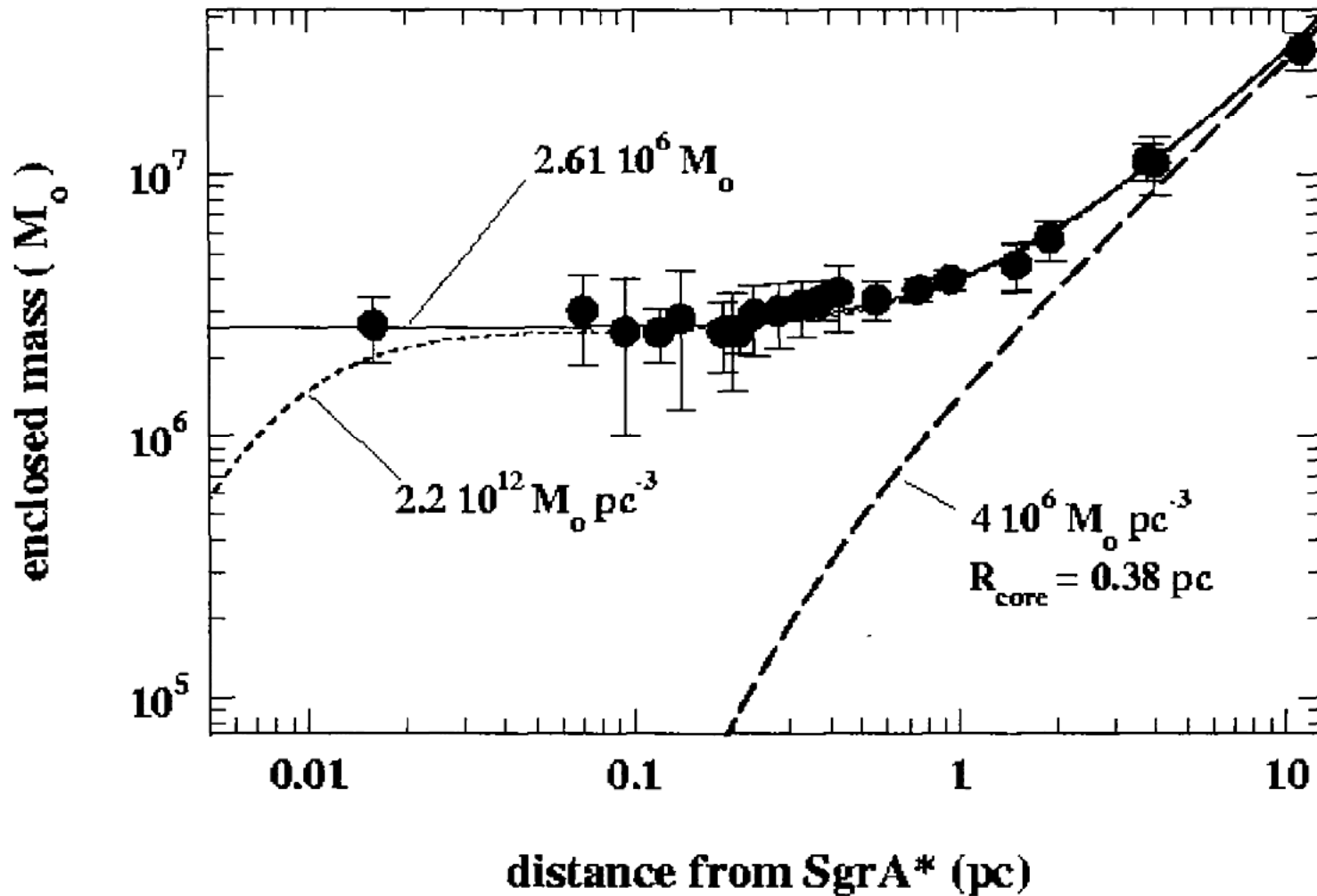


Deux disques épais et gauchis, ou bien une structure plus complexe ?

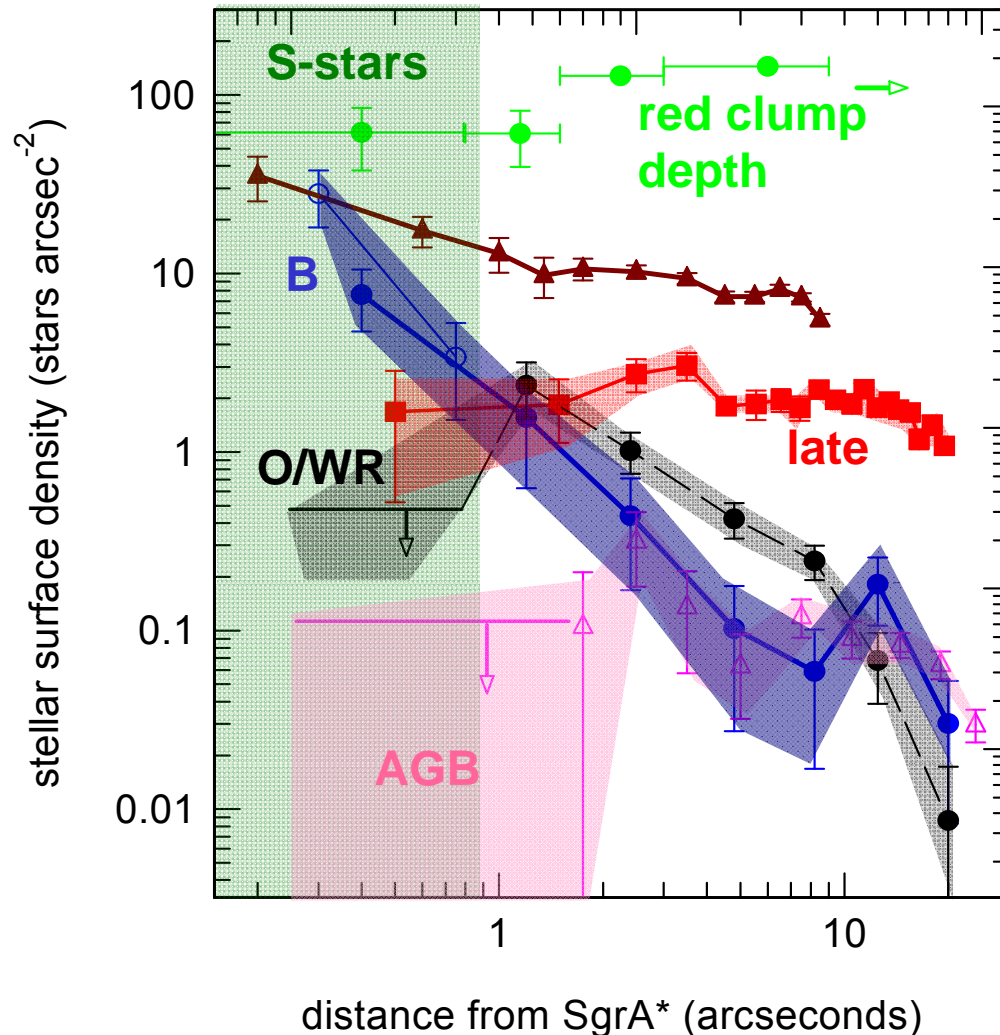
Masse versus distance au centre

Eckart & Genzel 1999: l'amas nucléaire d'étoiles ne suffit pas

- Aujourd'hui $M(\text{TN}) = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ (*Chatzopoulos et al 2015*)



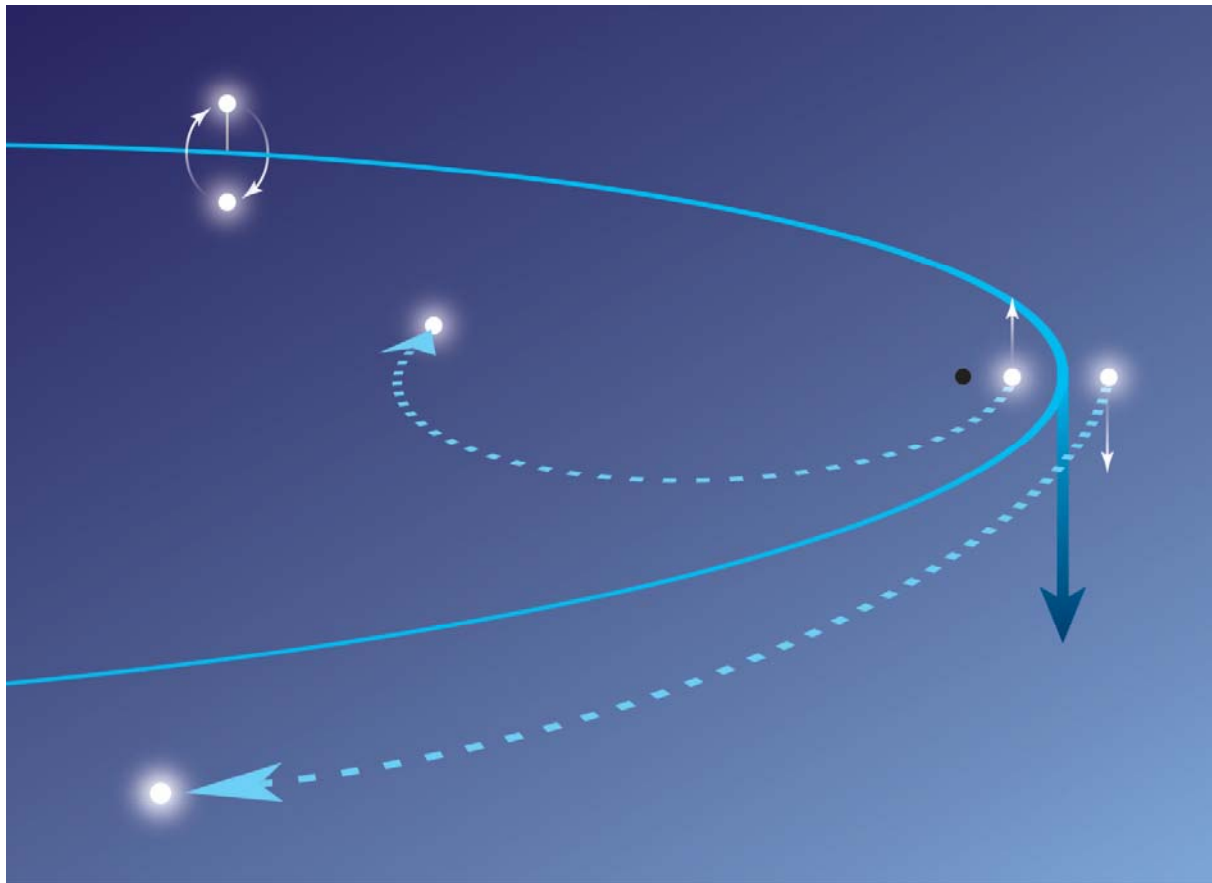
Distribution des étoiles au centre



- On trouve le **pic d'étoiles** attendu par la théorie (Young 1980) en $r^{-7/4}$
- Mais avec des variations selon le type des étoiles
- Il existe des étoiles jeunes et plus bleues au centre qui forment un pic
- Les étoiles plus vieilles, non
- Etoiles vieilles $10^6 M_{\odot}$
- Jeunes $1.5 \cdot 10^4 M_{\odot}$

Etoiles à grande vitesse

- Passage d'une étoile binaire près du trou noir
- Prédiction de Hills (1988), 1^{ère} observation en 2005 par W. Brown



Etoiles à $V > 1000\text{km/s}$
Échappent de la Galaxie

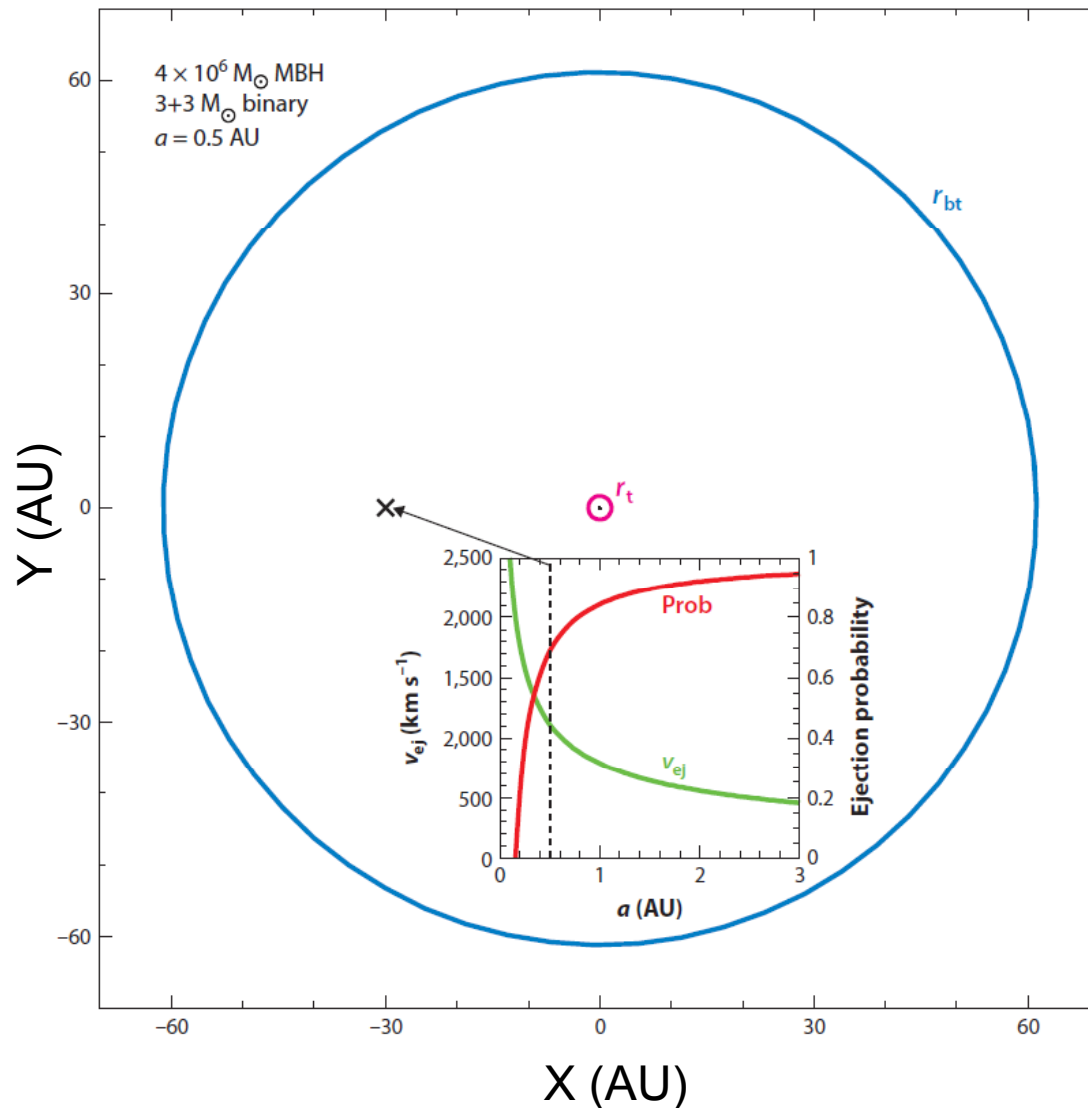
A ne pas confondre avec
Les étoiles « runaway »
Provenant du disque
($\sim 400\text{km/s}$)

Hyper Velocity Stars = HVS

Hills 1988, Yu & Tremaine 2003, Brown 2005, 2015

Etoiles à grande vitesse

- Processus de capture de Hills, taux d'éjection de $10^{-4}/\text{an}$ (Zhang 2013)



R_{bt}: rayon de marée de la binaire

R_t rayon de marée pour une étoile individuelle

Proba de 75% d'éjection

Avec la vitesse

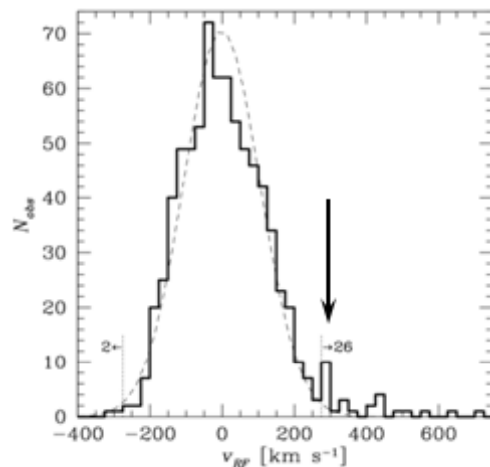
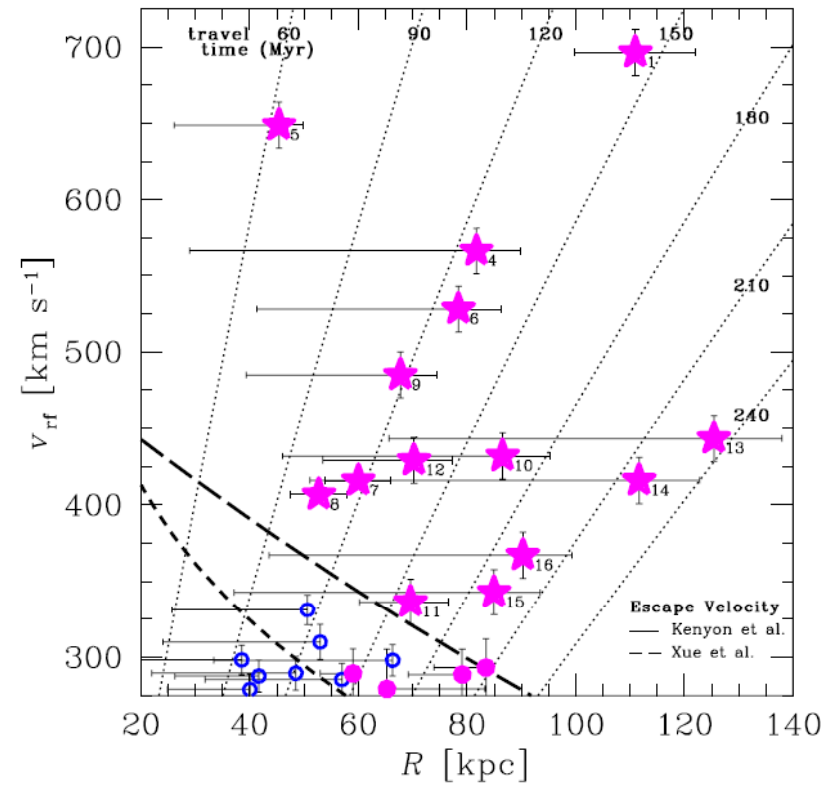
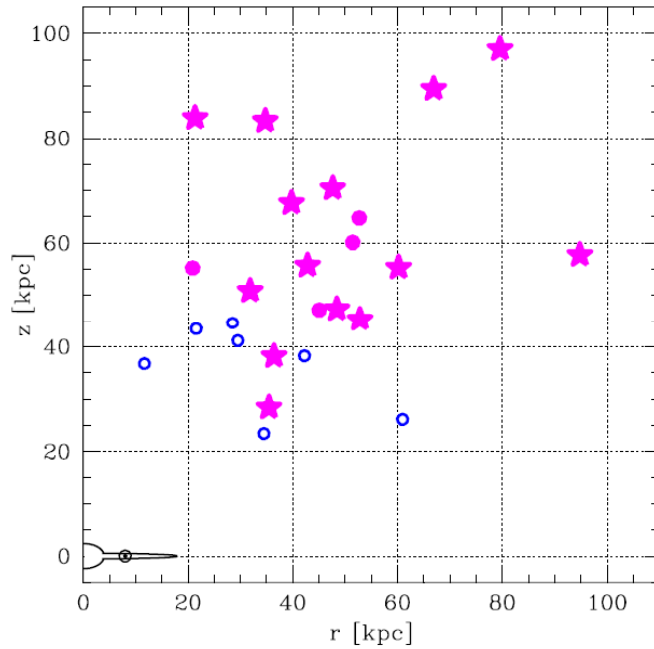
binaire de $2 \times 3 M_{\odot}$

Séparation $a = 0.5$ AU

Pour un peri-apse de 30 AU

$\rho(r) = 8/r^2$ par kpc 3

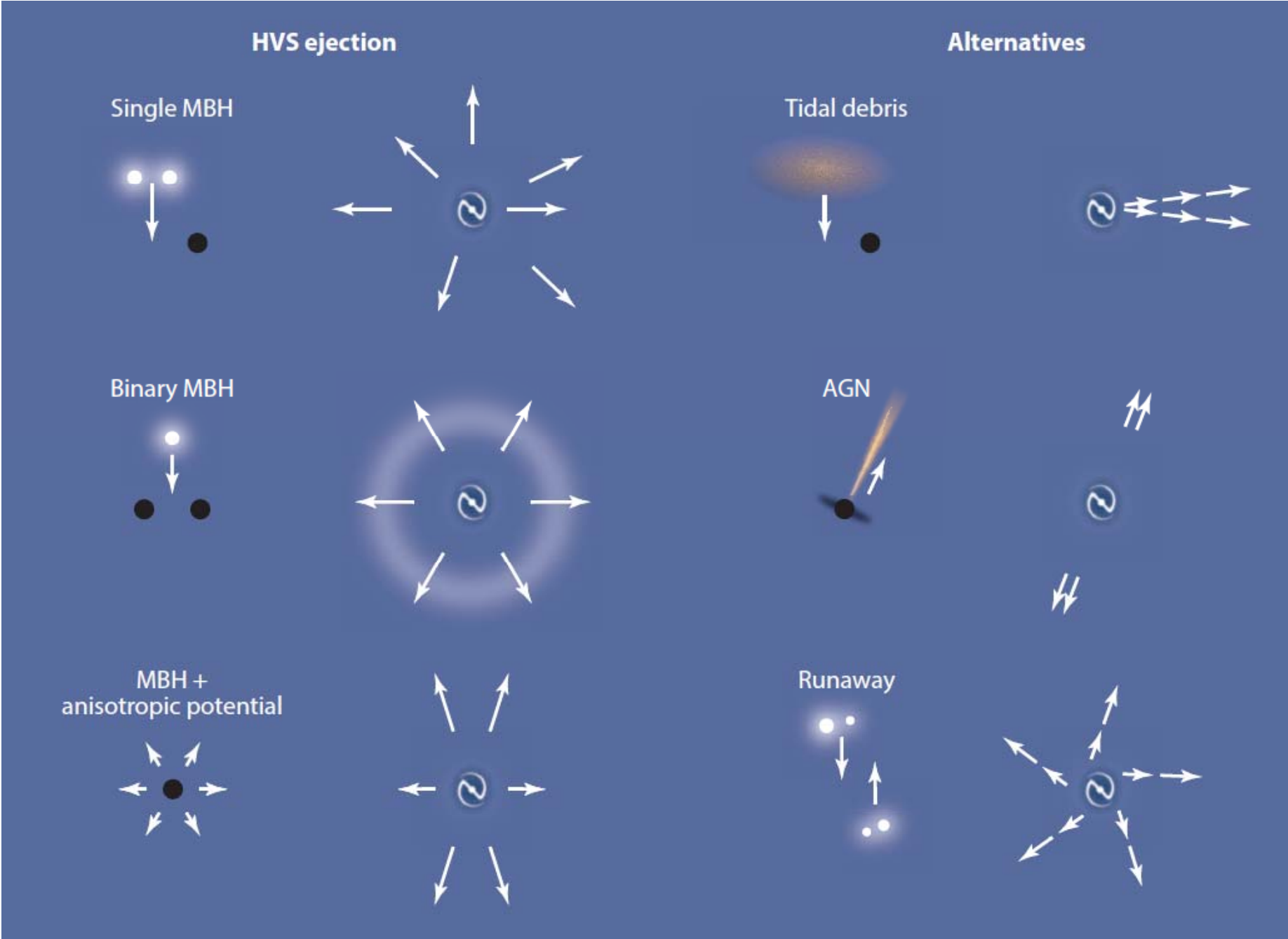
HVS: hyper velocity stars



Taux d'éjection prédit 10^{-4} /yr
 $\sim 10^3$ HVS dans 100 kpc

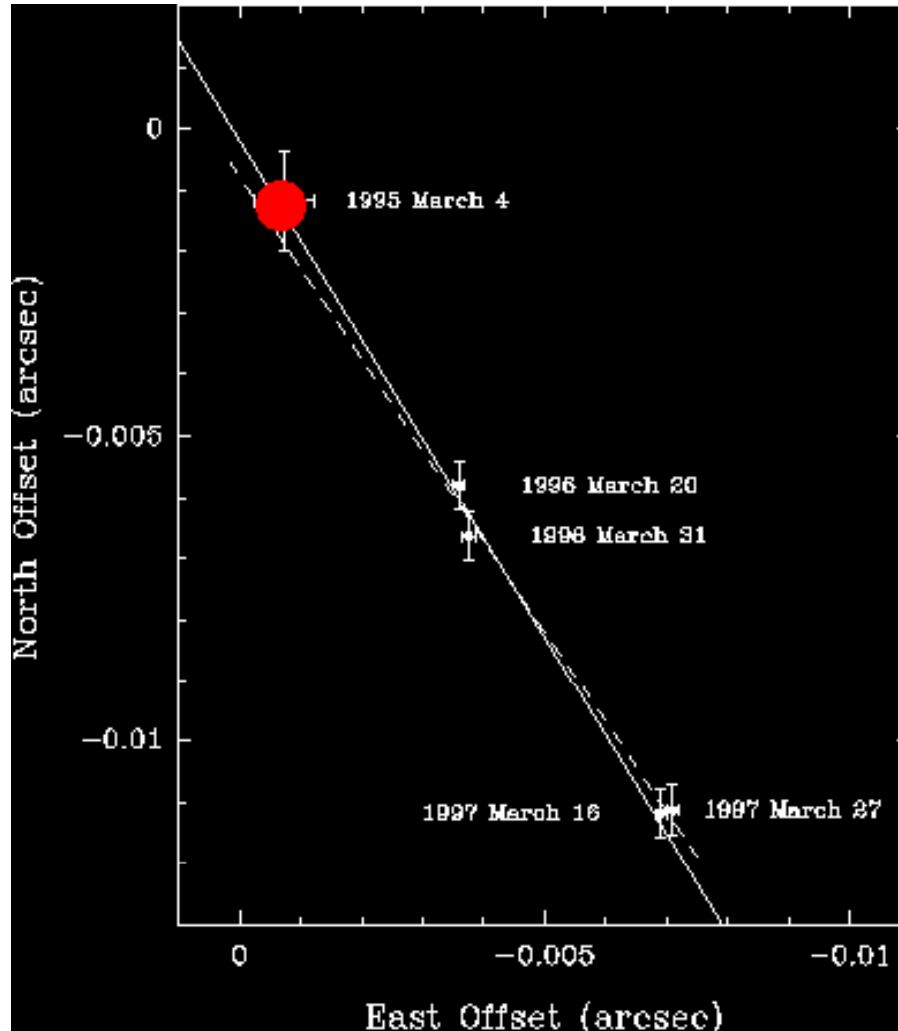
Brown et al. 2005, 2006, 2008, 2010, Hills 1989, Yu & Tremaine 2003

Différents processus produisent différentes distributions de HVS



SgrA* est-il bien le centre de la Galaxie?

Positionnement précis en VLBI



Ce que l'on voit ici est le mouvement du Soleil, par rapport aux QSO
SgrA* est fixe, immobile

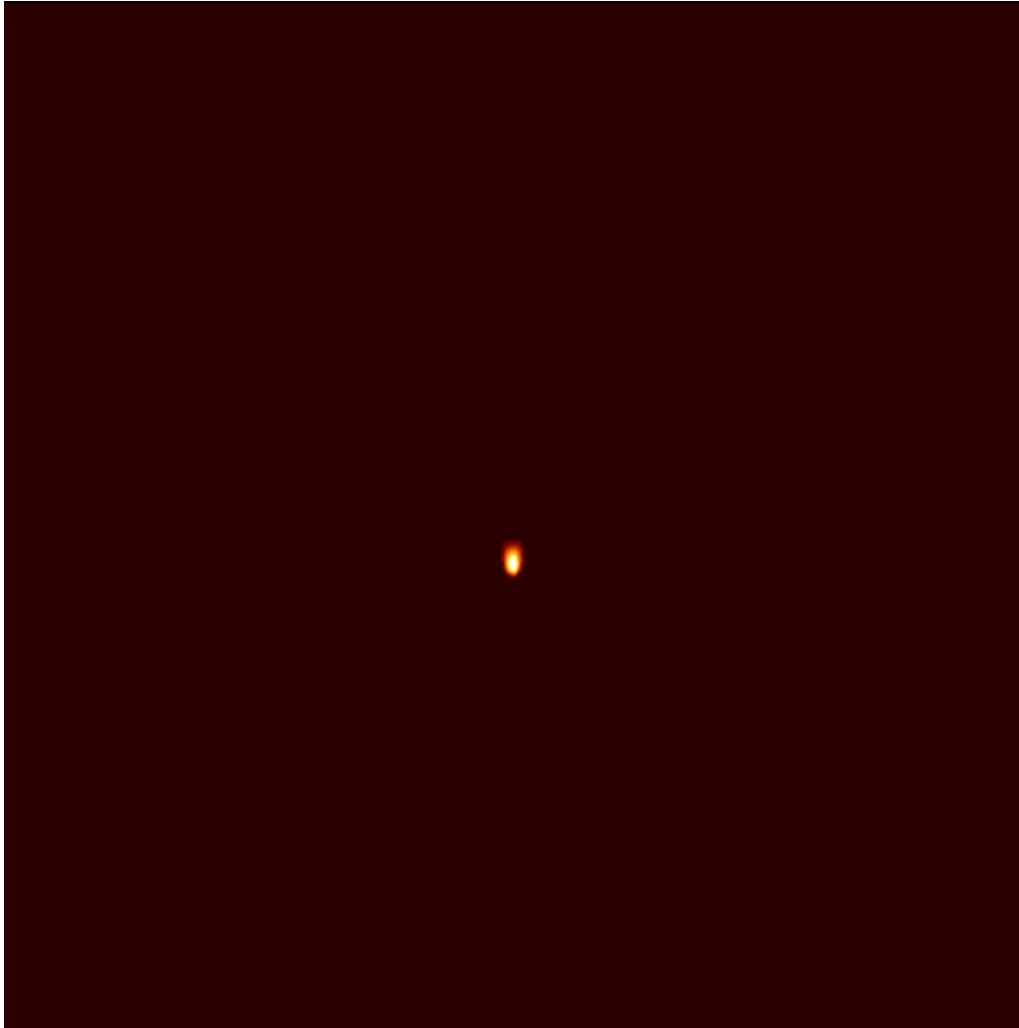
Echelle de milli-arcsec

La rotation du Soleil autour du centre se fait en 200 Myr
On voit le mouvement en quelques semaines

La position de Sagittarius A* dans le ciel à diverses époques par rapport à des quasars lointains, Reid et al 2004, 2009

SgrA* est-il bien compact?

VLBI à plusieurs longueurs d'onde, 5 à 43 GHz



L'image de SgrA* est floutée, par le milieu ionisé sur la ligne de visée

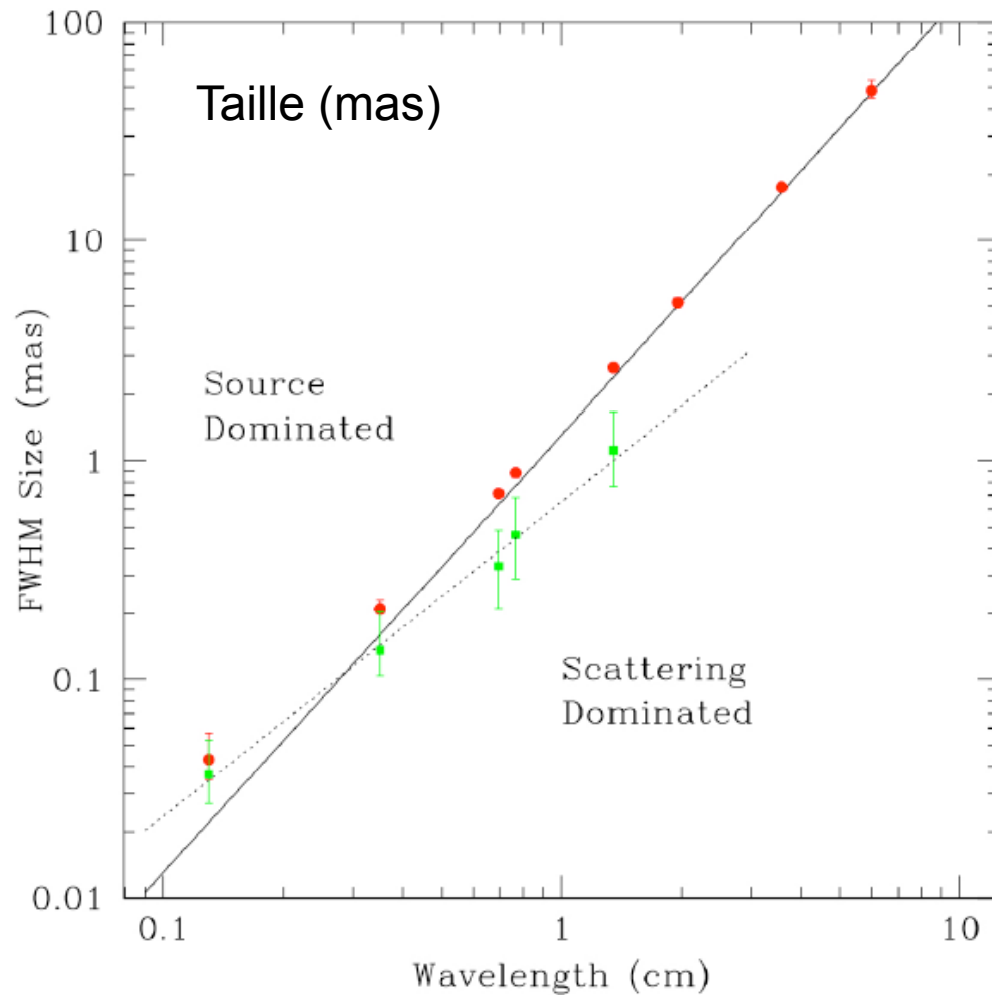
Effet varie en λ^{-2}

A haute fréquence, la diffusion est moindre

5 -43 GHz correspond à 6cm -0.7 cm

La forme de Sagittarius A* dans le ciel à diverses longueurs d'onde

Taille de SgrA* à $\lambda=1.3\text{mm}$



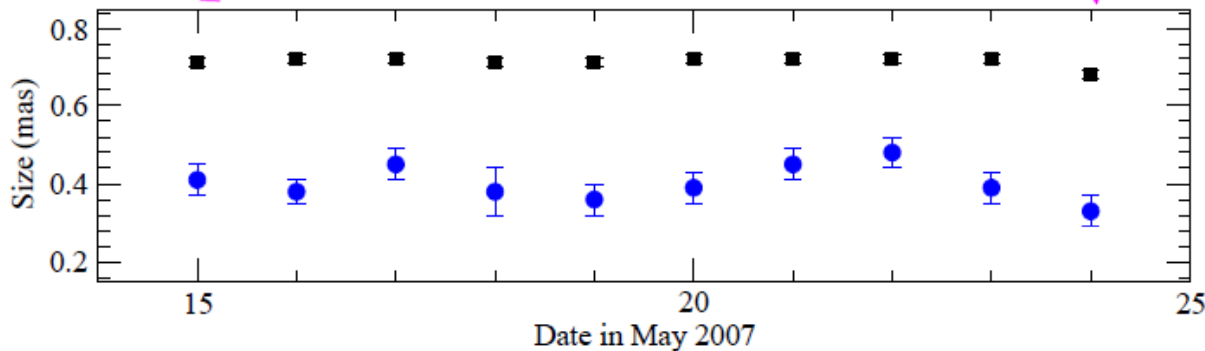
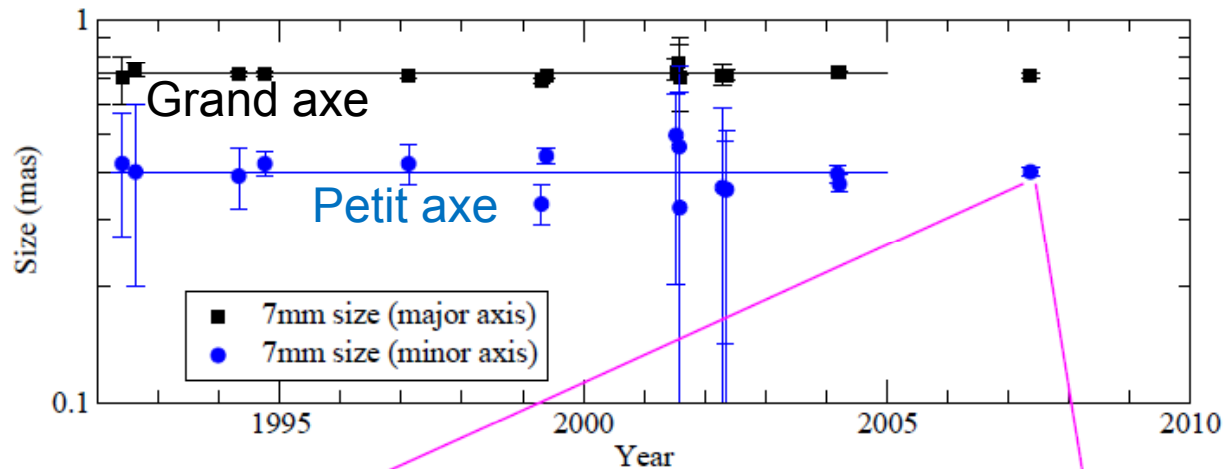
Longueur d'onde (cm)

- En rouge taille observée, suit la diffusion en λ^{-2}

En vert, taille intrinsèque, qui commence à dominer à 1.3mm

Taille $\sim 35 \mu\text{as} \sim 0.3 \text{ AU}$
 \sim taille de l'ombre du TN

Taille de SgrA* et variabilité

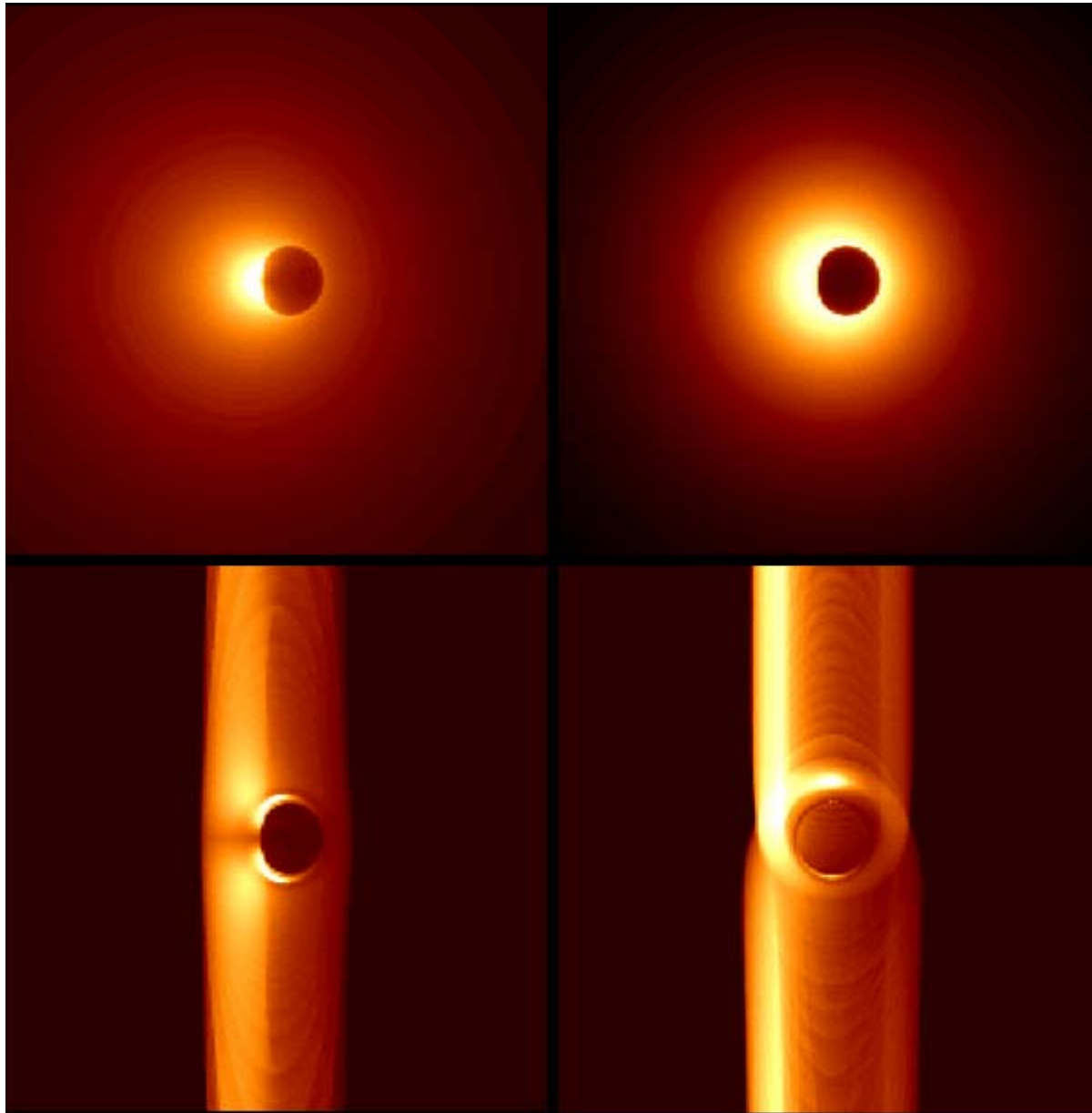


- Taille corrigée de la diffusion λ^{-2}
Taille 0.1 mas = 1AU, 150 millions de km

L'ombre du TN, environ 5 fois $R_s = 40$ millions km

On s'approche du TN!

Ombre du trou noir de SgrA*



- Différents modèles de l'émission autour de SgrA*
- (supposée $\tau \ll 1$)
- L'ombre correspond aux photons avalés par le TN (image par la lentille de l'horizon)
- La taille de l'ombre est toujours comparable
- *Falcke et al 2000*

Visibilité du trou noir de SgrA*

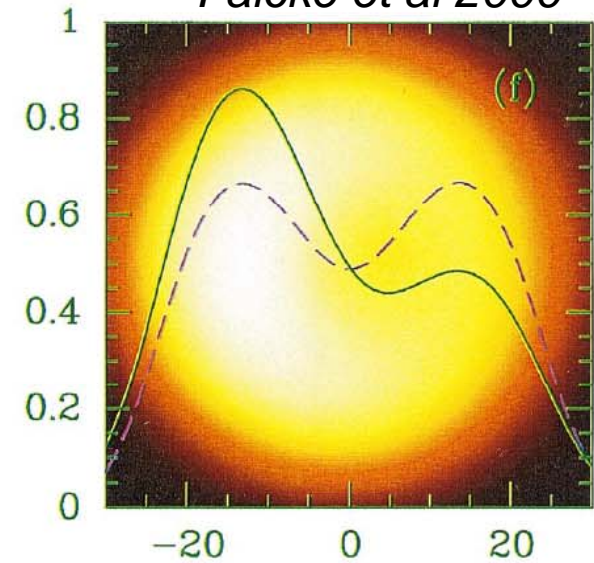
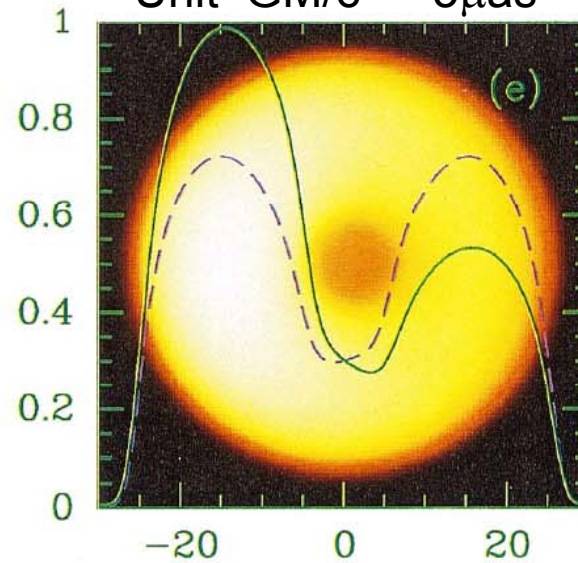
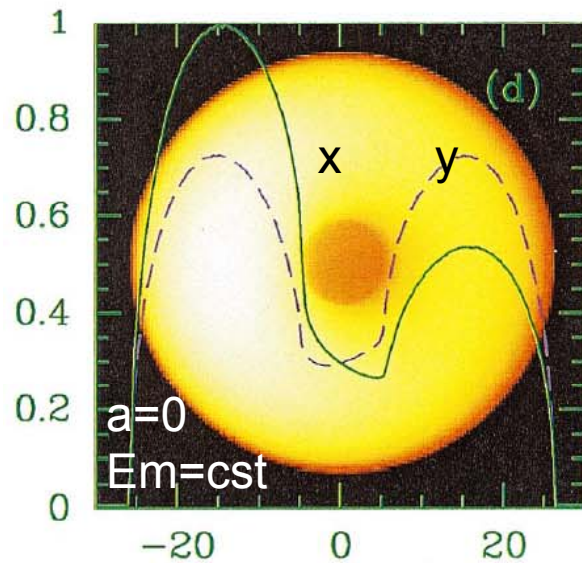
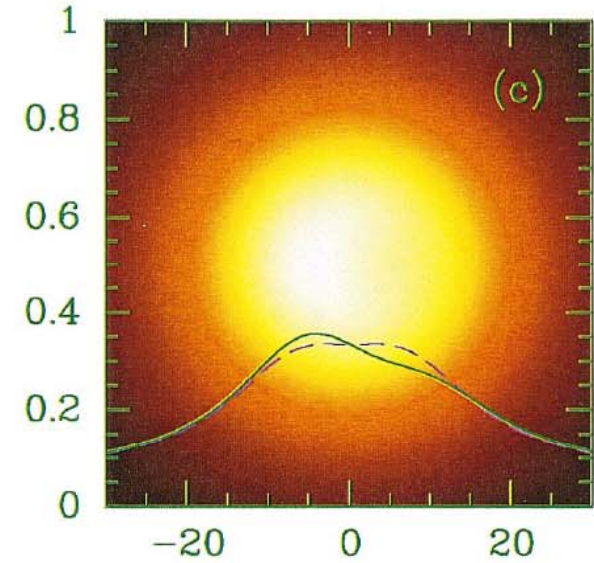
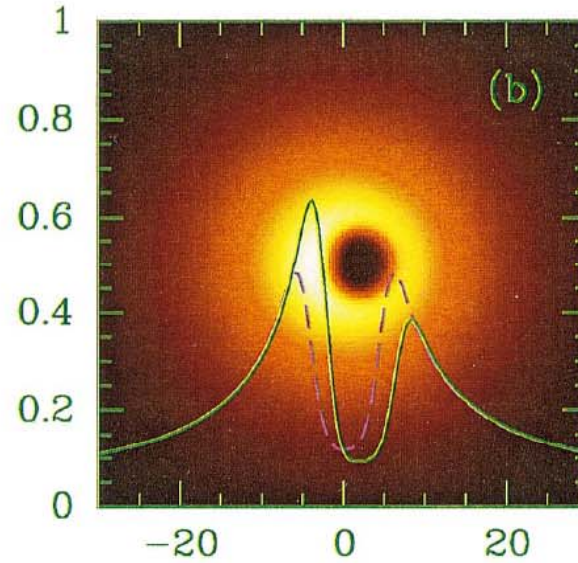
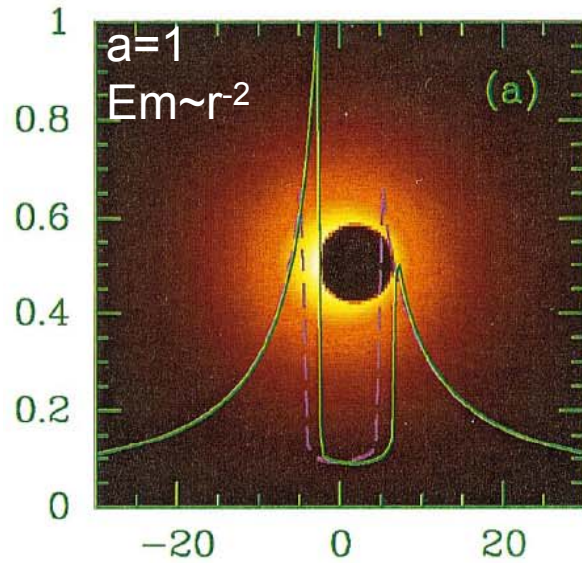
Gaz en chute libre

Modèle $i=45^\circ$

0.6 mm

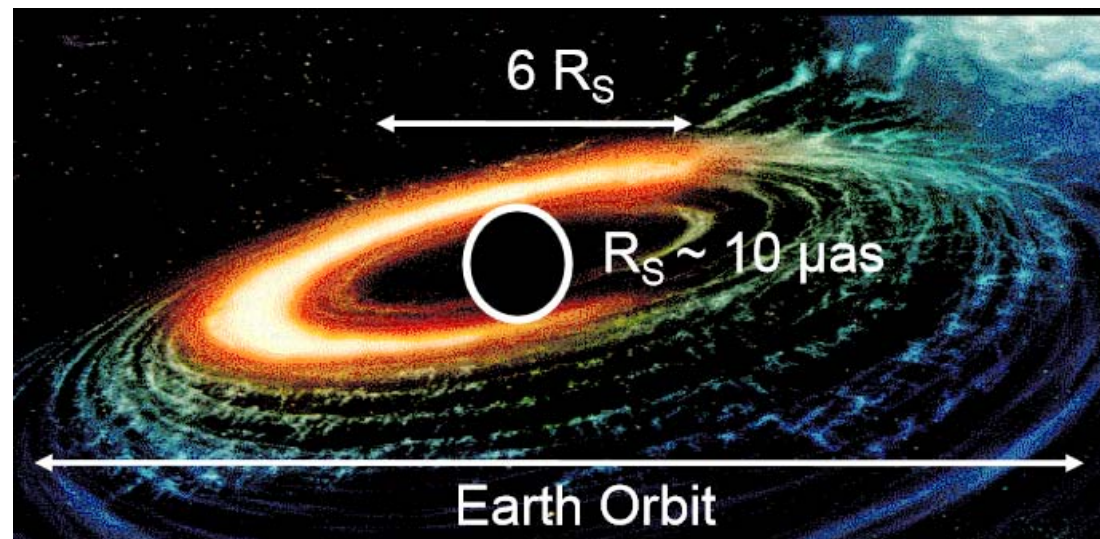
mm-VLBI

1.3mm

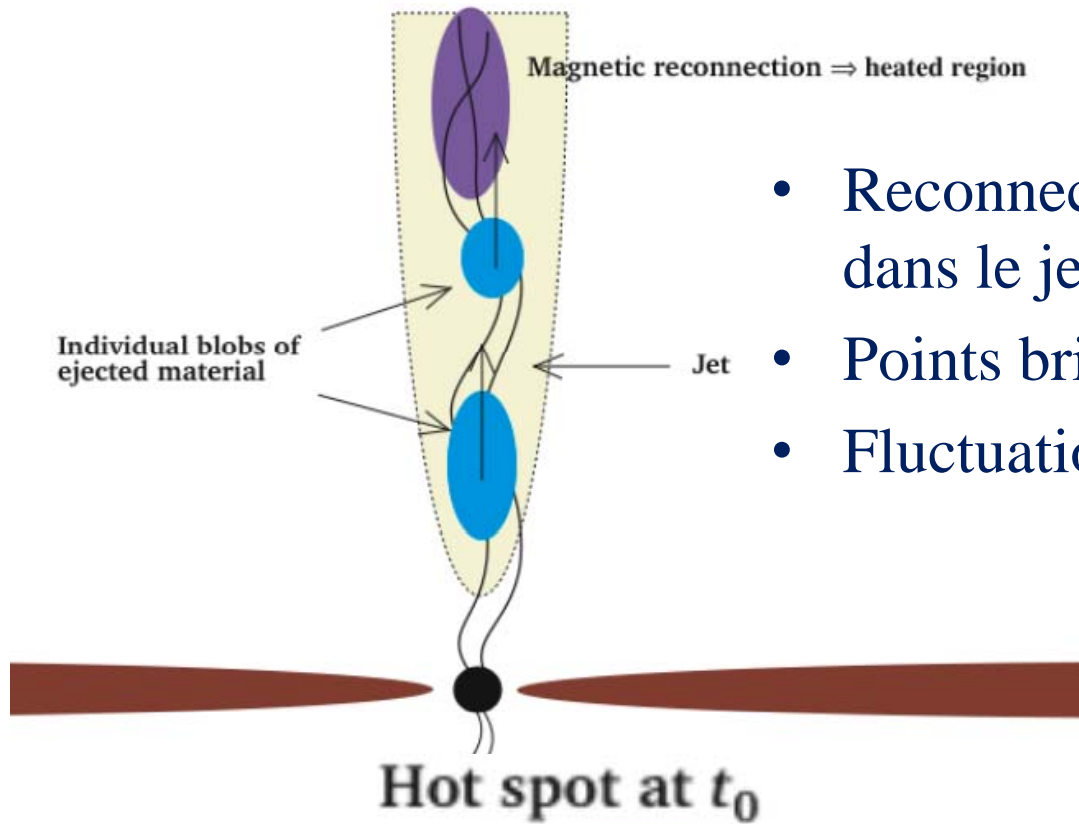


GRAVITY au VLTI

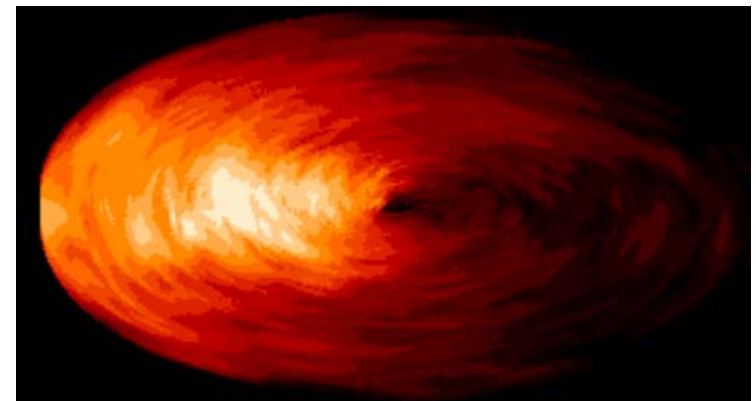
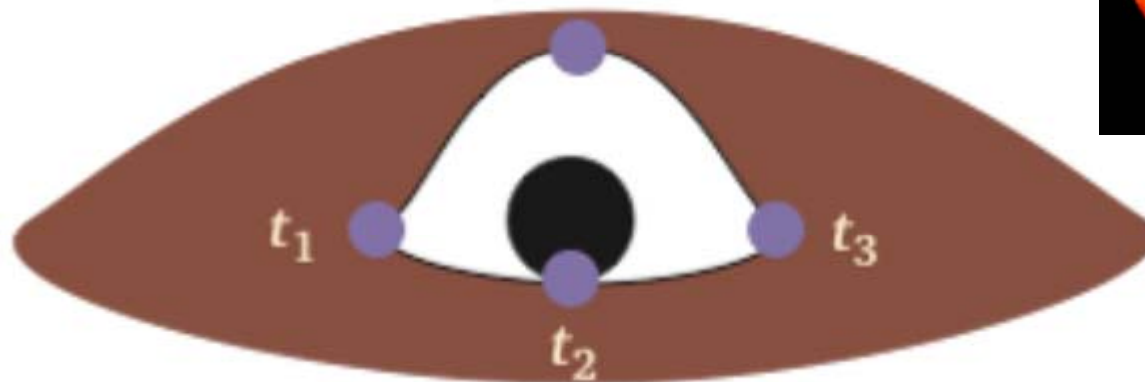
- L'instrument va devenir opérationnel en 2016
- Interférométrie **infrarouge**, bande K (2.2μ) entre les 4 UT fixes de 8m, et les télescopes auxiliaires AT (1.8m) mobiles
- Equivalent à un instrument de base 180m
- **$5\mu\text{as}$ précision**, pour $K=15$ en quelques minutes
- Exploration des orbites relativistes d'étoiles et des points brillants sur la dernière orbite stable, etc...



Scénarios à tester par GRAVITY

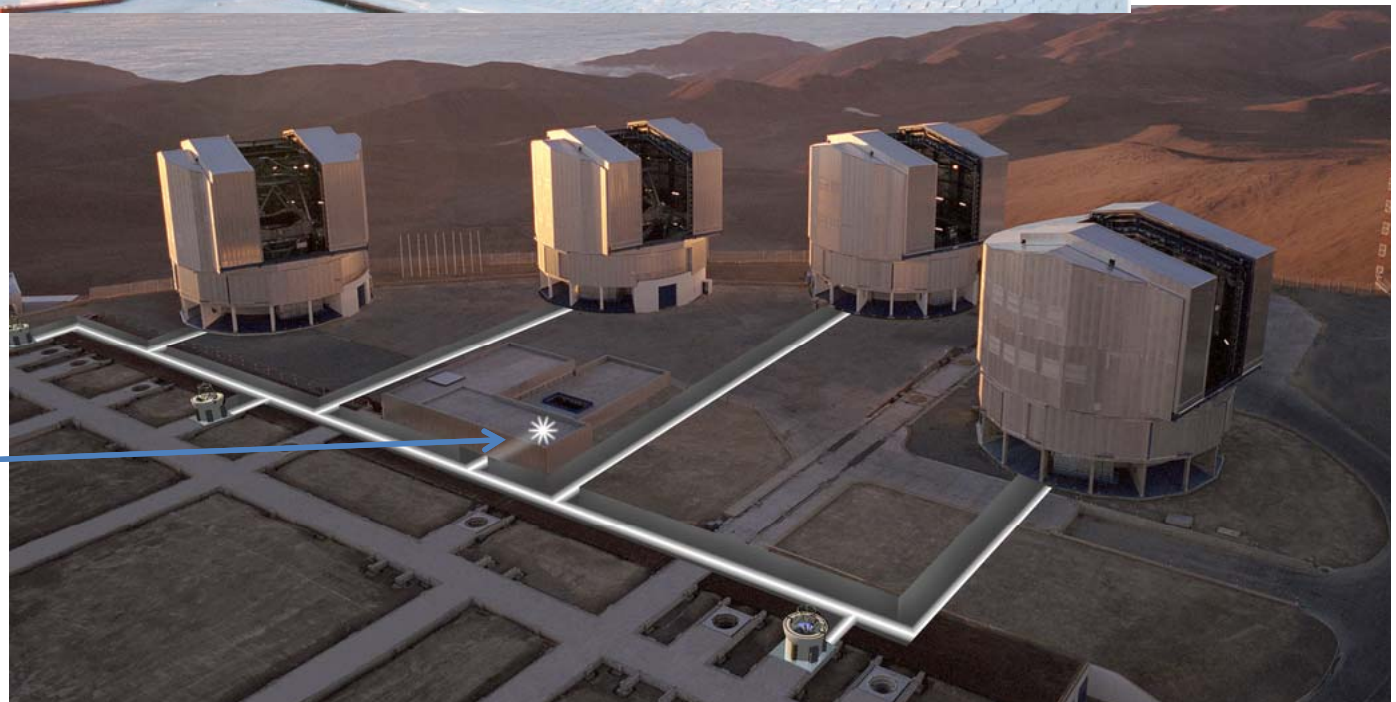


- Reconnection magnétique de grumeaux dans le jet
- Points brillants en orbite autour du TN
- Fluctuations du disque





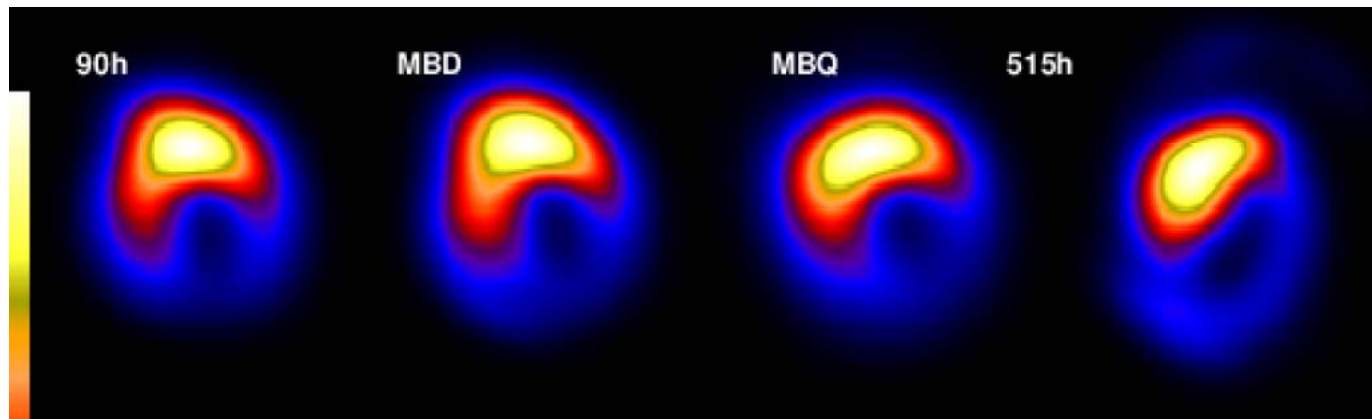
Combinaison des faisceaux par fibres optiques dans les tunnels



Event Horizon Telescope EHT



- EHT est la combinaison des télescopes millimétriques, avec ALMA fonctionnant en VLBI de part le monde

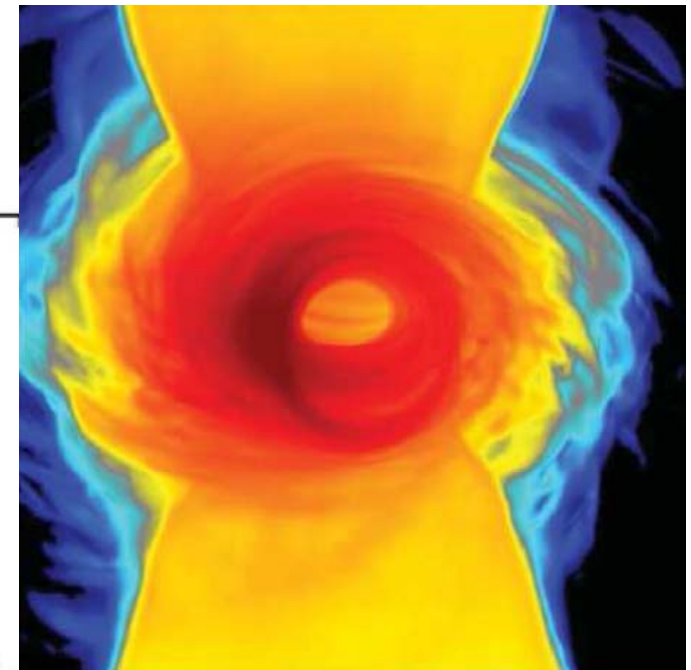
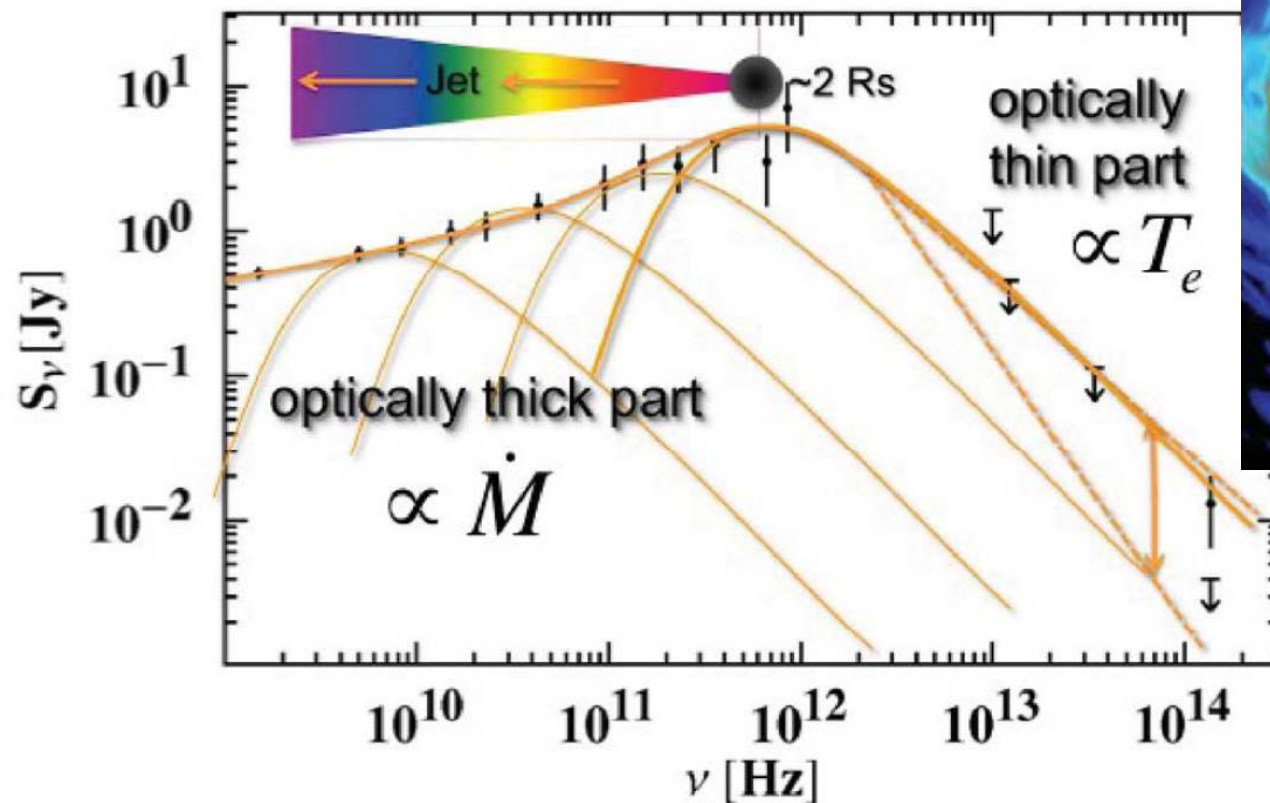


Modélisation de l'anneau de lumière, prédit pour un trou noir de Kerr
 $a \sim 0.9$ à 0.94 , $i = 50-60^\circ$

L'anneau devient un arc: déflexion des rayons, et Doppler boost relativistes (Ricarte & Dexter 2015)

Spectre de SgrA* avec jet

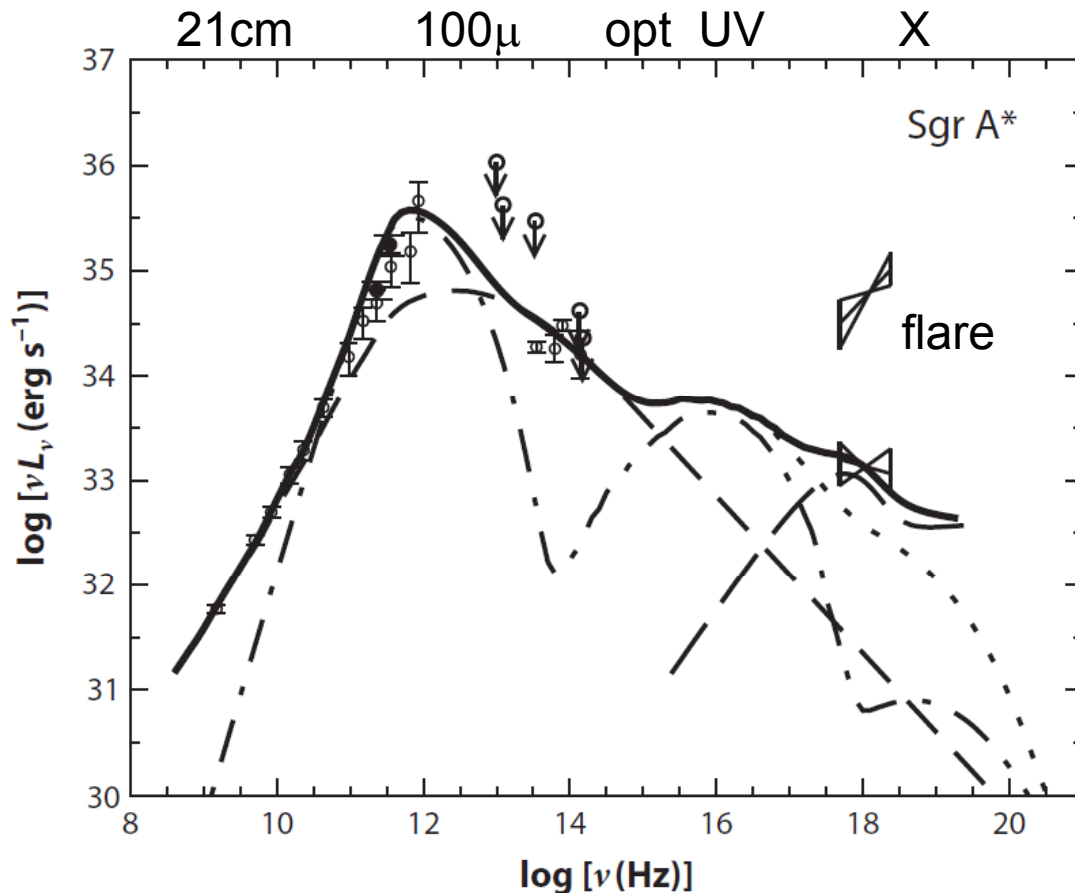
- L'émission synchrotron devient optiquement épaisse, à basse fréquence



Falcke et al 2011

Spectre de SgrA* et modèle ADAF

- Modèle ADAF de l'état tranquille de SgrA*, *Yuan et al (2003)*
- Synchrotron (---) , Compton - . -), + free-free = Total (——)



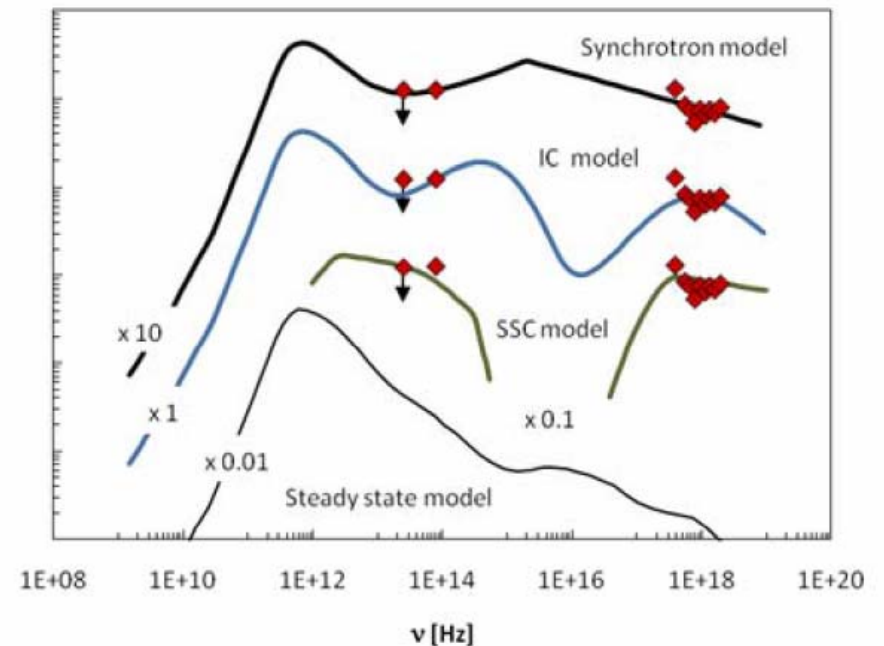
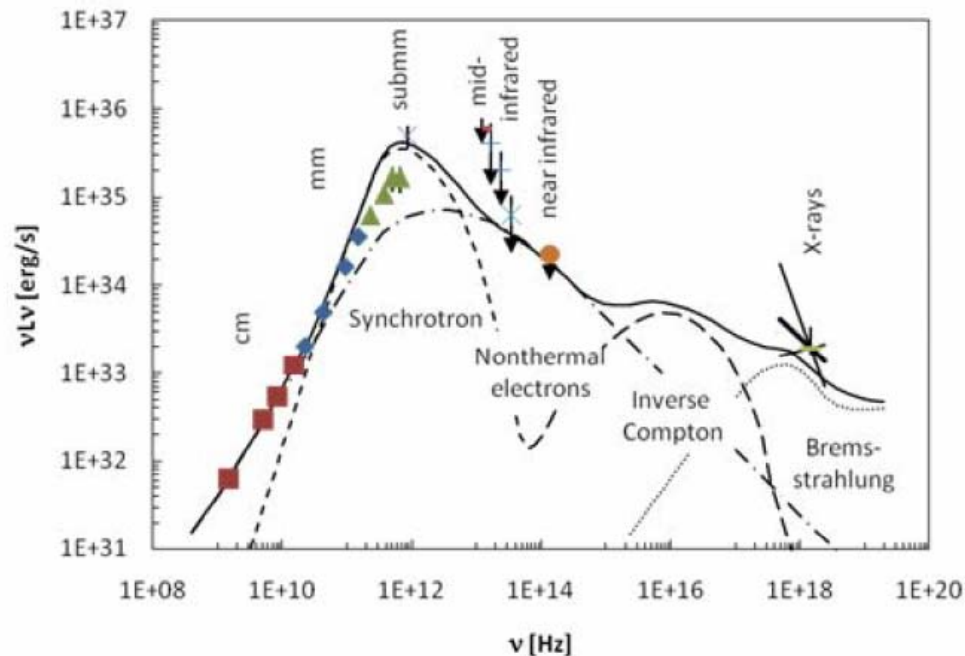
**ADAF= Advection
Dominated Accretion Flow**
 10^{-5} - $10^{-6} M_\odot/\text{yr}$
A l'intérieur du rayon de Bondi

$R_B \sim 10^5 R_S \approx 0.04 \text{ pc} \approx 1''$, où
l'énergie thermique du gaz est
égale à son énergie
potentielle dans le champ
gravitationnel du trou noir

Avec outflow: RIAF
Radiatively Inefficient
Accretion Flow

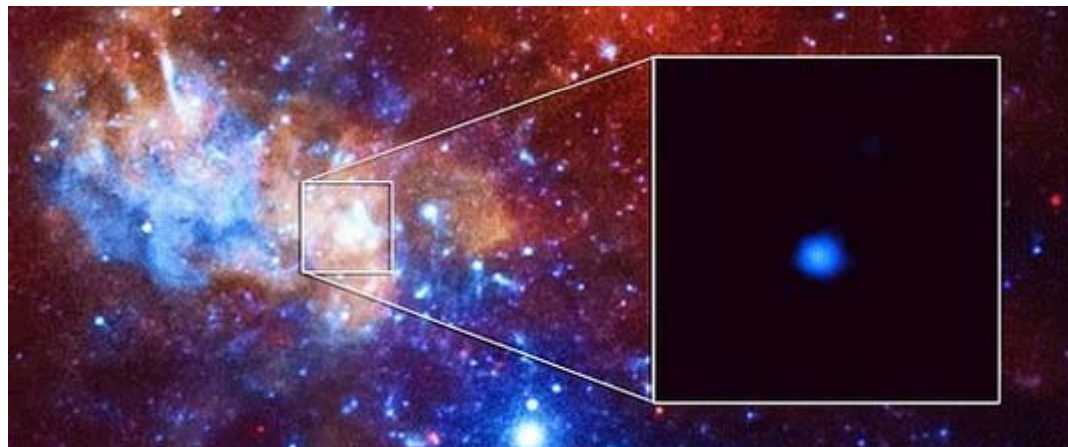
Spectre pendant un sursaut

- Spectre de SgrA* multiplié par 100 en NIR et rayons X, mais inchangé en radio
- NIR provient de l'émission synchrotron, d'électrons chauffés de façon transitoire, de même pour les rayons X (*en haut*)
- Pourrait aussi venir de Inverse Compton, des e- sur le mm (*milieu*)
- Ou alors Synchrotron Self Compton (e- sur eux-mêmes, *en bas*)



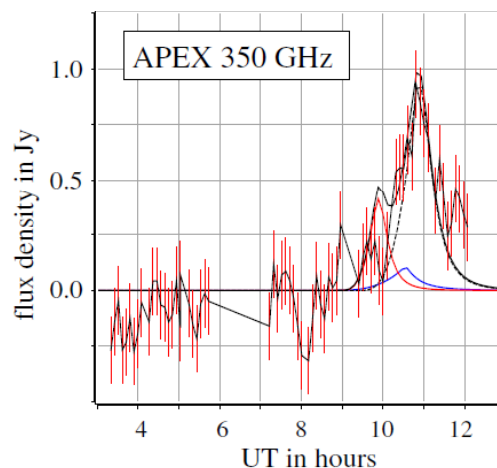
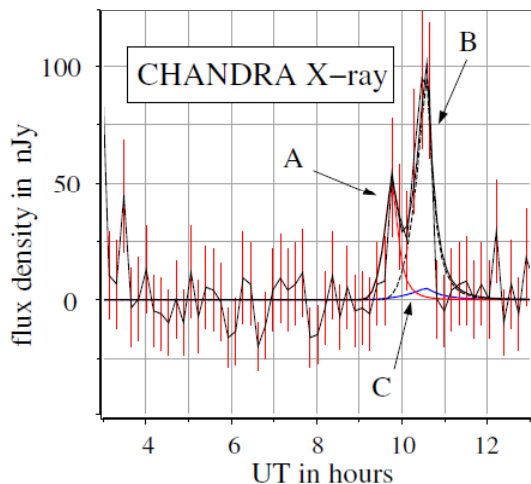
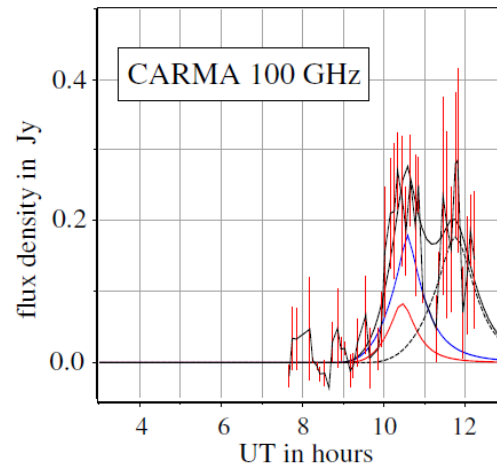
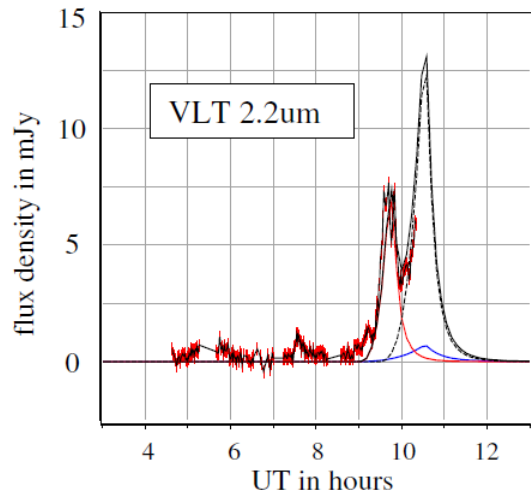
Sursauts en rayons X et NIR de SgrA*

- **Origine *encore mystérieuse***
- Ejection de matière (jet), points brillants sur la dernière orbite stable, ou bien fluctuations sur le disque d'accrétion
- Ponti et al (2015) 80 sursauts en rayons X
- Une recrudescence quelques mois après le passage de G2 au péricentre
- Augmentation d'un facteur 3.7 de la luminosité de SgrA* en 2013-14
- Ces variations des sursauts et de la luminosité est typique de TN quiescents



Sursauts à diverses λ

- Simultanéité, ou bien délai: X-ray et NIR simultanés, Radio délai
- Sursauts plus fréquents en NIR. Dure typiquement 30min



Les sursauts peuvent être interprétés comme une expansion adiabatique

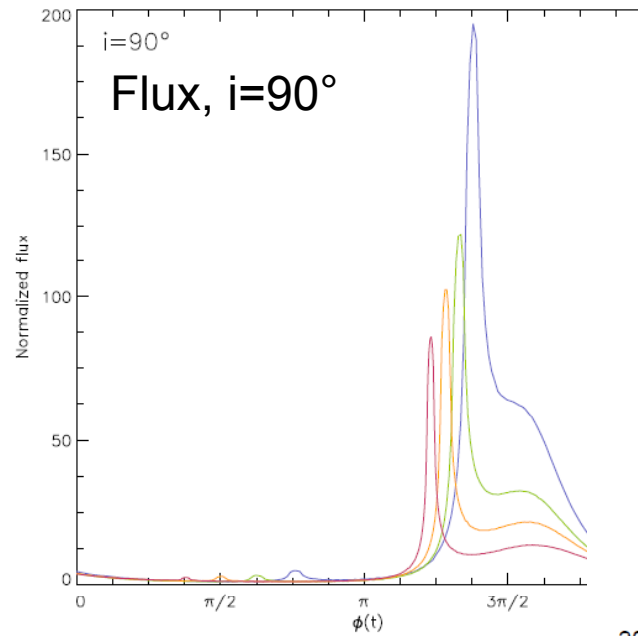
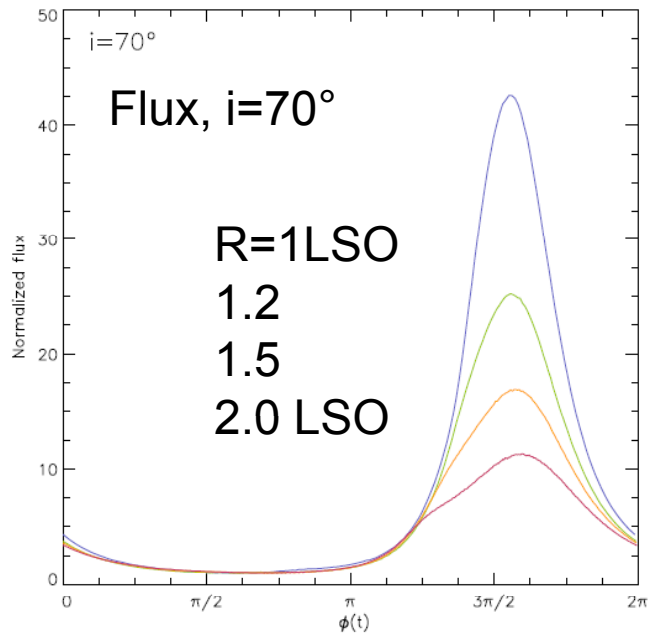
Emission synchrotron pure avec $n = 10^{6.5} \text{ cm}^{-3}$
Et Synchrotron Self-Compton SSC $10^{7.5} \text{ cm}^{-3}$

Retournement à 300-400GHz
Lorentz factor $\gamma = 10^3$

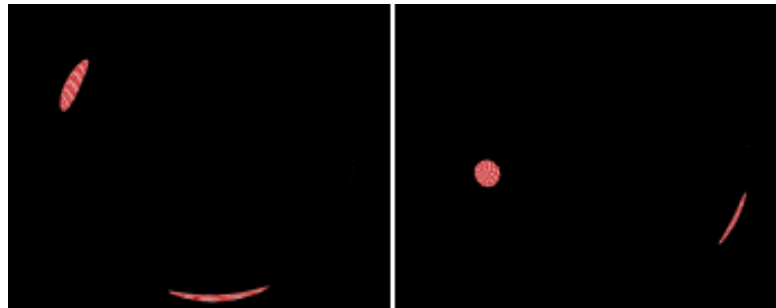
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Modèle de sursaut, avec points brillants

- Simulation des rayons lumineux, et effets de lentille

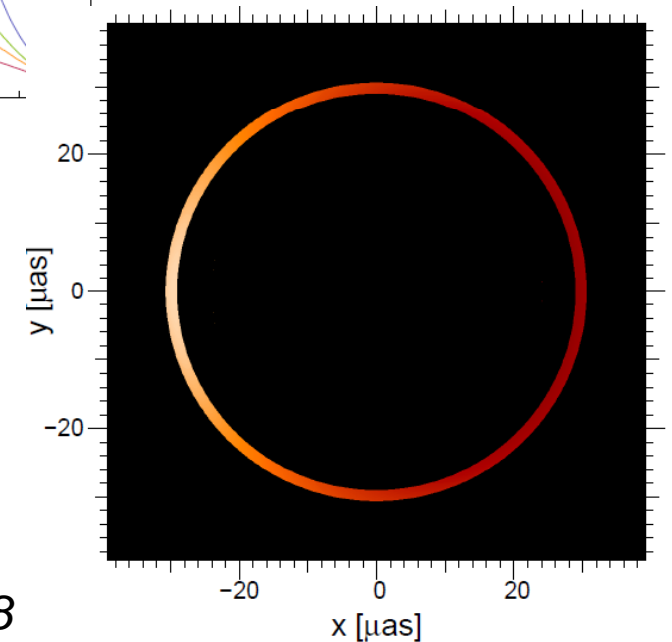


Phase

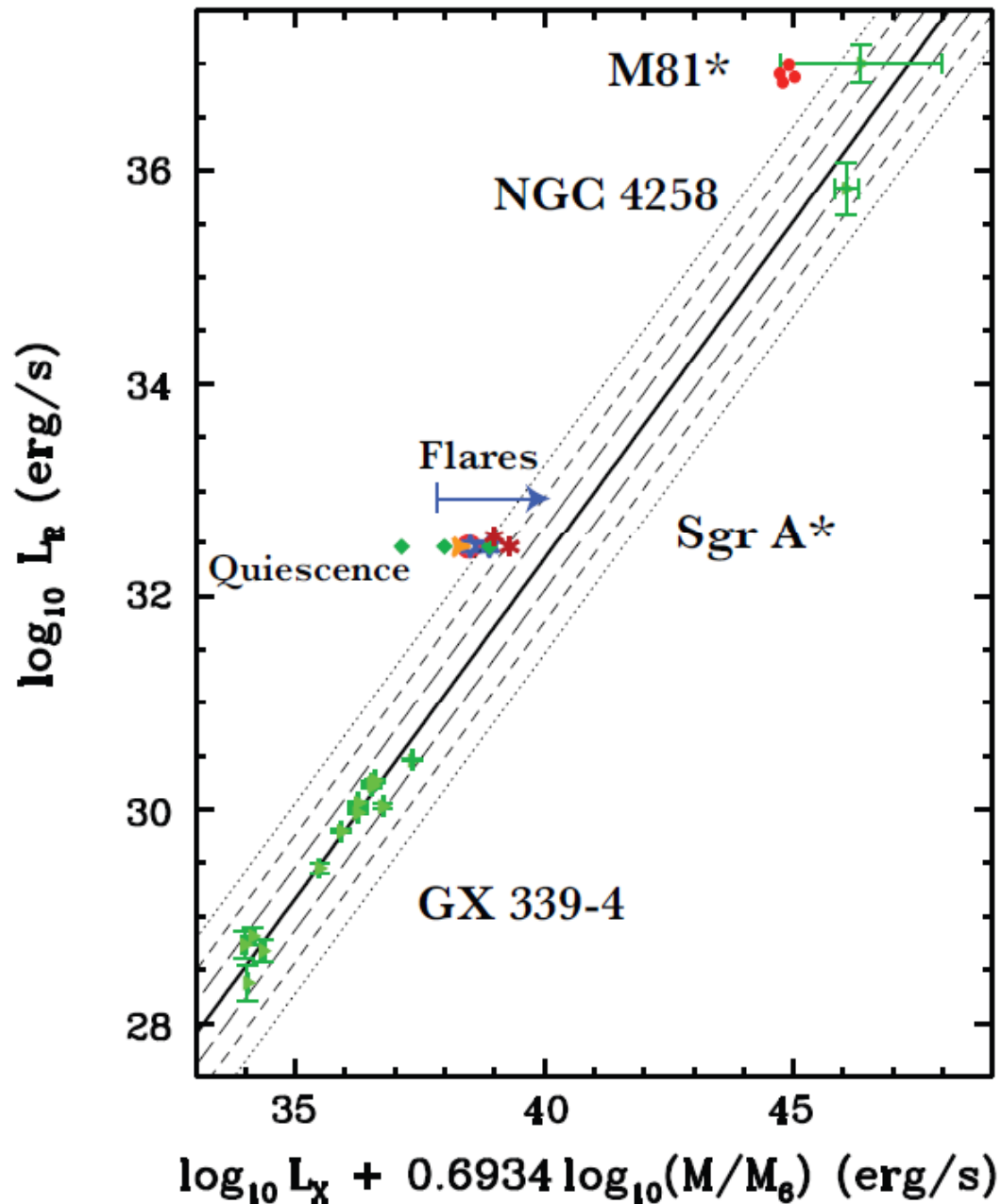


Kerr $a=0.52$
LSO
 $i=70^\circ$

Hamaus 2008



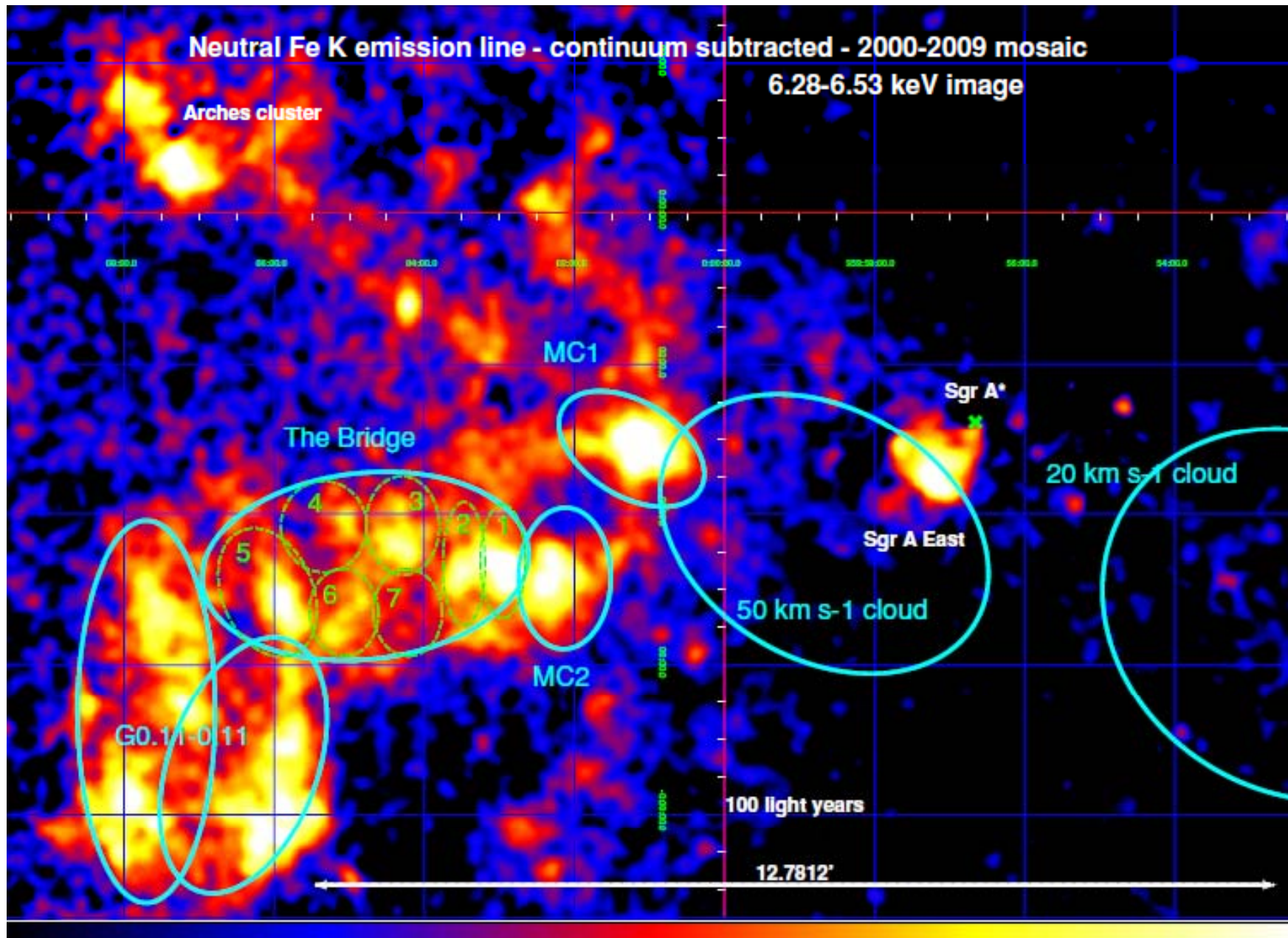
Corrélation Radio-X et sursauts

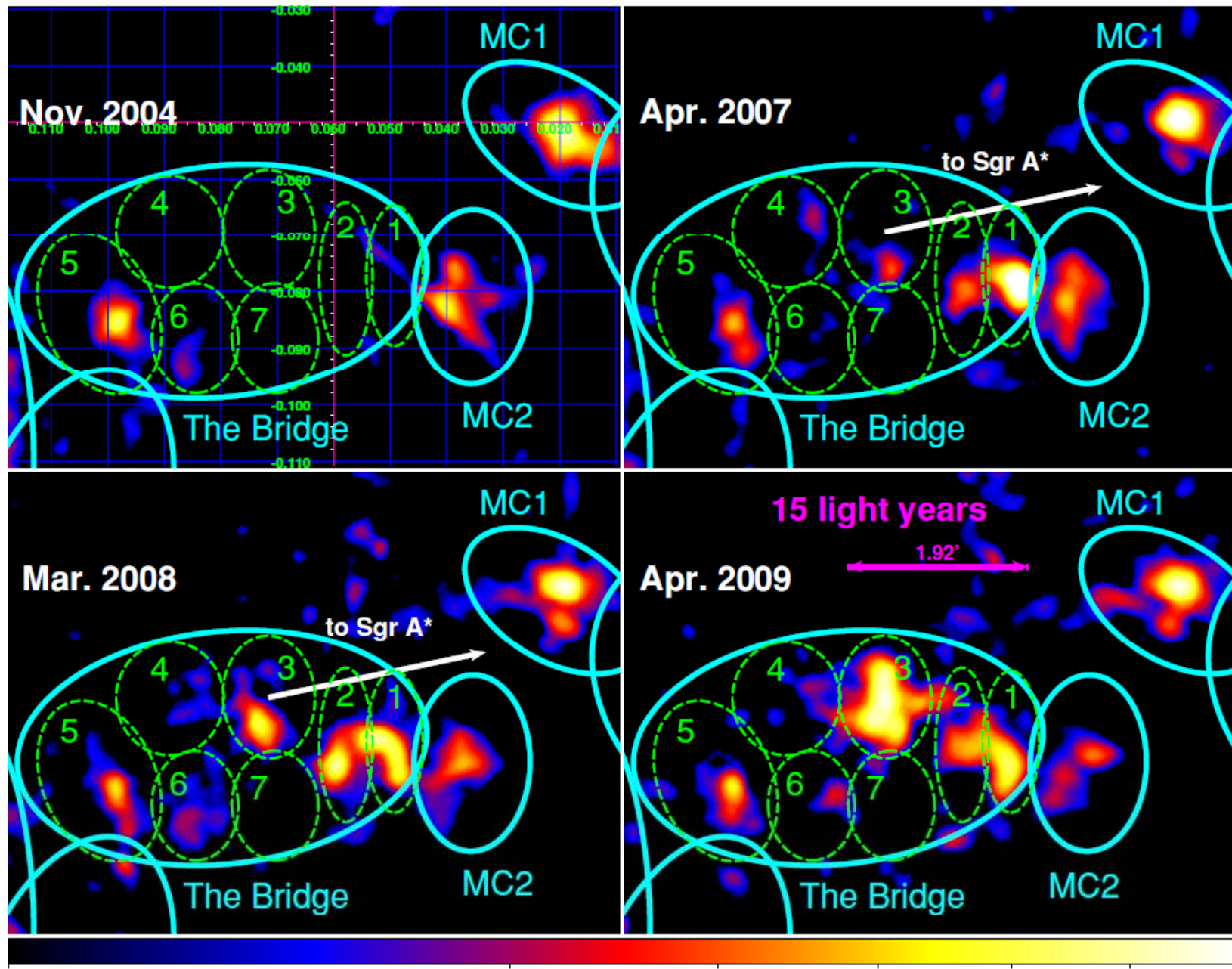


- Un sursaut X par jour, non accompagné de radio
- Y-aurait-il une barrière pour L_x ?
- On pourrait le vérifier avec les autres AGN de faible luminosité

Markoff 2005

Découverte de réflexion super-luminique Raie Fe $K\alpha$

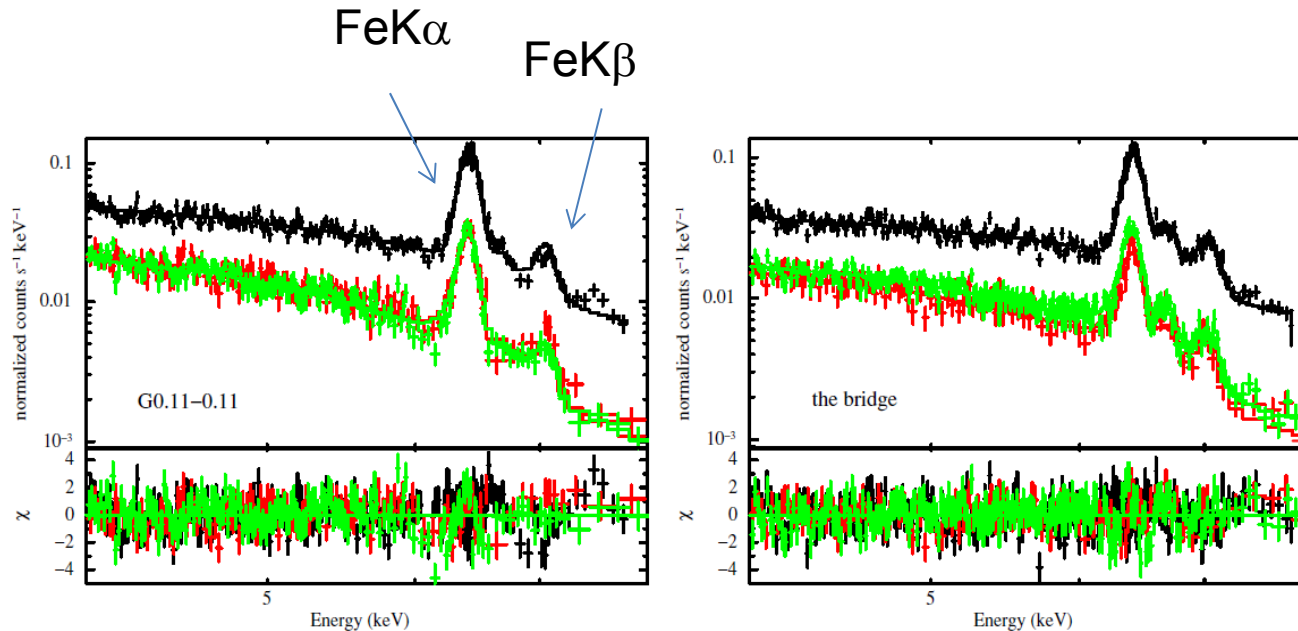
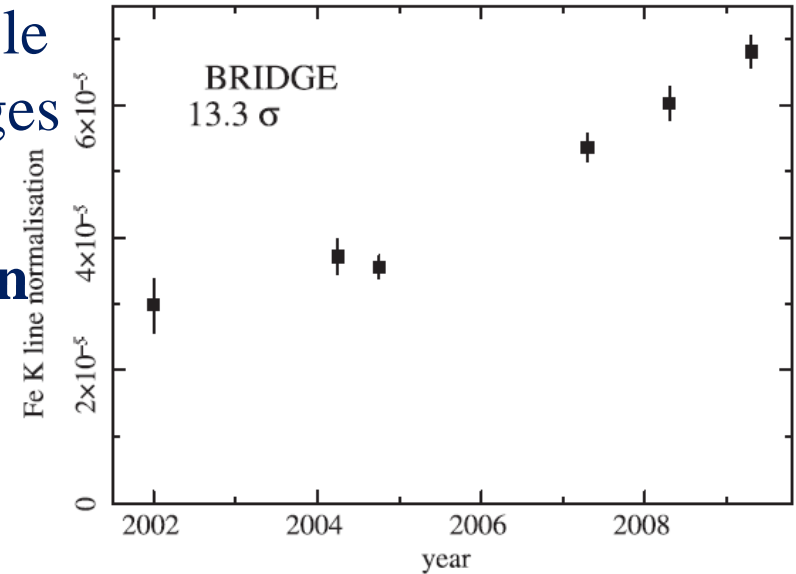




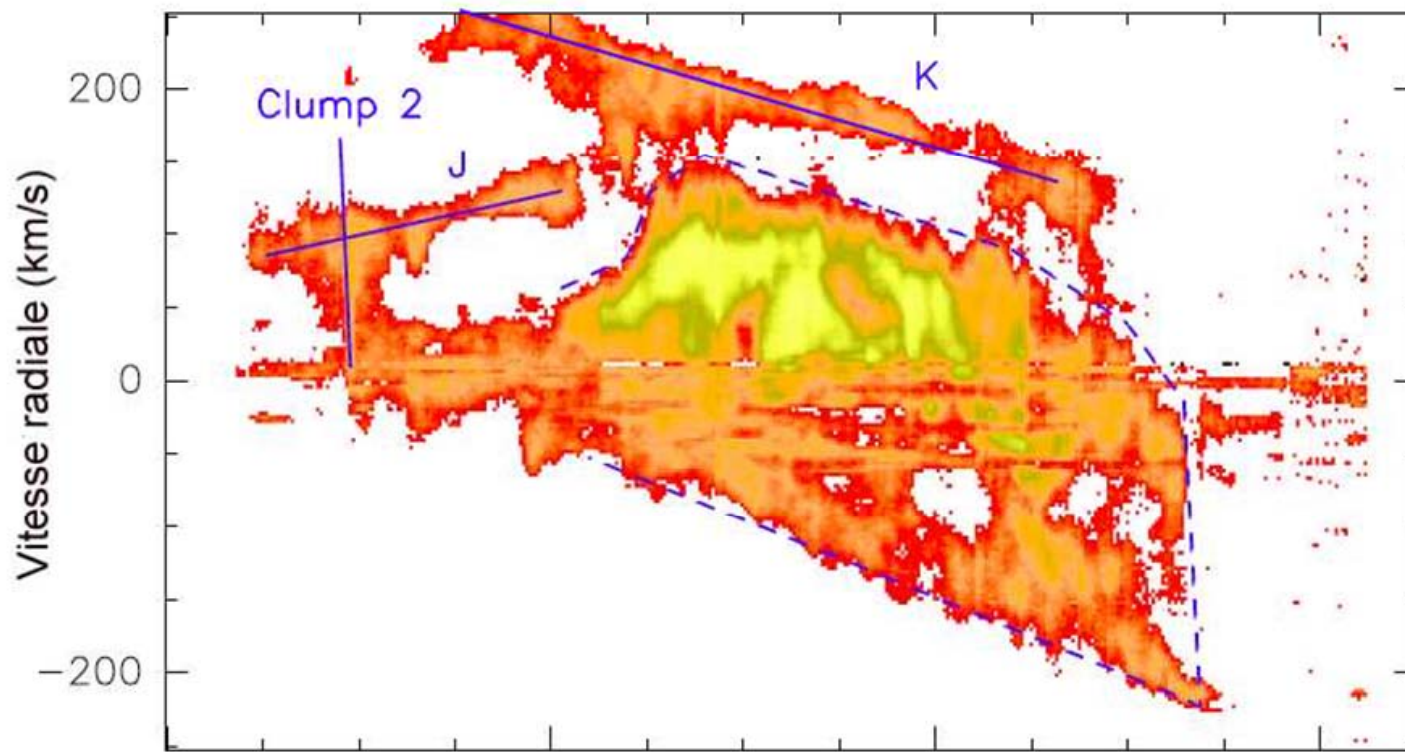
06

Variabilité sur 10 ans

- L'émission de la raie Fe K α varie dans le « Bridge », mais pas dans certains nuages avoisinants
- **Region balayée 2 arcmin~ 15 al en un temps de 2-3 ans $\rightarrow v_{app}=5c$**
- Pas à l'intérieur, car devrait $\sim 1/r^2$

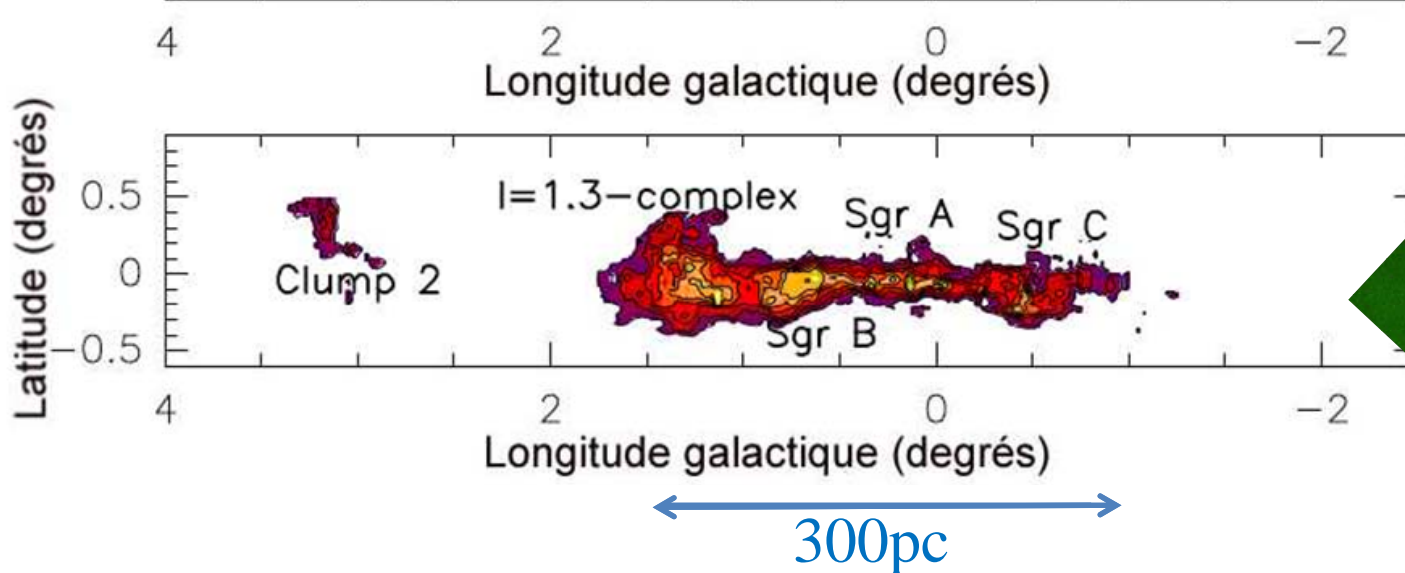


Ponti et al 2010

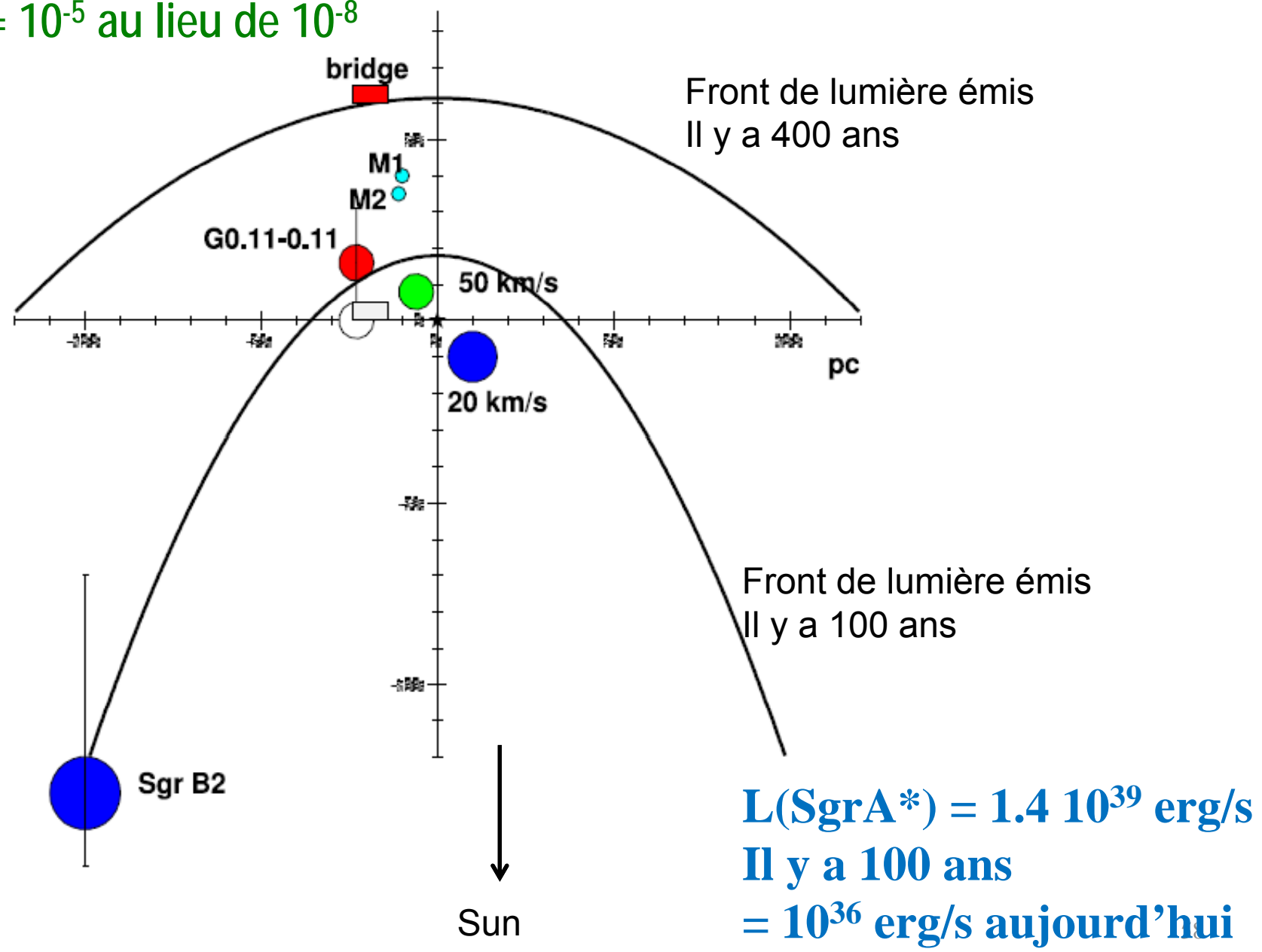


Reservoirs de gaz
autour du centre

$L = 10^{-8} LE ?$
 $L \times 160$ dans un
sursaut

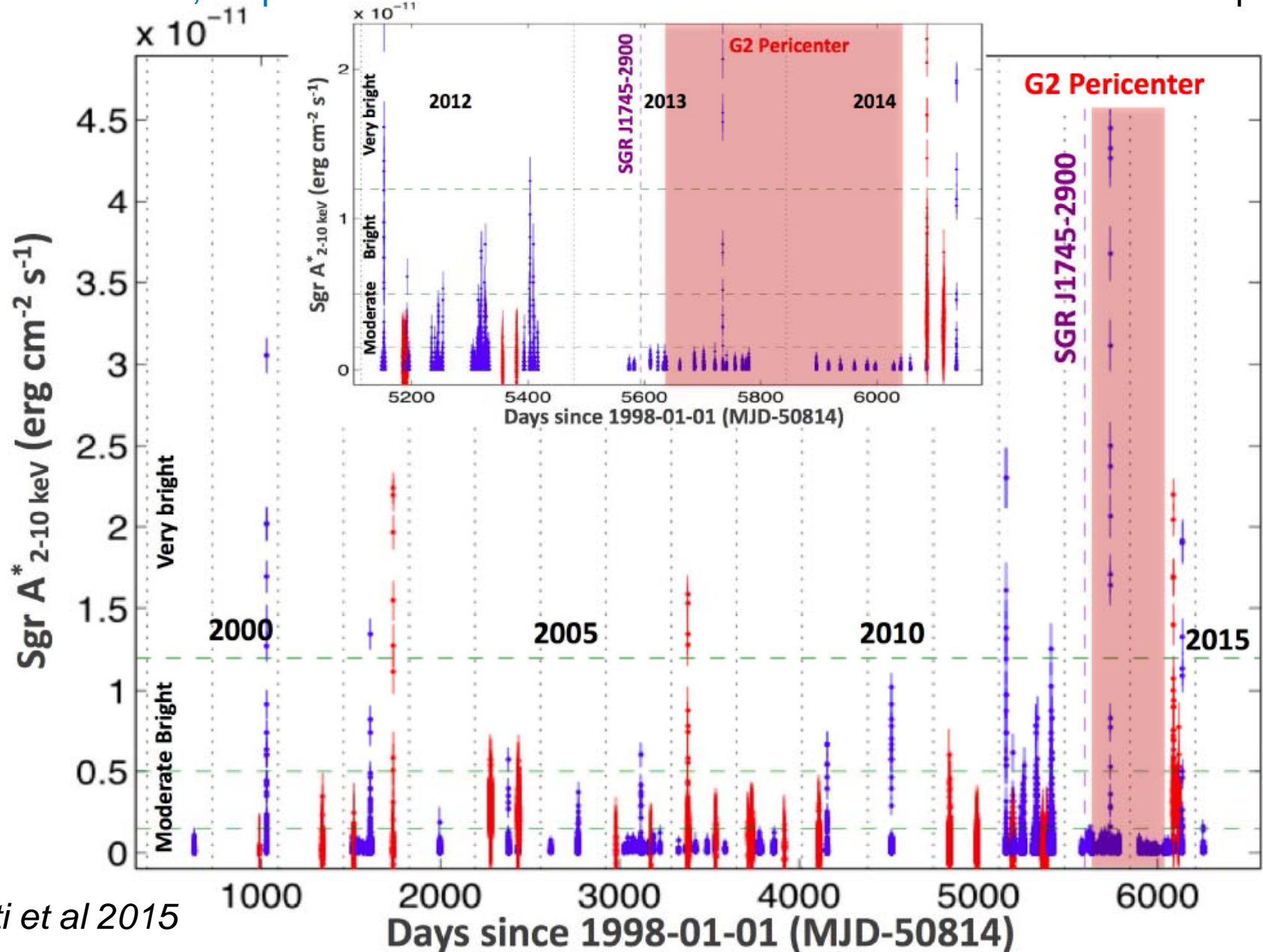


Augmentation de puissance d'un facteur 1000, pendant au moins 10 ans
 $L/LE = 10^{-5}$ au lieu de 10^{-8}



Chandra: bleu, 1 point = 300s

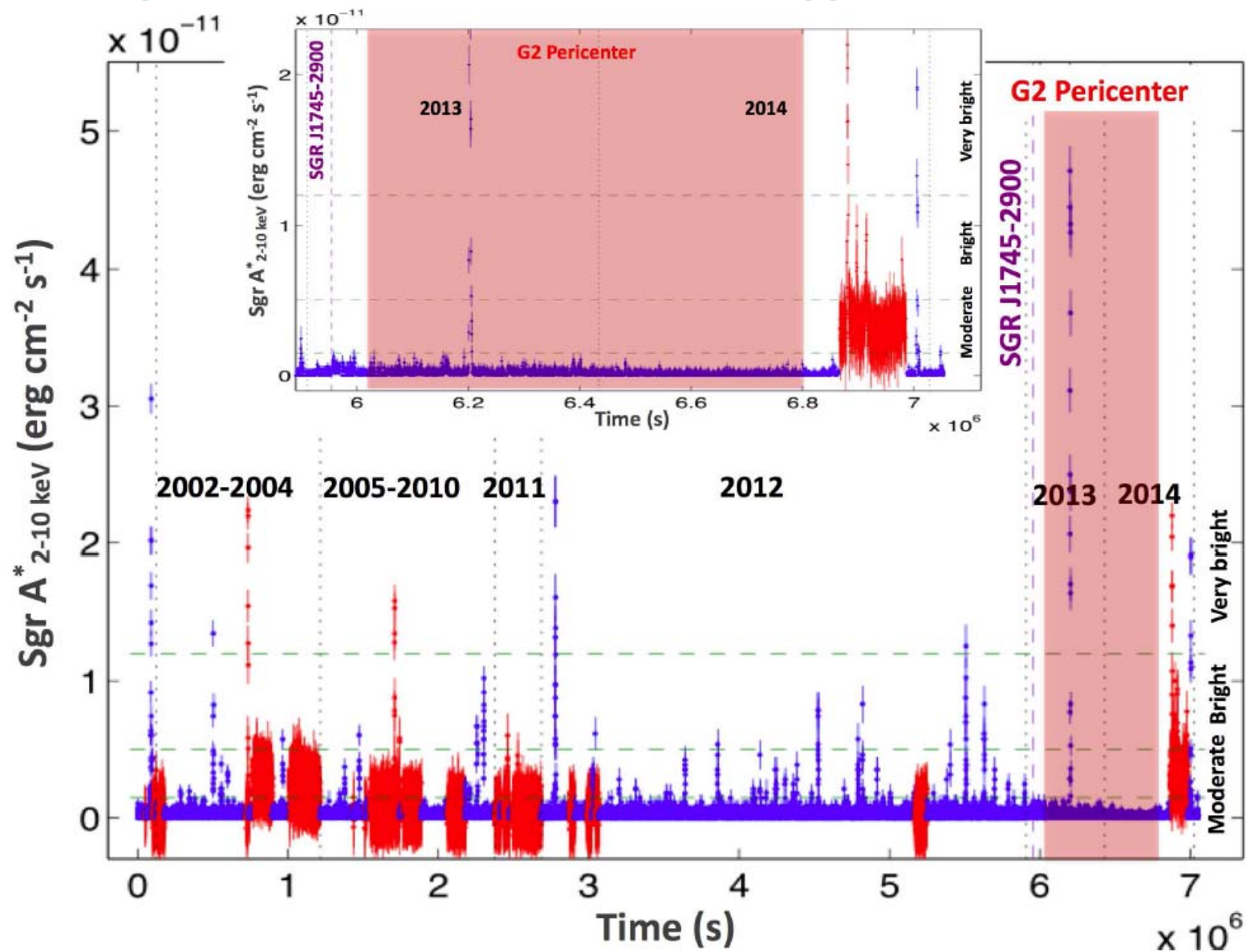
Influence de G2? Dû à la meilleure statistique



Ponti et al 2015

XMM: rouge, après soustraction de sources ponctuelles, cf la magnétar SGR 1745-2900

Les forts sursauts fin 2014 sont-ils dûs à G2?
Ici les périodes sans observation sont supprimées



Trou noir au centre de notre galaxie

Orbites des étoiles, $V > 1000\text{km/s}$, Masse du trou $\sim 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$
Nuage G2, ou bien enveloppe de gaz autour d'une étoile

Environnement multi-longueurs d'onde, NIR et rayons-X, binaires
et objets compacts, gaz diffus

VLBI radio mm, approche l'ombre du trou noir, Kerr ou non ?
Mesure du spin et des effets de relativité. Test de la gravité- EHT

GRAVITY en proche infrarouge. Approcher l'horizon

Encore bien des questions: spectre multi-longueur d'onde
Origine des sursauts, dernière orbite stable, ou jet?

Paradoxe des étoiles jeunes (10Myr), HVS...

