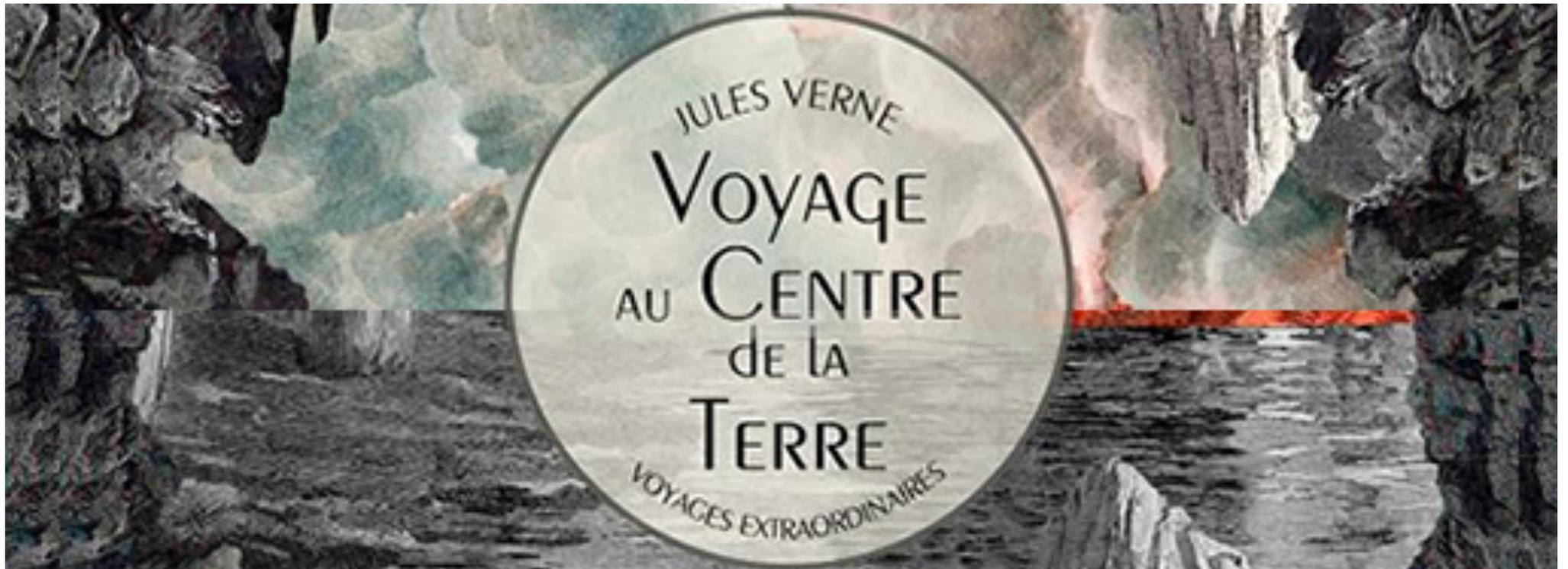


Voyage au centre de la Galaxie

Disque de 100 000 AL de diamètre



Le centre de la Galaxie



Dans la constellation du Sagittaire

© 2000 Axel Mellin



Le centre de la Galaxie

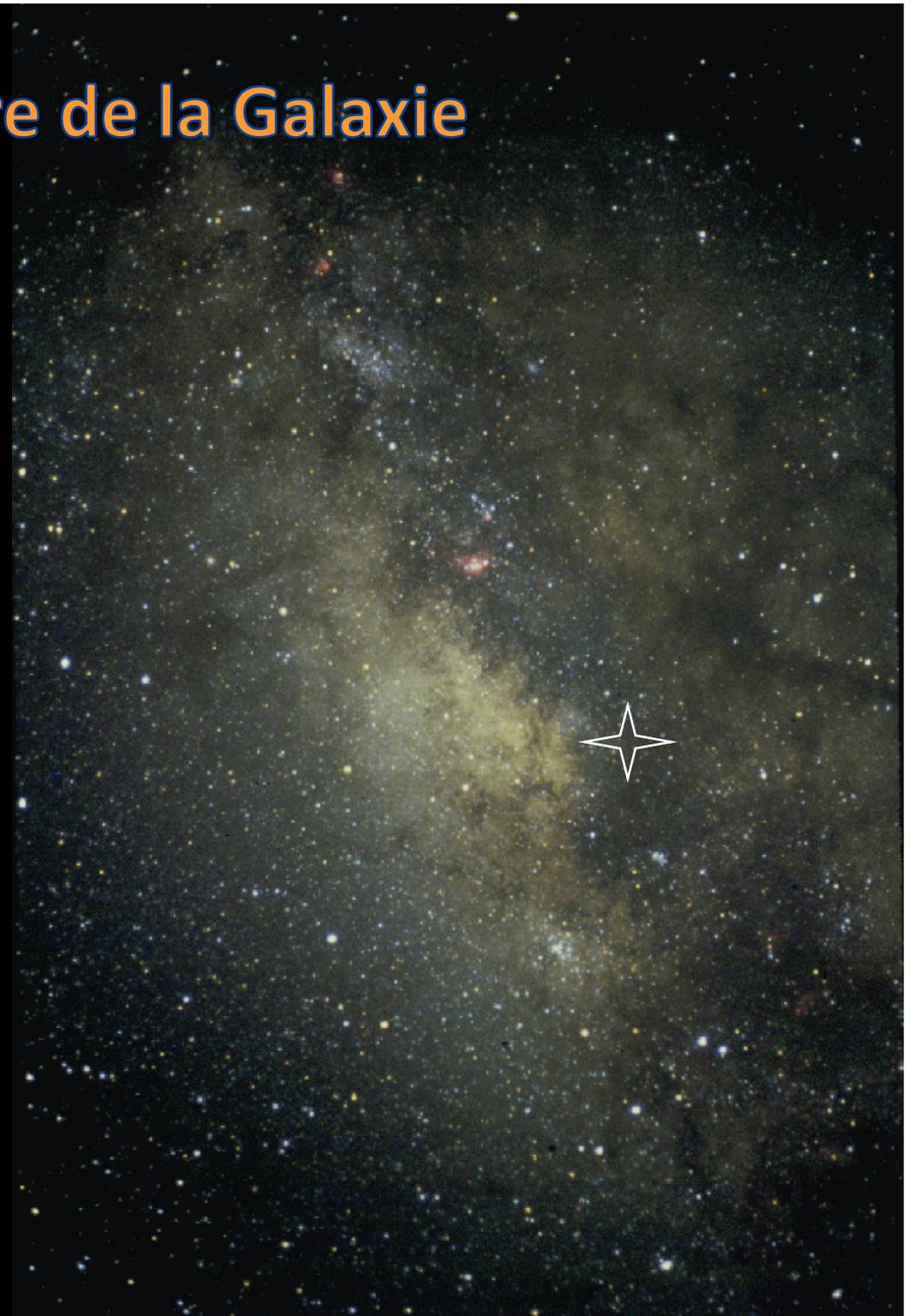


Le centre de la Galaxie



Figure 8.8
Cette image, issue des observations du projet Two Micron All Sky Survey (2MASS), montre les régions centrales de la Voie lactée dans le domaine de l'infrarouge rapproché (1,25 μm , 1,65 μm et 2,17 μm). À la distance du centre de la Galaxie, soit 26000 a.l., le champ de vision est de 700×1000 a.l.

Image infrarouge (1.25, 1.65 & 2.17 μm)



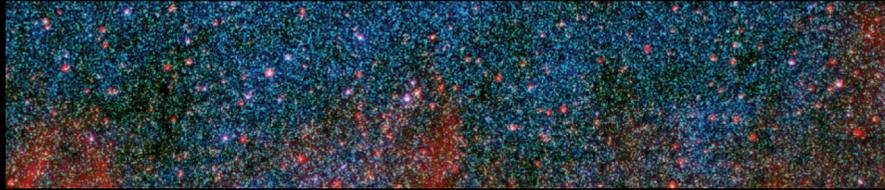
Le centre de la Galaxie



The Center of the Milky Way Galaxy

Spitzer Space Telescope • IRAC

Le centre de la Galaxie



Si la Terre était située dans cette région centrale:
œil nu : 10^6 étoiles aussi brillantes que Sirius
Luminosité du ciel équivaldrait à 200 pleines lunes!

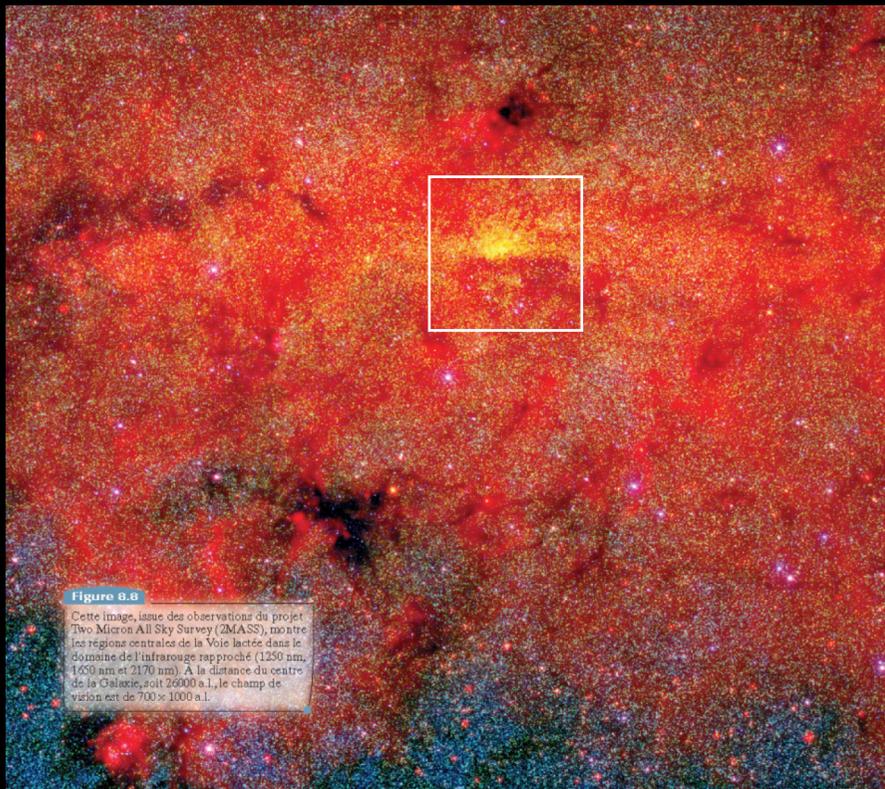


Figure 8.8

Cette image, issue des observations du projet Two Micron All Sky Survey (2MASS), montre les régions centrales de la Voie lactée dans le domaine de l'infrarouge rapproché (1,25 μm , 1,65 μm et 2,17 μm). À la distance du centre de la Galaxie, soit 26000 a.l., le champ de vision est de 700×1000 a.l.

Image infrarouge (1.25, 1.65 & 2.17 μm)

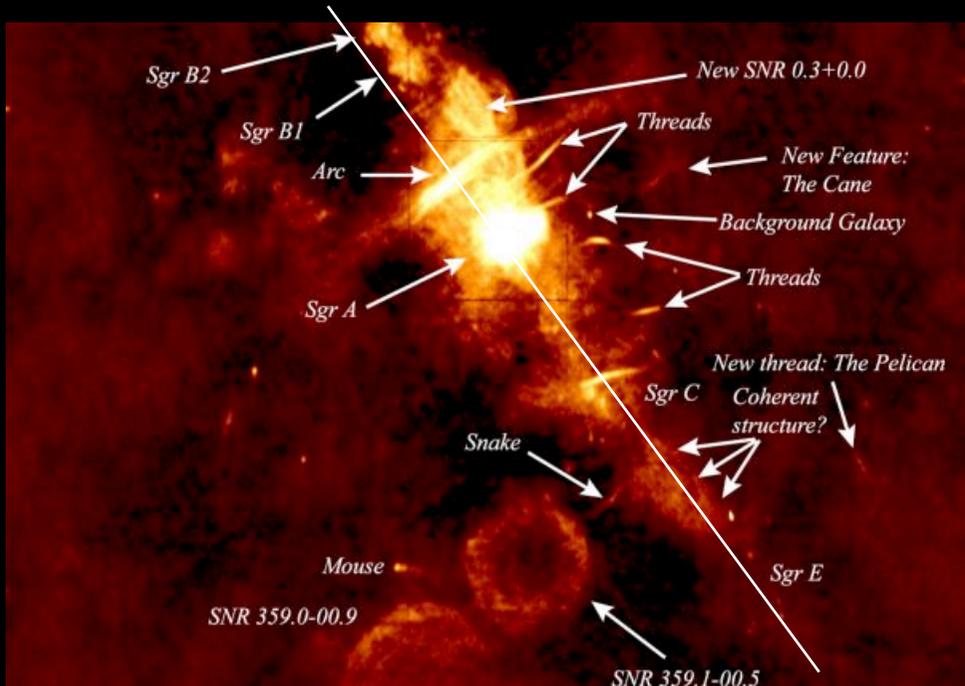


La
Structure
de l'Univers



Le centre de la Galaxie

Image radio $\lambda = 1$ m



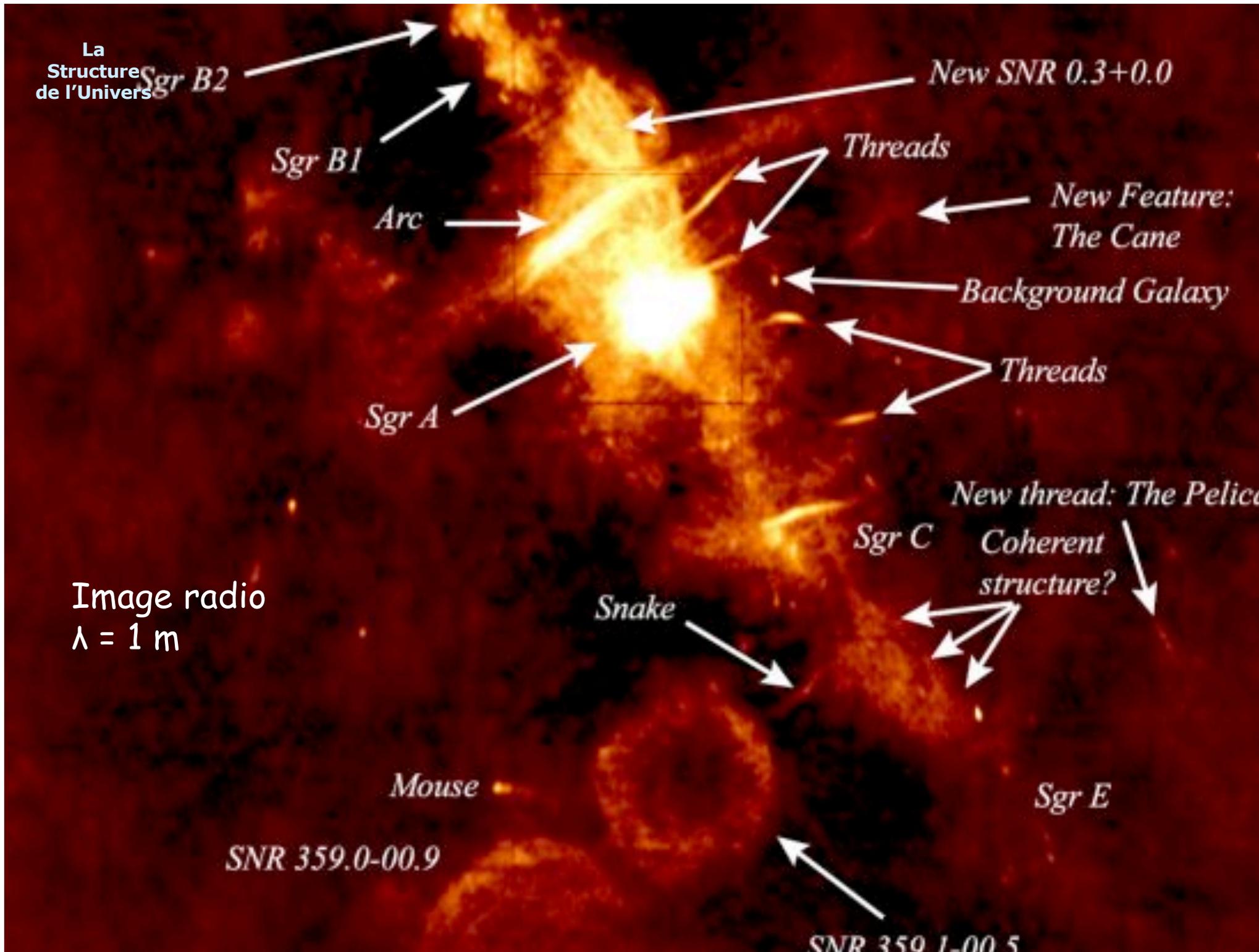
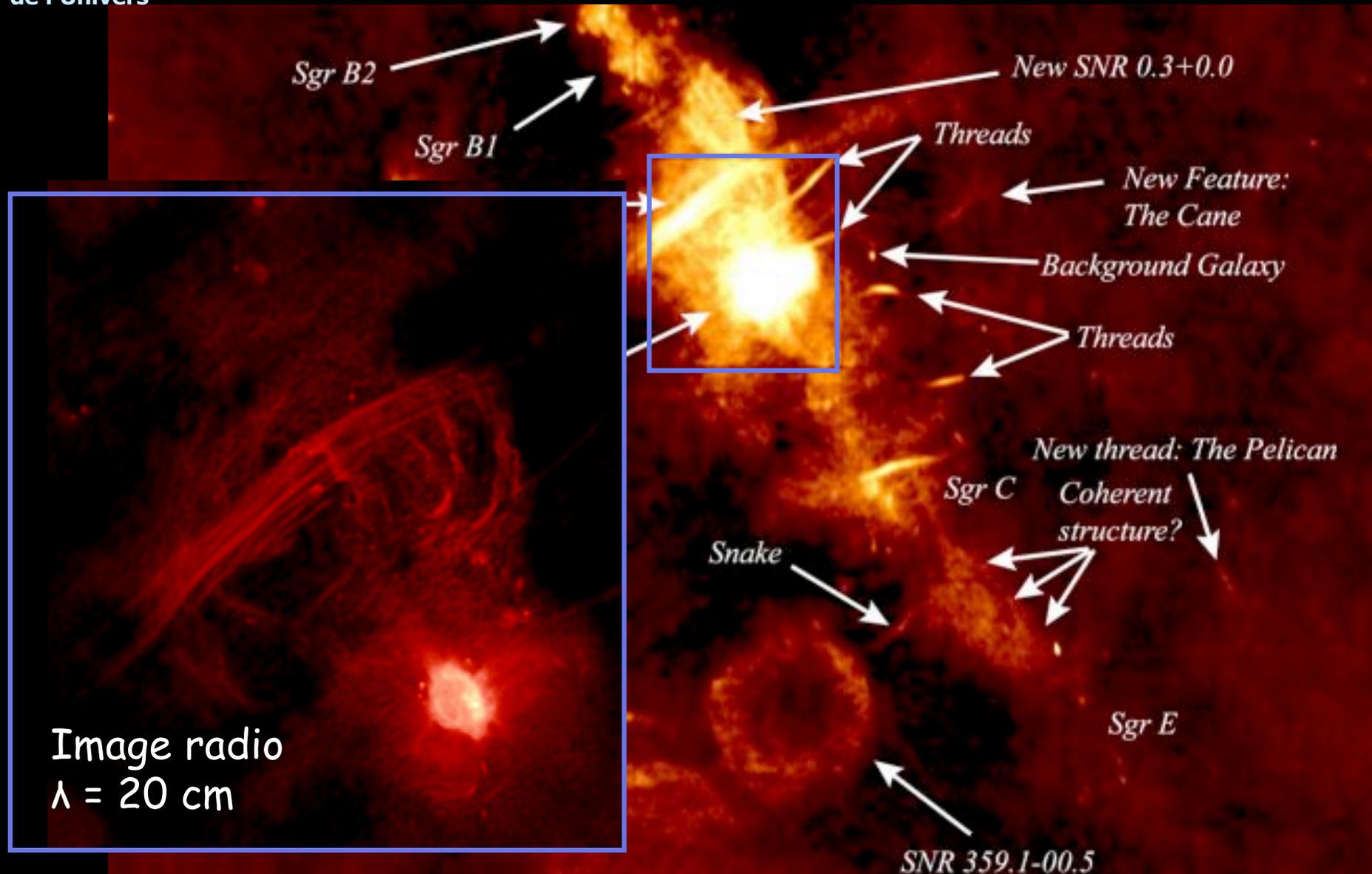


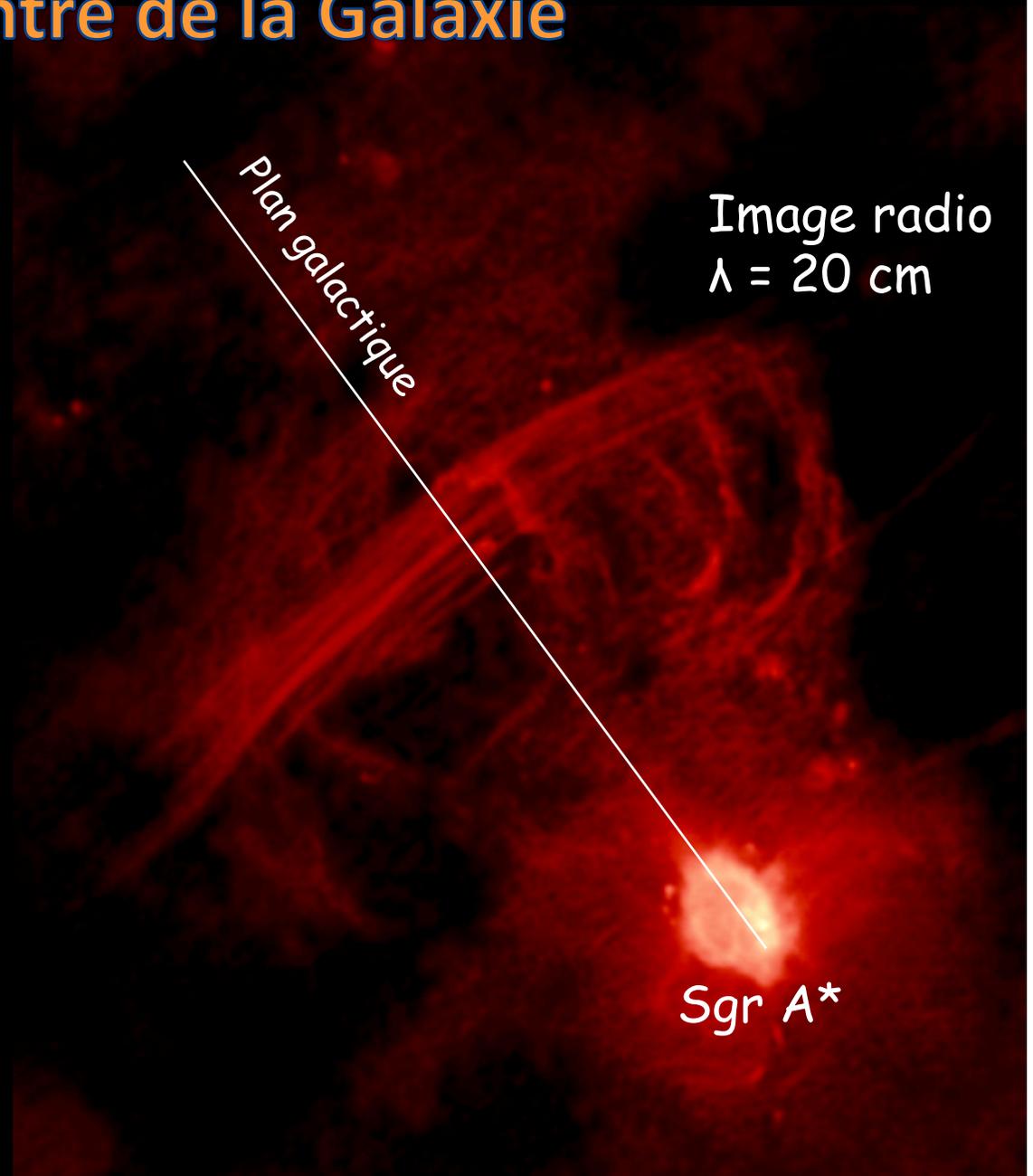
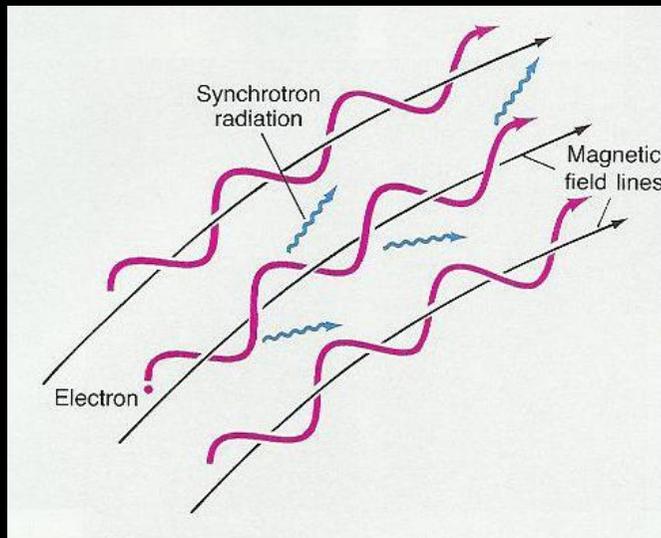
Image radio
 $\lambda = 1 \text{ m}$

Le centre de la Galaxie



Le centre de la Galaxie

Centre galactique possède un champ magnétique intense : électrons émettent du rayonnement synchrotron (radio) en spiralant le long des lignes de champ

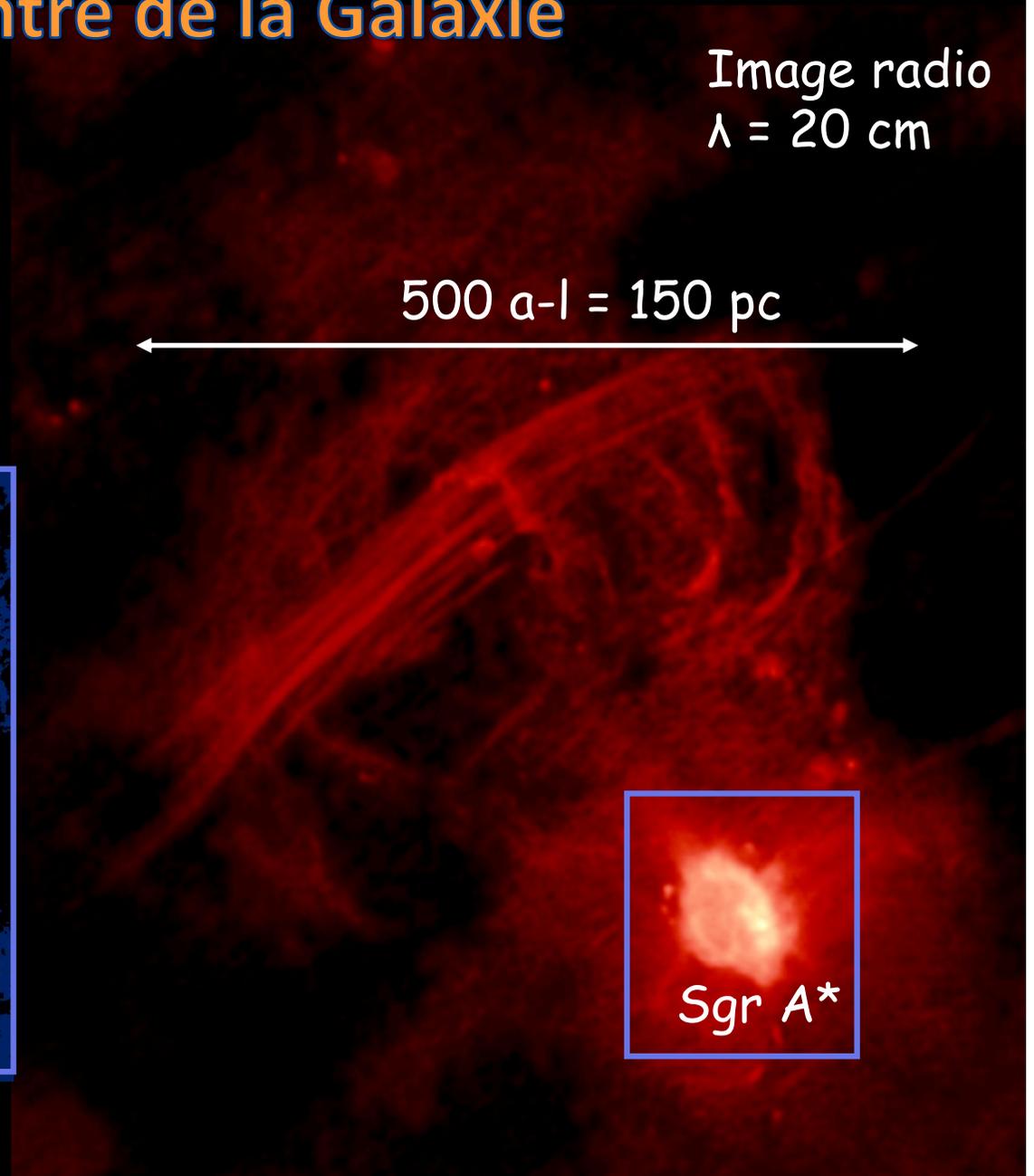
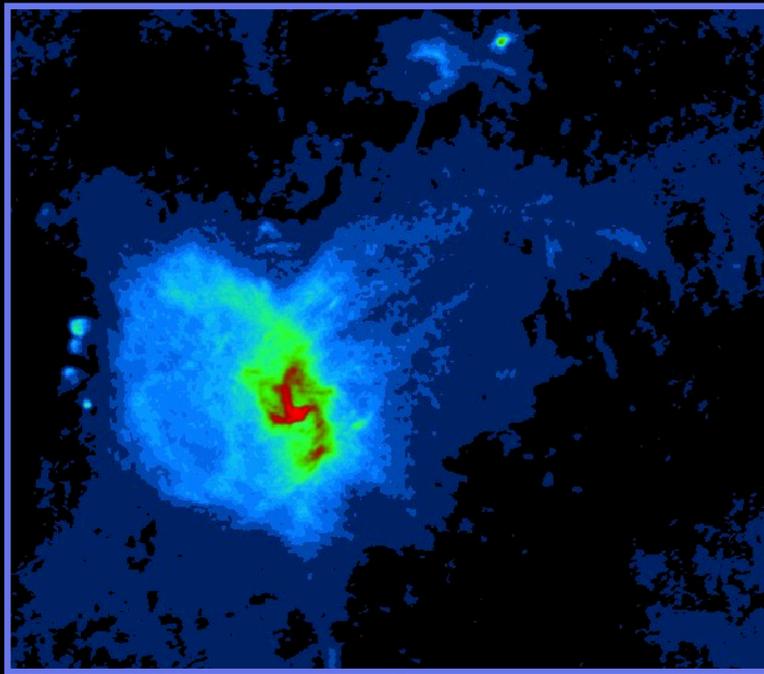


Le centre de la Galaxie

Image radio
 $\lambda = 20 \text{ cm}$

500 a-l = 150 pc

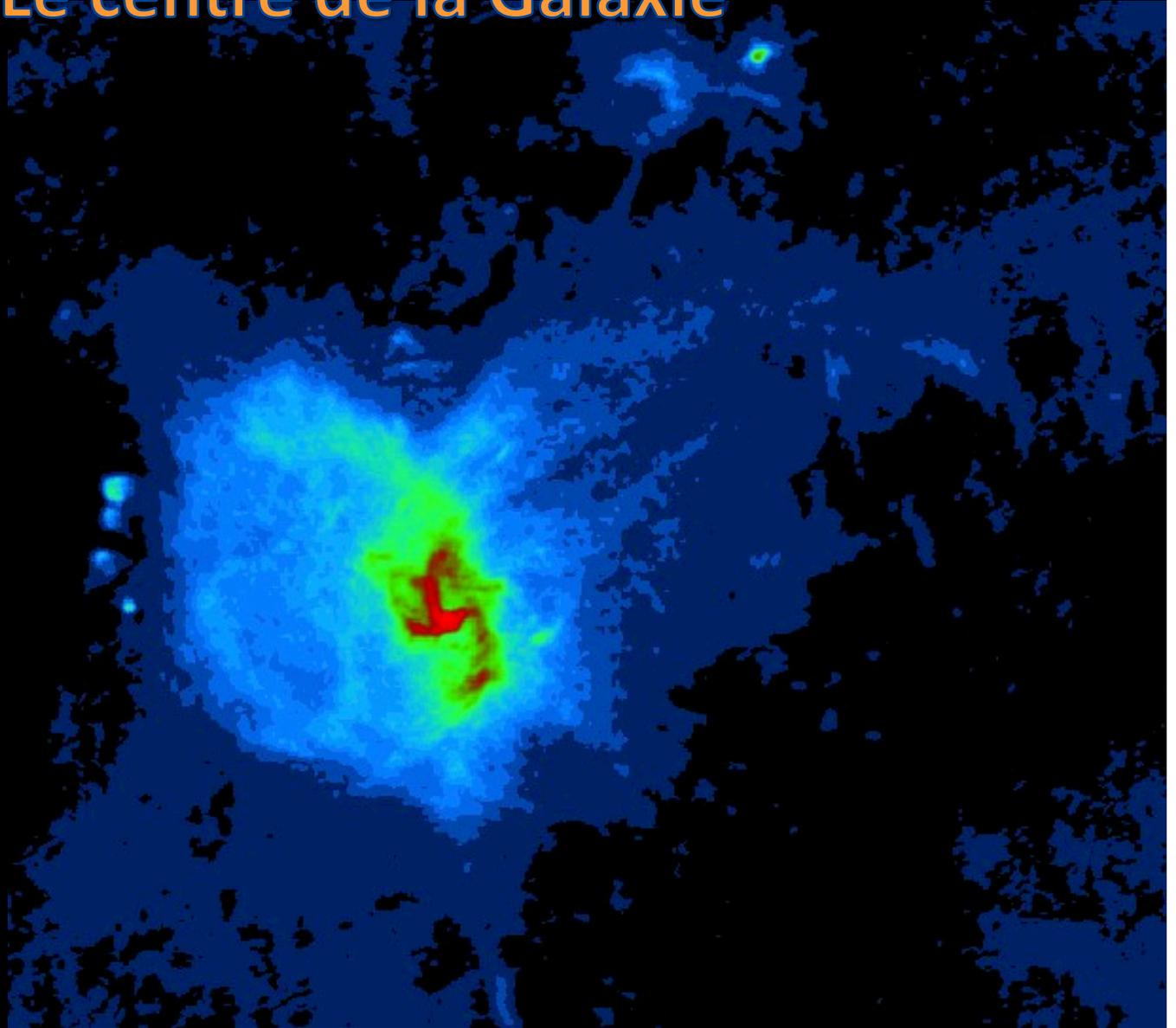
Image radio
 $\lambda = 6 \text{ cm}$



Sgr A*

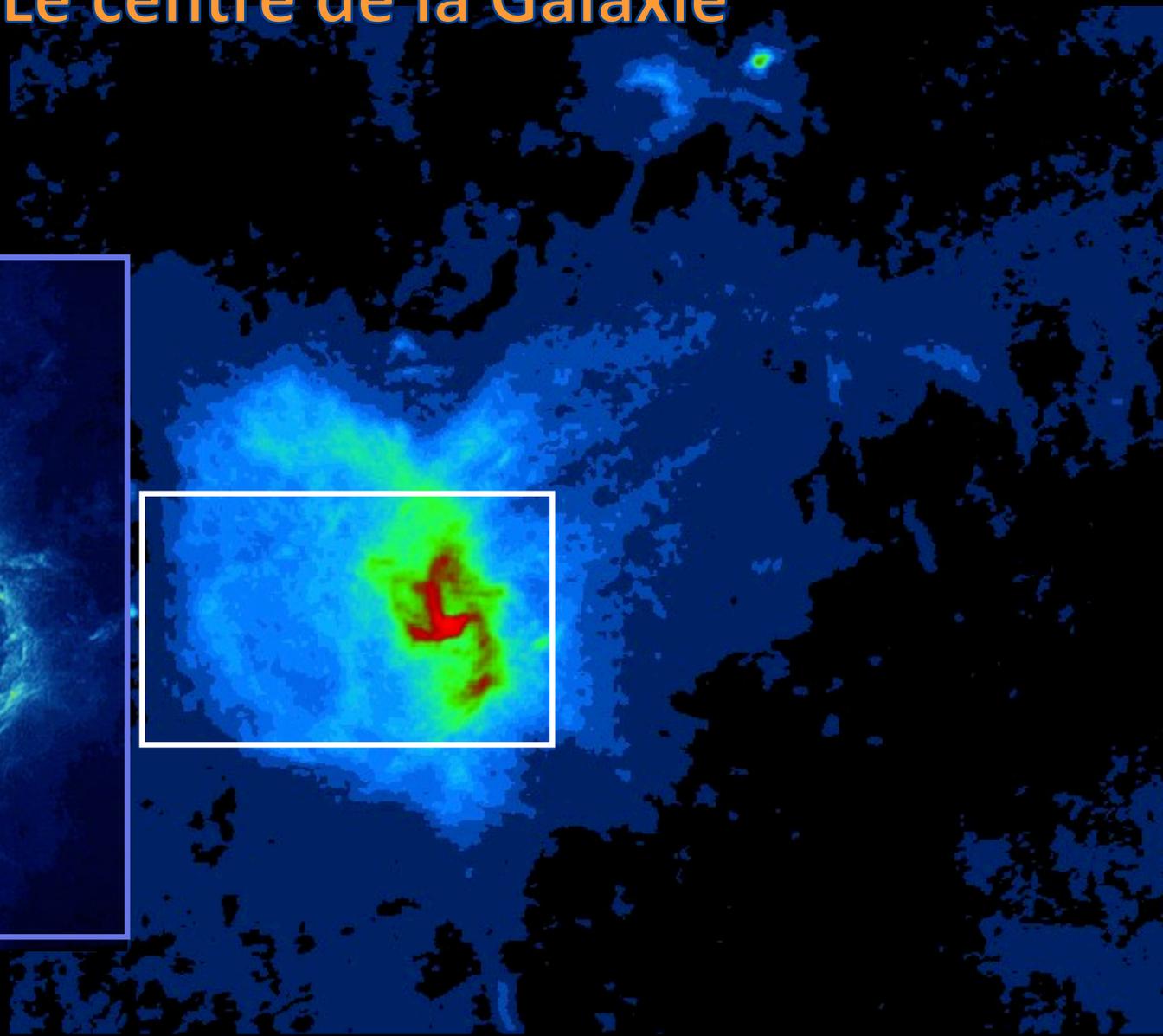
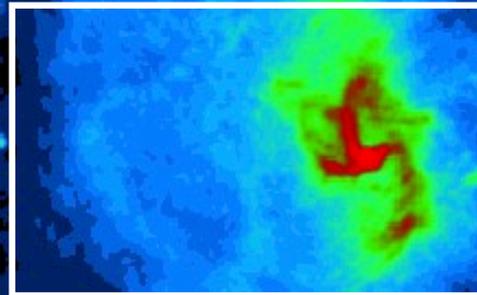
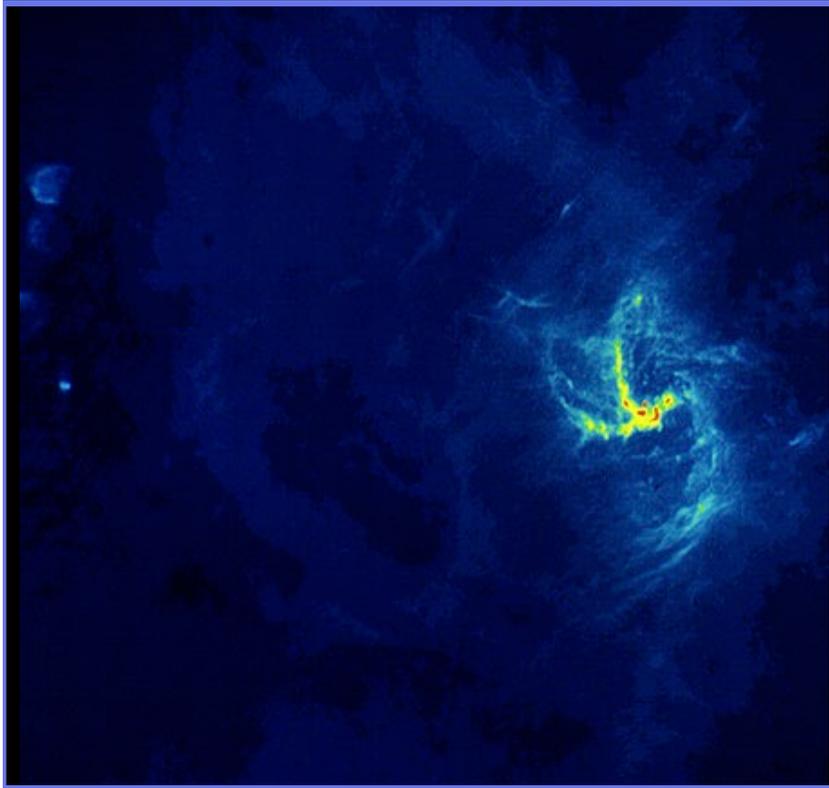
Le centre de la Galaxie

Image radio
 $\lambda = 6 \text{ cm}$



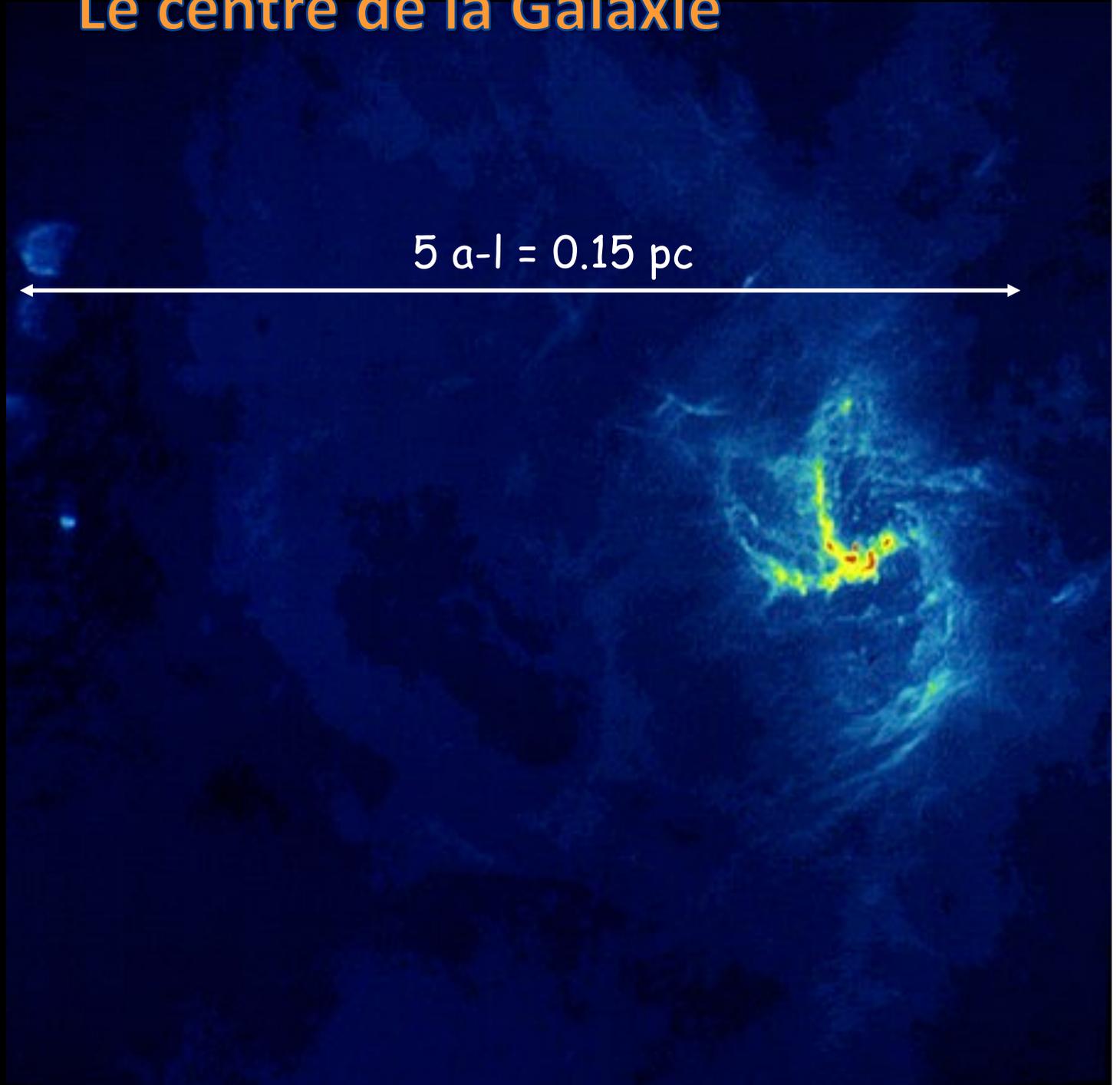
Le centre de la Galaxie

Image radio
 $\lambda = 6 \text{ cm}$

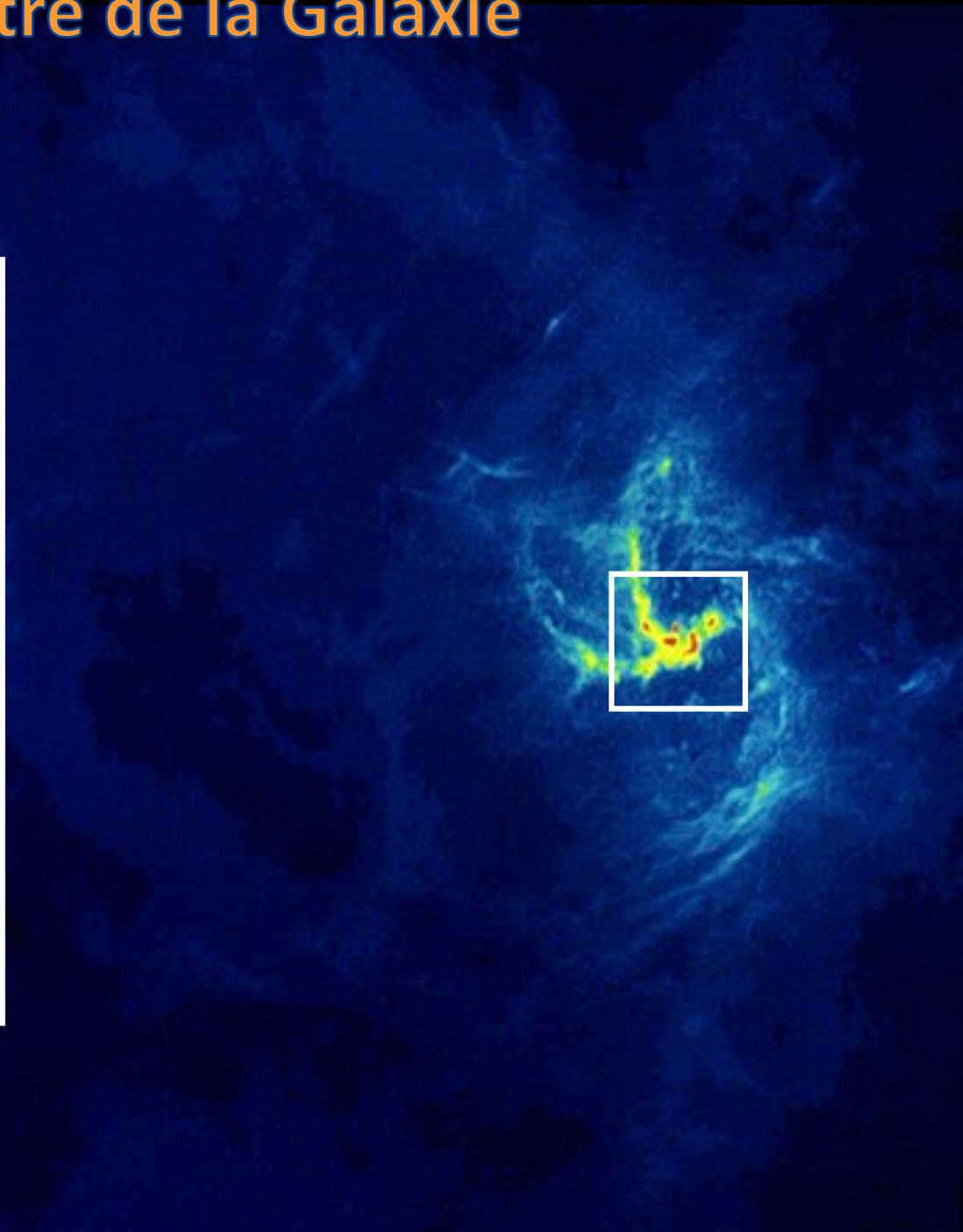
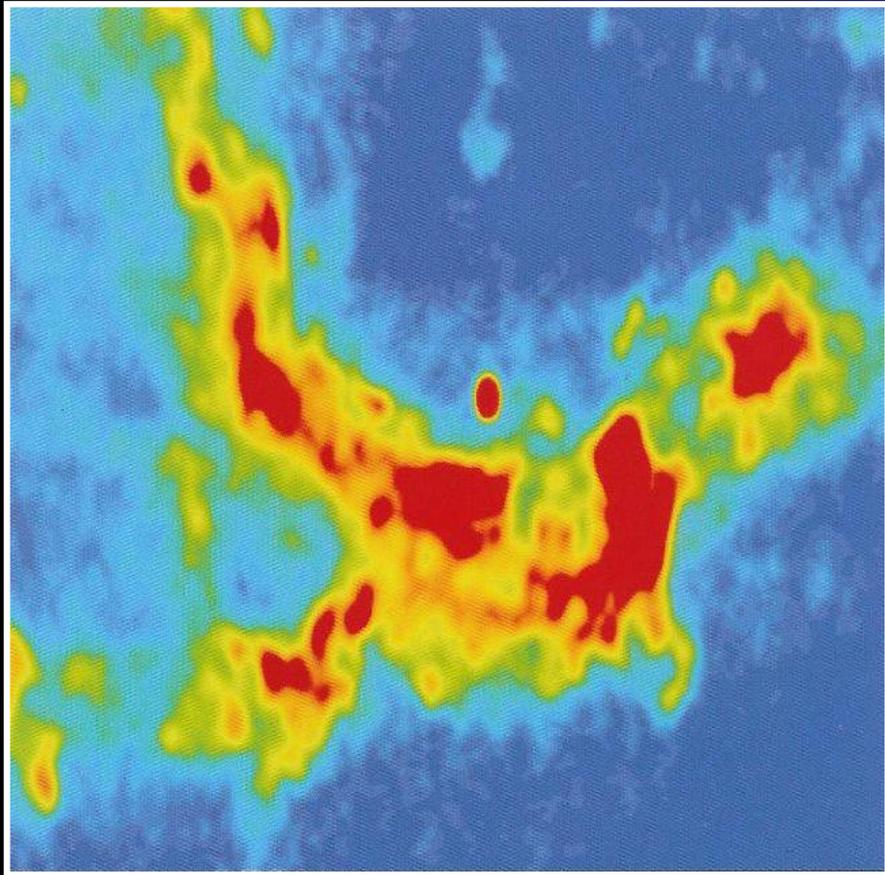


Le centre de la Galaxie

$5 \alpha - 1 = 0.15 \text{ pc}$

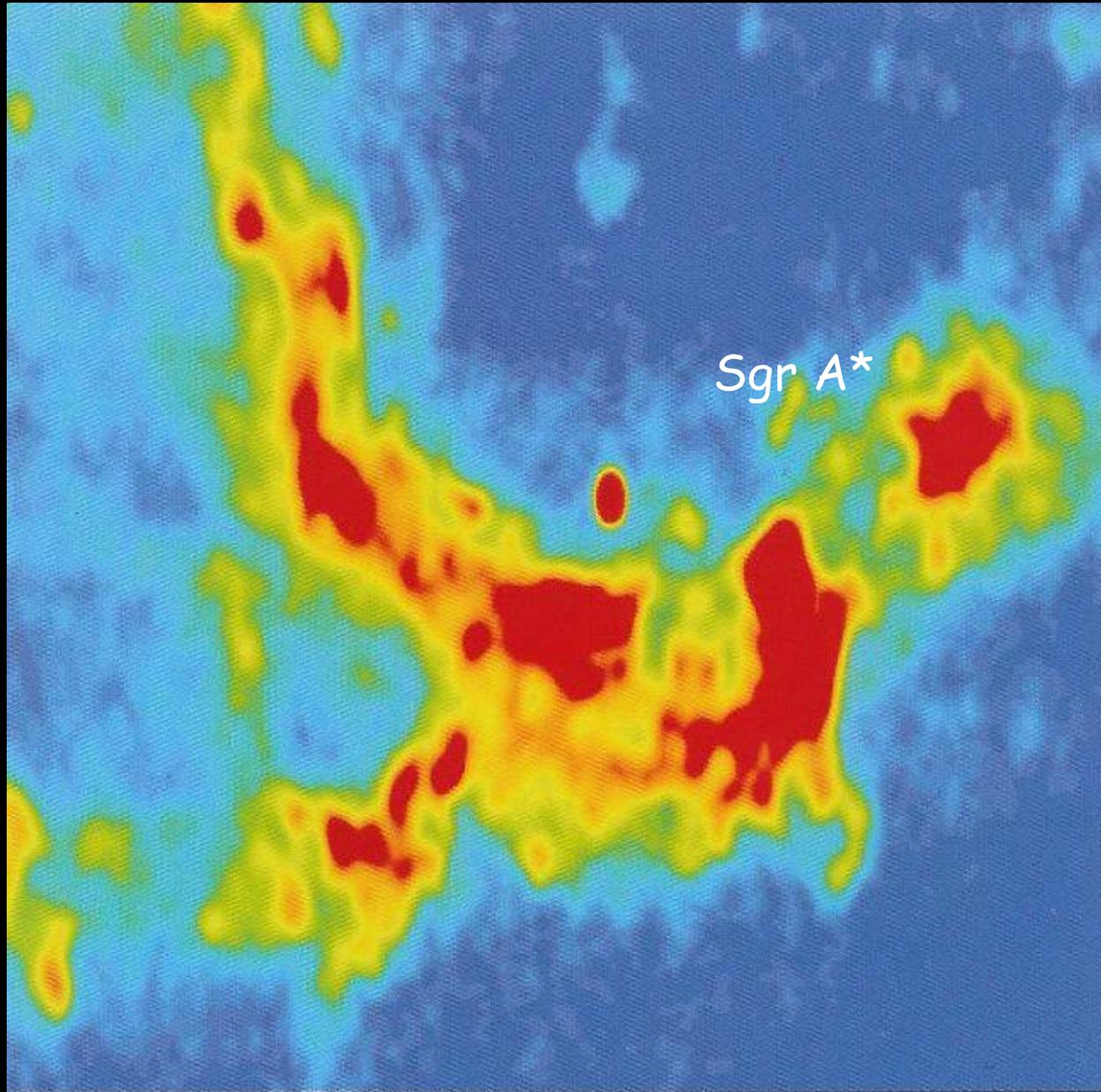


Le centre de la Galaxie



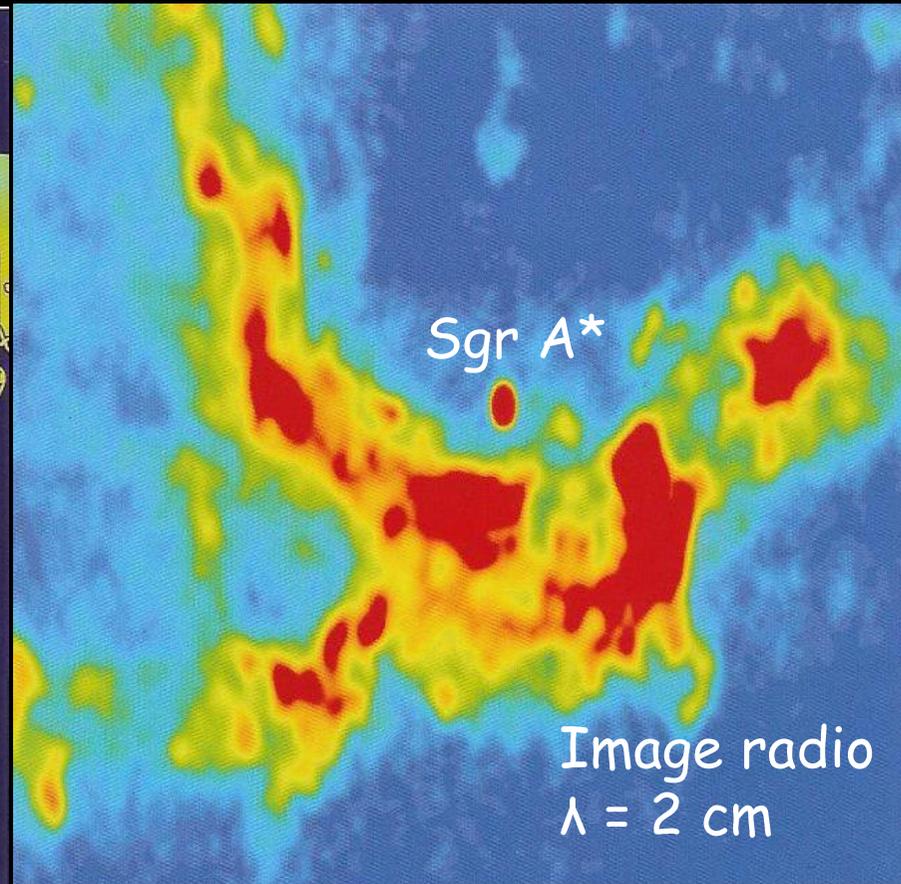
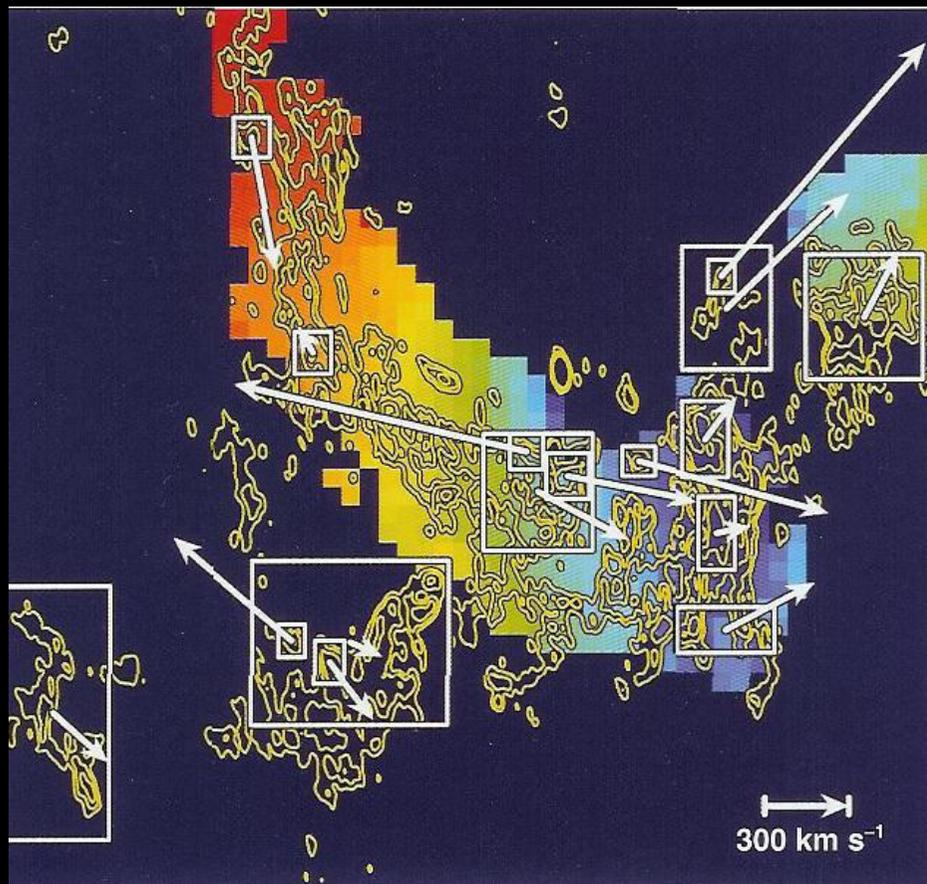
Le centre de la Galaxie

Image radio
 $\lambda = 2 \text{ cm}$



Le centre de la Galaxie

Gaz à grande vitesse à proximité de Sgr A*



Le centre de la Galaxie

Image IR (9, 13, 21 μm)

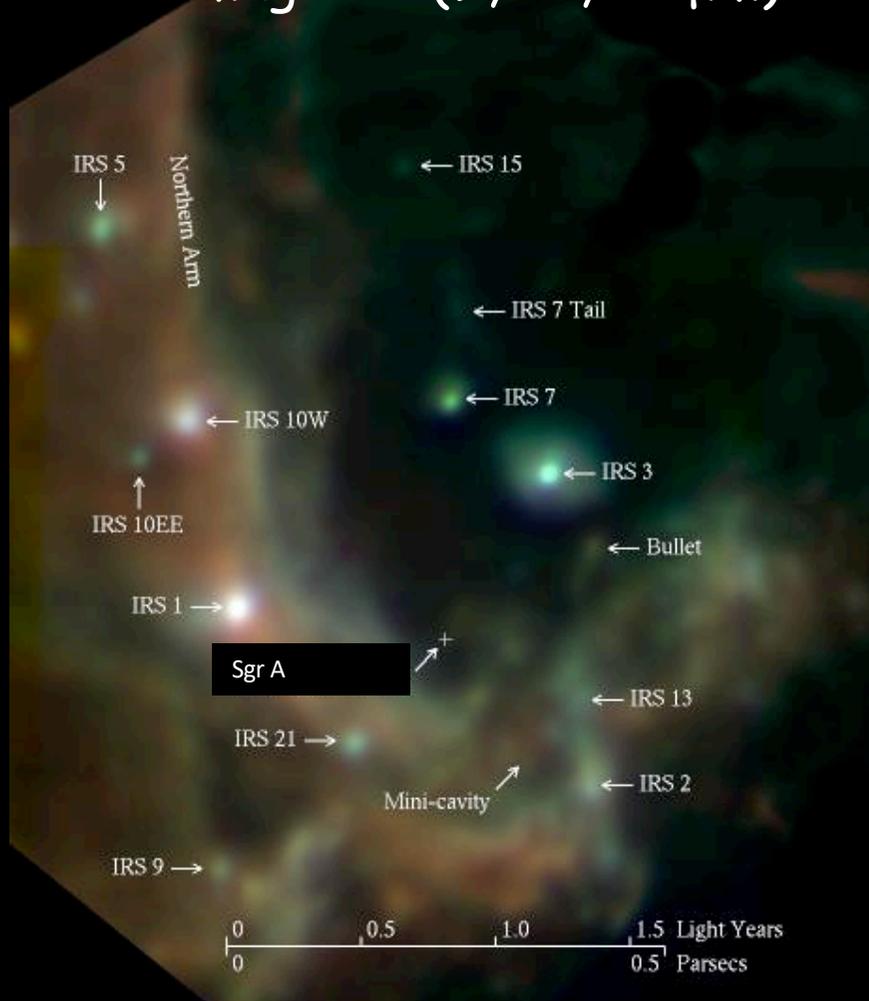
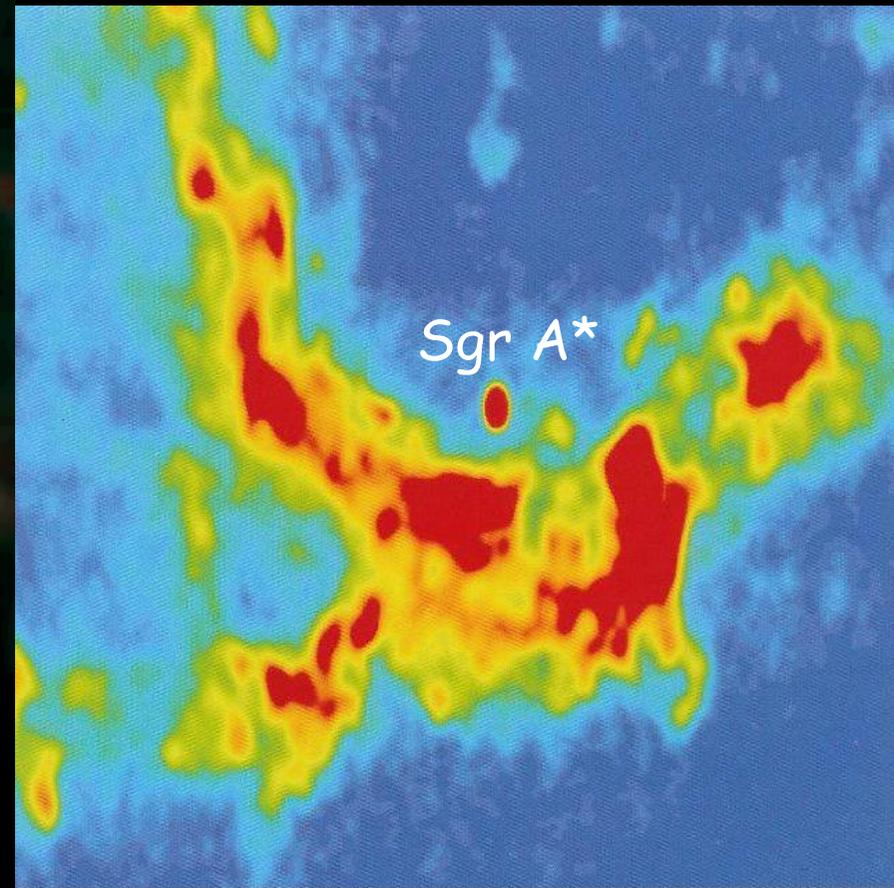


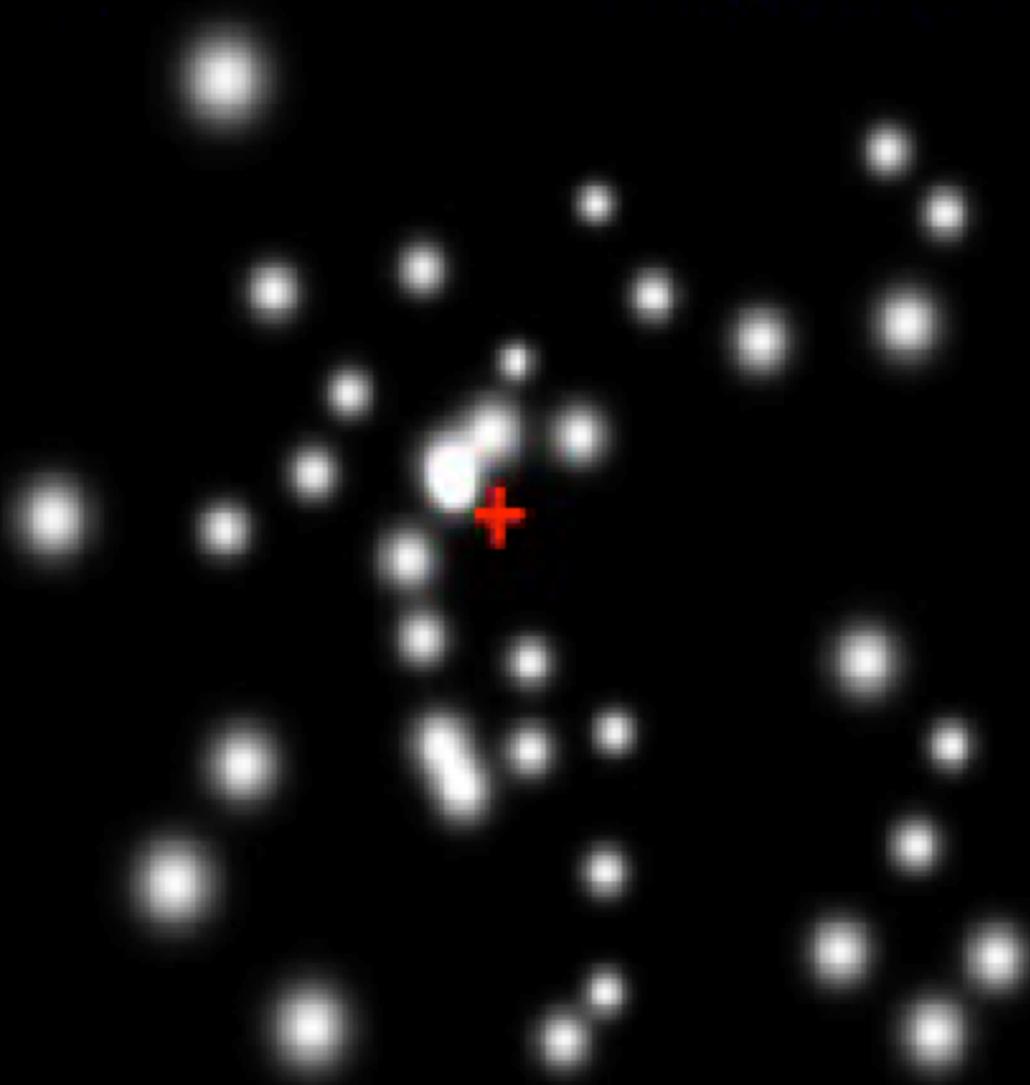
Image radio
 $\lambda = 2 \text{ cm}$



Le centre de la Galaxie

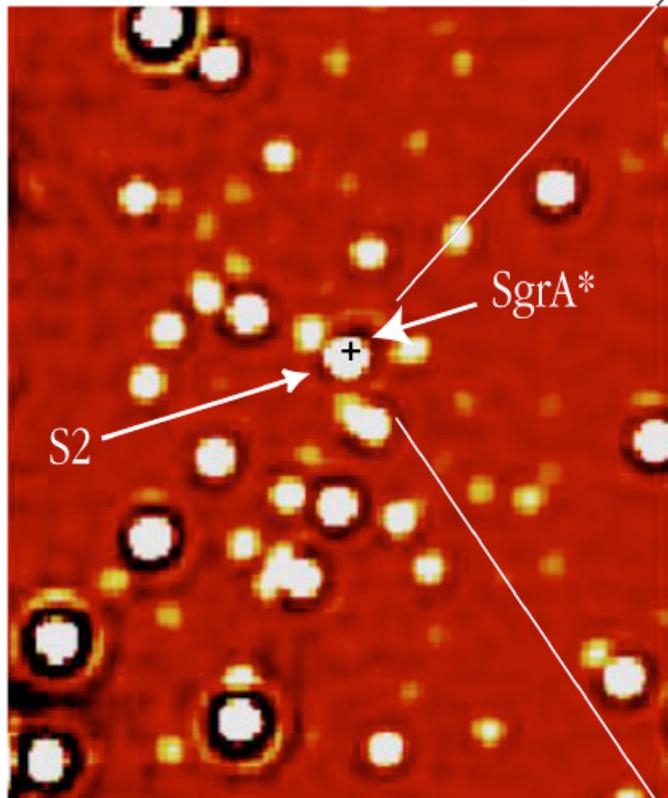
1992

10 light days

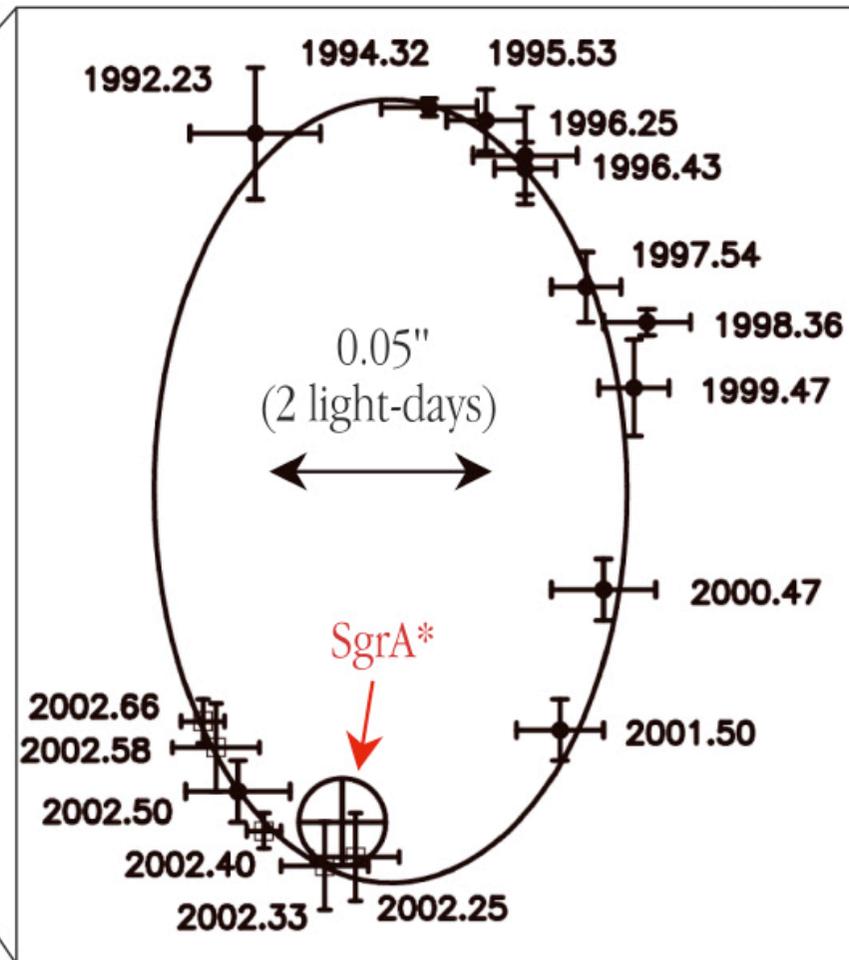


Centre de la Galaxie

NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*



The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

Masse du corps attracteur

Etoile S2 est passée en 2002 à 15 heures-lumière (=110 UA !) de Sgr A* à la vitesse de 5000 km/s, sur une orbite d'excentricité 0.87 (A = 843 UA)

$$3e \text{ loi de Kepler: } A^3 \text{ (UA)} / P^2 \text{ (an)} = M \text{ (M}_{\text{sol}})$$

où P = 15.2 ans et A = 843 UA

Soit: $M = (2.6 \pm 0.2) 10^6 M_{\text{sol}}$ dans moins de 110 UA!

soit densité : $> 2.6 \cdot 10^6 / (4/3 \pi 110^3) M_{\text{sol}} / \text{UA}^3$
 $> 0.466 M_{\text{sol}} / \text{UA}^3$ ($= 4.0 \cdot 10^{15} M_{\text{sol}} / \text{pc}^3$)

- ce n'est pas tant la densité que l'absence de lumière en provenance de cet objet qui plaide en faveur d'un **trou noir**

Le monde des galaxies

Trou noir central

Il n'est pas surprenant de détecter un trou noir au centre de notre Galaxie:
La plupart des (toutes les?) galaxies semblent partager cette propriété

D'après la cinématique des étoiles
et du gaz dans le noyau galactique

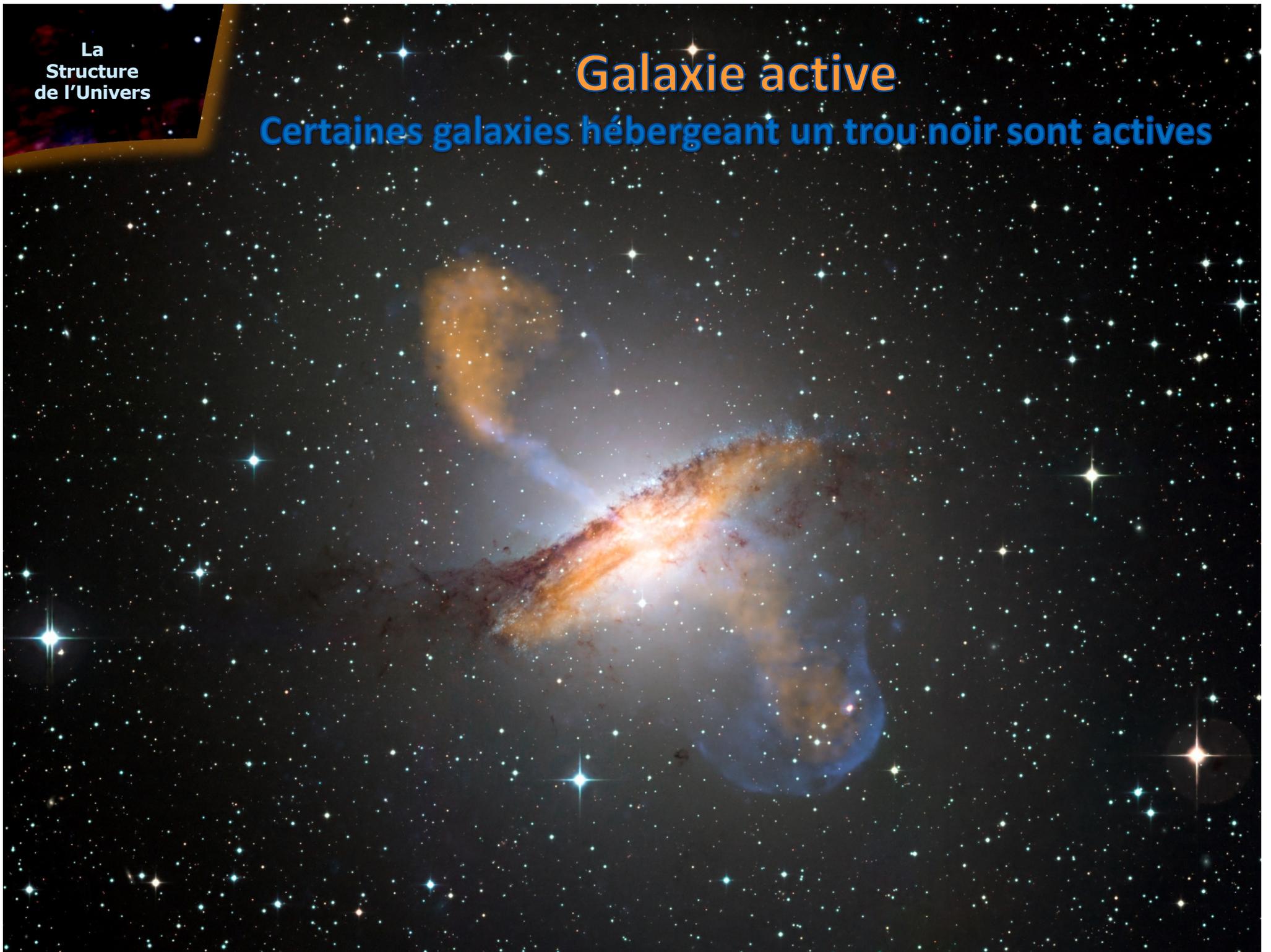
- M 31 (Andromède):
30 $10^6 M_{\odot}$ dans moins de 5 a-l

- M 87, la galaxie elliptique géante
au centre de l'amas de la Vierge:
3 $10^9 M_{\odot}$ dans moins de 120 a-l



Galaxie active

Certaines galaxies hébergeant un trou noir sont actives



Le monde des galaxies

Galaxie active M87

M 87 est une galaxie active: elle présente un jet émanant de son noyau

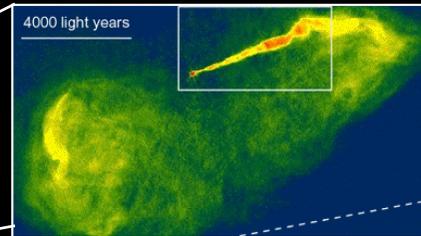
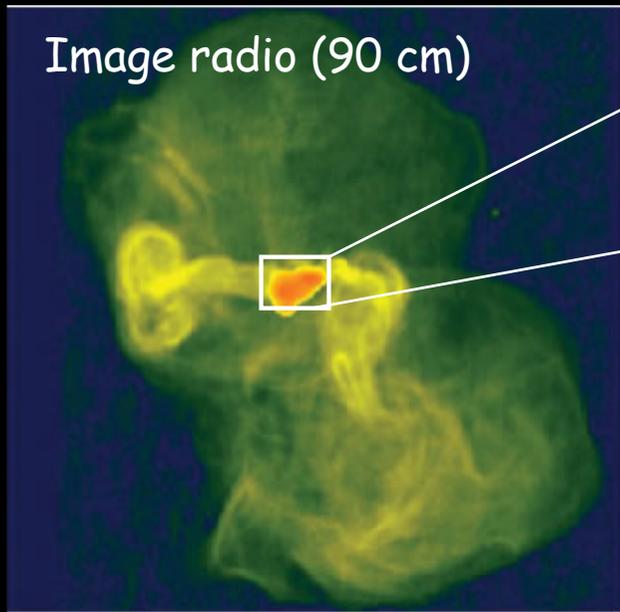


Le monde des galaxies

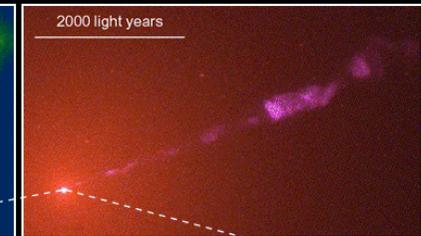
Jet émanant du noyau de M87

250 000 a-l

Image radio (90 cm)

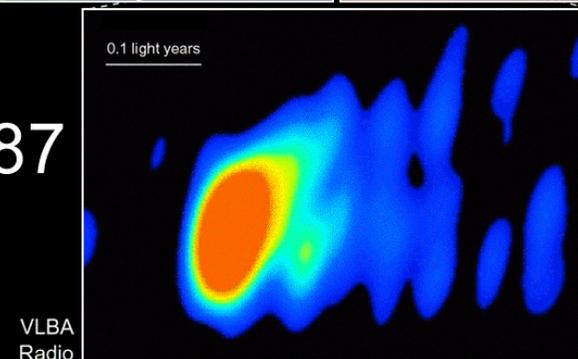


VLA
Radio



HST • WFPC2
Visible

M 87



VLBA
Radio

NASA, NRAO and J. Biretta (STScI) • STScI-PRC99-43



Le monde des galaxies

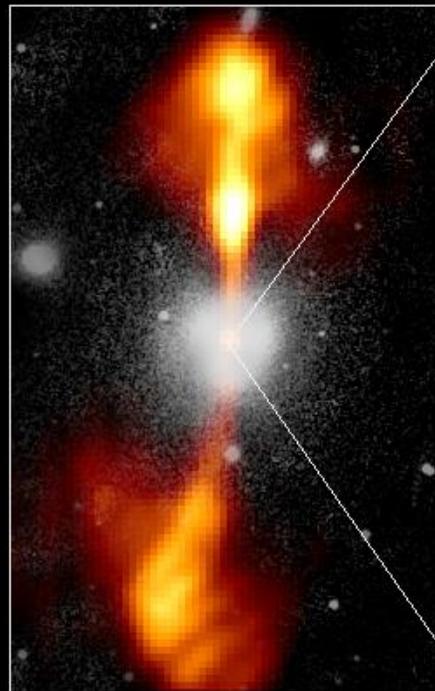
Galaxie active NGC 4261

NGC 4261, une autre galaxie active de l'amas de la Vierge
présentant un jet émanant de son noyau

Core of Galaxy NGC 4261

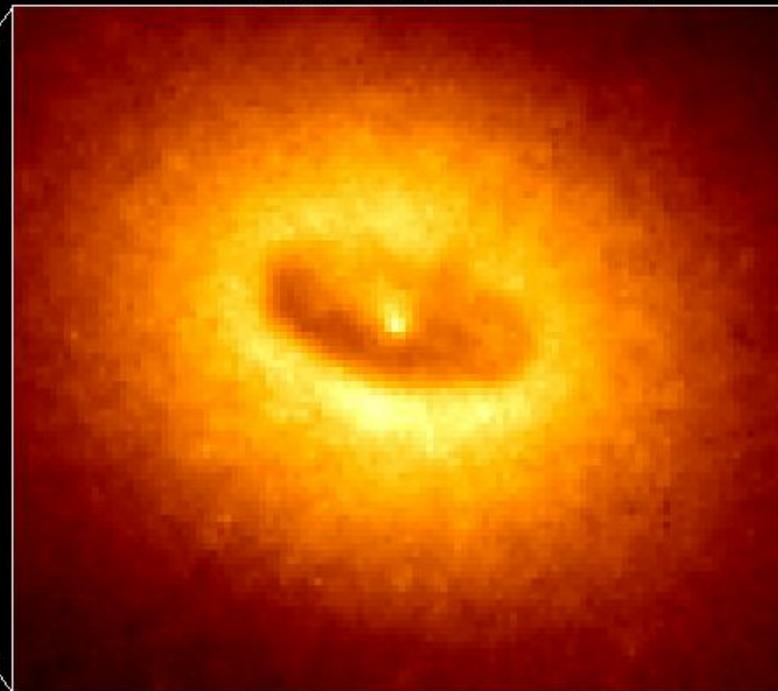
Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

Le monde des galaxies

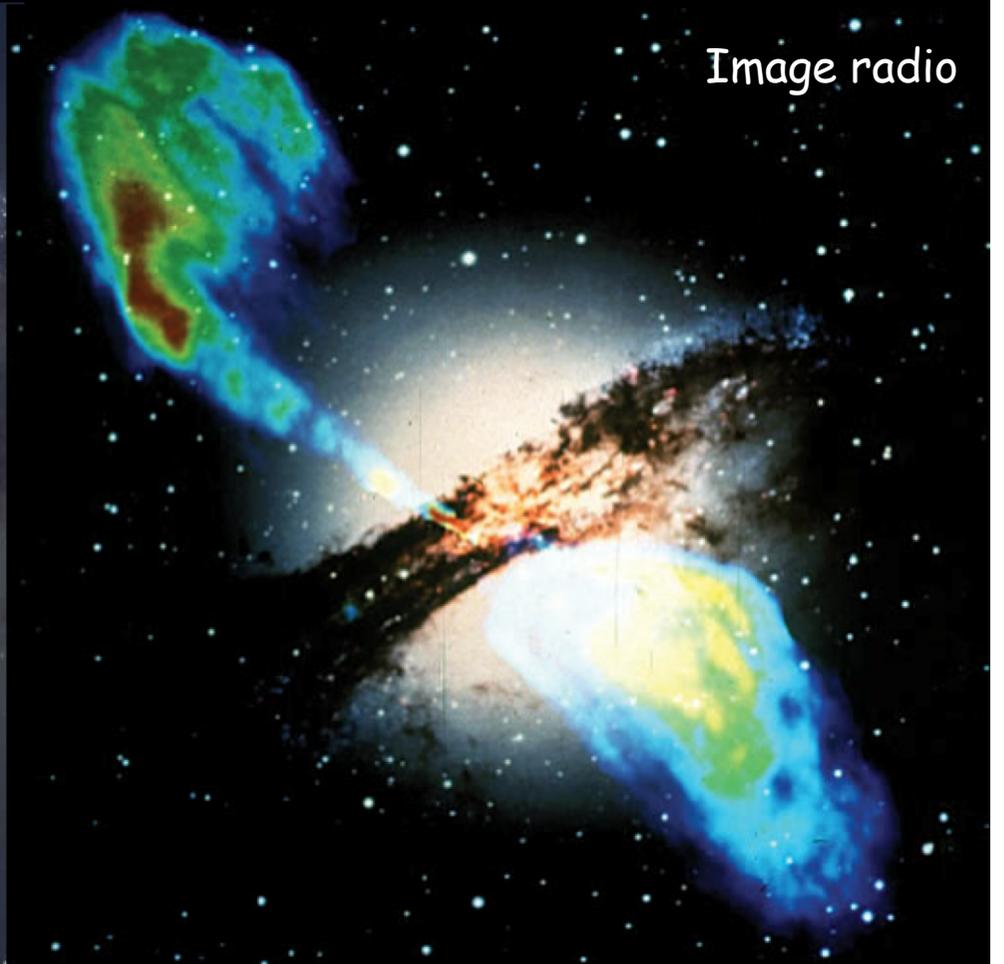
Galaxie active Centaurus A

Centaurus A, une autre galaxie active

Image visible



Image radio



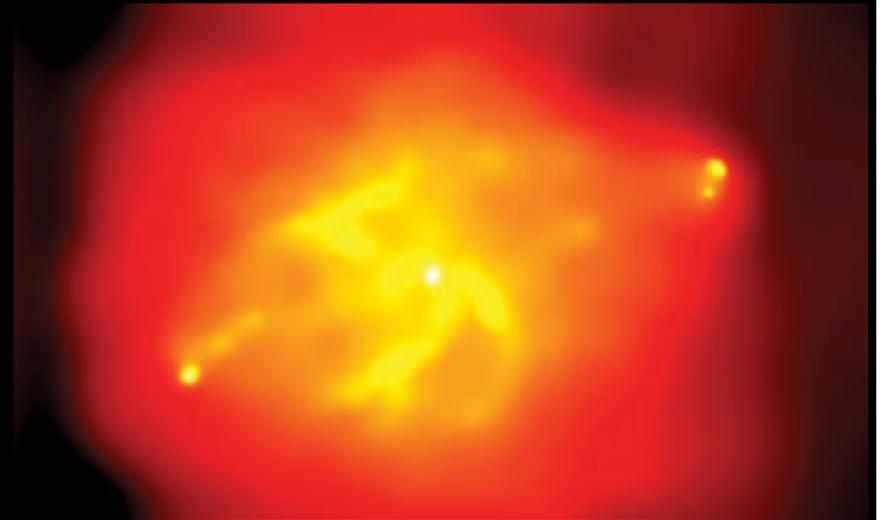
Le monde des galaxies

Galaxie active Cygnus A

- A peine détectable en lumière visible
- La 3e radio source la plus intense du ciel !



Image X



Cygnus A

Image radio



Le monde des galaxies

Les galaxies actives

- Galaxies « anodines » en lumière visible
- Elles sont beaucoup plus lumineuses dans le domaine X et radio
- Elles présentent des jets immenses (plus étendus que la galaxie visible)
- Ces jets sont vraisemblablement produits par le trou noir central, entouré d'un disque d'accrétion

Le monde des galaxies

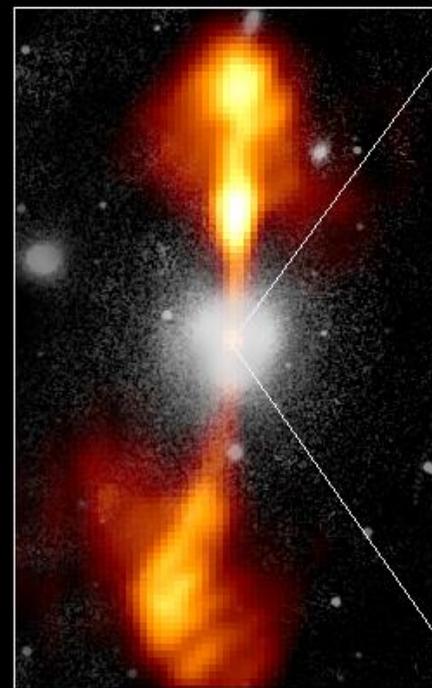
Les galaxies actives: disque d'accrétion "saturé"

Si l'approvisionnement en matière du disque d'accrétion est trop grand, le disque « déborde » et se met à éjecter une partie de la matière sous forme de jets perpendiculaires au plan du disque

Core of Galaxy NGC 4261

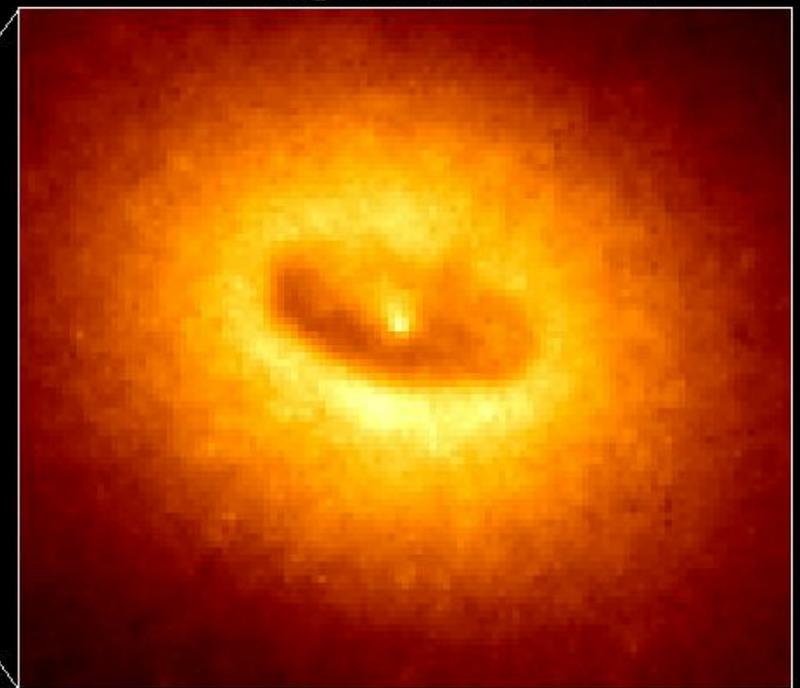
Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk

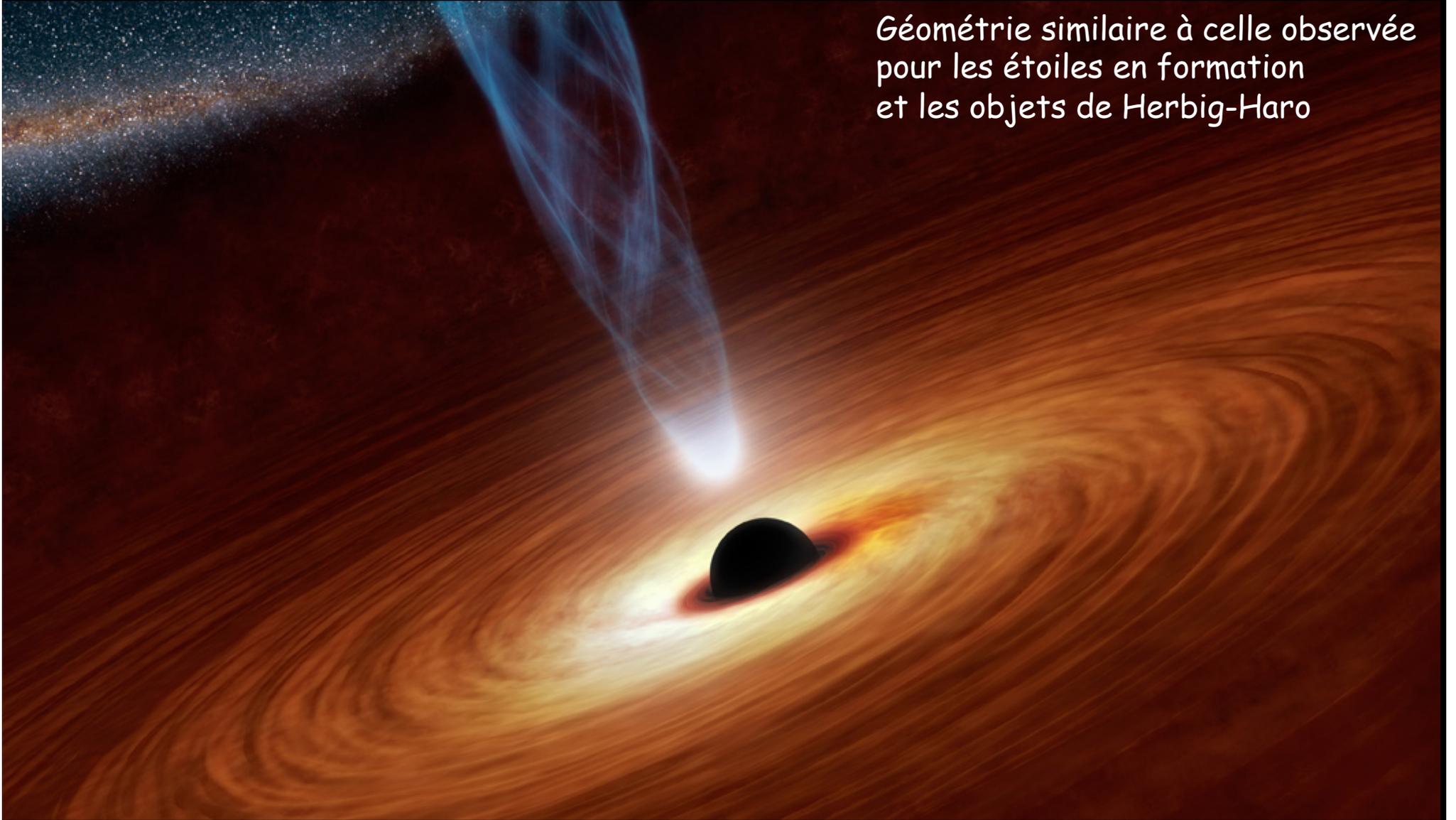


17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

Le monde des galaxies

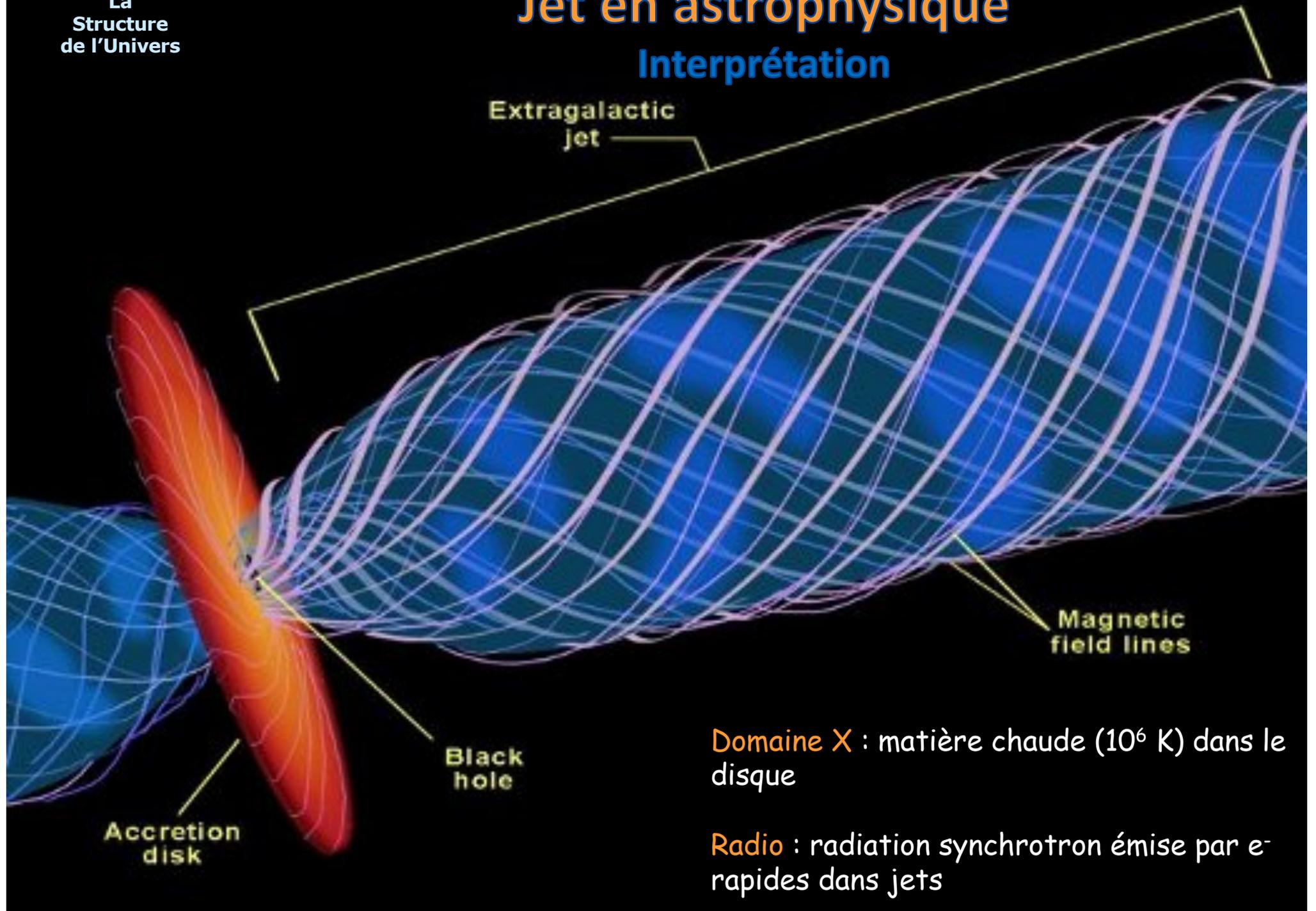
Jet de galaxie active (vue d'artiste)

Géométrie similaire à celle observée
pour les étoiles en formation
et les objets de Herbig-Haro



Jet en astrophysique

Interprétation



Domaine X : matière chaude (10^6 K) dans le disque

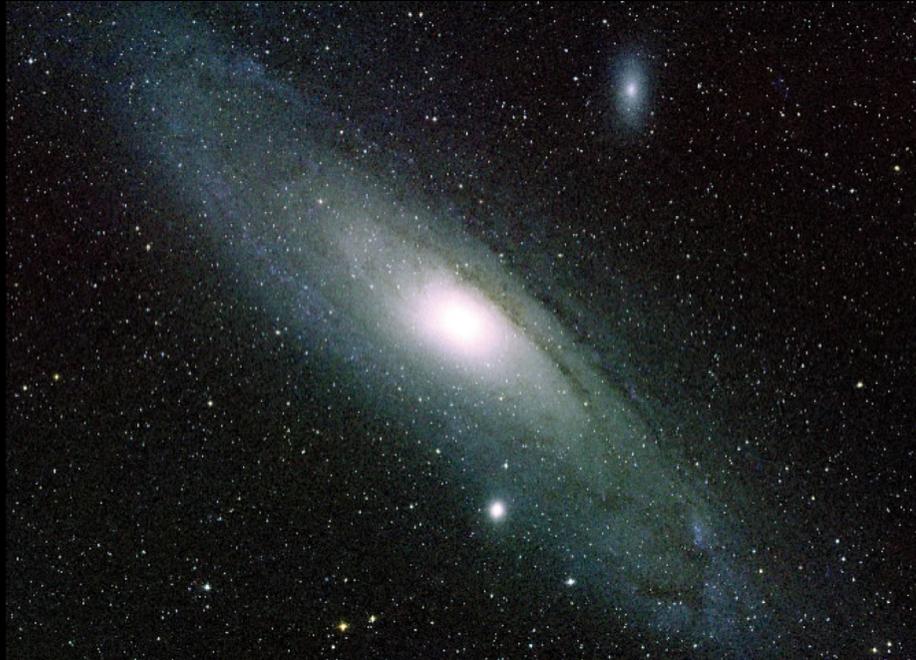
Radio : radiation synchrotron émise par e^- rapides dans jets

Le monde des galaxies

Galaxie active / Galaxie normale



M 87: galaxie active



M 31: galaxie non active

Les deux galaxies possèdent
des trous noirs centraux:
L'une est active, l'autre pas !

Pourquoi?

Le monde des galaxies

Galaxie active / Galaxie normale

Origine de l'activité

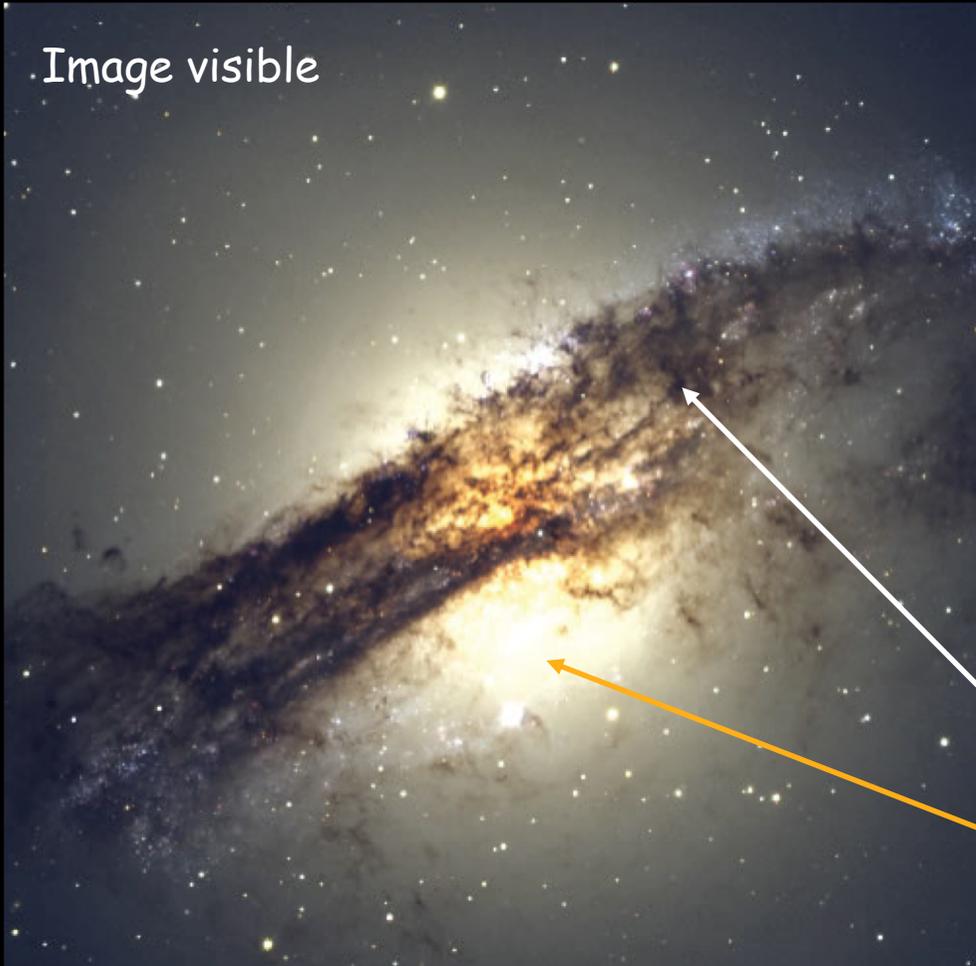
Une explication possible: **relation activité** \Leftrightarrow **collisions intergalactiques**

Cas de Centaurus A : **absorption** d'une galaxie spirale satellite

Cas de Centaurus A

Galaxie en interaction / active la plus proche

Image visible



La galaxie spirale phagocytée a alimenté le disque d'accrétion du trou noir central, et la matière excédentaire est éjectée dans les jets

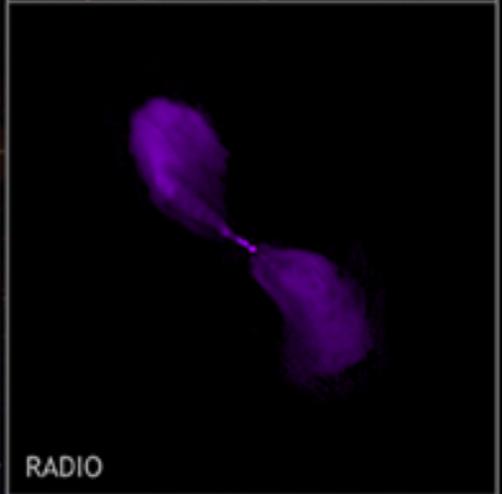
Résidu de la galaxie spirale

Galaxie elliptique

Cas de Centaurus A



X-RAY



RADIO



OPTICAL

COMPOSITE

Le monde des galaxies

Galaxie active / Galaxie normale

Origine de l'activité

Une explication possible: **relation activité** \Leftrightarrow **collisions intergalactiques**

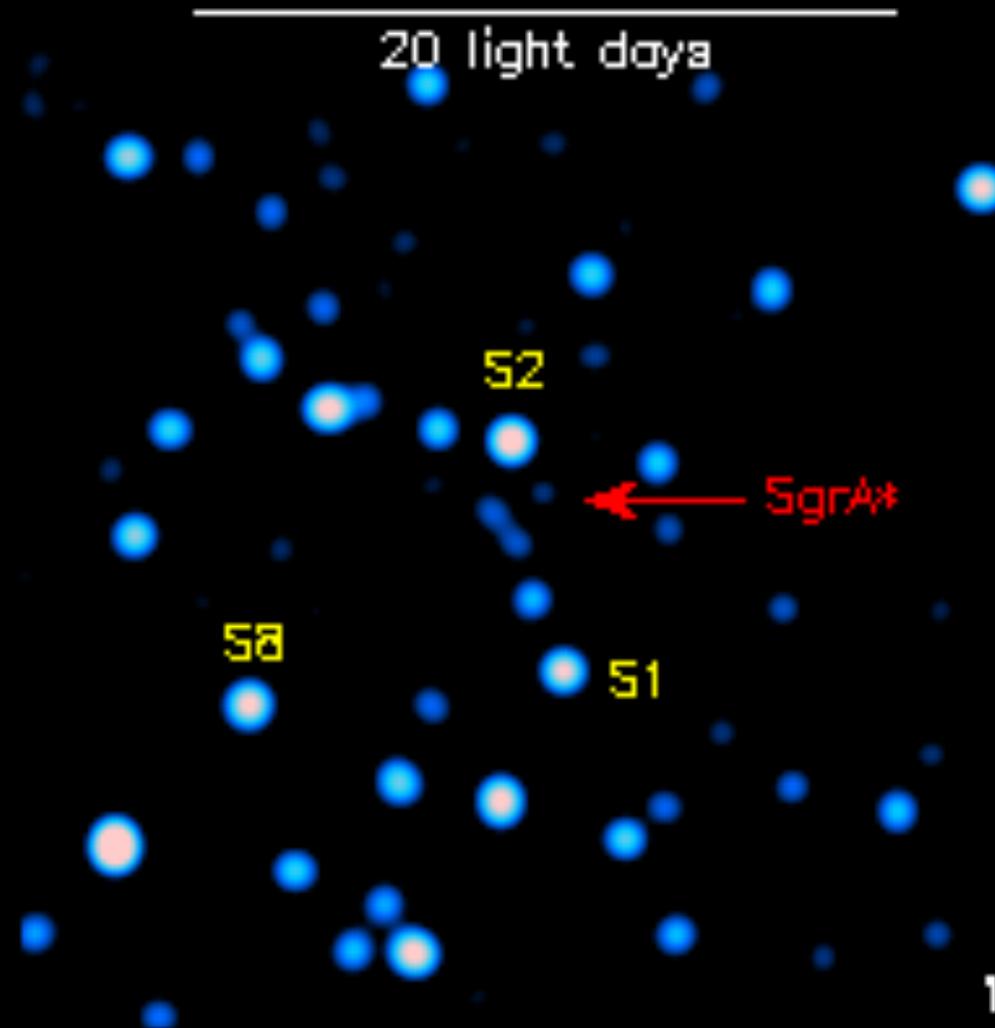
Cas de Centaurus A : **absorption** d'une galaxie spirale satellite

Dans notre Galaxie et celle d'Andromède, il n'y a plus de matière pour alimenter le **disque d'accrétion** du trou noir...

(quoique on y observe de temps en temps un **sursaut** lumineux)

Sgr A*

Sursaut (flare) de 2003



Le monde des galaxies

Galaxie active / Galaxie normale

Origine de l'activité

Une explication possible: **relation activité** \Leftrightarrow **collisions intergalactiques**

Cas de Centaurus A : **absorption** d'une galaxie spirale satellite

Dans notre Galaxie et celle d'Andromède, il n'y a plus de matière pour alimenter le **disque d'accrétion** du trou noir...

(quoique on y observe de temps en temps un **sursaut** lumineux : origine inconnue)

Les **galaxies proches ne sont plus actives** (à l'exception de Cen A, une galaxie en interaction)

➤ origine de l'activité:

- lien avec l'âge / le **stade évolutif** de la galaxie
- lien avec l'environnement / l'histoire (**interaction**) de la galaxie

Galaxies en interaction

Simulation de collision de galaxies



Cas de la galaxie active M87

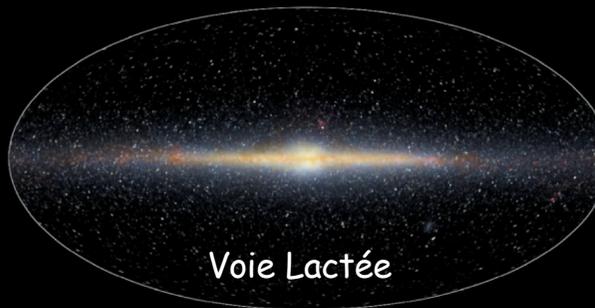
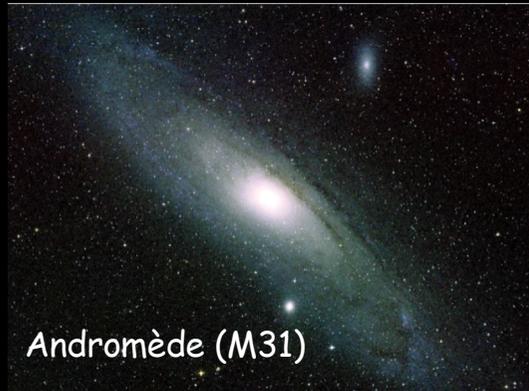
Grande galaxie elliptique de l'amas de la Vierge



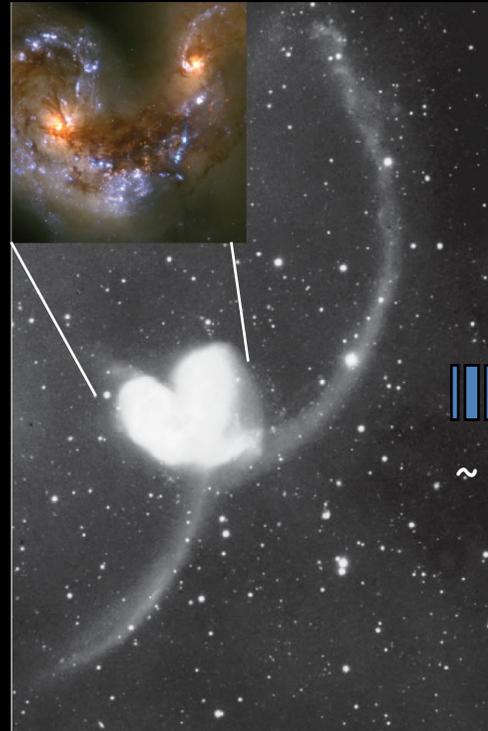
- galaxies elliptiques géantes = résultat de la fusion de 2 galaxies !

Galaxies en interaction

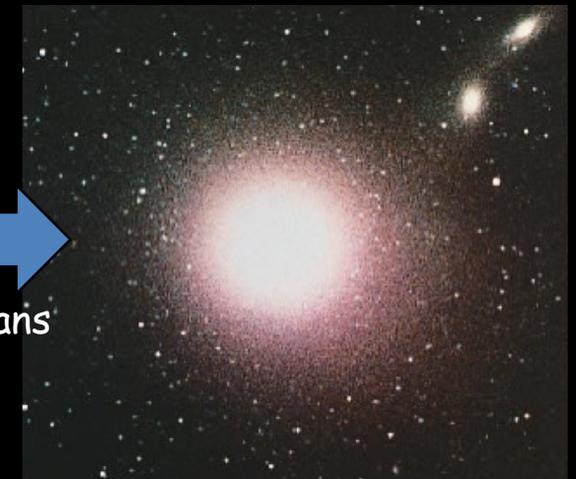
Scénario



~ $4 \cdot 10^9$ ans



~ $1 \cdot 10^9$ ans

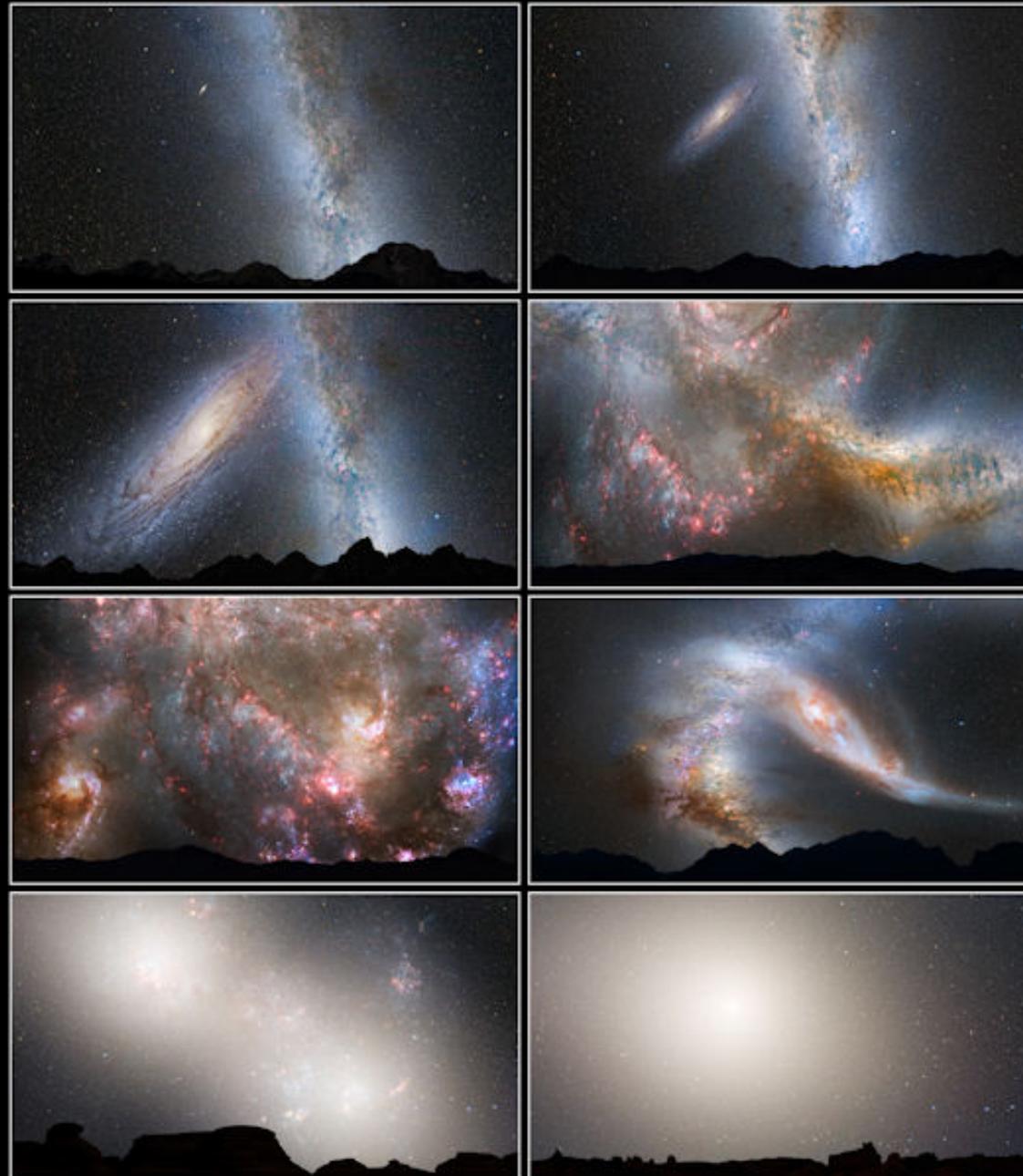


Deux galaxies
spirales

Galaxies en
interaction

Galaxie elliptique
géante

La
Structure
de l'Univers



**Illustration Sequence of the Milky Way
and Andromeda Galaxy Colliding**

NASA, ESA, Z. Levay and R. van der Marel (STScI), T. Hallas, and A. Mellinger ■ STScI-PRC12-20b

Le monde des galaxies

Galaxies en interaction

Phénomène fréquent

Les interactions entre galaxies sont très **fréquentes**

Les **diamètres** des galaxies ne sont pas négligeables par rapport aux distances entre galaxies au sein des amas:

Exemple dans amas local :

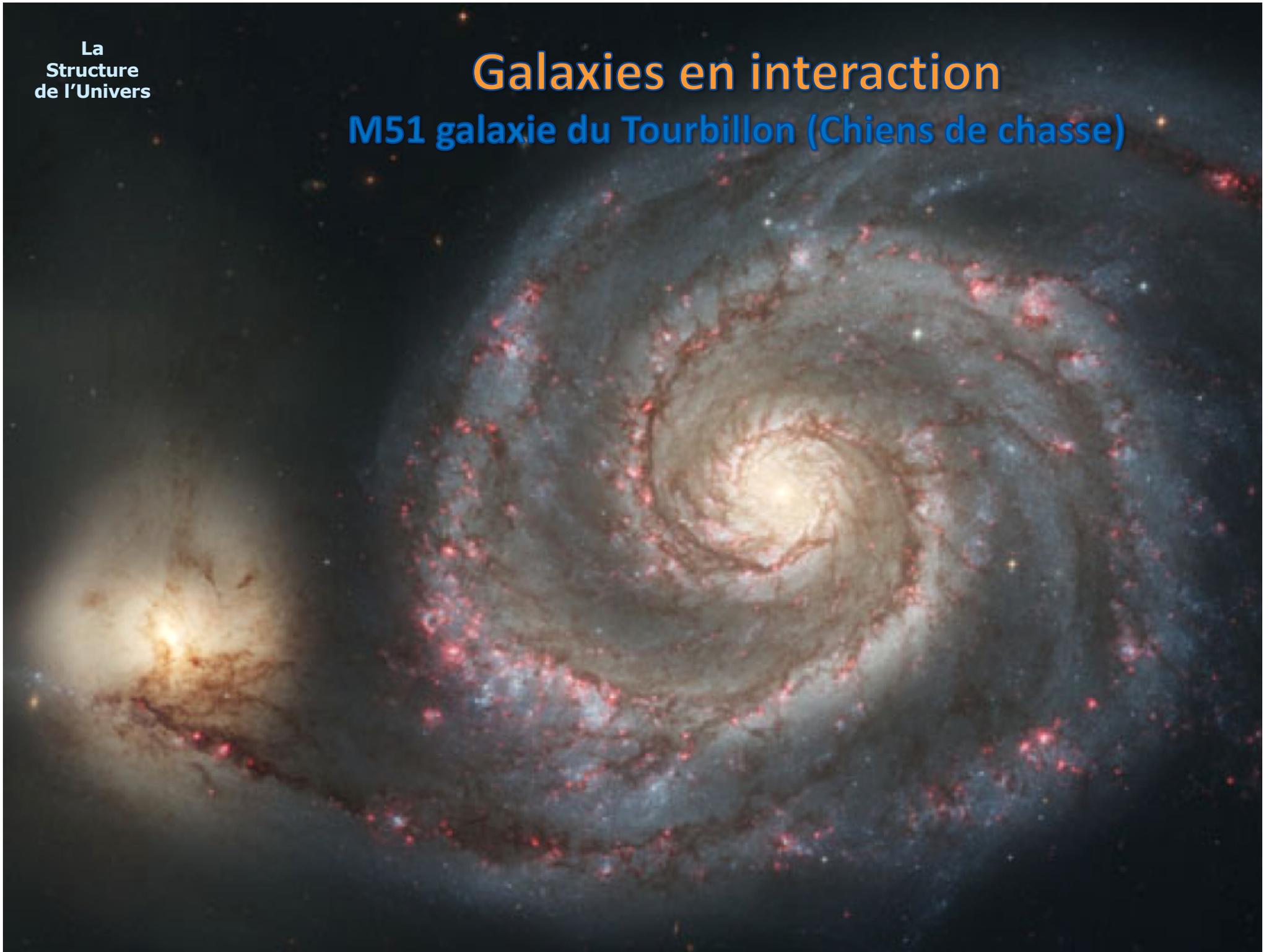
distance Voie Lactée - Andromède = **25 fois diamètre Voie Lactée**

A titre de comparaison: distance typique entre étoiles de la galaxie =

$$\begin{aligned} 1 \text{ pc} &= 206265 \text{ UA} = 206265 \times 149.6 \times 10^6 \text{ km} \\ &= 206265 \times 149.6 \times 10^6 \text{ km} / 0.7 \times 10^6 \text{ km} \times 1 R_{\text{sol}} \\ &= 206265 \times 216 R_{\text{sol}} \\ &= \mathbf{40 \times 10^6 R_{\text{sol}}} \end{aligned}$$

Galaxies en interaction

M51 galaxie du Tourbillon (Chiens de chasse)



Galaxies en interaction

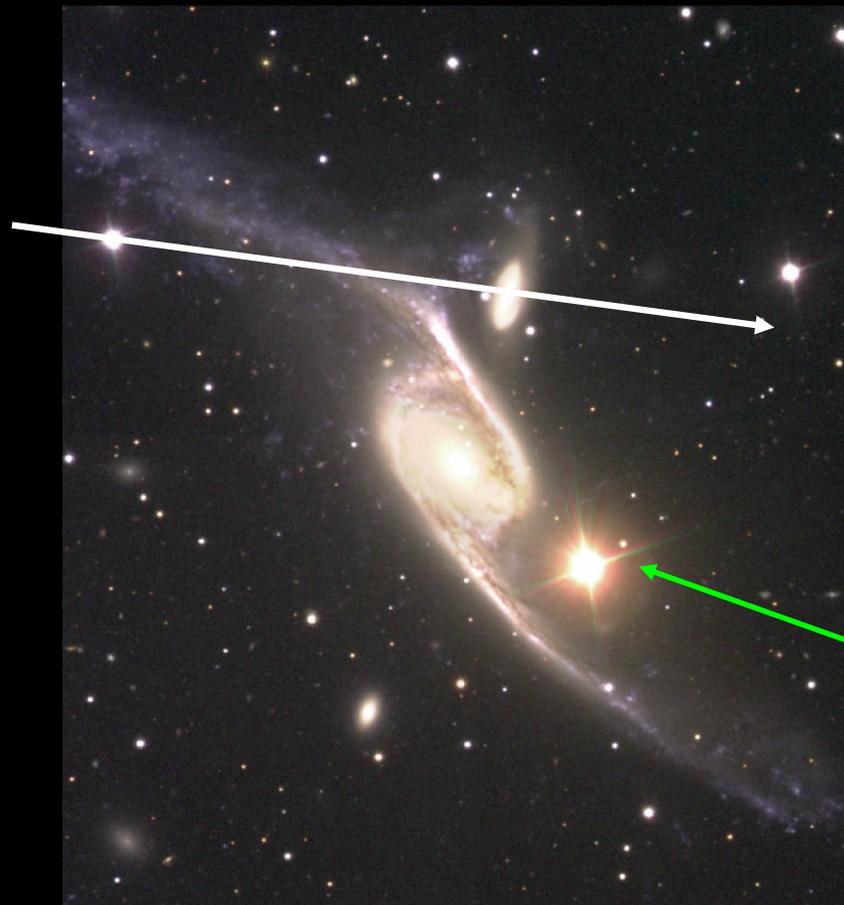
Choc de galaxies : galaxie de la Roue de chariot



Les collisions de galaxies déclenchent la formation d'étoiles (régions bleues: étoiles massives à courte durée de vie) : choc entre nuages de gaz qui déclenchent leur effondrement et/ou onde de choc qui se propage dans le disque de la galaxie

Galaxies en interaction

Déformation de galaxies : NGC 6872

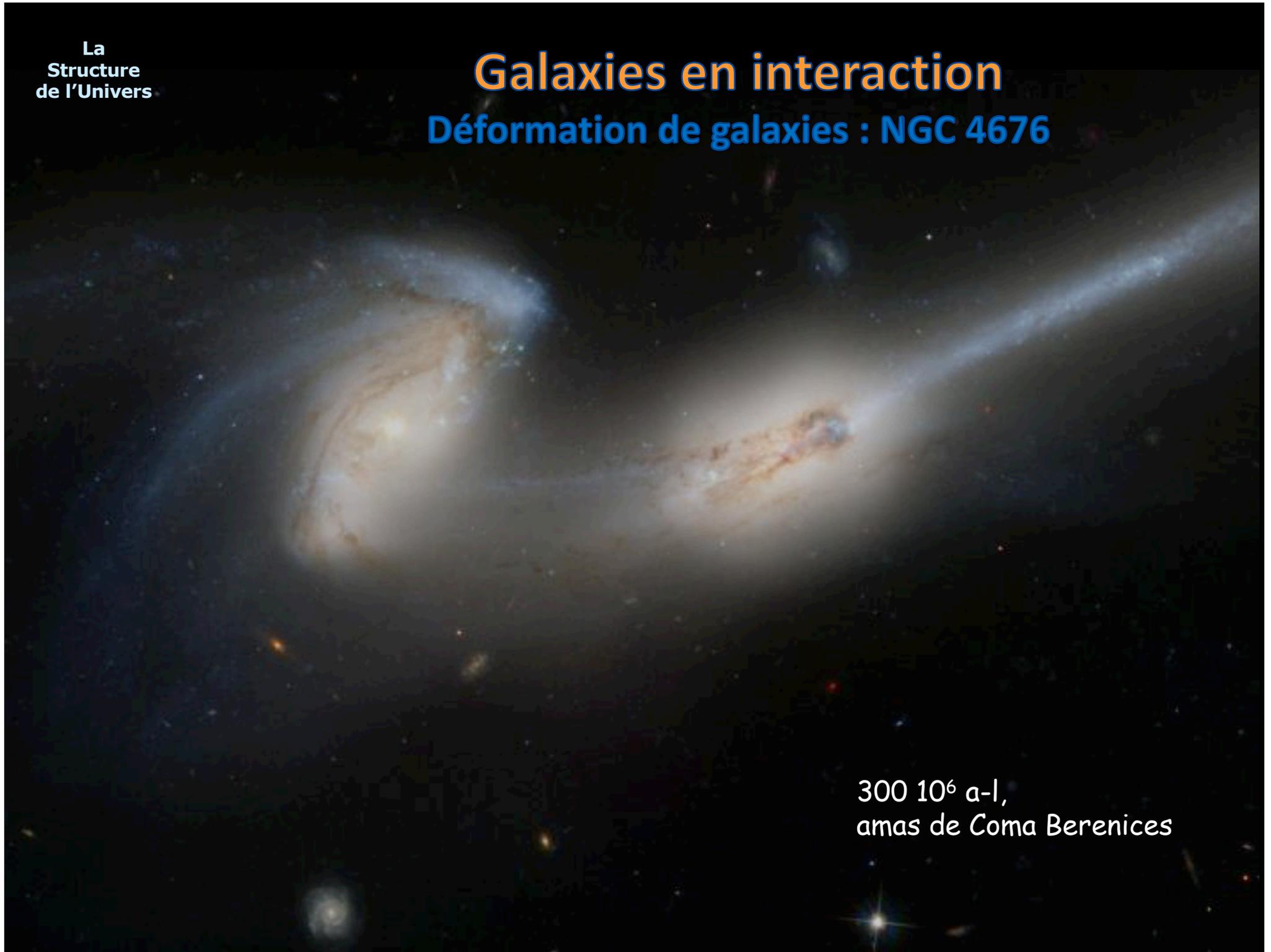


Étoile de notre Galaxie
à l'avant-plan

Galaxies en interaction

Déformation de galaxies : NGC 4676

300 10^6 a-l,
amas de Coma Berenices



Galaxies en interaction

Au sein même de la Voie Lactée!

Sagittarius Dwarf Irregular Galaxy

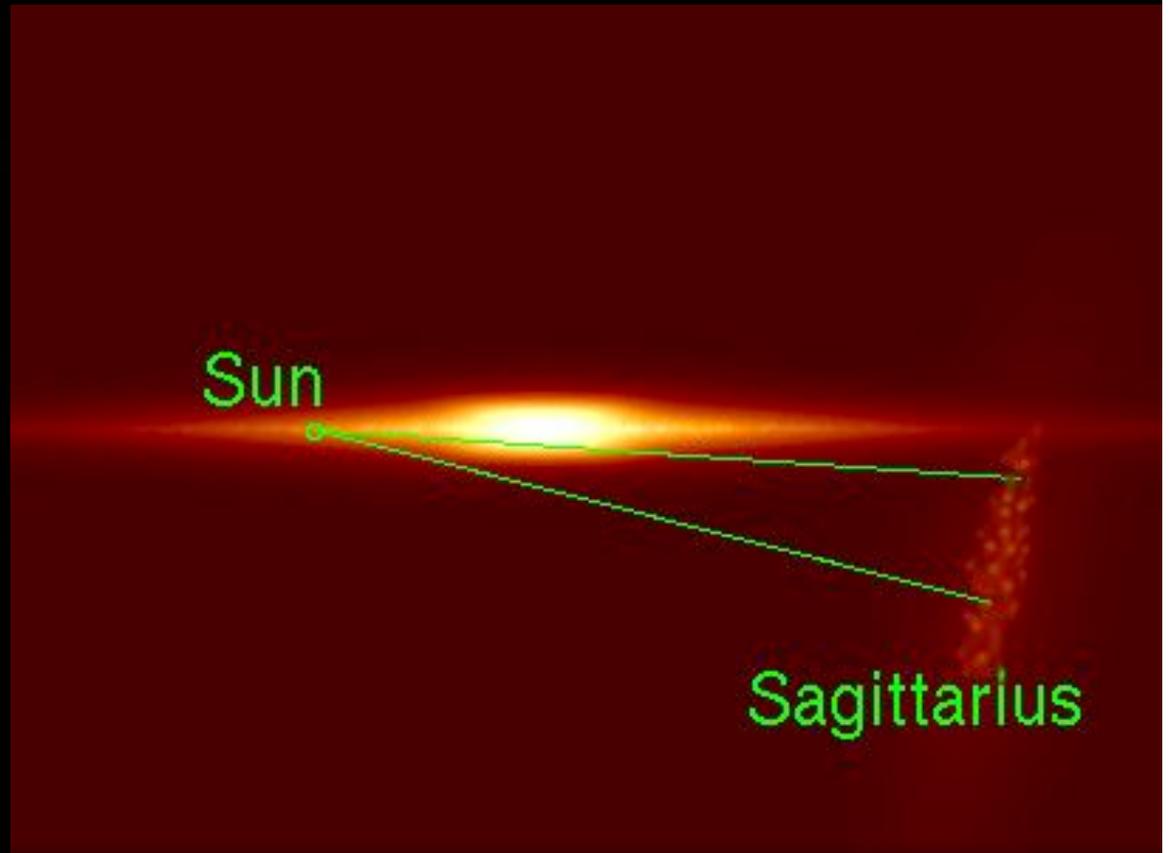


Hubble
Heritage

Fusion avec les galaxies elliptiques naines du Grand chien et du Sagittaire

Sun

Sagittarius



Galaxies en interaction

Origine des galaxies elliptiques géantes

Au sein des amas de galaxies

Les collisions de galaxies donnent naissance aux **galaxies elliptiques géantes**

Elles sont plus nombreuses dans les **amas très peuplés**

Exemple: Amas de la Vierge (2000 galaxies!)

Les amas moins peuplés contiennent essentiellement des **galaxies spirales**

Exemple: Amas local (30 galaxies)

Galaxies en interaction

Au sein même de la Voie Lactée!

Abell 2199: la galaxie centrale est une galaxie elliptique géante cannibalisant des galaxies spirales de la taille de la Voie Lactée

Stade évolutif des galaxies

Quasars

Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine, très lointaine

Les galaxies lointaines sont apparemment toutes **actives**. Pourquoi ?

Les galaxies actives sont en effet beaucoup plus **lumineuses** que les galaxies normales (10 à 1000 fois, sur l'ensemble du spectre)

Elles sont donc plus facilement **déTECTABLES** à grande distance

Elles sont alors plus **jeunes** (grande distance = lointain passé)

A l'époque, la matière alimentant le disque d'accrétion était encore **abondante**

Les collisions entre galaxies étaient plus **fréquentes** dans le passé

- galaxies lointaines, jeunes et actives, observées en tant que **quasar**

Quasar 3C273

Hubble Space Telescope, lumière visible &
coronographe (2003)



Quasar

Quasi stellar radio source

Controverse sur la nature des quasars

Sources radio quasi-ponctuelles découvertes en 1960

Raies spectrales d'abord **non identifiées**

Ensuite identifiées comme raies communes mais affectées d'un grand **décalage vers le rouge**

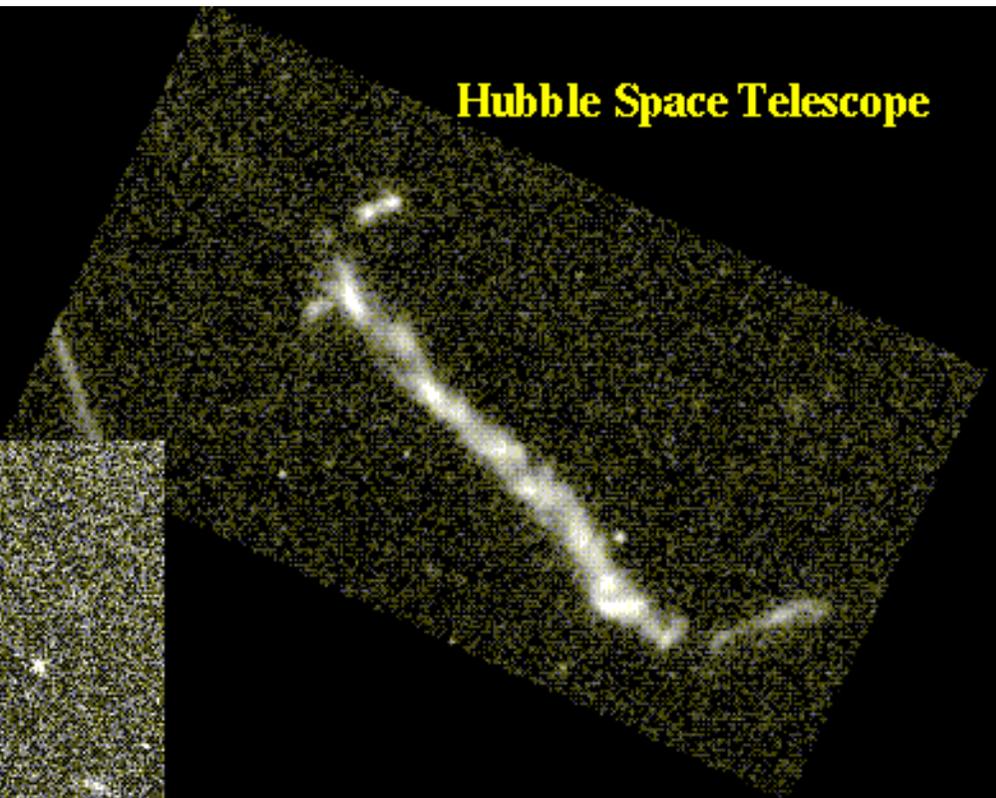
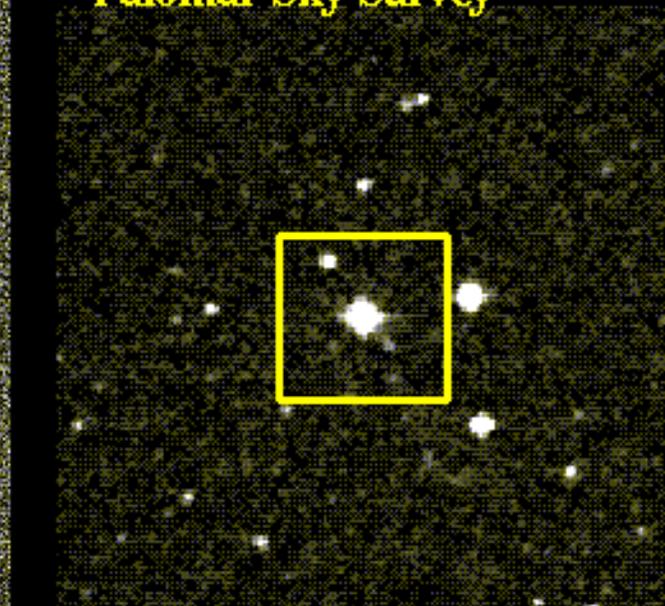
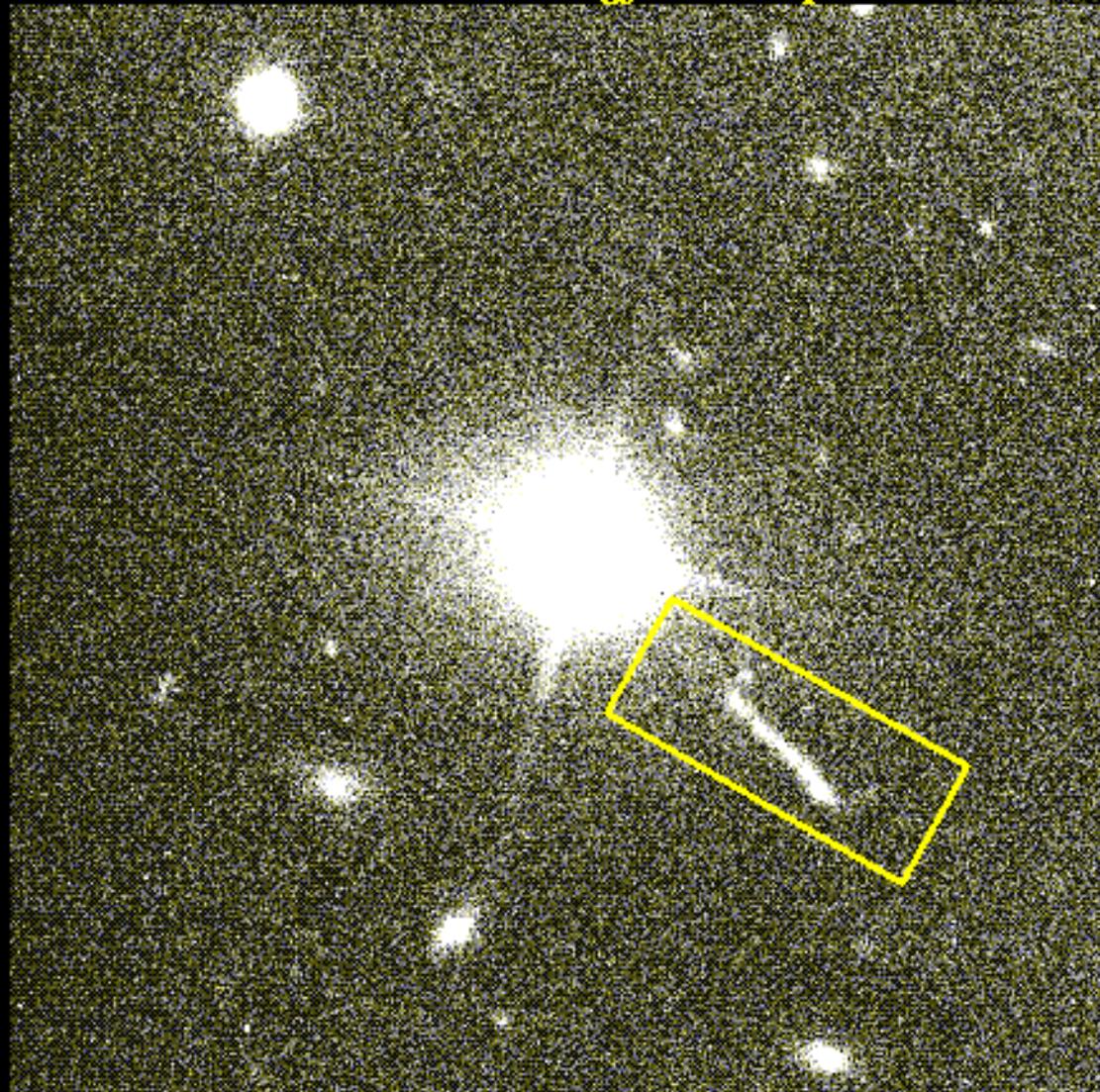
Jet radio souvent associé aux quasars les plus brillants (proches)

3C 273 and its Jet

Hubble Space Telescope

ESO New Technology Telescope

Palomar Sky Survey



Quasar

Quasi stellar radio source

Controverse sur la nature des quasars

Sources radio quasi-ponctuelles découvertes en 1960

Raies spectrales d'abord **non identifiées**

Ensuite identifiées comme raies communes mais affectées d'un grand **décalage vers le rouge**

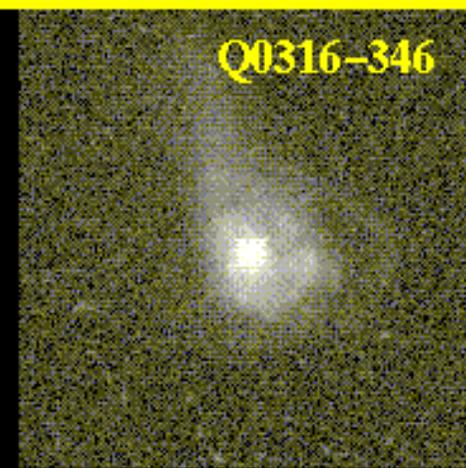
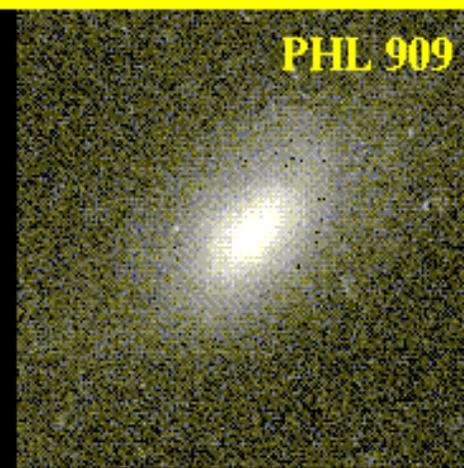
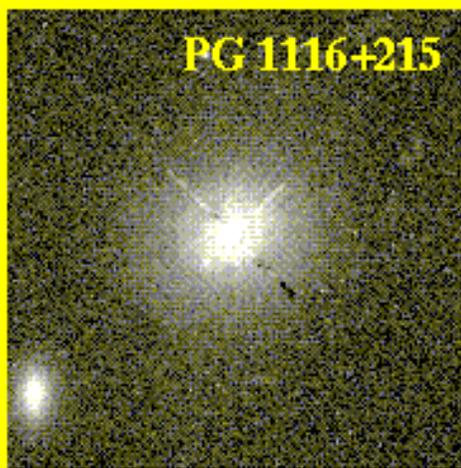
Jet radio souvent associé aux quasars les plus brillants (proches)

1990: télescope spatial Hubble découvre les **galaxies associées**

Radio-loud



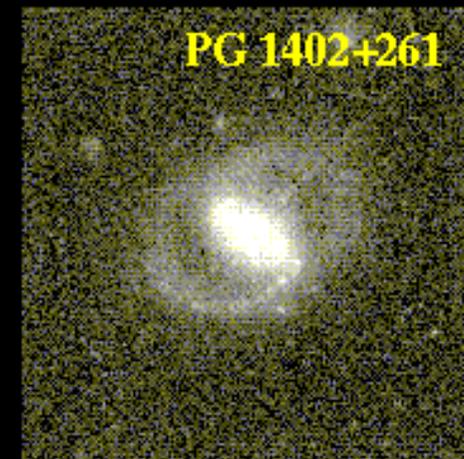
Radio-quiet



QSO Host Galaxies

HST images

10"



Quasar

Quasi stellar radio source

Controverse sur la nature des quasars

Sources radio quasi-ponctuelles découvertes en 1960

Raies spectrales d'abord **non identifiées**

Ensuite identifiées comme raies communes mais affectées d'un grand **décalage vers le rouge**

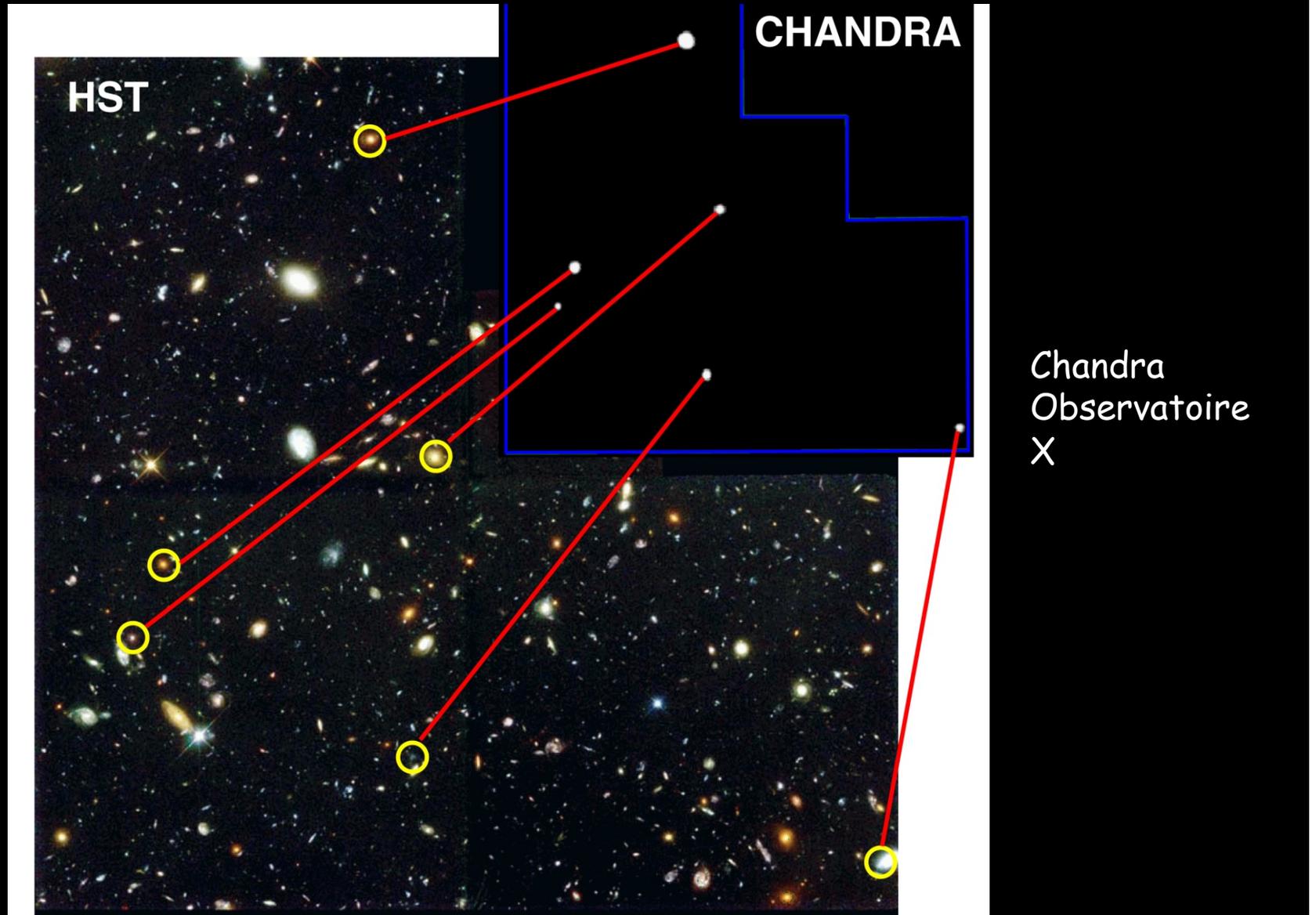
Jet radio souvent associé aux quasars les plus brillants (proches)

1990: télescope spatial Hubble découvre les **galaxies associées**

➤ quasars = **noyaux** de galaxies actives lointaines

Nombreuses galaxies lointaines actives

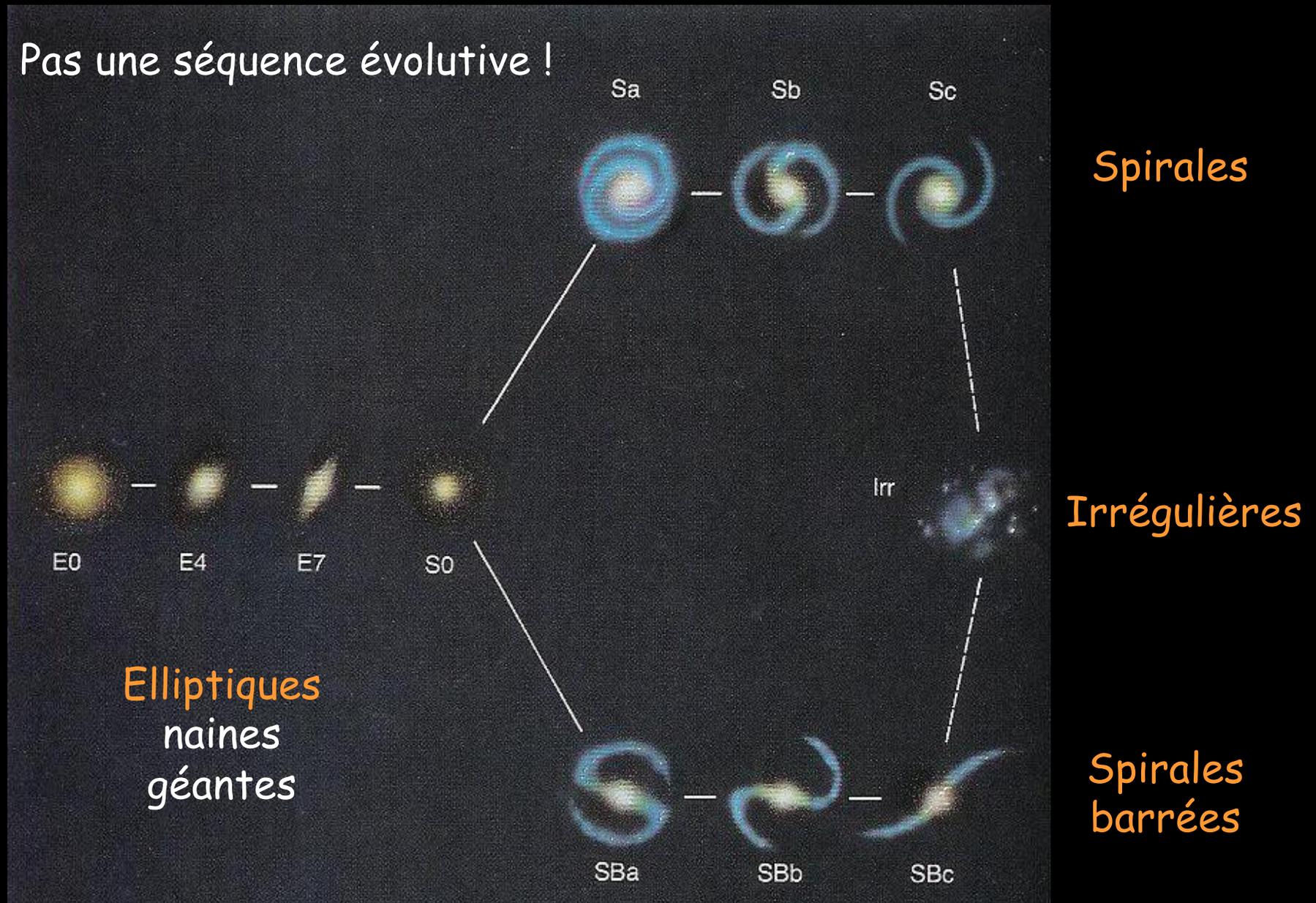
Hubble Space Telescope vs Chandra X-ray Observatory



Classification des galaxies

Diagramme de Hubble

Pas une séquence évolutive !

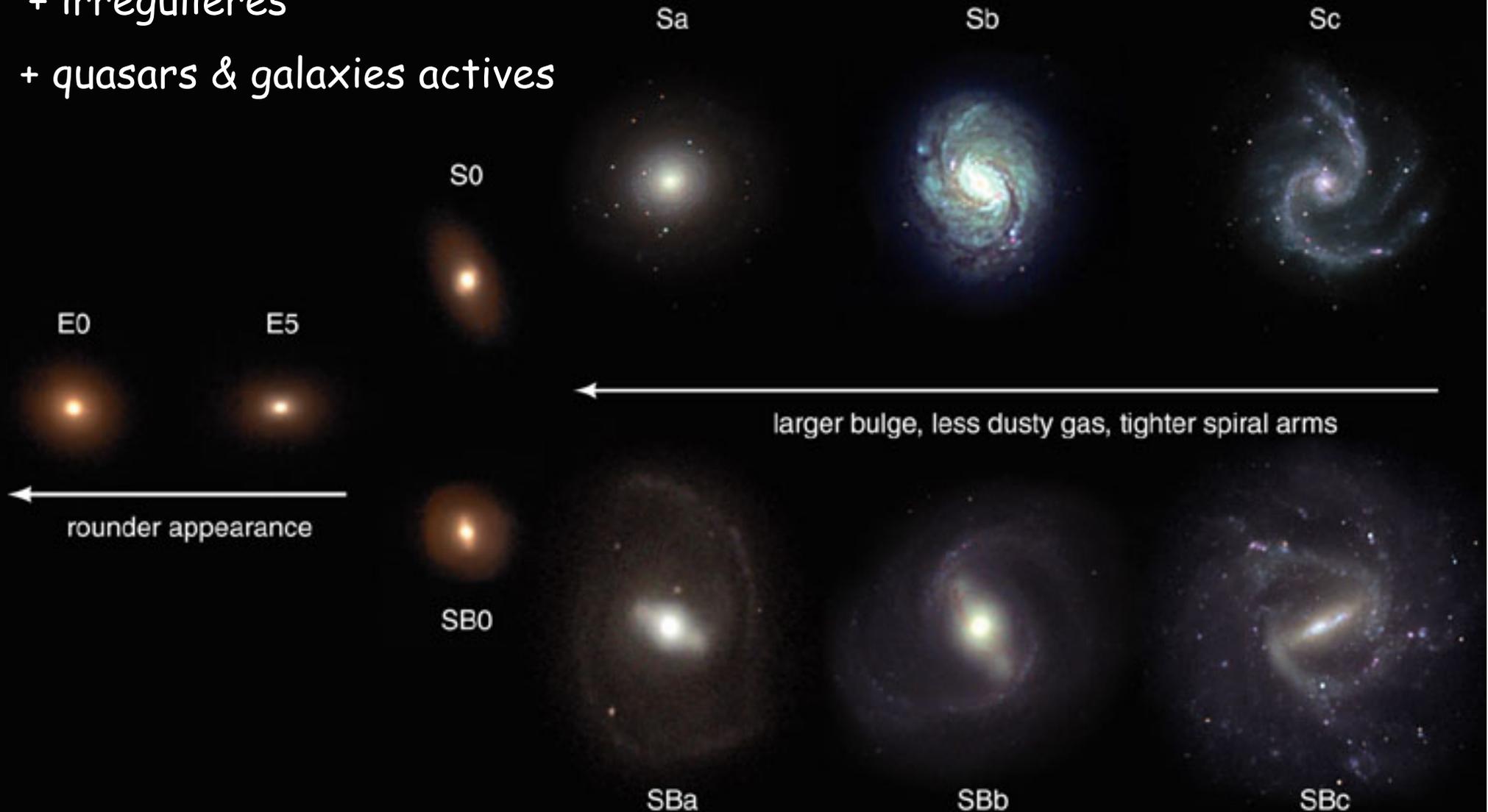


Classification des galaxies

Diagramme de Hubble

+ irrégulières

+ quasars & galaxies actives

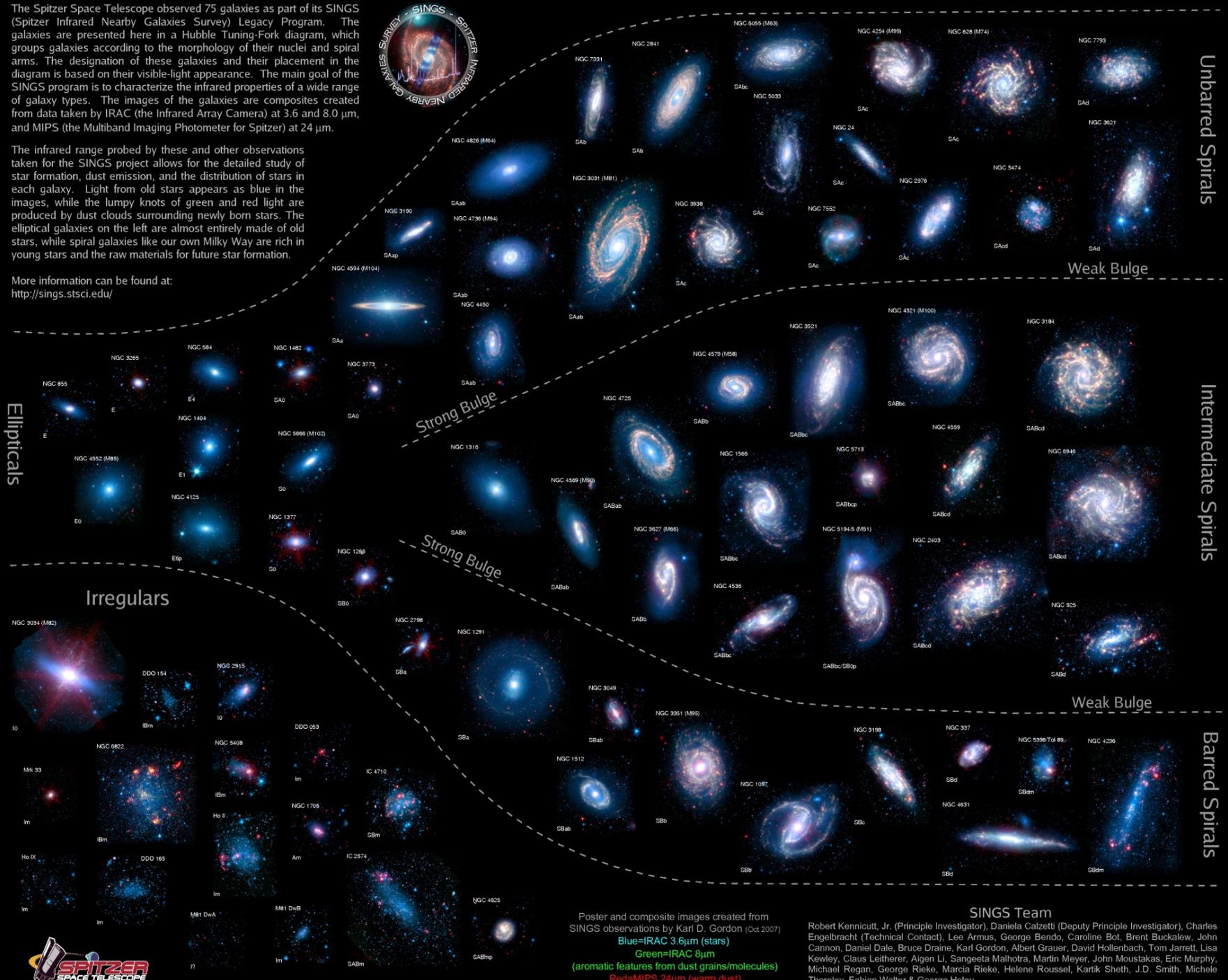


The Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS) Hubble Tuning-Fork

The Spitzer Space Telescope observed 75 galaxies as part of its SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) Legacy Program. The galaxies are presented here in a Hubble Tuning-Fork diagram, which groups galaxies according to the morphology of their nuclei and spiral arms. The designation of these galaxies and their placement in the diagram is based on their visible-light appearance. The main goal of the SINGS program is to characterize the infrared properties of a wide range of galaxy types. The images of the galaxies are composites created from data taken by IRAC (the Infrared Array Camera) at 3.6 and 8.0 μm , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24 μm .

The infrared range probed by these and other observations taken for the SINGS project allows for the detailed study of star formation, dust emission, and the distribution of stars in each galaxy. Light from old stars appears as blue in the images, while the lumpy knots of green and red light are produced by dust clouds surrounding newly born stars. The elliptical galaxies on the left are almost entirely made of old stars, while spiral galaxies like our own Milky Way are rich in young stars and the raw materials for future star formation.

More information can be found at:
<http://sings.stsci.edu/>



Ellipticals

Irregulars

Strong Bulge

Strong Bulge

Unbarred Spirals

Weak Bulge

Intermediate Spirals

Weak Bulge

Barred Spirals



Poster and composite images created from SINGS observations by Karl D. Gordon (Oct 2007)
 Blue=IRAC 3.6 μm (stars)
 Green=IRAC 8 μm
 (aromatic features from dust grains/molecules)
 Red=MIPS 24 μm (warm dust)

SINGS Team
 Robert Kennicutt, Jr. (Principal Investigator), Daniela Calzetti (Deputy Principal Investigator), Charles Engelbracht (Technical Contact), Lee Armus, George Bendo, Caroline Bot, Brent Buckalew, John Cannon, Daniel Dale, Bruce Draine, Karl Gordon, Albert Grauer, David Hollenbach, Tom Jarrett, Lisa Kewley, Claus Leitherer, Aigen Li, Sangeeta Malhotra, Martin Meyer, John Moustakas, Eric Murphy, Michael Regan, George Rieke, Marcia Rieke, Helene Roussel, Kartik Sheth, J.D. Smith, Michele Thornley, Fabian Walter & George Helou

Propriétés comparatives des galaxies



| | Spirales | Elliptiques géantes | Elliptiques naines | Irrégulières naines géantes |
|-------------------------------|--|--------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Masse visible (M_{\odot}) | $10^9 - 10^{11}$ | 10^{13} ! | 10^6 | $10^7 - 10^{10}$ |
| Diamètre (10^3 a-l) | 20 - 150 | 500 ! | 2 | 5 - 30 |
| Orbites stellaires | Ellipses de faible excentricité dans le plan du disque + orbites du halo orientées au hasard | Ellipses de forte excentricité | | |
| Matière interstellaire | Beaucoup dans le disque | Pas | | Beaucoup |
| Etoiles | - Jeunes et bleues dans les bras spiraux - Toutes catégories dans disque - Vieilles dans le halo | Pas d' étoiles bleues | | Comme spirales |

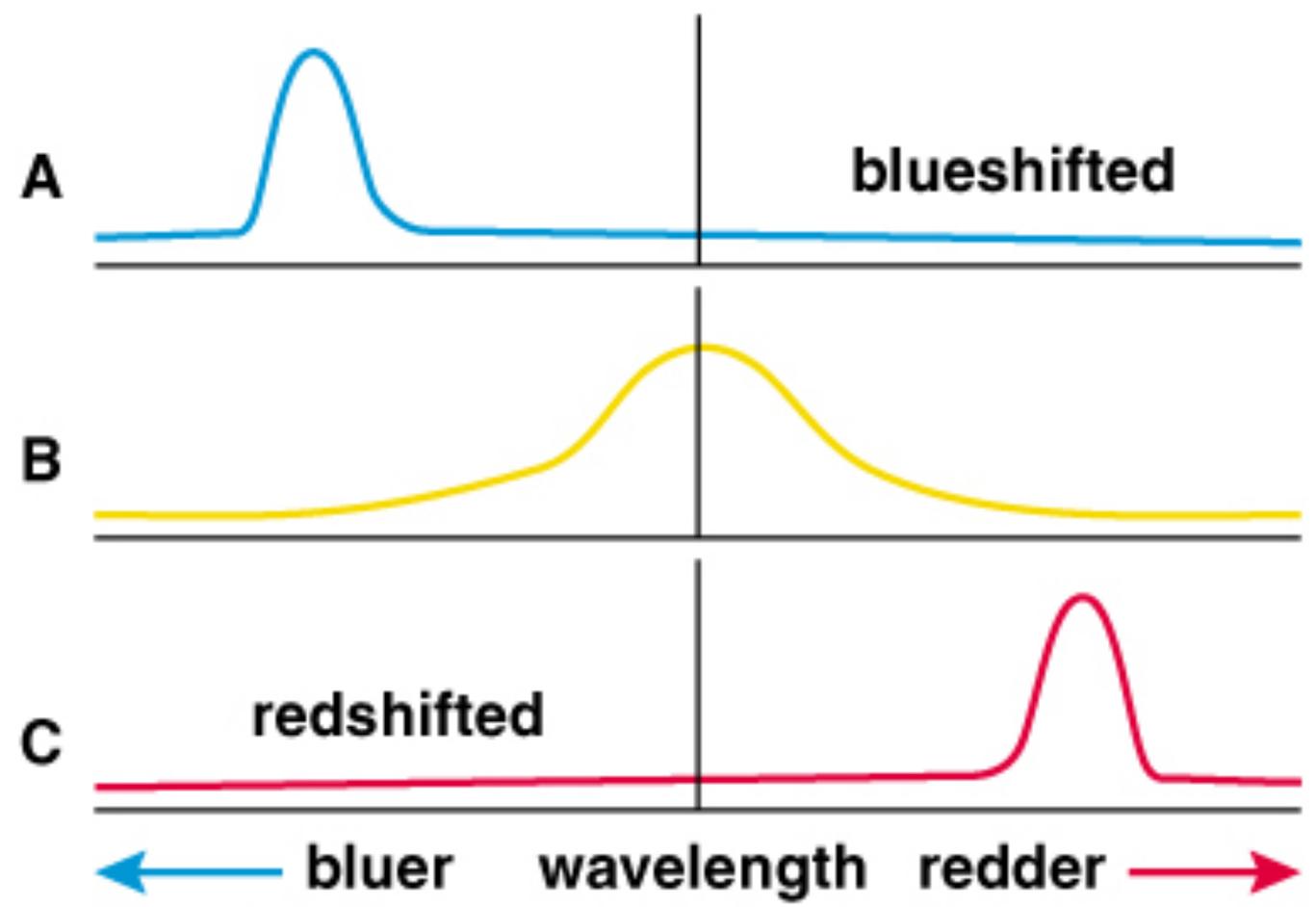
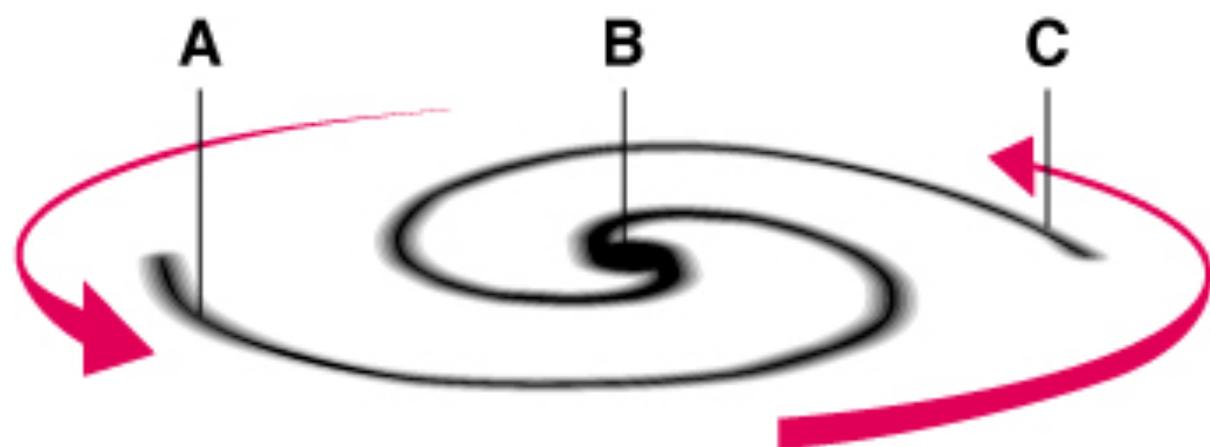
Masse des galaxies

Courbe de rotation

Galaxie en rotation vue par la tranche

Mesure de la vitesse radiale par **effet Doppler** :

$$V_{\text{rot}} / c = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0$$



Masse des galaxies

Courbe de rotation

Galaxie en rotation vue par la tranche

Mesure de la vitesse radiale par **effet Doppler** :

$$V_{\text{rot}} / c = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

Si la masse d'une galaxie était principalement concentrée dans son bulbe (comme suggéré par son fort éclat), la vitesse de rotation de la galaxie (à la distance r du centre) s'exprimerait par:

$$V = 2\pi r / P \quad (\text{module de la vitesse dans une orbite circulaire})$$

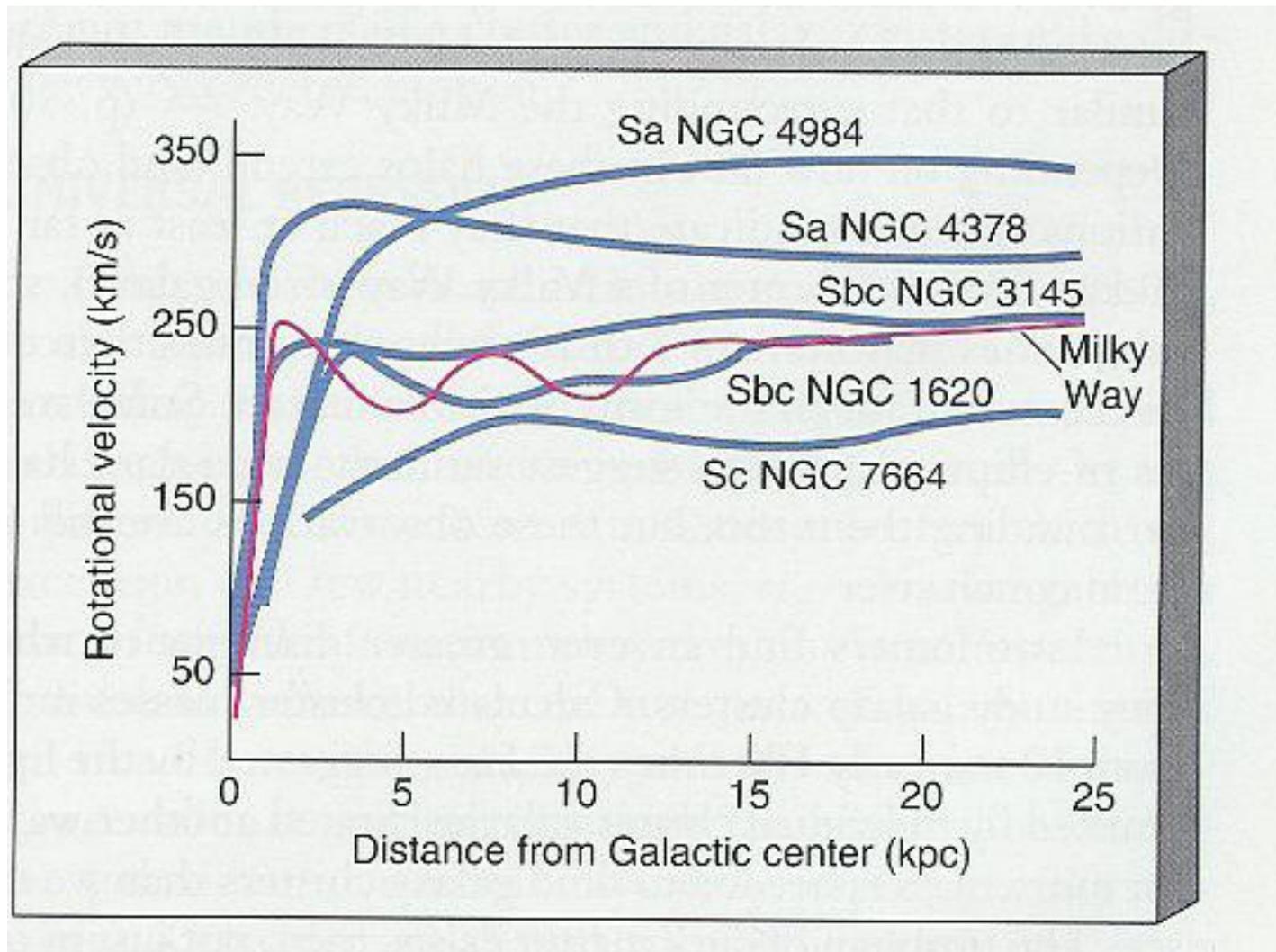
$$r^3 / P^2 = G M_{\text{noyau}} / 4\pi^2 \quad (3\text{e loi de Kepler})$$

$$\triangleright V_{\text{rot}}(r) = [G M_{\text{noyau}} / r]^{1/2}$$

Masse des galaxies

Courbe de rotation

Les courbes de la rotation sont plates (au lieu de décroître comme $r^{-1/2}$) !



Masse des galaxies

Masse dynamique et lumineuse

1. Estimation masse dynamique

Il existe des nuages de gaz en orbite à 100 000 a-l du centre de la Galaxie (soit deux fois plus loin que la limite du disque d'étoiles). La vitesse circulaire de ces nuages est 270 km/s.

La masse dynamique de la Voie Lactée est donc de $5.2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$

2. Estimation masse lumineuse

En extrapolant à partir de la portion de la Galaxie directement observable, on évalue la luminosité totale de la Galaxie à $25 \cdot 10^9 L_{\odot}$.

Si toutes les étoiles de la Galaxie étaient identiques au Soleil, on en déduirait une masse de $25 \cdot 10^9 M_{\odot}$.

Ce n'est pas le cas: on estime que la Galaxie est peuplée principalement d'étoiles moins massives et moins lumineuses que le Soleil, dont le rapport $L/M = 1/4$.

Il faut donc $4 M_{\odot}$ pour produire $1 L_{\odot}$ en moyenne dans la Galaxie.

La masse lumineuse de la Galaxie s'élève donc à $100 \cdot 10^9 M_{\odot}$, soit $10^{11} M_{\odot}$

Masse des galaxies

Matière sombre vs MOND

Deux possibilités:

1. Il existe de la **matière non-lumineuse** telle que $M(r) \propto r$, soit $V(r) = \text{constante}$

Quelle est la nature de cette **matière sombre**?

- **objets compacts?** trous noirs, étoiles à neutrons, naines blanches, naines brunes...

➤ Résultats des grands programmes d'observation : pas suffisant!

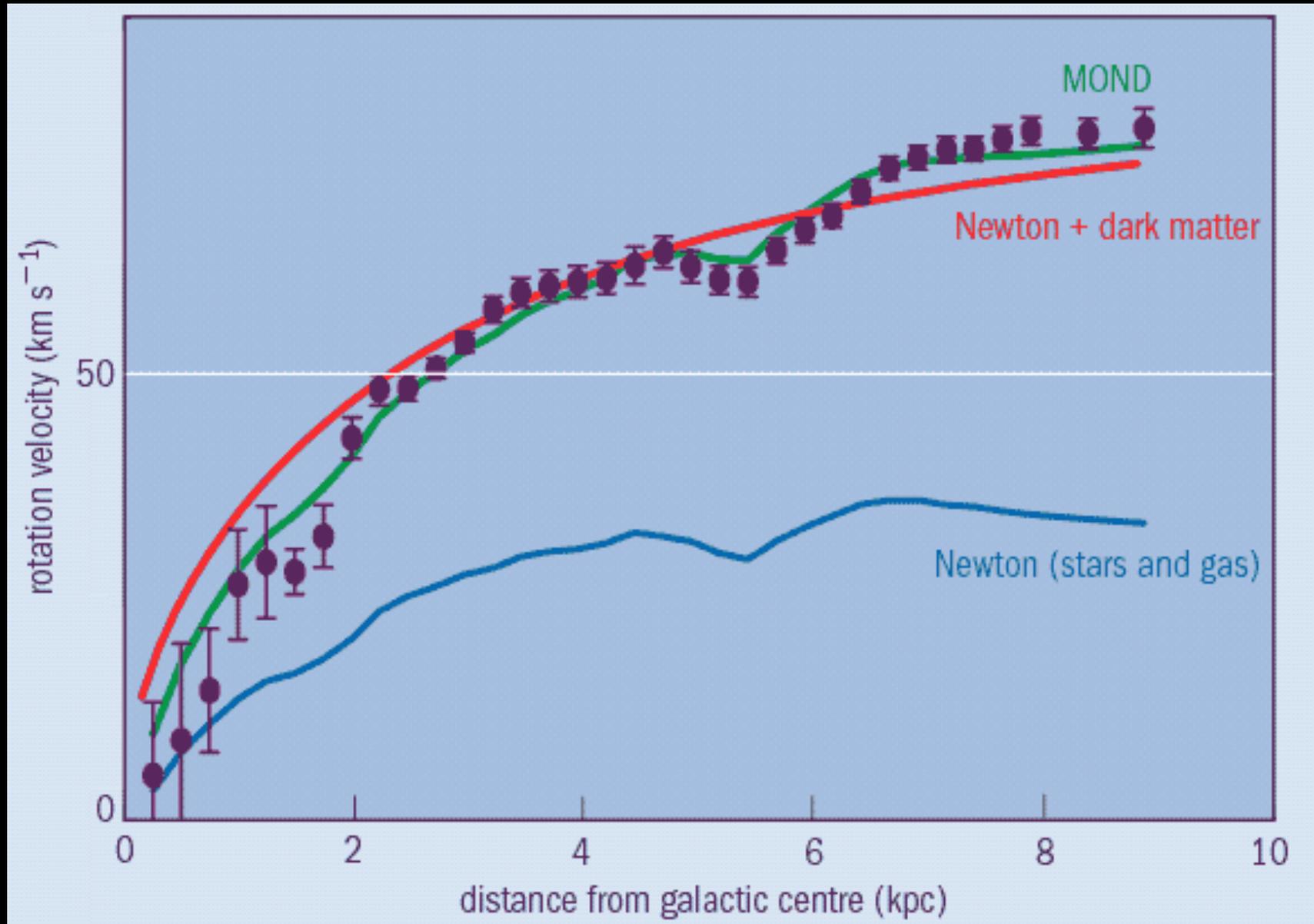
- **particules élémentaires exotiques?**

2. La **loi de la gravitation** n'est pas valable à ces échelles:

MOND: Modified Newtonian Dynamics

Théorie MOND

Explication de la courbe de rotation des galaxies ?



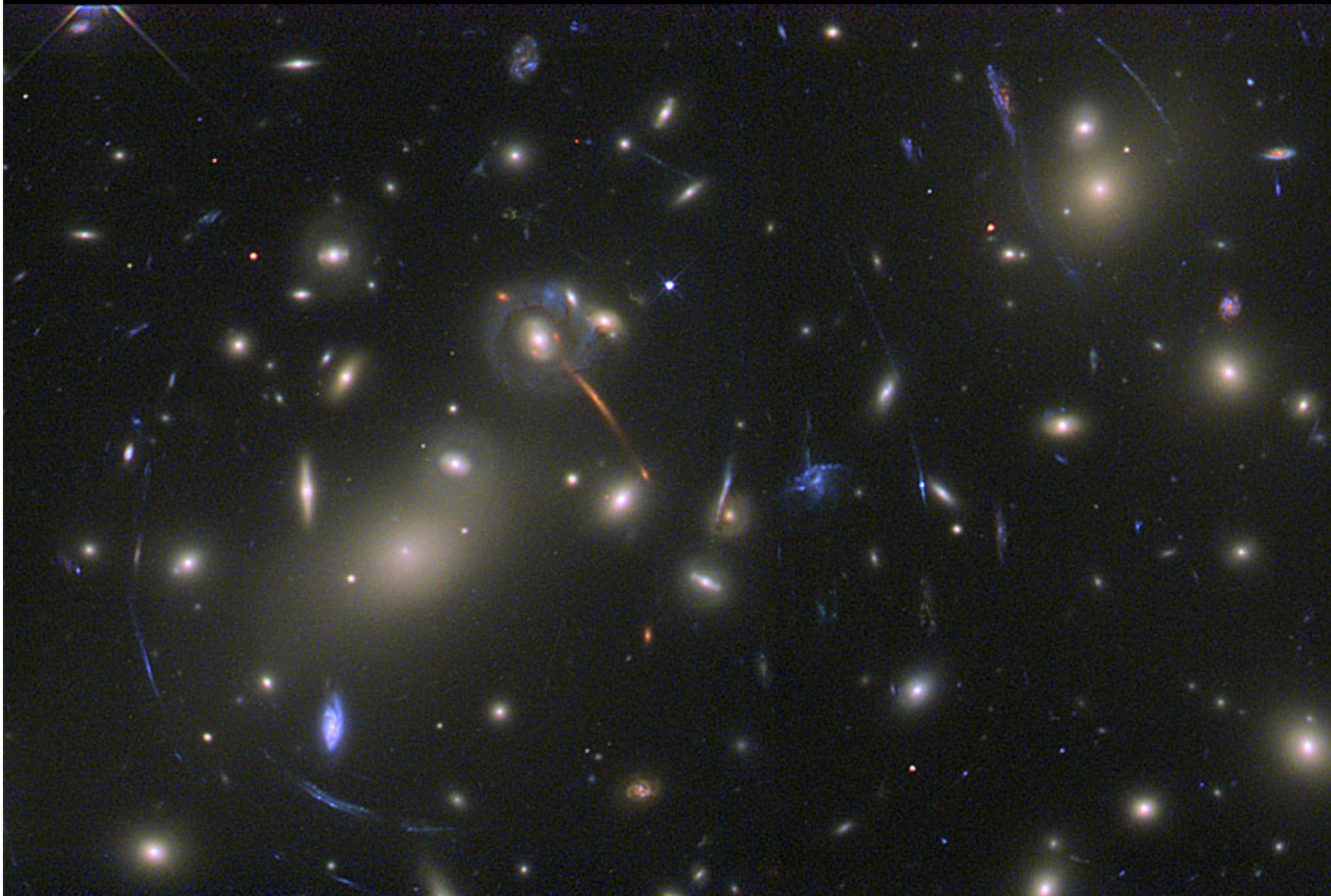
Masse des galaxies

Amas de galaxies et lentilles gravitationnelles



Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

Abell 2218 / HST



Lentille gravitationnelle

Interprétation

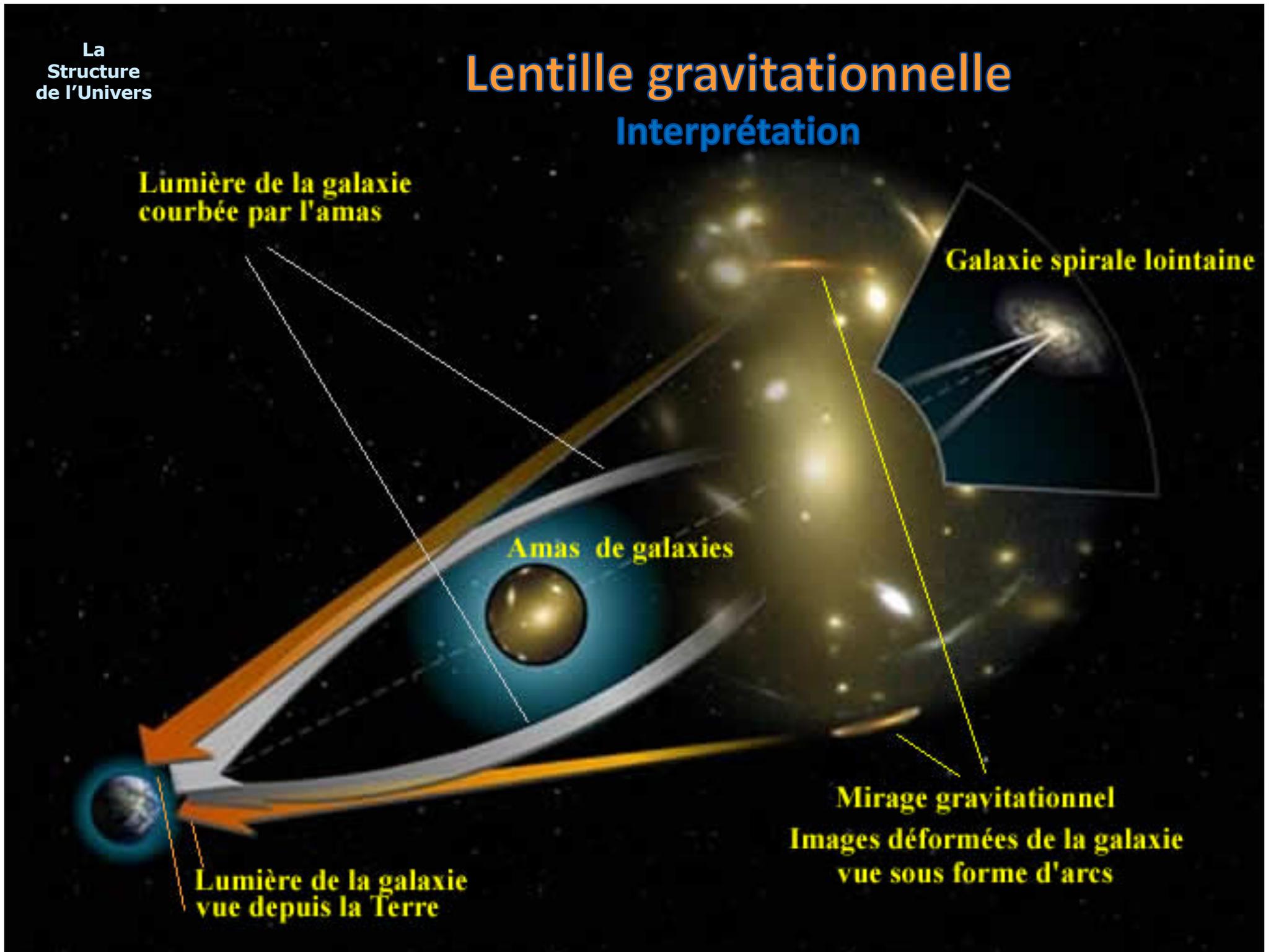
Lumière de la galaxie
courbée par l'amas

Galaxie spirale lointaine

Amas de galaxies

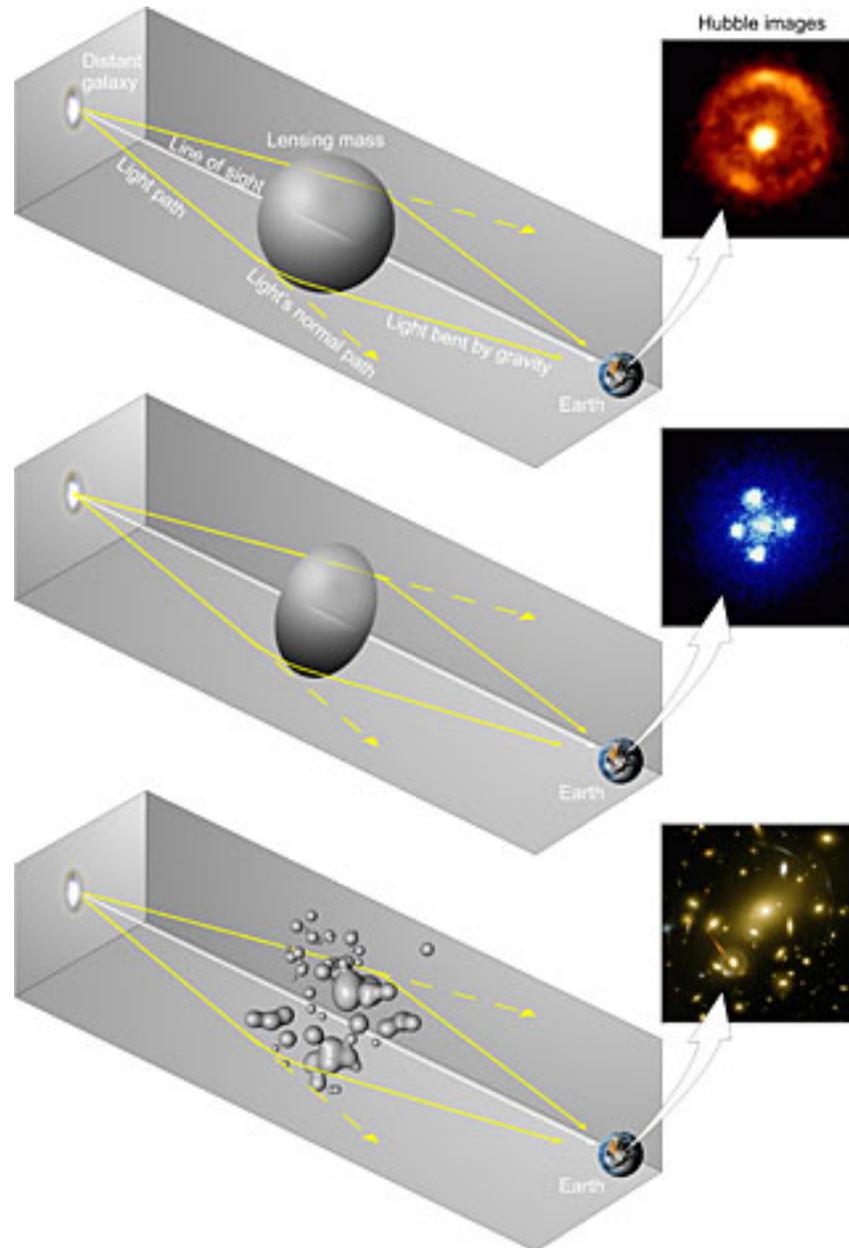
Mirage gravitationnel
Images déformées de la galaxie
vue sous forme d'arcs

Lumière de la galaxie
vue depuis la Terre



Lentille gravitationnelle

Pourquoi des arcs ?



Lentille gravitationnelle

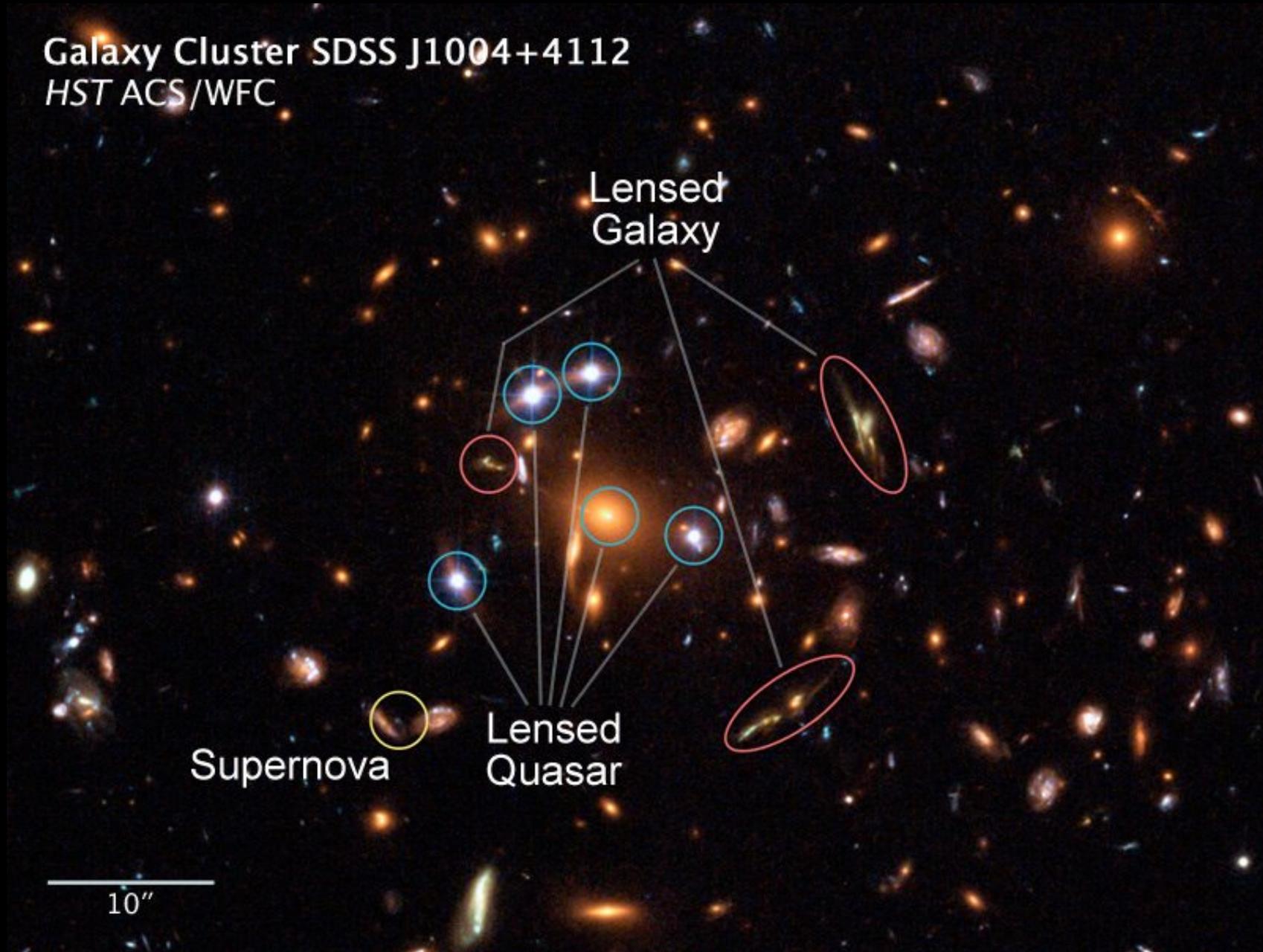
Quasar derrière amas SDSS J1004+4112



Lentille gravitationnelle

Quasar derrière amas SDSS J1004+4112

Galaxy Cluster SDSS J1004+4112
HST ACS/WFC



Lentille gravitationnelle

Quasar derrière amas SDSS J1004+4112

J1004+4112 : 5 lentilles gravitationnelles

Quasar
distant

La lumière émise par
le quasar s'incurve autour
de l'amas de galaxies
produisant des effets de
lentilles gravitationnelles

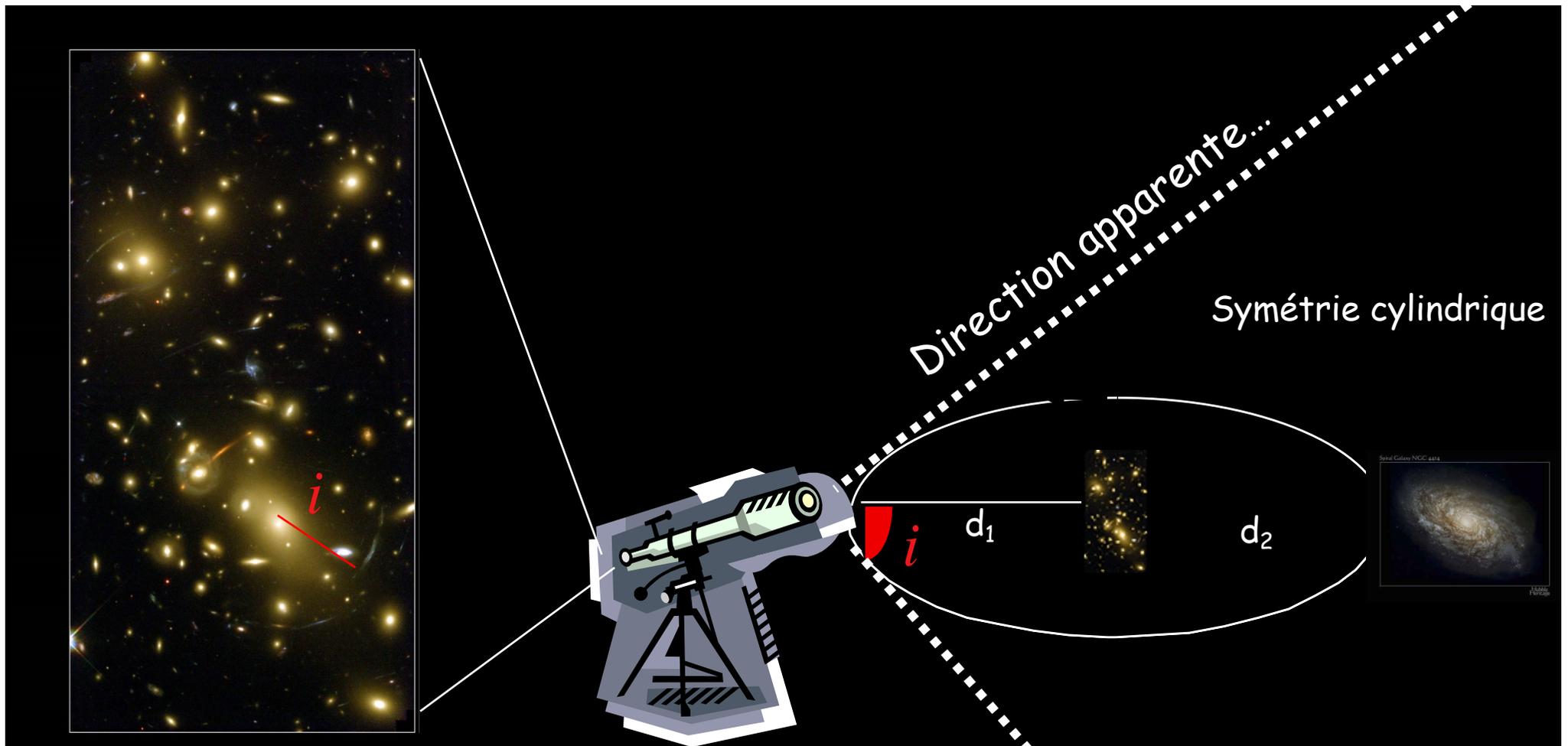


*Les arcs rouges représentent les images déformées des galaxies situées à l'arrière-plan

Masse des galaxies

Amas de galaxies et lentilles gravitationnelles

$$i^2 = \frac{4GM_{\text{amas}}}{c^2} \frac{d_2}{d_1(d_1 + d_2)}$$



Masse des galaxies

Amas de galaxies et lentilles gravitationnelles

$$i^2 = \frac{4GM_{\text{amas}}}{c^2} \frac{d_2}{d_1(d_1 + d_2)}$$

Ici aussi, les masses de l'amas déduites de la formule relativiste et de la comptabilisation de la matière visible sont en désaccord, et semblent requérir de grandes quantités de matière sombre.

Cependant, il existe depuis mars 2004 une généralisation relativiste de MOND qui rétablit l'accord !

Mystère de la matière sombre

Matière noire = +/- 84 % de la matière totale !

The empirical observations that motivate the dark matter problem are the roots of the tree; the various hypothesized solutions are its fruit.

