



Le centre Galactique

R. Terrier
Laboratoire APC
CNRS/Univ. Paris Diderot

1. Le centre Galactique et son environnement

2. Sgr A*: un trou noir super massif dormant

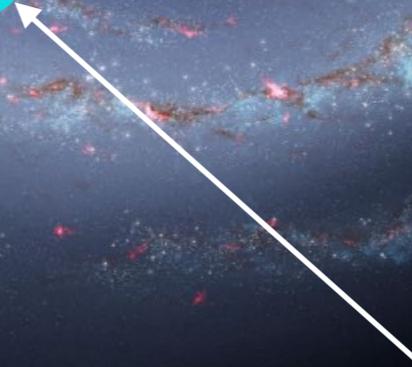
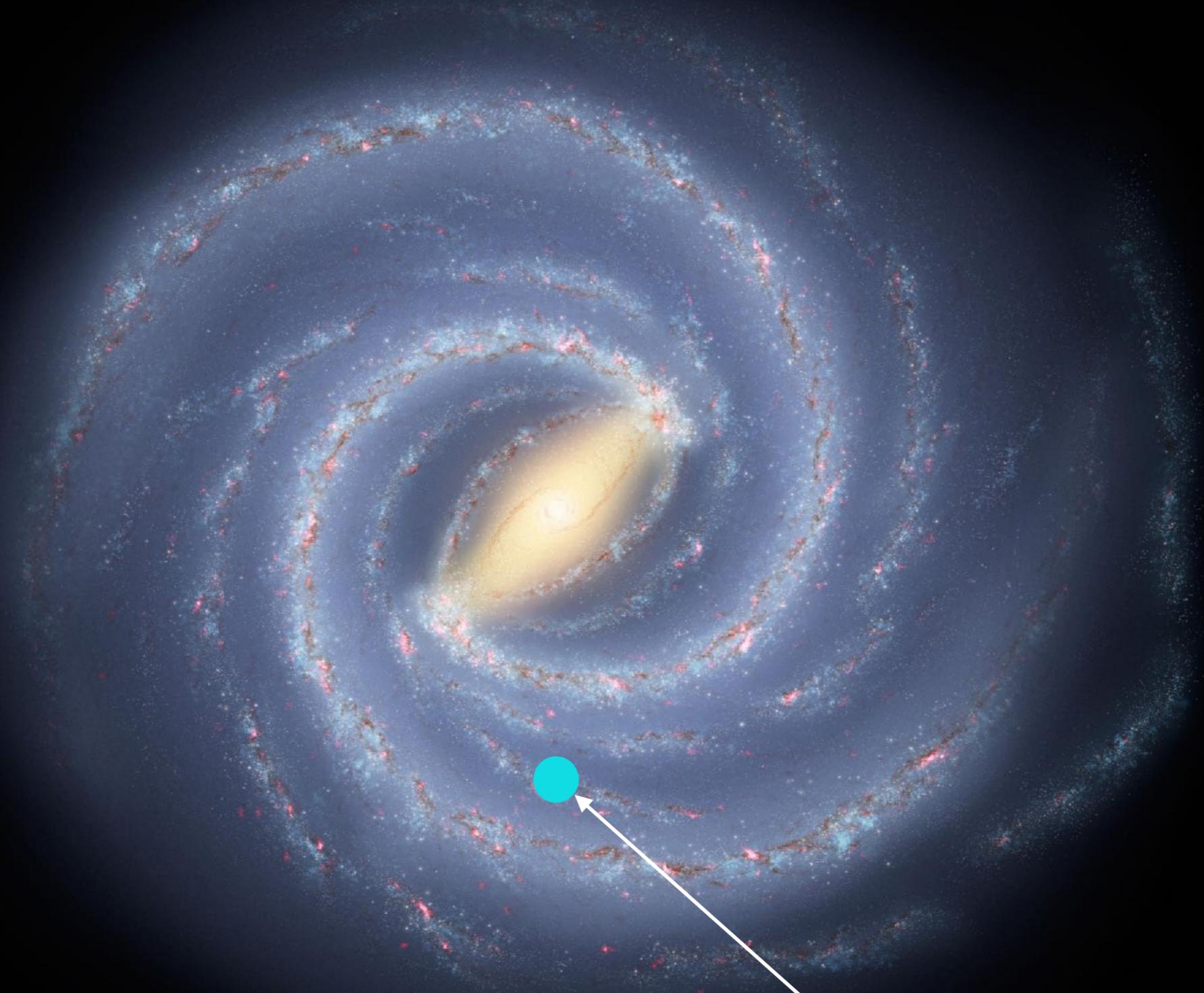
3. Traces d'activités passées

Le centre Galactique et son environnement

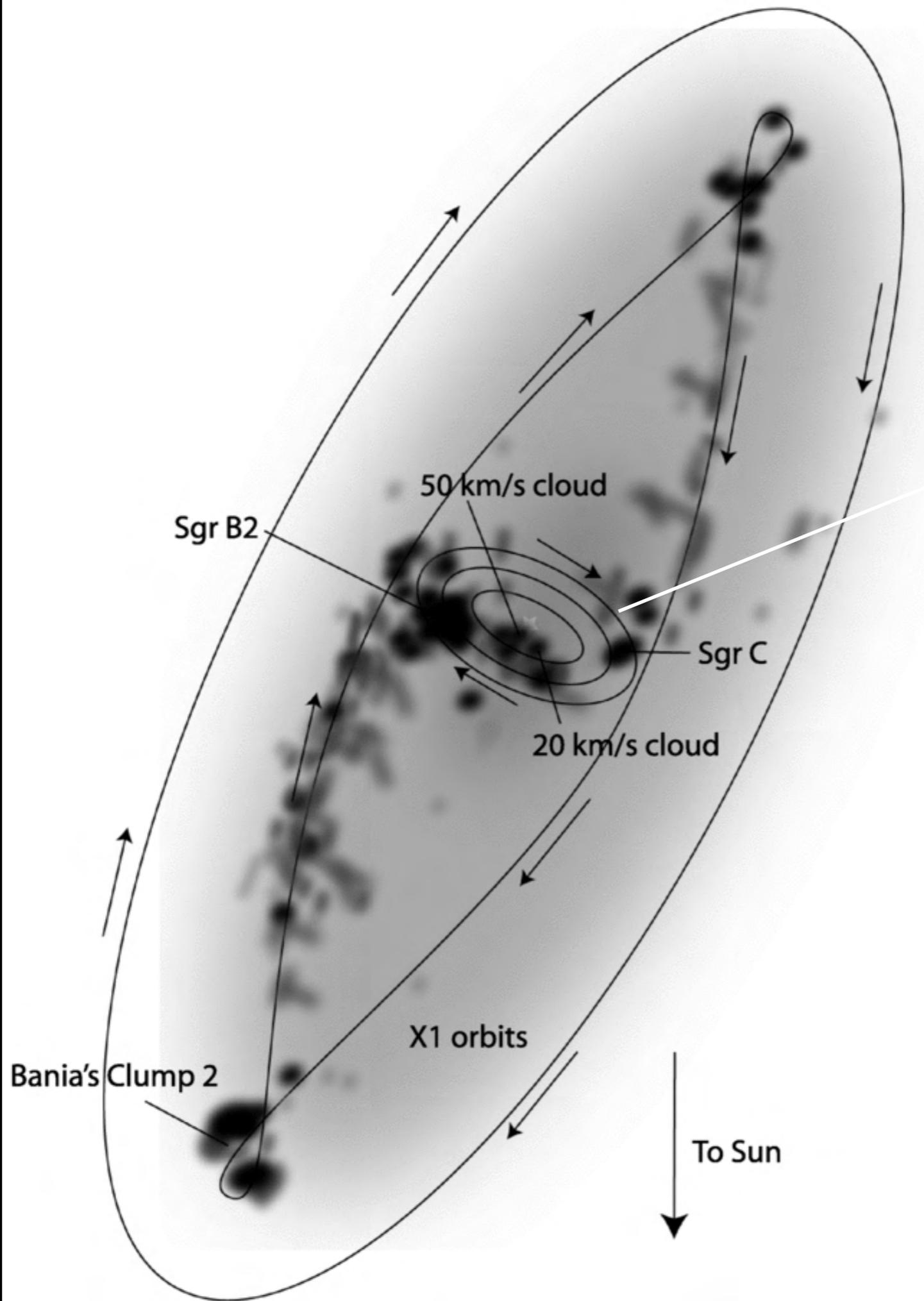
Voyage au centre de la Galaxie

La voie lactée vue de dessus

26000 a.l.



Vous êtes ici



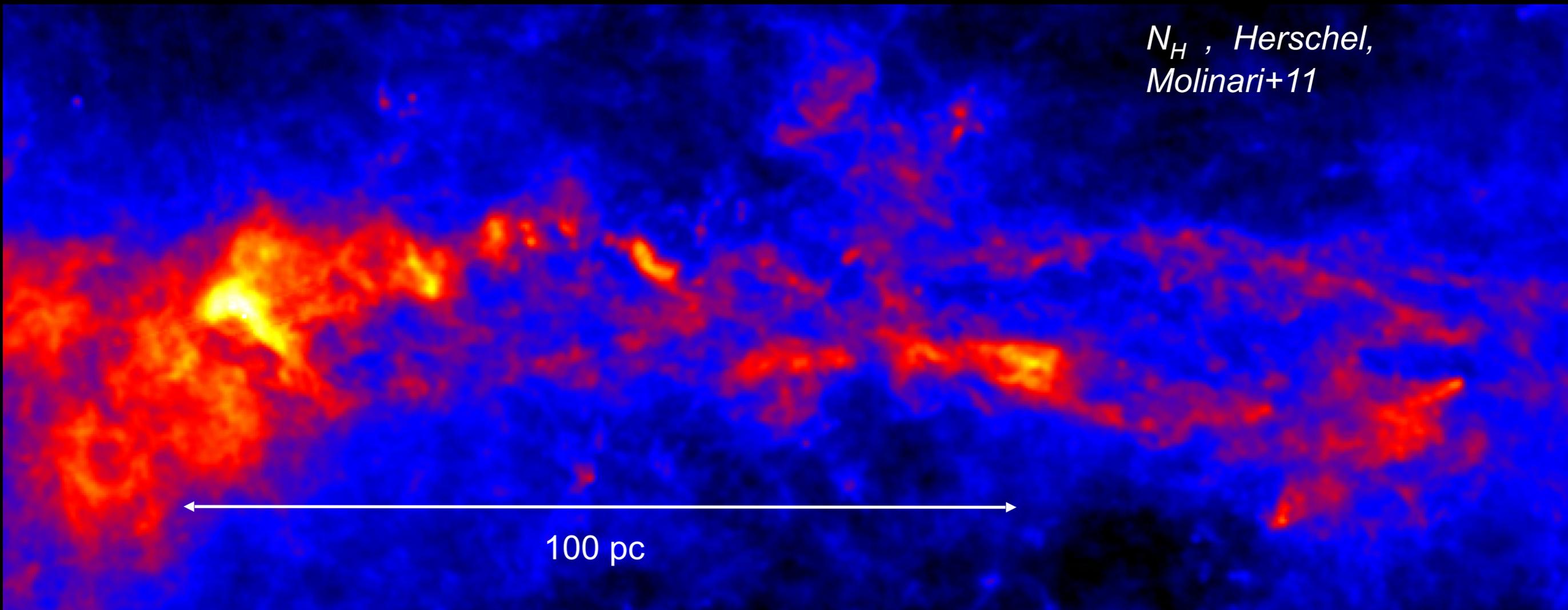
La zone moléculaire centrale (CMZ)

Taux injection masse:
0.1 - 1 M_{\odot}/yr

Morris & Serrabyn (1996)

d'après Bally (2010)

La zone moléculaire centrale



La Zone moléculaire centrale (CMZ) contient $2-6 \cdot 10^7 M_\odot$ de gaz moléculaire

Tsuboi+99, Molinari+11 etc

~30% de la masse totale sous forme de gaz diffus (100 cm^{-3})

Dahmen+98, Oka+05, Geballe12

La zone moléculaire centrale

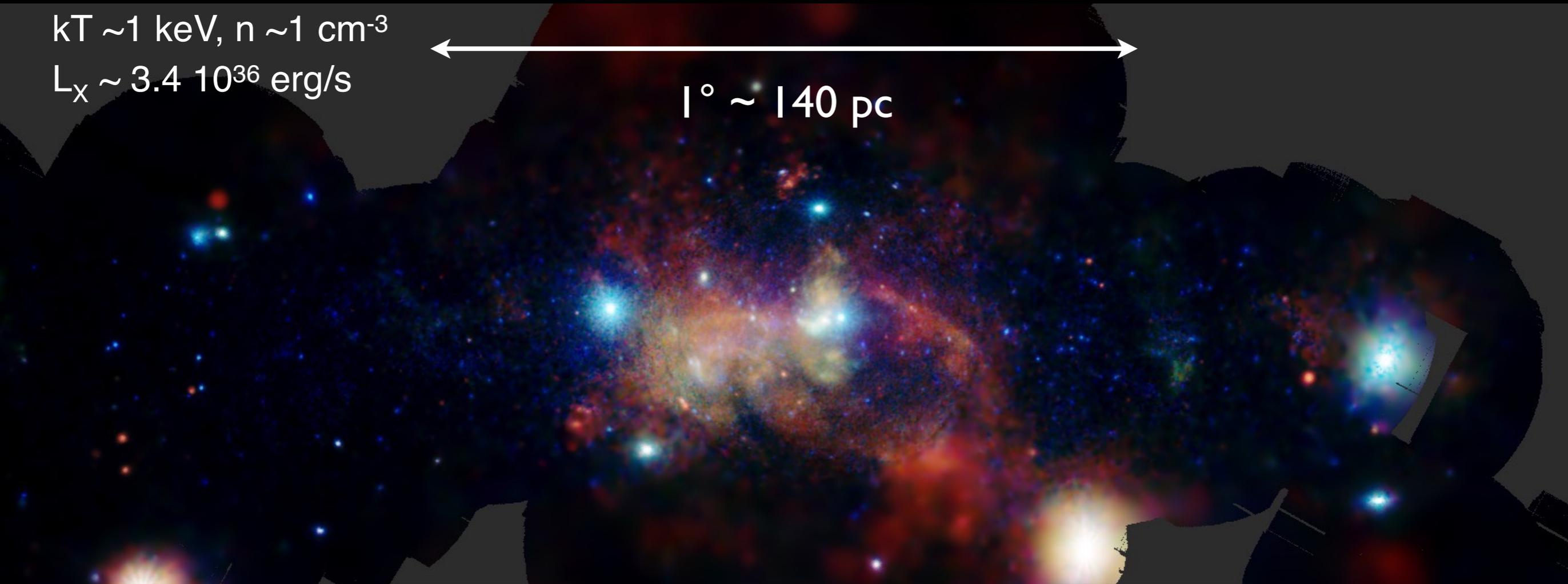
Raies X thermiques : **Si xiii**, **S xv**, **Ar xvii**

plasma chaud:

$kT \sim 1 \text{ keV}$, $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$

$L_x \sim 3.4 \cdot 10^{36} \text{ erg/s}$

$1^\circ \sim 140 \text{ pc}$

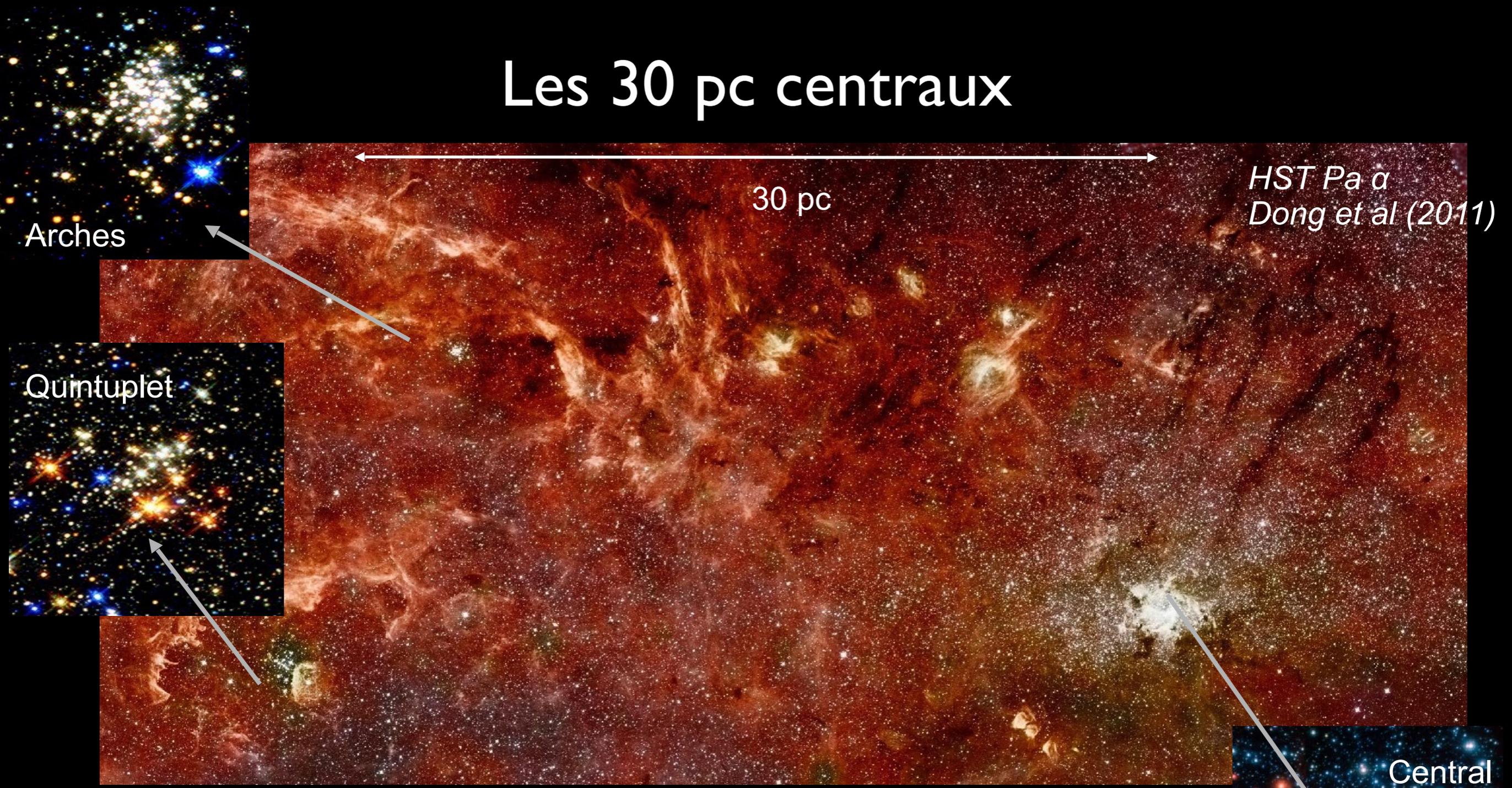


Taux de formation d'étoile $\sim 0.035 - 0.15 M_\odot/\text{yr}$

XMM-Newton
Ponti et al (2015)

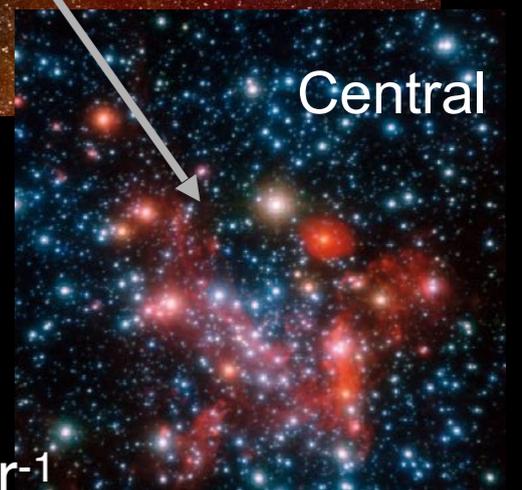
Taux de supernova : $0.3 - 1.2 \times 10^{-3} \text{ yr}^{-1}$

Les 30 pc centraux



Amas d'étoiles massives dans les 30 pc centraux:

- Central: ~ 6 Myr, 150 étoiles O & WR taux SN $\gtrsim 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$
- Quintuplet : ~ 4 Myr, (pistol star) taux SN $\gtrsim 0.3 \times 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$
- Arches: ~ 2 Myr, densité au coeur : $10^5 M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$



Les 3 pc centraux



↑
1 arcmin ~ 2.5 pc
↓

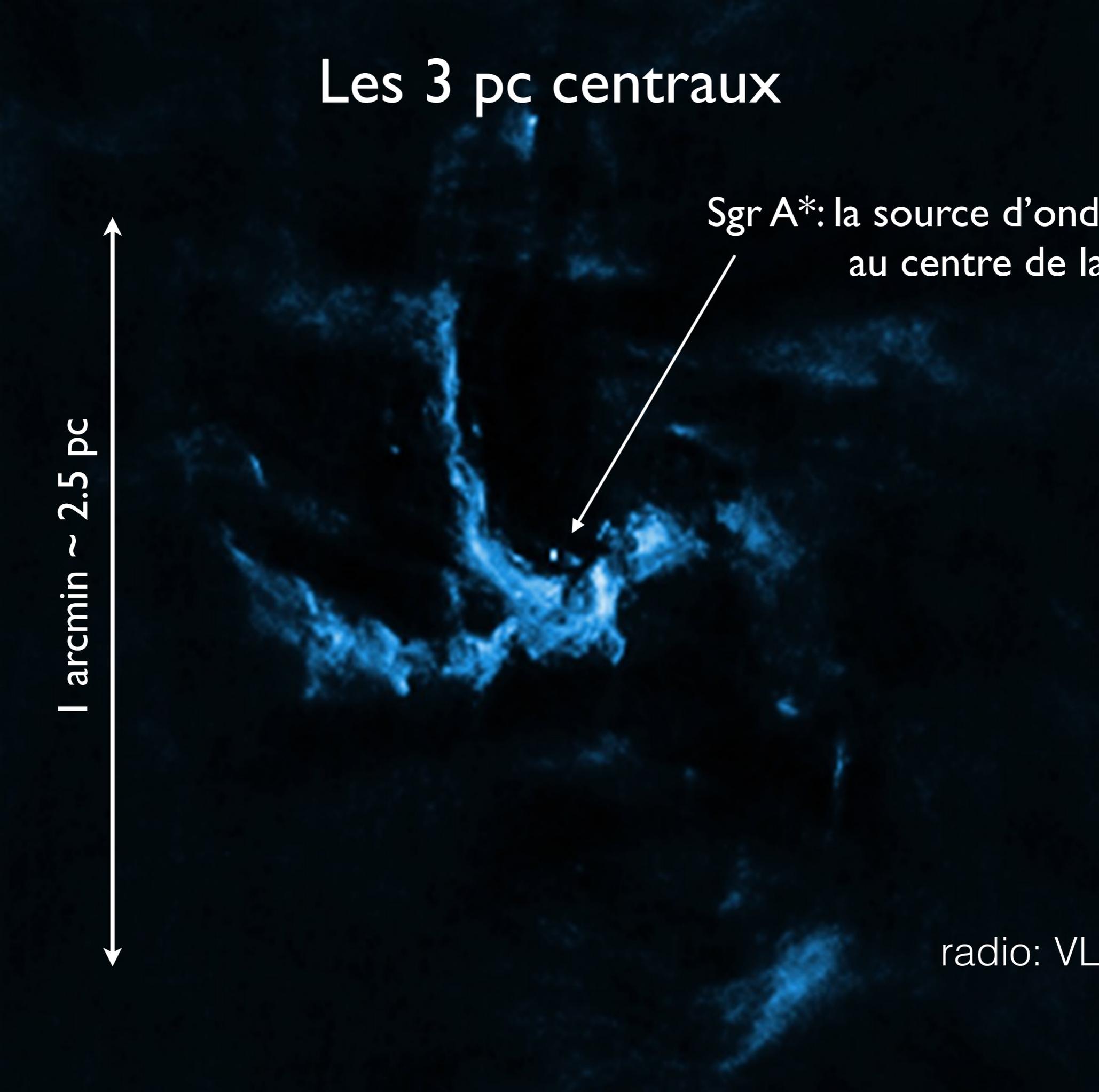
N-IR HST
NASA/STSI

Les 3 pc centraux

1 arcmin ~ 2.5 pc

Sgr A*: la source d'ondes radio
au centre de la Galaxie

radio: VLA



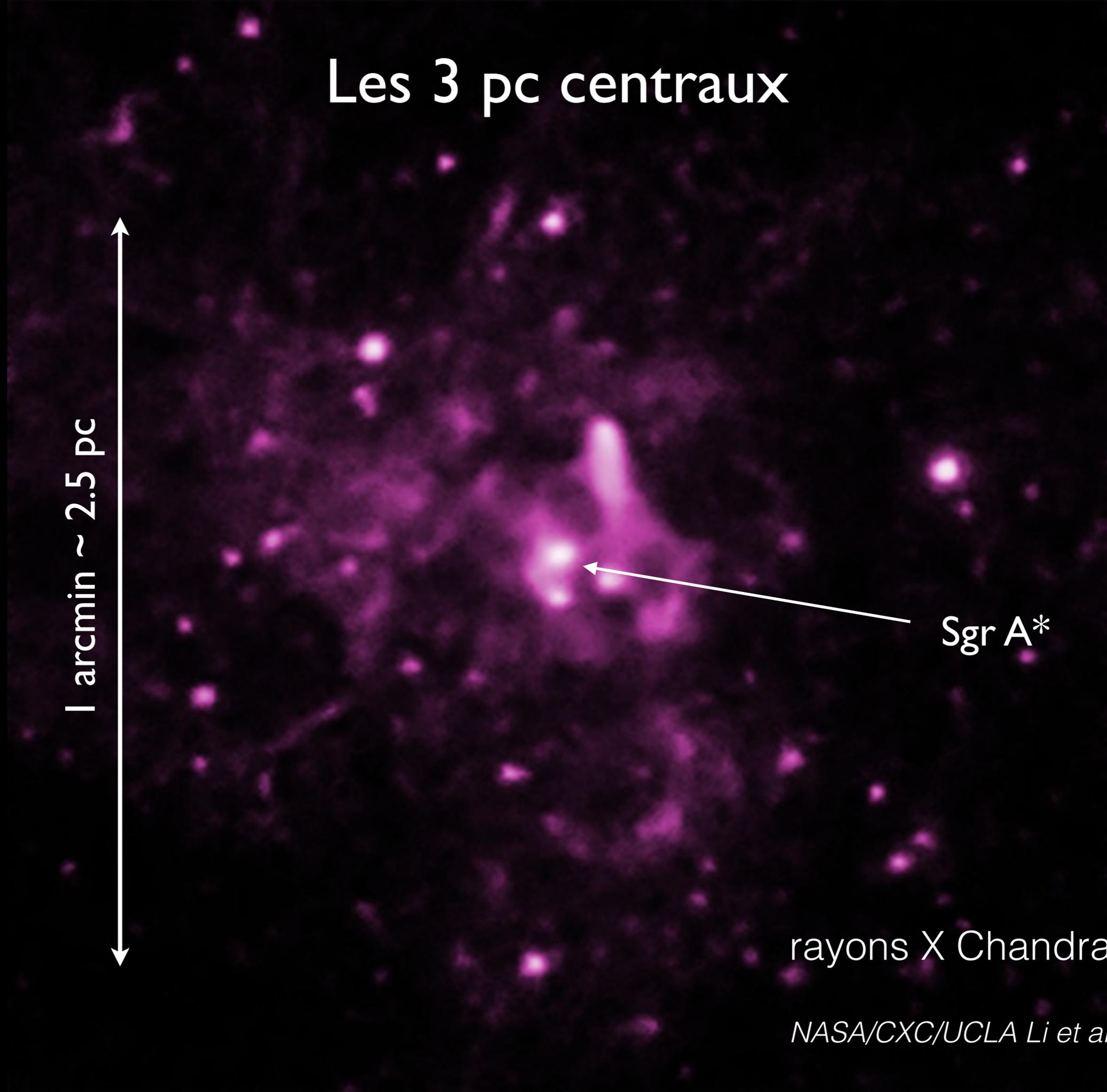
Les 3 pc centraux

1 arcmin ~ 2.5 pc

Sgr A*

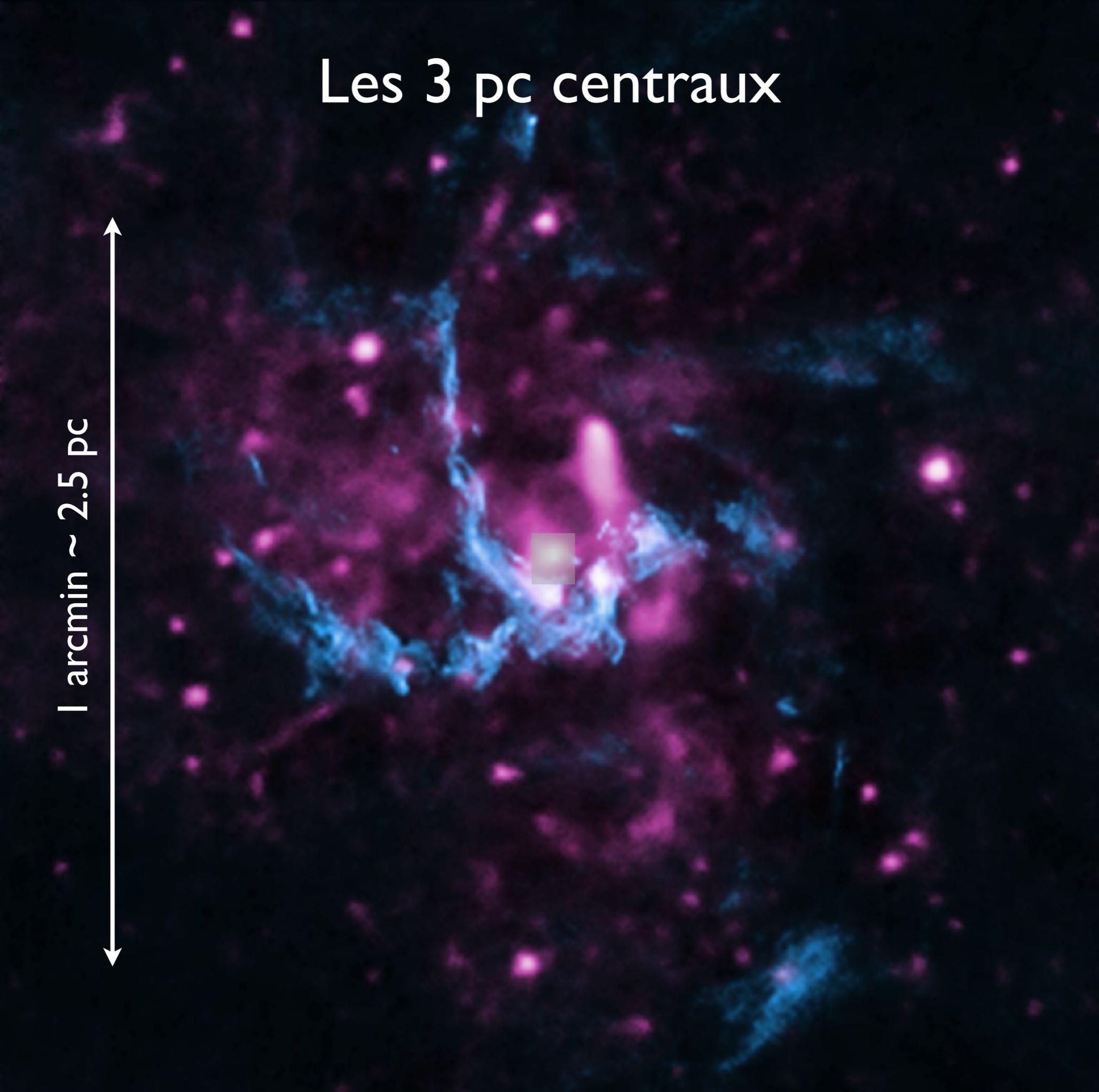
rayons X Chandra

NASA/CXC/UCLA Li et al (2013)

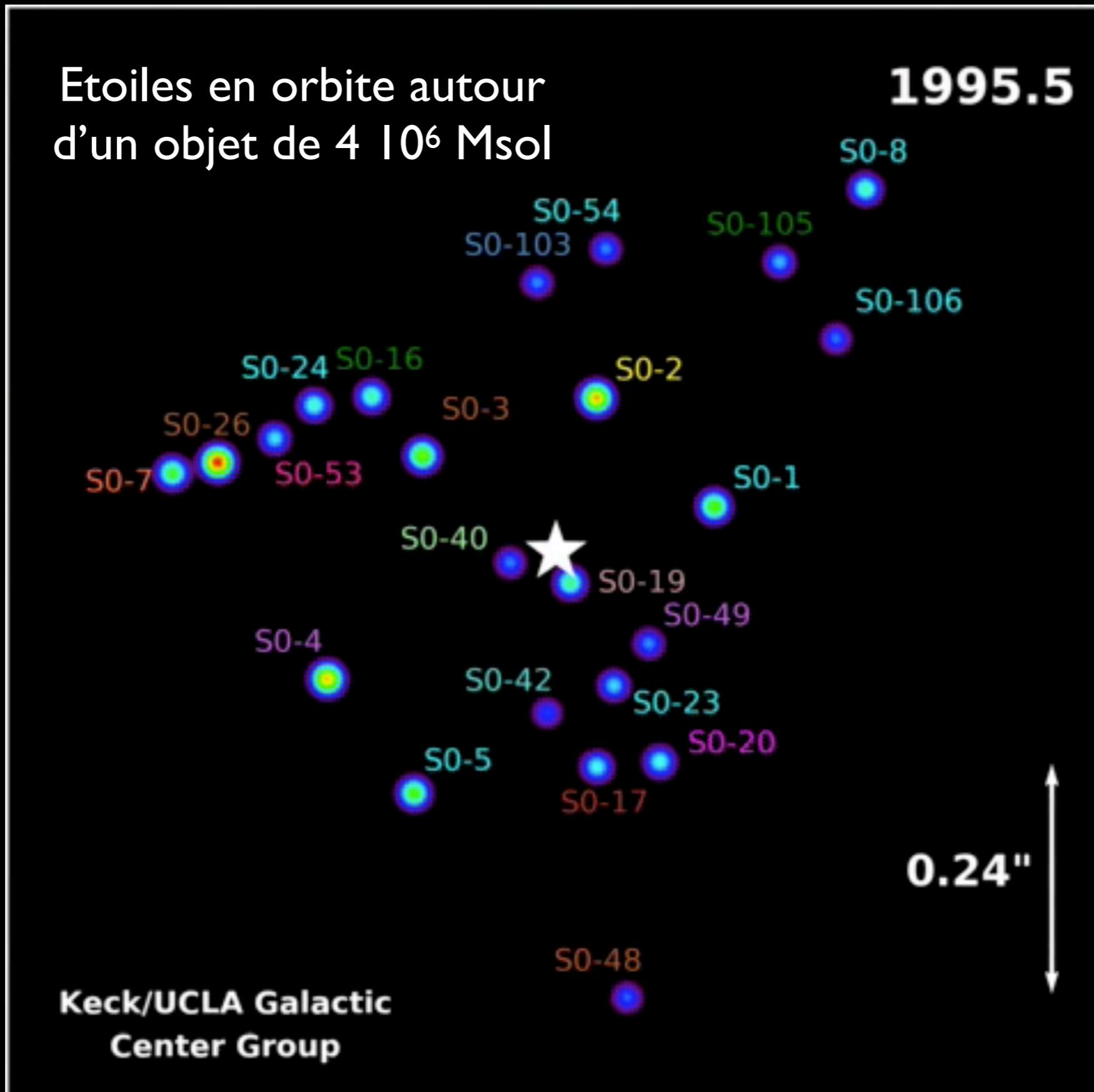


Les 3 pc centraux

1 arcmin \sim 2.5 pc



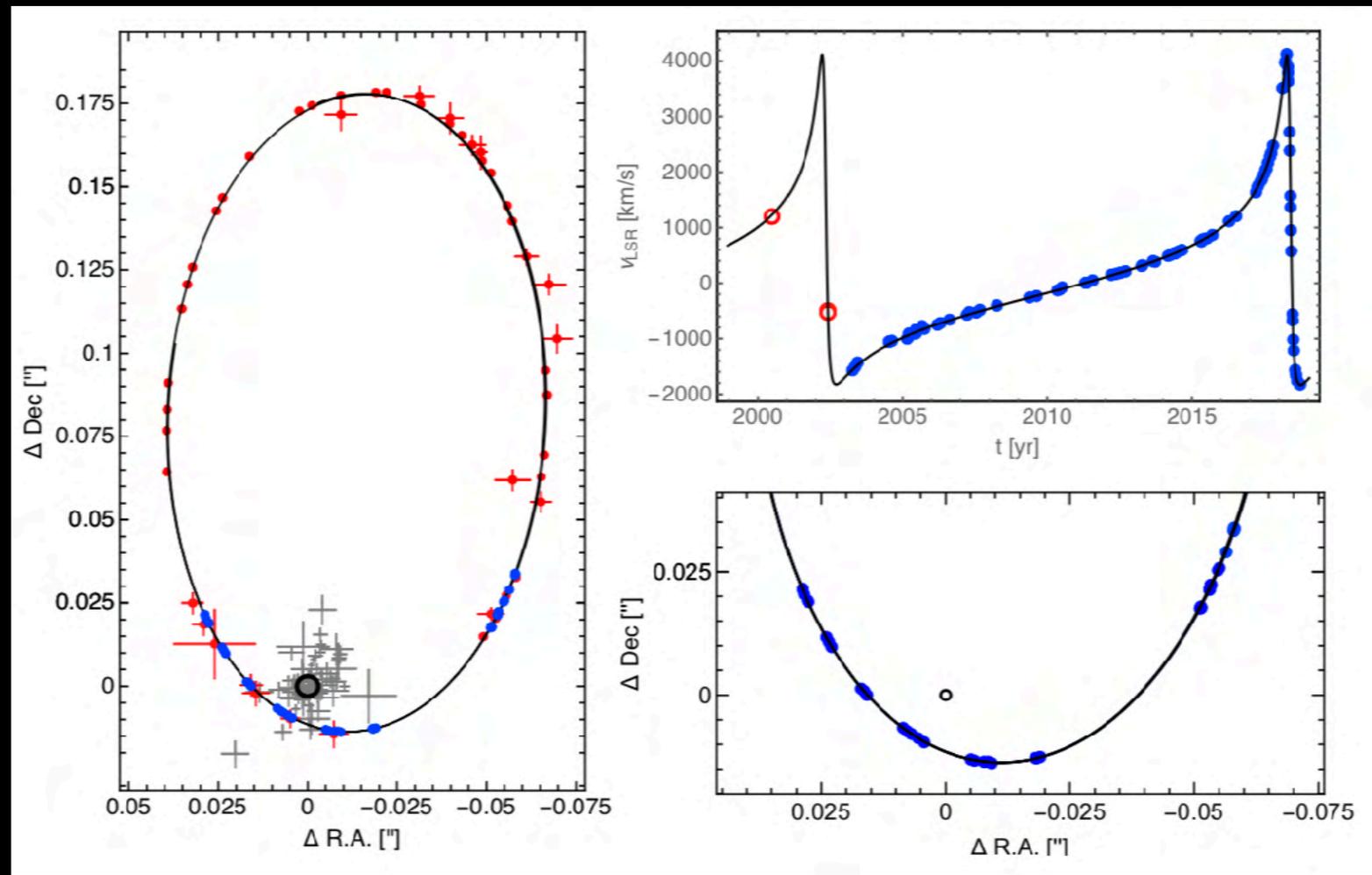
Les 0.03 pc centraux



A. Ghez et al.

Sgr A* : un trou noir supermassif

GRAVITY: interféromètre au VLT. Précision astrométrique : 20-70 μs



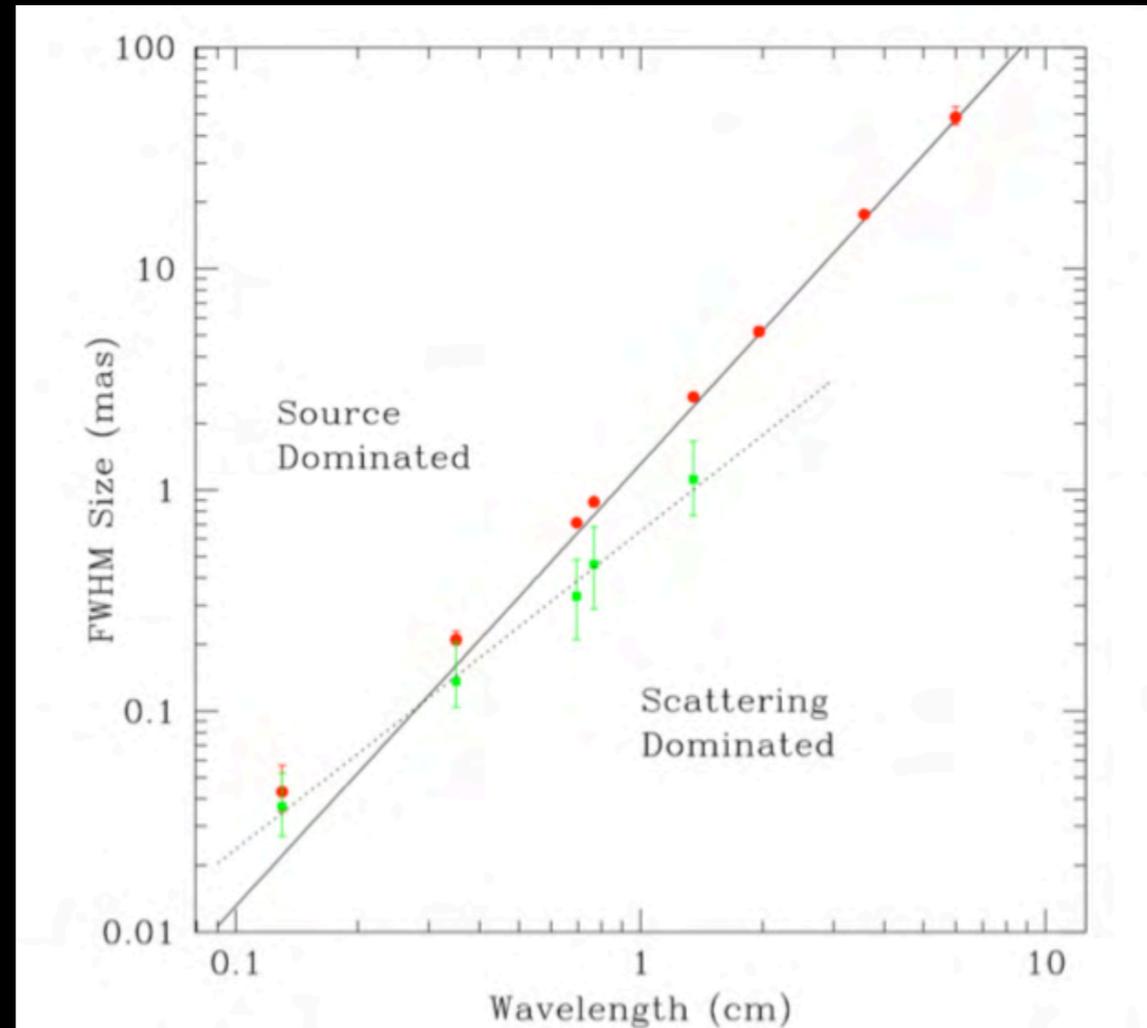
étoile S2
période: 16 ans
péricentre :
2800 R_g

The GRAVITY Collaboration: R. Abuter et al. (2019)

$$M_{BH} = 4.297 \pm 0.013 \times 10^6 M_{\odot} \quad R_0 = 8275 \pm 9_{stat} \pm 33_{sys} pc$$

The GRAVITY Collaboration: R. Abuter et al. (2021)

Sgr A* : un trou noir supermassif



Doeleman et al. (2008)

- Interférométrie radio de grande baseline (VLBI)
- Taille intrinsèque de Sgr A* à 1 mm $\sim 50 \mu\text{as} \sim 6 \cdot 10^{12}$ cm
- Soit $\sim 4-5 R_s$ pour un objet de $4 \times 10^6 M_{\text{sol}}^{\text{aire}}$

Voir l'ombre du trou noir?

- Un réseau de télescopes radio pour l'interférométrie à grande ligne de base: l'Event Horizon Telescope
- Résoudre les régions internes autour de Sgr A* et résoudre l'ombre du trou noir ($\sim 50 \mu\text{arcsec}$)

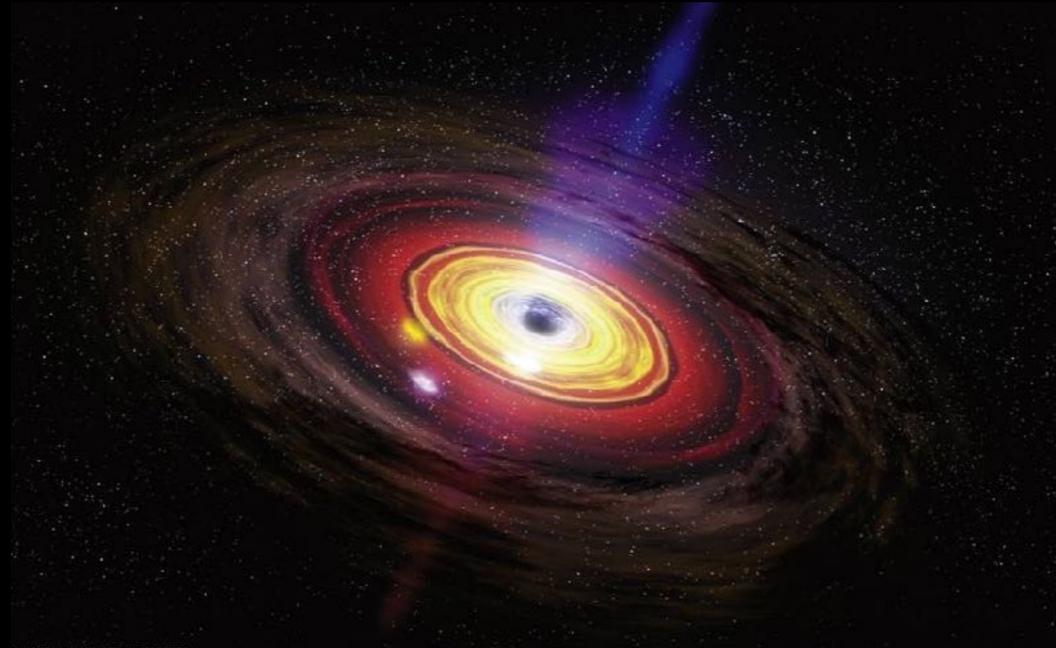


M 87*

EHT collaboration 2019

Sgr A* : un trou noir super massif dormant

Accrétion de matière sur un trou noir

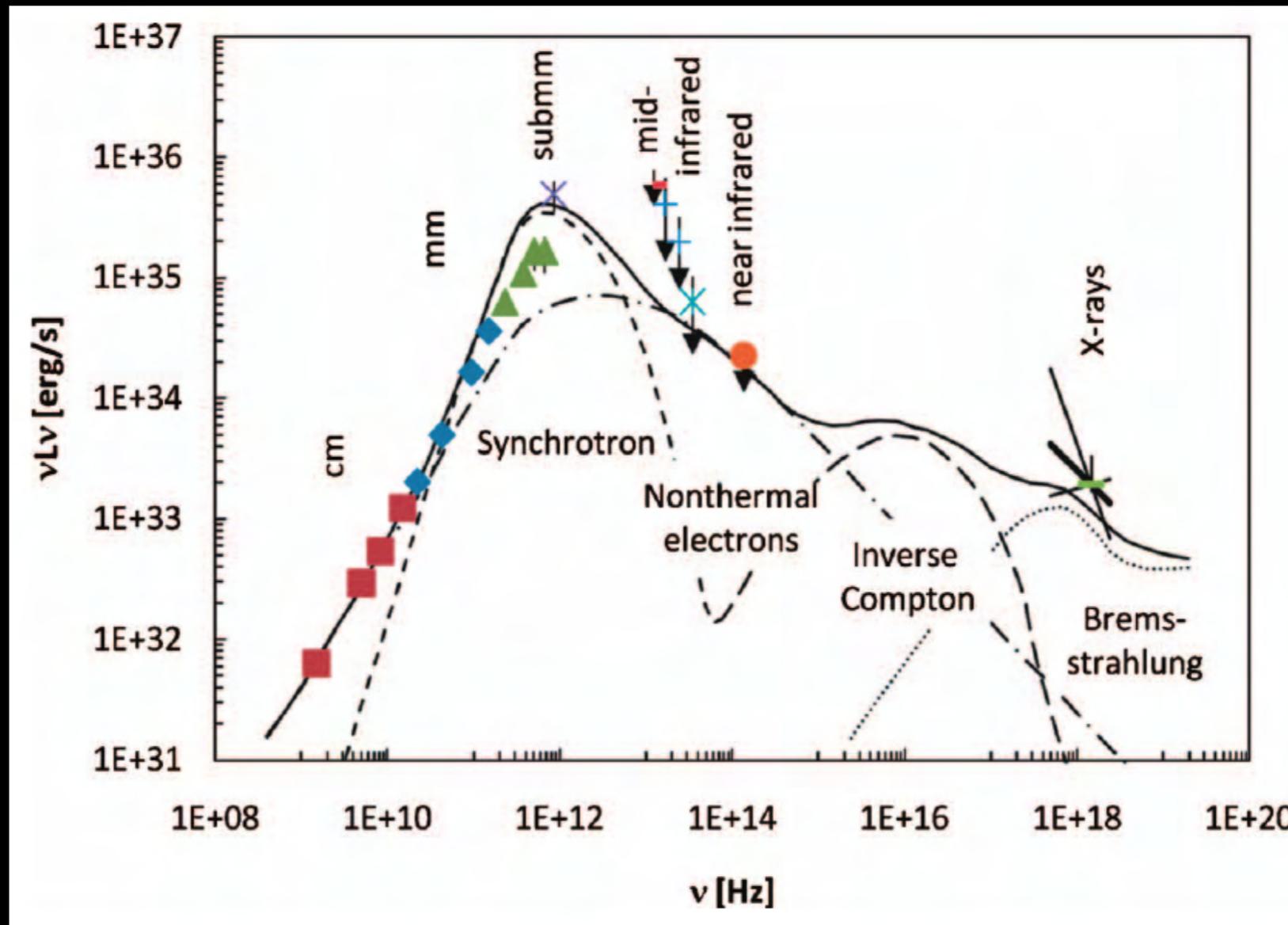


Dissipation de l'énergie du gaz en orbite: chauffage & rayonnement

Si rayonnement est efficace, $L \sim 0.1 \dot{M}c^2$

Luminosité limite (Eddington) pour Sgr A* $\sim 5 \cdot 10^{44}$ erg/s

Sgr A* : un trou noir dormant



Genzel et al (2010)
Yuan et al (2003)

- Luminosité bolométrique $\sim 5 \cdot 10^{35}$ erg/s
- 9 ordres de grandeur en dessous de la limite Eddington!

Accrétion inefficace : hot accretion flow

- Cavité centrale remplie d'un gaz chaud produit par les vents des étoiles massives

- Une partie du gaz est capturée dans le puits de potentiel de Sgr A*

(Baganoff et al 2003, Russel et al 2016)

- Taux d'accrétion au rayon de Bondi

$$\dot{M} \sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$$

- Taux d'accrétion mesuré au voisinage du SMBH

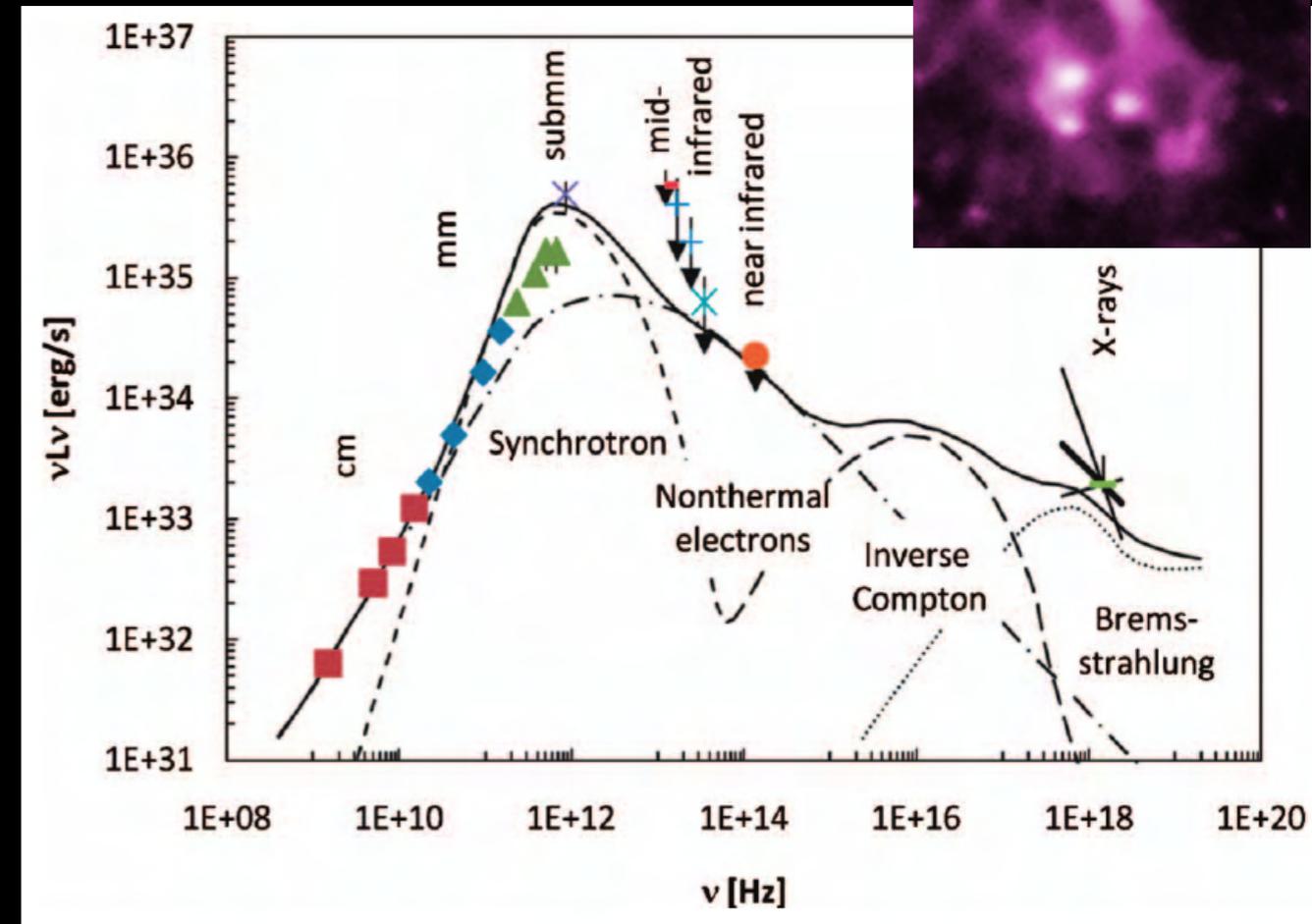
$$10^{-9} M_{\odot}/\text{yr} < \dot{M} < 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$$

(Marrone et al 2007)

- Distribution spectrale bien reproduite par des modèles de type RIAF avec outflows (accrétion chaude).

Puissance sous forme d'éjection estimée $\sim 10^{39}$ erg/s

(Wang et al 2013)



Variabilité et éruptions

- N-IR : Source continuum variable
 - Variations de flux de ~ 1 ordre de grandeur
 - Certaines éruptions s'accompagnent d'une éruption X

- Eruptions X :
 - Fréquence: 1 - 2 par jour
 - Durée typique: $\sim 20 - 60$ min

Neilsen+13, Ponti+15

- Luminosité varie d'un facteur 10-100 par rapport à état quiescent

- Sursauts les plus intenses détectés à

$$L_x \sim 5 \cdot 10^{35} \text{ erg/s}$$

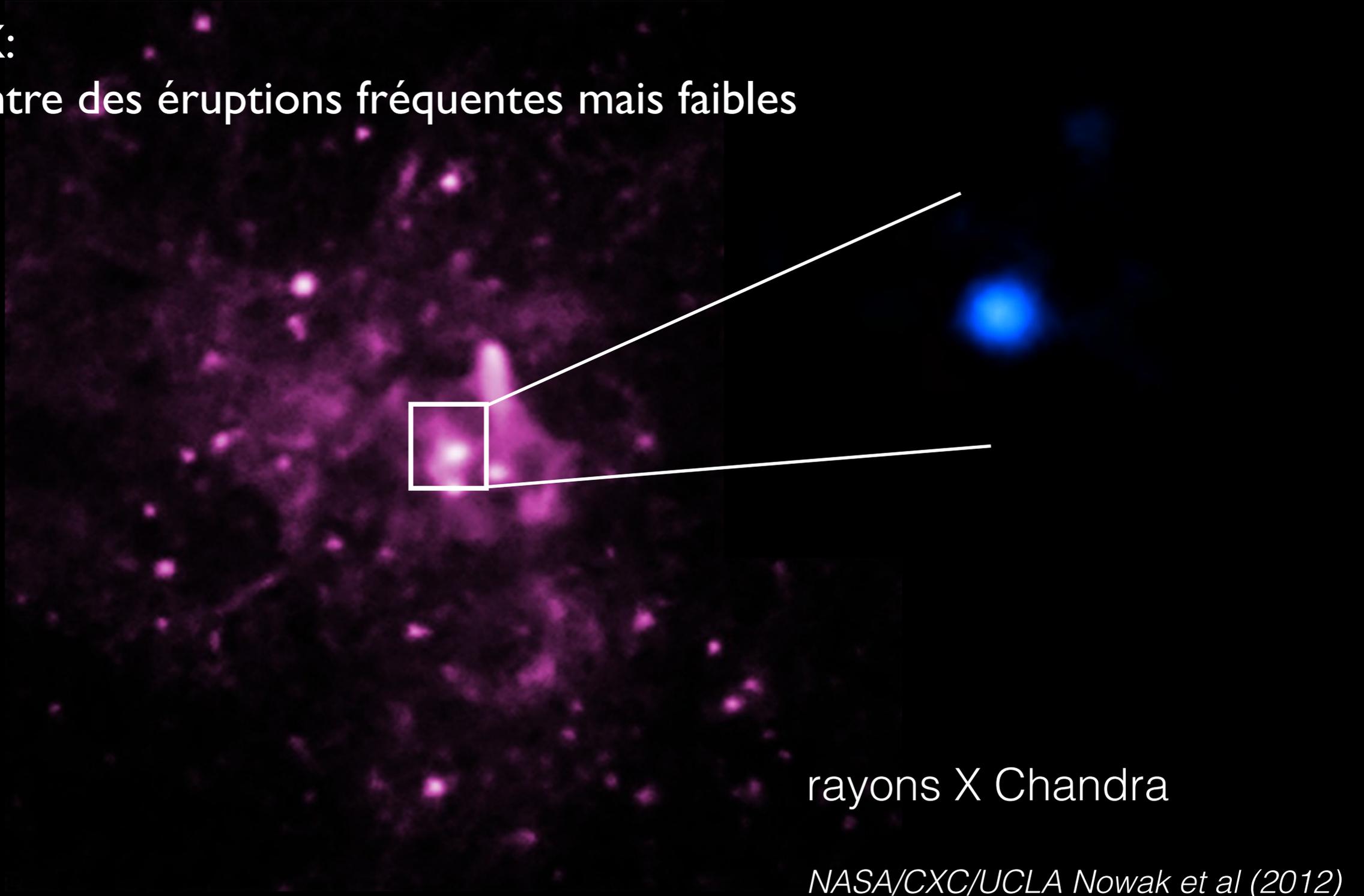
(e.g. Porquet+08, Nowak+12, Ponti+17, Haggard+19)



Variabilité et éruptions

En rayons X:

Sgr A* montre des éruptions fréquentes mais faibles



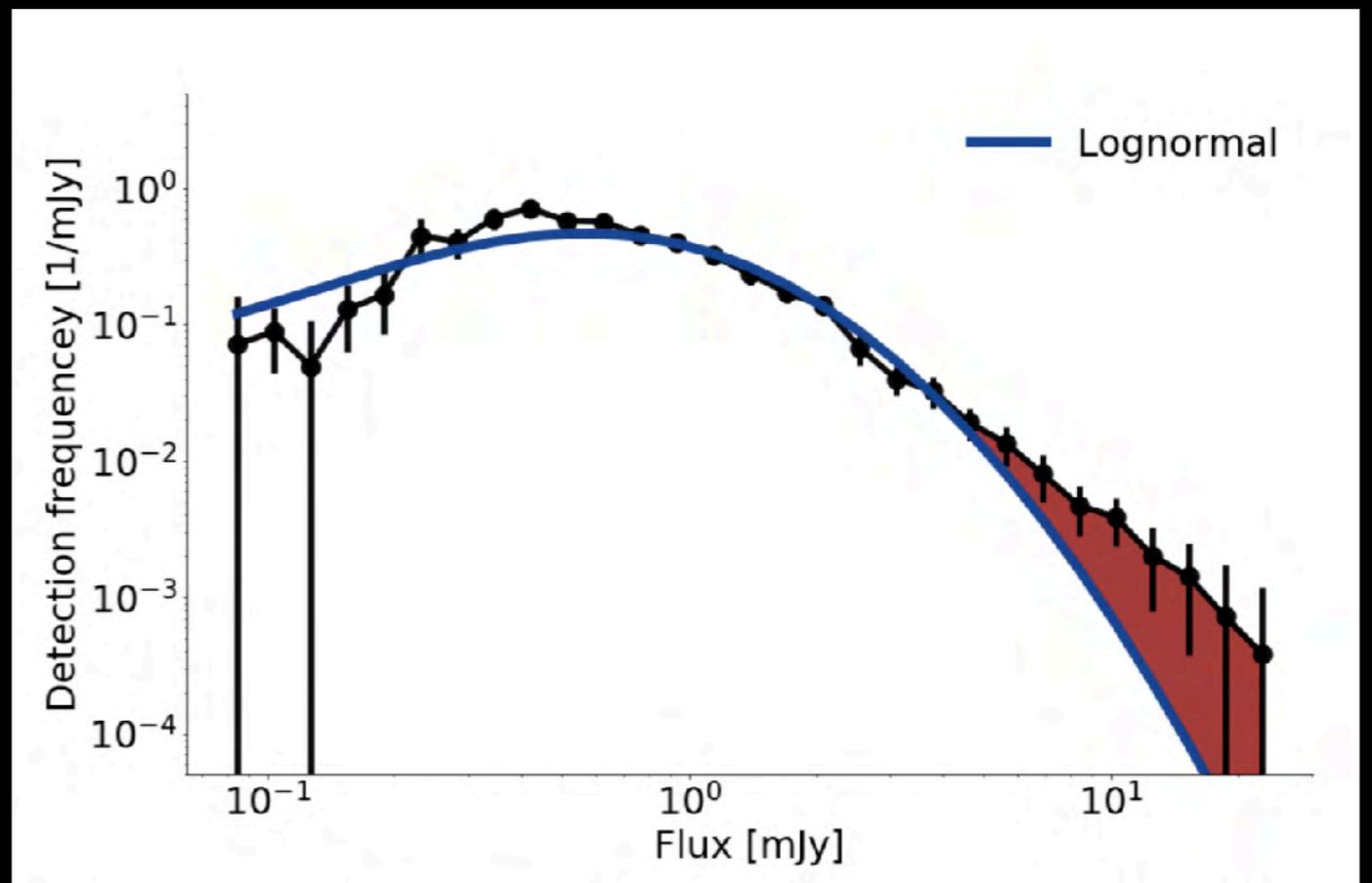
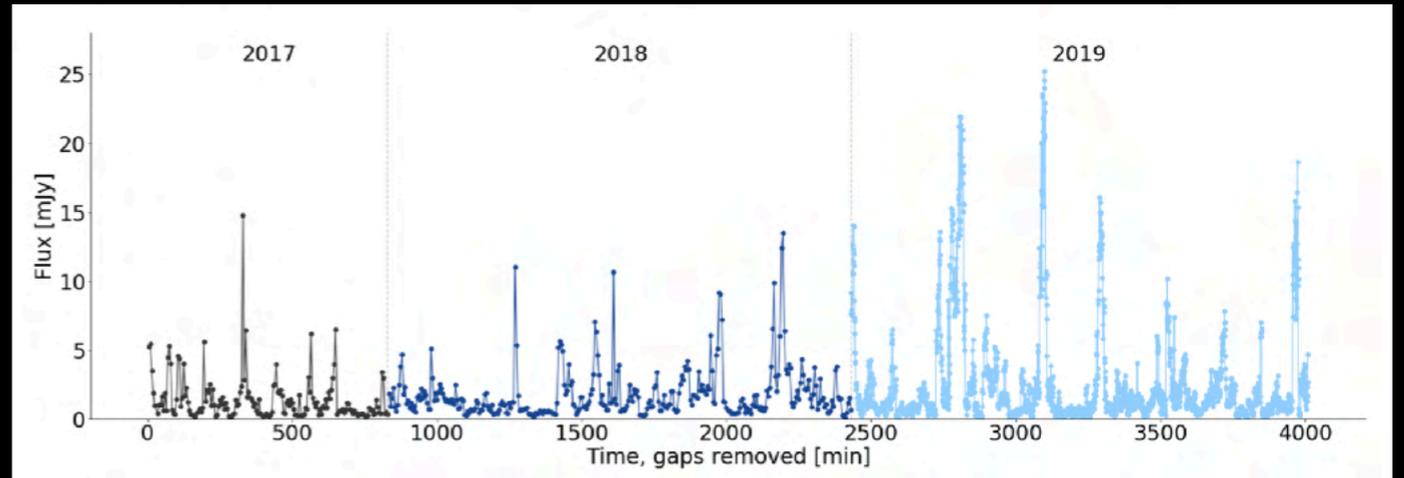
rayons X Chandra

NASA/CXC/UCLA Nowak et al (2012)

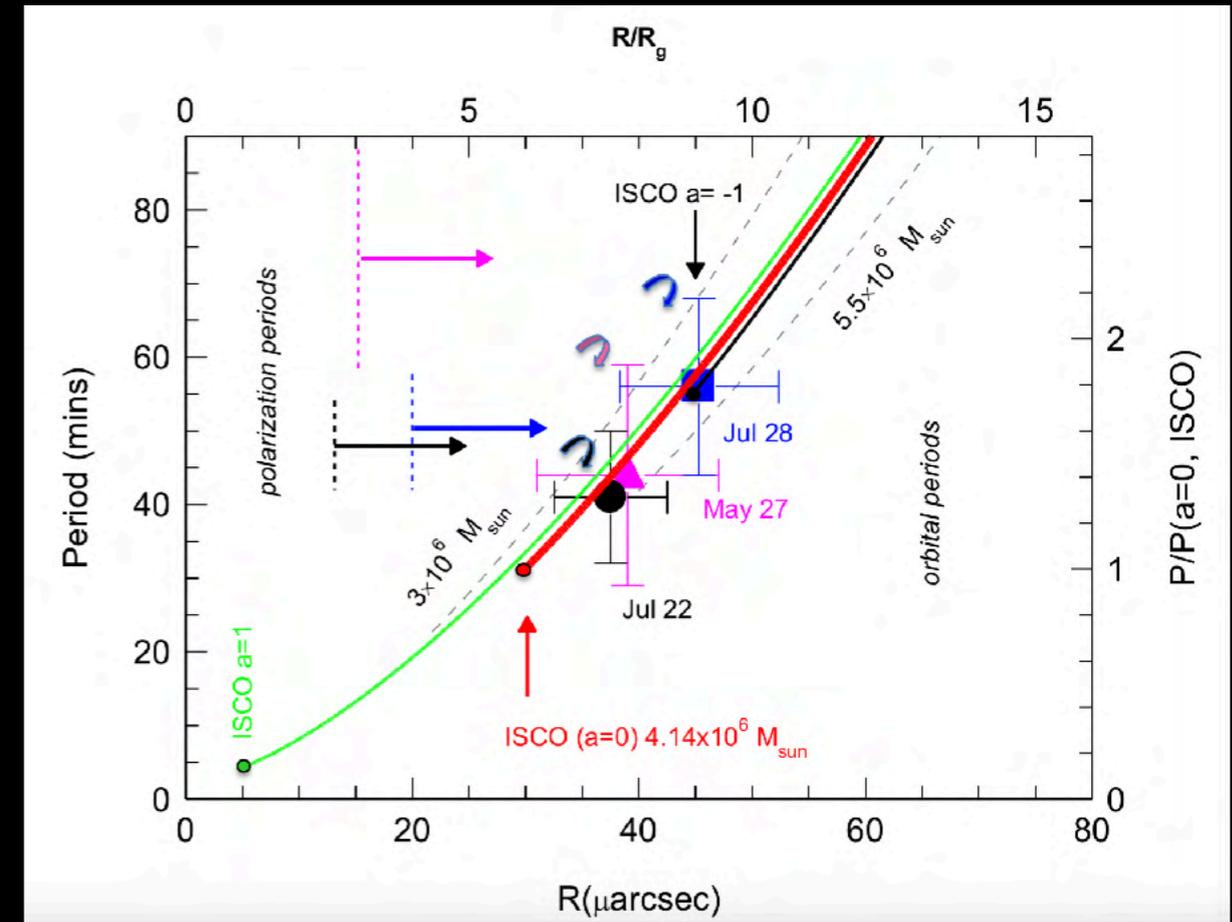
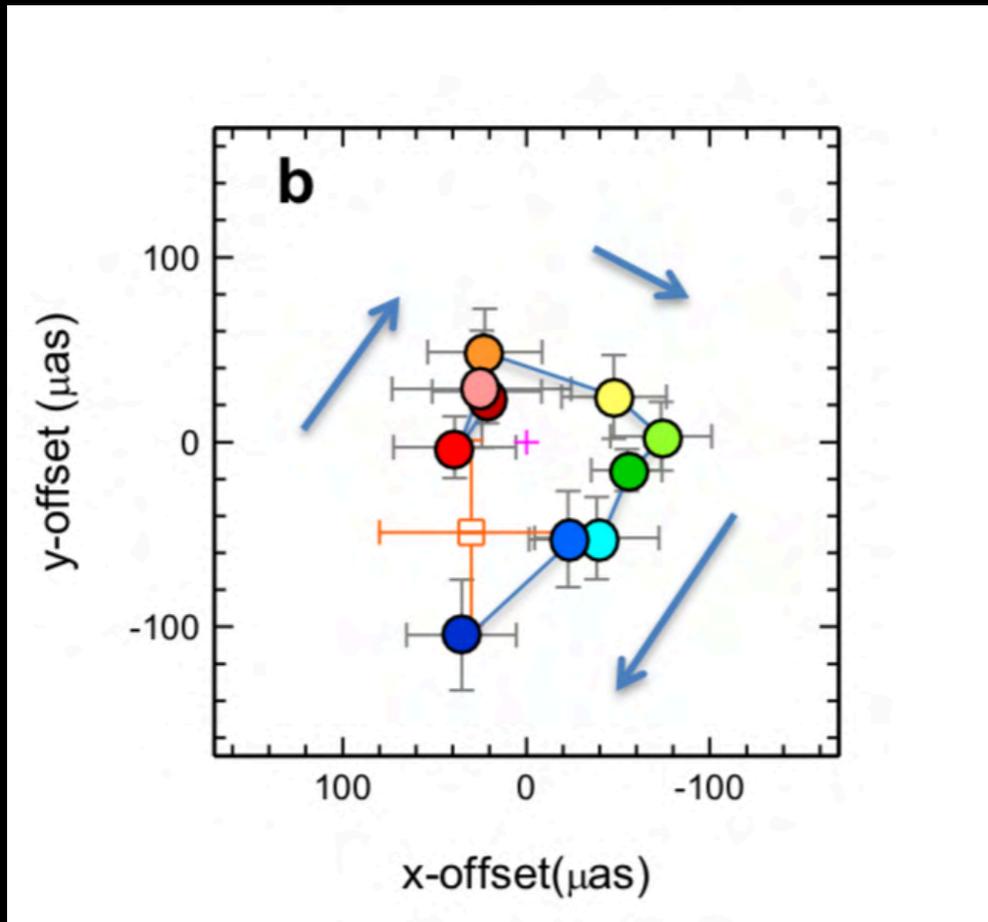
N-IR: Variabilité ou éruptions?

- La variabilité infra-rouge est elle due à un simple processus aléatoire (bruit rouge)?
- La distribution de flux nécessite une composante additionnelle en loi de puissance
- La source IR proche présente donc un état quiescent variable et des éruptions plus intenses

Do et al (2019), Abuter et al (2020)



Eruptions: détection de mouvements orbitaux



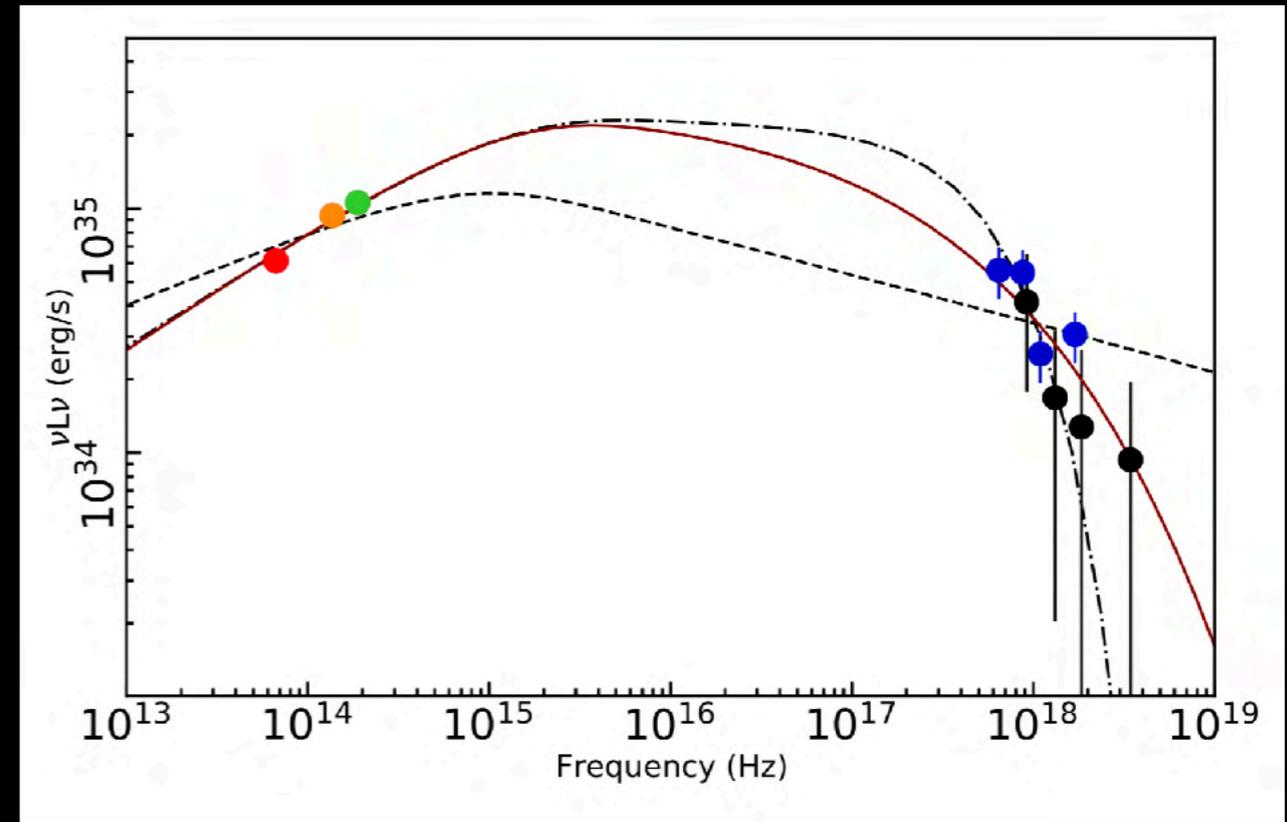
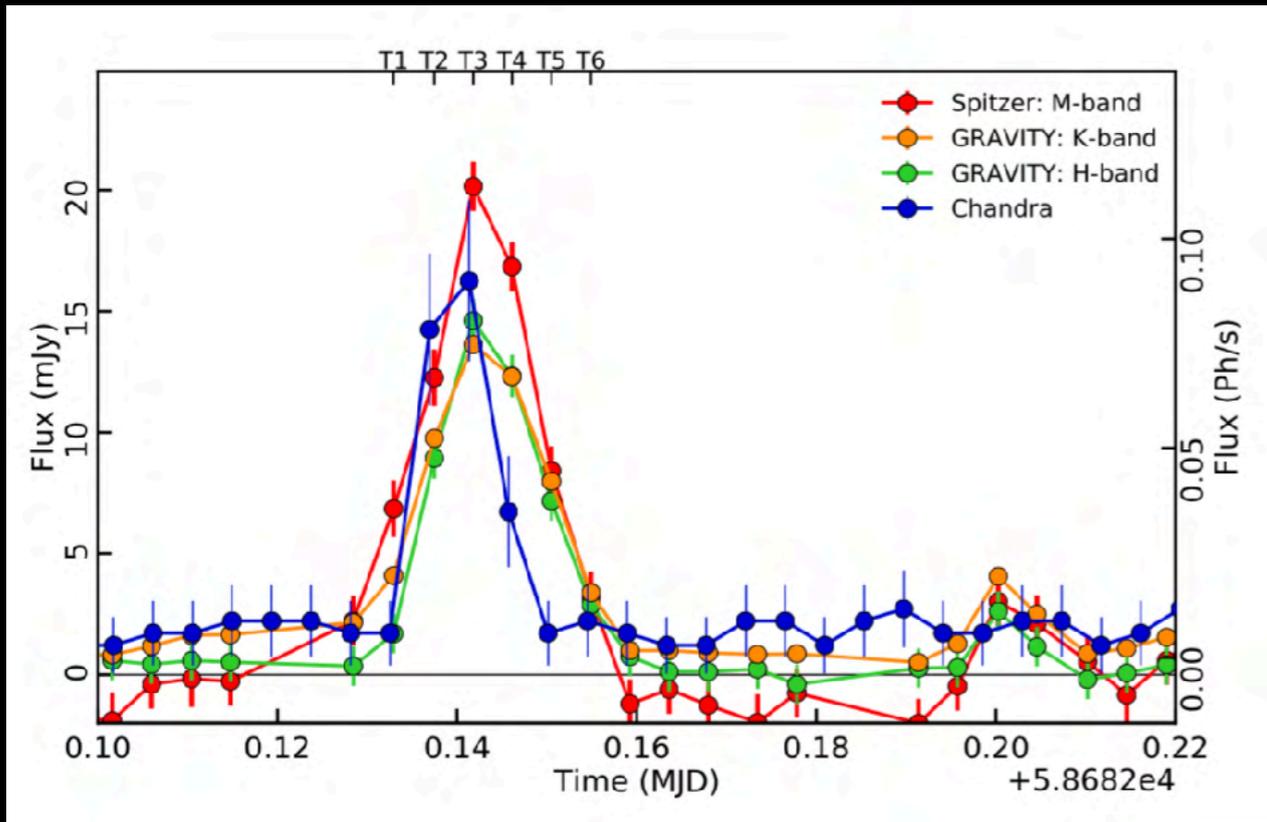
The GRAVITY Collaboration: R. Abuter et al. (2018)

- Gravity a observé 3 flares compatibles avec des orbites circulaires

$$P = 33 - 65 \text{ min} \quad R = 6 - 10 r_g \text{ soit } 1.17 \pm 0.3 \text{ ISCO } (a = 0)$$

- Rotation sur 150 μas à $\sim 0.3 c$

Modèles radiatifs des éruptions

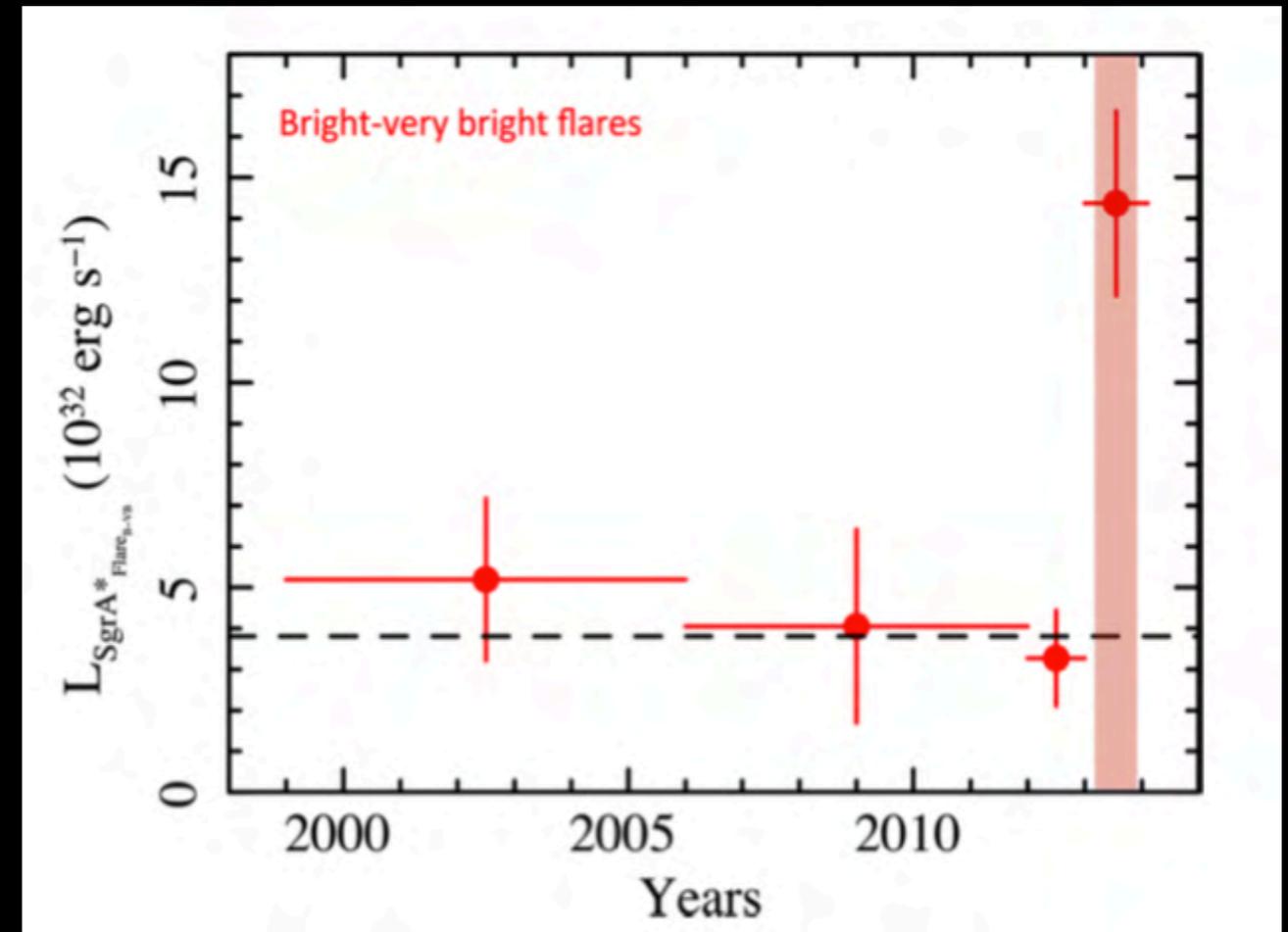


The GRAVITY Collaboration: R. Abuter et al. (2021)

- Phénomènes radiatifs à l'oeuvre encore mal compris
- Rayonnement IR produit par rayonnement synchrotron d'électrons non-thermiques (polarisation)
- Origine des rayons X encore incertaine:
 - synchrotron ou SSC (synchrotron self-Compton)?

Des variations de fréquence des éruptions?

- La fréquence des éruptions X ne varie pas significativement depuis 2000
- La fréquence des éruptions X les plus brillantes semble avoir été multipliée par ~ 3 à partir de 2014 *Ponti et al (2015), Mossoux et Grosso (2017), Mossoux et al (2020)*
- Des sursauts IR plus intenses observés en 2019 *Do et al (2019)*
- Un effet causé par le passage de G2 au periastre en 2014?
 - G2: un objet (nuage?) de quelques masses terrestres
 - période orbitale: ~ 250 ans



Ponti et al. (2015)

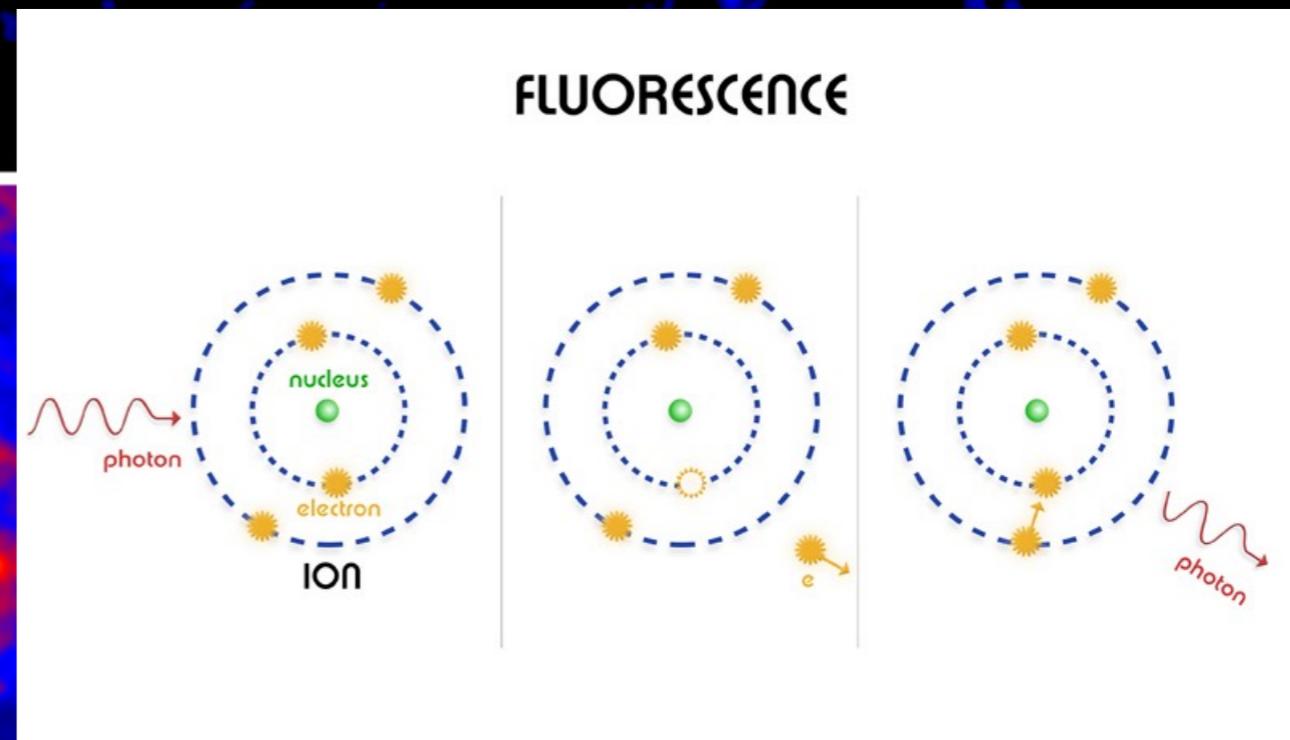
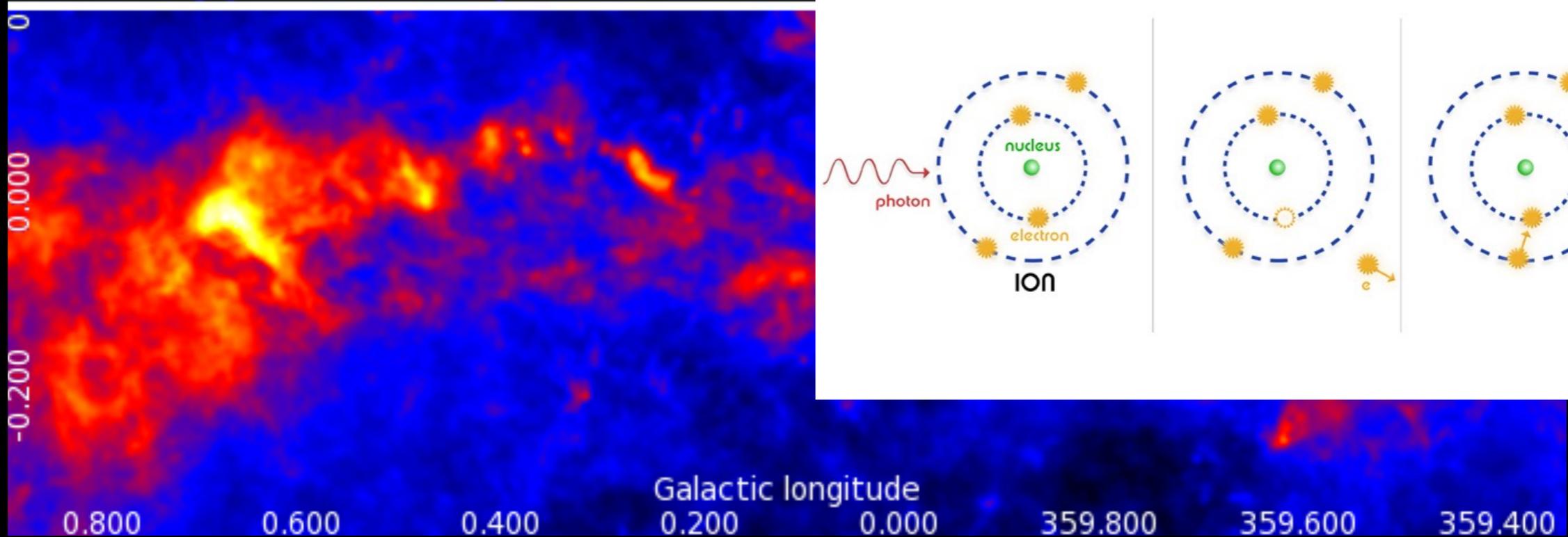
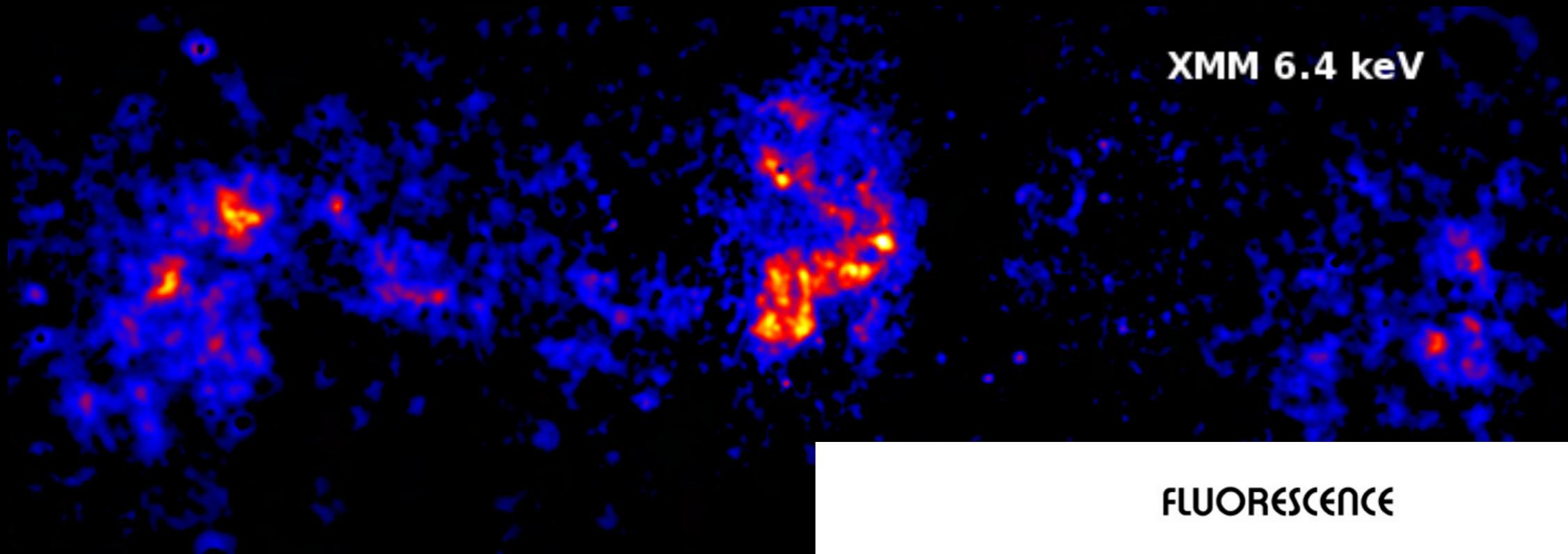
Sgr A*: un trou noir dormant

- Luminosité actuelle de Sgr A* $\sim 5 \cdot 10^{35}$ erg/s $\sim 10^{-9} L_{\text{Edd}}$
- Des sursauts quotidiens mais faibles $\sim 10^{34-35}$ erg/s
- Les éruptions sont produites à proximité du trou noir
- Des indications de variabilité du taux d'éruptions

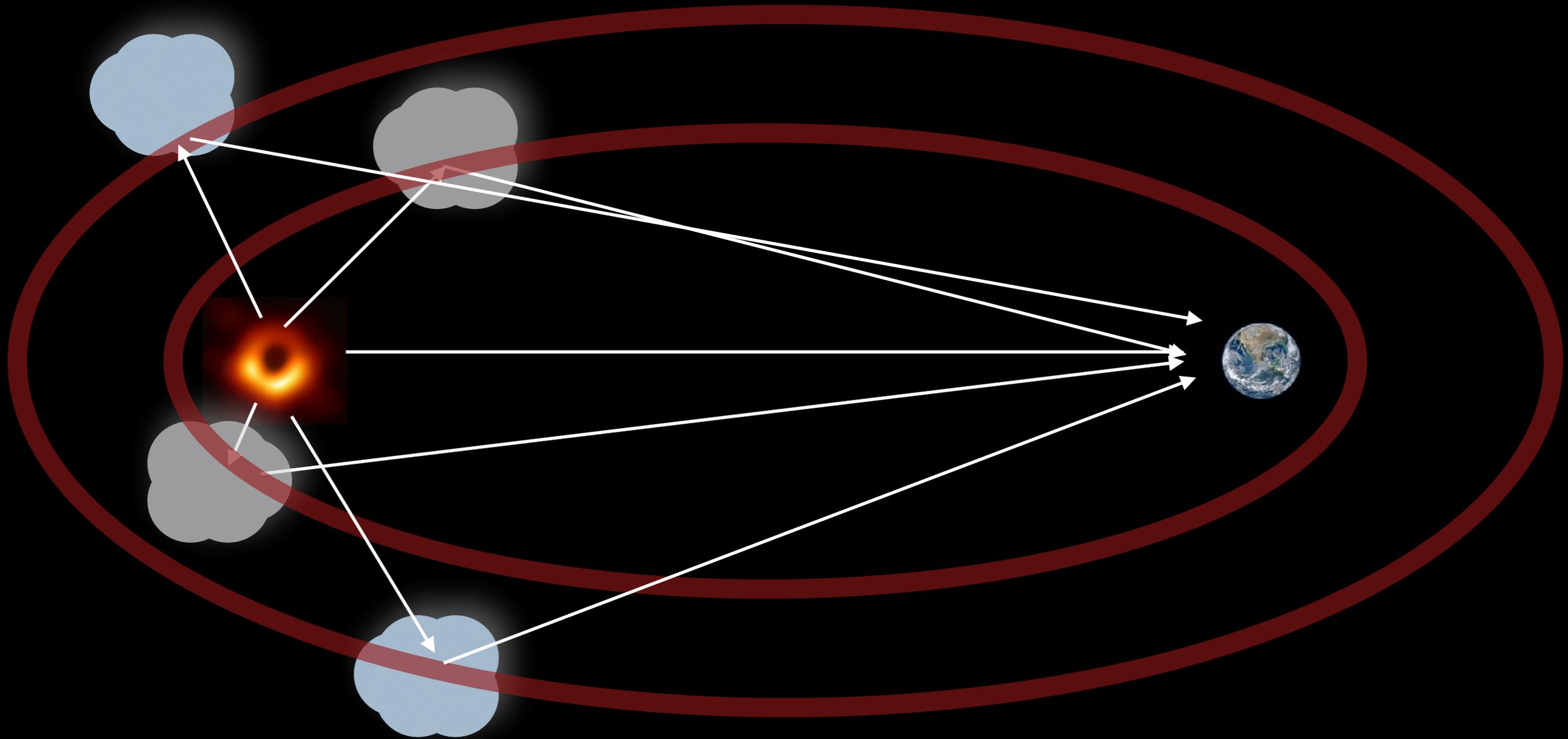
Y'a-t il eu des épisodes de forte activité par le passé?

Traces de l'activité passée de Sgr A*?

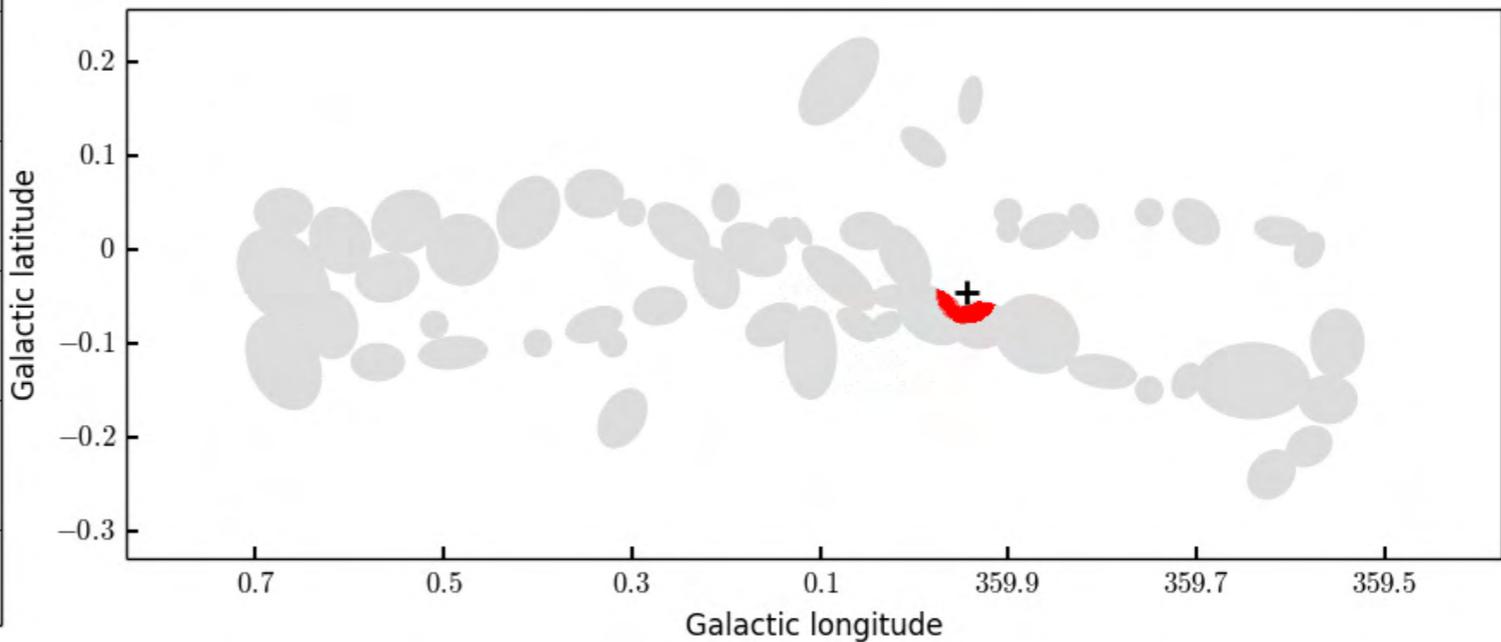
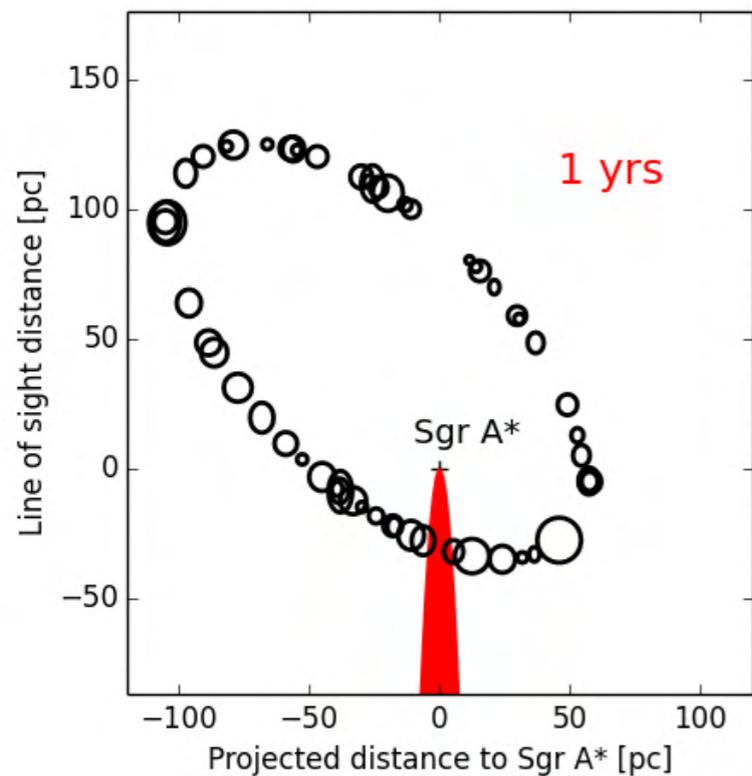
Fluorescence du fer interstellaire dans les 100 pc centraux



Des échos de lumière?



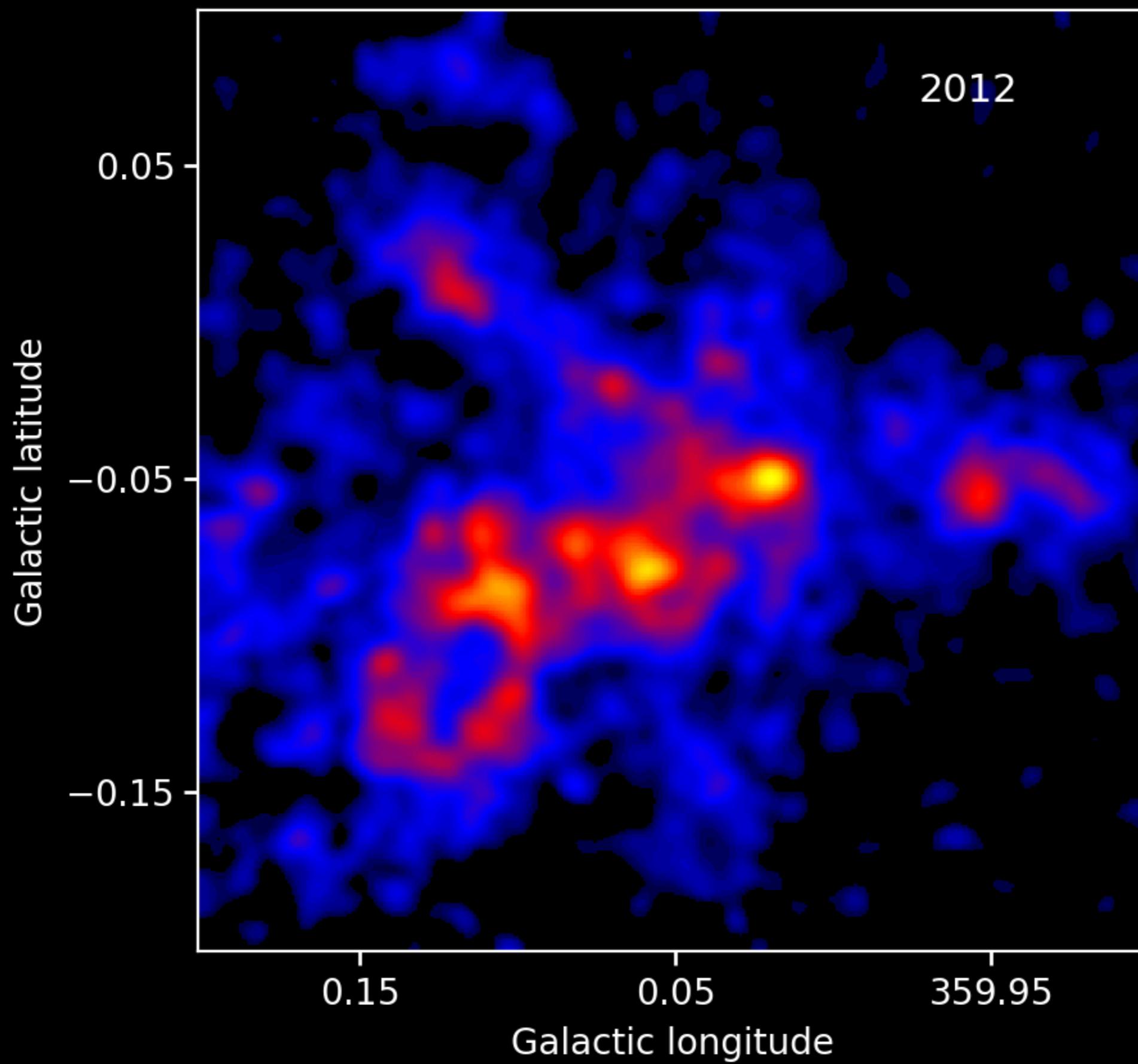
Propagation d'échos de lumière dans la CMZ



Clavel, et al (2014)

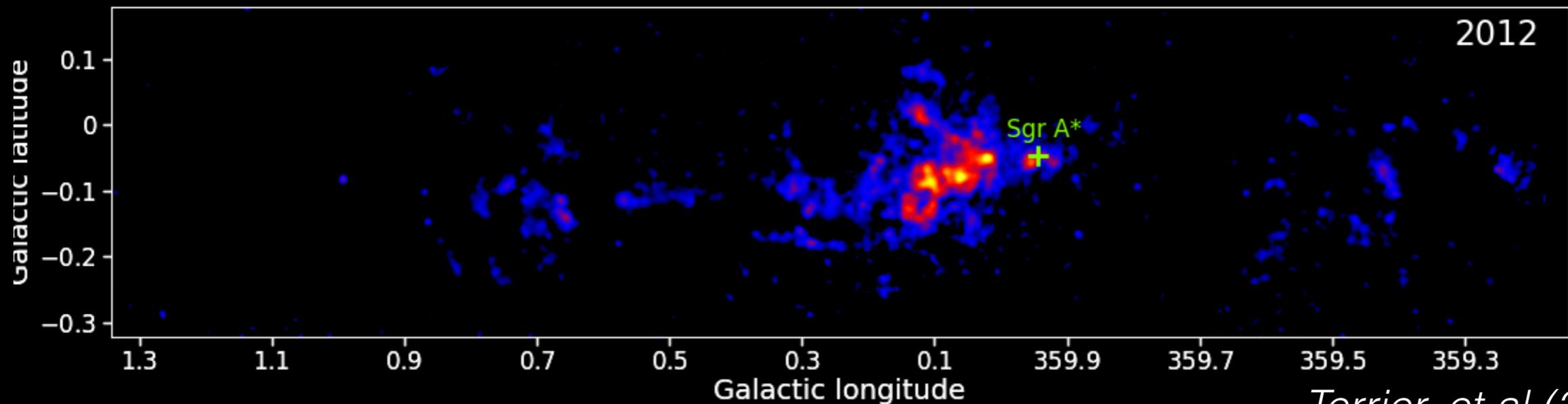
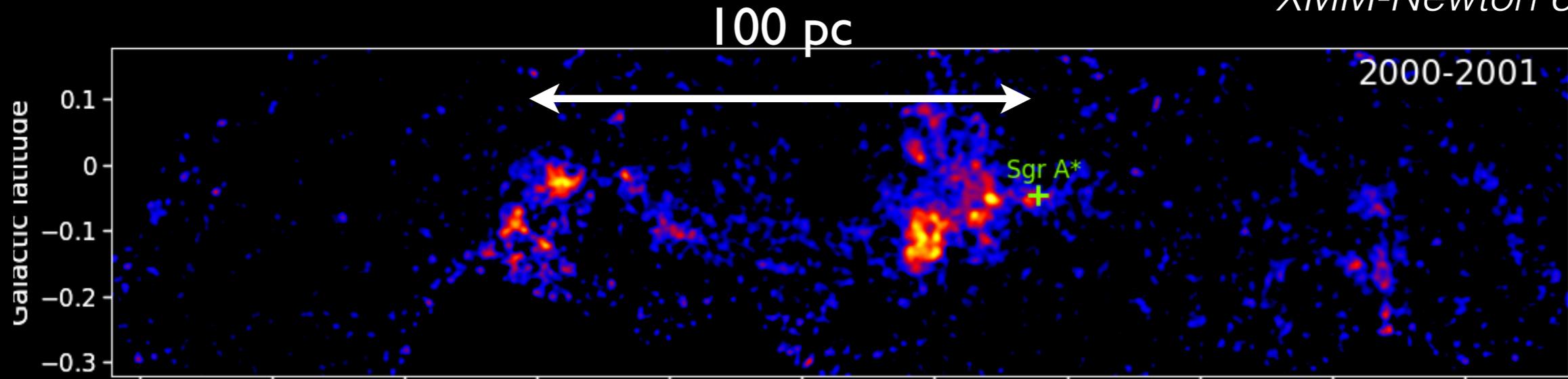
$$\frac{\dot{x}}{c} = \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{\|x\|} \geq 1 \quad \text{Mouvement superluminaire}$$

P. Couderc Les auréoles lumineuses des novae(1939)



Des échos de lumière

XMM-Newton 6.4 keV



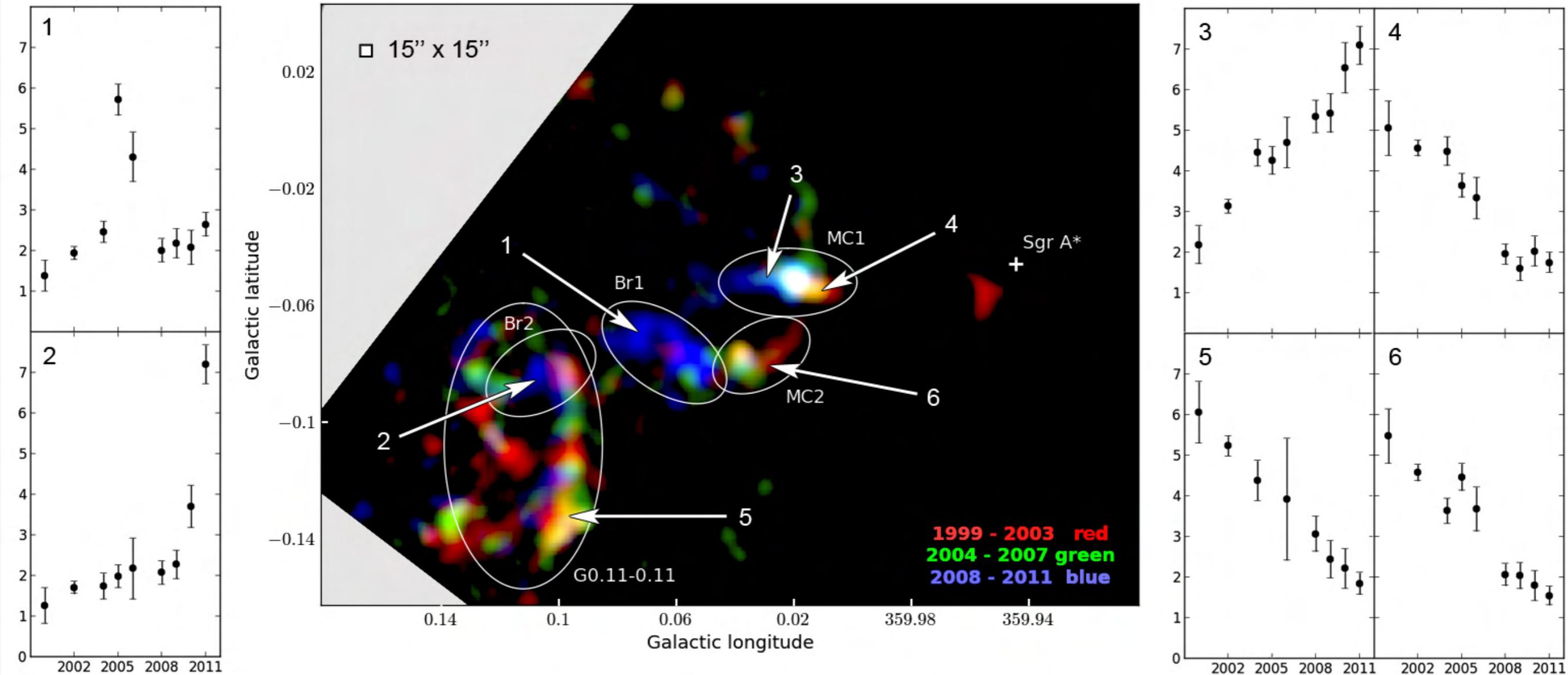
Terrier, et al (2018)

Illumination par une source de $L_x \sim 10^{39}$ erg/s

Koyama et al (1996), Revnivtsev et al. (2004) Terrier, et al (2010)

Plusieurs échos?

Mesures des temps caractéristiques de variabilité avec *Chandra* et *XMM*

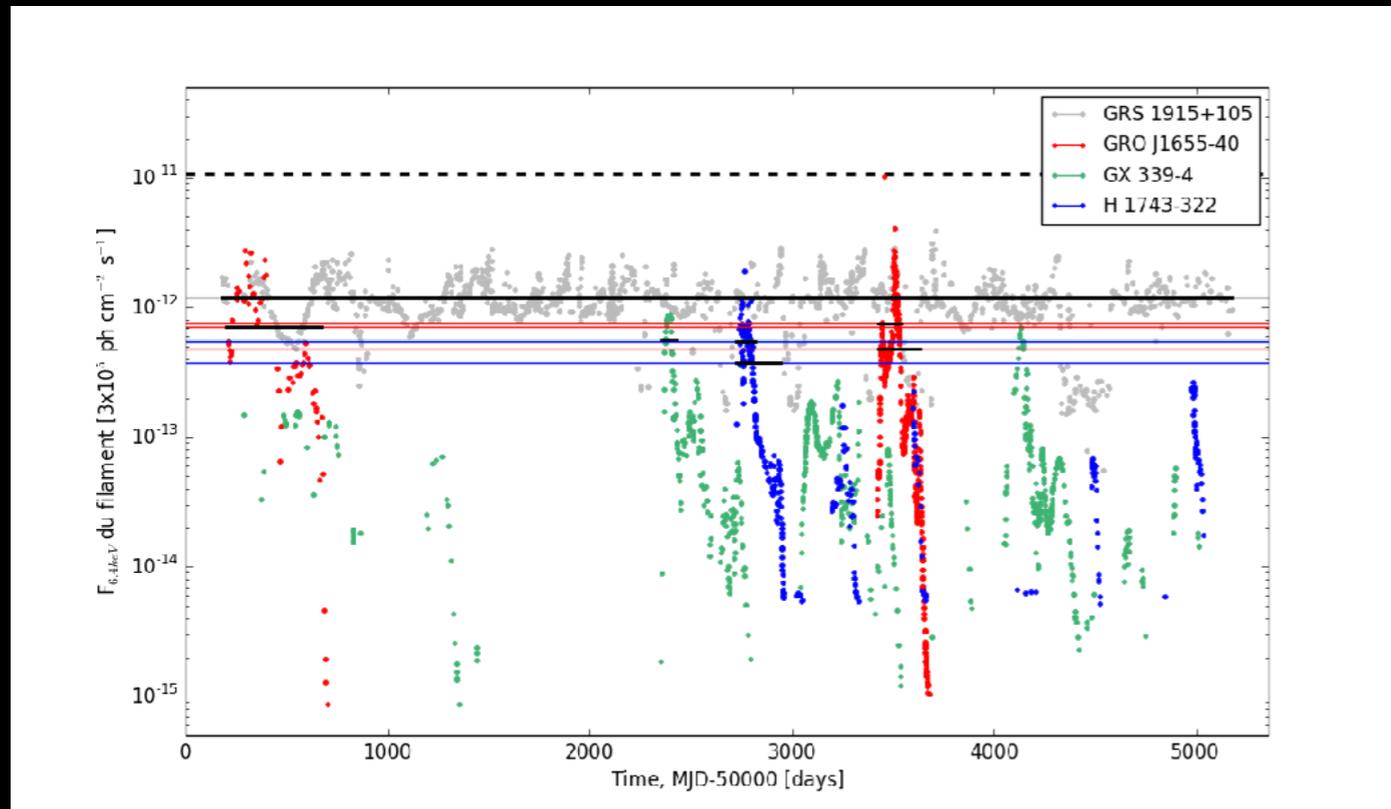


2 temps caractéristiques : ~ 1 yr, ~ 10 yrs : 2 événements distincts

Clavel et al (2013), Terrier et al. (2018)

Sgr A* à l'origine des illuminations?

Une binaire X à proximité du trou noir peut-elle expliquer les échos?

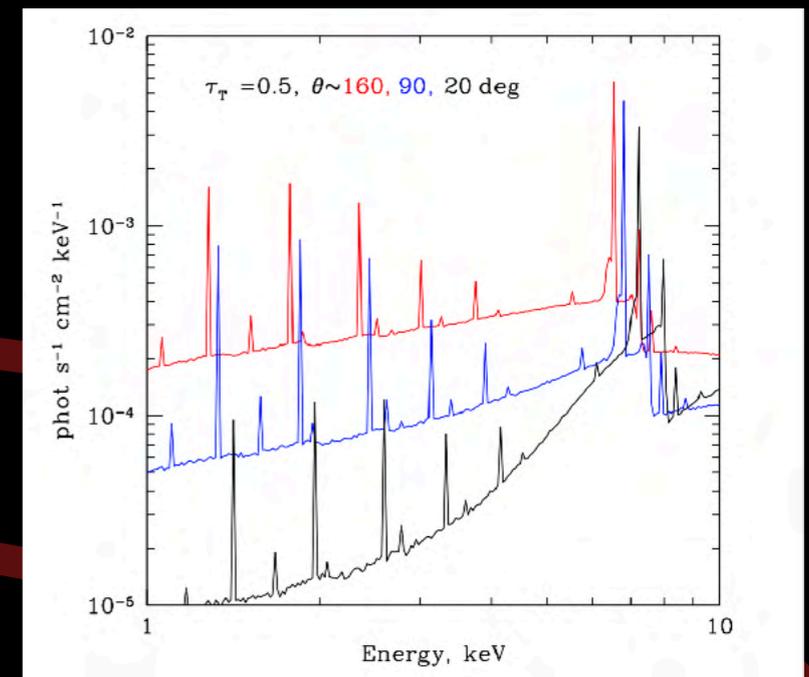


Binaires X Galactiques trop faible d'au moins un facteur 10

Un sursaut super-géant de magnetar?

Un sursaut du type de SGR 1806 le 27 Dec 2004 (10^{46} erg en moins d'une seconde) est trop faible de 1-2 ordres de magnitude

Dater les éruptions de Sgr A*?



Churazov et al (2017)

La forme du spectre diffusé dépend de la position de la source par rapport à l'observateur

Walls et al (2016), Churazov et al (2017), D. Chuard (2018)

Dater les éruptions de Sgr A*?

2 échos distincts!

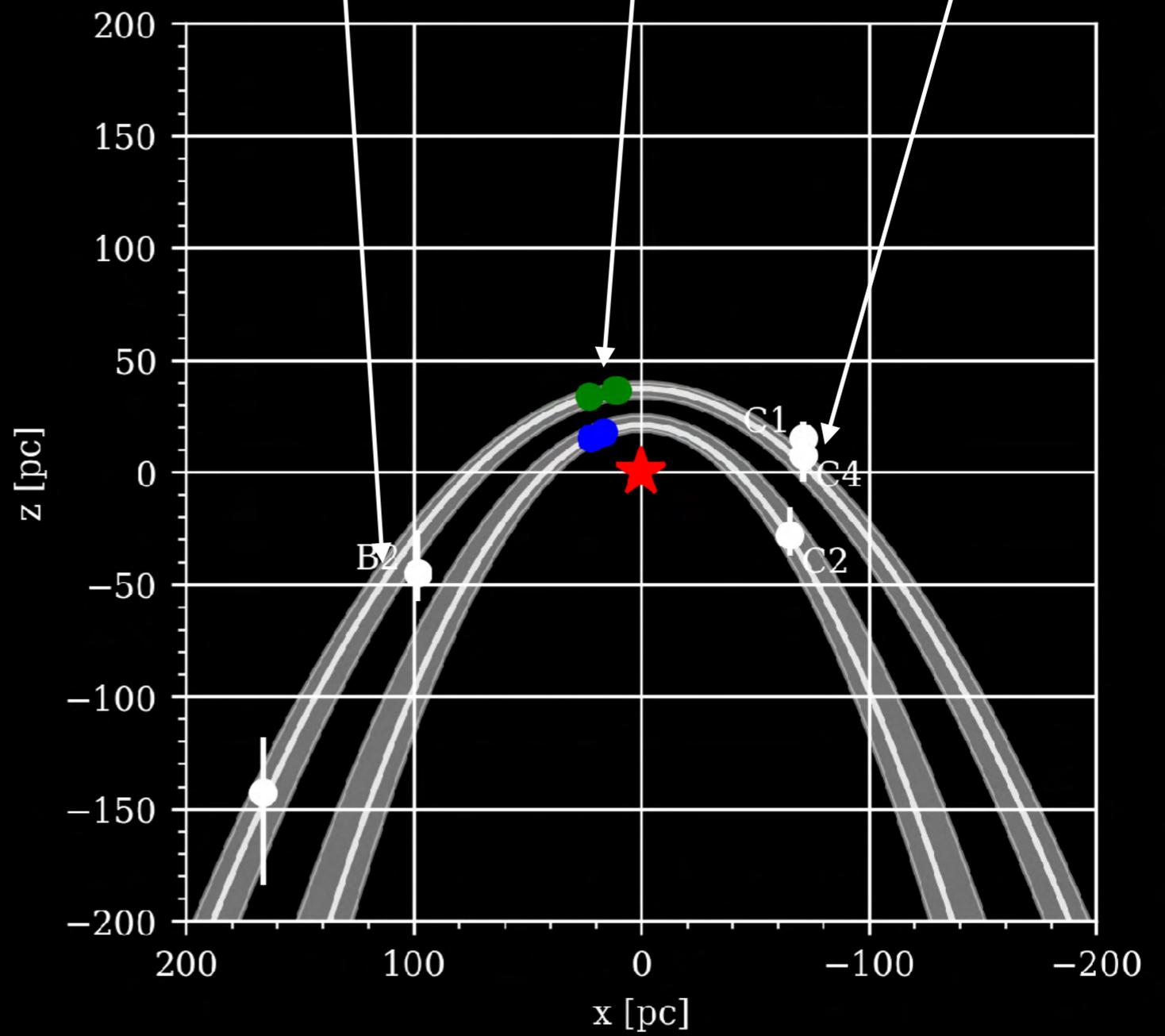
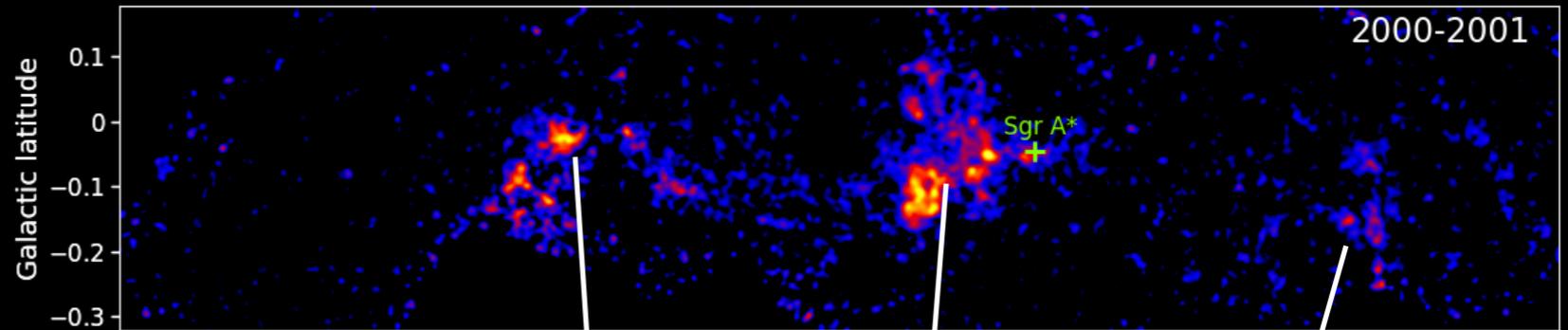
2 éruptions brèves
(~1 an et 10 ans)

$\Delta t_1 \sim 100$ ans

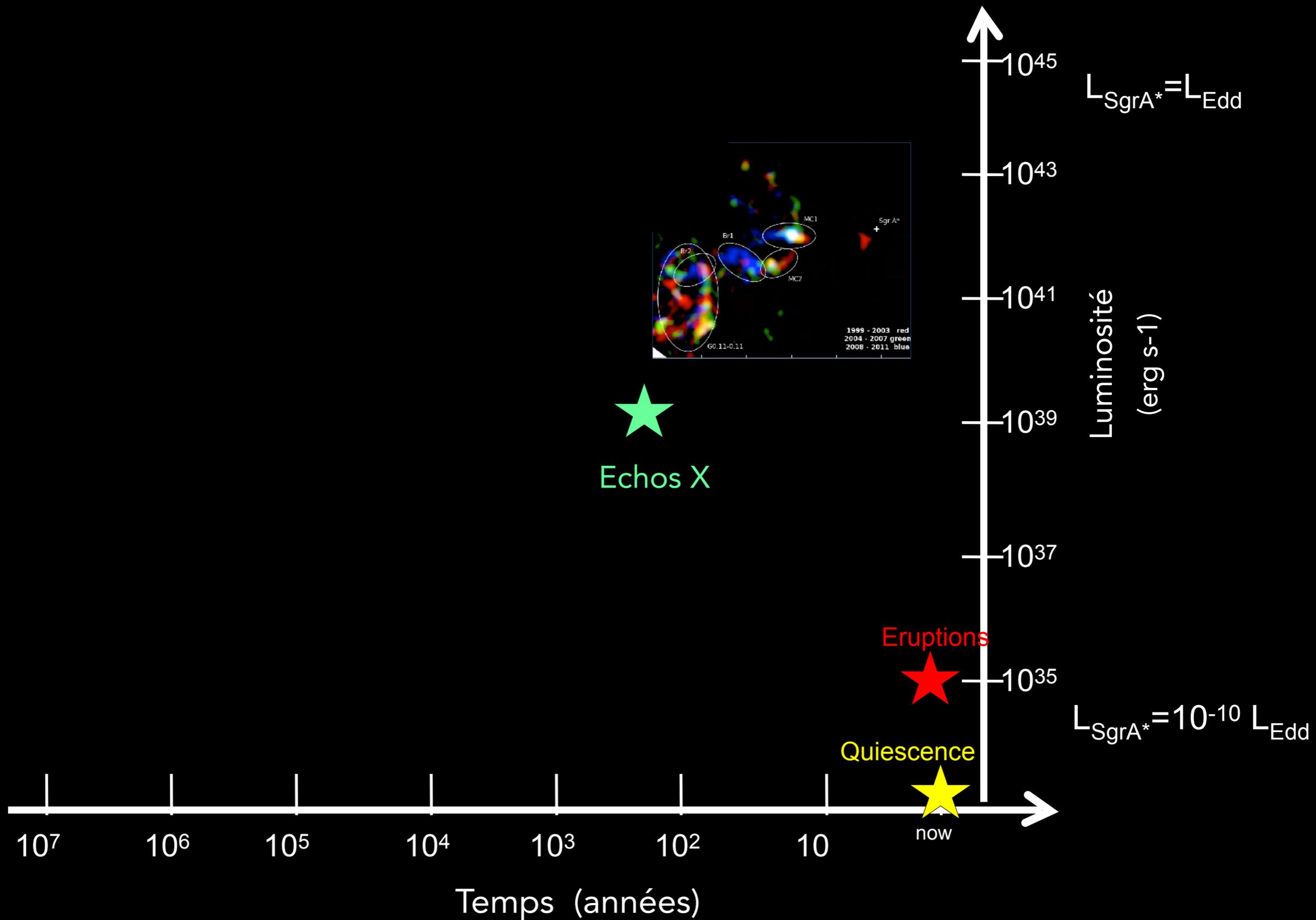
$\Delta t_2 \sim 240$ ans

Luminosité requise:

$L_X \sim 10^{39}$ erg/s



Activité passée Sgr A*



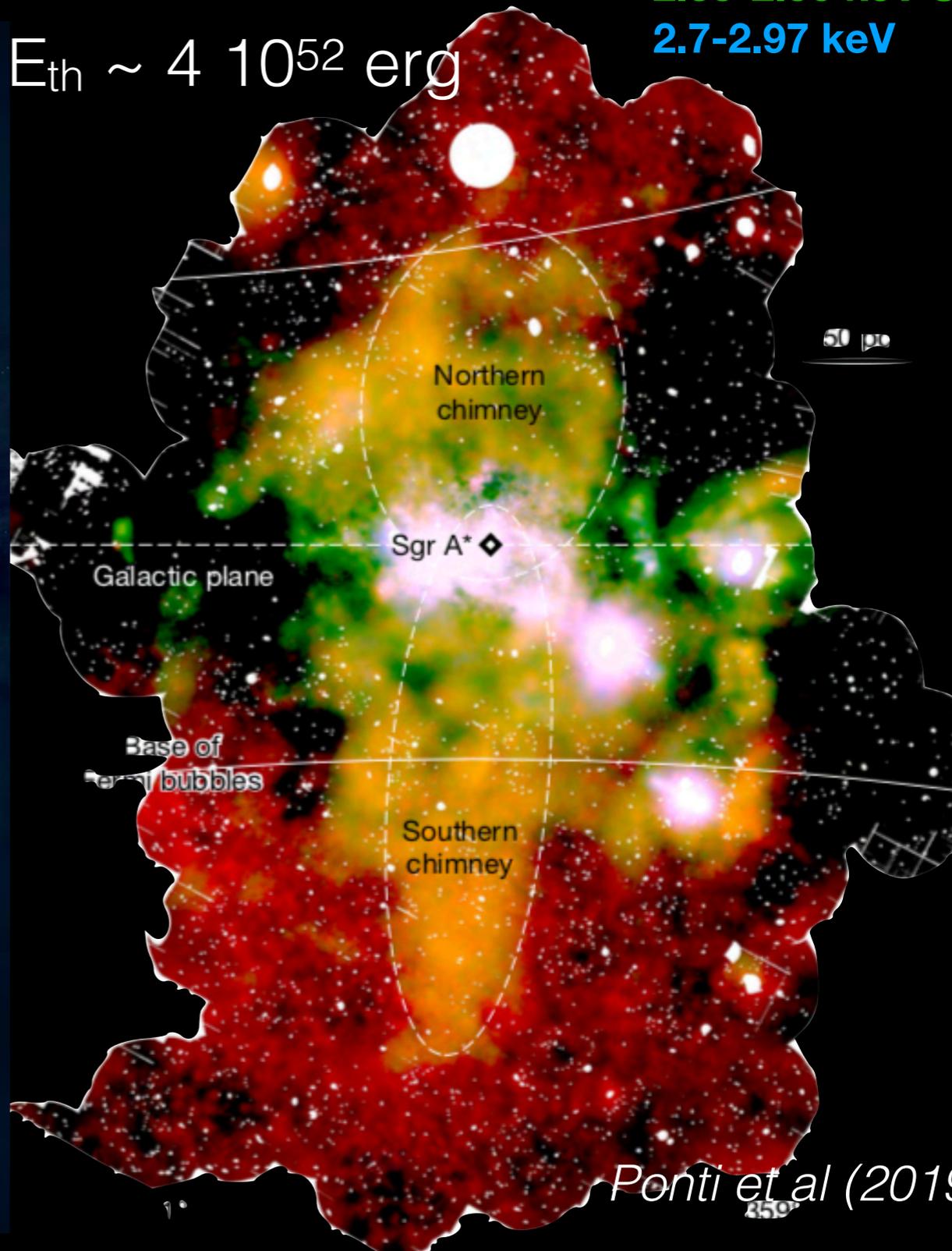
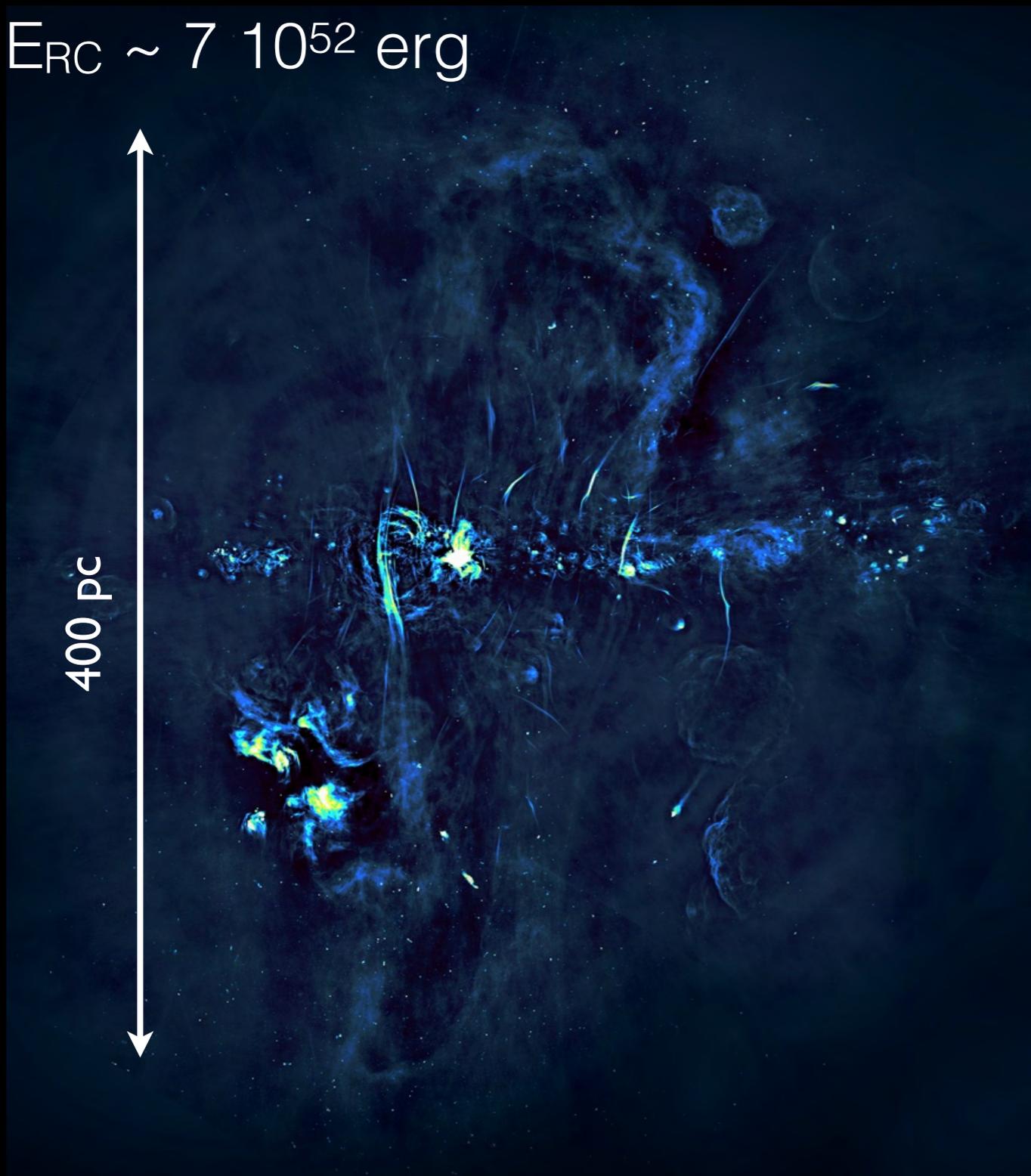
Des cheminées bipolaires

$E_{RC} \sim 7 \cdot 10^{52}$ erg

$E_{th} \sim 4 \cdot 10^{52}$ erg

1.5-2.6 keV
2.35-2.56 keV S XV
2.7-2.97 keV

400 pc



MeerKAT

Heywood et al (2019)

Ponti et al (2019)

XMM-Newton

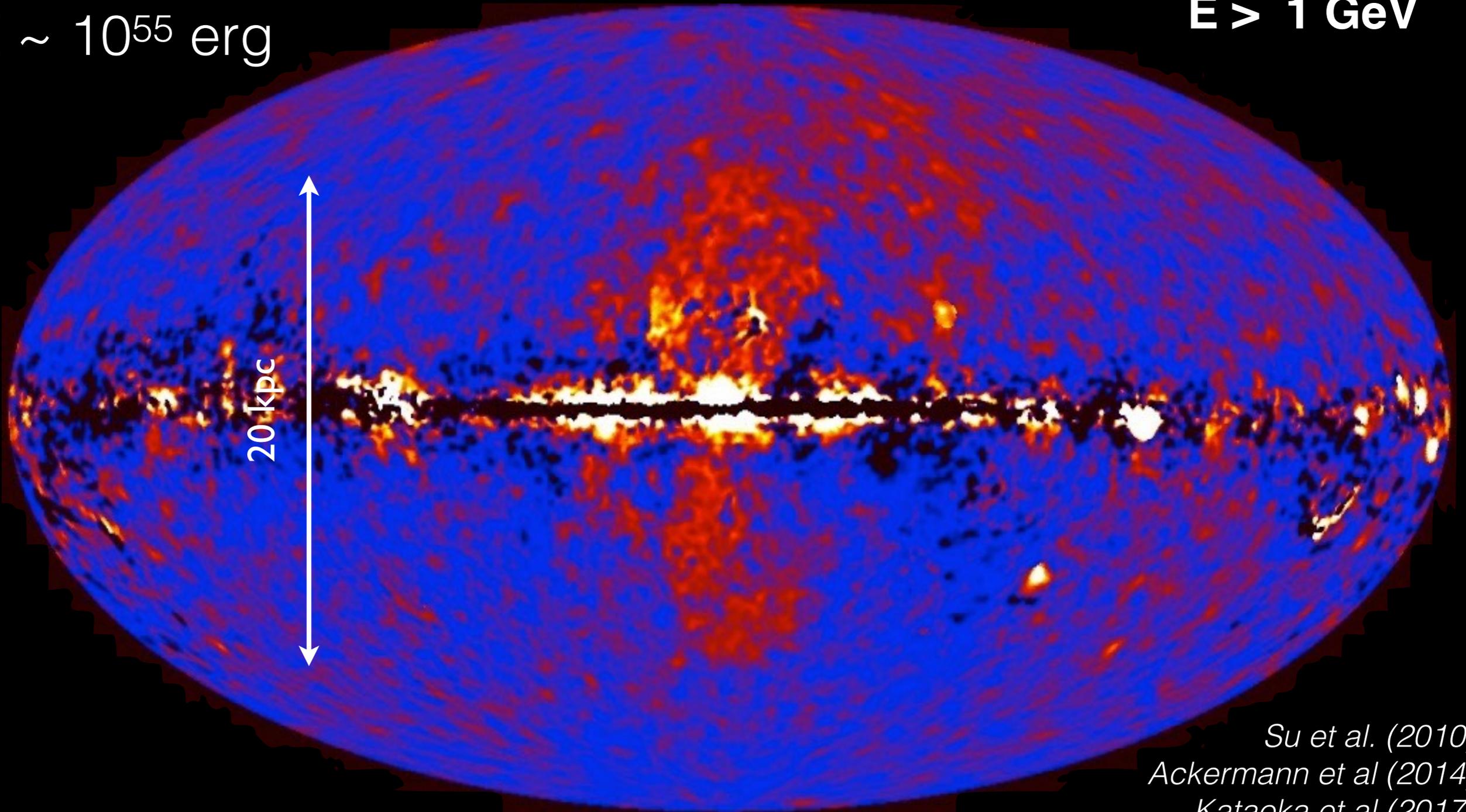
Galactic longitude

Ejections bipolaires: bulles de Fermi

$$L_\gamma \sim 10^{37} \text{ erg/s}$$

$$E \sim 10^{55} \text{ erg}$$

Fermi-LAT
 $E > 1 \text{ GeV}$



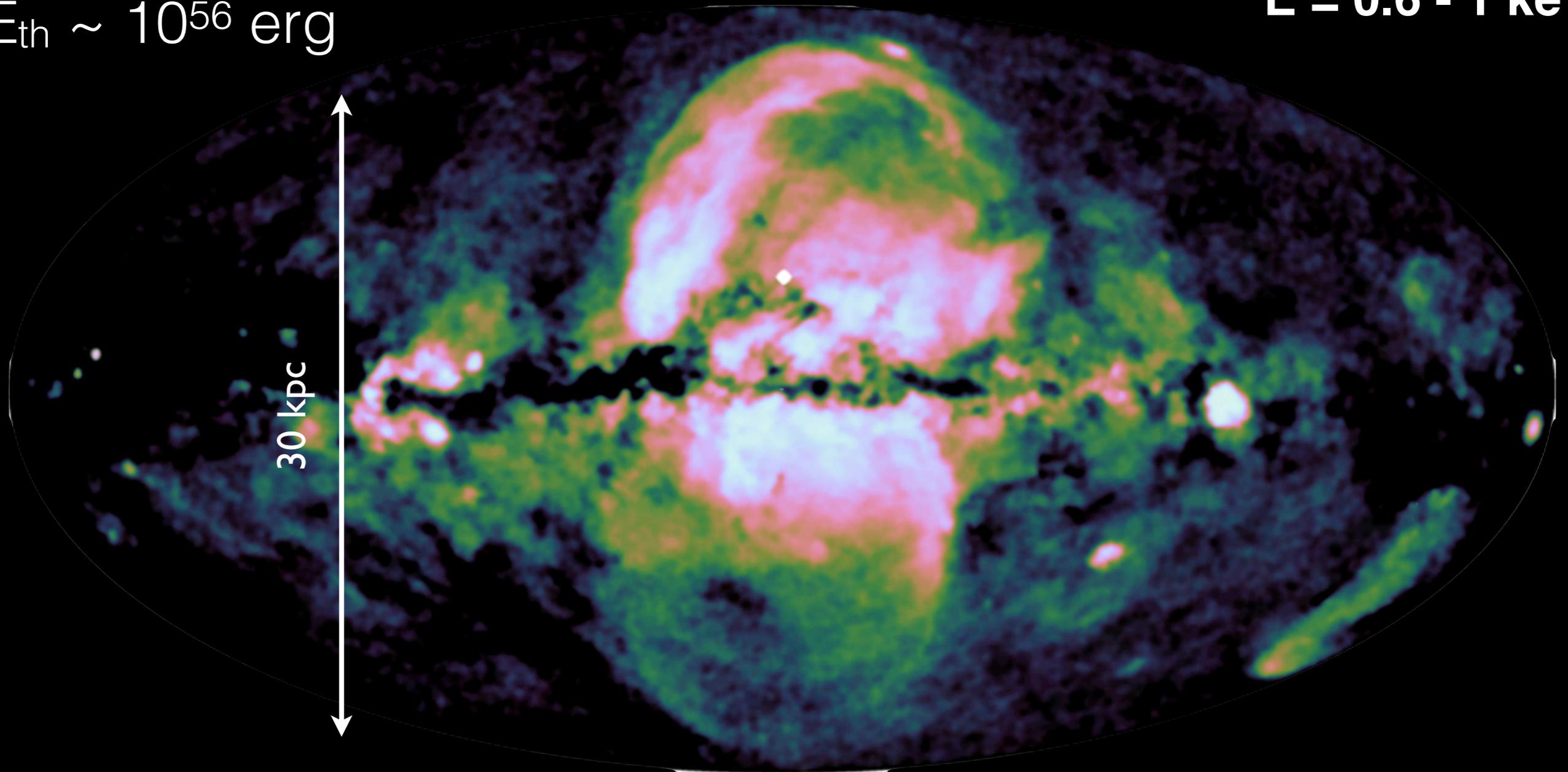
Su et al. (2010)
Ackermann et al (2014)
Kataoka et al (2017)

Ejections bipolaires: les bulles d'e-ROSITA

$$L_x \sim 10^{39} \text{ erg/s}$$

$$E_{\text{th}} \sim 10^{56} \text{ erg}$$

e-ROSITA
E = 0.6 - 1 keV

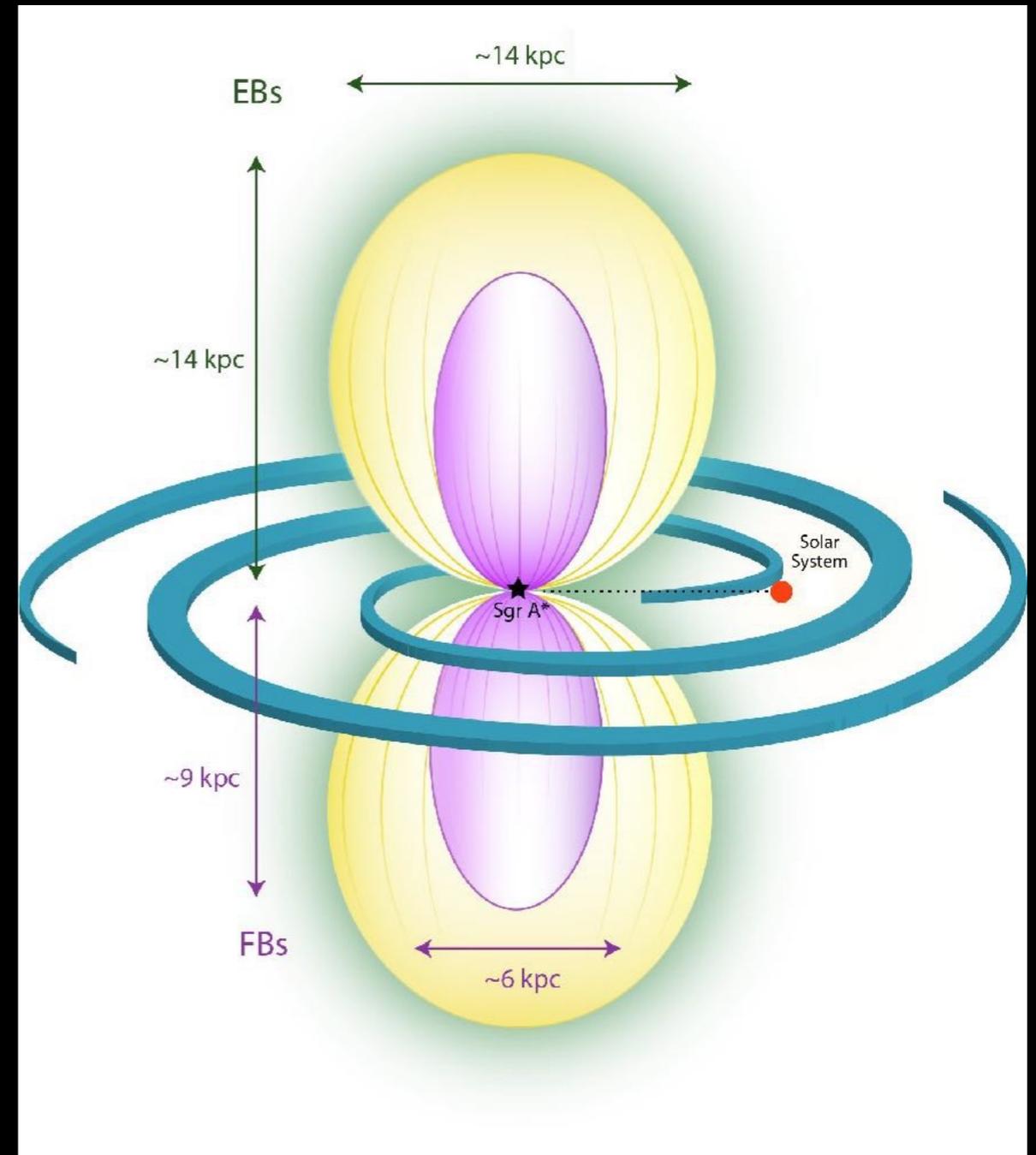


Predehl et al. (2020)

Un noyau actif dans la Galaxie?

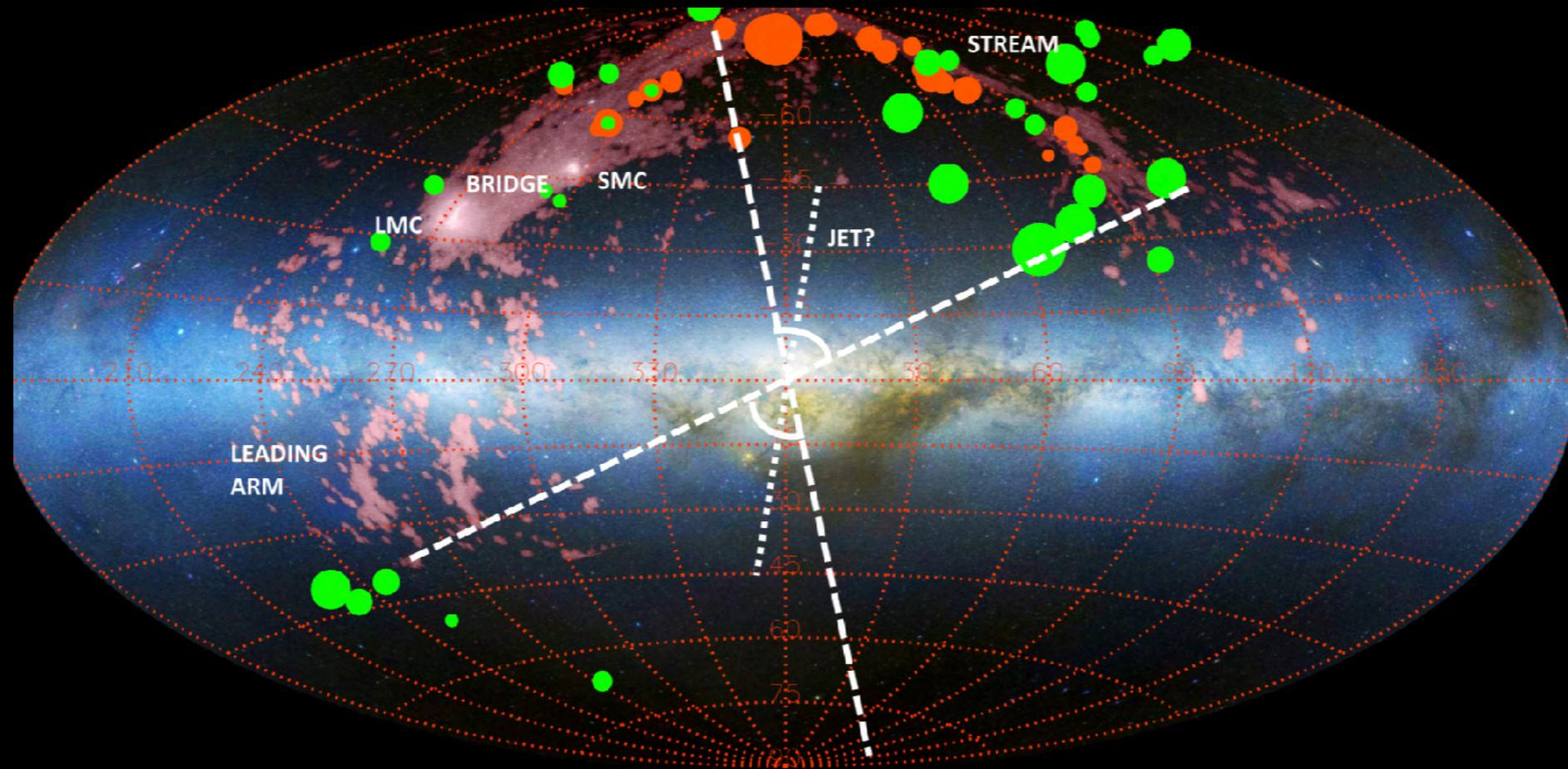
- Les bulles de Fermi et e-ROSITA doivent être produites par le même phénomène
- Peuvent être énergisées en 1 Myr par une source à 10^{43} erg/s
- Une phase de noyau actif de Sgr A* il y a quelques Myr?
- Ou une phase de flambée d'étoiles intense?

*e.g. Guo & Matthews (2012),
Crocker et al (2015), Predehl et al. (2020) etc.*



Predehl et al. (2020)

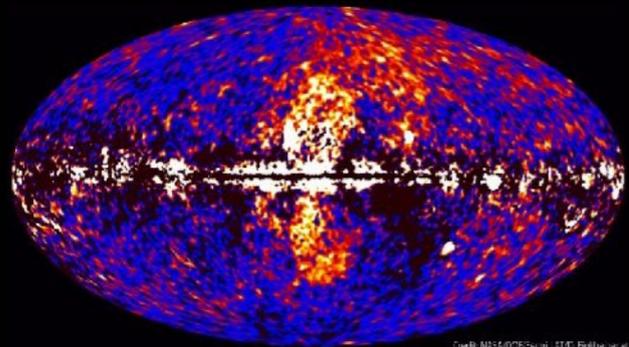
Un noyau actif dans la Galaxie?



- Observation d'un niveau élevé d'ionisation dans une partie du courant de Magellan
- Le rayonnement stellaire UV de la Voie Lactée est trop faible
- Compatible avec un scénario où Sgr A* était à un niveau élevé il y a quelques Myr

Bland-Hawthorn et al (2013), Bland-Hawthorn et al. (2019), Fox et al. (2020)

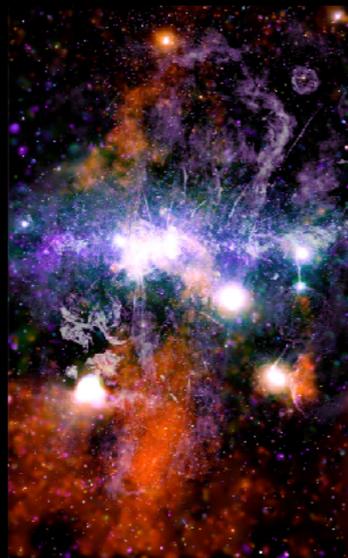
Activité passée Sgr A*



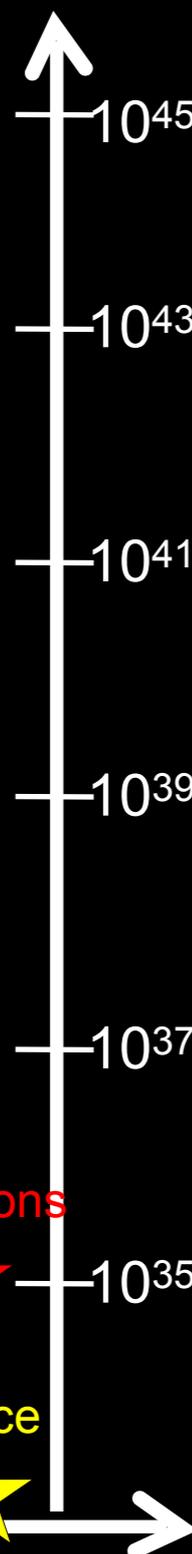
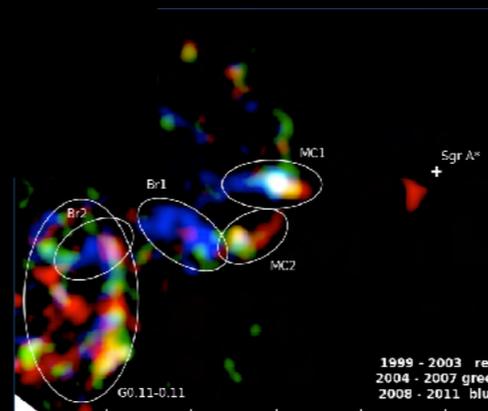
Fermi bubbles?



Cheminées bipolaires?



Echos X



$$L_{\text{SgrA}^*} = L_{\text{Edd}}$$

Luminosité (erg s⁻¹)

$$L_{\text{SgrA}^*} = 10^{-10} L_{\text{Edd}}$$

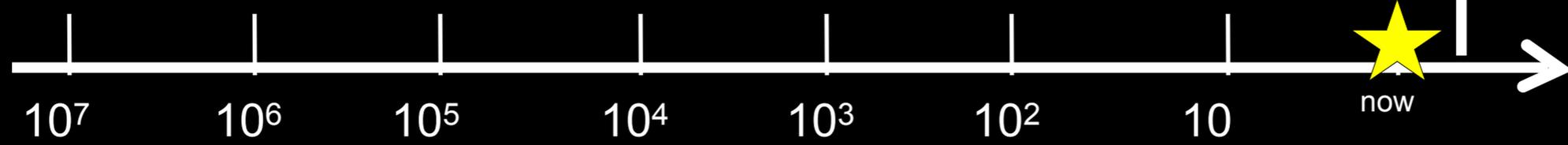
Eruptions



Quiescence



now



Temps (années)

En résumé

- Sgr A*: un trou noir dormant de 4 millions de masses solaires
 - Luminosité bolométrique $\sim 5 \cdot 10^{35}$ erg/s
 - Accrétion chaude et peu efficace qui doit s'accompagner d'outflows
 - Des éruptions quotidiennes en N-IR, et X : $L \sim 10^{34-35}$ erg/s
 - GRAVITY a détecté le mouvement orbital autour du SMBH lors d'une éruption
 - Mécanismes à l'origine des éruptions encore incertains
- Des traces d'activité plus intense dans le passé:
 - Des échos de lumières en rayons X montrent que Sgr A* a subi deux éruptions intenses au cours des derniers siècles
 - Une phase de « noyau actif » il y a quelques millions d'années à l'origine des éjections bipolaires (bulles de Fermi et e-ROSITA)