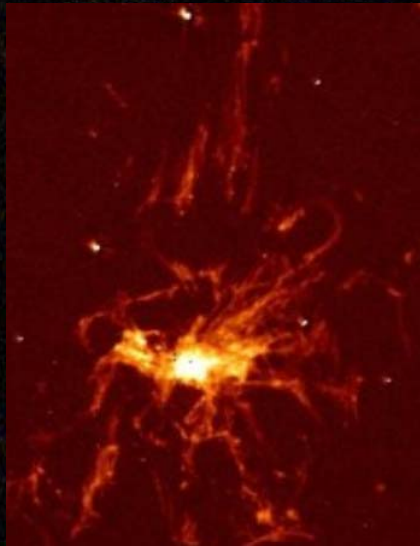




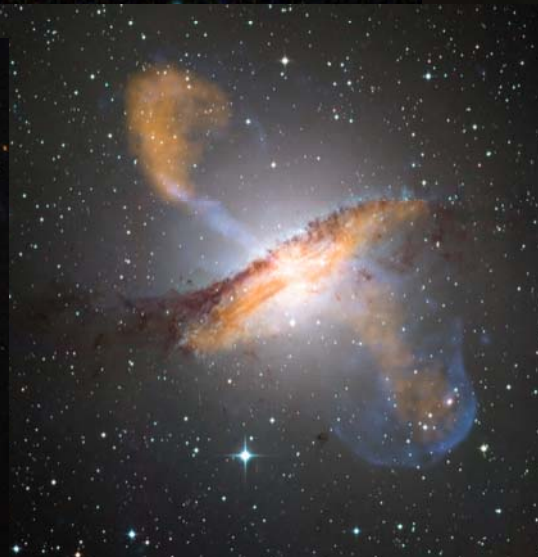
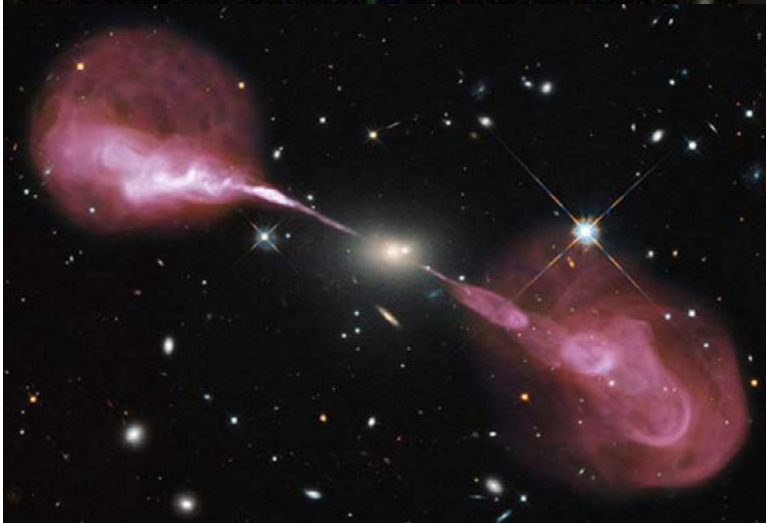
Atacama Large Millimeter/submillimeter Array



Les trous noirs super massifs trop gloutons



HST



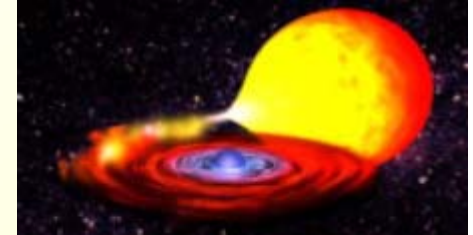
Françoise Combes
Observatoire de Paris

7 Octobre 2015

● Deux sortes de trous noirs

1. Trous noirs de masse stellaire, étoile massive en fin de vie

$$V_{\text{ech}}^2 = 2 GM/r$$



2. Trous noirs super-massifs: noyaux de galaxie

Rayon du trou noir $R_s = 2GM/c^2$ = horizon des événements

$R_s = 2.5 (M/10^9 M_\odot)$ heures-lumière

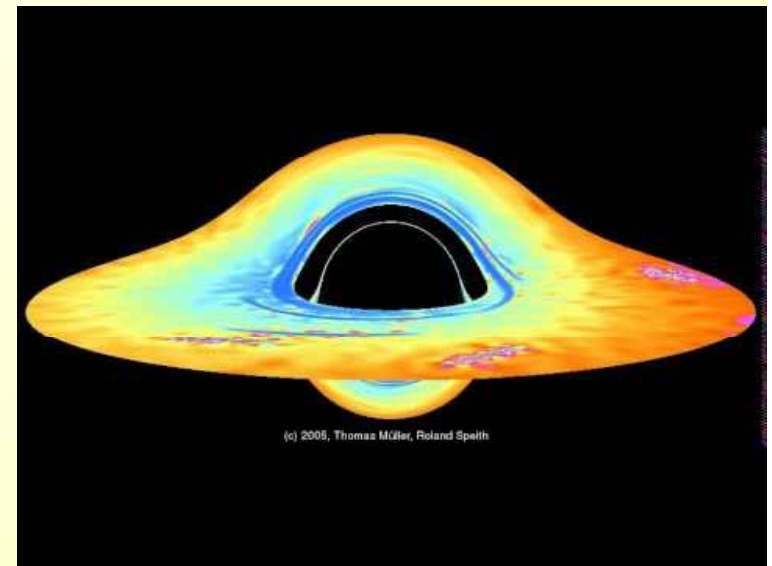
Pour un TN de $1 M_\odot$, $R_s = 3\text{km}$

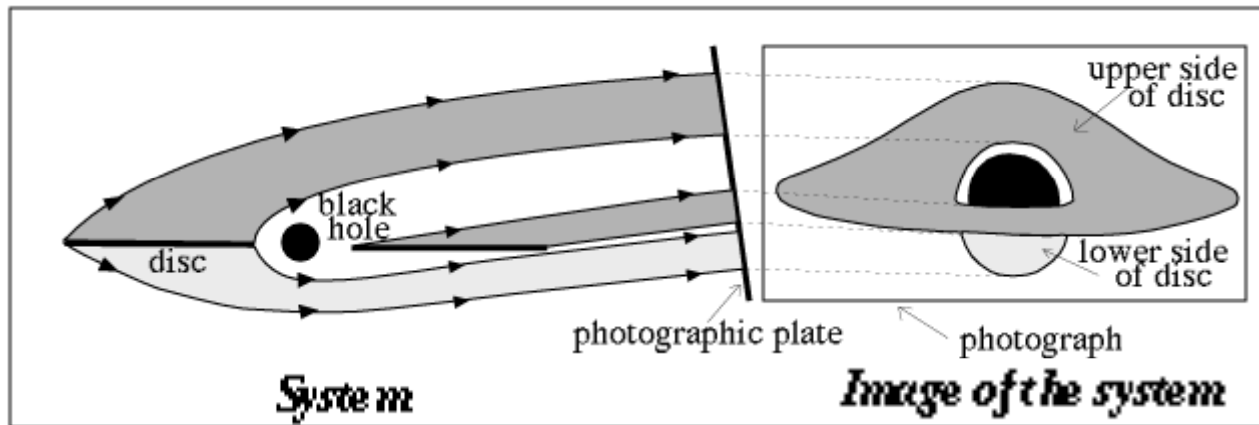
Un trou noir n'a pas de cheveux!

Masse et spin seulement

Maximum spin mesuré dans N1365

$J \sim GM^2/c$, La vitesse atteint c à l'horizon

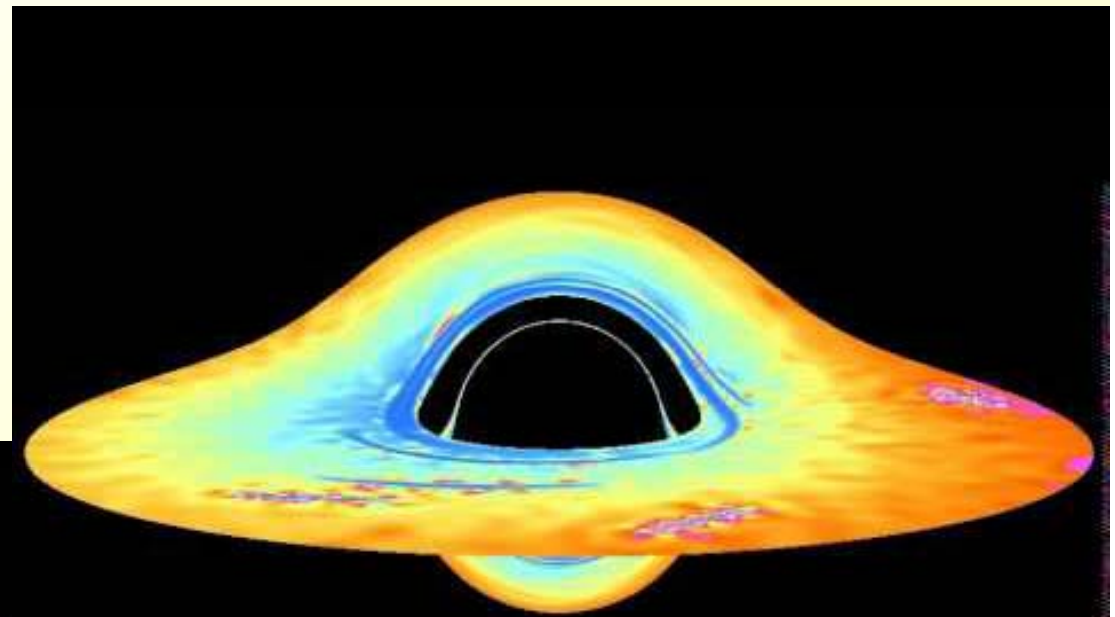




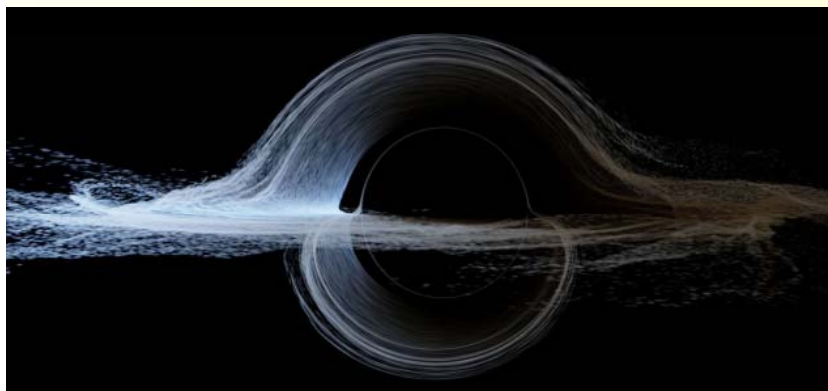
Le trou noir est entouré d'un disque brillant
On l'observe à 10°

Le disque est complètement déformé, par rapport à un astre classique

On voit aussi le dessous!

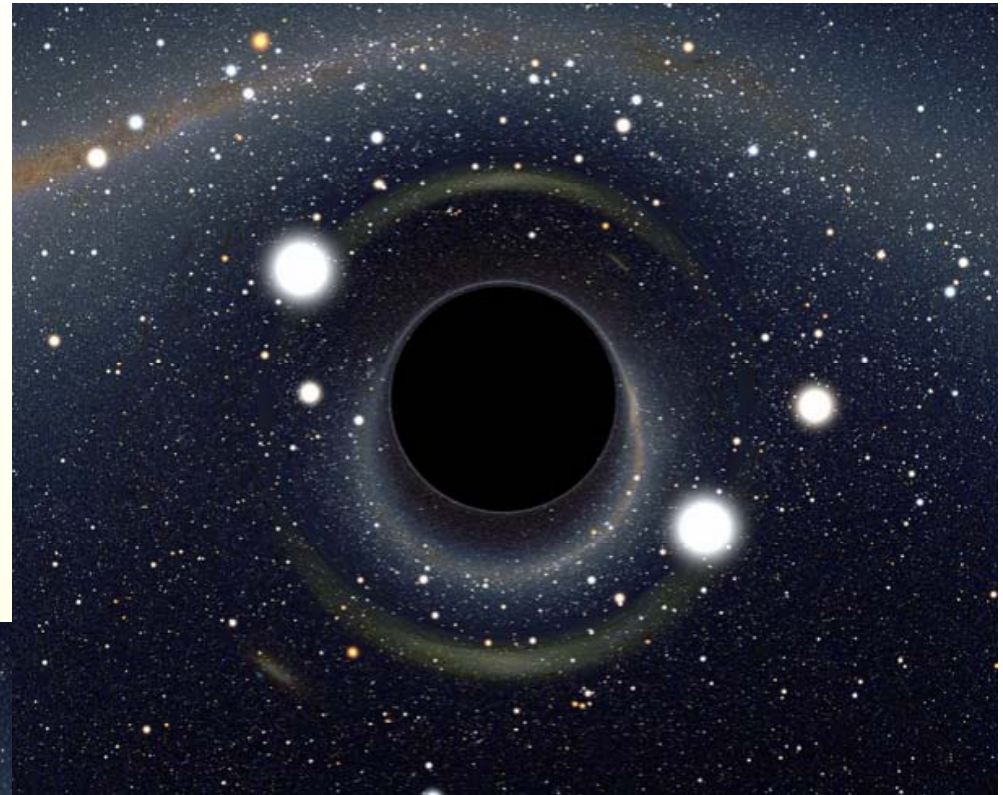


(c) 2005, Thomas Müller, Roland Speth



**Un trou noir dévie les rayons
lumineux
→ Déformation des images**

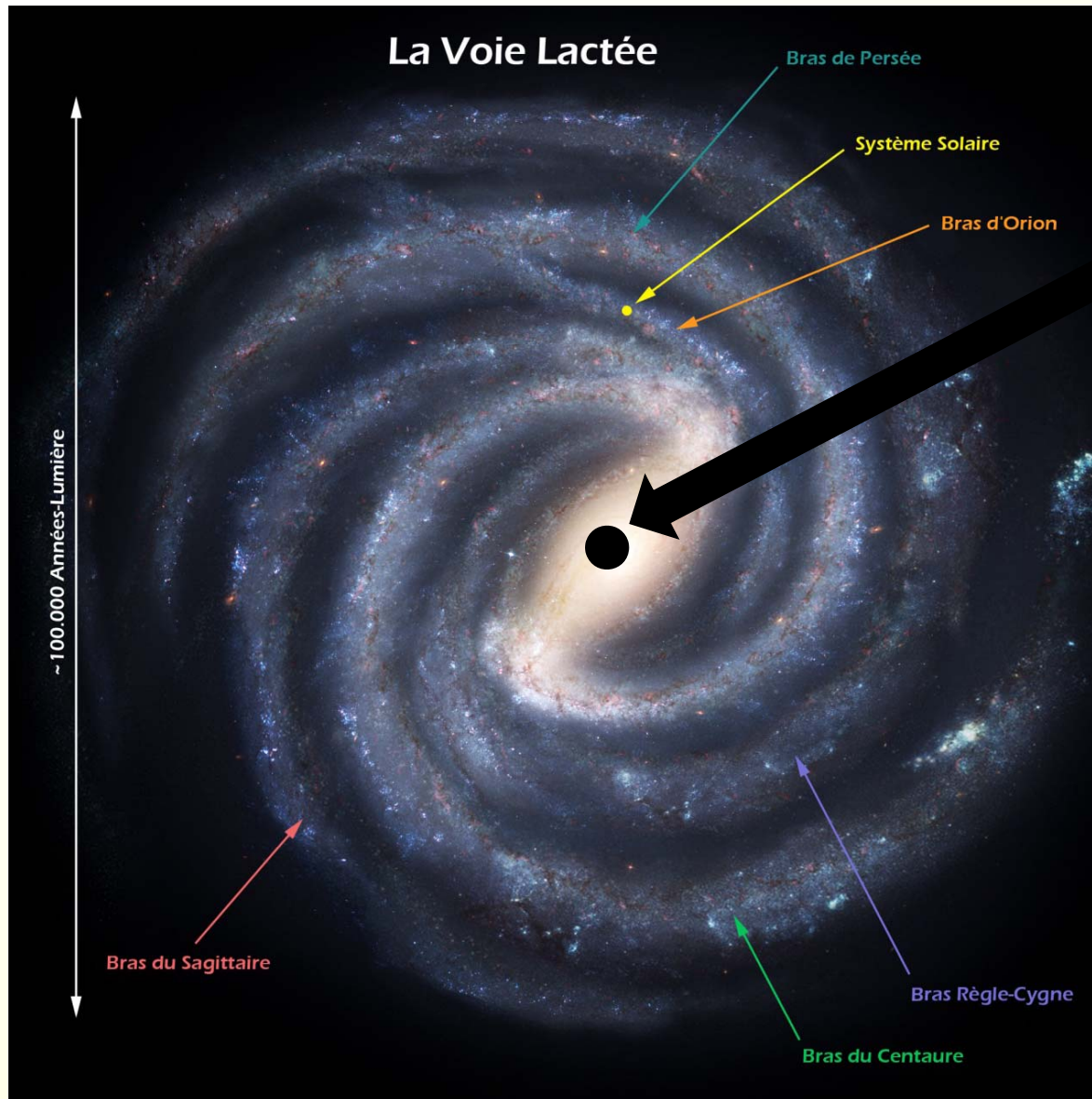
Nuages de Magellan et
Voie Lactée



Trou noir entre nous et
les Nuages de Magellan

Alain Riazuelo

Notre galaxie: la Voie Lactée



Trou Noir



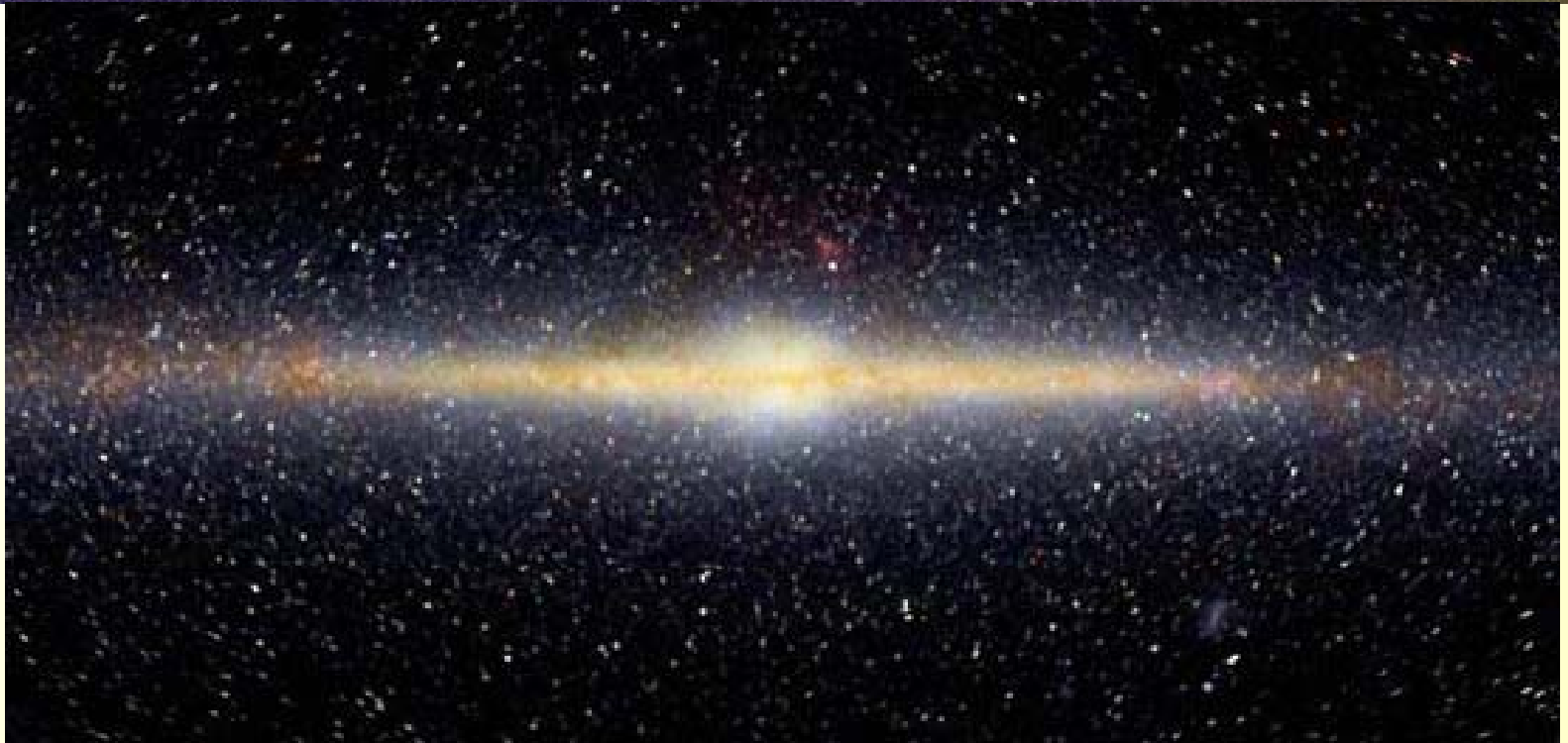
Images en optique, infra-rouge



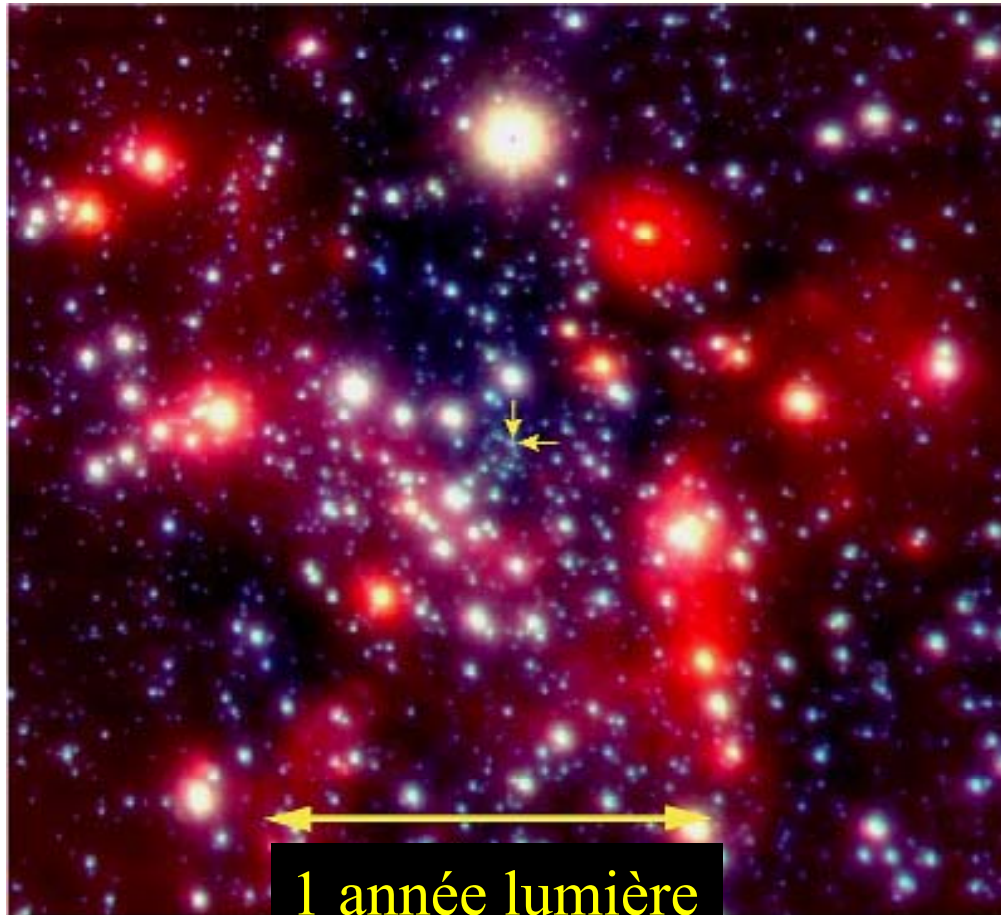
Barre

Bulbe en
cacahuète

2MASS



Astrométrie et mouvements propres au centre galactique

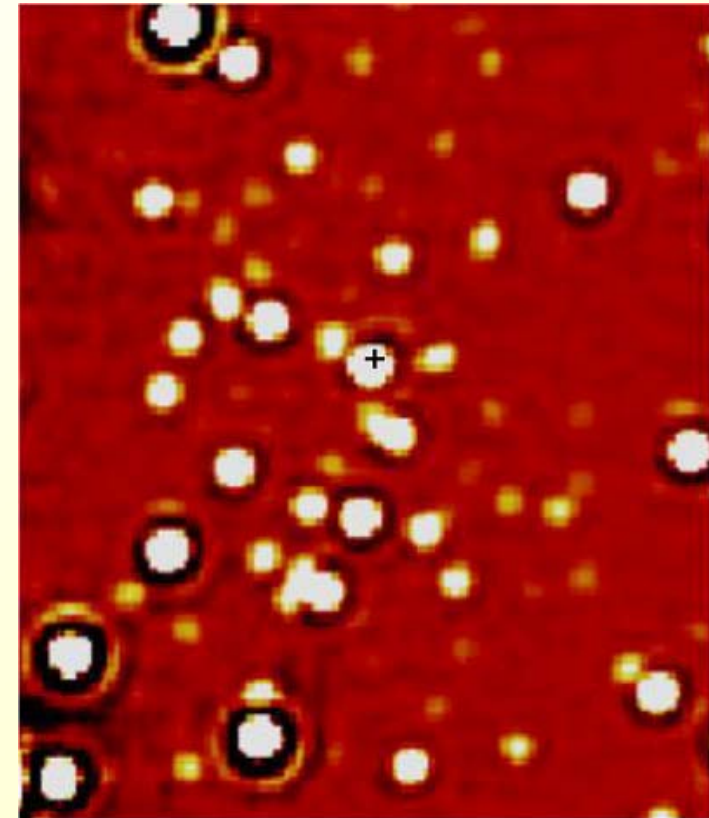


1 année lumière

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)

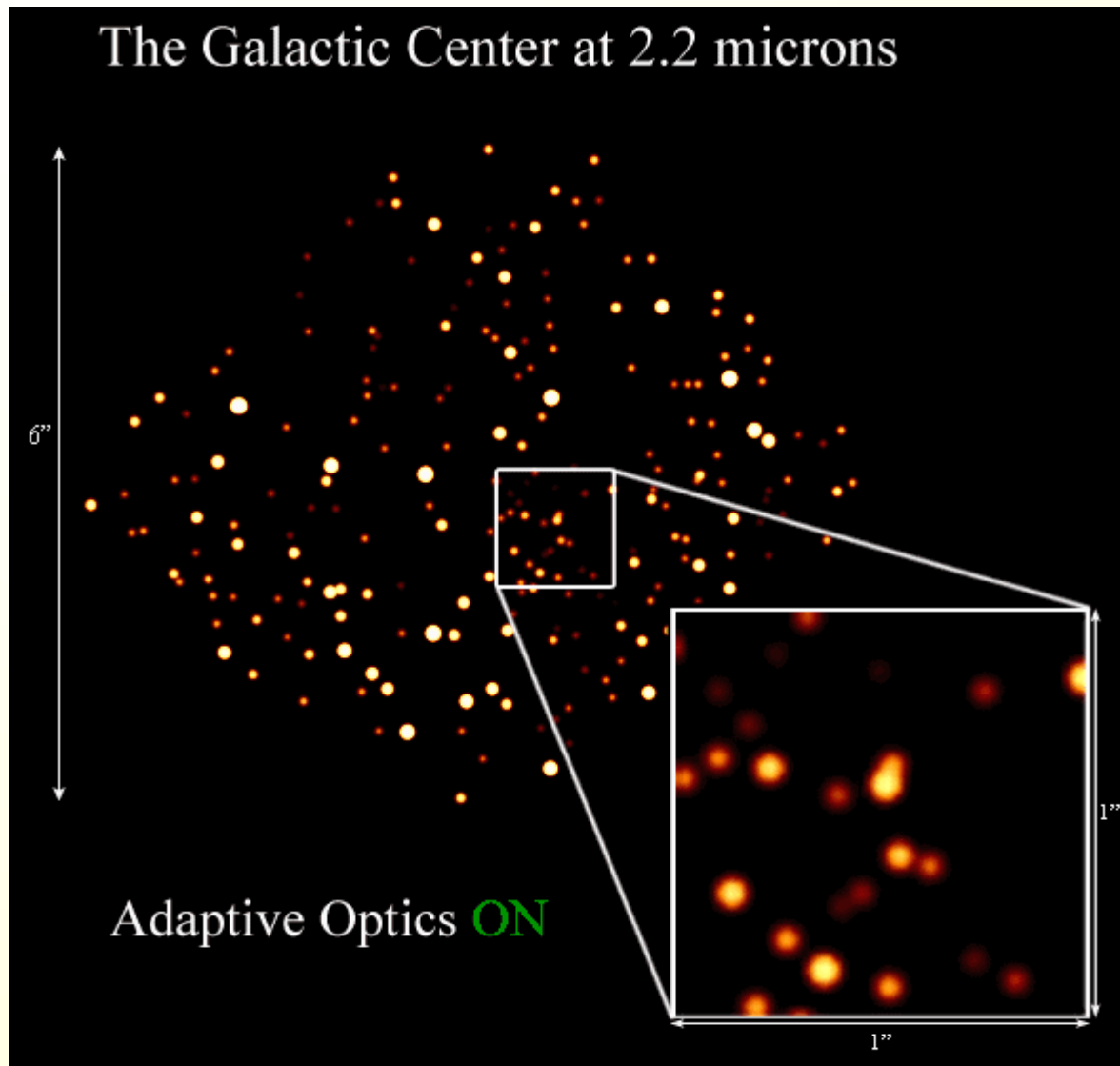
ESO PR Photo 23b/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



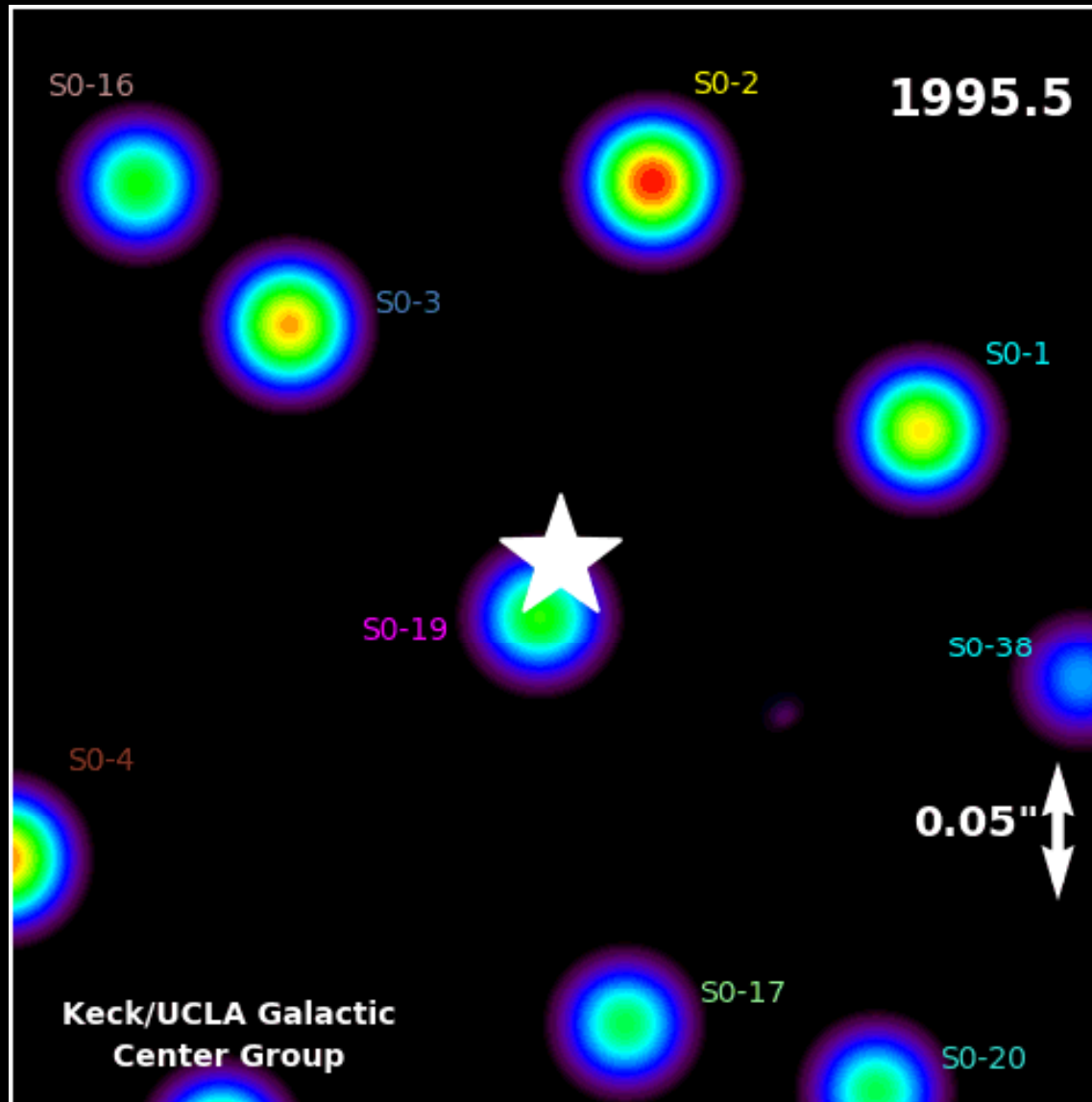
VLT-optique adaptative

Les effets de l'optique adaptative

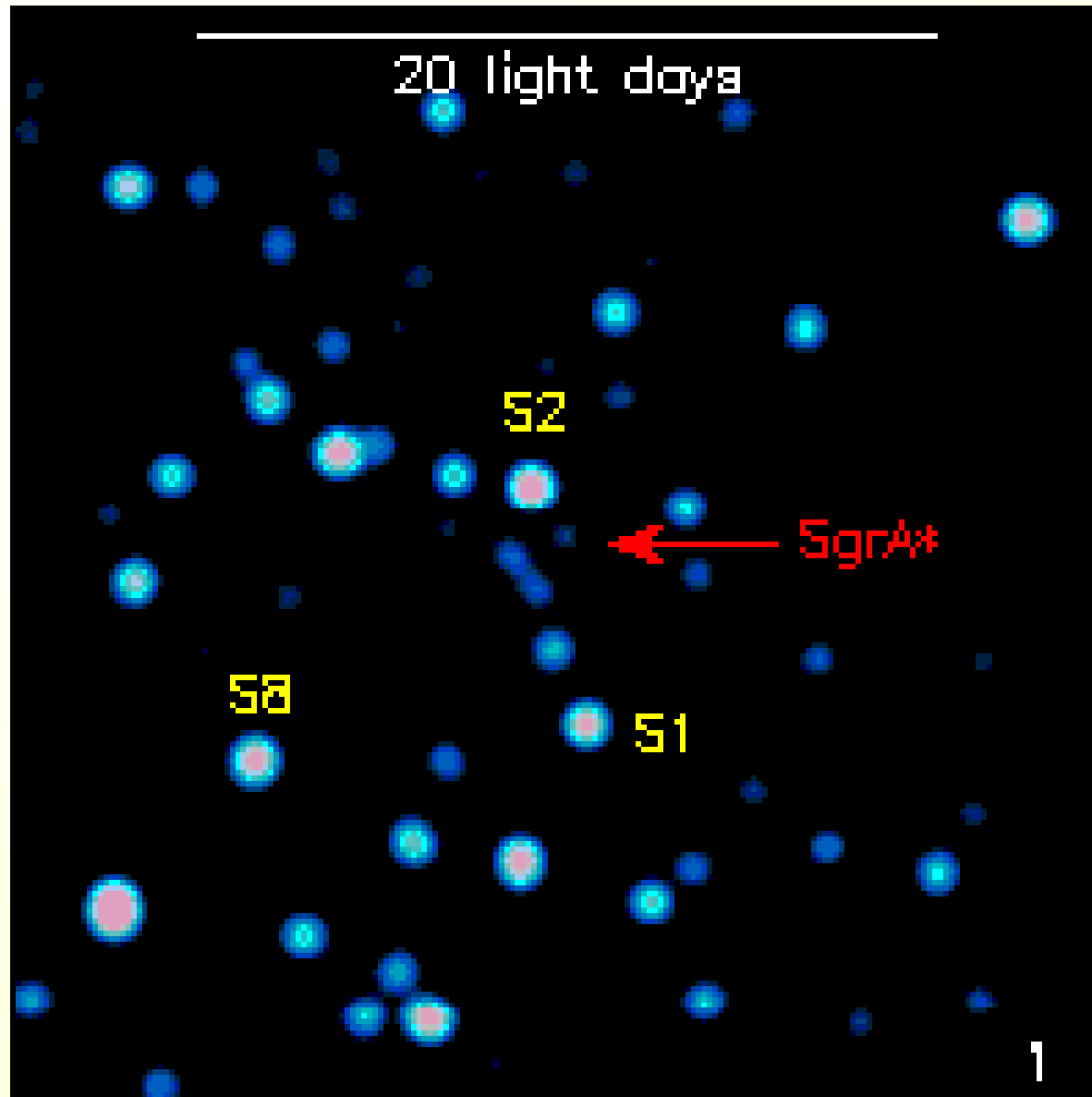


Corrige des
turbulences de
l'atmosphère

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



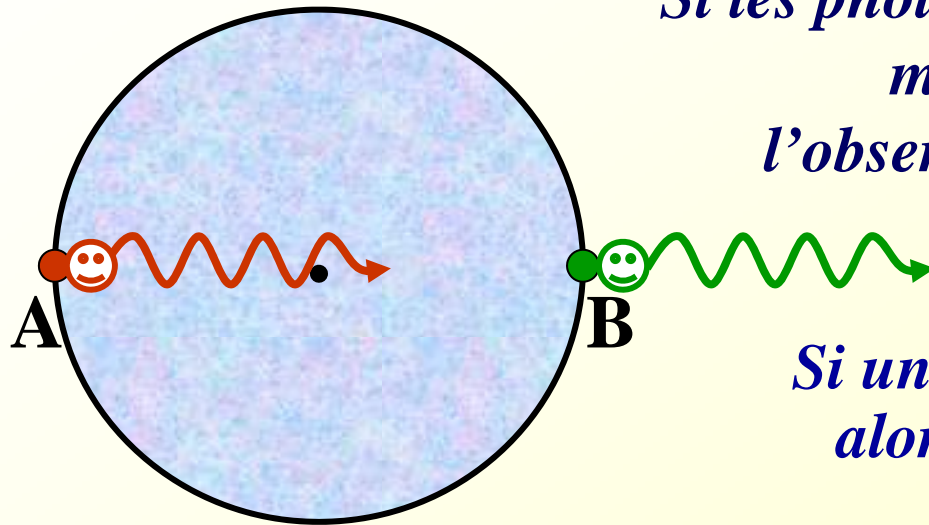
Sursaut Infrarouge du trou noir de la Galaxie



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

Variabilité et taille

Variabilité et temps de parcours



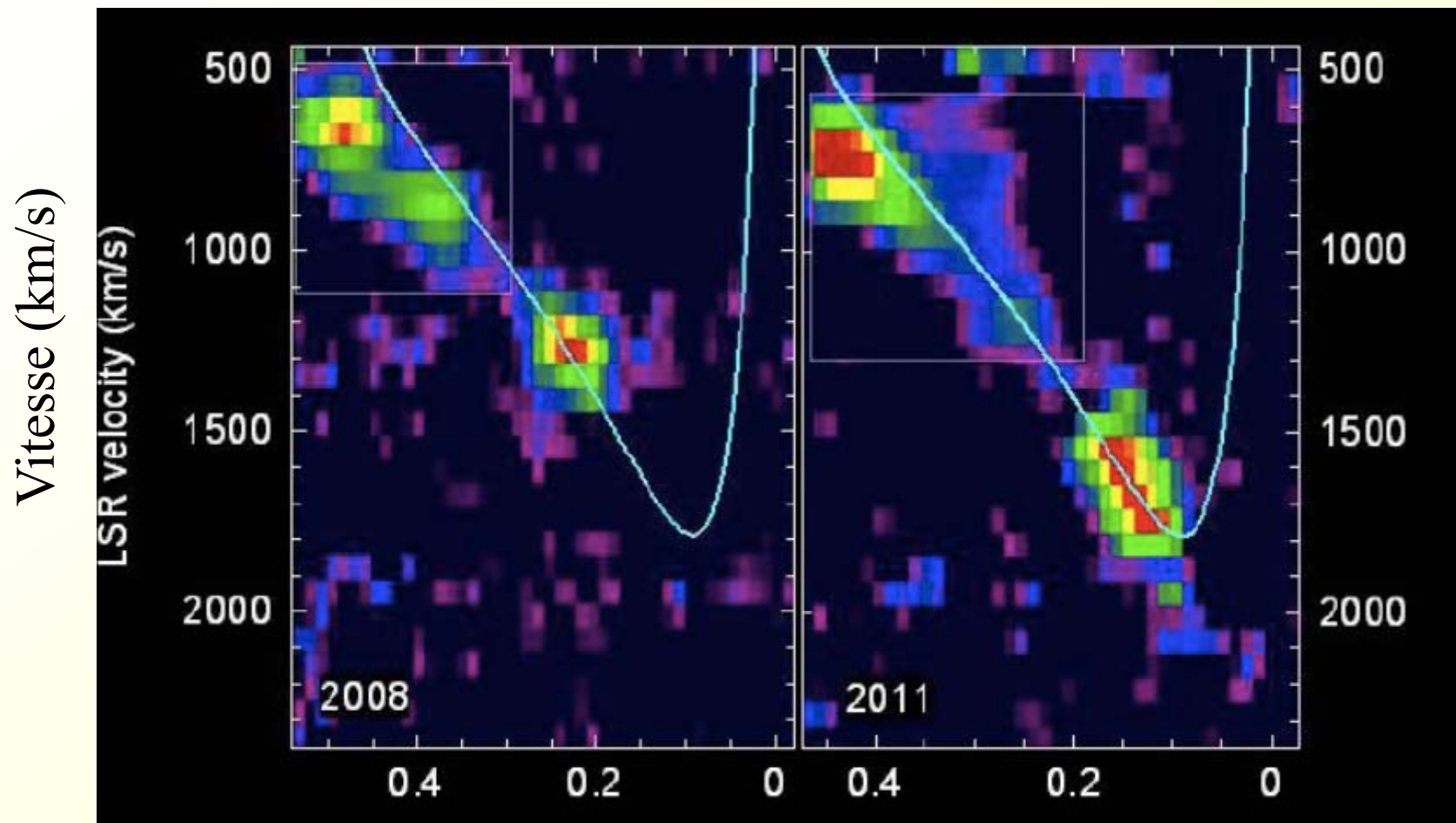
$c = \text{vitesse de la lumière}$
 $d = \text{diamètre}$

Si les photons partent de A et B au même moment, A arrive à l'observateur $t (= d / c)$ later.

Si un burst en A dure un temps δt , alors on voit un changement sur une échelle $t + \delta t$.

Ce qui donne une limite supérieure pour le diamètre, d , car le δt mesuré doit être supérieur au temps de trajet de la lumière.

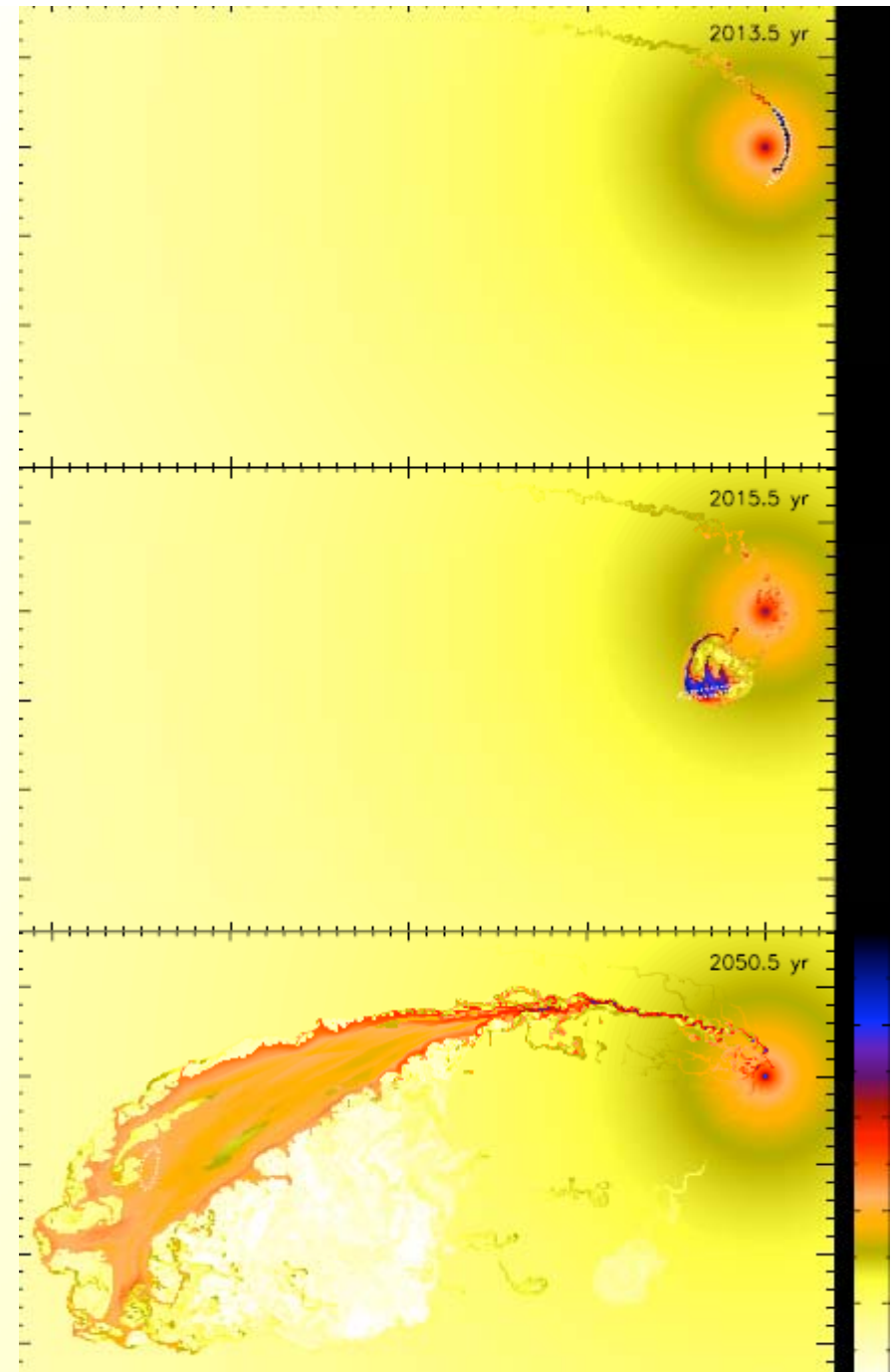
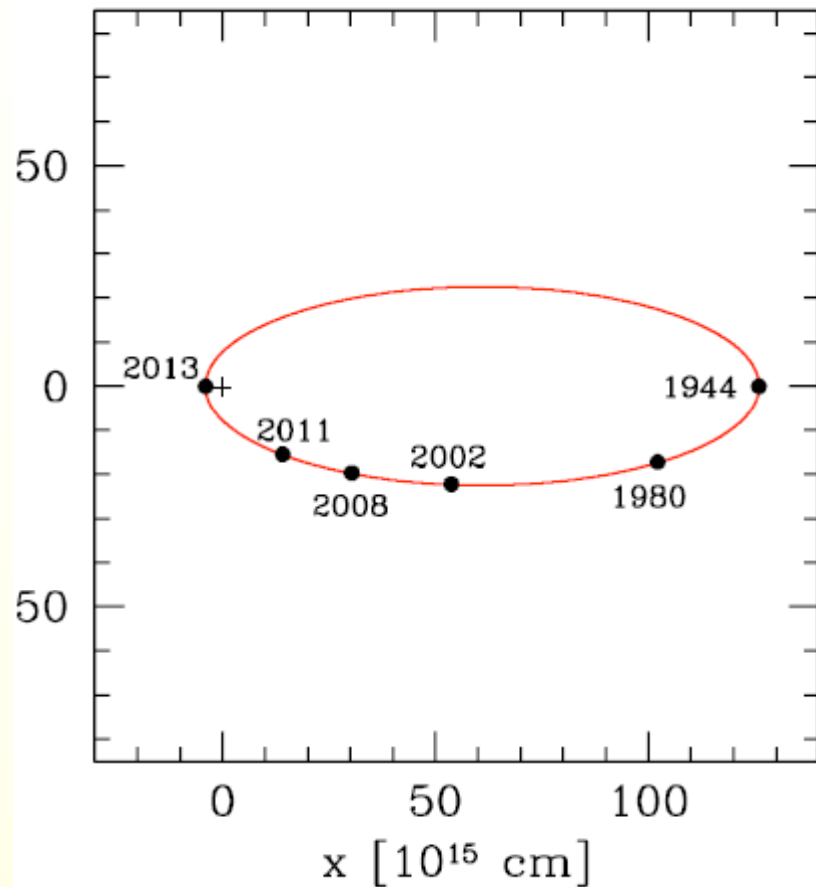
Découverte d'un nuage de gaz en 2011



Distance au trou noir en arcsec (=0.1 al)

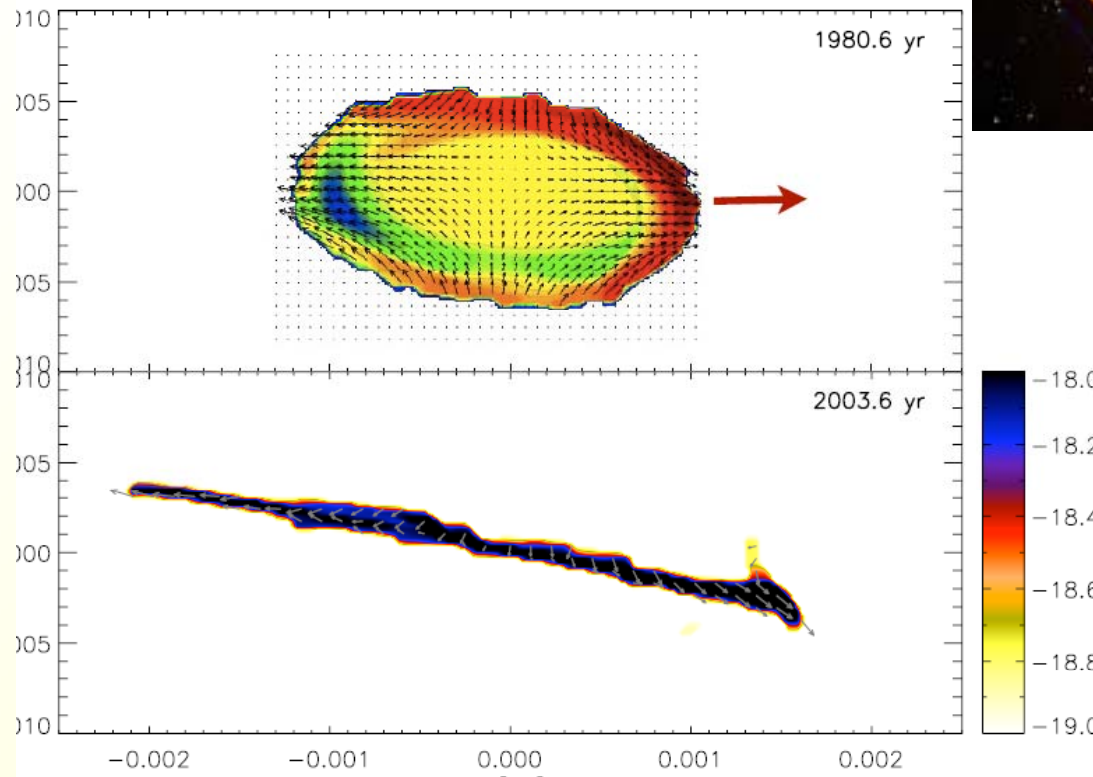
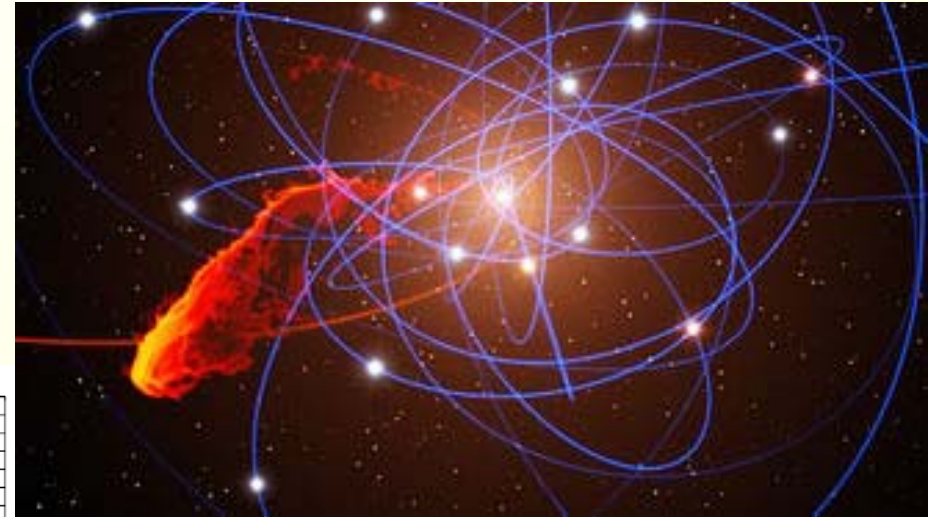
Orbite du nuage de gaz ($10^{-5} M_{\odot}$)

137 ans de période



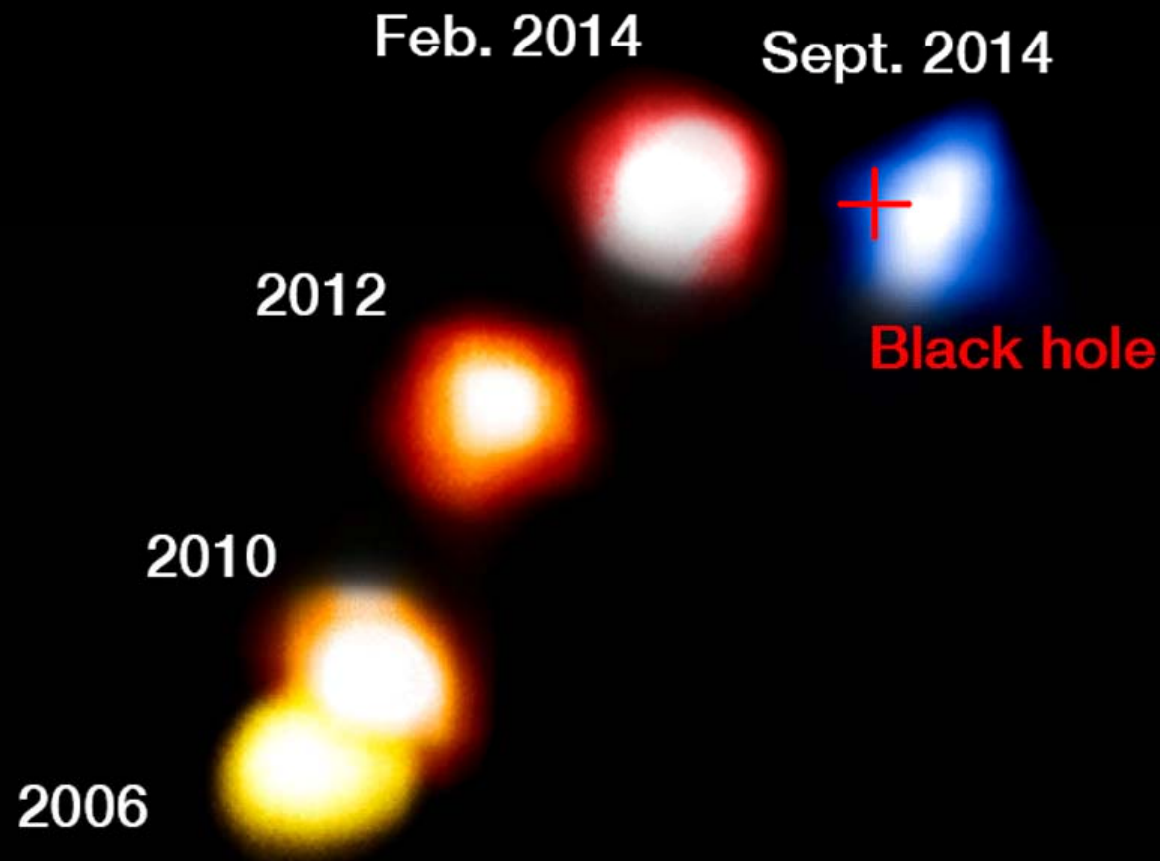
Comment le gaz est arrivé?

Destruction d'une étoile
par les forces de marée?



Simulations de
l'étirement du nuages
sur son orbite

Les dernières images (26 Mars 2015)



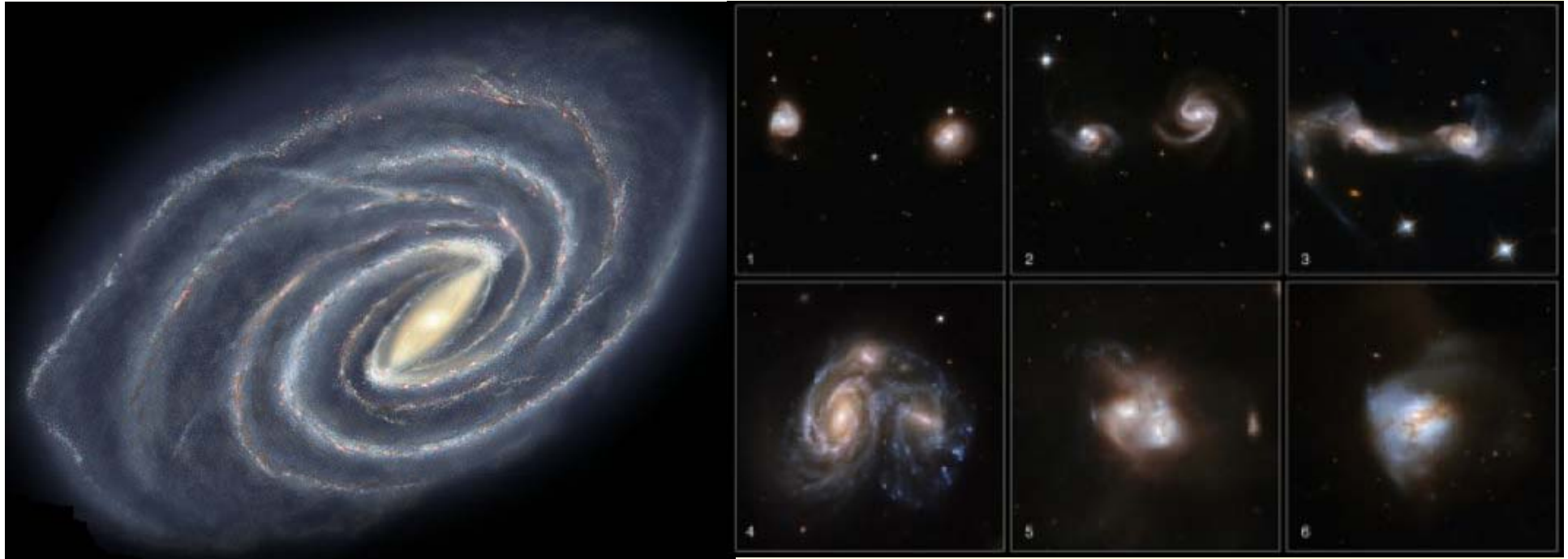
Le nuage a survécu le péricentre en Mai 2014
→ Il existe une étoile au centre

Interaction et fusion avec Andromède

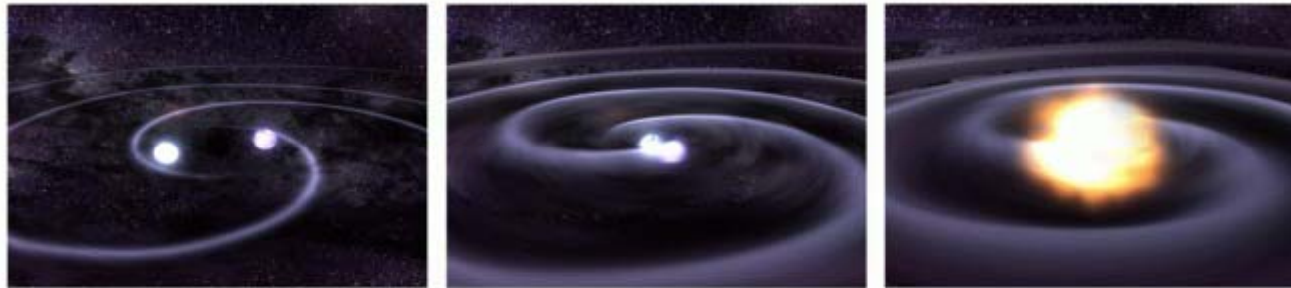


Perspectives pour la Voie lactée...

Dans quelques 3 Ma



Fusion des trous noirs

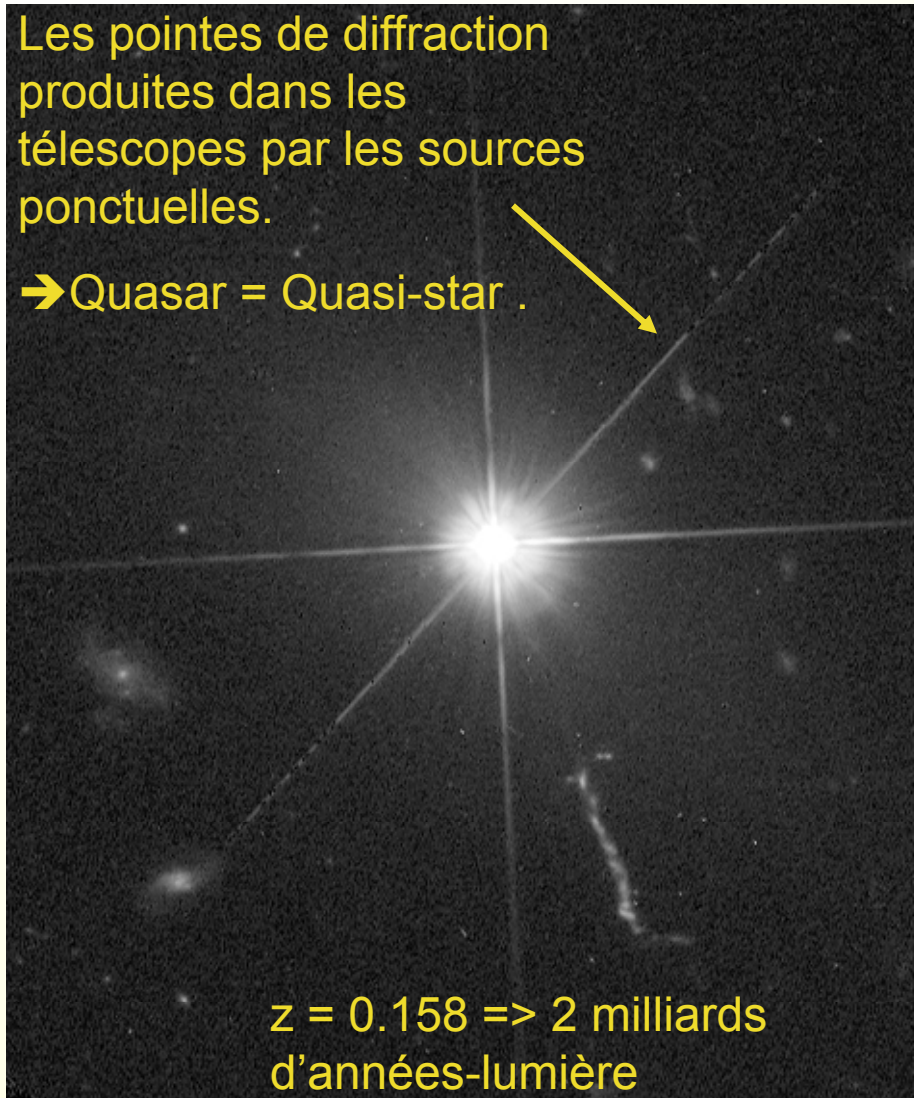


→ Ondes gravitationnelles

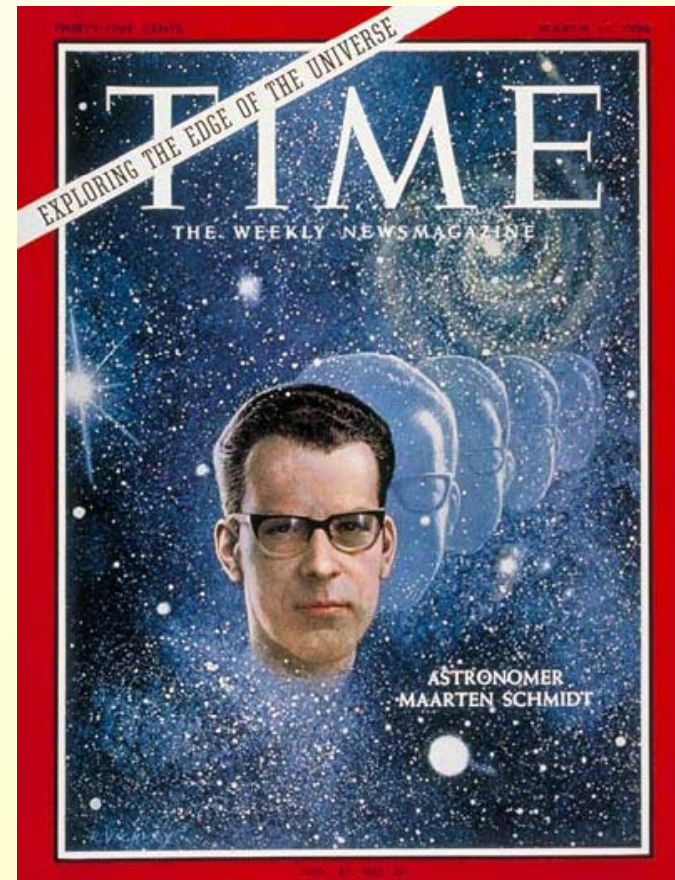
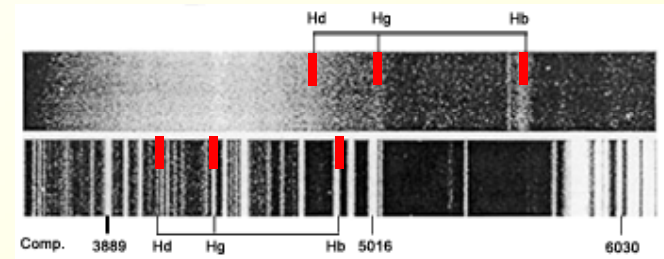
Découverte par Maarten Schmidt du premier quasar 3C273 en 1963

Les pointes de diffraction produites dans les télescopes par les sources ponctuelles.

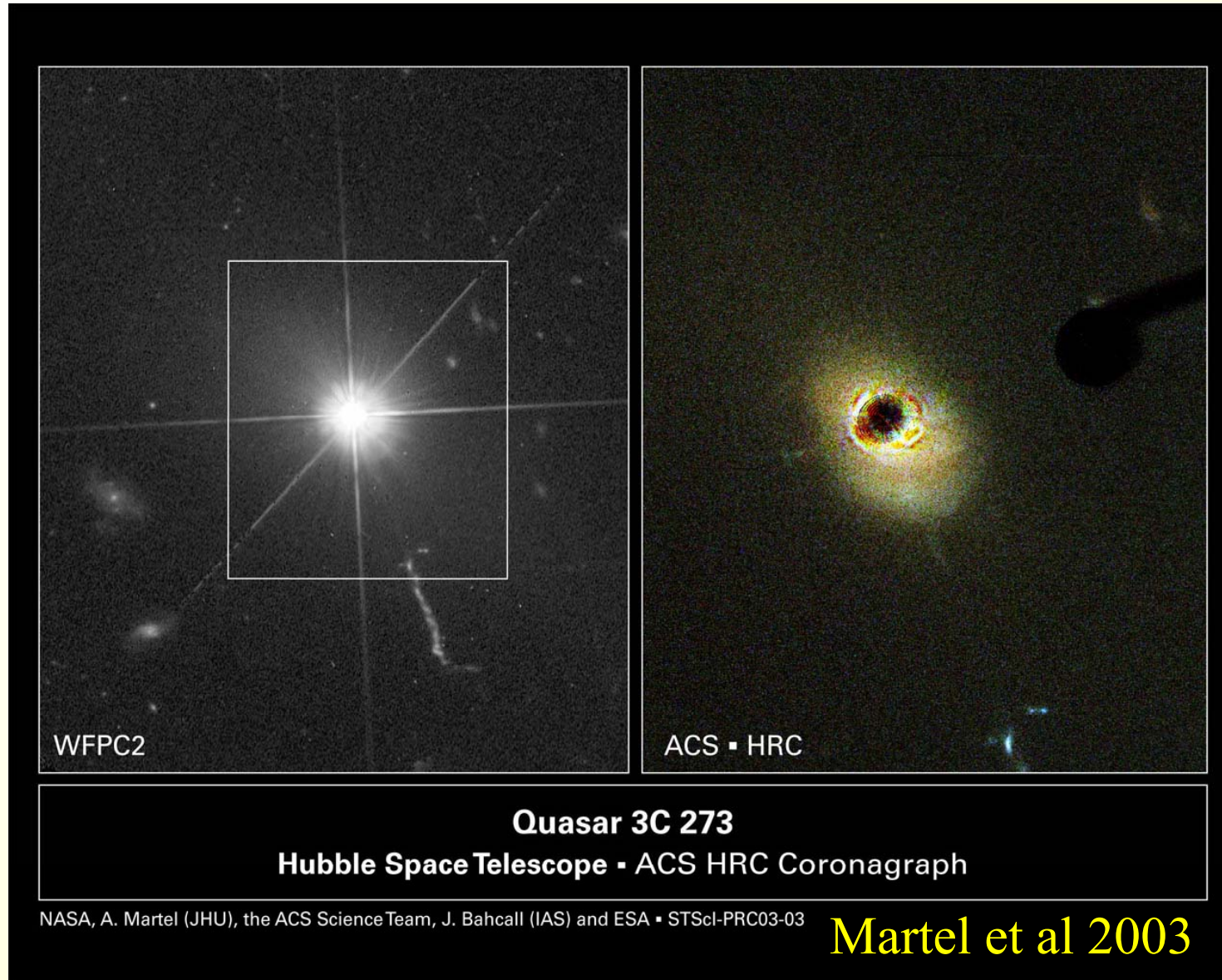
→ Quasar = Quasi-star .



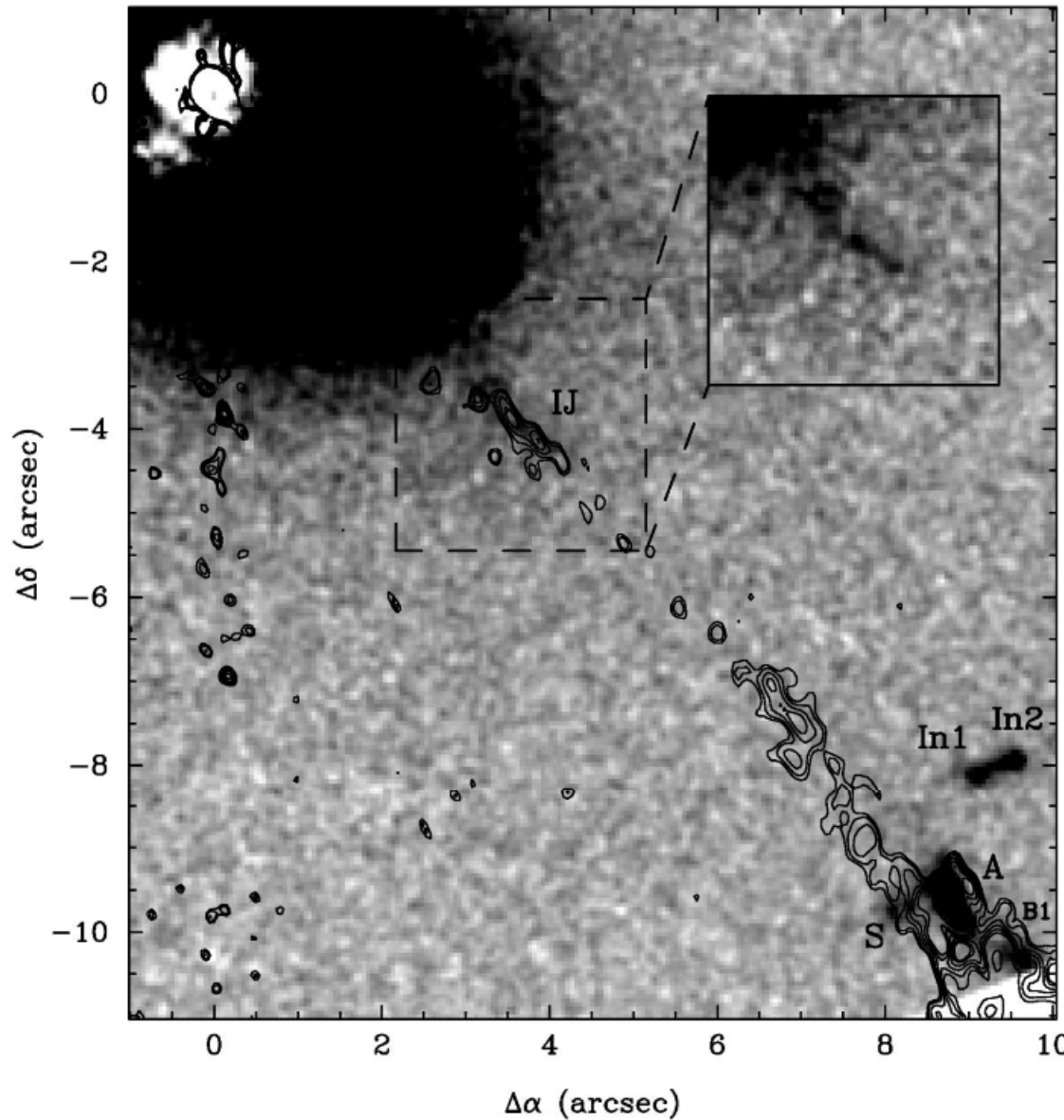
$z = 0.158 \Rightarrow$ 2 milliards d'années-lumière



Avec HST (haute résolution), possible de soustraire le quasar pour voir la galaxie sous-jacente

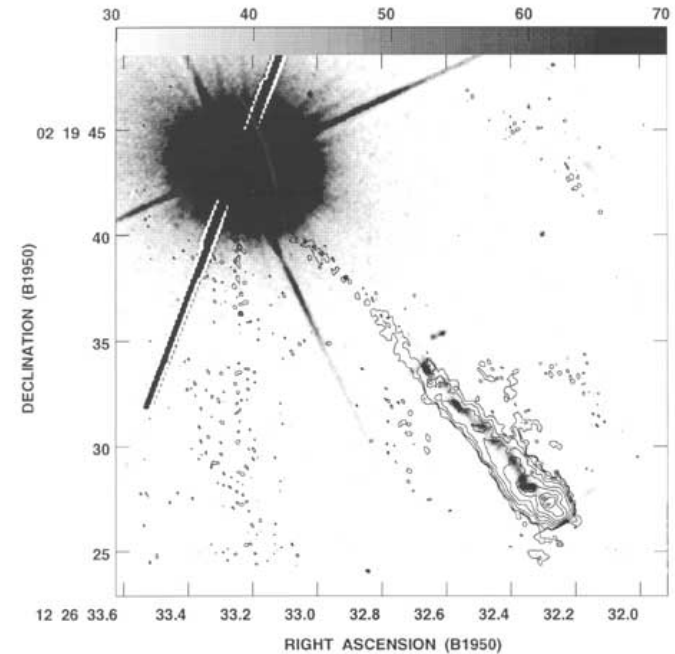


Superposition image Radio

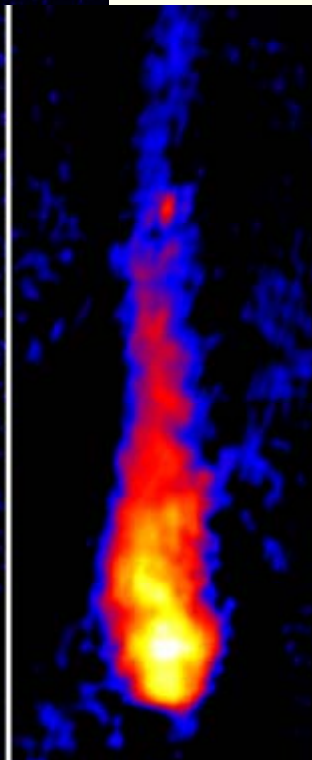
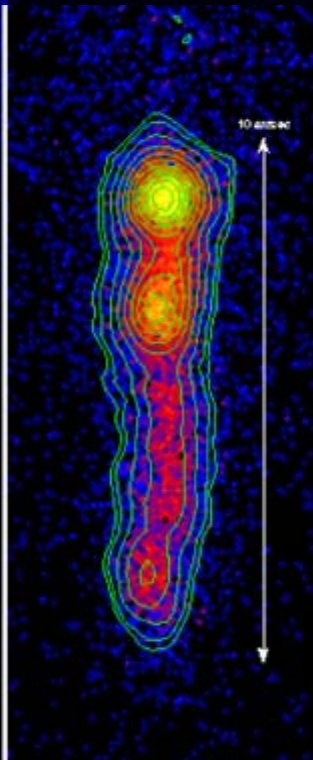
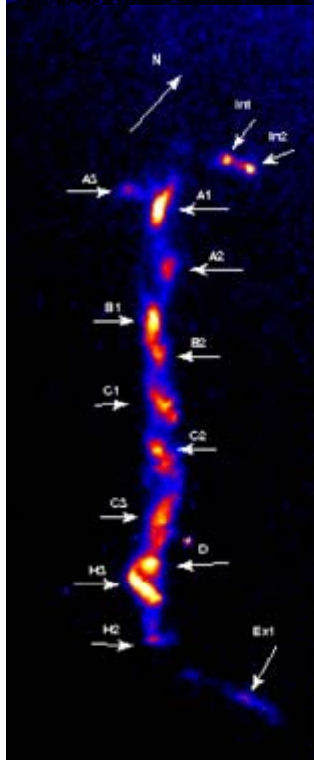
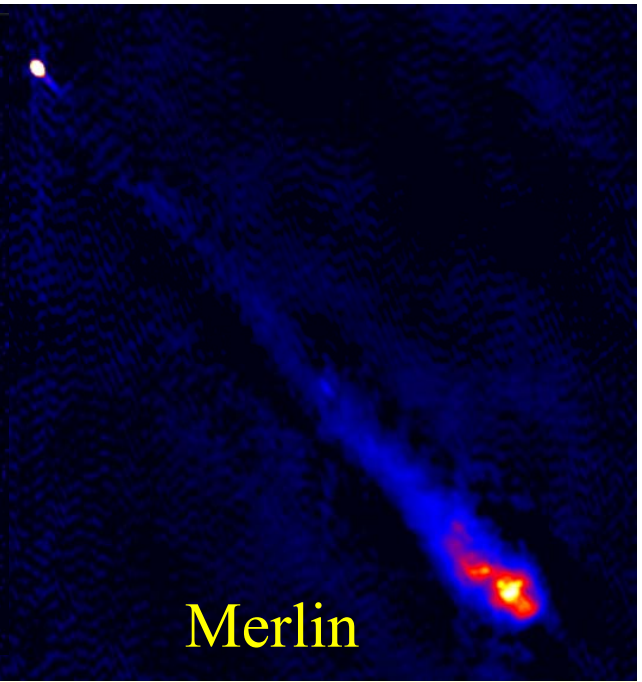
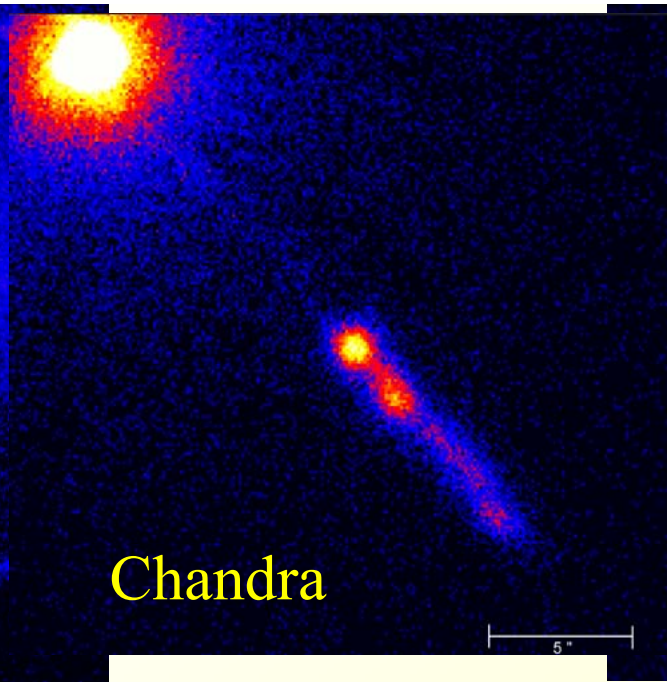
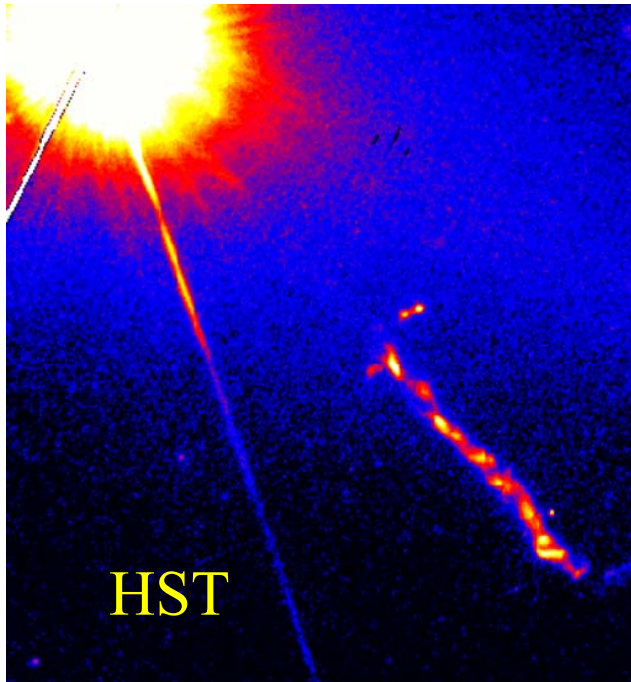


Jet radio: contours
// jet optique (HST)

67kpc de long

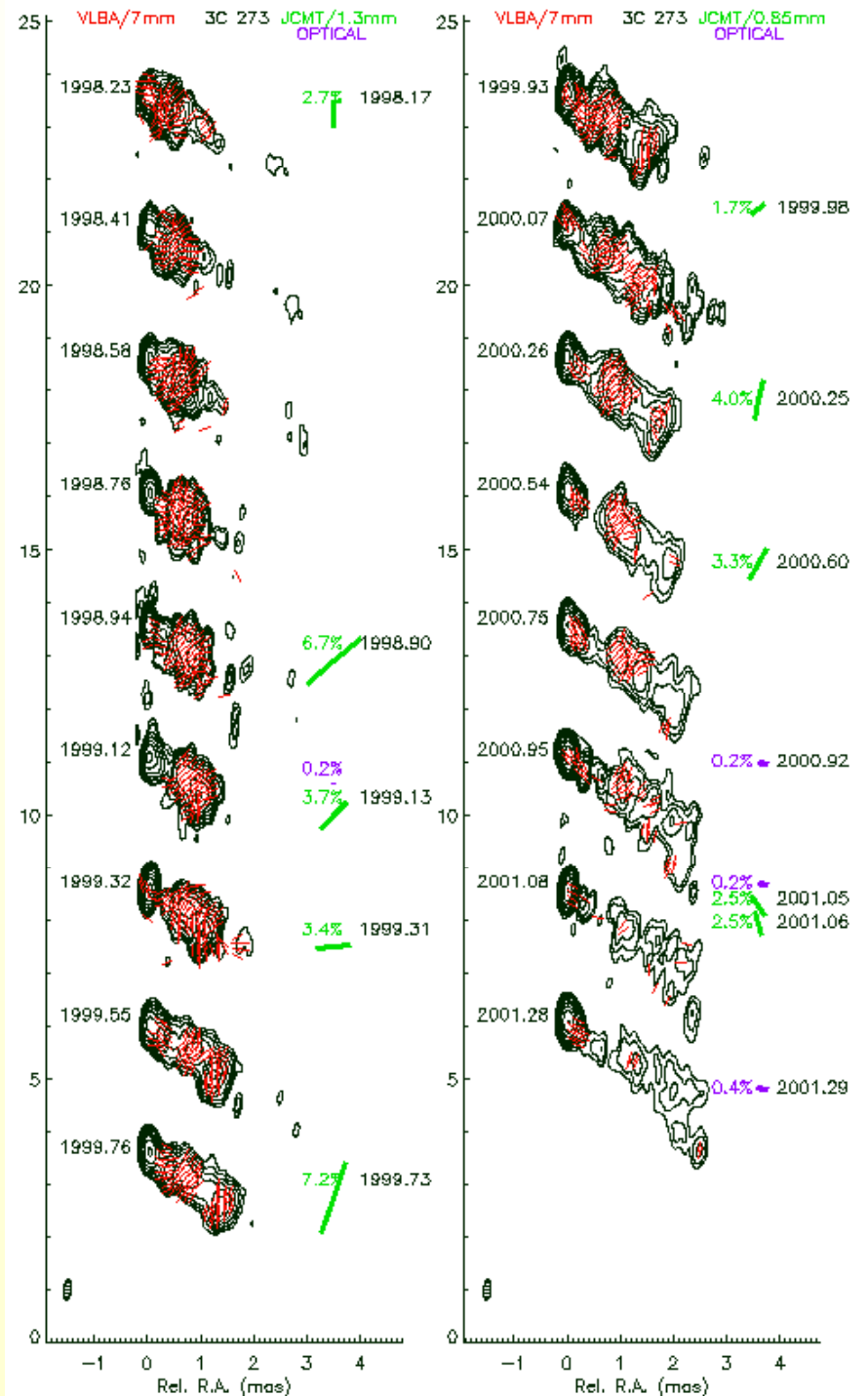
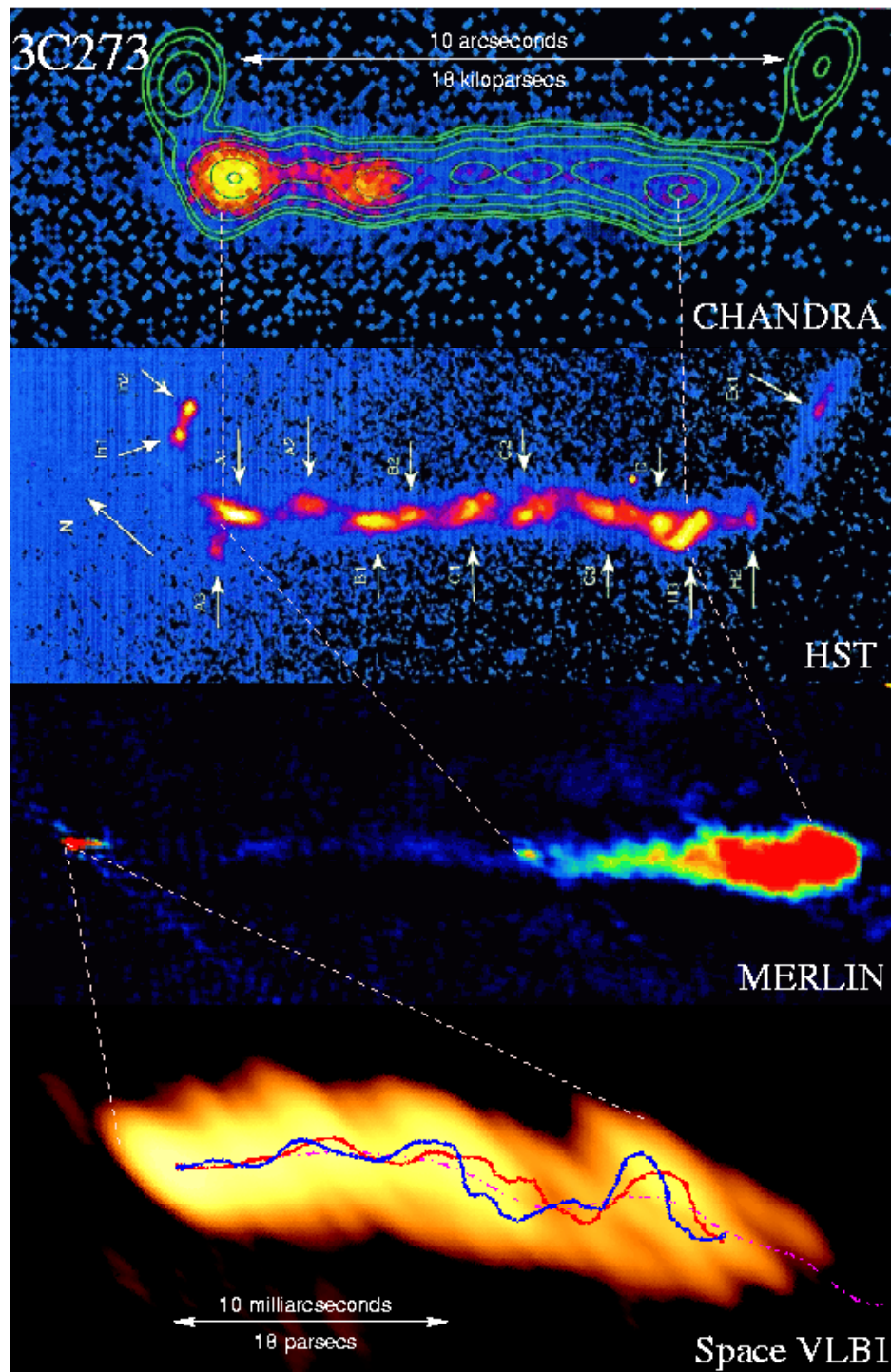


HST+Merlin



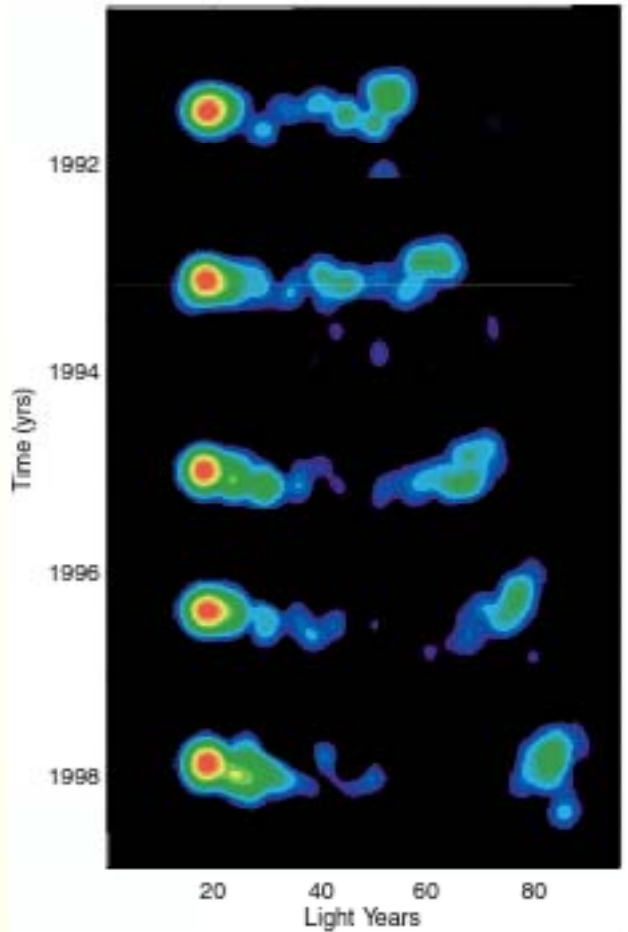
3C273, le plus proche des Quasars
Le plus brillant (*1000 fois une
Galaxie comme la notre*)

Superposition des jets en optique
(HST) en rayons X (Chandra)
Et en radio cm (Merlin)



Les jets sont super-luminiques

Jet radio dans 3C279



P a la vitesse v , par rapport O
 $y = r \sin \theta$ $t = r/v$

La lumière venant de P met moins de temps à nous atteindre que celle de O.

Temps observateur pour que l'objet aille de O à P

$$t_{app} = t - x/c$$

$$t_{app} = (r/v) - (r/c) \cos \theta$$

$$t_{app} = (r/v) (1 - \beta \cos \theta)$$

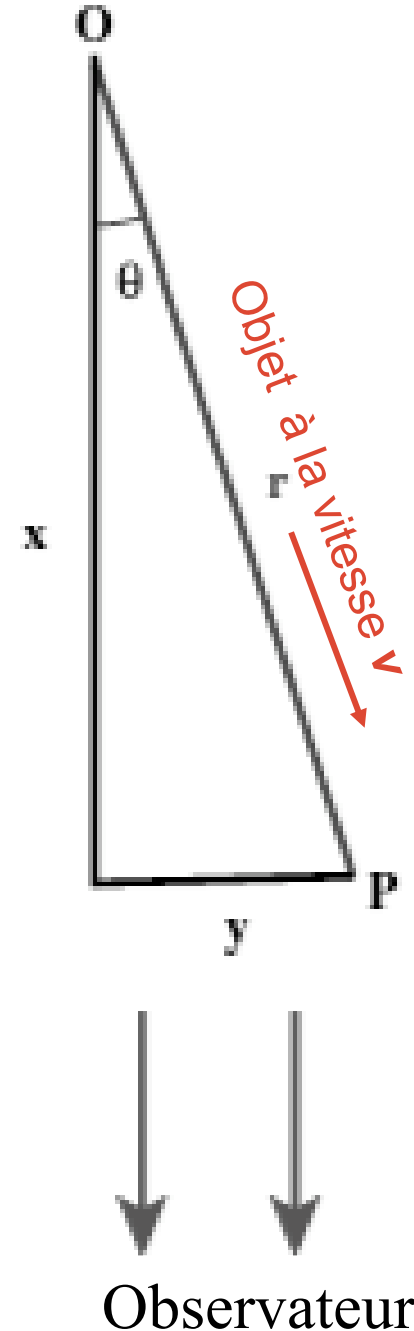
Vitesse apparente sur le ciel

$$v_{app} = y/t_{app}$$

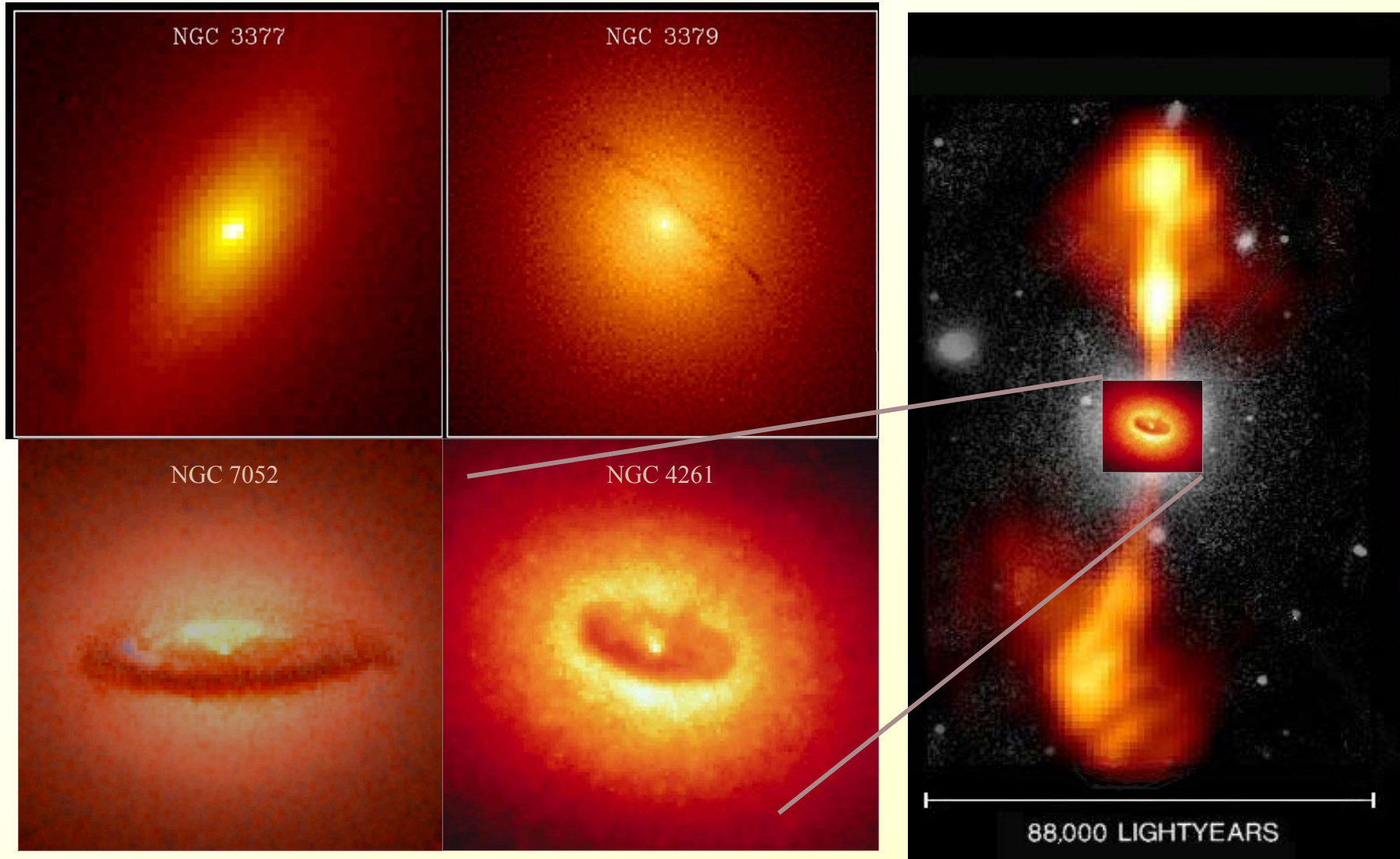
$$v_{app} = (v \sin \theta)/(1 - \beta \cos \theta)$$

Pour $v \ll c$, $\beta = v/c \sim 0 \rightarrow v_{app} = v \sin \theta$

Pour $v \sim c$, $v_{app} \gg v$ et même supérieure à c



Les sphéroïdes abritent des trous noirs, qui sont à l'origine des noyaux actifs de galaxies (AGNs)



Origine de l'émission radio :

- Flux en spectre de puissance décroissante (pente 0 noyau, puis 1)
- radiation polarisée linéairement (au moins 30%, ce qui est beaucoup)

→ **rayonnement synchrotron** émis par des électrons en mouvement relativiste dans un champ magnétique

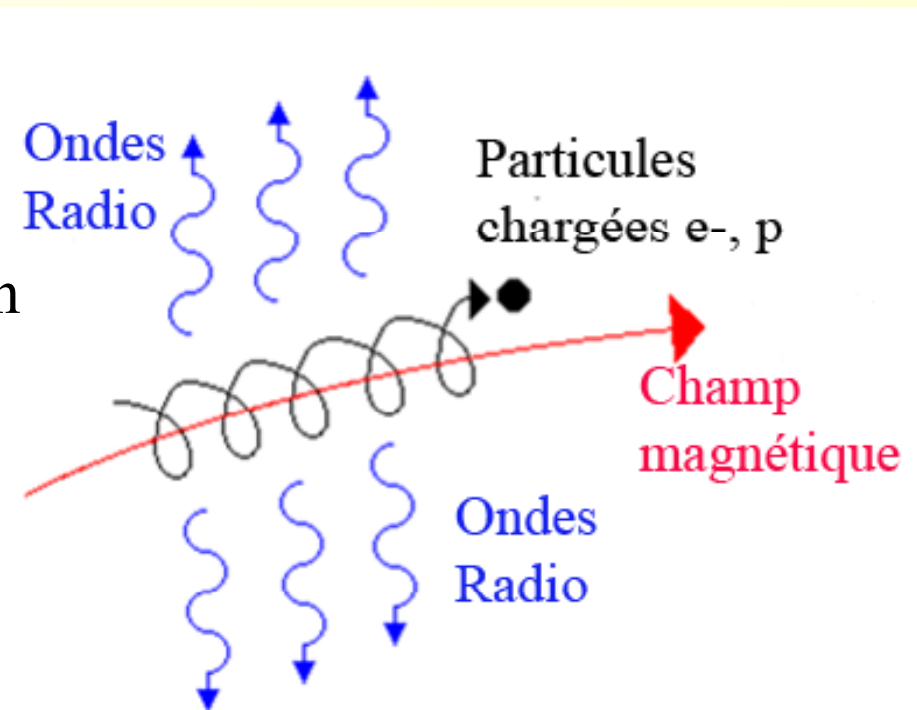
Pour un électron d'énergie

$$E = \gamma m_e c^2 \quad \text{avec} \quad \gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

la fréquence caractéristique d'émission vaut

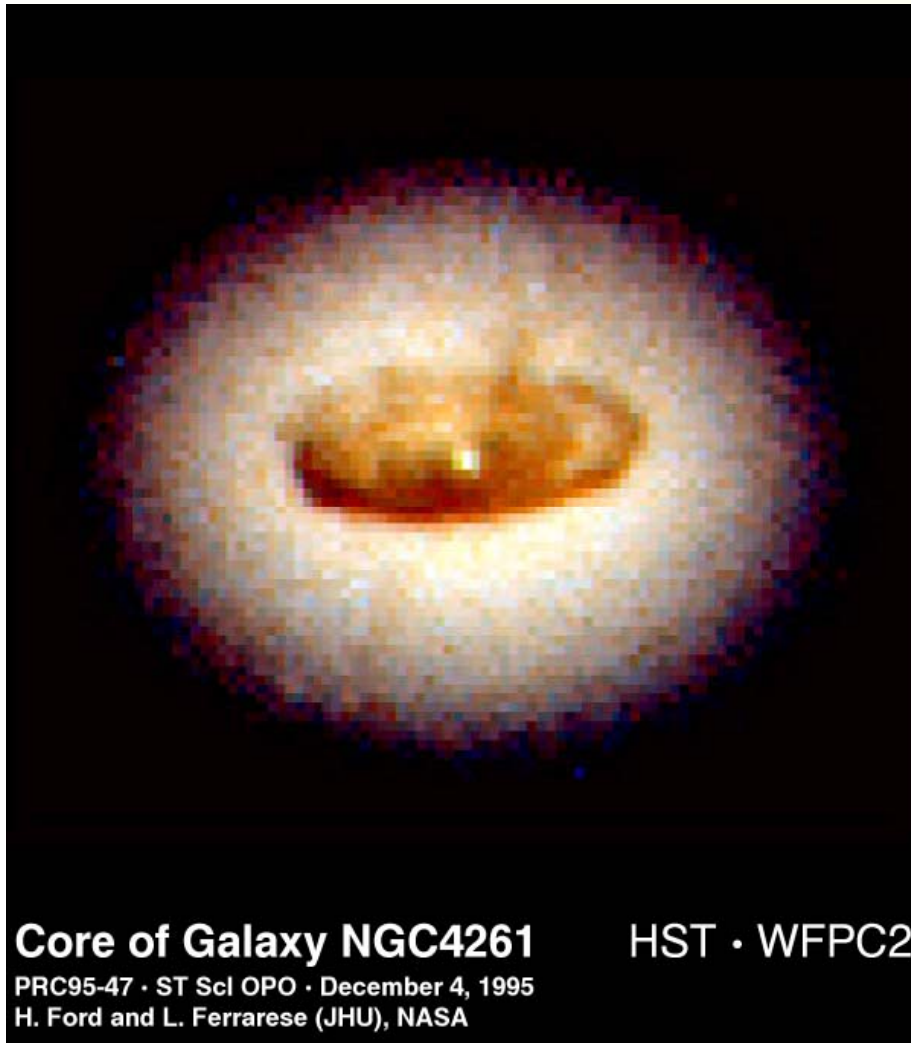
$$\nu_c \sim 4.2 \times 10^6 \gamma^2 B \text{ Hz}$$

Avec B en Gauss



Trous Noirs Supermassifs

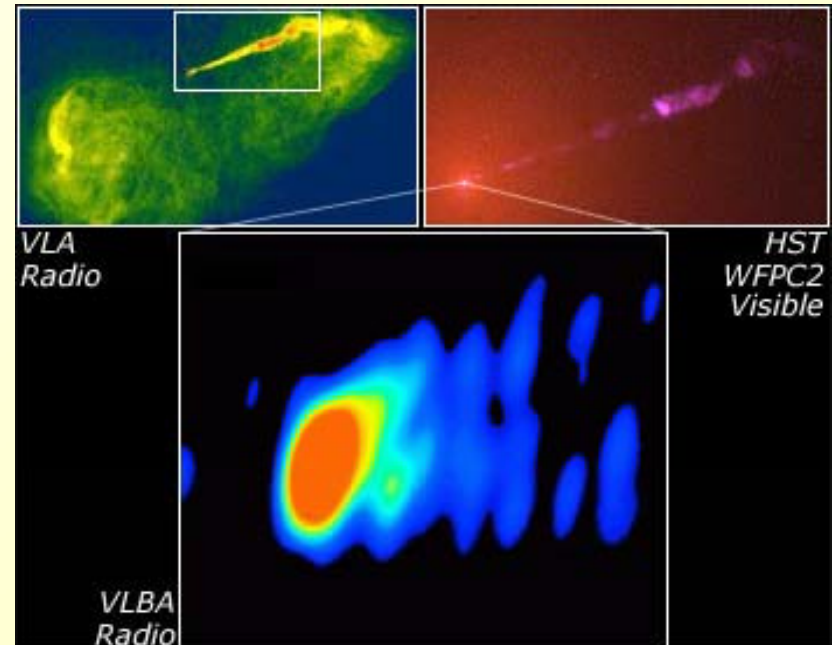
Haute résolution Télescope Spatial
+ jet radio (VLA)



Core of Galaxy NGC4261

HST · WFPC2

PRC95-47 · ST Sci OPO · December 4, 1995
H. Ford and L. Ferrarese (JHU), NASA

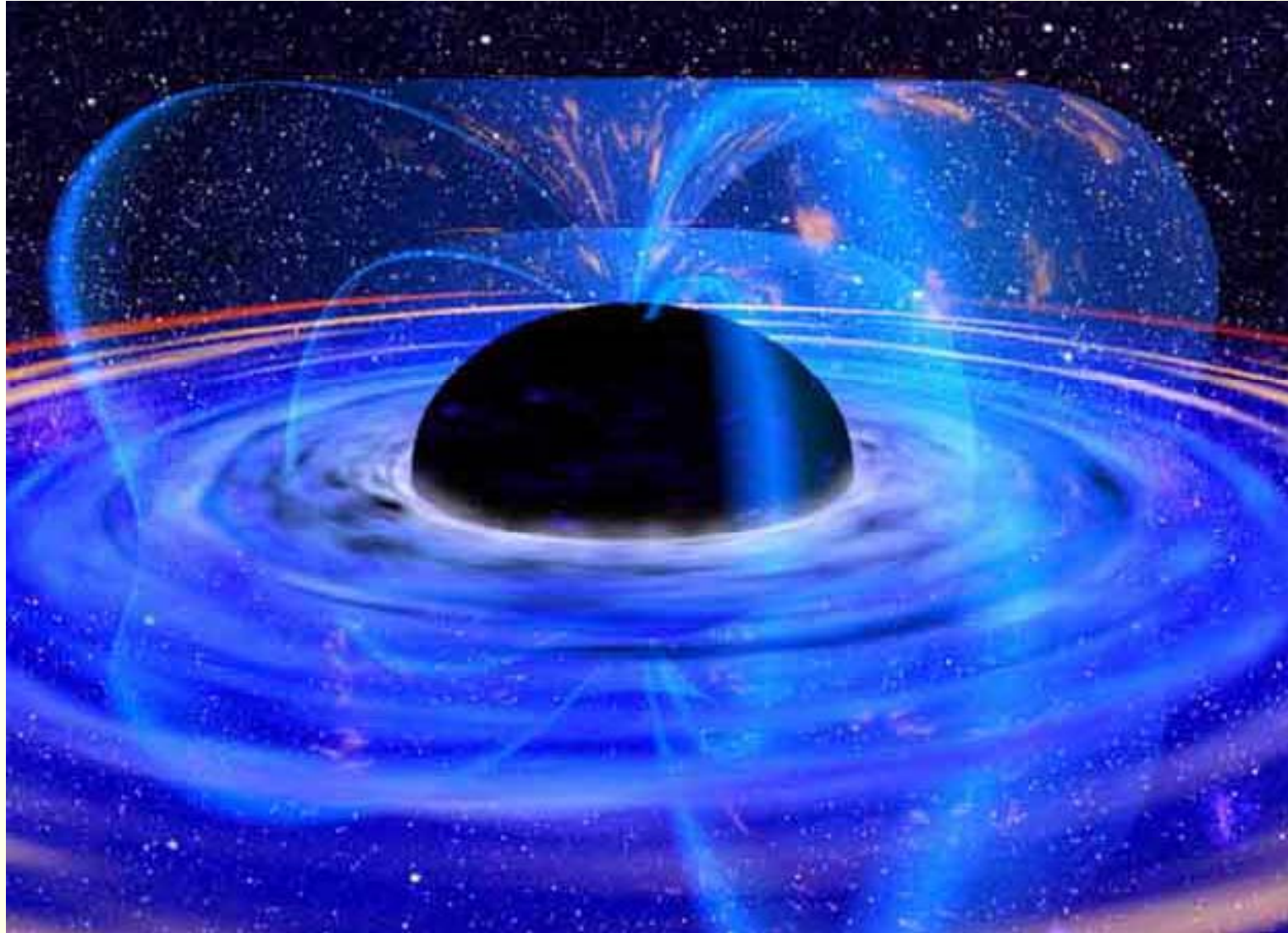


VLA
Radio

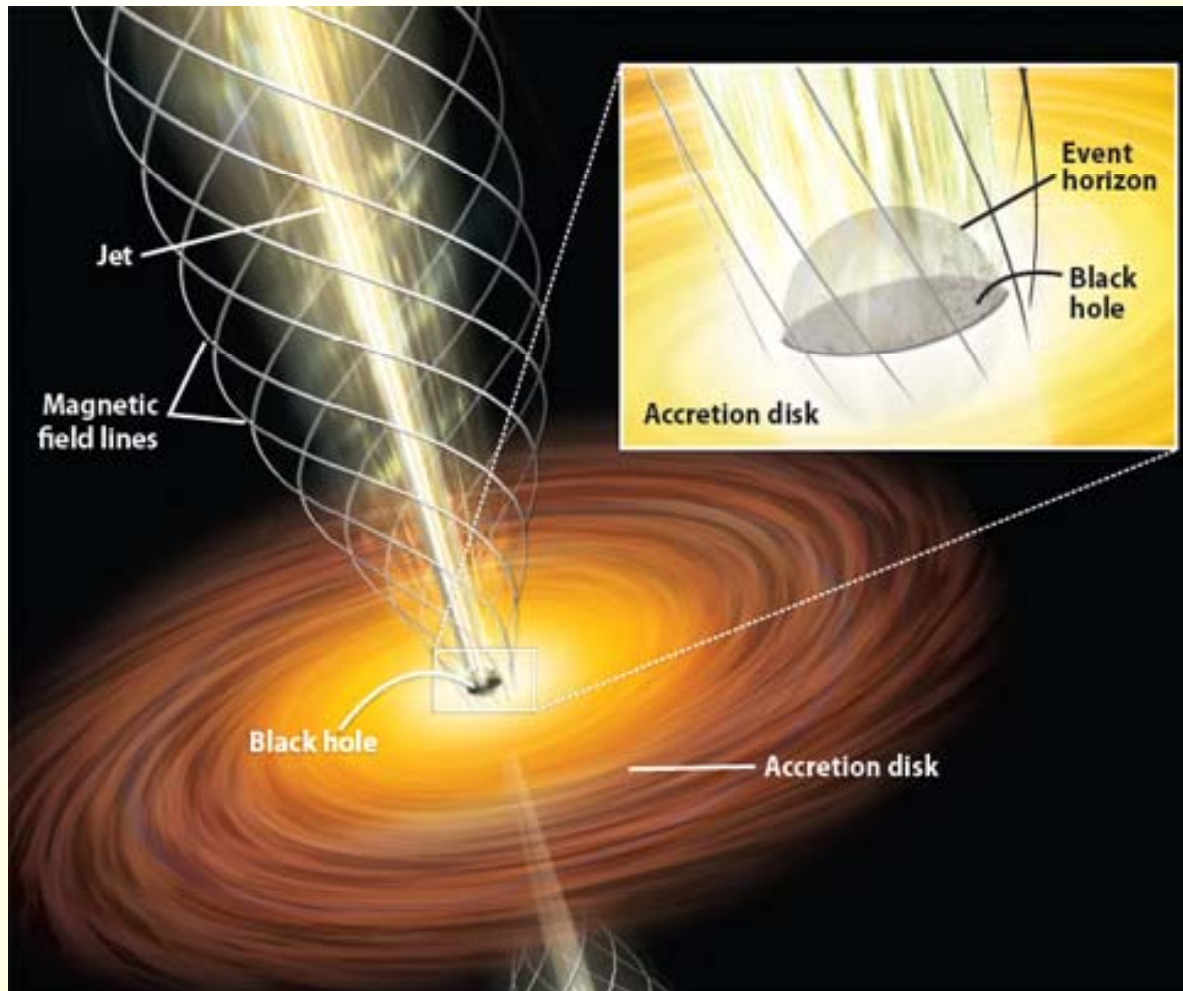
HST
WFPC2
Visible

VLBA
Radio

Trou Noir en rotation: origine des Jets Radio?



Les jets sont confinés par des champs magnétiques



Ejection de plasma: lobes radio

Cygnus A

Image radio, VLA

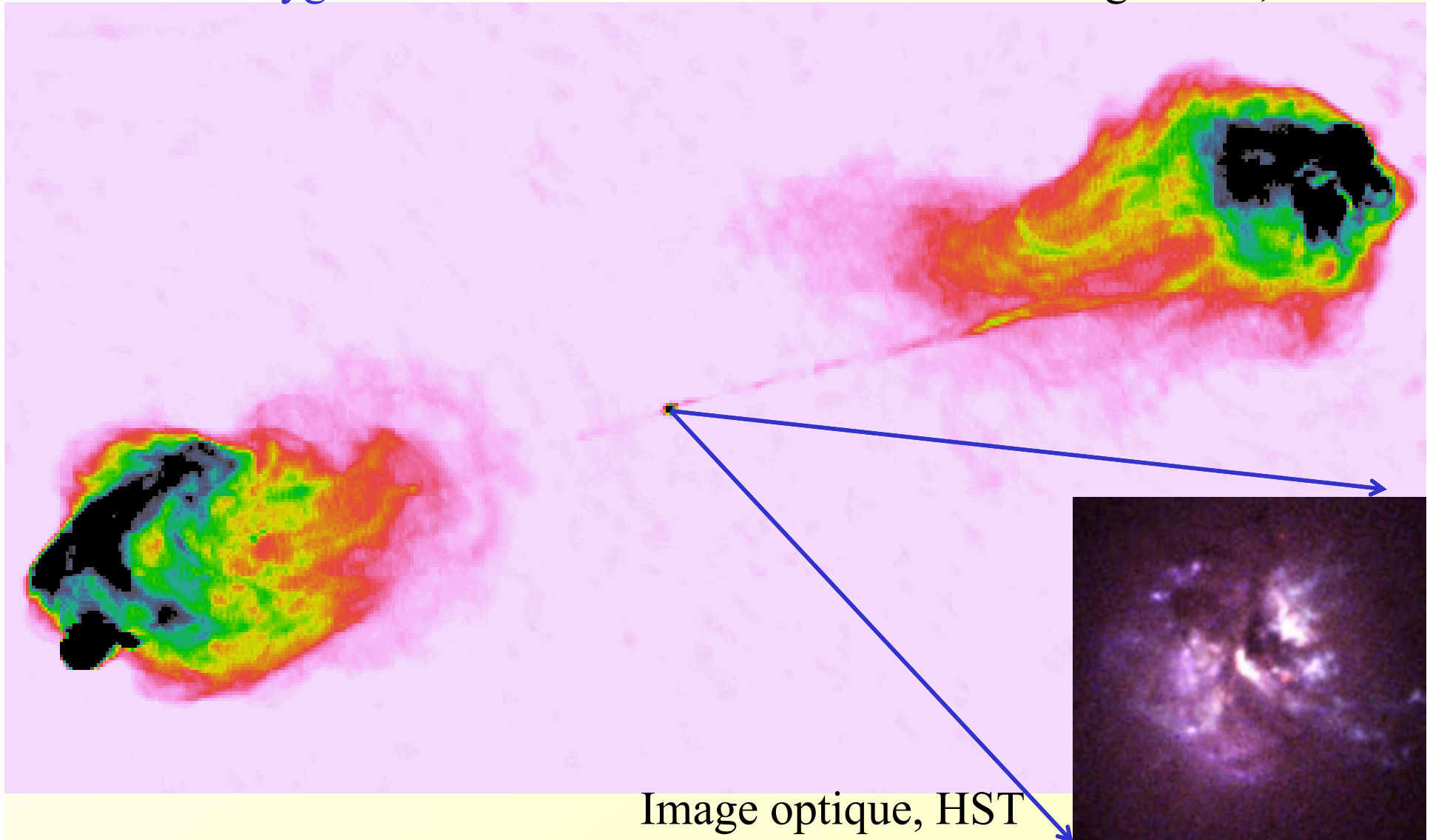
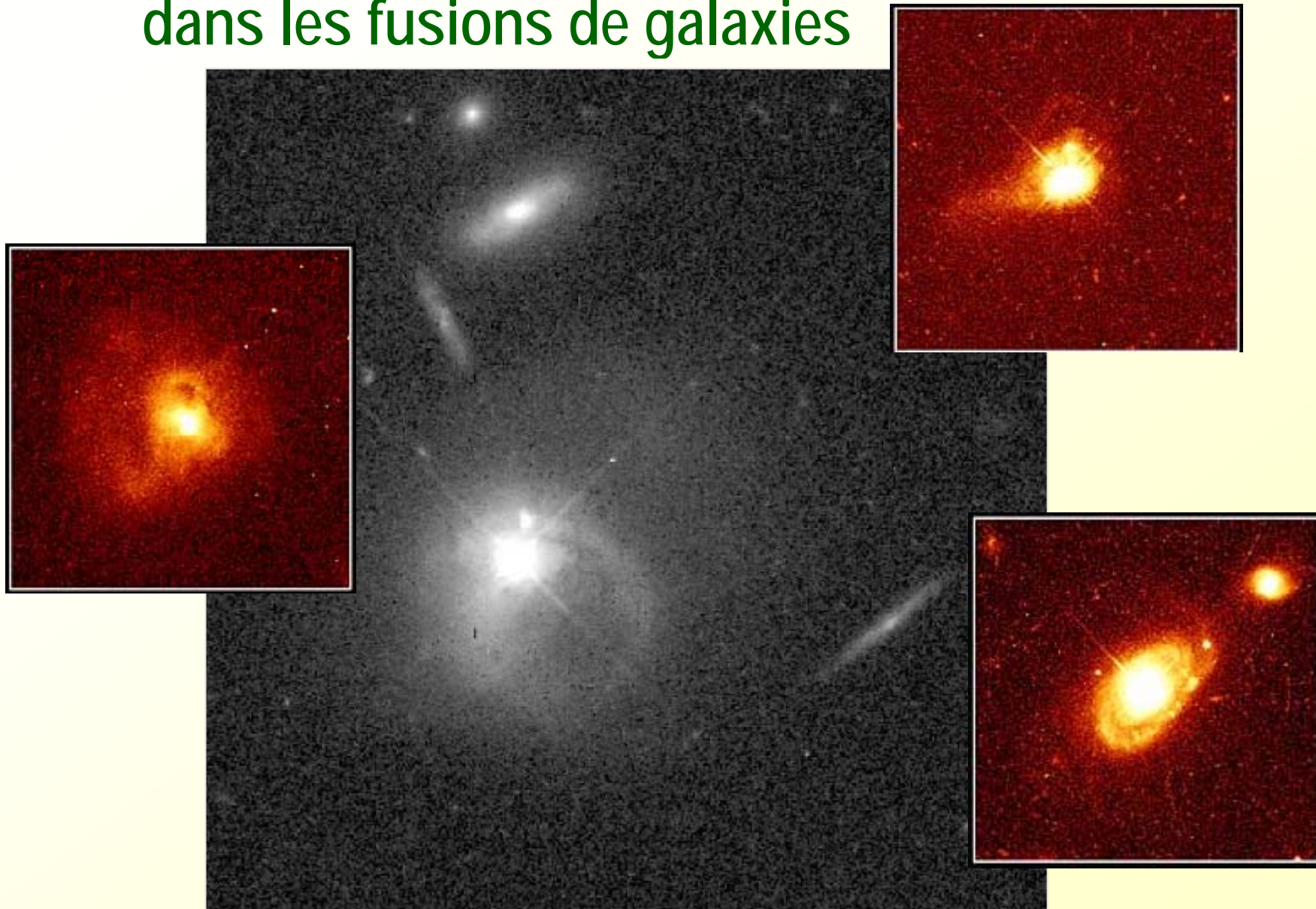


Image optique, HST

La majorité des quasars sont observés
dans les fusions de galaxies

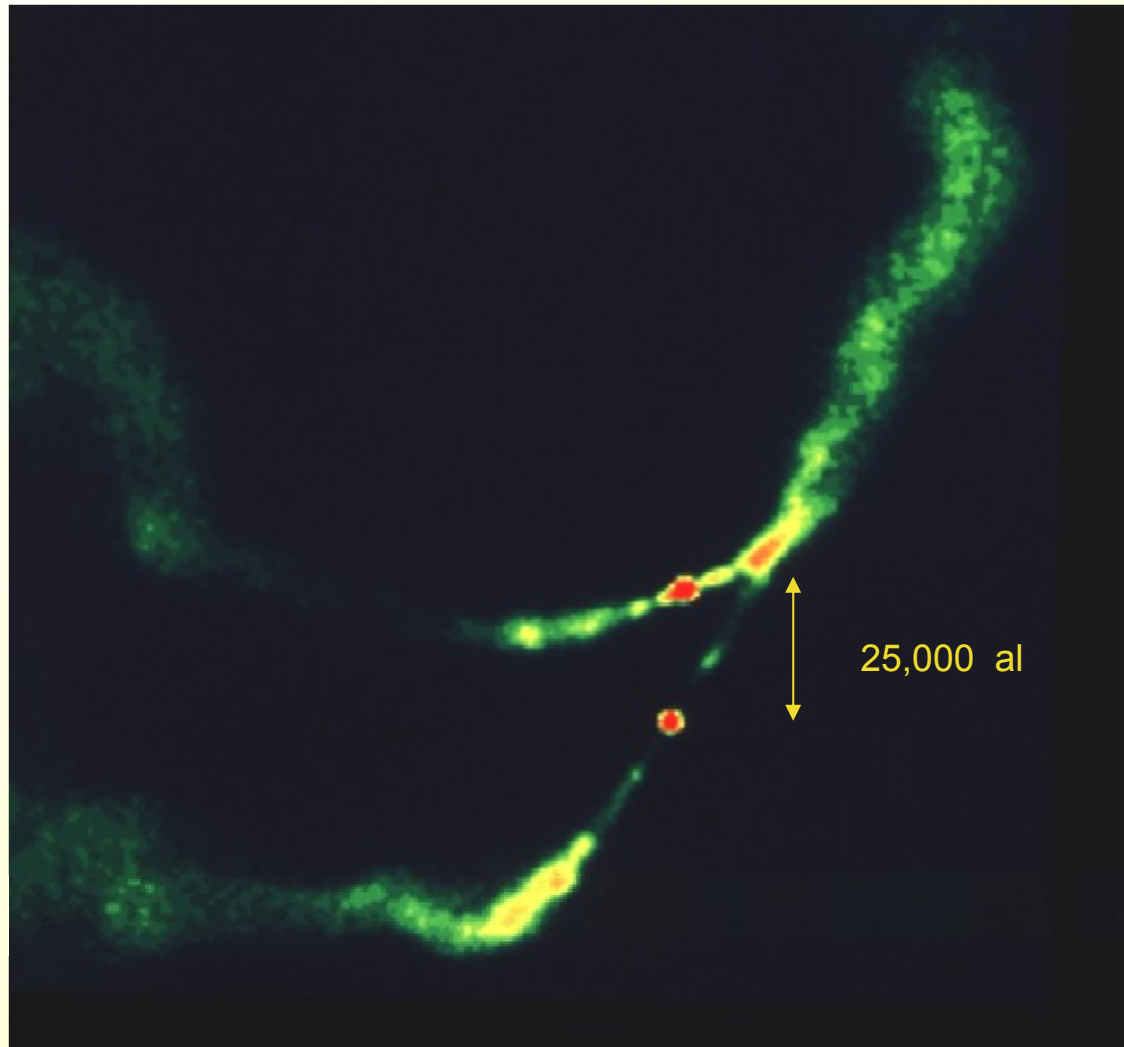
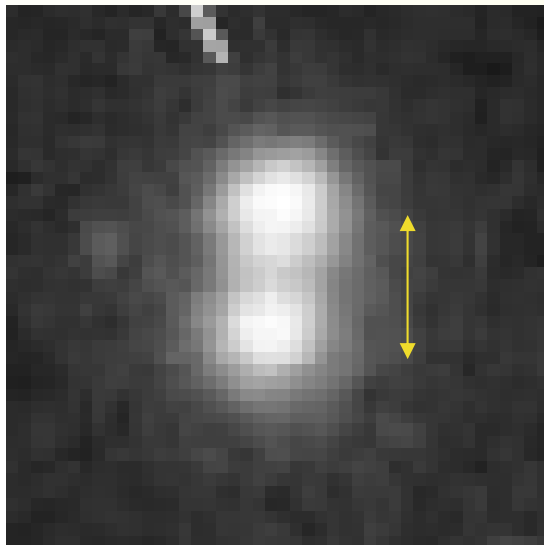


Brassage violent du gaz → alimentation du trou noir

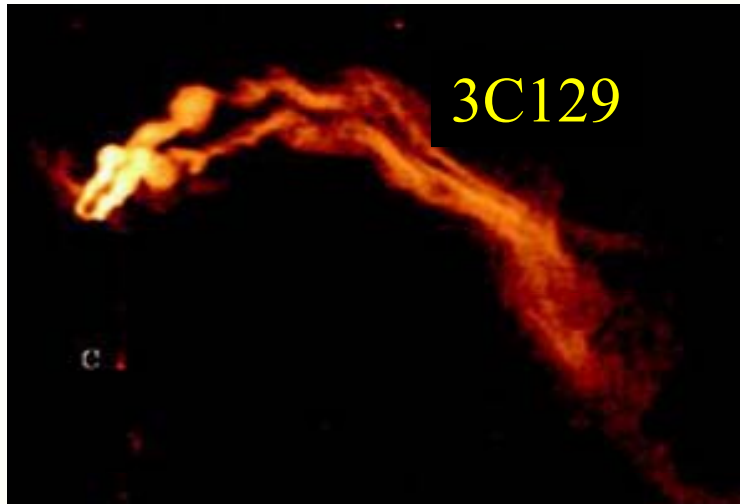
Un quasar double, en train de fusionner: 3C75, $z=0.023$

Image radio, VLA

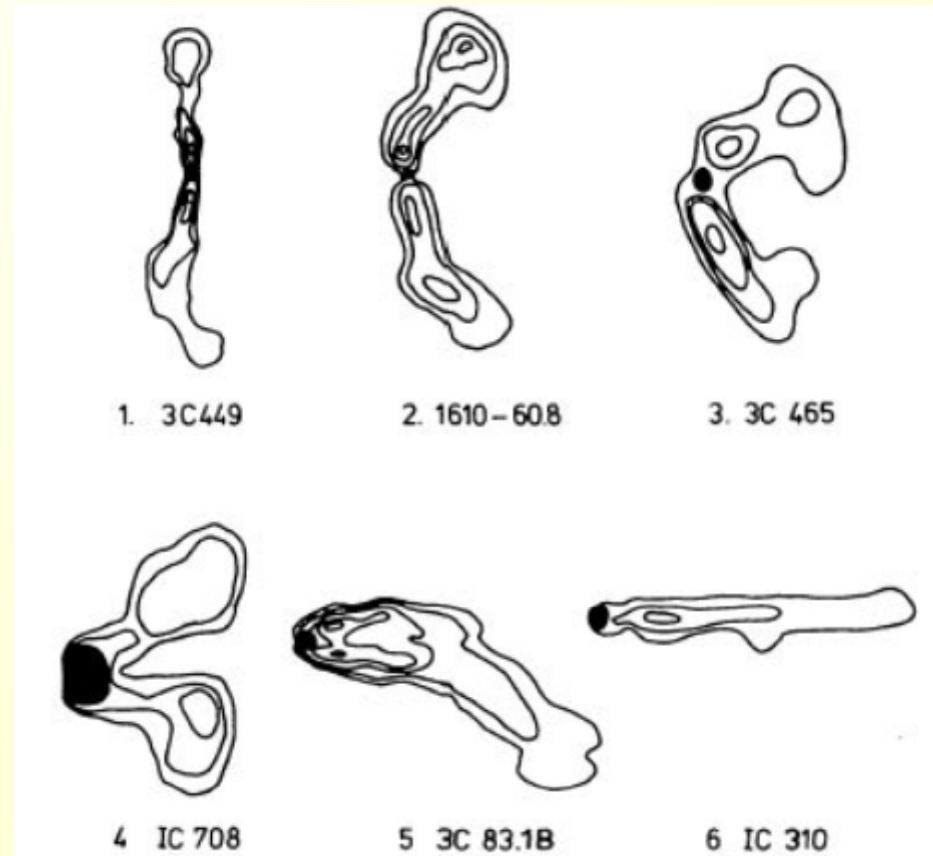
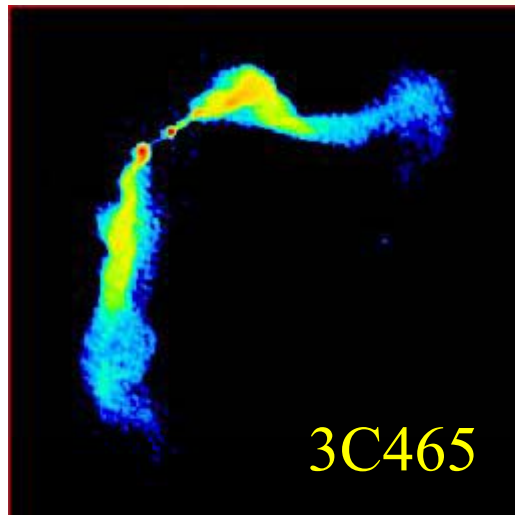
Image optique HST



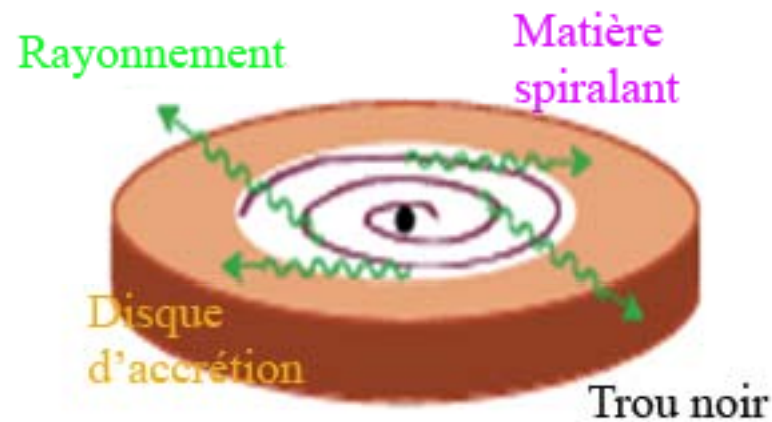
Lobes radio, galaxies en mouvement



Les galaxies se déplacent jusqu'à 1000km/s dans les amas de galaxies



Efficacité de la production d'énergie



En spiralant et tombant sur le trou noir, la matière est choquée et chauffée → elle rayonne

Rayon du trou noir $R_s = 2GM/c^2$

$R_s = 2.5 M_\odot$ heure-lumière

Pour un trou noir d' $1 M_\odot$, $R_s = 3\text{km}$

Energie disponible $GmM/R_s = 1/2 mc^2$

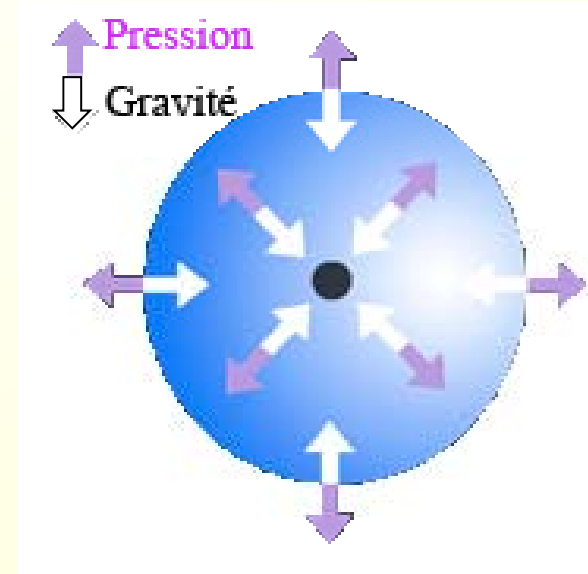
Efficacité de conversion en rayonnement : **10% de mc^2**

Les réactions nucléaires dans les étoiles $< 1\%$

En consommant 1 – 10 masses solaires par an, un trou noir peut rayonner ~ 1000 plus que toute la Voie lactée

Limite d'Eddington

La pression de radiation
compense la gravité
Le gaz ne peut plus tomber

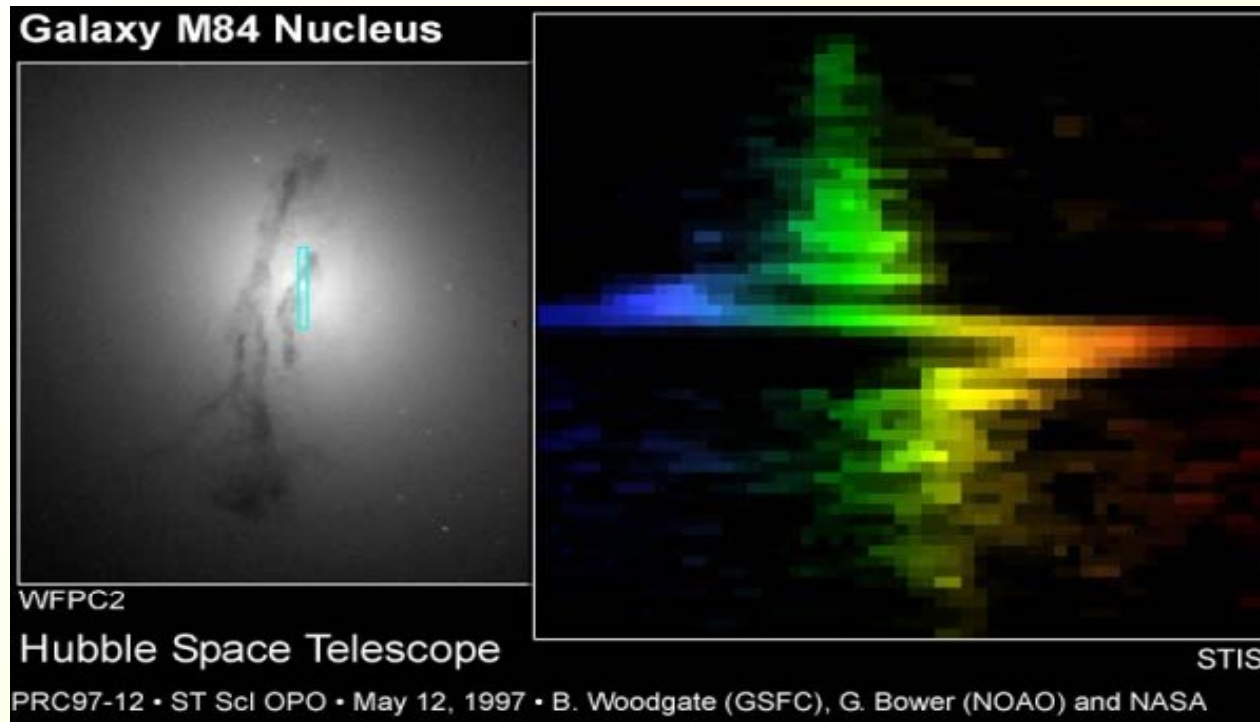


$$L_E = 4\pi cGM_{bh}m_p/\sigma_e = 3.3 \times 10^{12} L_\odot \quad (M_{bh}/10^8 M_\odot)$$

Un trou noir ne peut pas rayonner plus que L_E
Et ne peut pas manger plus que

$$dM_E/dt = L_E / \eta c^2 = 2M_\odot/\text{yr} \quad (M_{bh}/10^8 M_\odot) \quad (0.1/\eta)$$

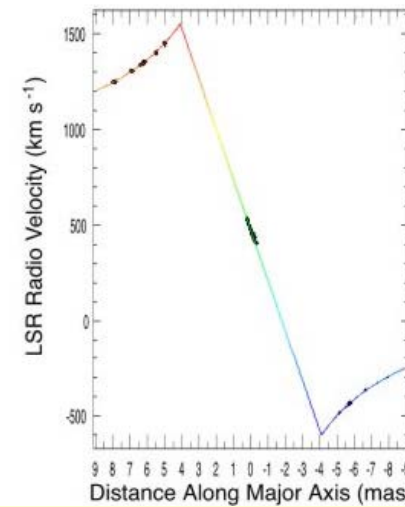
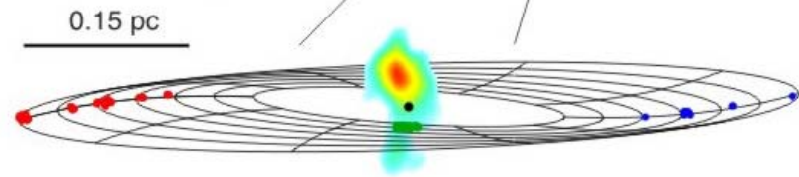
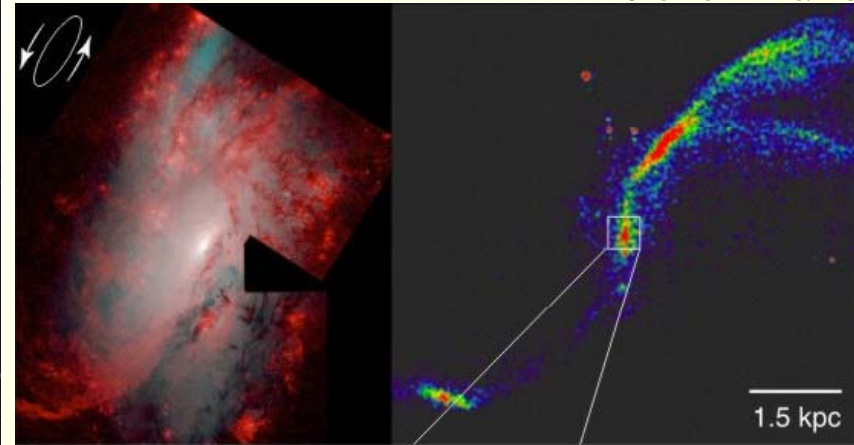
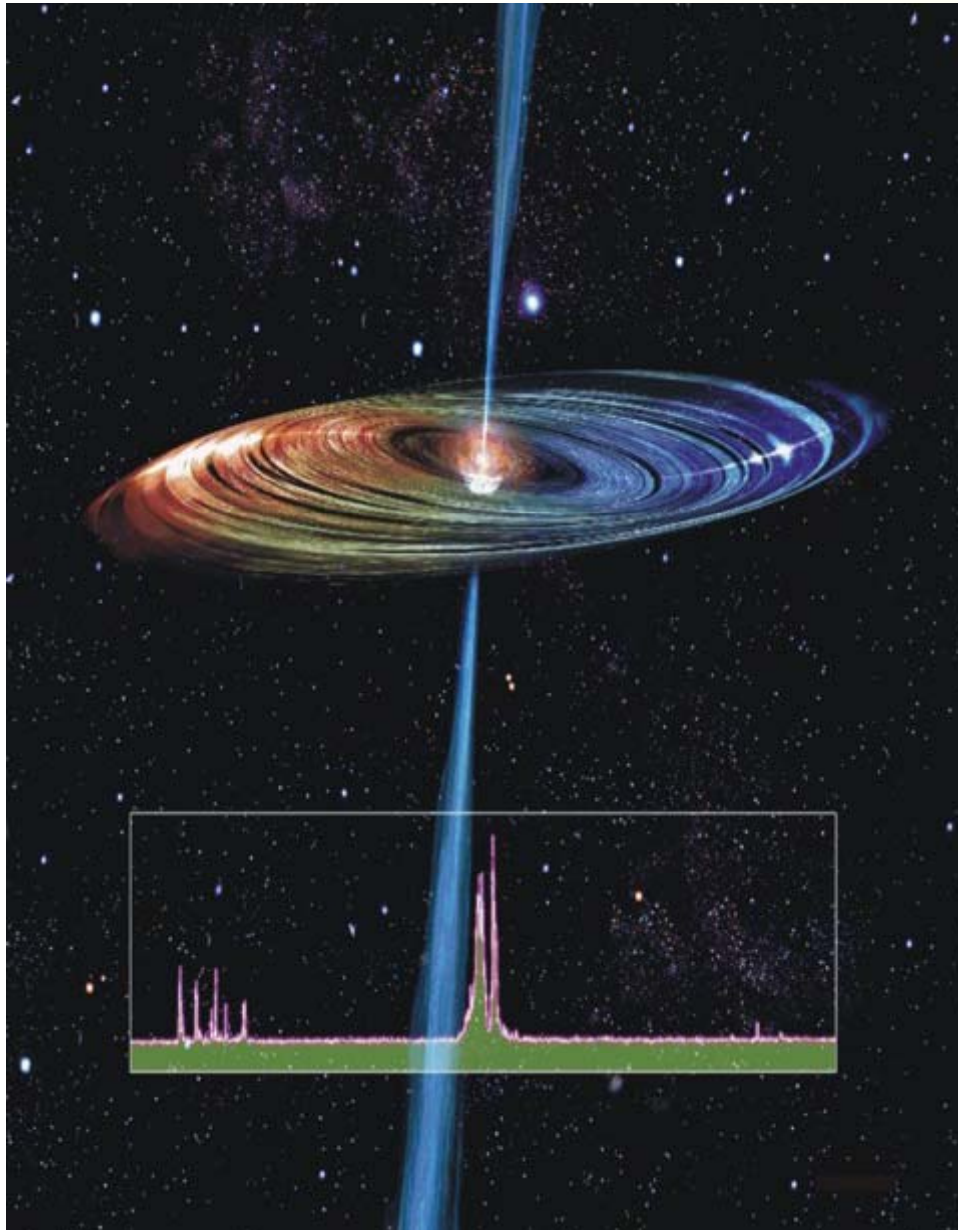
Mesure de la masse du trou noir



- Masses mesurées dynamiquement
- Mesure des vitesses à >10 pc du trou noir
- A grands distance, mesures moins précises

NGC 4258: masers H₂O

Jets radio



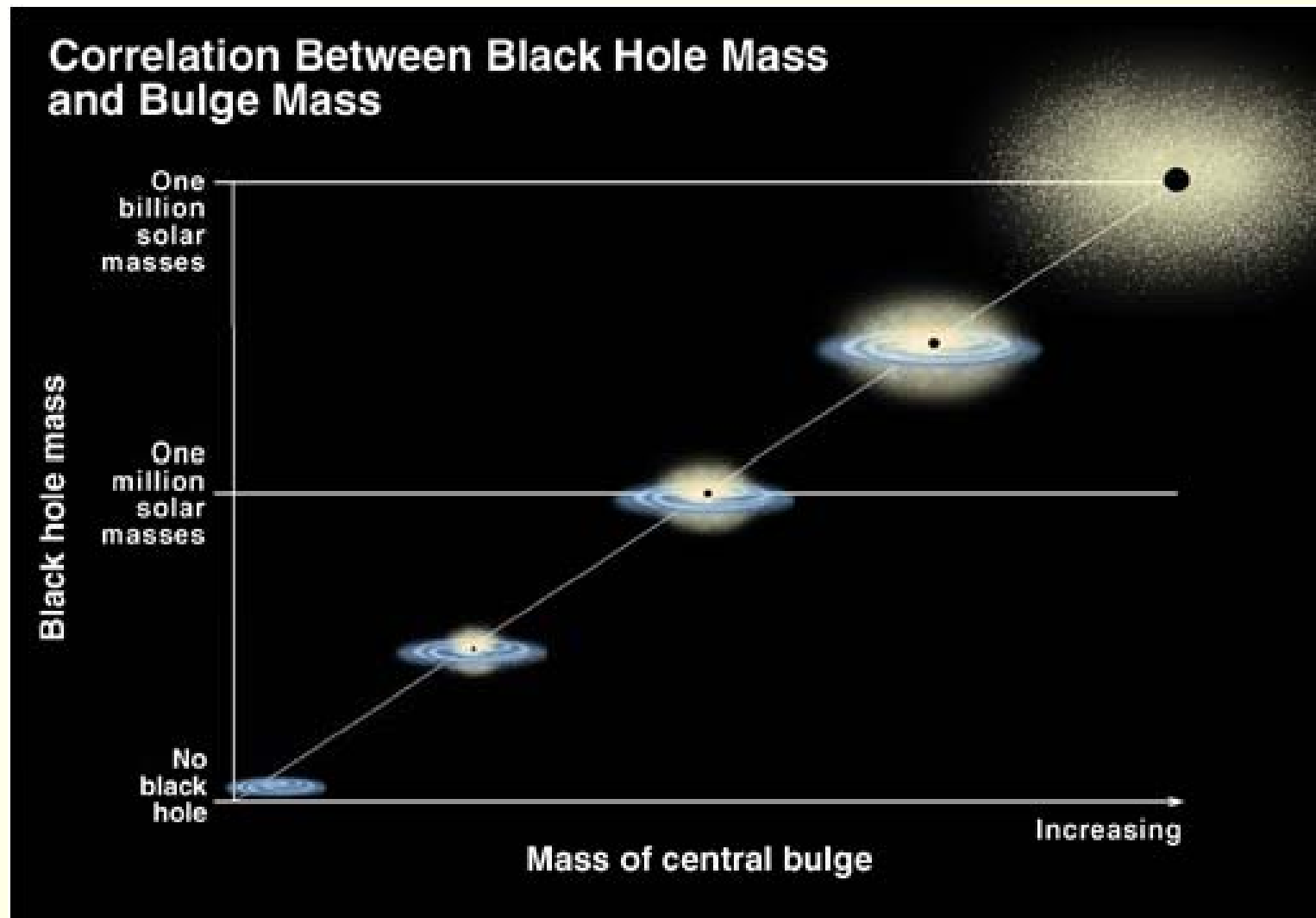
$M=4 \times 10^7 M_{\odot}$

$D=7.2 \text{ Mpc}$

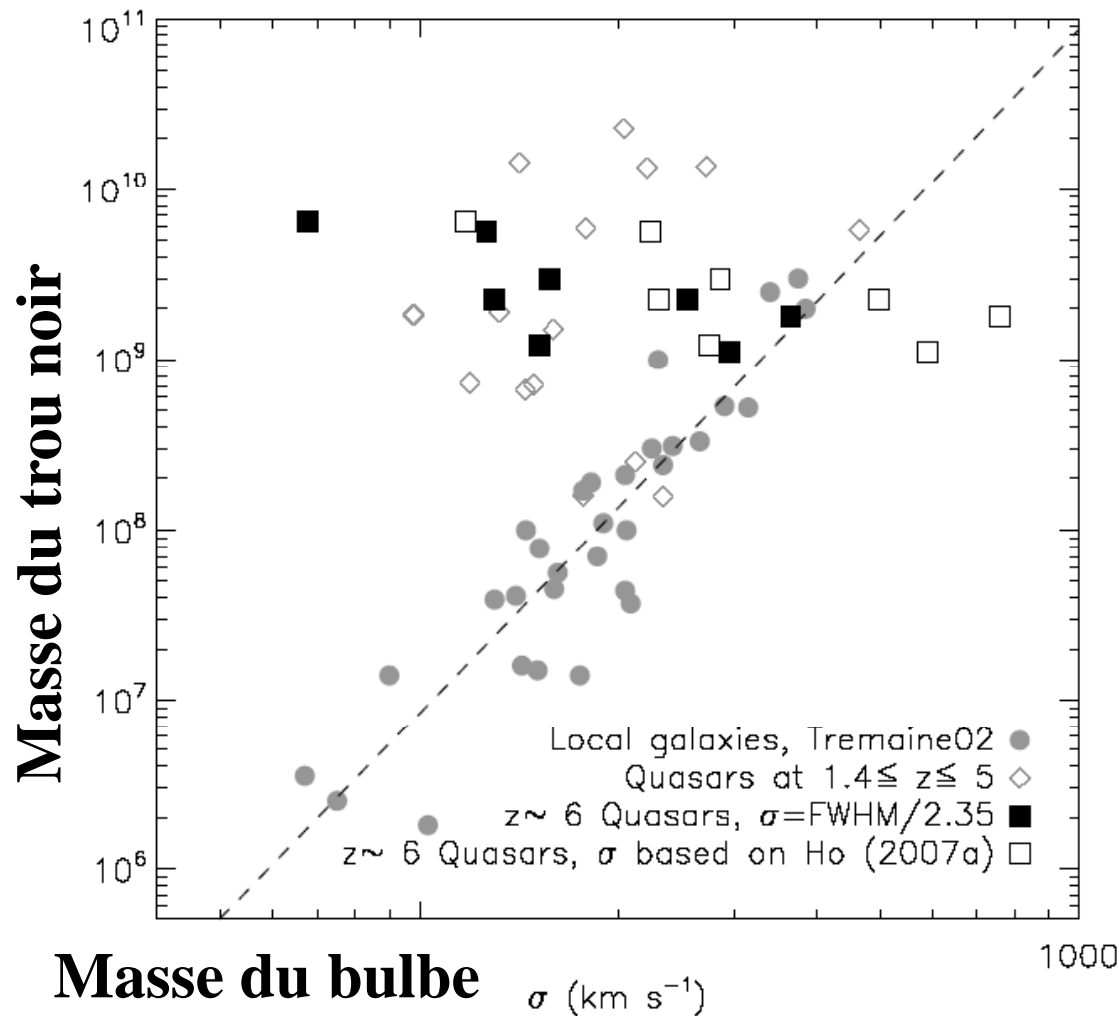
Co-habitation trou noir - Galaxie

$$M_{\text{TN}} \sim 0.5\% M_{\text{bulbe}}$$

Qu'en est-il au début de l'Univers?



$M_{\text{trou noir}}$ – Masse bulbe (ou σ)



Trous noirs précoces?

QSO à $z=6$

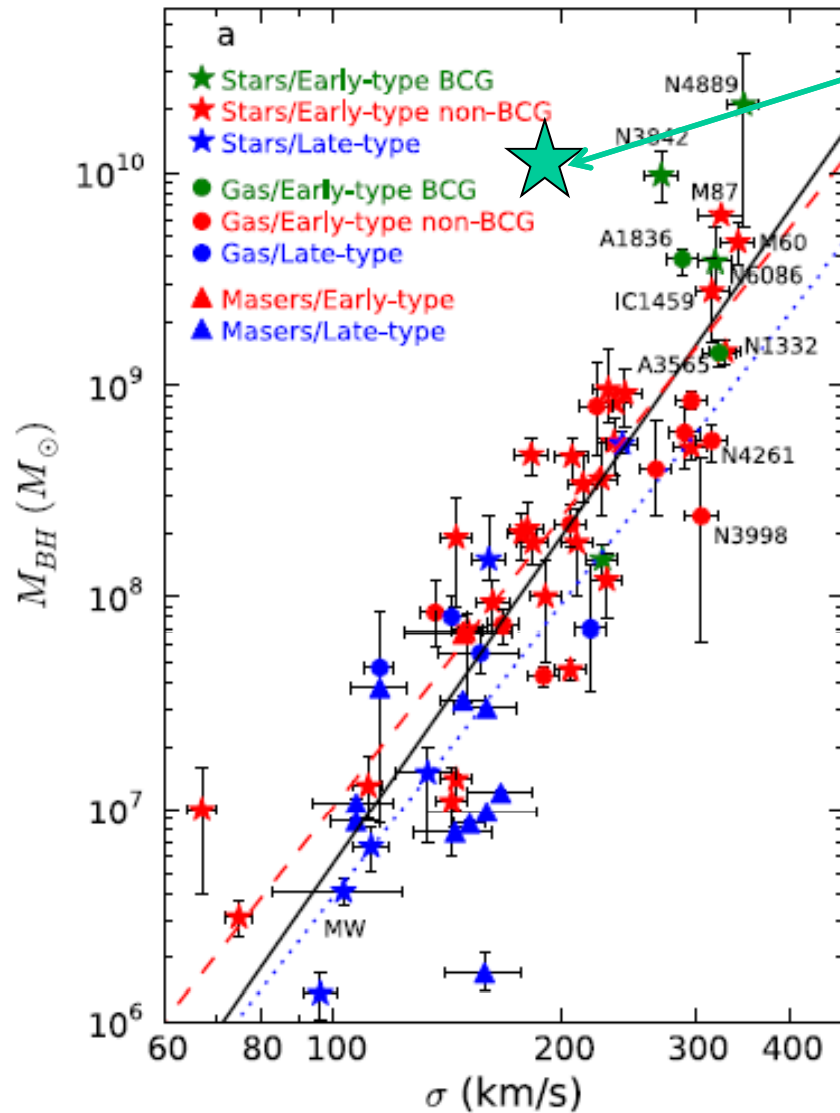
→ La masse des trous noirs est plus grande que prévue

Mais:

Inclinaison incertaine

→ ALMA pourra donner la morphologie, et les inclinaisons

Masse du trou noir et masse du bulbe



N1277

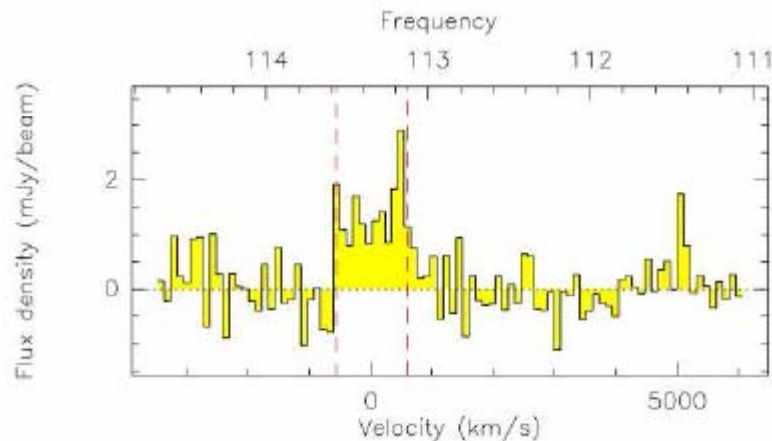
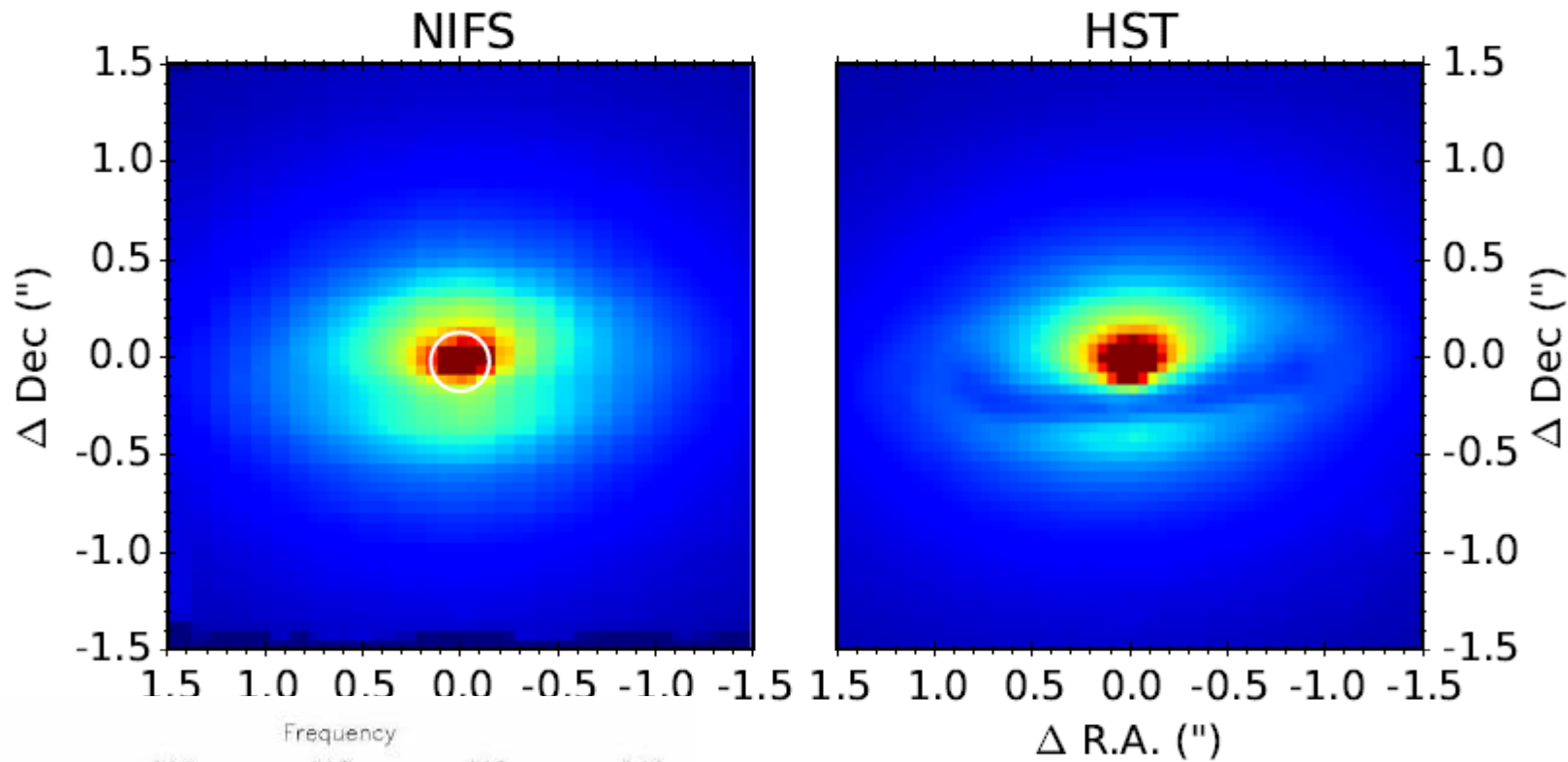
Les deux masses sont proportionnelles $\sim 1/700$

Parfois, on arrive un peu au-dessus, dans les amas de galaxies

Galaxies cannibales au centre

Avalent le gaz chaud avant la formation d'étoiles?

NGC 1277: un trou noir obèse?



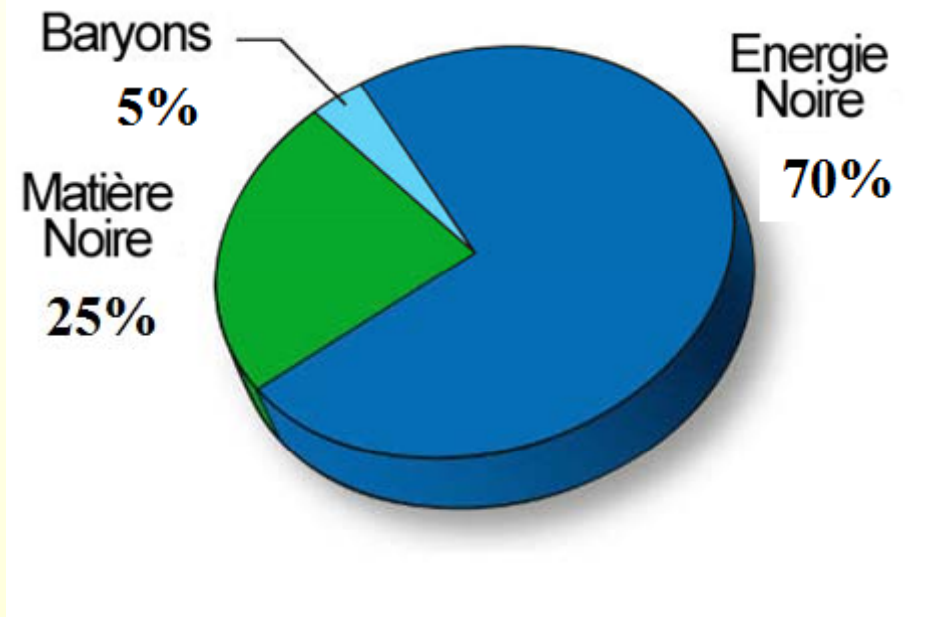
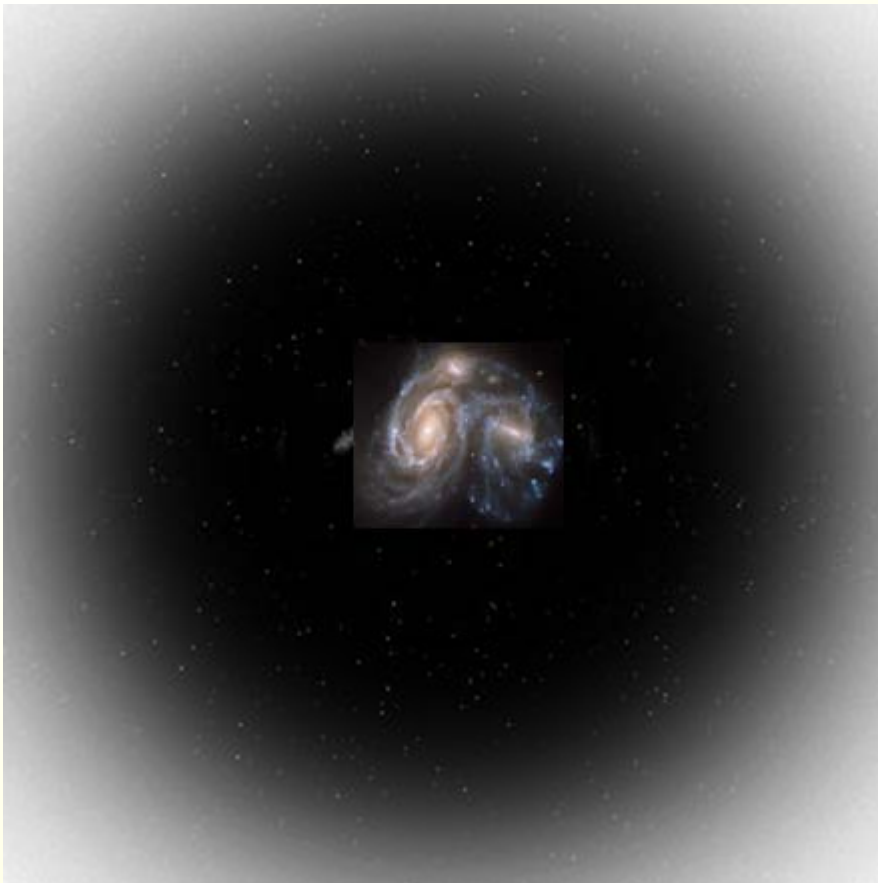
$$M_{\text{BH}} = 1.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

Scharwaechter et al 2015

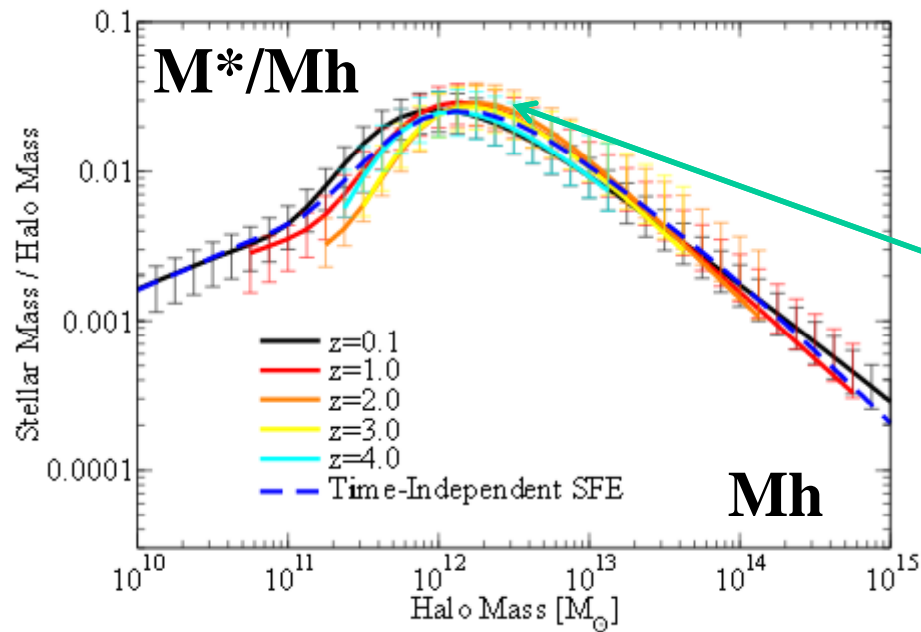
Matière noire et atomes des galaxies

Rapport observé dans les galaxies

Atomes/MN < 0.04



Rapport dans l'Univers
Atomes/MN= 0.2



Atomes/MN = 0.2 universel

Observé < 0.04 dans les galaxies
Max, pour $M_h = 10^{12} M_\odot$
(Voie Lactée)

Formation d'étoiles inefficace

Behroozi et al 2013

→ Les baryons sont éjectés des
galaxies

Les supernovae sont efficaces pour les
galaxies naines seulement

Pour les galaxies massives, uniquement les AGN?

AGN: Largement assez d'énergie

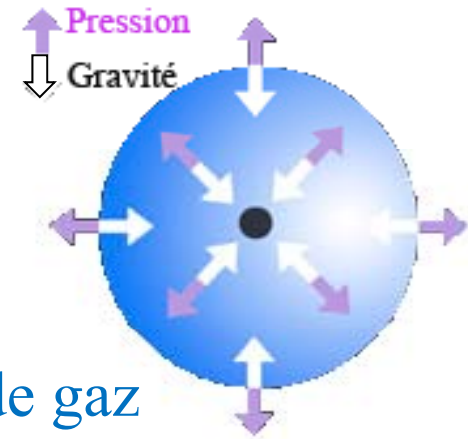
$$M_{\text{BH}} = 2 \cdot 10^{-3} M_{\text{gal}} \quad E_{\text{gal}} \sim M_{\text{gal}} \sigma^2$$

$$E_{\text{BH}} \sim 0.1 M_{\text{BH}} c^2 \quad \rightarrow E_{\text{BH}}/E_{\text{gal}} > 80$$

Deux modes d'éjection des AGN

Mode Quasar: vents par rayonnement

Quand la luminosité proche d'Eddington, jeune QSO,
 $L_{\text{Edd}} = 4\pi GM_{\text{BH}} m_p c / \sigma_T \rightarrow M_{\text{BH}} \sim f \sigma_T \sigma^4$, f fraction de gaz



Même considération avec la pression de radiation sur la poussière σ_d

$\sigma_d / \sigma_T \sim 1000$, limitation de M_{bulbe} à $1000 M_{\text{BH}}$?

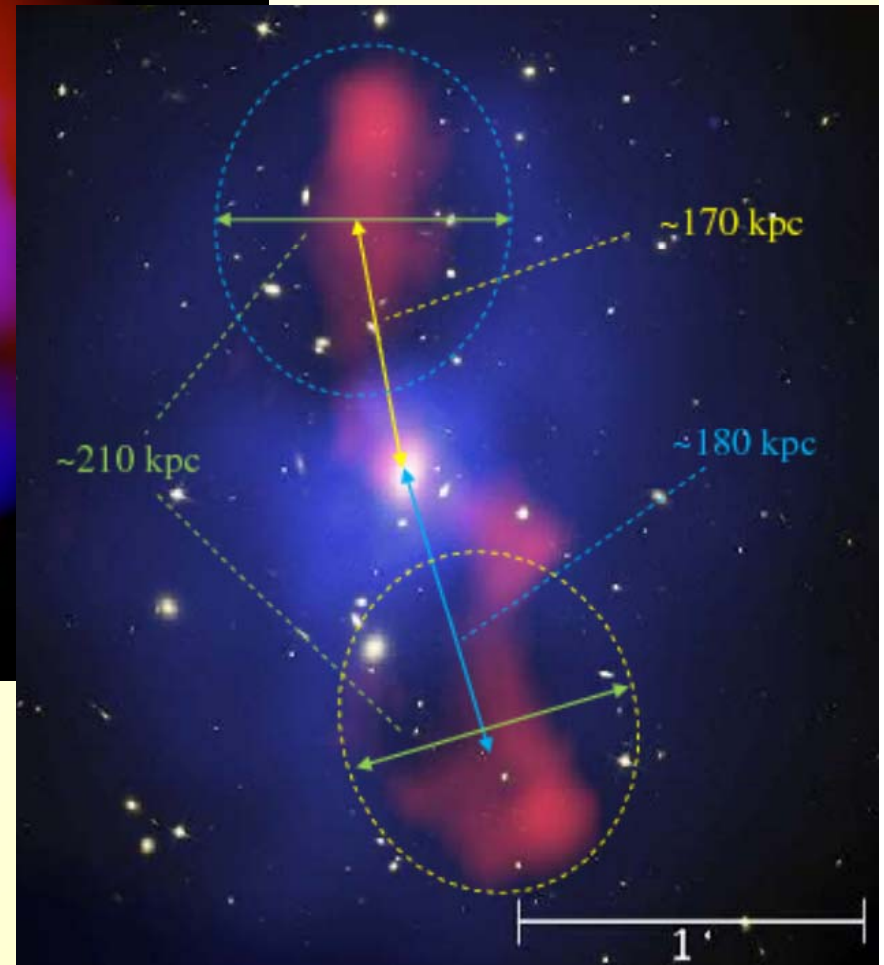
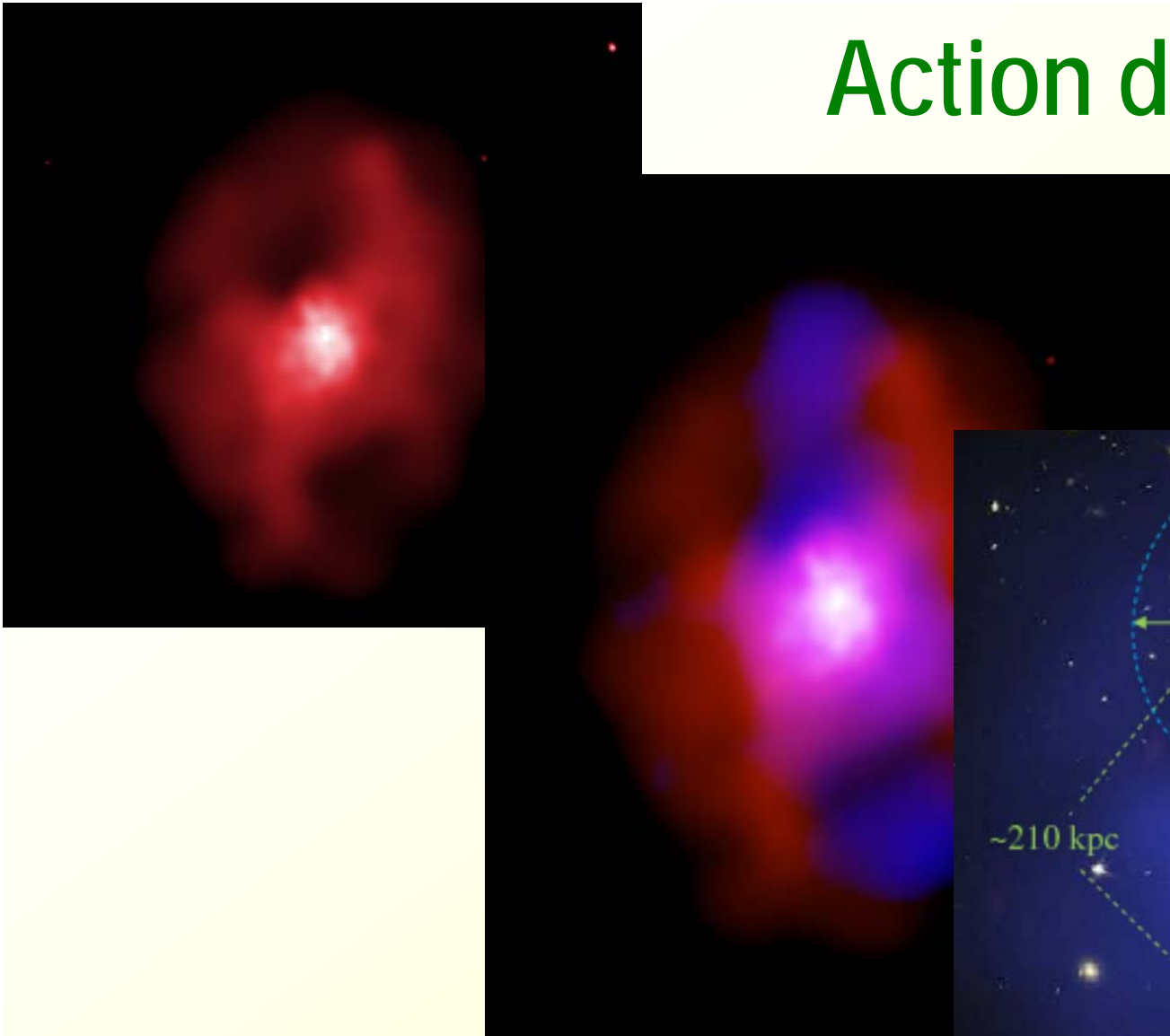
Mode Radio, ou cinétique, jets radio

Quand $L < 0.01 L_{\text{edd}}$, galaxies massives, tard dans l'univers
Non destructif: garde un équilibre chauffage-refroidissement

Flots de refroidissement dans les amas de galaxies,
AGN de faible luminosité, Seyferts..

Action des AGN

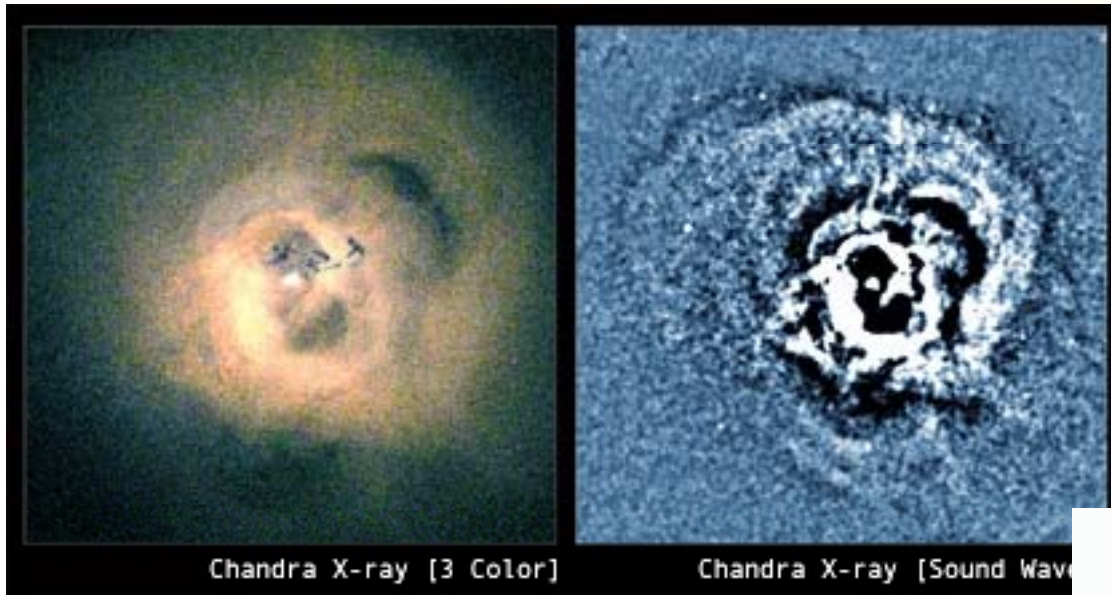
Amas de Galaxies



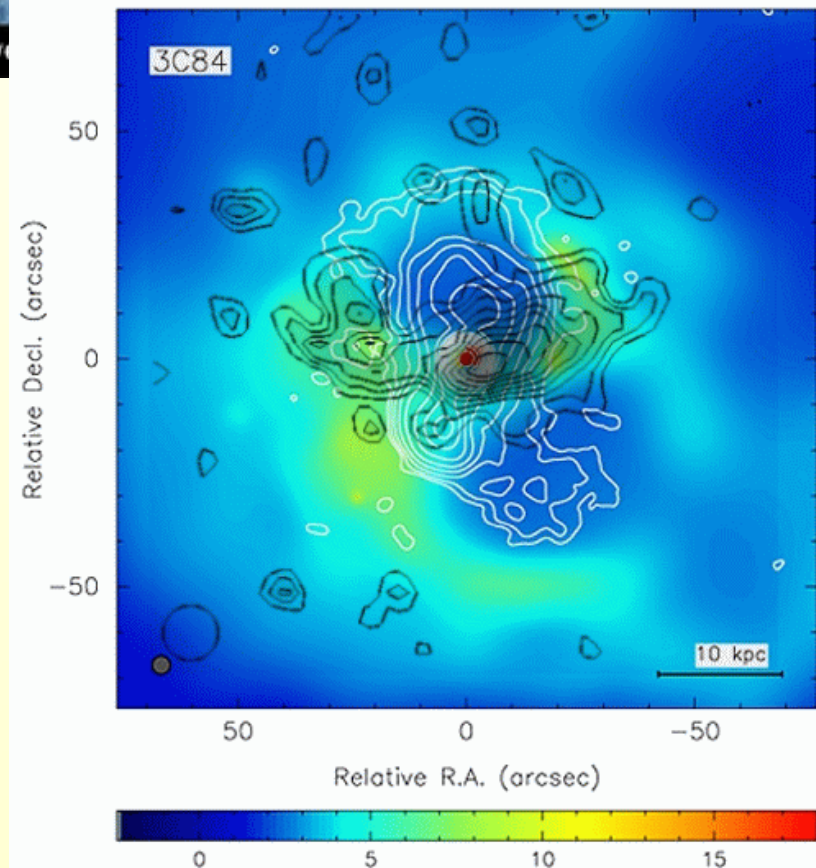
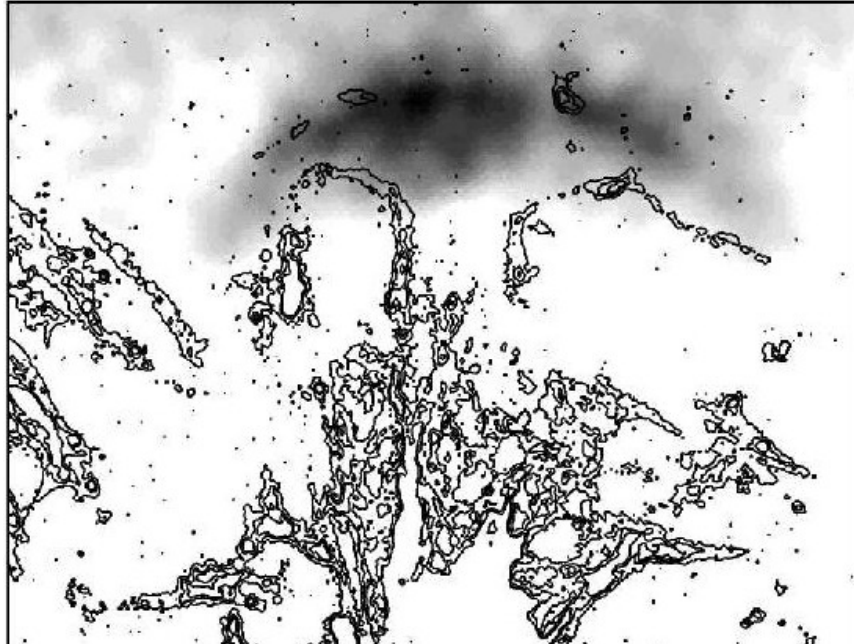
MS0735.6+7421 cluster
(*McNamara et al. 2009*)

Gas qui se refroidit dans les amas

Salomé et al 2006



Perseus A , *Fabian et al 2003*



3 paires de cavités dans NGC 5813



AGN: activité
périodique
1, 10, 30kpc

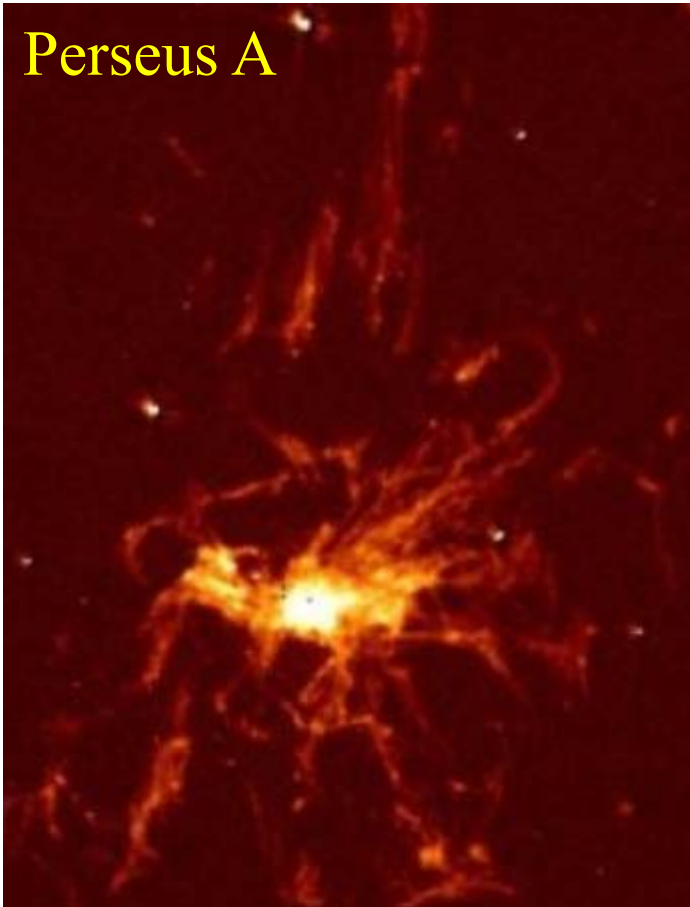
Période 10 Myr

Sur 30kpc, ou
50Myr, activité
continue

Chocs Mach2

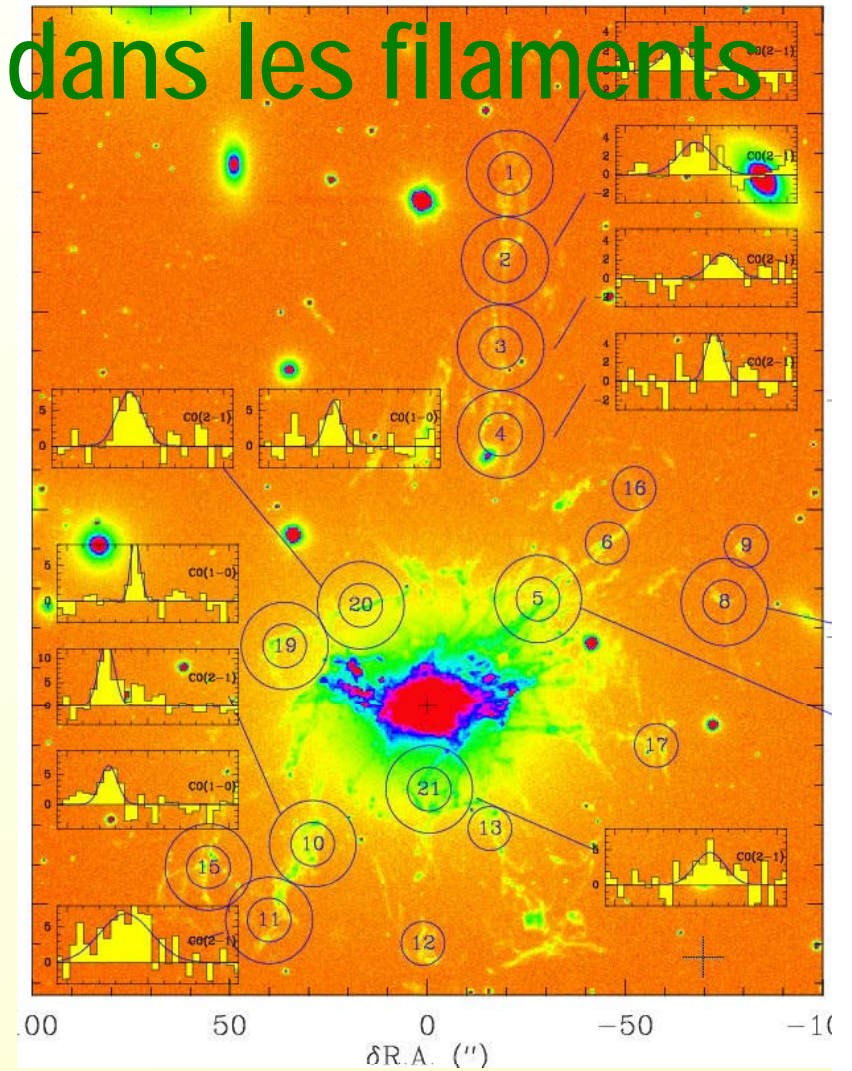
Randall et al 2015

Perseus A



Gaz froid dans les filaments

Flux de gaz dans les deux sens
Le gaz moléculaire venant d'un épisode précédent de refroidissement est entraîné par le jet radio de l'AGN
→ Alimente le trou noir



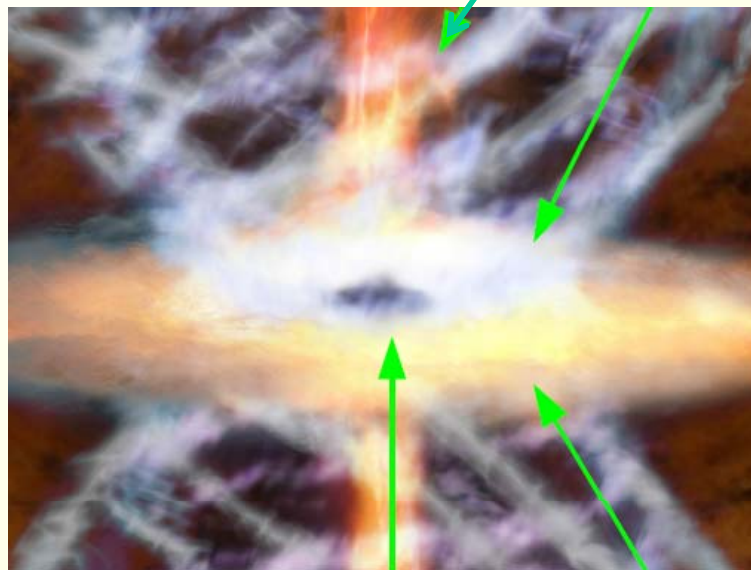
UFO: « Ultra-Fast Outflow »

Raies Fe XXV/XXVI en absorption

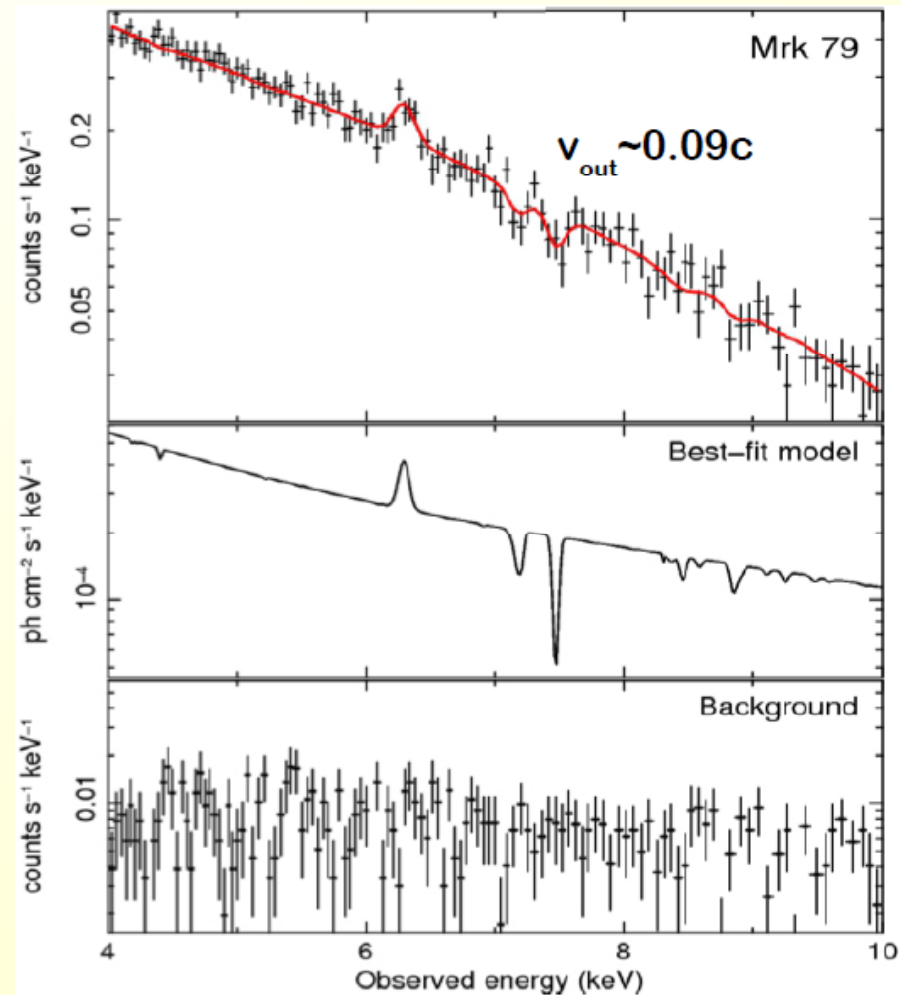
Gaz très ionisé, et relativiste

Flots de gaz en rayons X

$V > 10\,000\text{ km/s}$

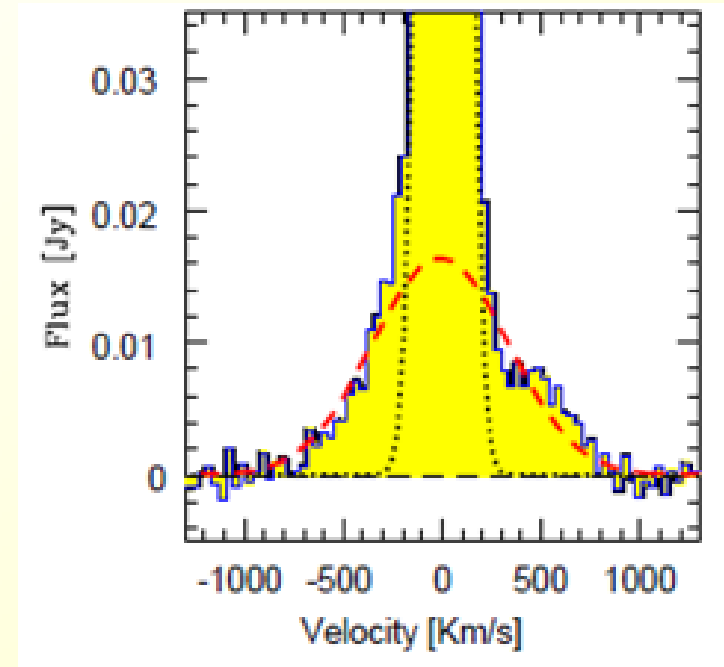
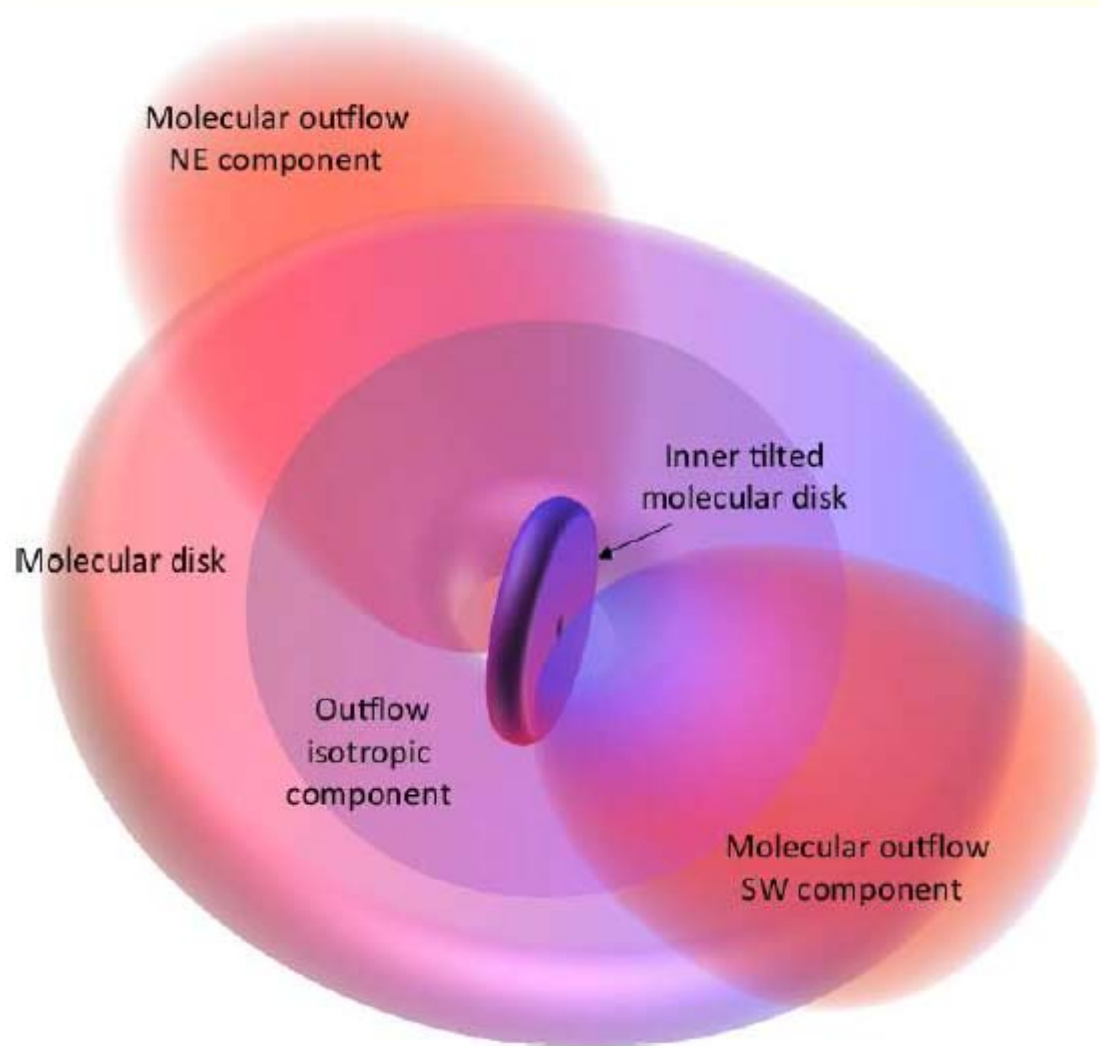


Trou noir Disque d'accrétion



Tombesi et al. 2011

UFO+ flot moléculaire Mrk231



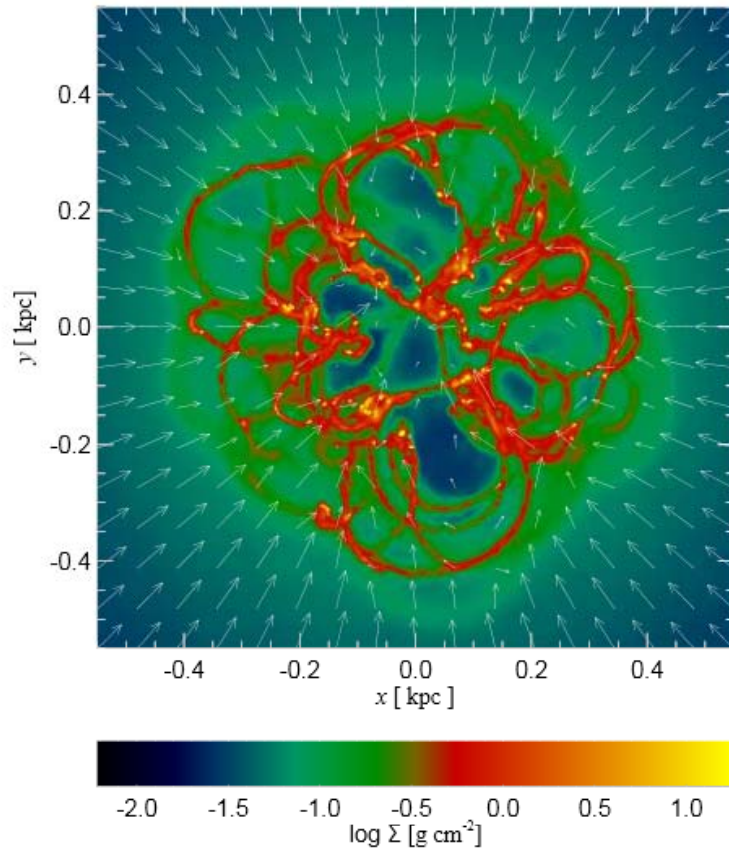
Mrk 231

AGN et aussi starburst

Gaz éjecté 10^7 - $10^8 M_{\odot}$

Flot de $700 M_{\odot}/\text{yr}$

Mode Quasar : simulations multi-phase

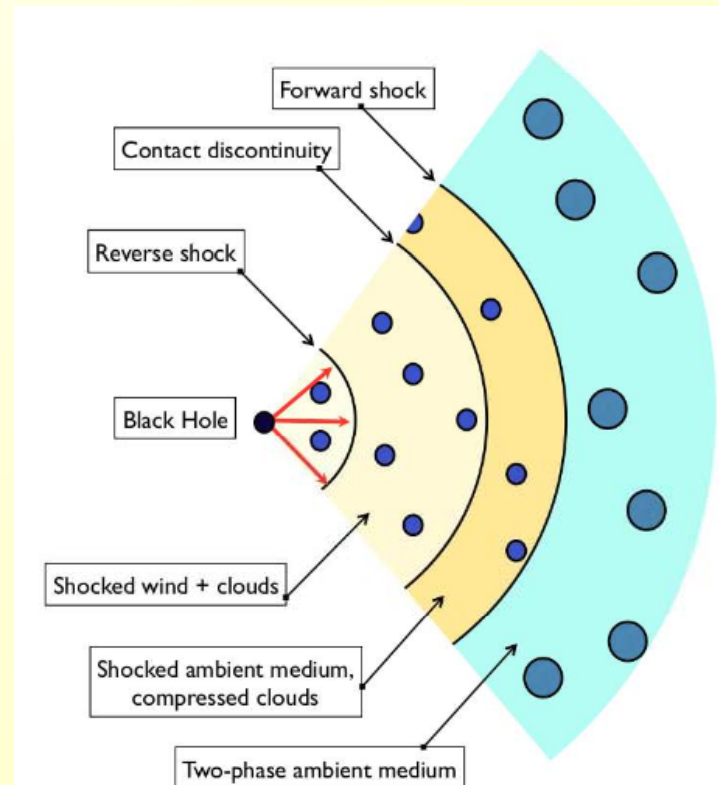


La plupart de l'énergie cinétique s'échappe dans les vides

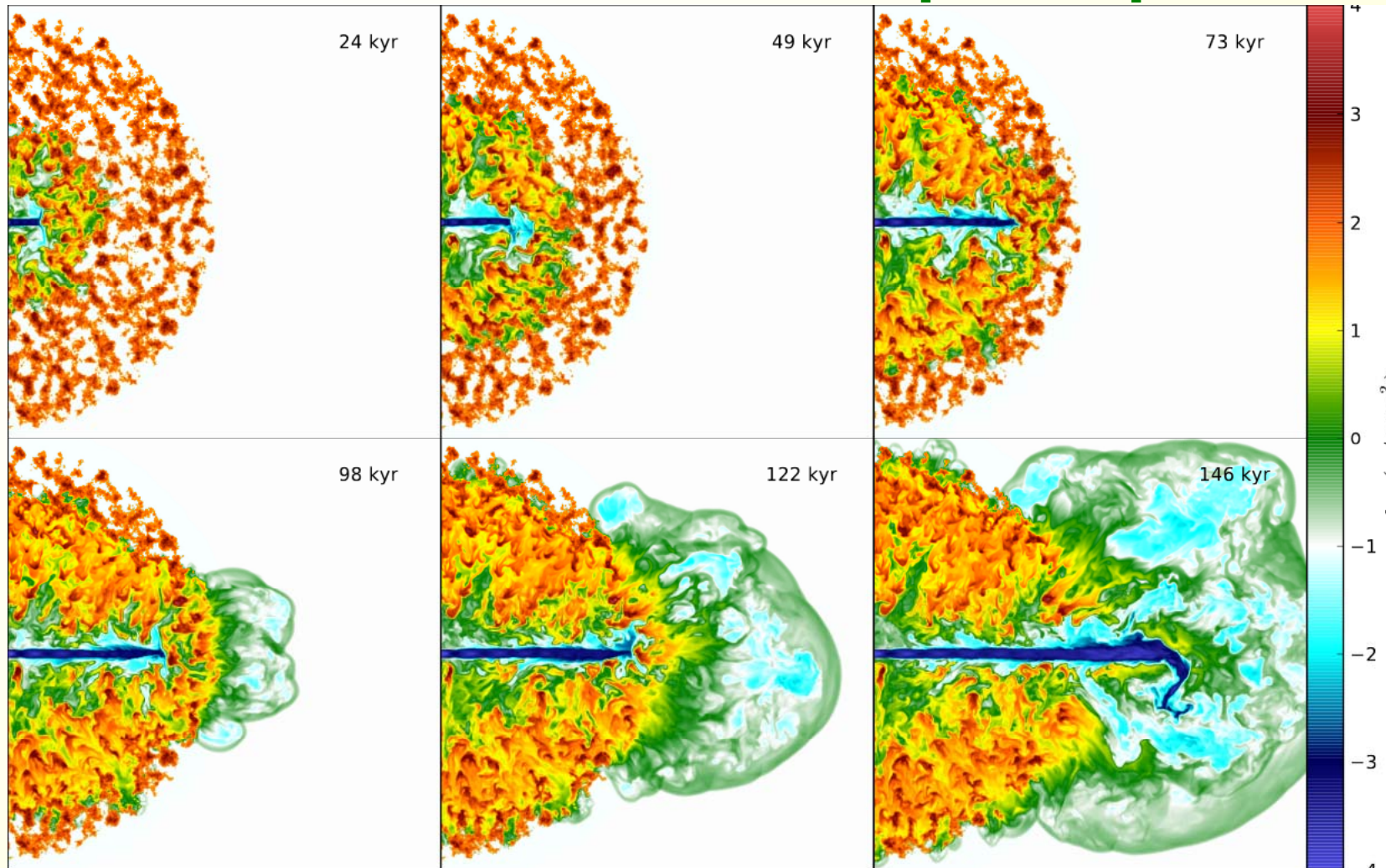
Couplage moins efficace que prévu!

Pourrait donner la relation M - σ

Nayakshin 2014



Structure fractale 2pc-1kpc

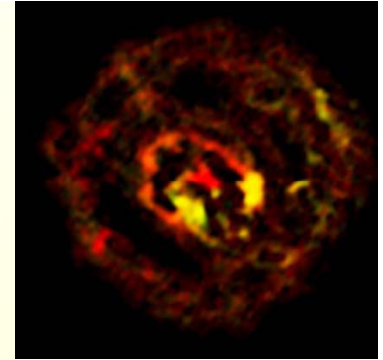


Jets relativistes efficaces *Wagner & Bicknell 2011*

AGN de faible luminosité

NGC 1433: spirale barrée, **CO(3-2) avec ALMA**

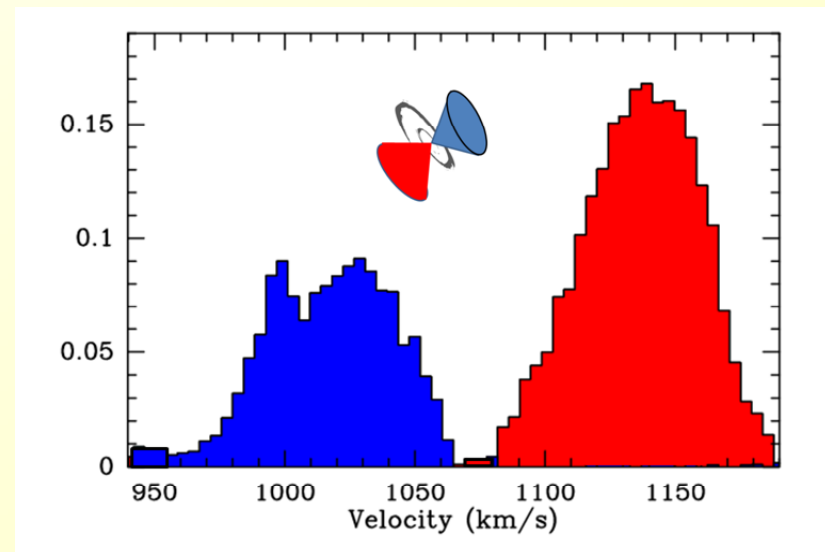
Le gaz moléculaire alimente le trou noir → flot



Le plus petit flot détecté

Flot de 100km/s

7% de la masse = $3.6 \cdot 10^6 \text{ Mo}$

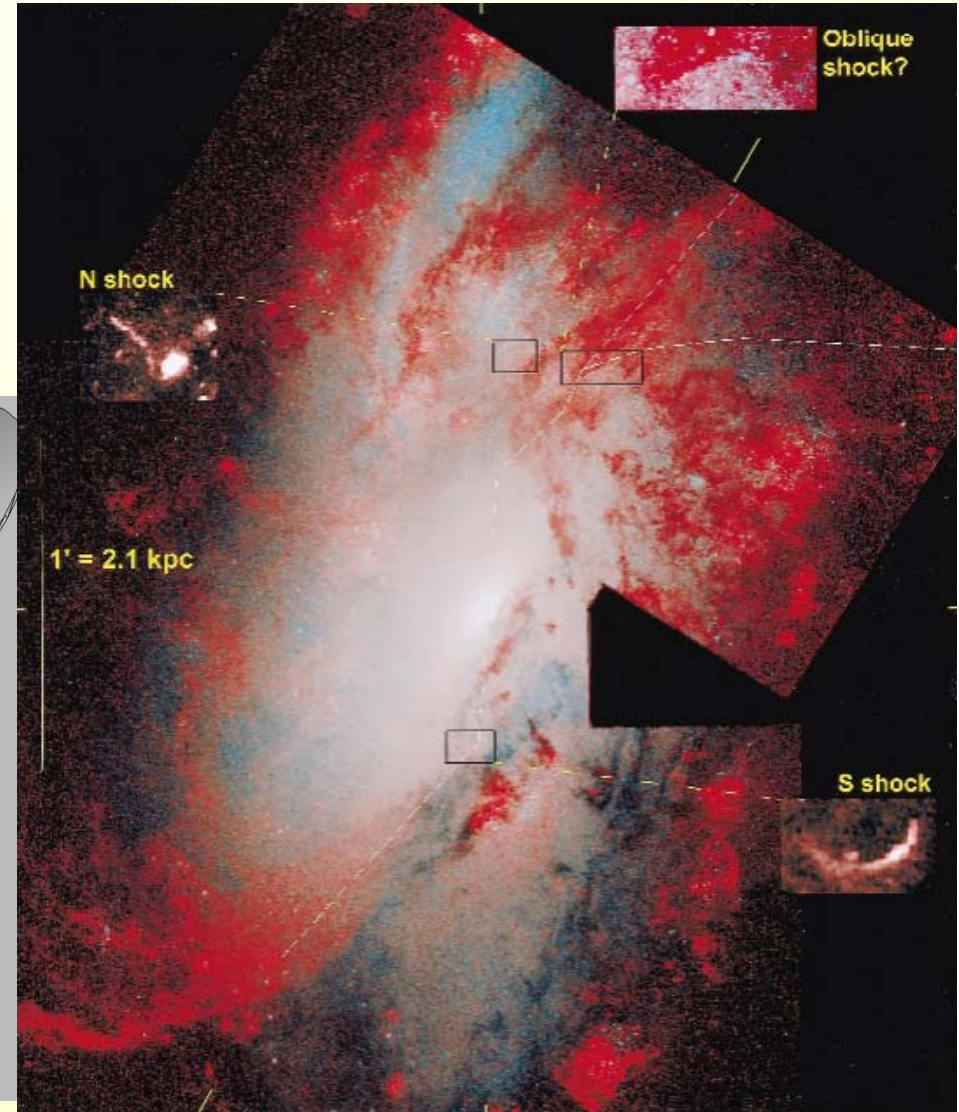
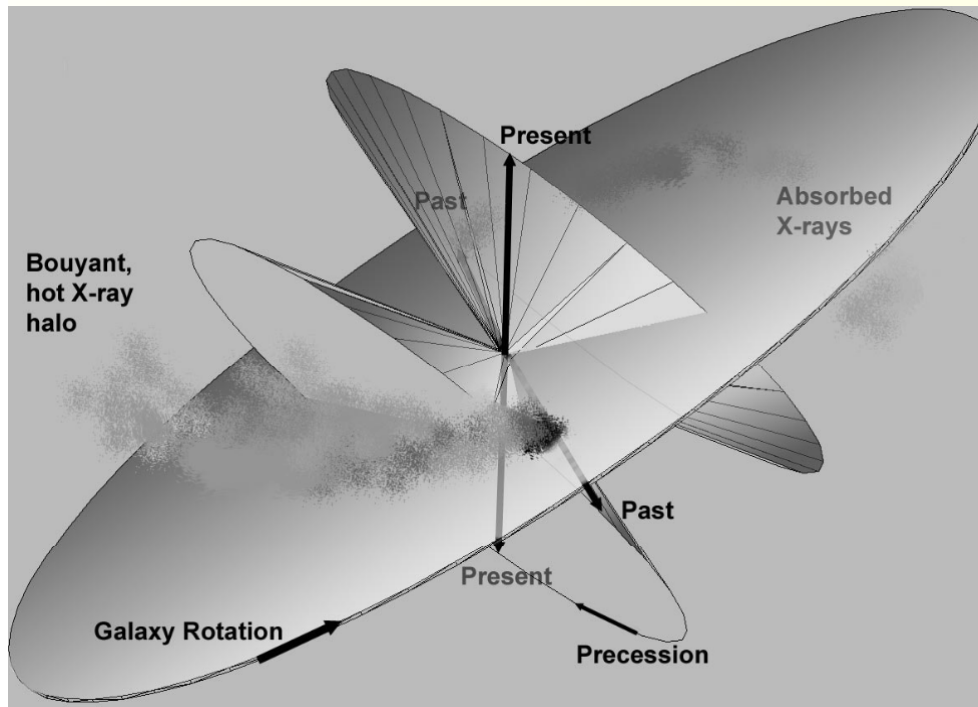


52

Jet dans le plan du disque



NGC 4258 Cecil et al 2000



CONCLUSION



- Les trous noirs massifs croissent en symbiose avec les galaxies
- Les flots de gaz sont très fréquents dans les phases actives
Le trou noir rejette une partie plus ou moins grande de sa nourriture
- **Vents très rapides UFOs ($v > 10\,000$ km/s)**
- **Entraînent le gaz moléculaire: beaucoup plus de masse (10^7 - $10^9 M_{\odot}$)
Que le flot de gaz ionisé**
- Modèrent la formation d'étoiles, pourraient expliquer que les baryons sont en dehors des galaxies

Univers violent et variable

