



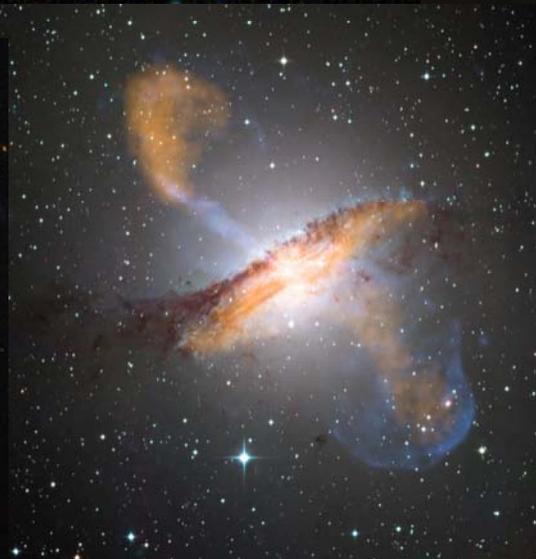
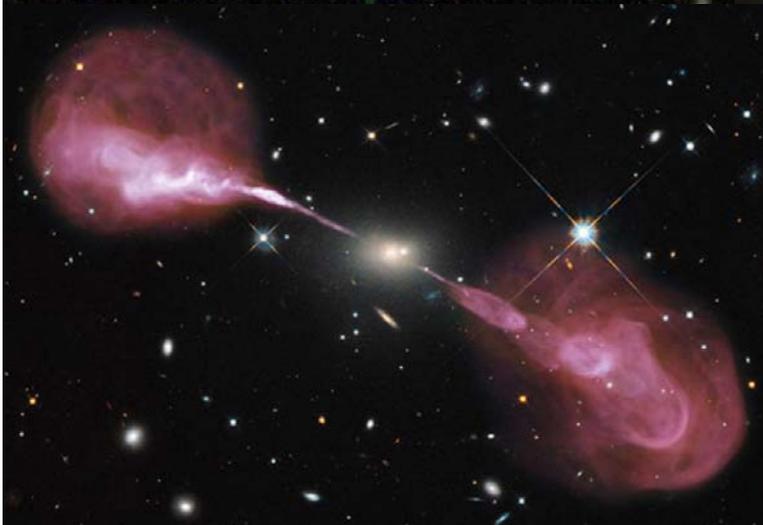
Atacama Large Millimeter/submillimeter Array



# Les trous noirs super massifs trop gloutons



HST



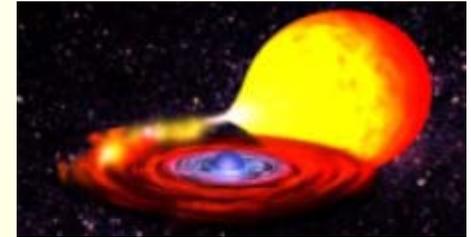
Françoise Combes  
**Observatoire de Paris**

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

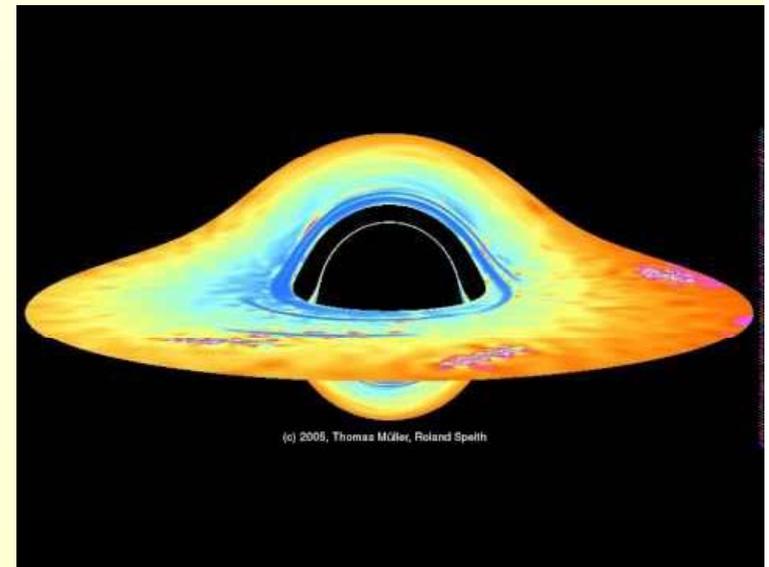
Pour un TN de  $1 M_\odot$ ,  $R_s = 3\text{km}$

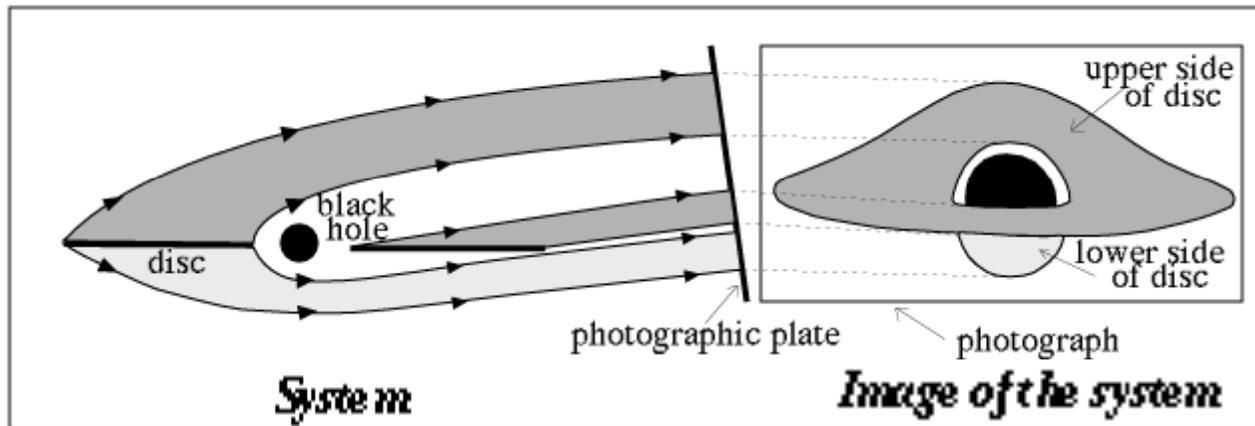
*Un trou noir n'a pas de cheveux!*

Masse et spin seulement

Maximum spin mesuré dans N1365

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

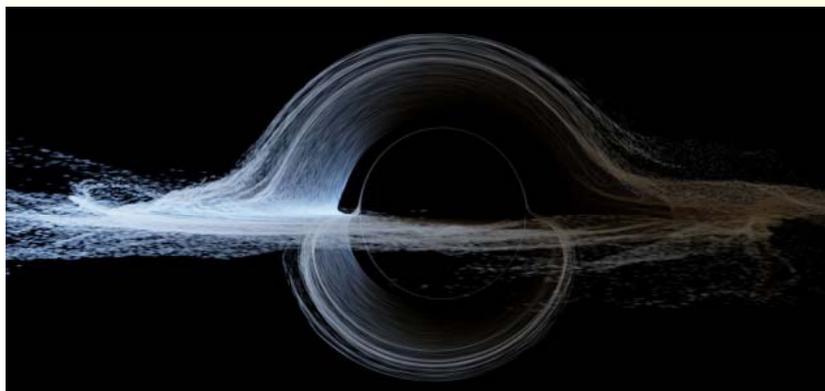
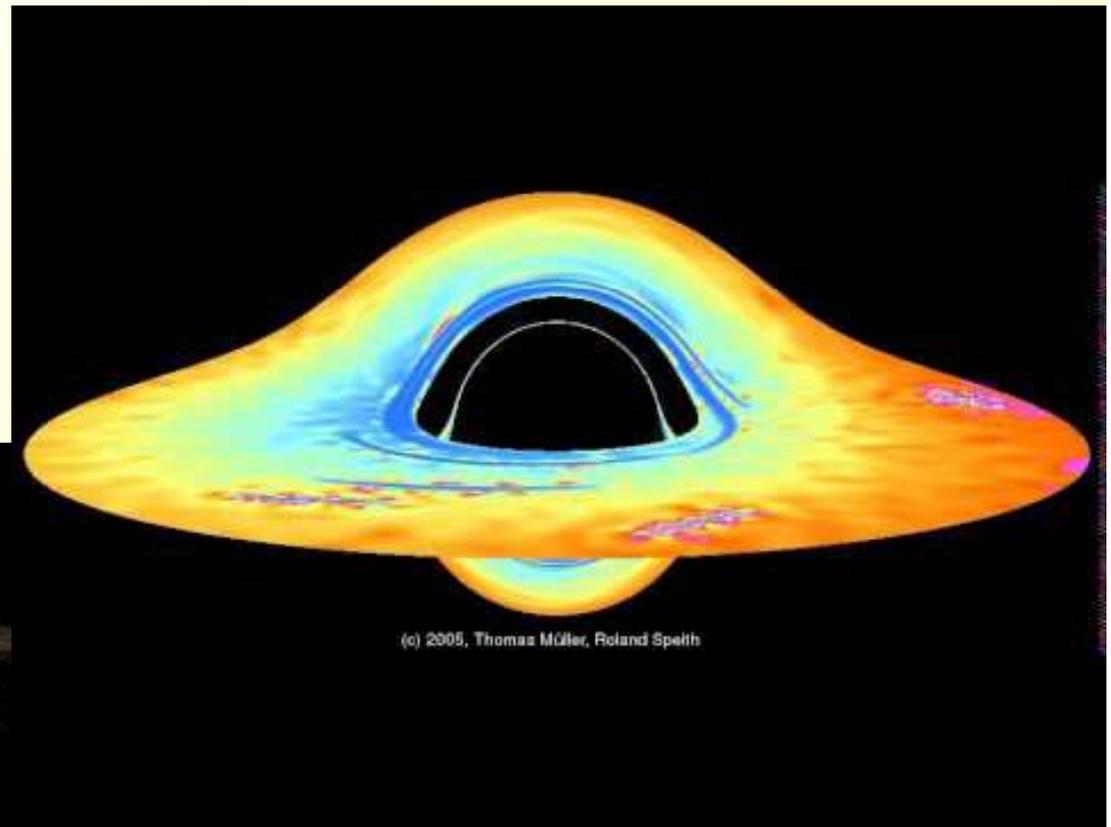




Le trou noir est entouré d'un disque brillant  
On l'observe à  $10^\circ$

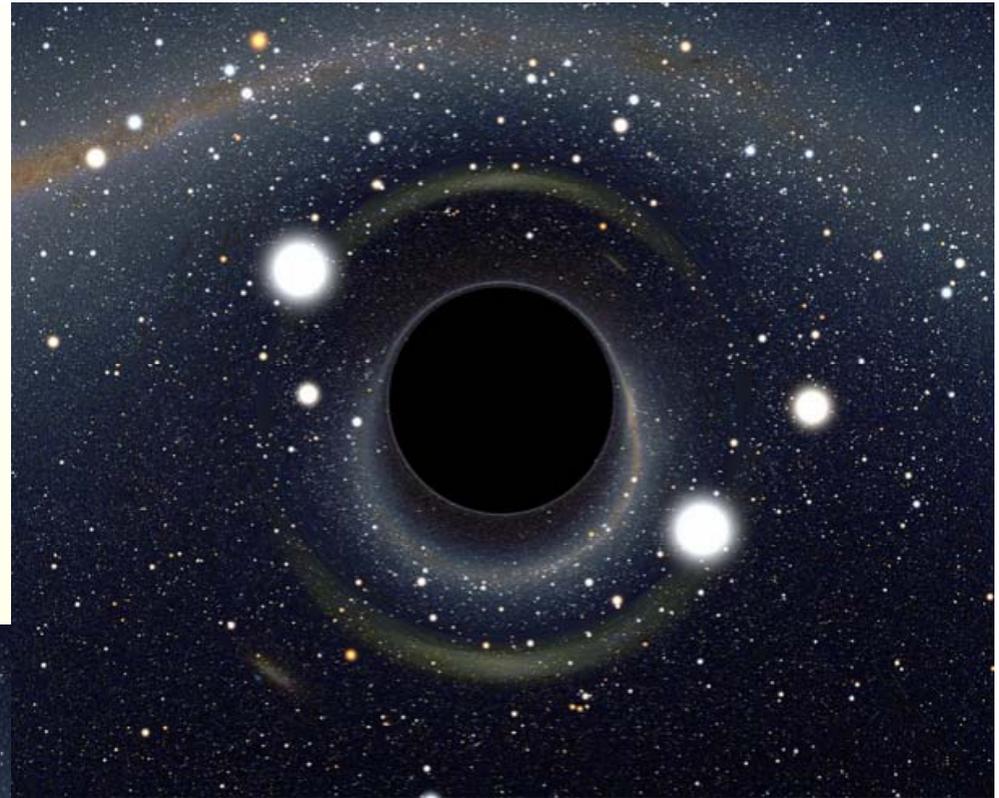
Le disque est complètement déformé, par rapport à un astre classique

On voit aussi le dessous!



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

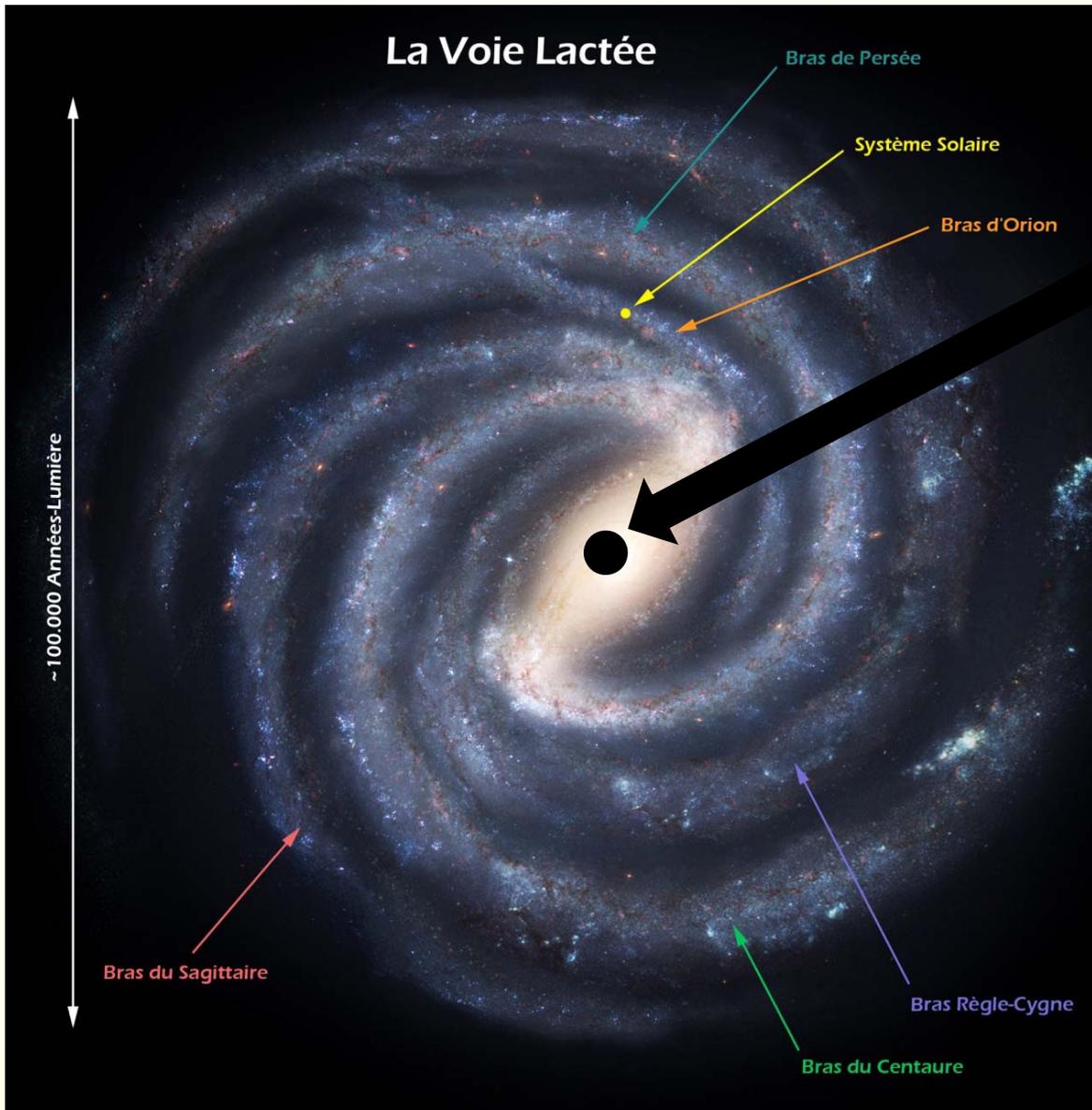
Nuages de Magellan et  
Voie Lactée



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

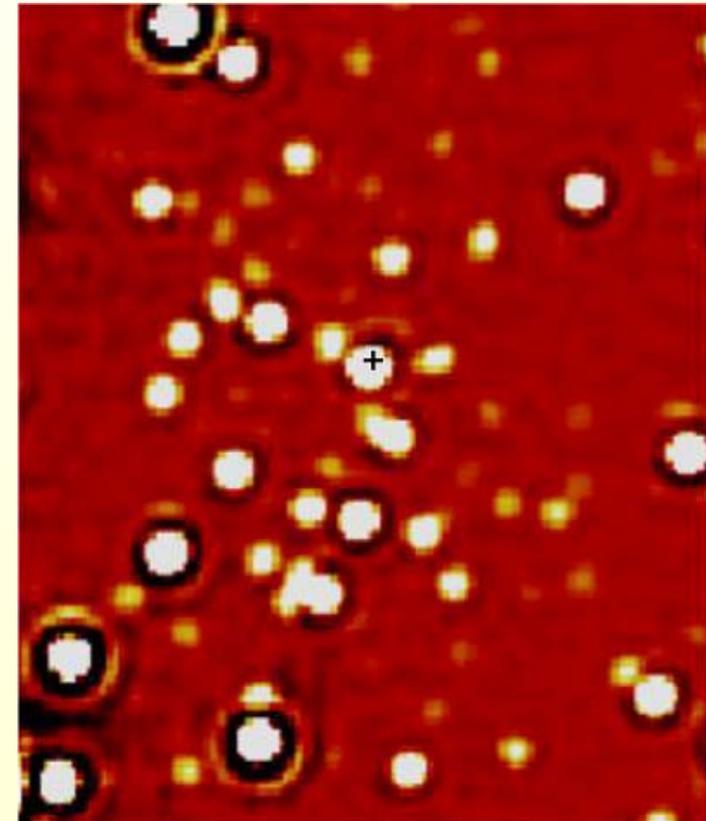


1 année lumière

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 (μCen11)  
(VLT YEPUN + NACO)

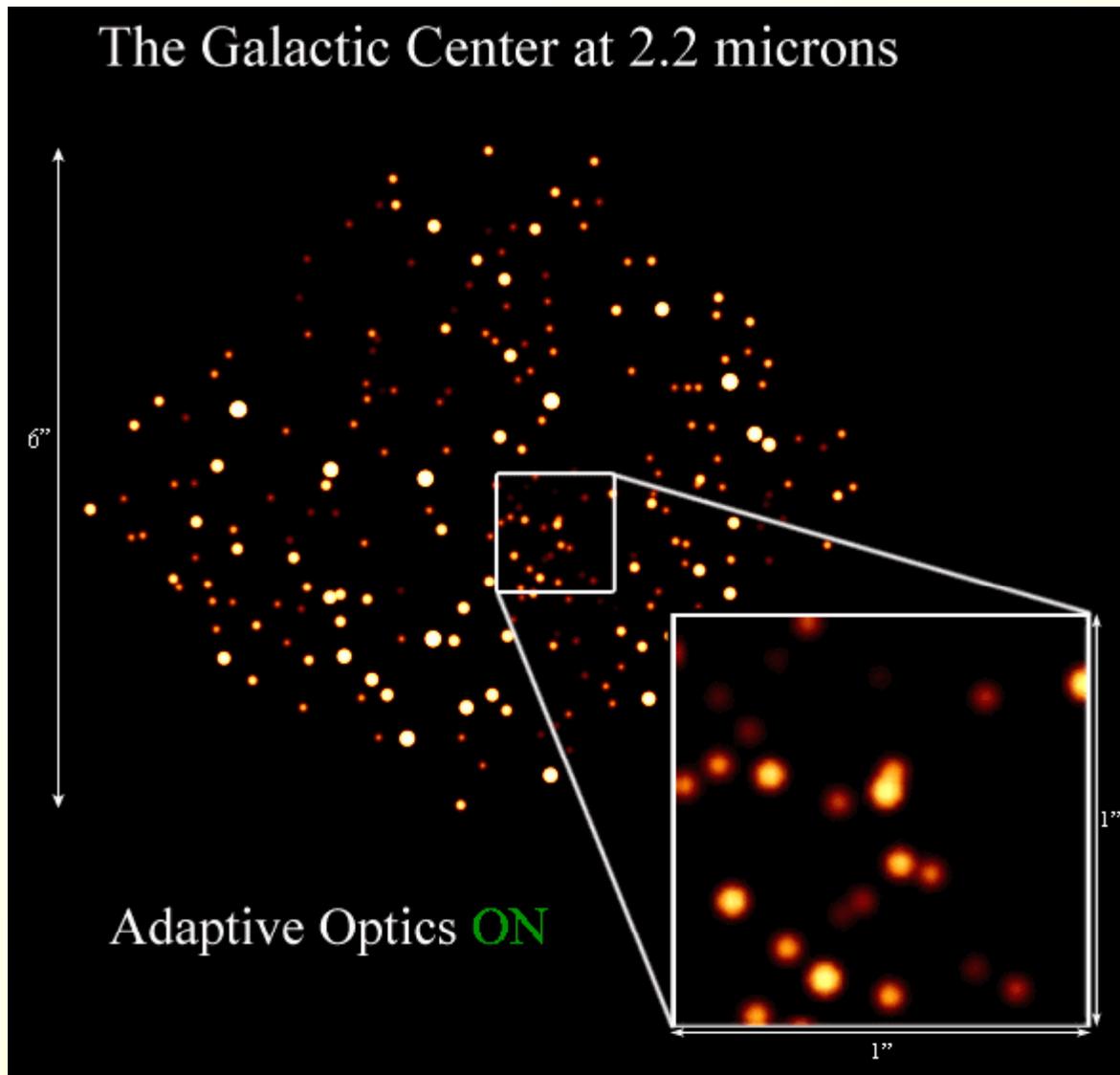
ESO PR Photo 23b/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



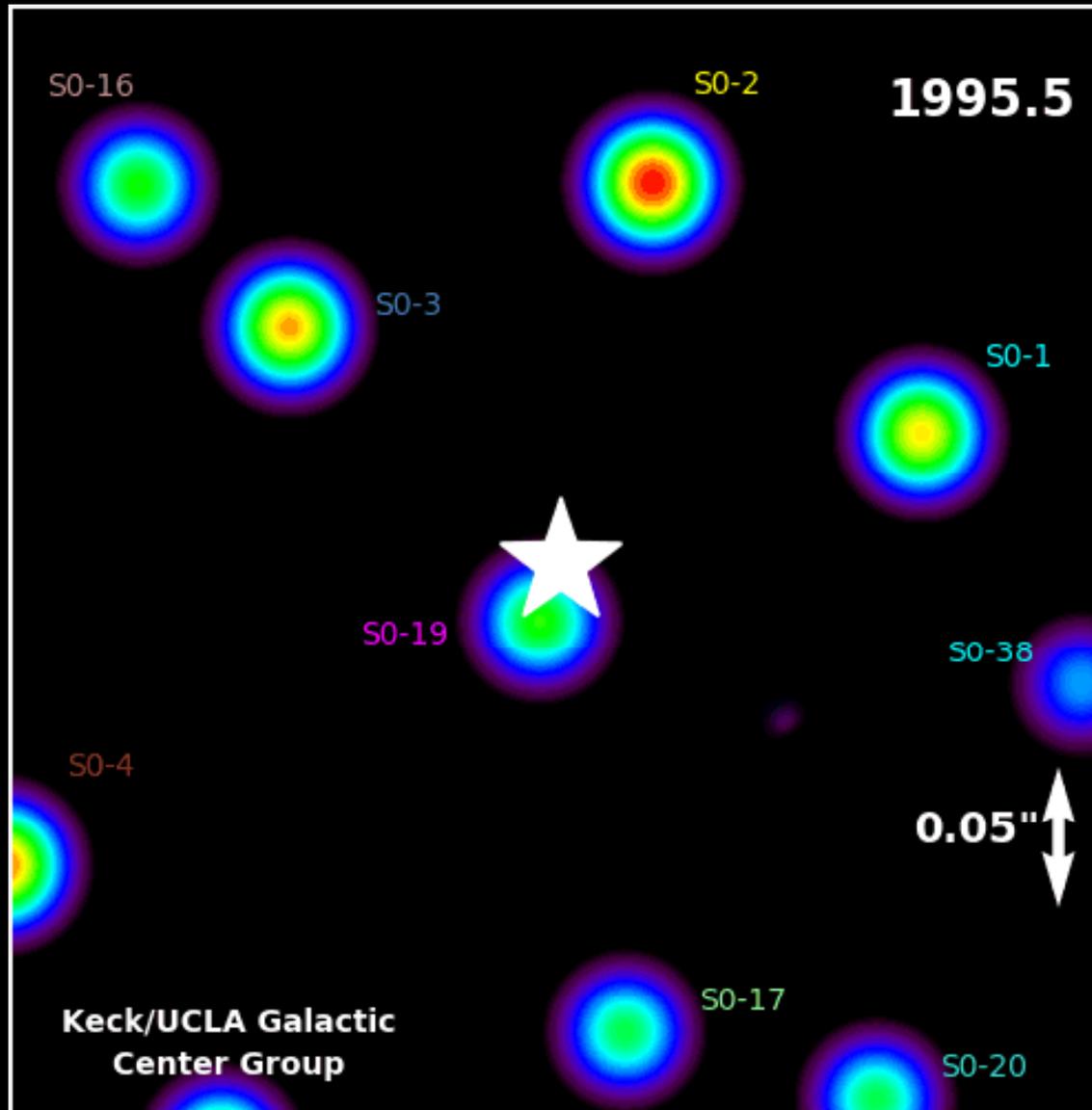
VLT-optique adaptative

# Les effets de l'optique adaptative

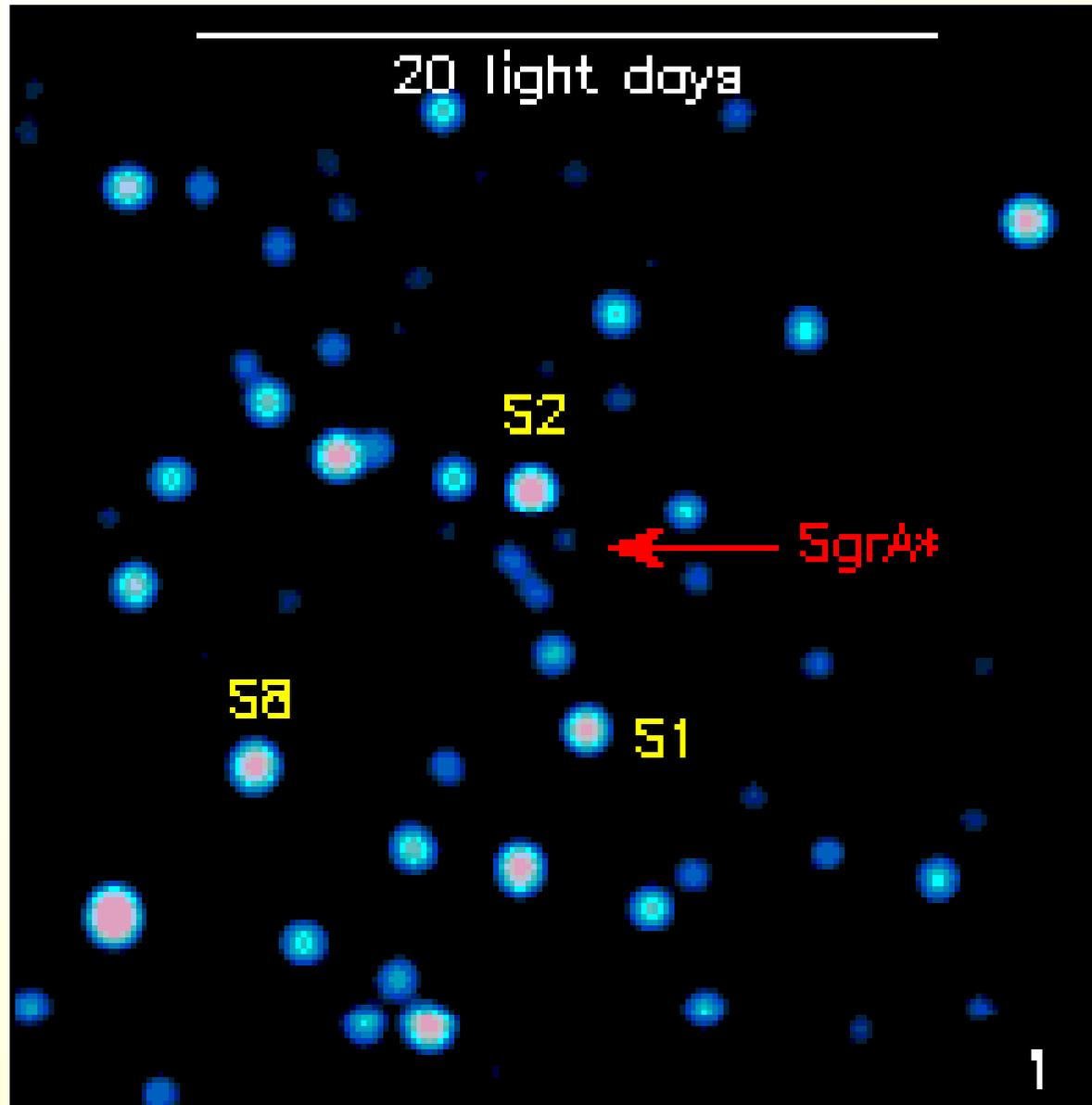


Corrige des  
turbulences de  
l'atmosphère

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



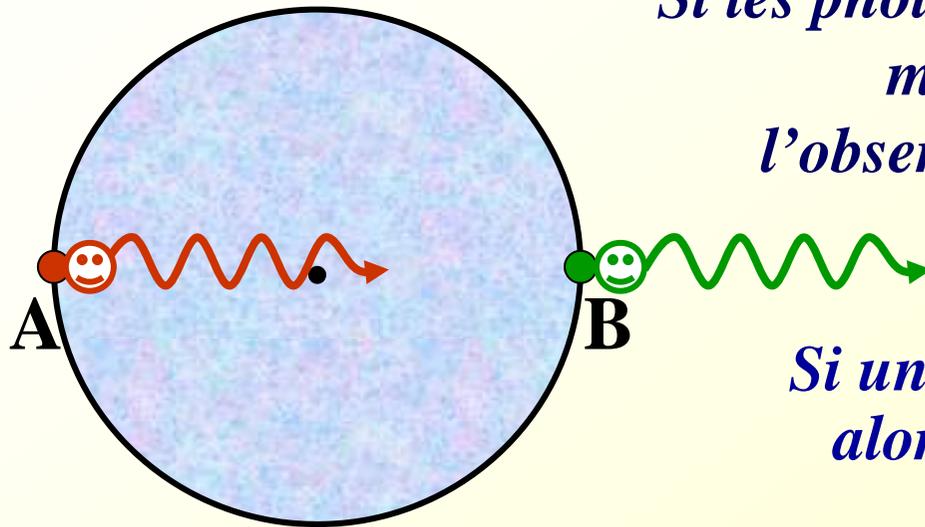
# Sursaut Infrarouge du trou noir de la Galaxie



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

# Variabilité et taille

## Variabilité et temps de parcours



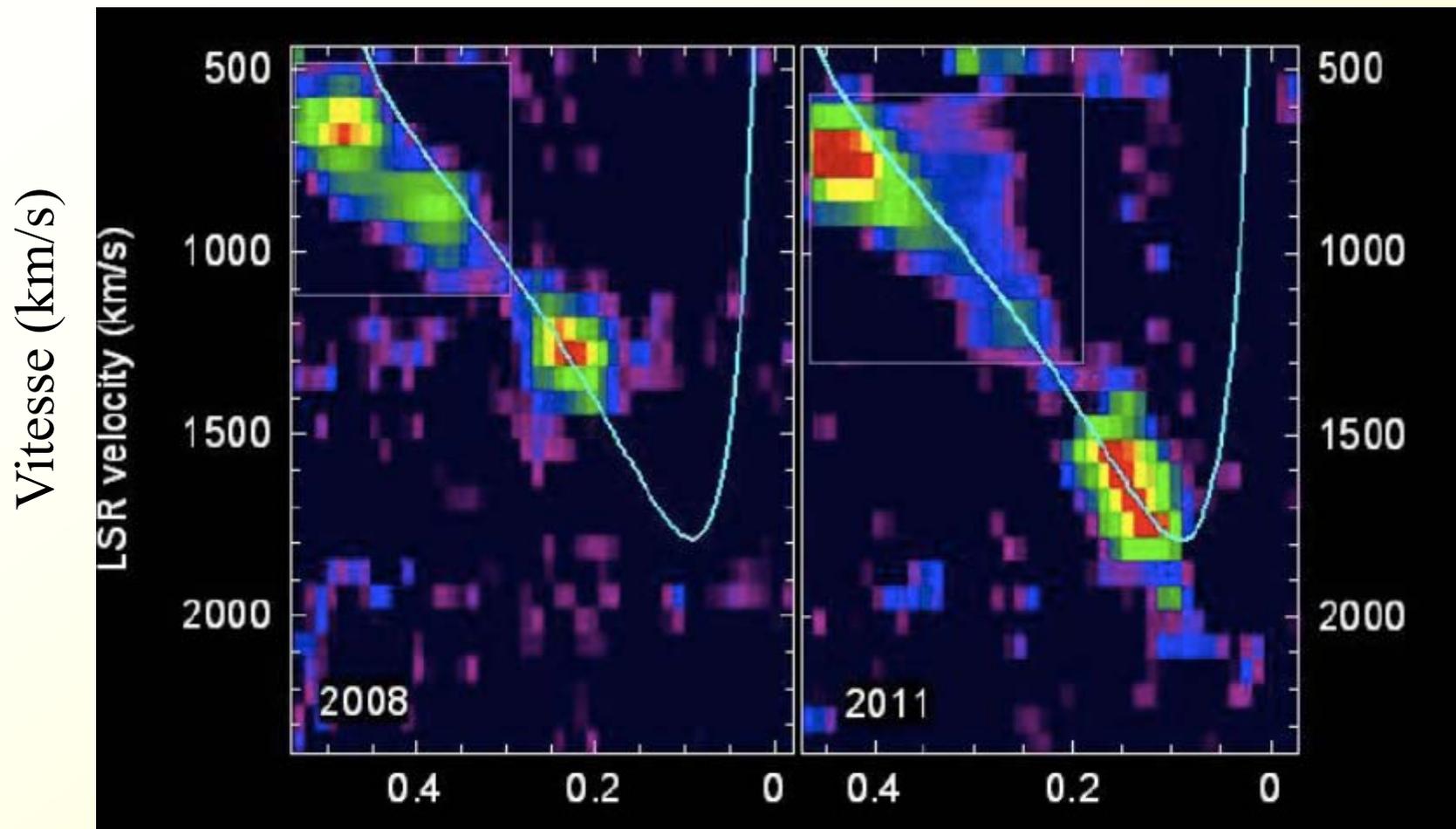
$c =$  vitesse de la lumière  
 $d =$  diamètre

*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  $\delta t$ , alors on voit un changement sur une échelle  $t + \delta t$ .*

*Ce qui donne une limite supérieure pour le diamètre,  $d$ , car le  $\delta t$  mesuré doit être supérieur au temps de trajet de la lumière.*

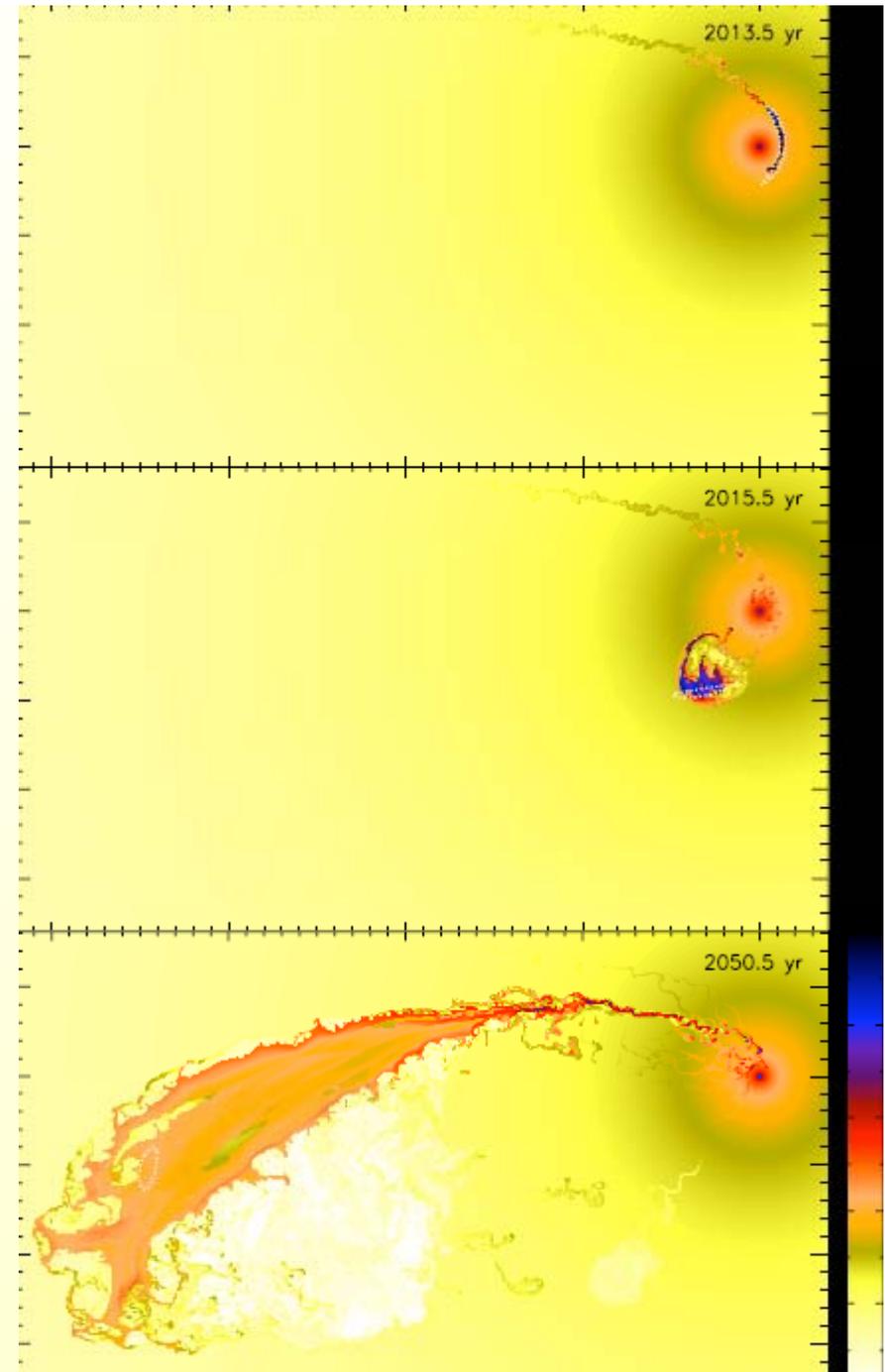
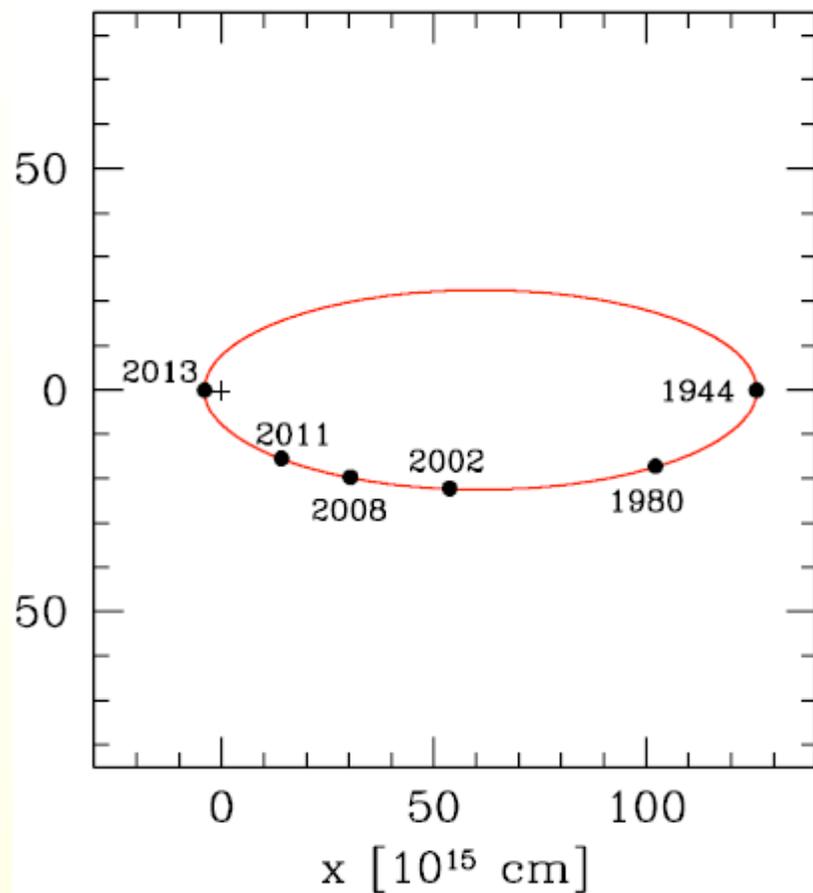
# Découverte d'un nuage de gaz en 2011



Distance au trou noir en arcsec (=0.1 al)

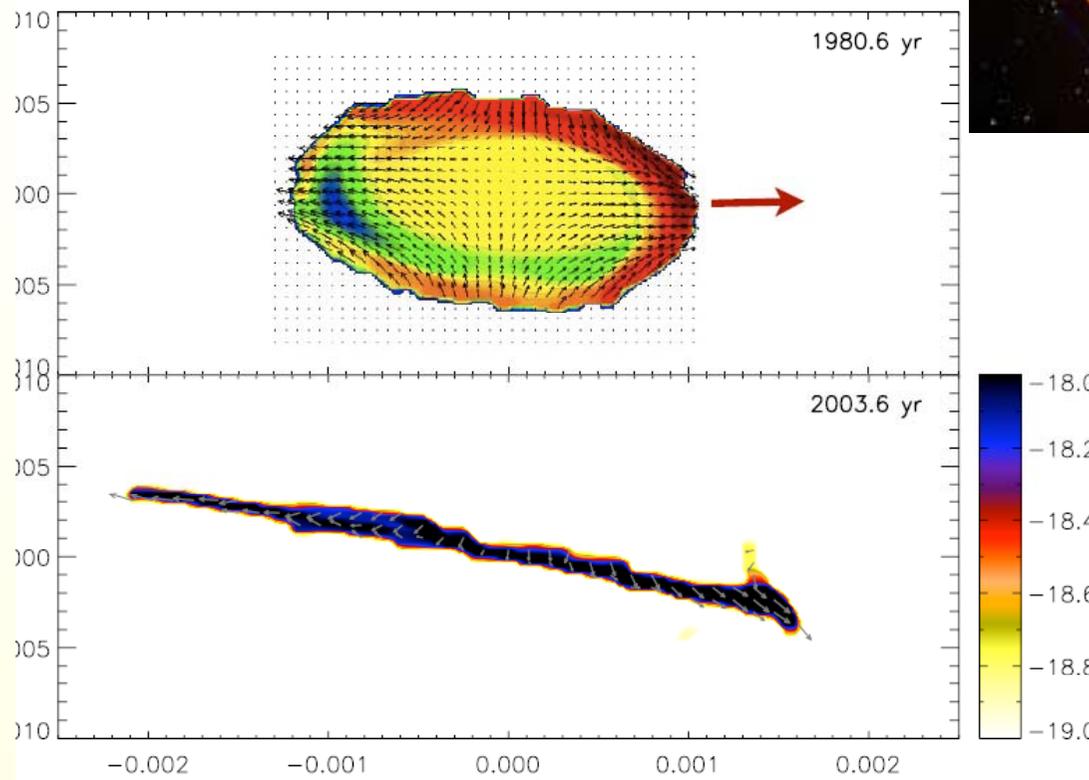
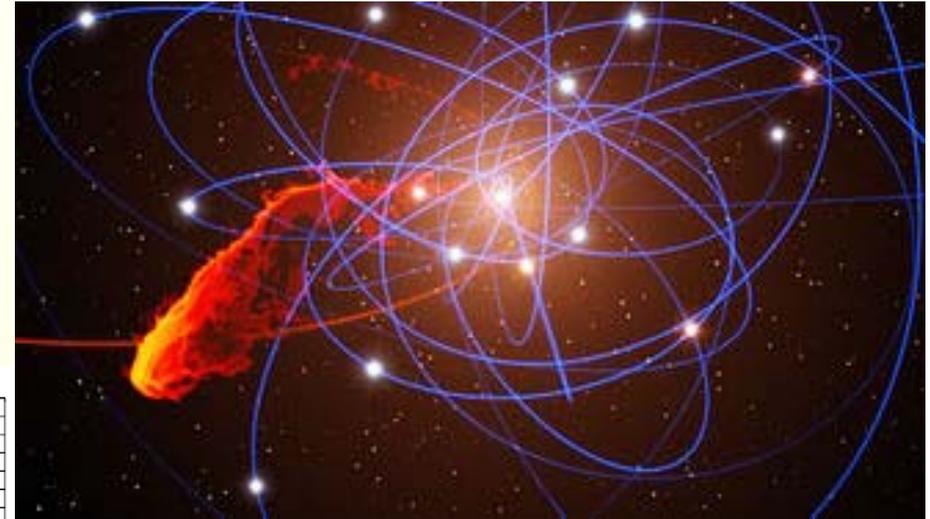
# Orbite du nuage de gaz ( $10^{-5} M_{\odot}$ )

137 ans de période



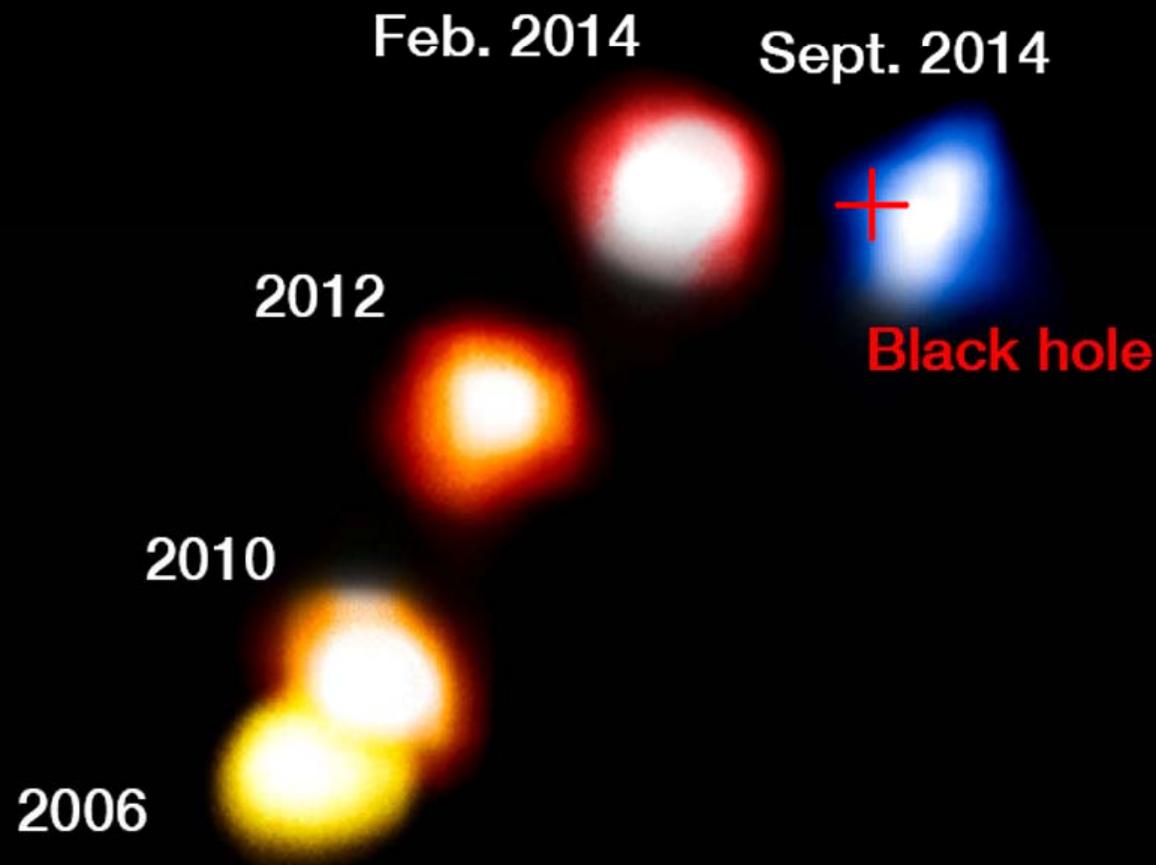
# Comment le gaz est arrivé?

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

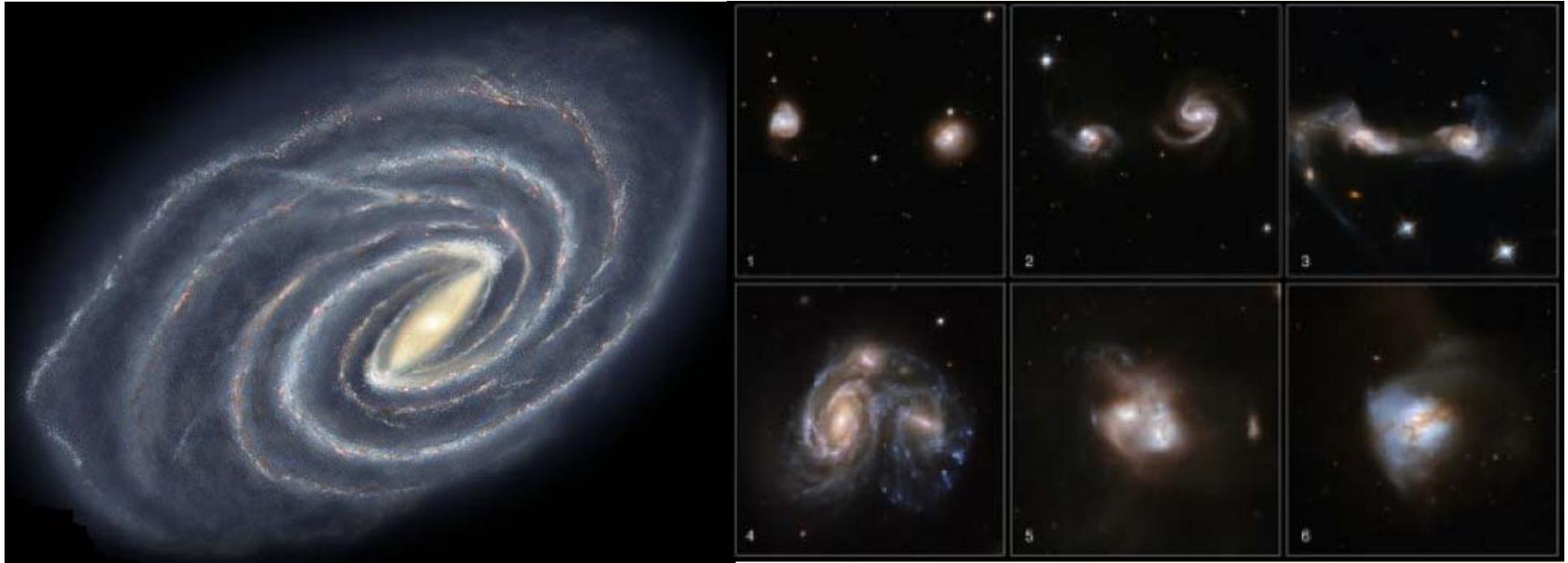
→ Il existe une étoile au centre

# Interaction et fusion avec Andromède

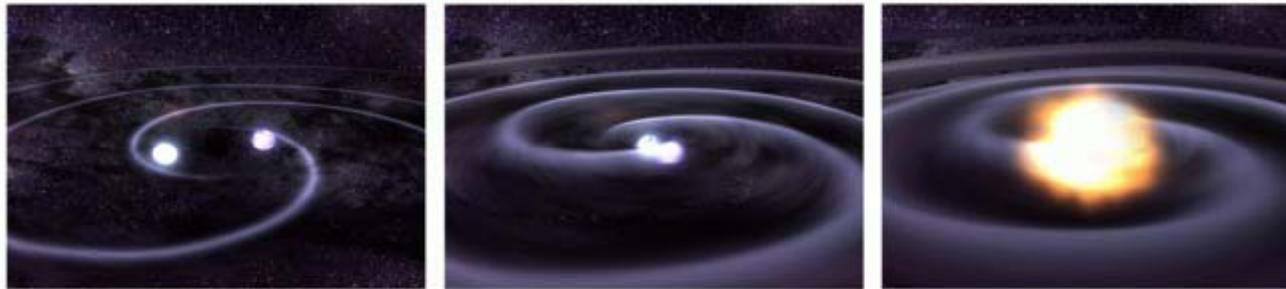


# Perspectives pour la Voie lactée...

Dans quelques 3 Ma



Fusion des trous noirs

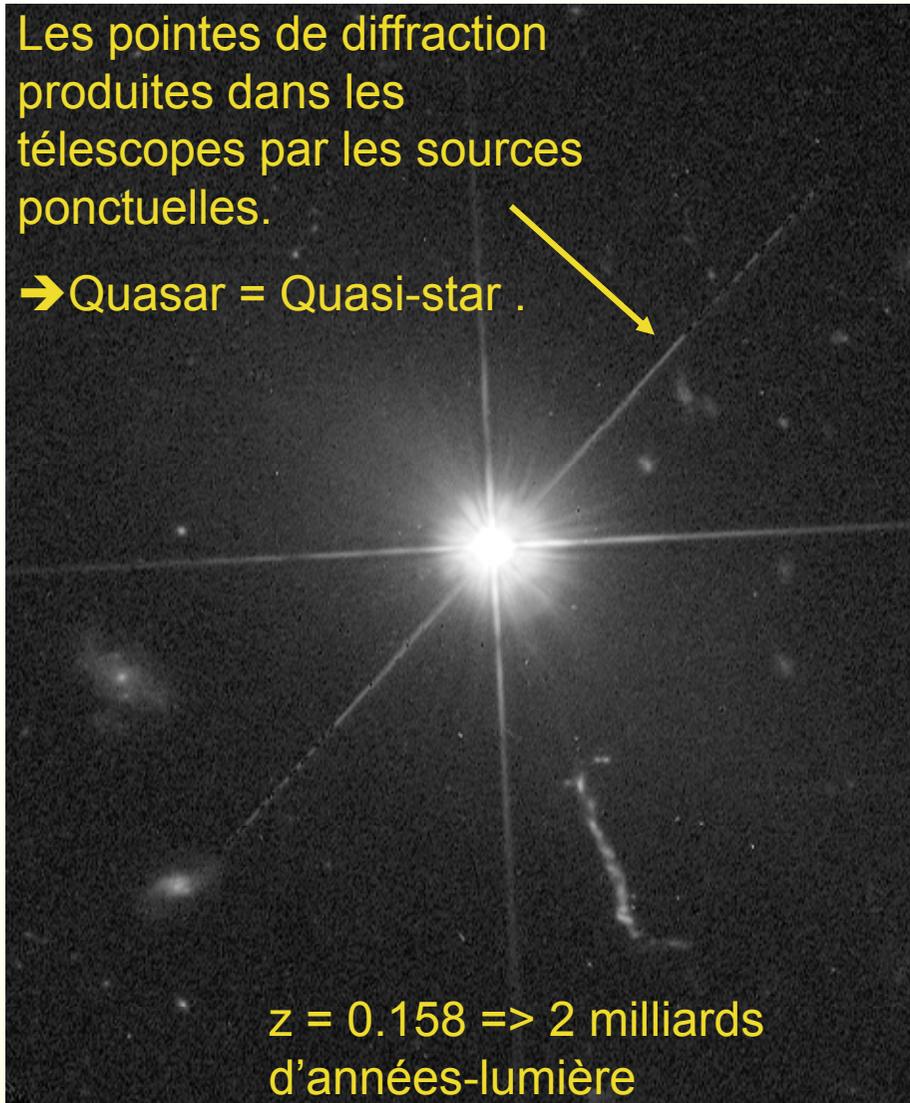


→ Ondes gravitationnelles

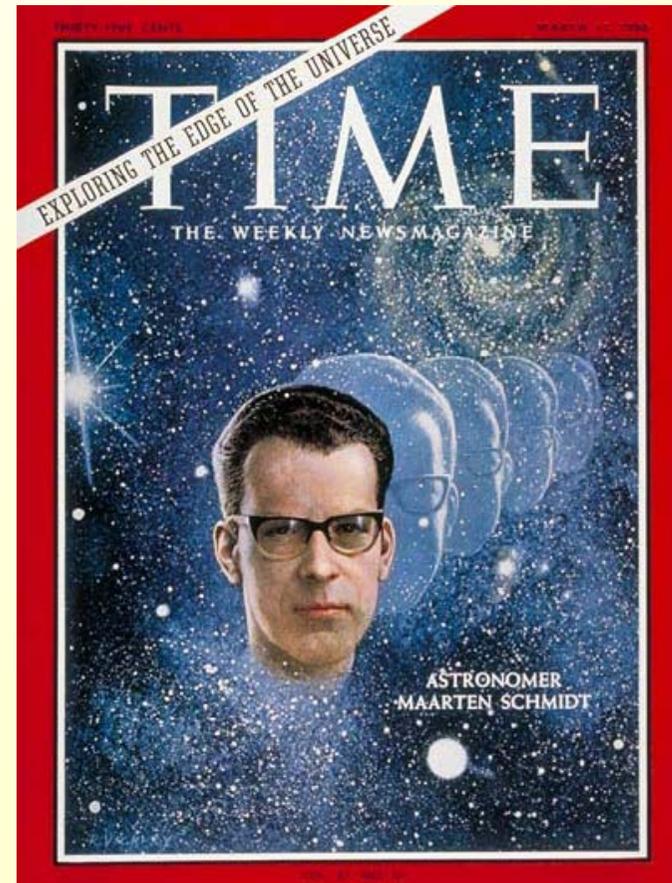
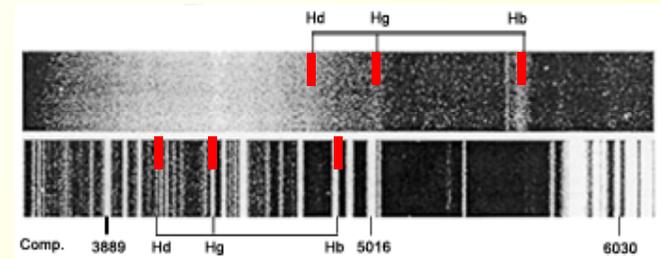
# Découverte par Maarten Schmidt du premier quasar 3C273 en 1963

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

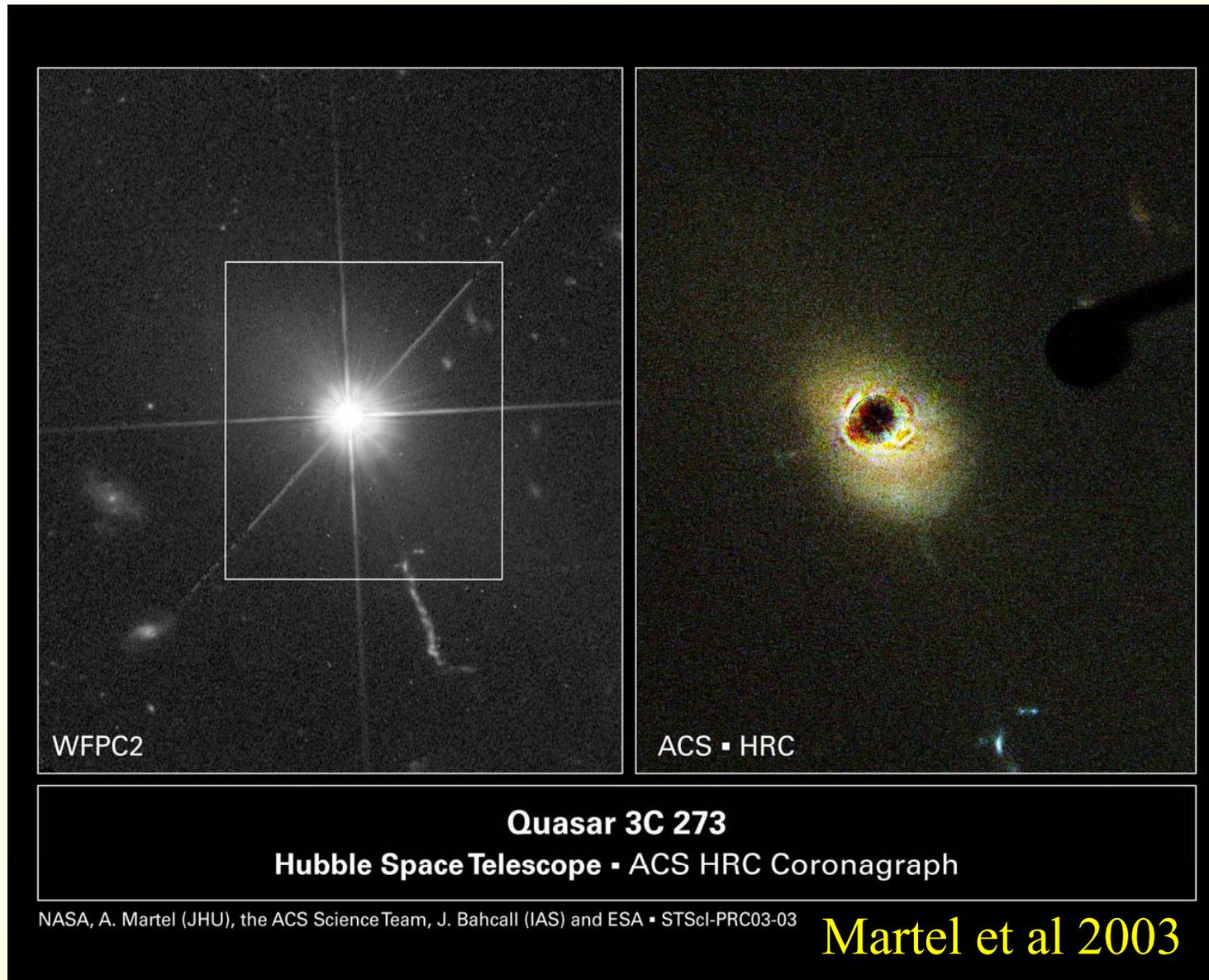
→ Quasar = Quasi-star .



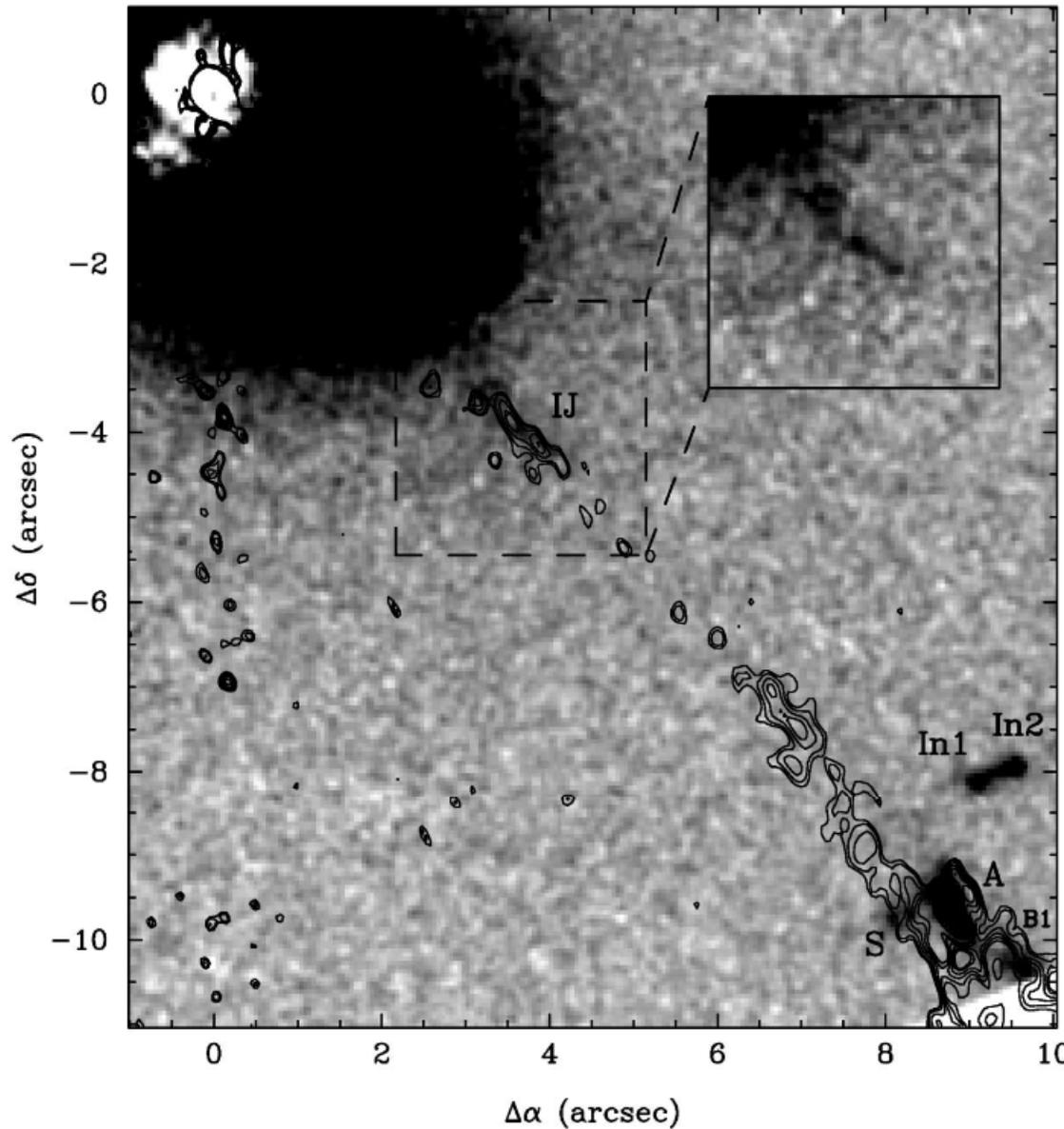
$z = 0.158 \Rightarrow$  2 milliards d'années-lumière



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

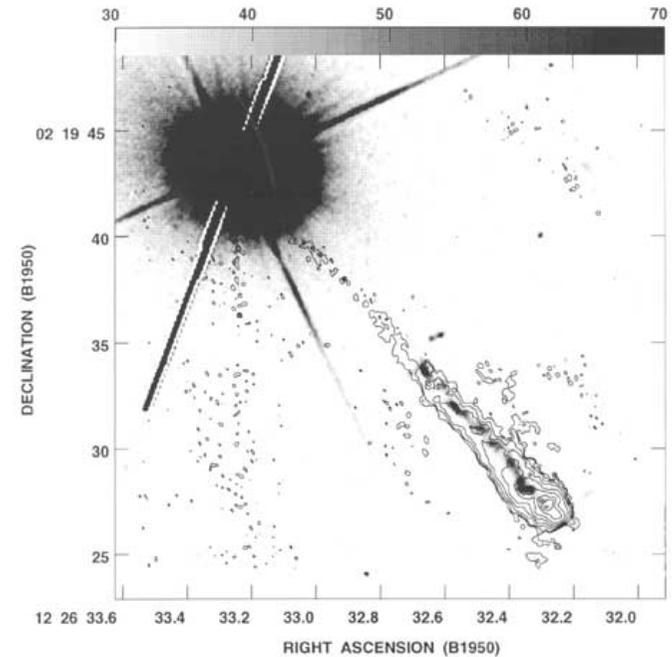


# Superposition image Radio

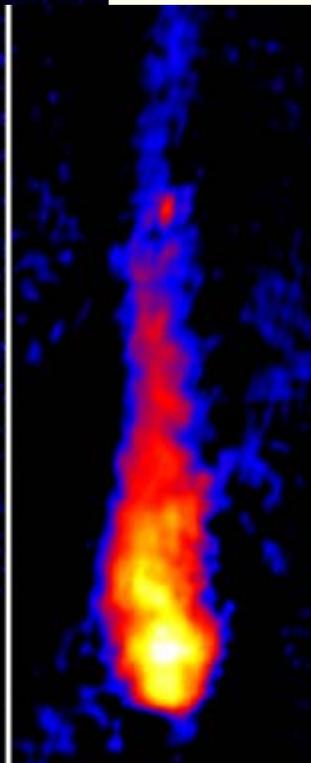
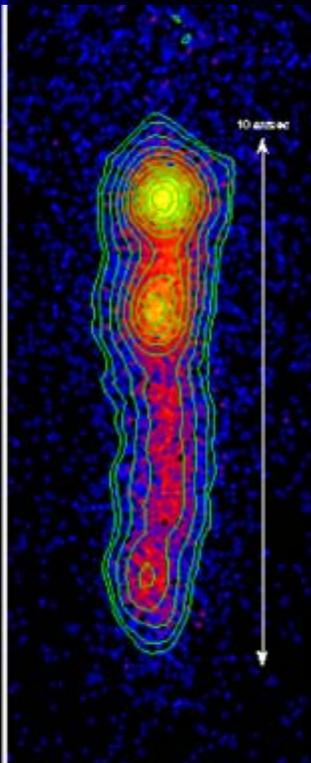
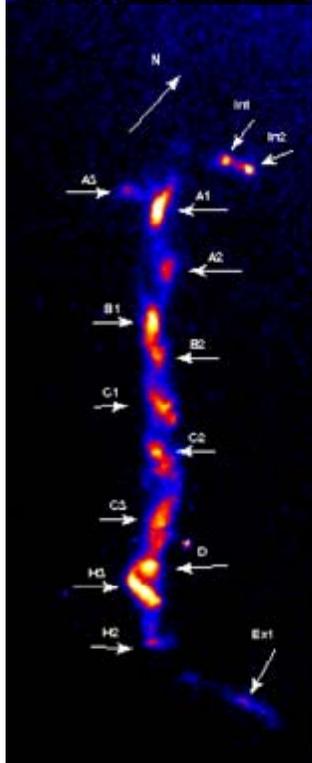
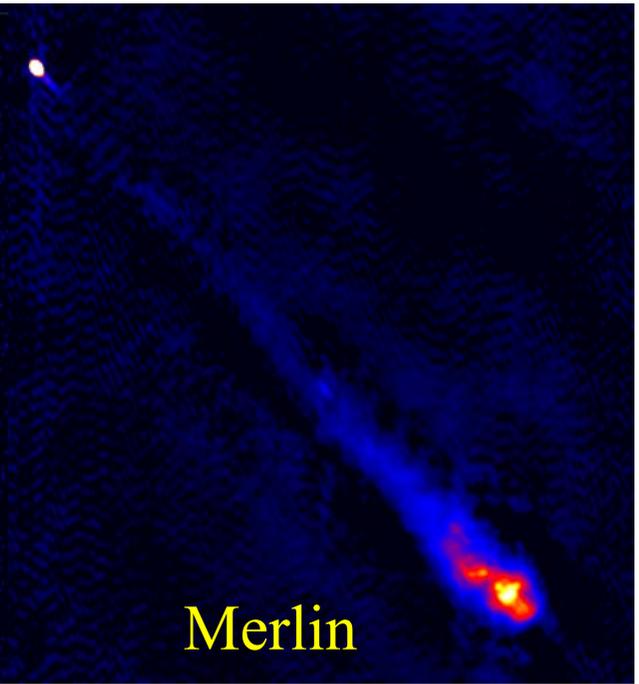
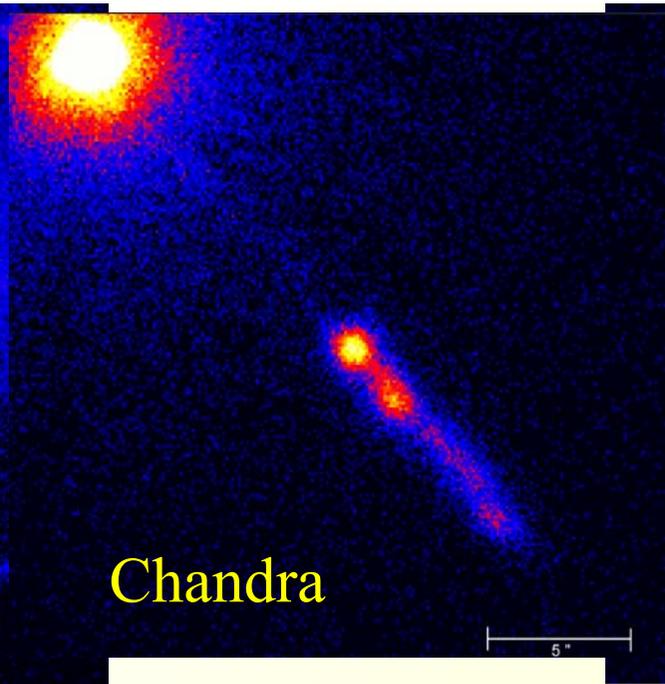
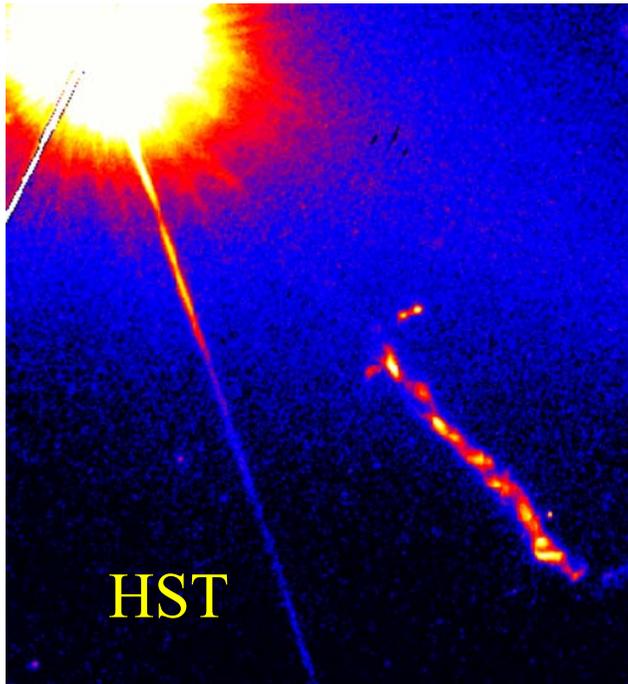


Jet radio: contours  
// jet optique (HST)

67kpc de long

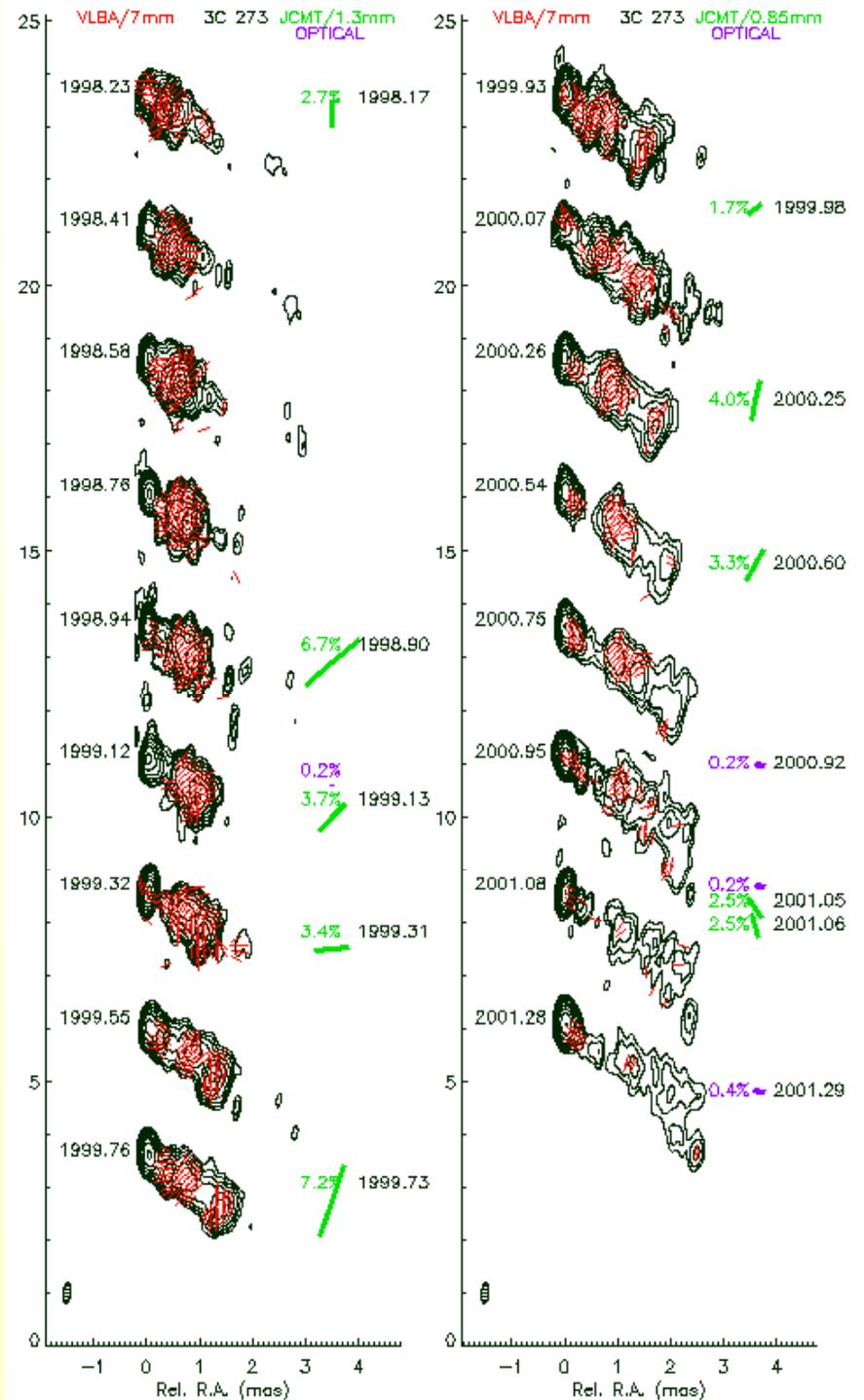
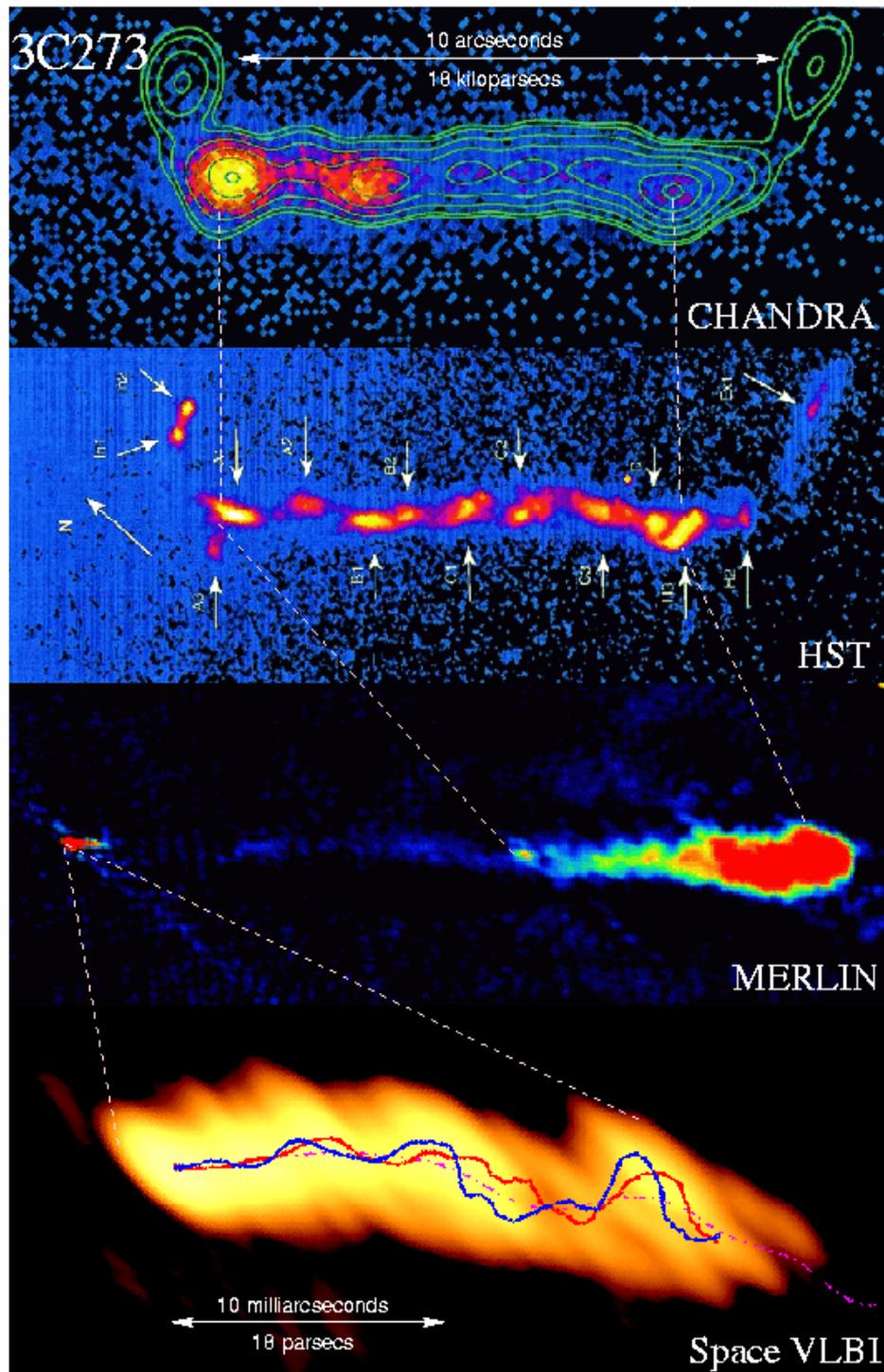


HST+Merlin



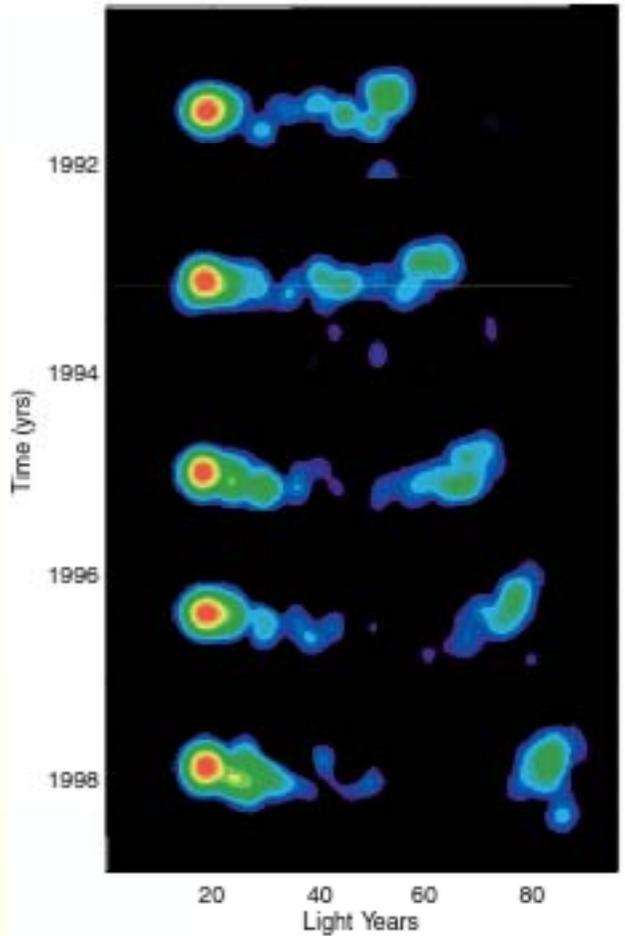
3C273, le plus proche des Quasars  
Le plus brillant (*1000 fois une  
Galaxie comme la notre*)

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

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

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

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

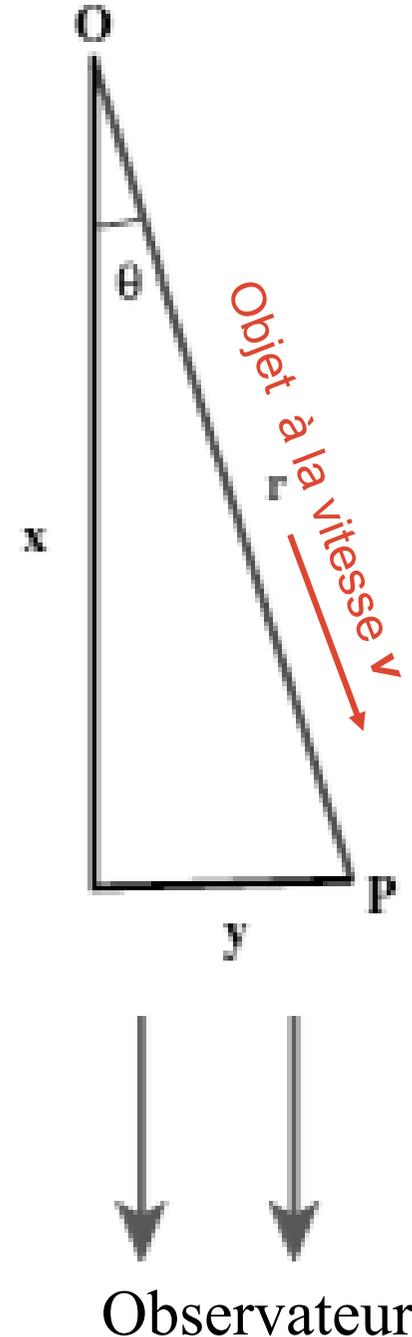
Vitesse apparente sur le ciel

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

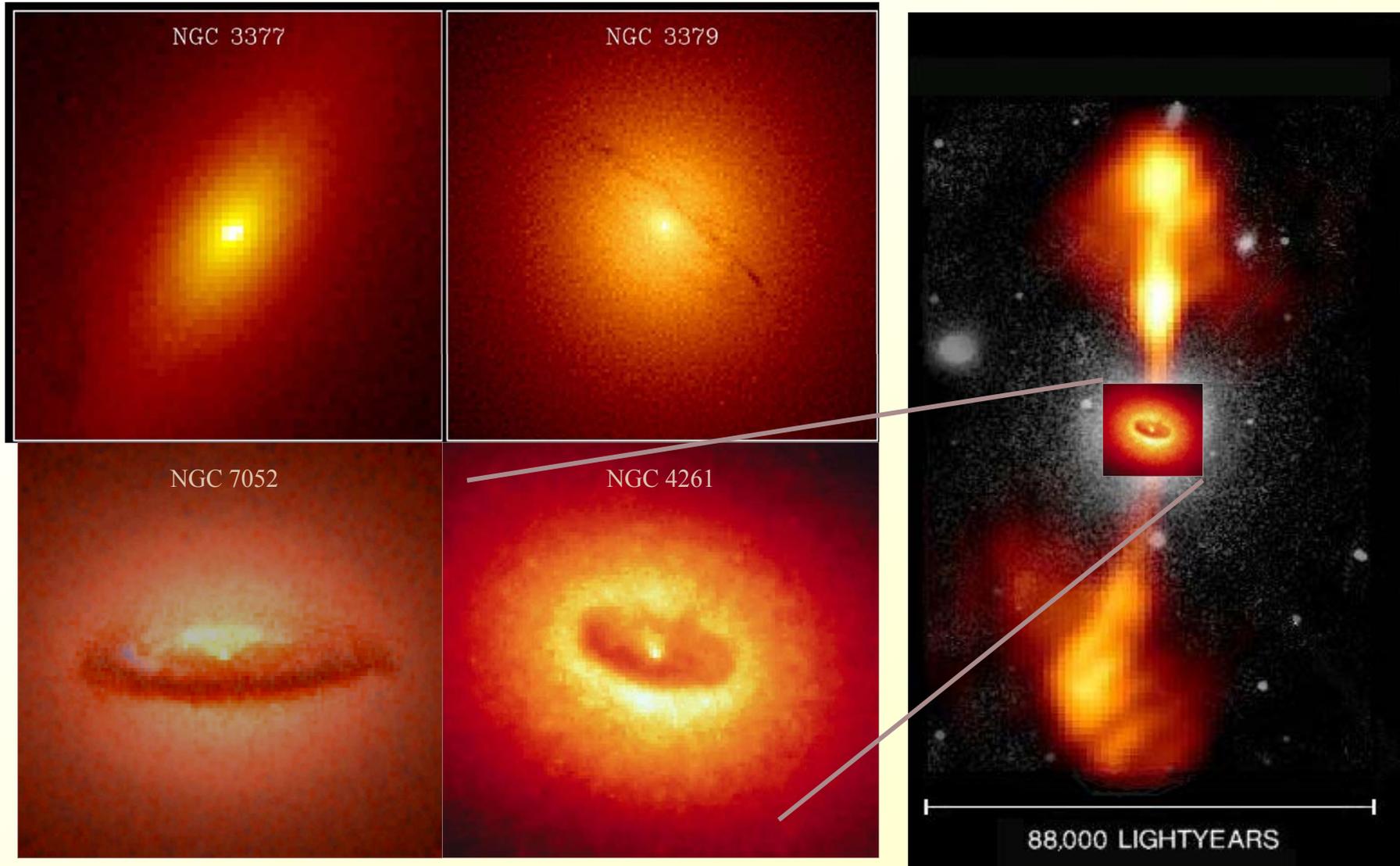
$$v_{app} = (v \sin \theta) / (1 - \beta \cos \theta)$$

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

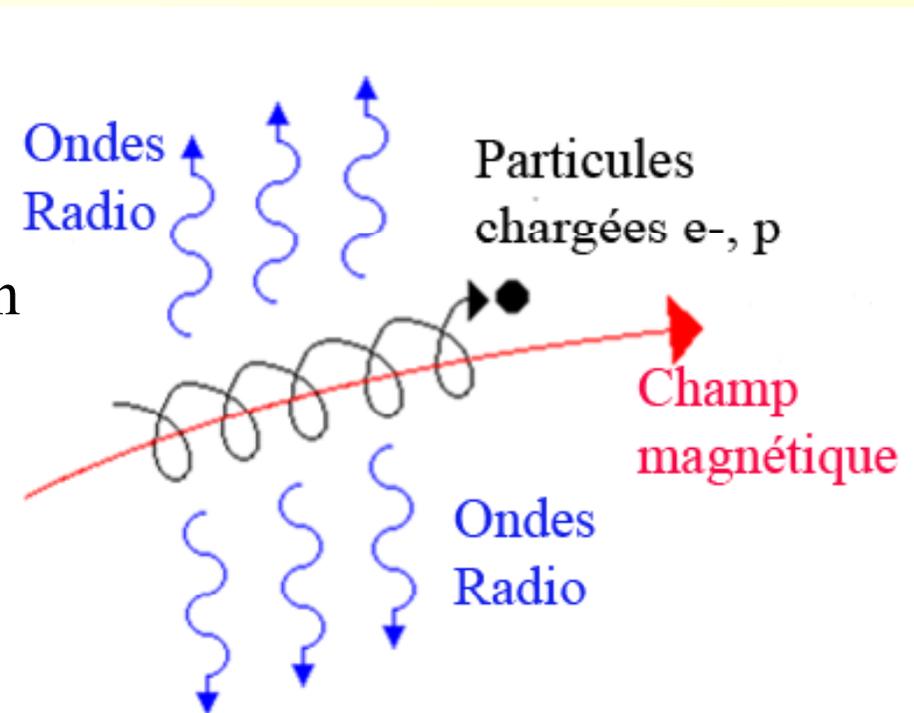
Pour un électron d'énergie

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

la fréquence caractéristique d'émission vaut

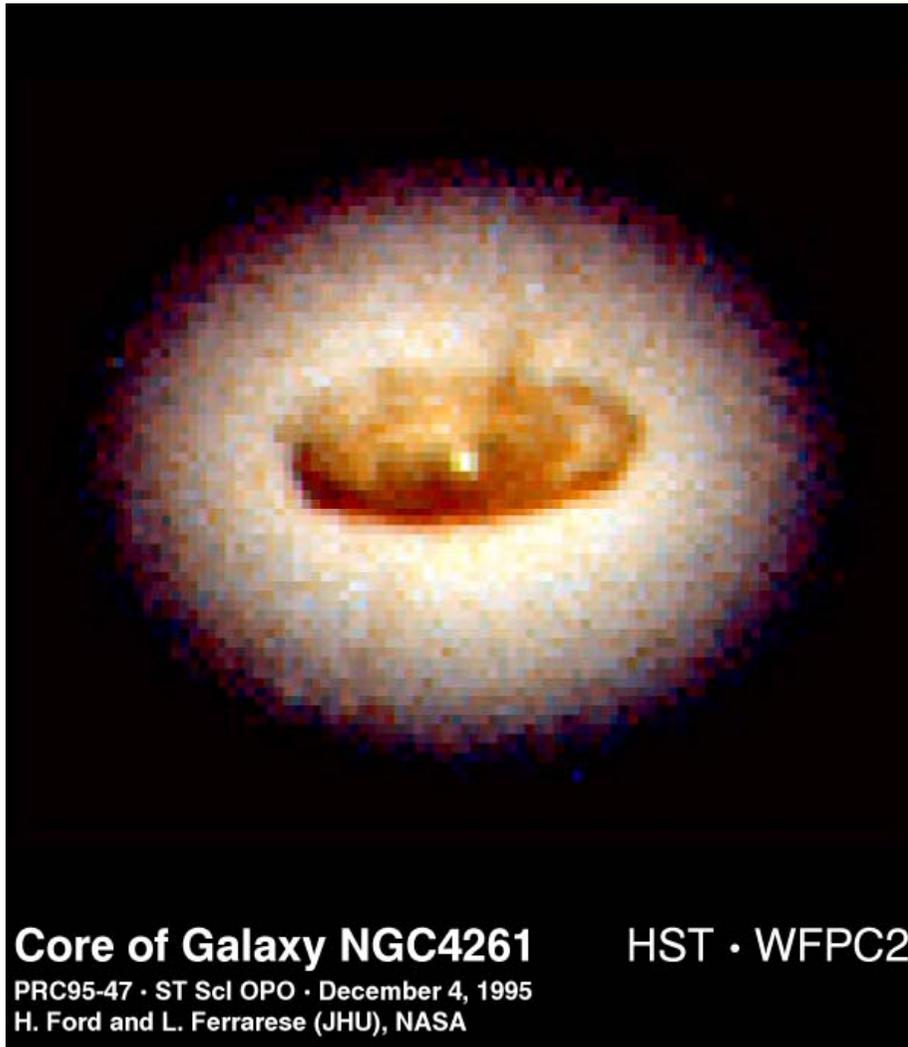
$$\nu_c \sim 4.2 \times 10^6 \gamma^2 B \text{ Hz}$$

Avec  $B$  en Gauss



# Trous Noirs Supermassifs

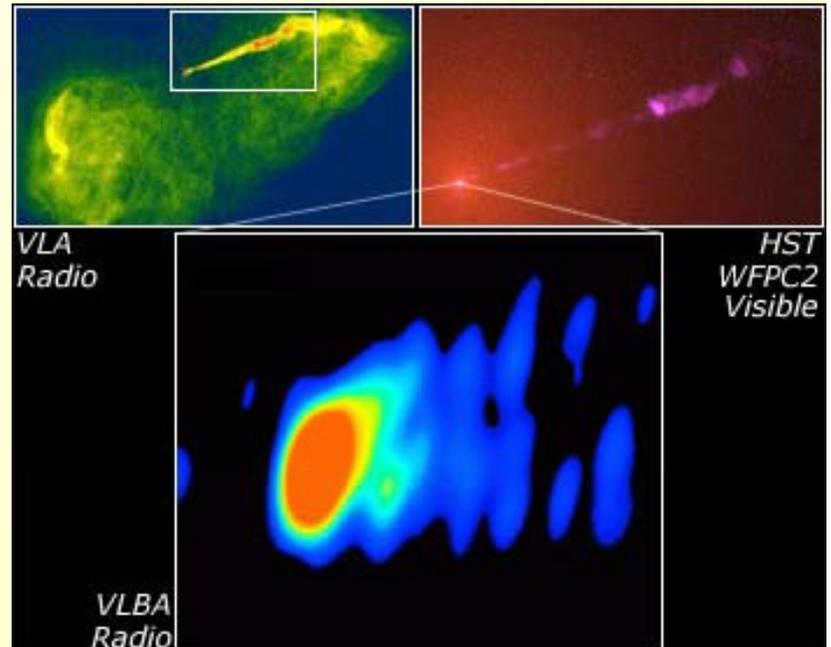
Haute résolution Télescope Spatial  
+ jet radio (VLA)



**Core of Galaxy NGC4261**

HST · WFPC2

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

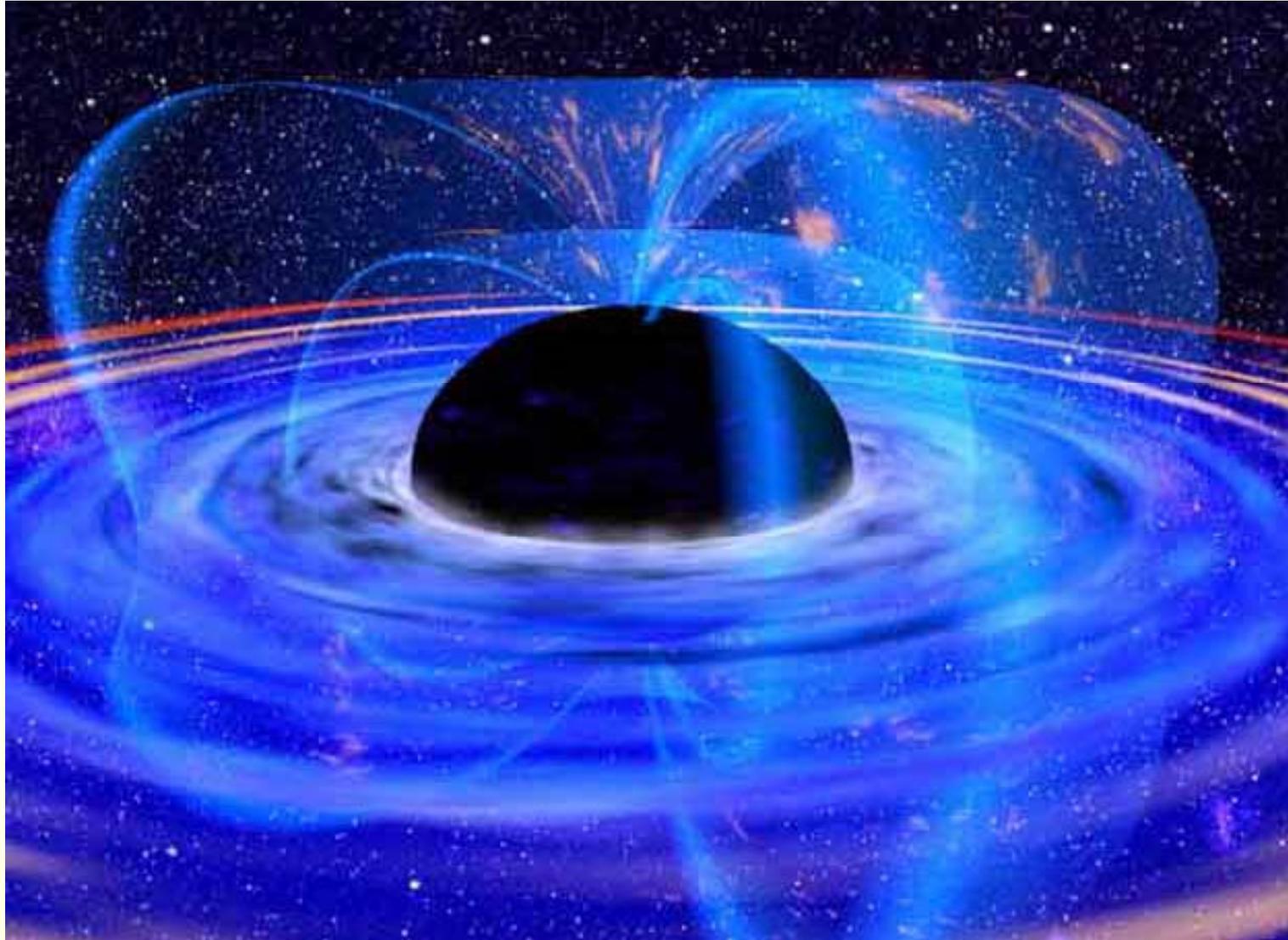


VLA  
Radio

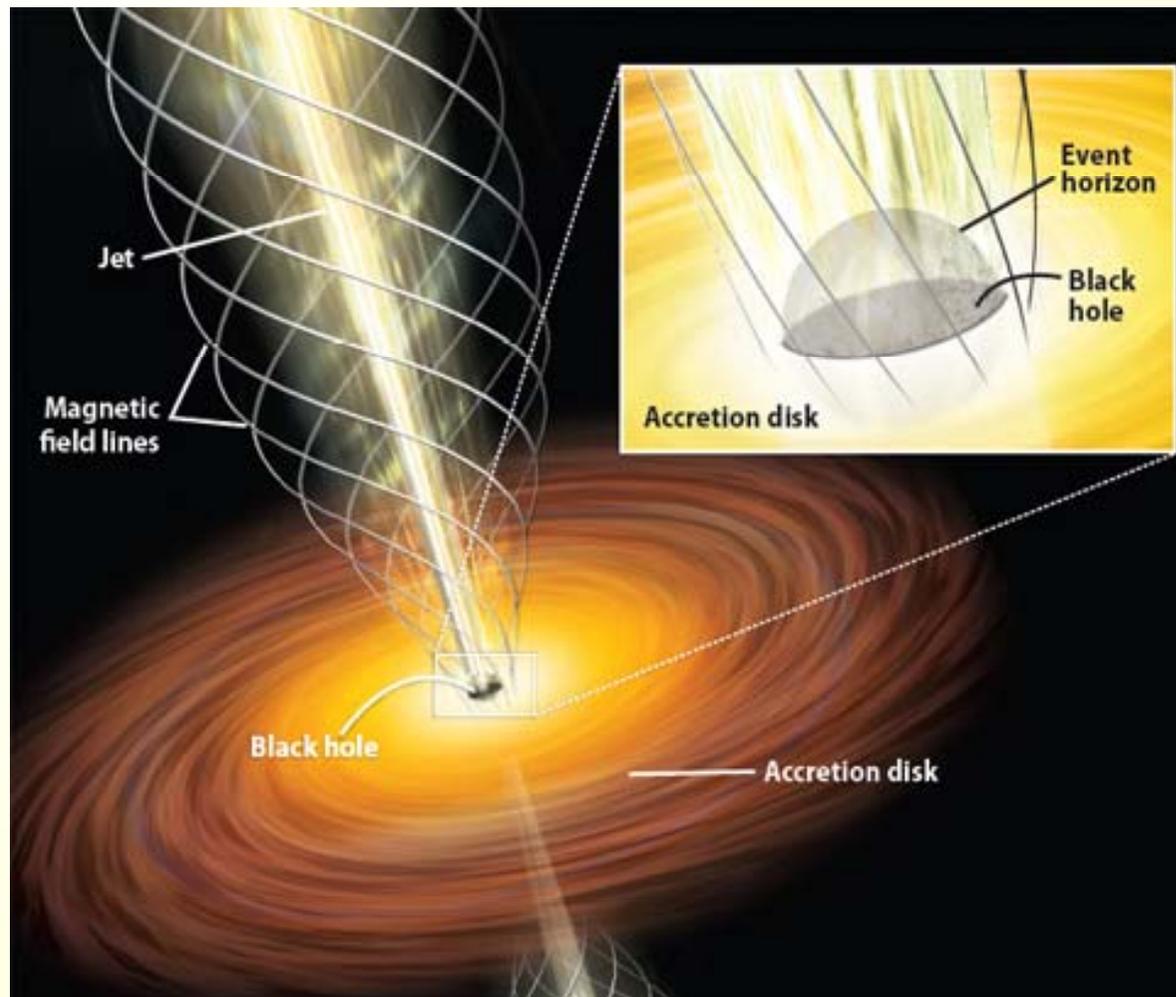
HST  
WFPC2  
Visible

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

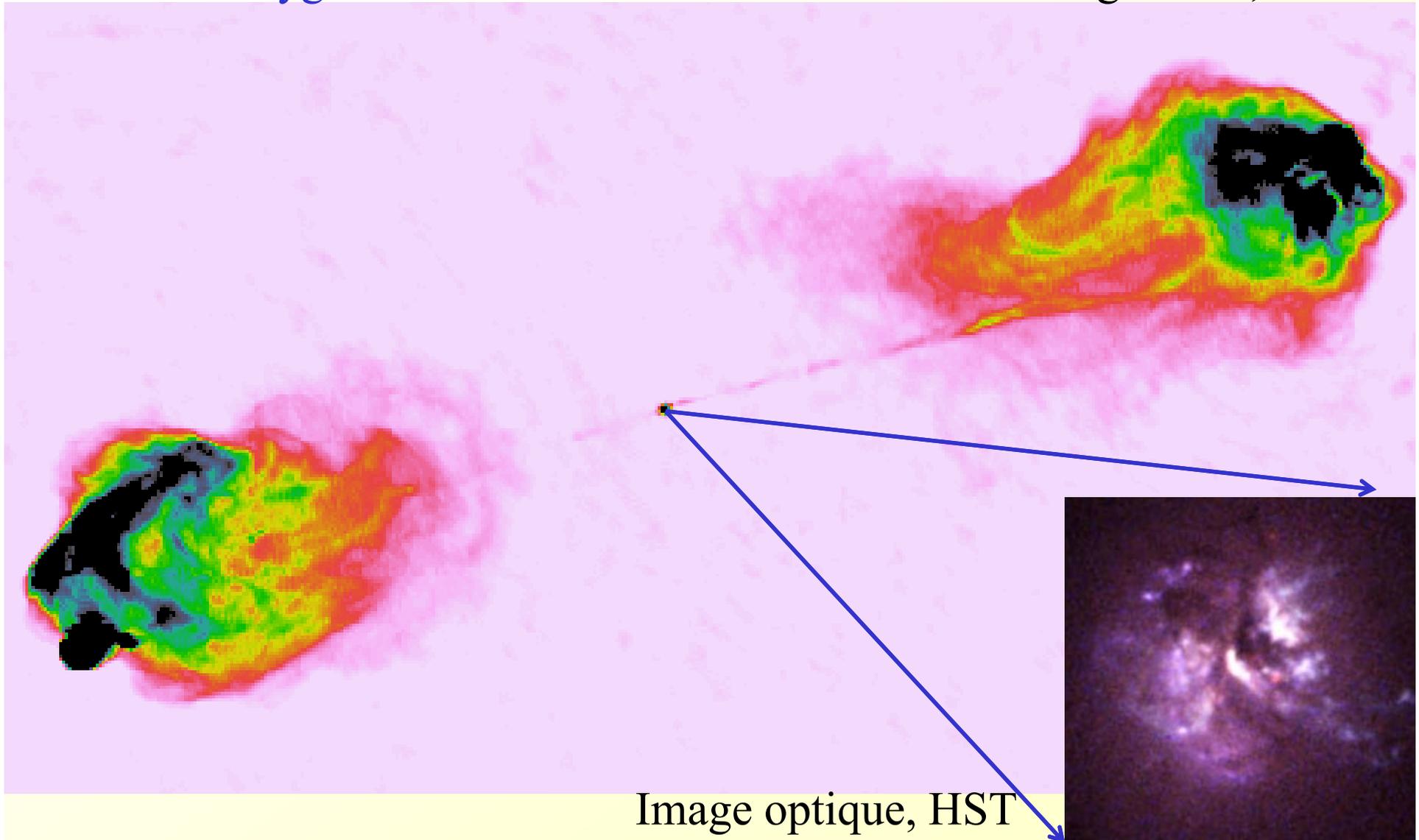
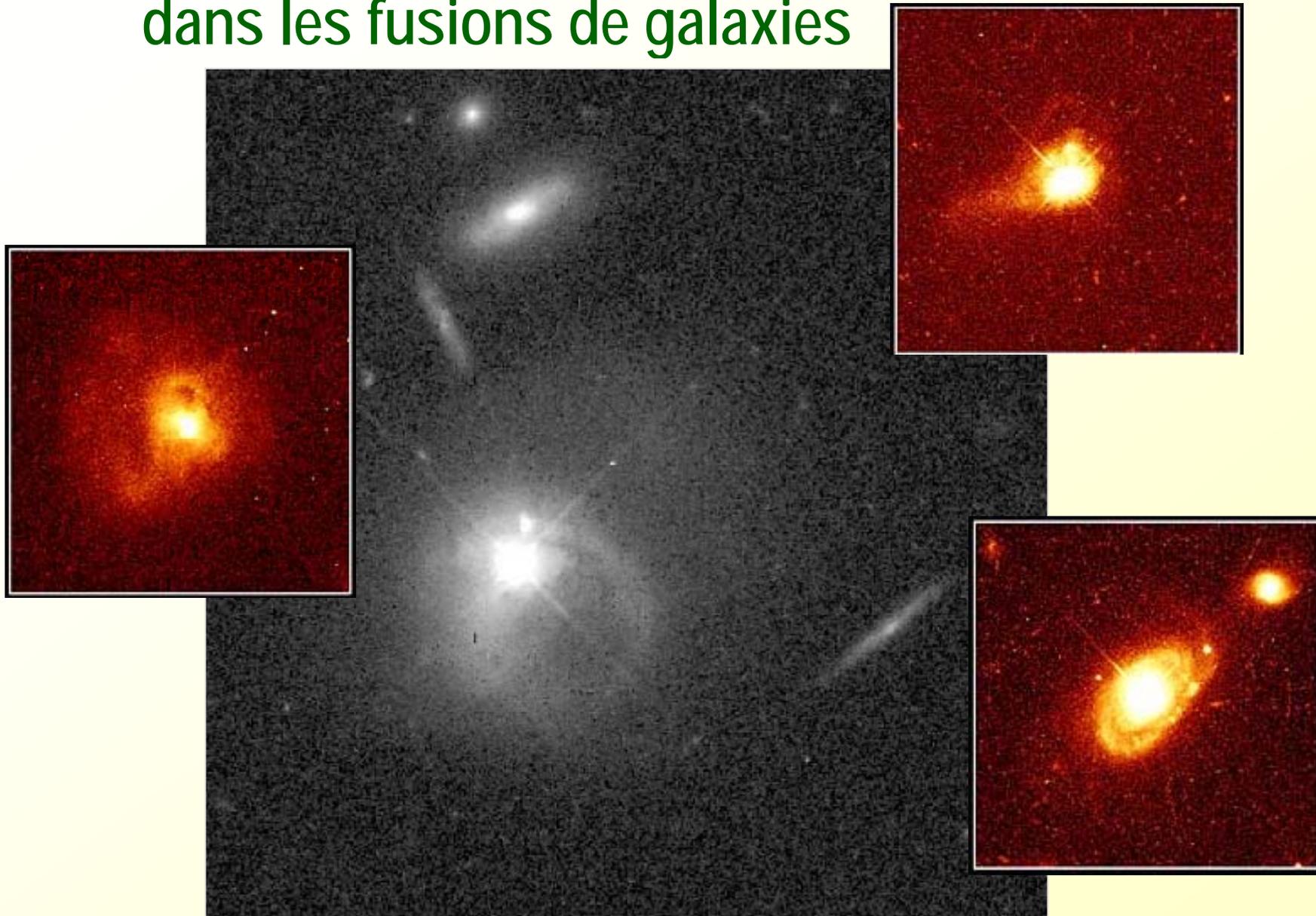


Image optique, HST

La majorité des quasars sont observés  
dans les fusions de galaxies

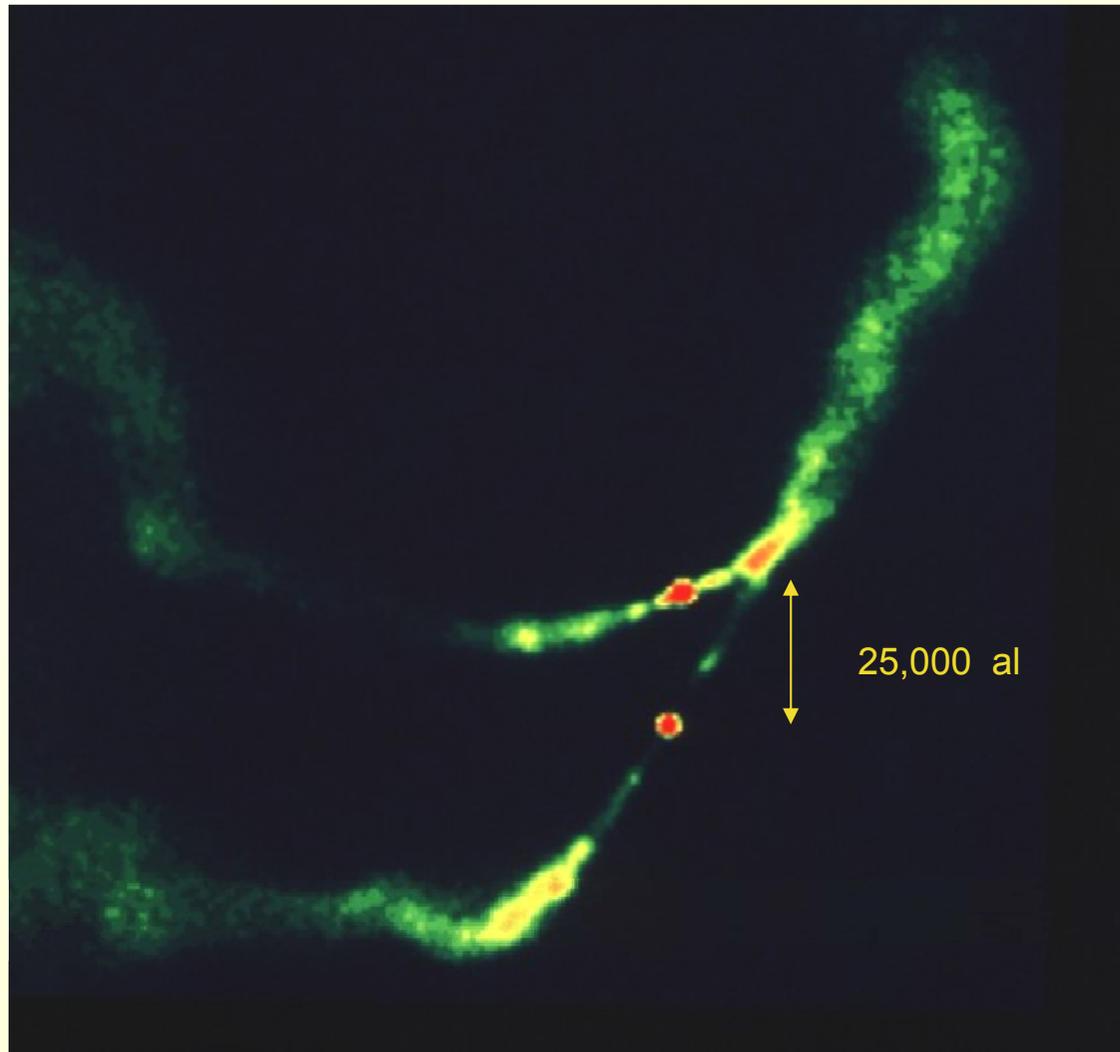
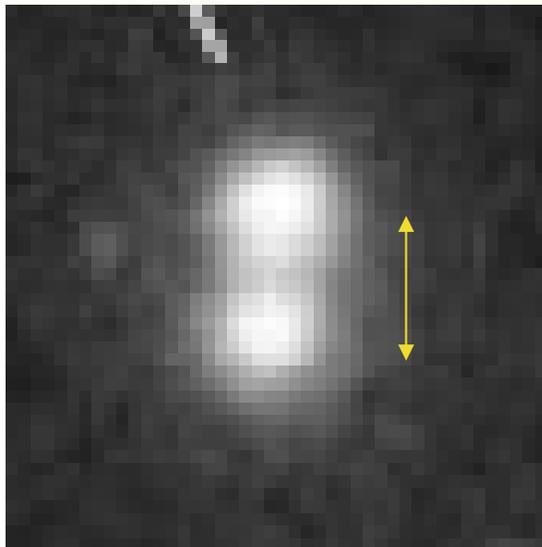


Brassage violent du gaz → alimentation du trou noir

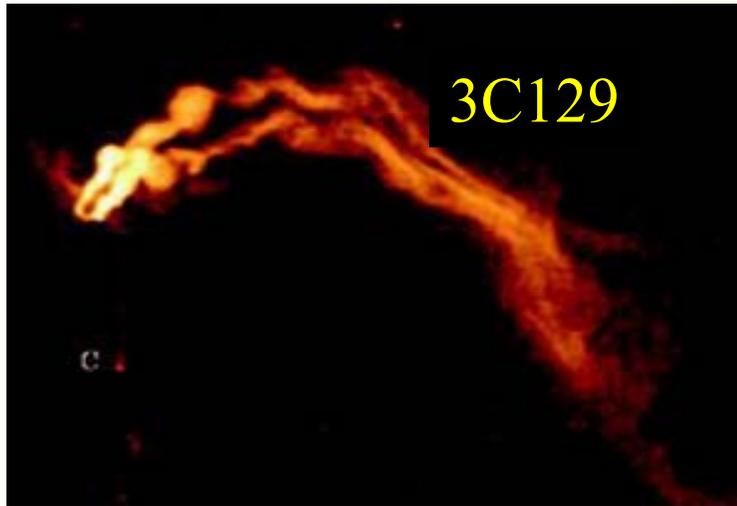
# Un quasar double, en train de fusionner: 3C75, $z=0.023$

Image radio, VLA

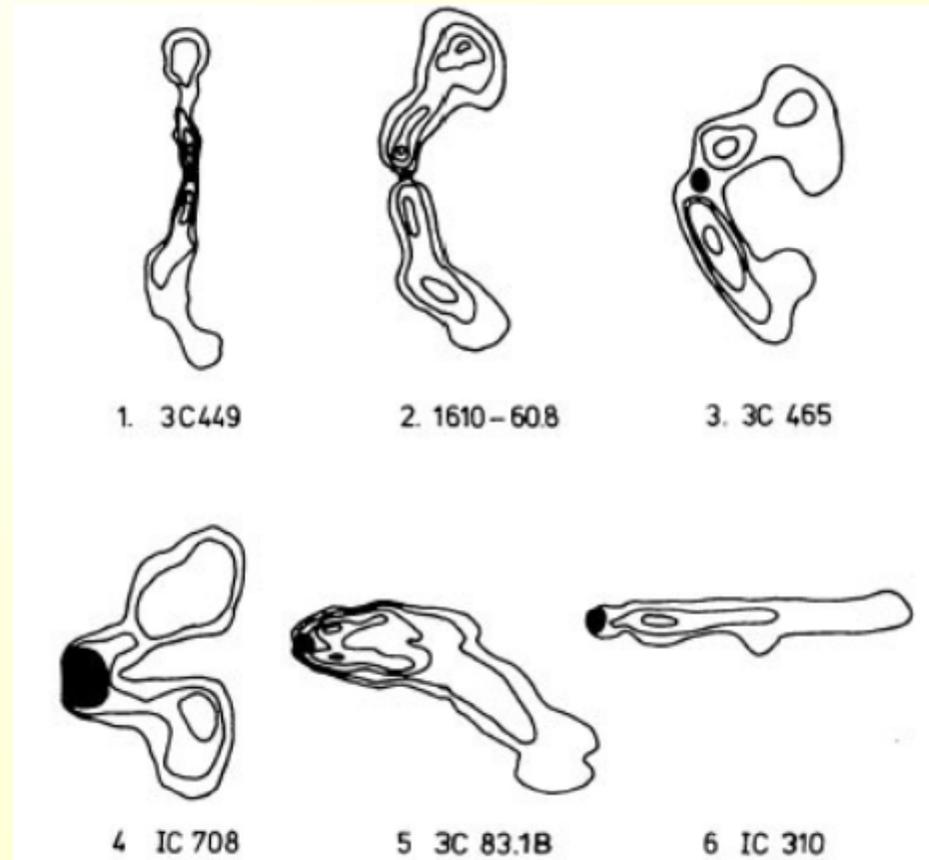
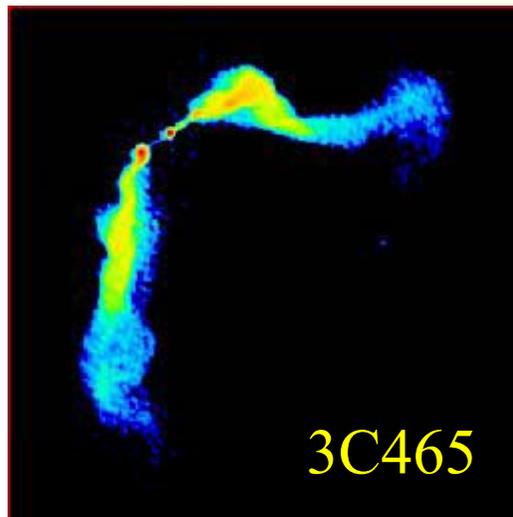
Image optique HST



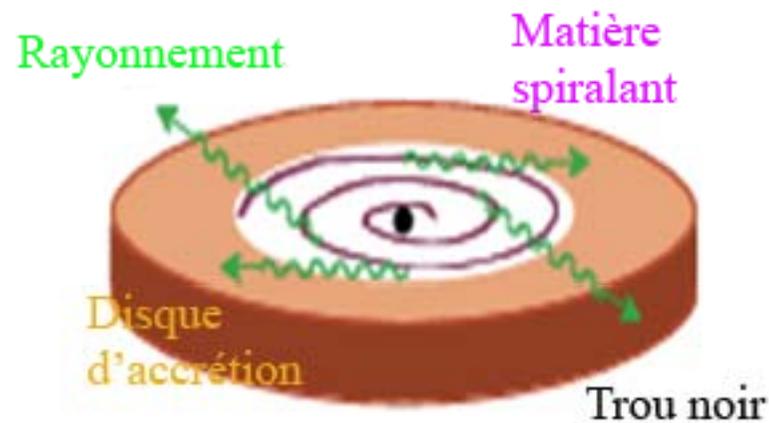
# Lobes radio, galaxies en mouvement



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  $GmM/R_s = 1/2 mc^2$**

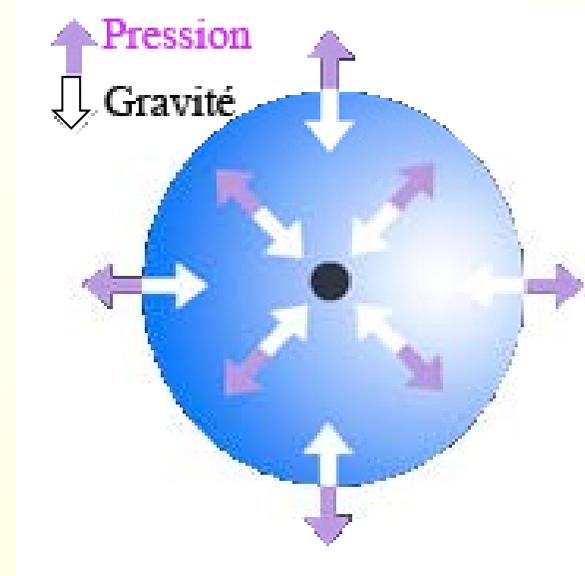
Efficacité de conversion en rayonnement : **10% de  $mc^2$**

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

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

# Limite d'Eddington

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

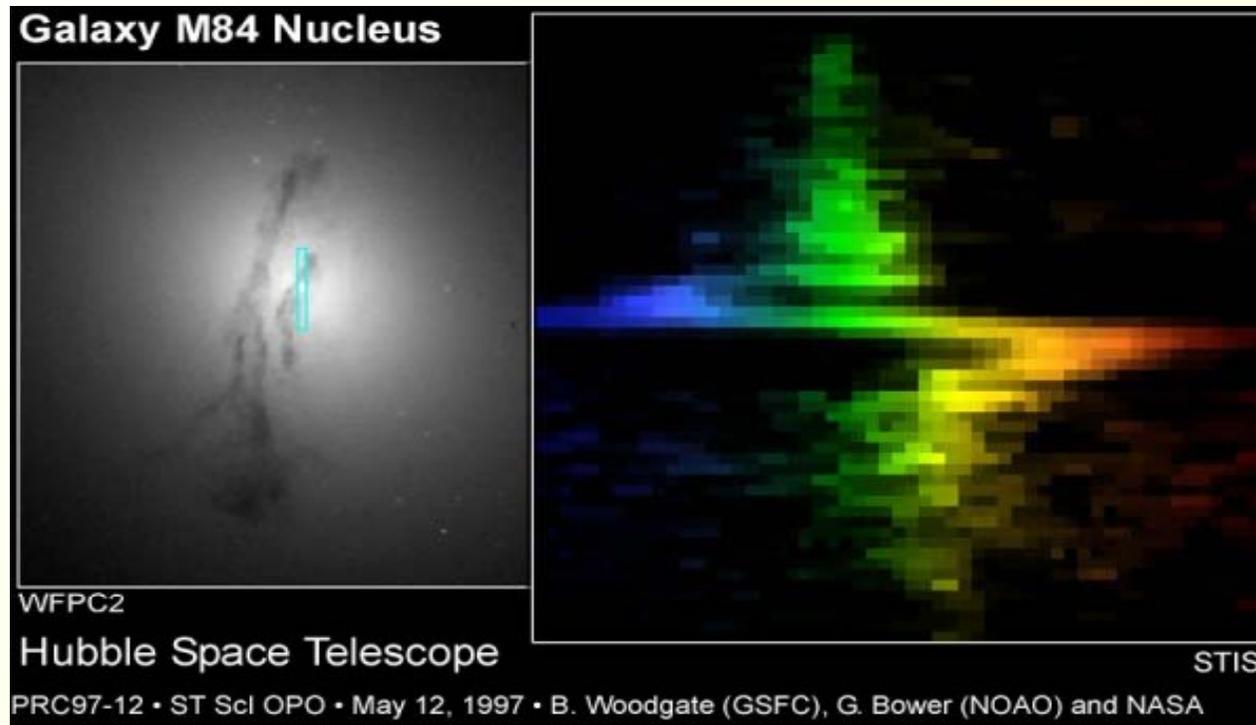


$$L_E = 4\pi cGM_{bh}m_p/\sigma_e = 3.3 \times 10^{12} L_{\odot} (M_{bh}/10^8 M_{\odot})$$

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

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

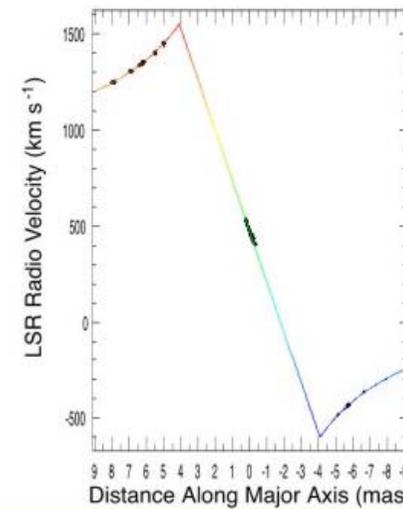
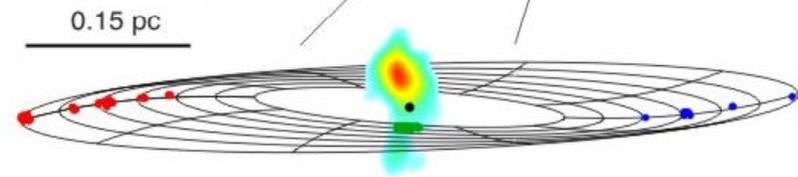
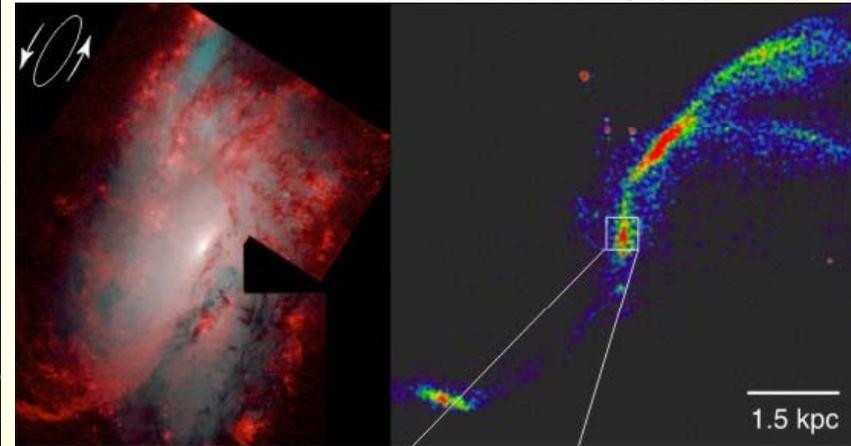
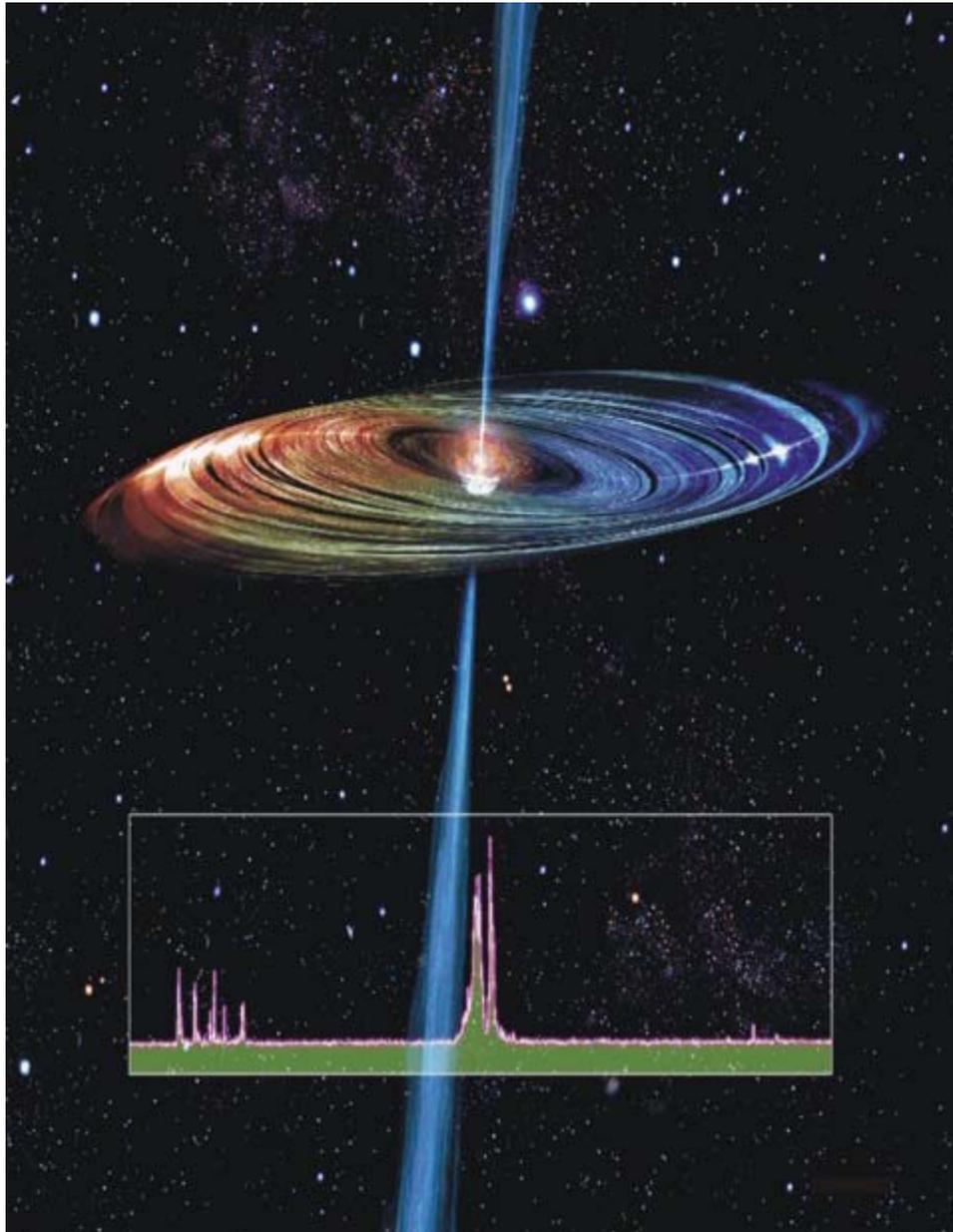
# Mesure de la masse du trou noir



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

# NGC 4258: masers H<sub>2</sub>O

Jets radio

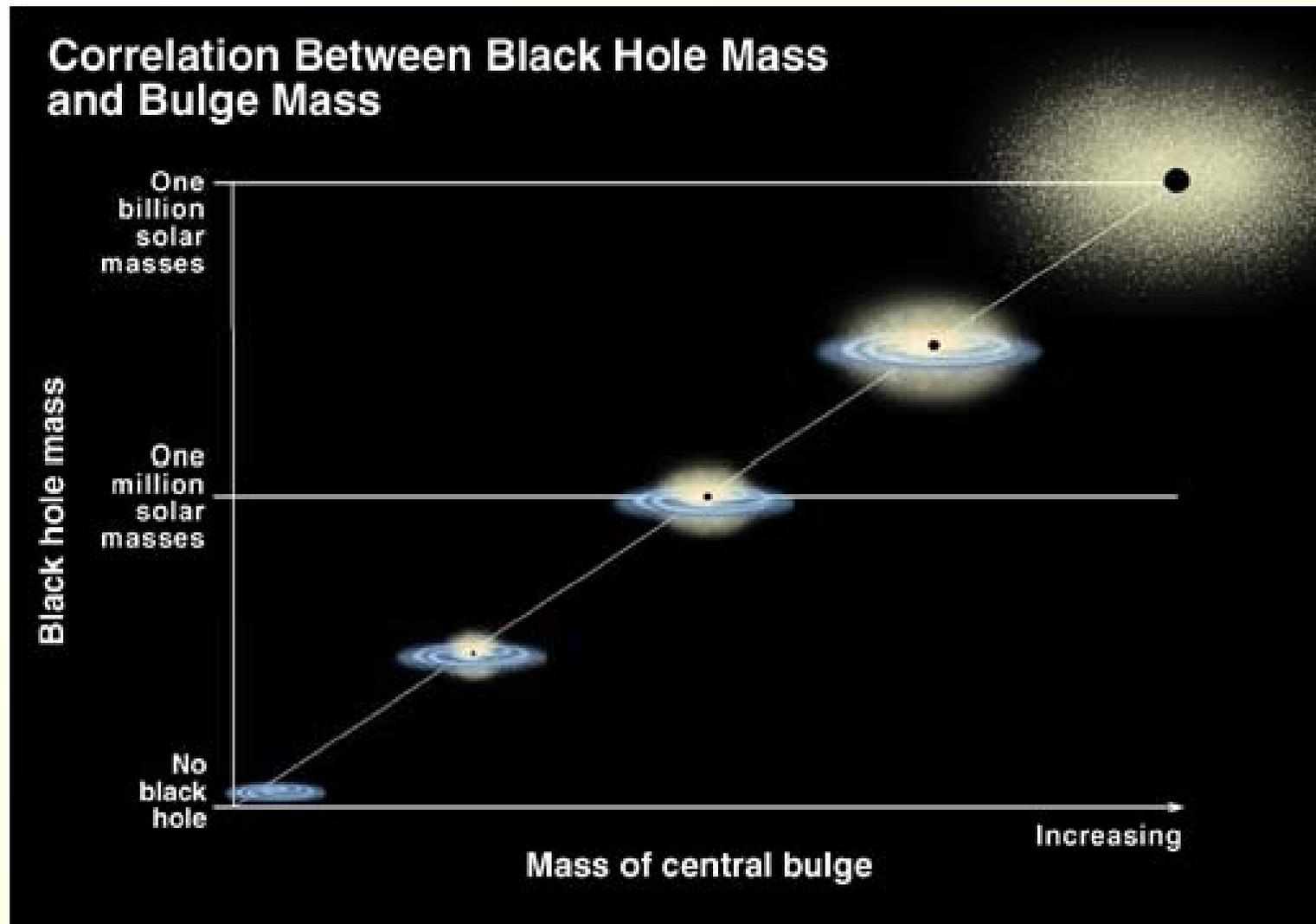


$M=4 \times 10^7 M_{\odot}$

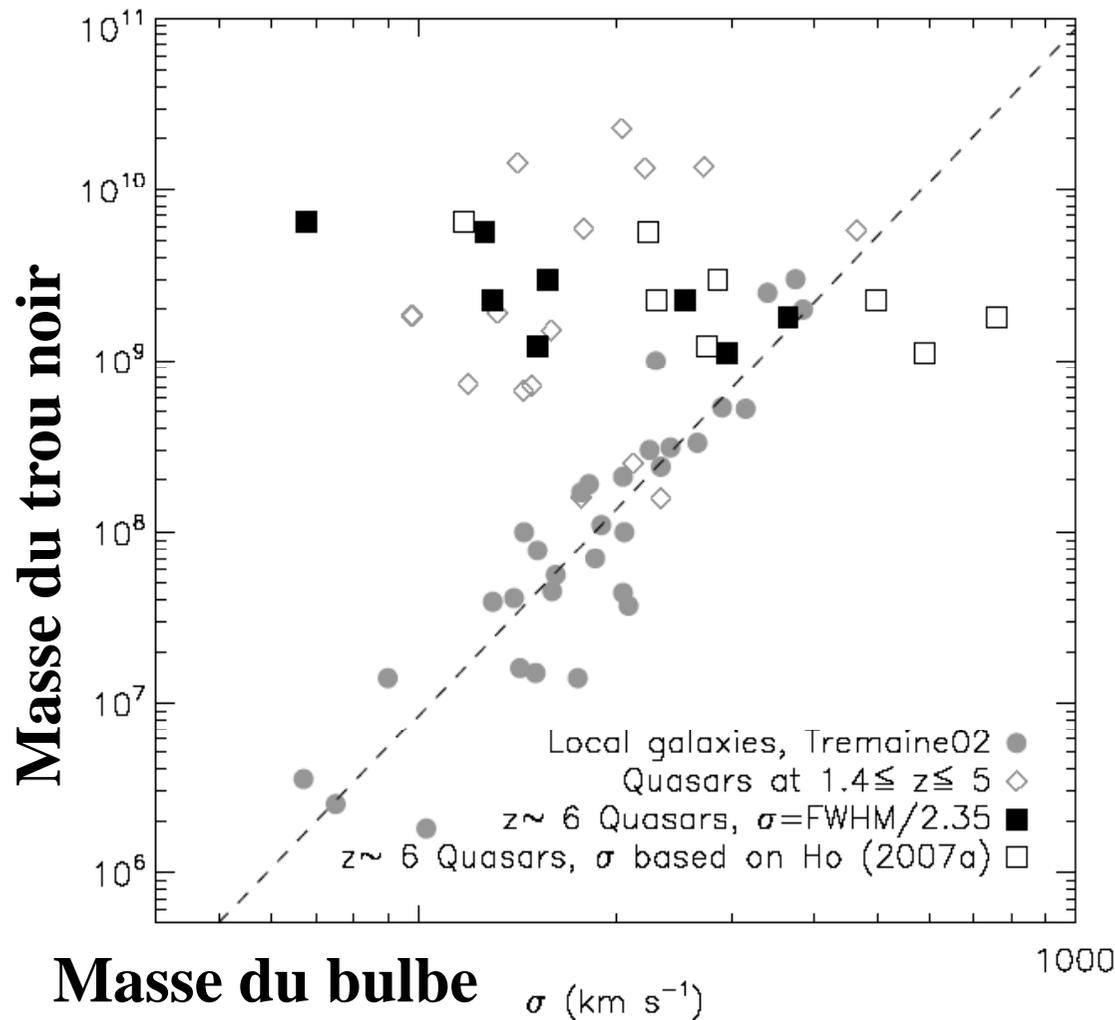
$D=7.2 \text{ Mpc}$

# Co-habitation trou noir - Galaxie

$M_{\text{TN}} \sim 0.5\% M_{\text{bulbe}}$       Qu'en est-il au début de l'Univers?



# $M_{\text{trou noir}} - \text{Masse bulbe (ou } \sigma)$



**Trous noirs précoces?**

QSO à  $z=6$

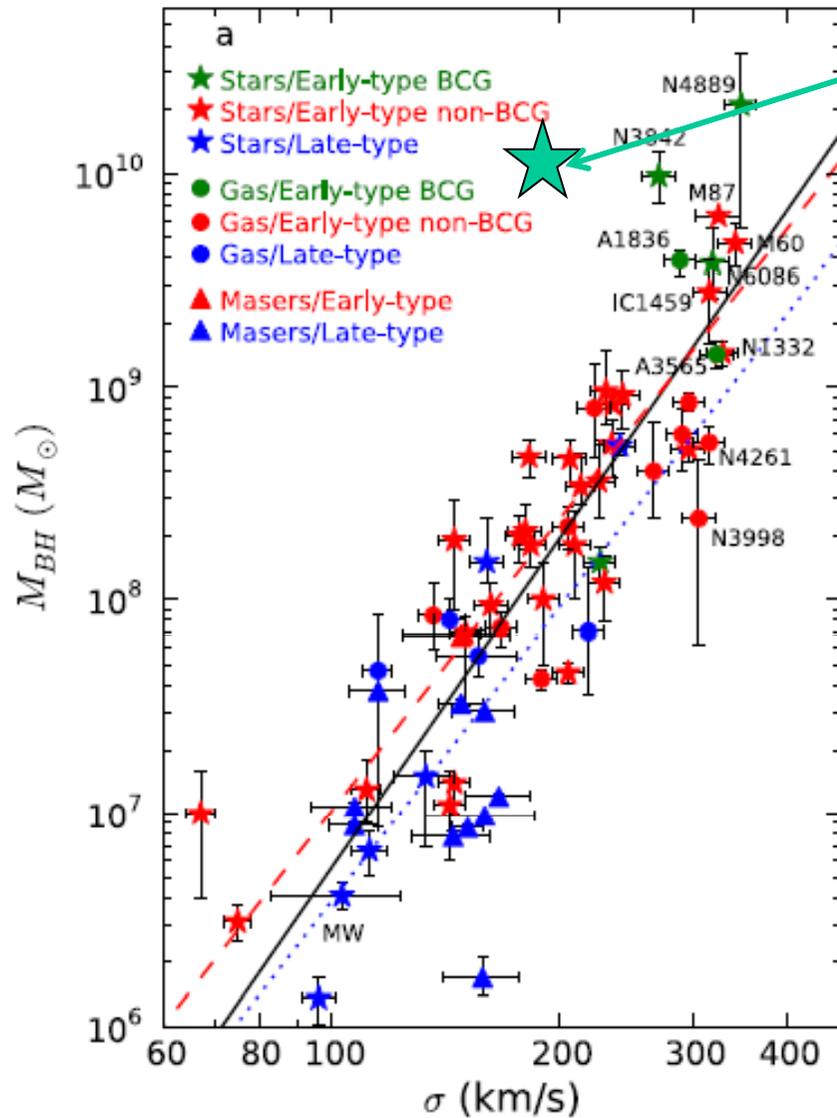
→ La masse des trous noirs est plus grande que prévue

**Mais:**

**Inclinaison incertaine**

→ ALMA pourra donner la morphologie, et les inclinaisons

# Masse du trou noir et masse du bulbe



N1277

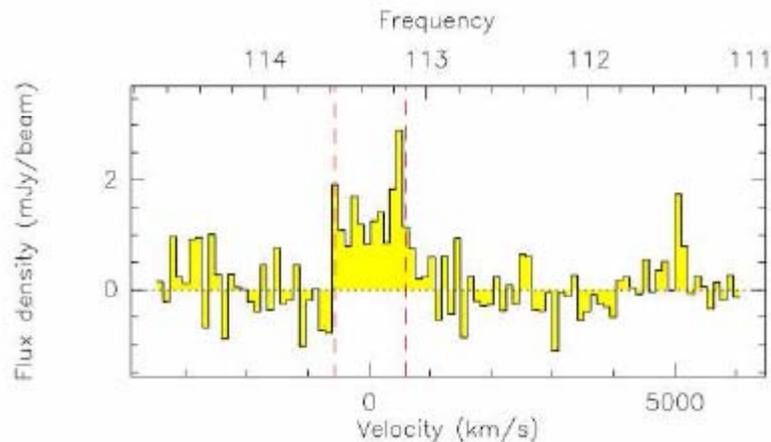
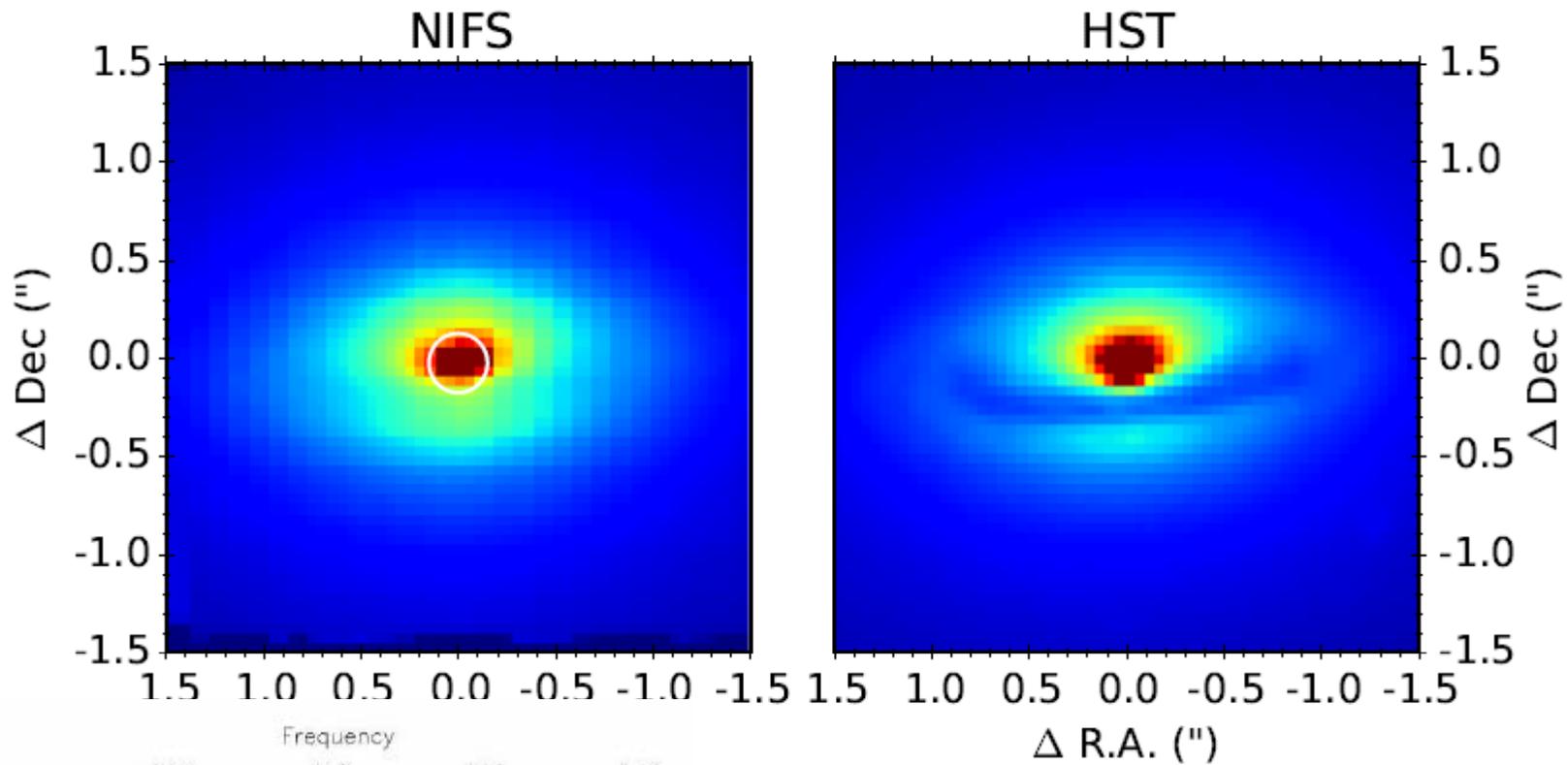
Les deux masses sont proportionnelles  $\sim 1/700$

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?



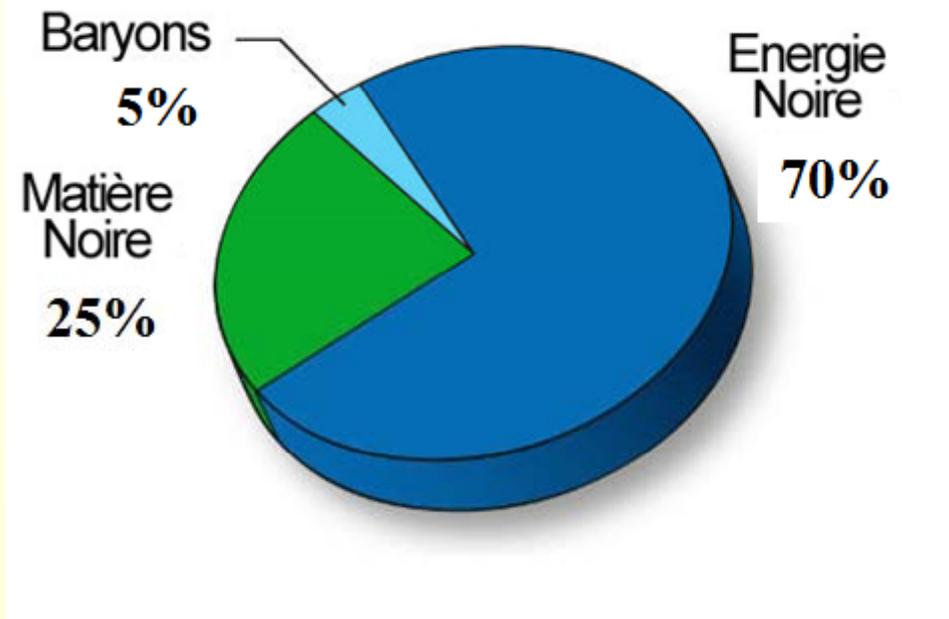
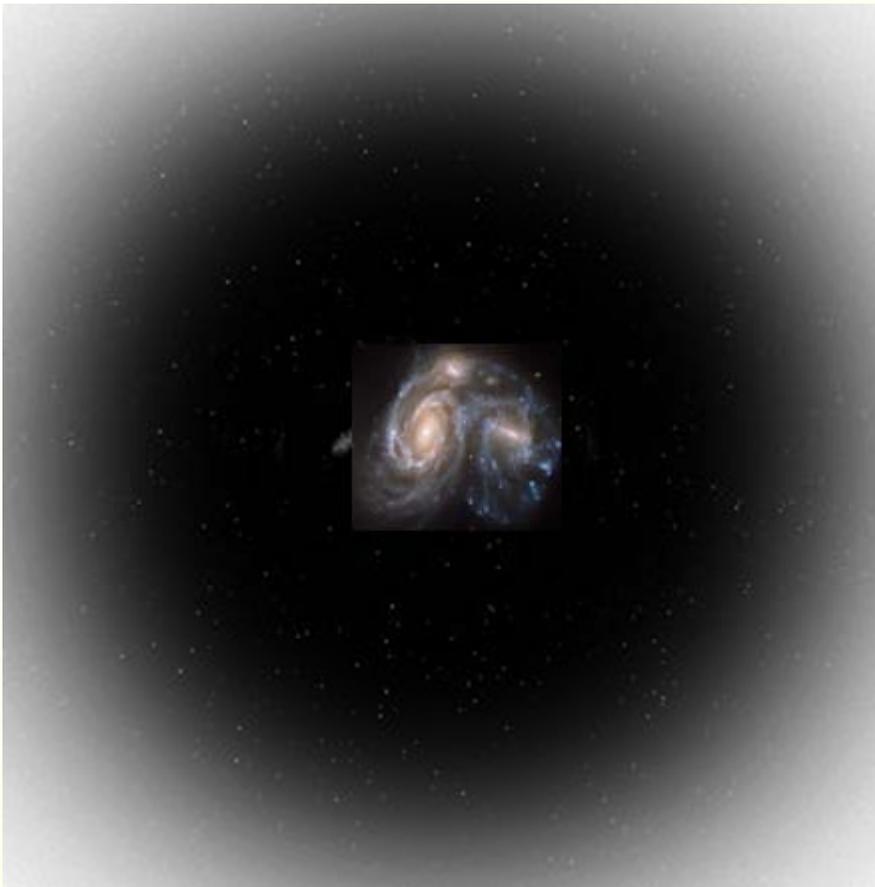
$$M_{\text{BH}} = 1.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

*Scharwaechter et al 2015*

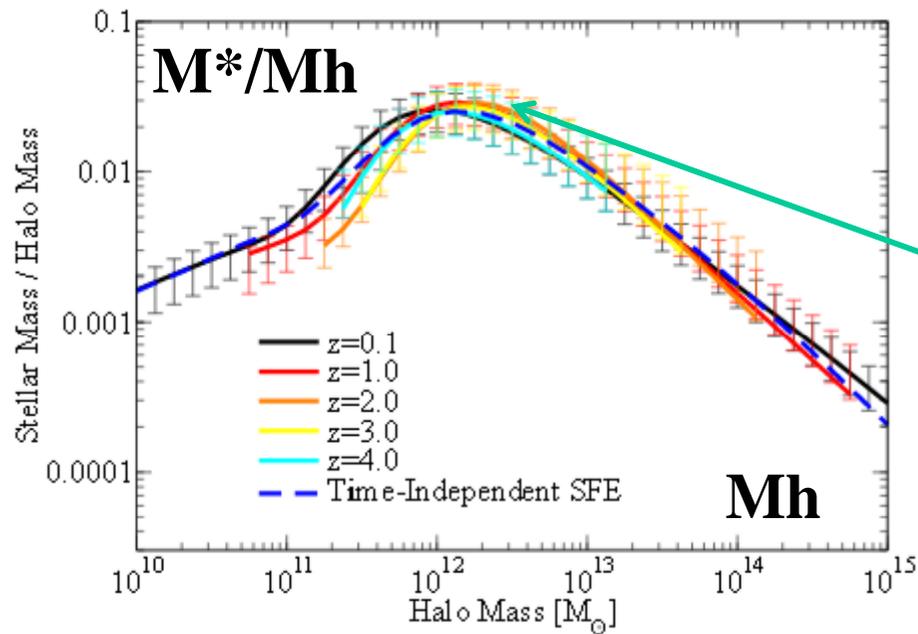
# Matière noire et atomes des galaxies

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

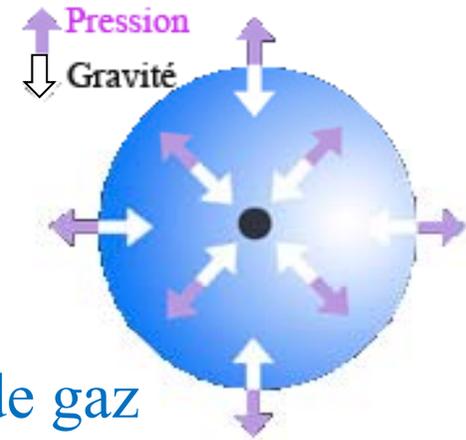
$$M_{\text{BH}} = 2 \cdot 10^{-3} M_{\text{gal}} \quad E_{\text{gal}} \sim M_{\text{gal}} \sigma^2$$

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

# 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  $\sigma_d$

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

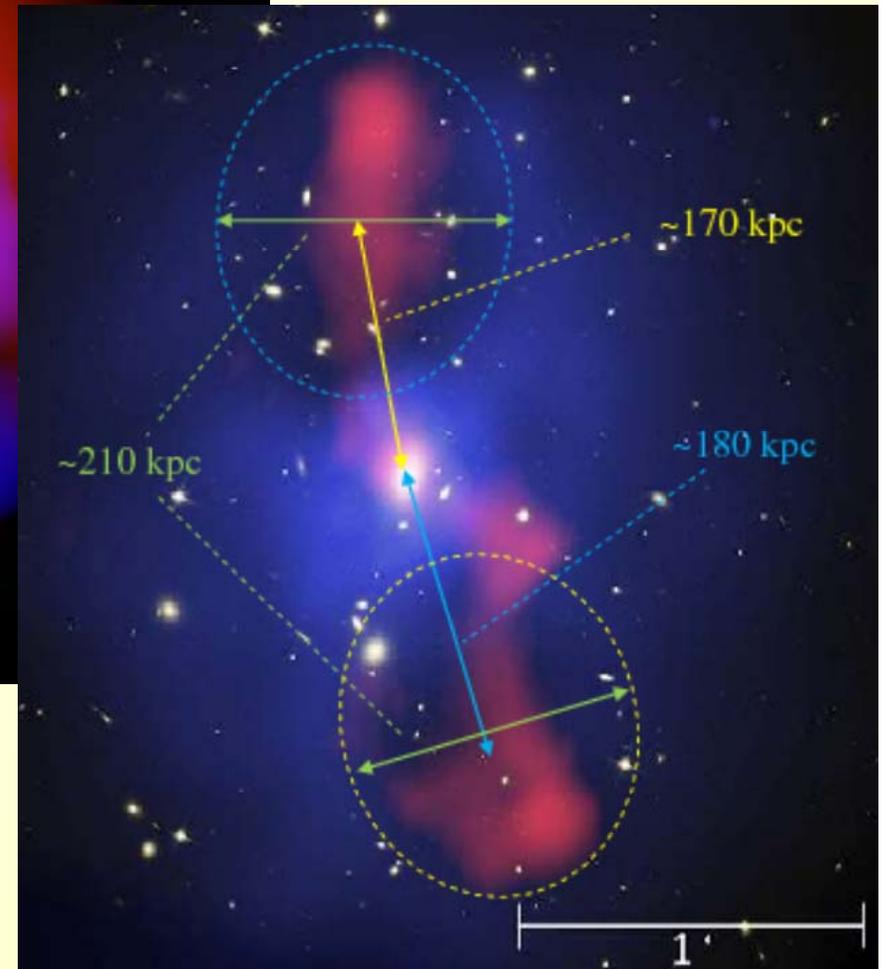
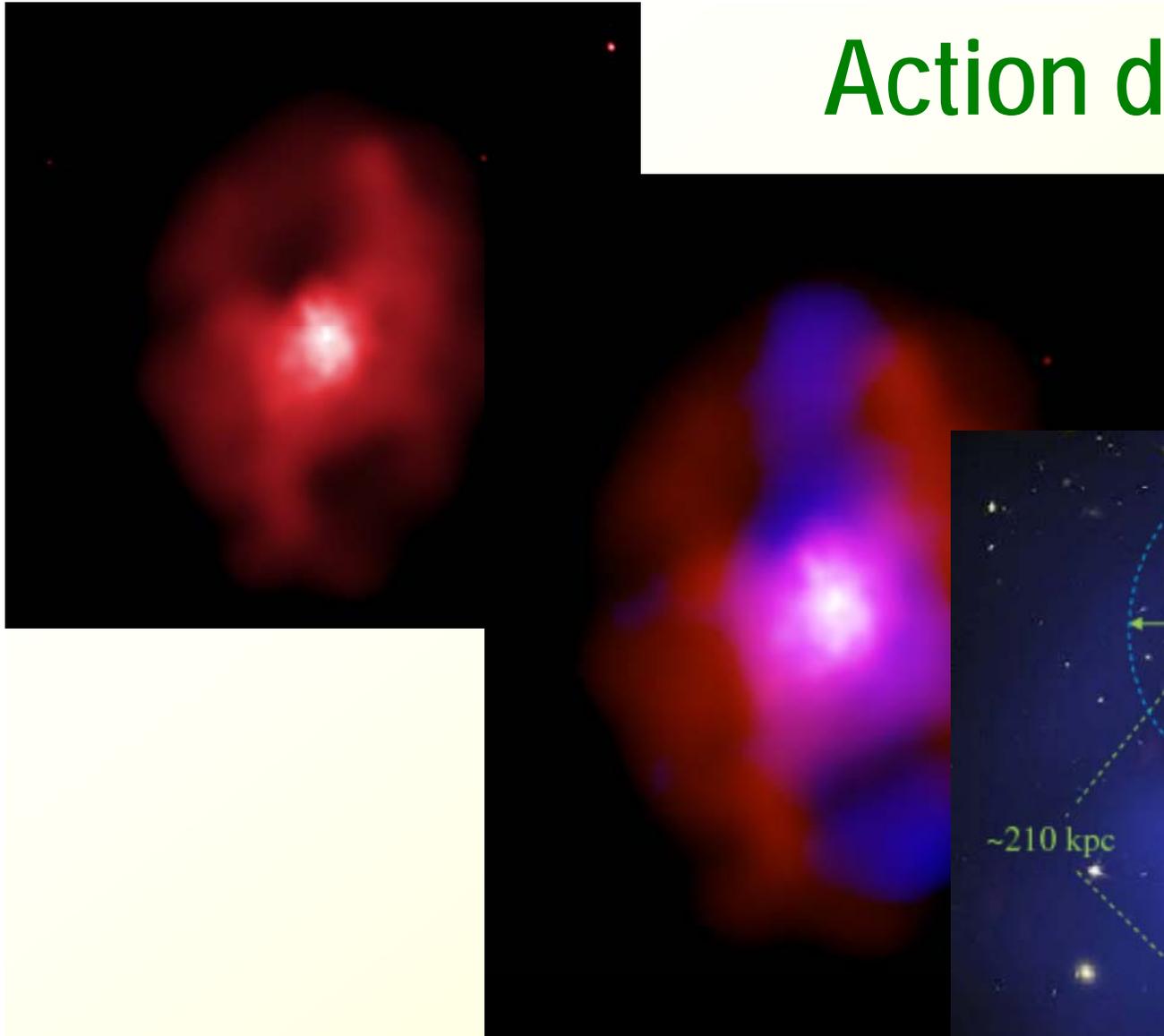
## Mode Radio, ou cinétique, jets radio

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



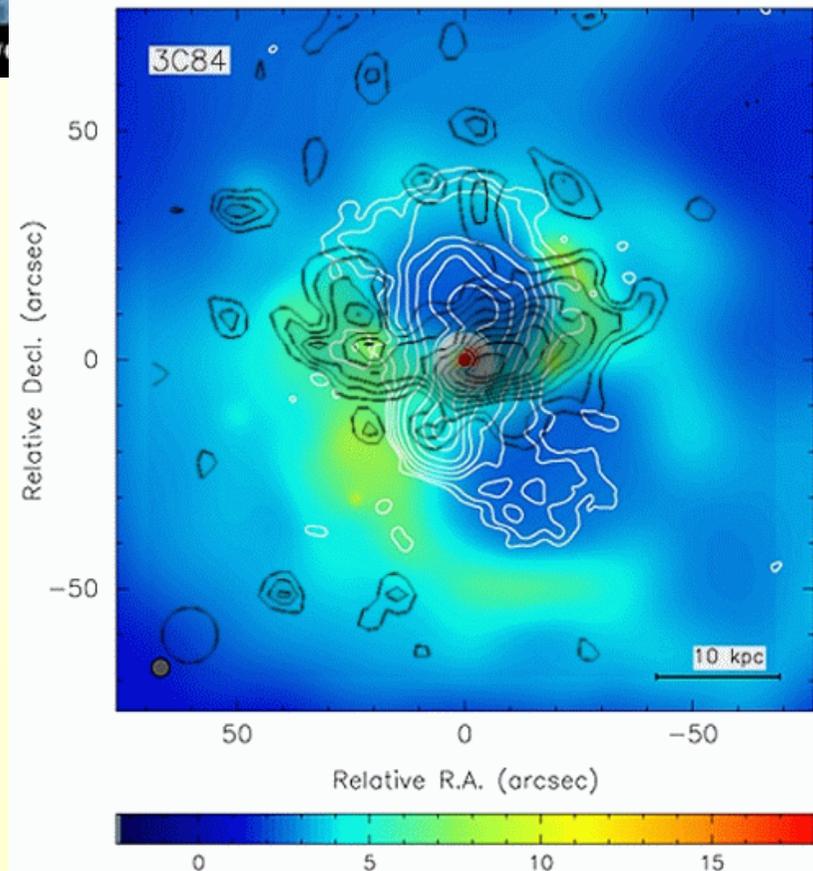
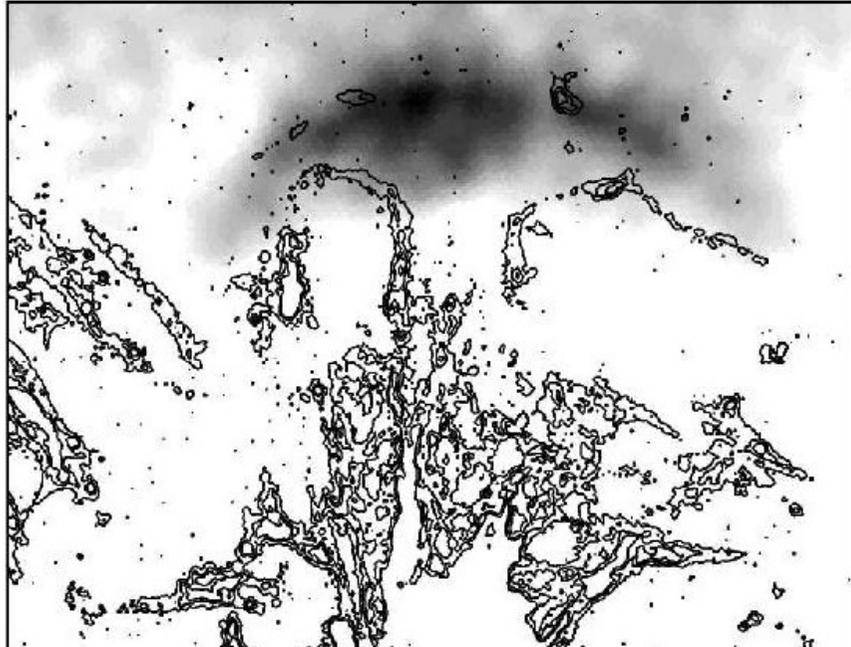
MS0735.6+7421 cluster  
(*McNamara et al. 2009*)

# Gas qui se refroidit dans les amas

*Salomé et al 2006*



Perseus A , *Fabian et al 2003*



# 3 paires de cavités dans NGC 5813



N5814

AGN: activité  
périodique  
1, 10, 30kpc

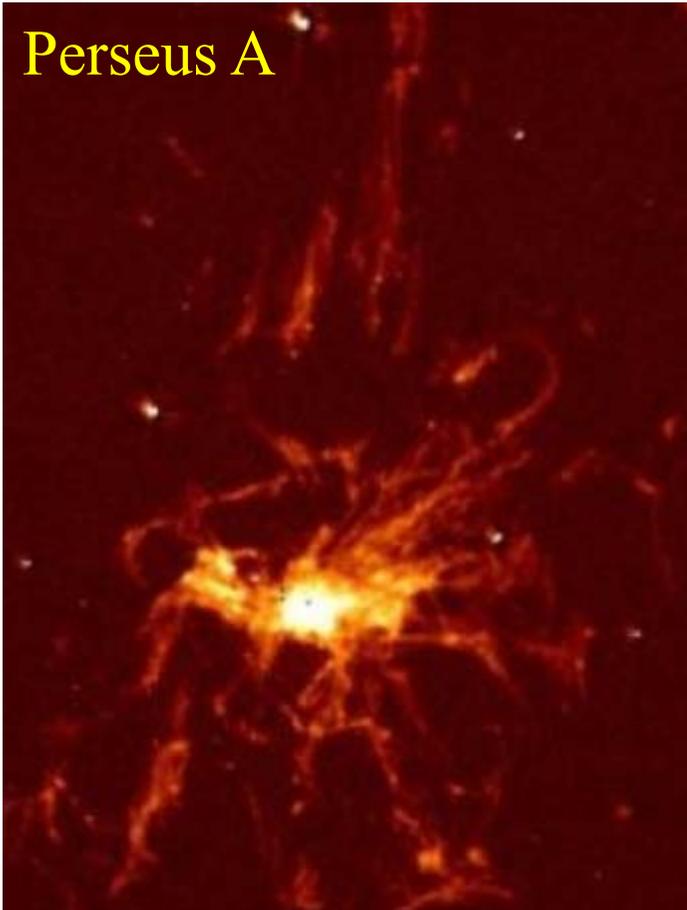
Période 10 Myr

Sur 30kpc, ou  
50Myr, activité  
continue

Chocs Mach2

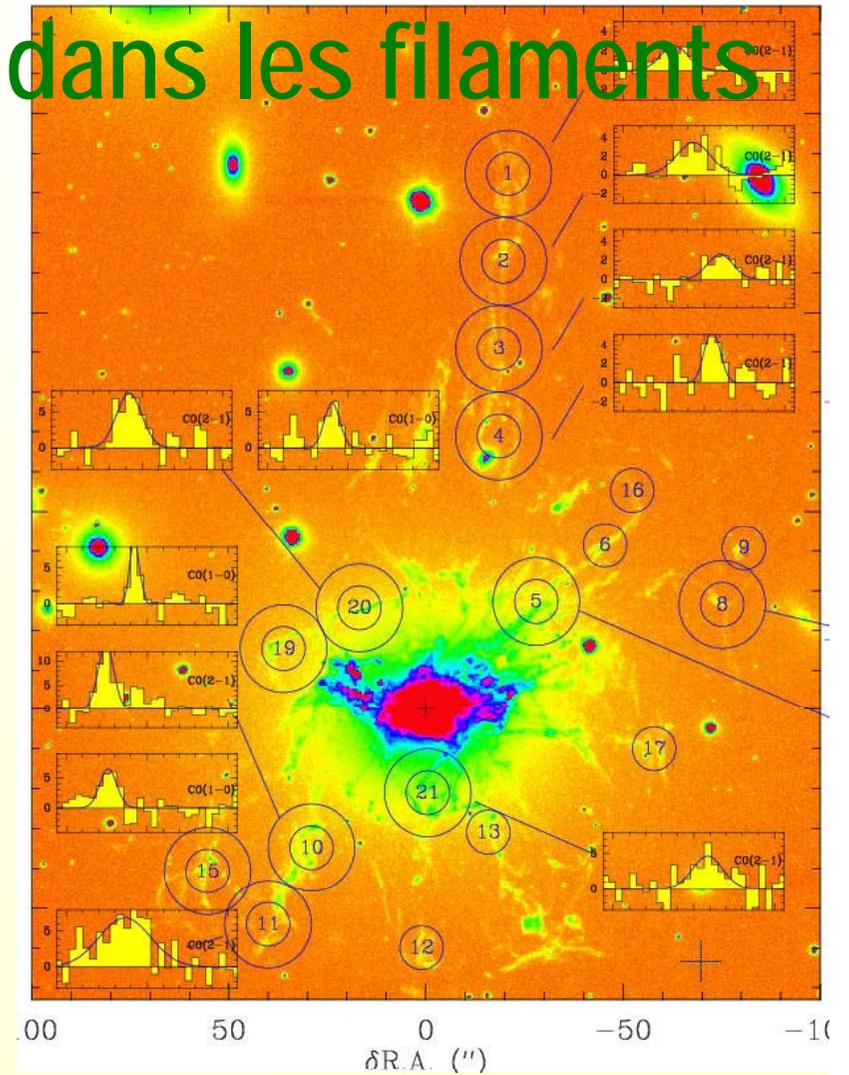
*Randall et al 2015*

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



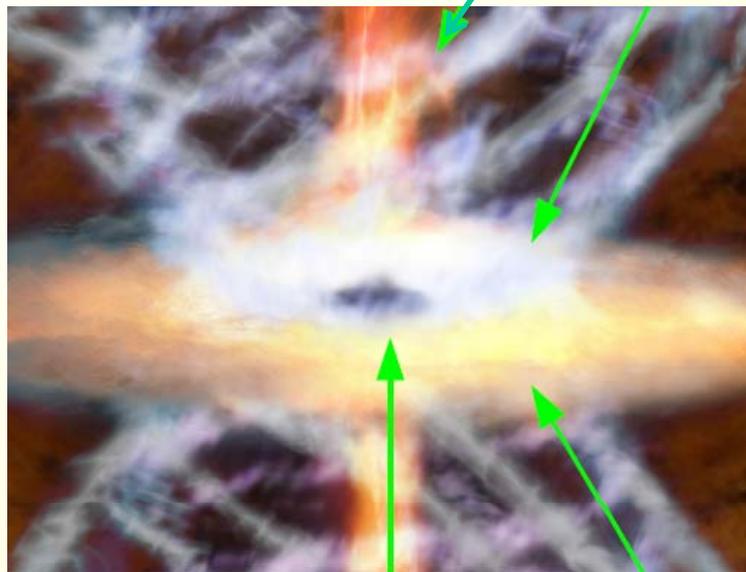
# UFO: « Ultra-Fast Outflow »

Raies Fe XXV/XXVI en absorption

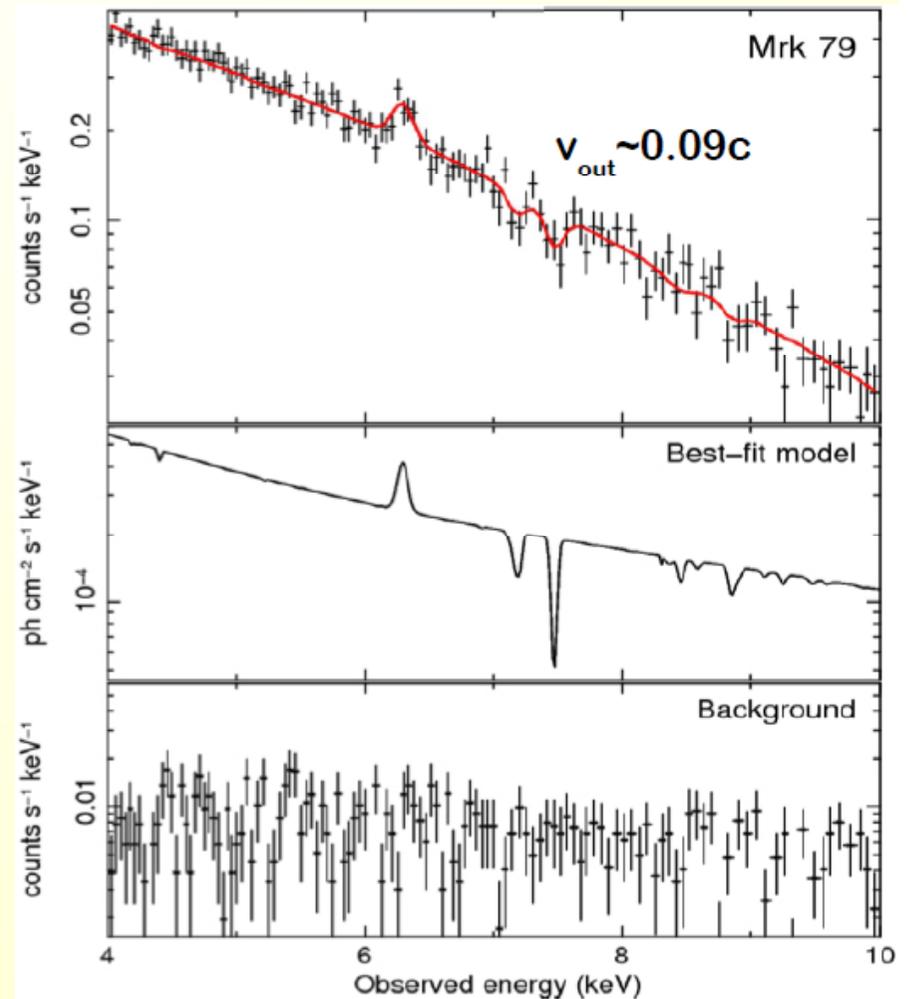
Gaz très ionisé, et relativiste

Flots de gaz en rayons X

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

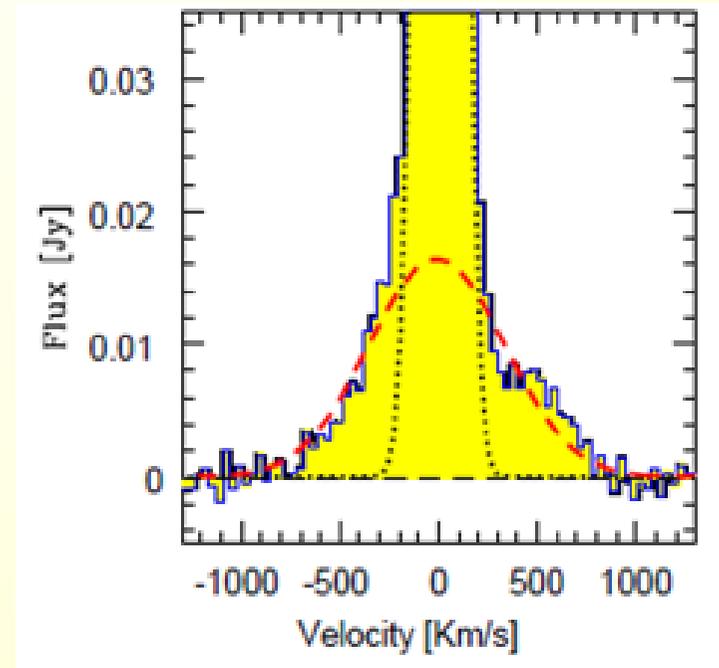
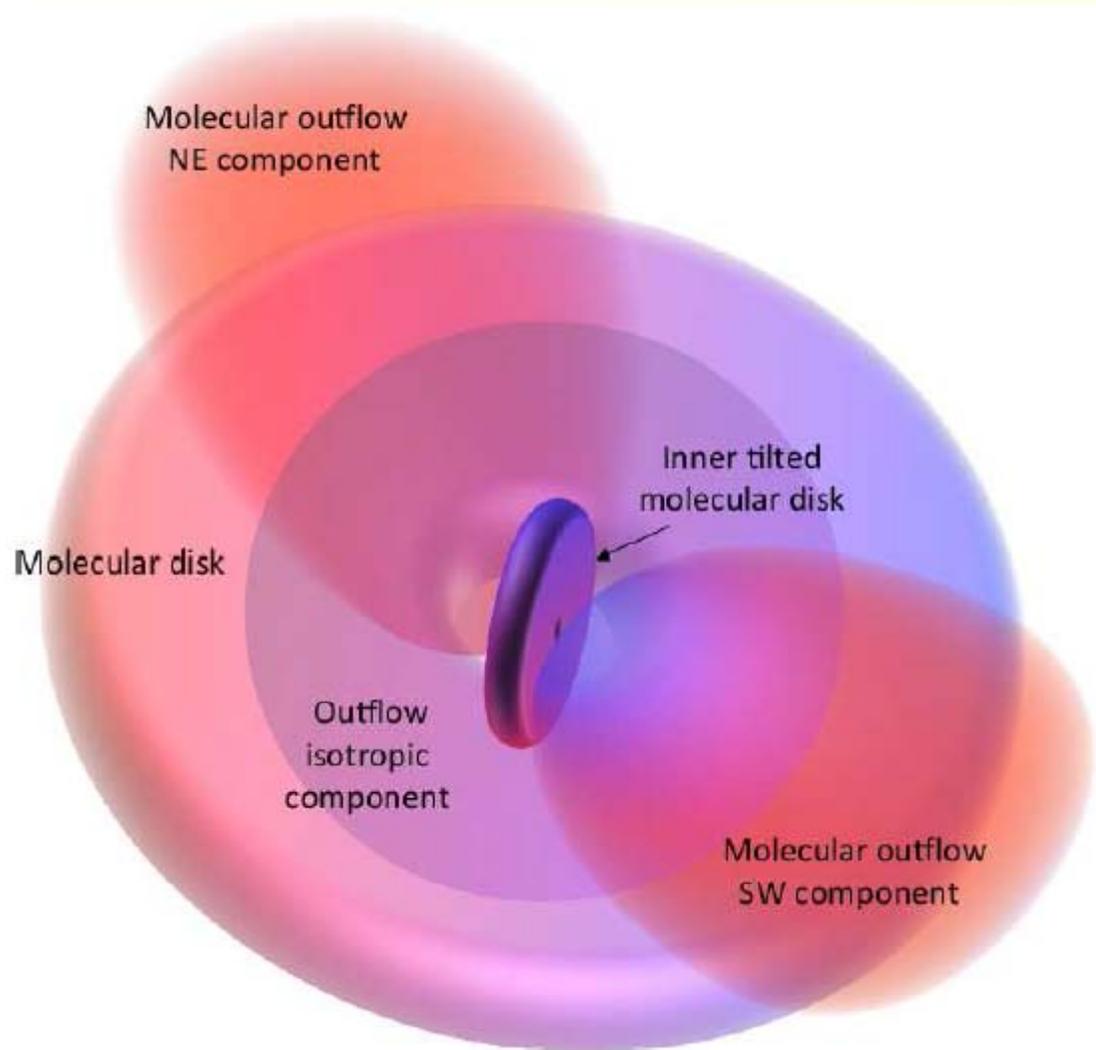


Trou noir Disque d'accrétion



*Tombesi et al. 2011*

# UFO+ flot moléculaire Mrk231



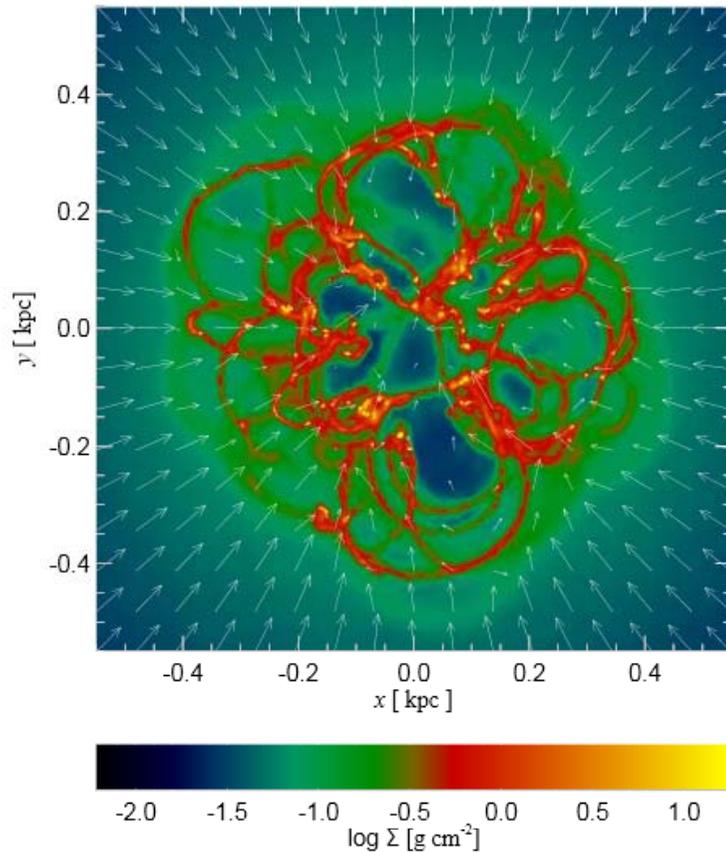
## Mrk 231

AGN et aussi starburst

Gaz éjecté  $10^7$ - $10^8 M_{\odot}$

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

# Mode Quasar : simulations multi-phase

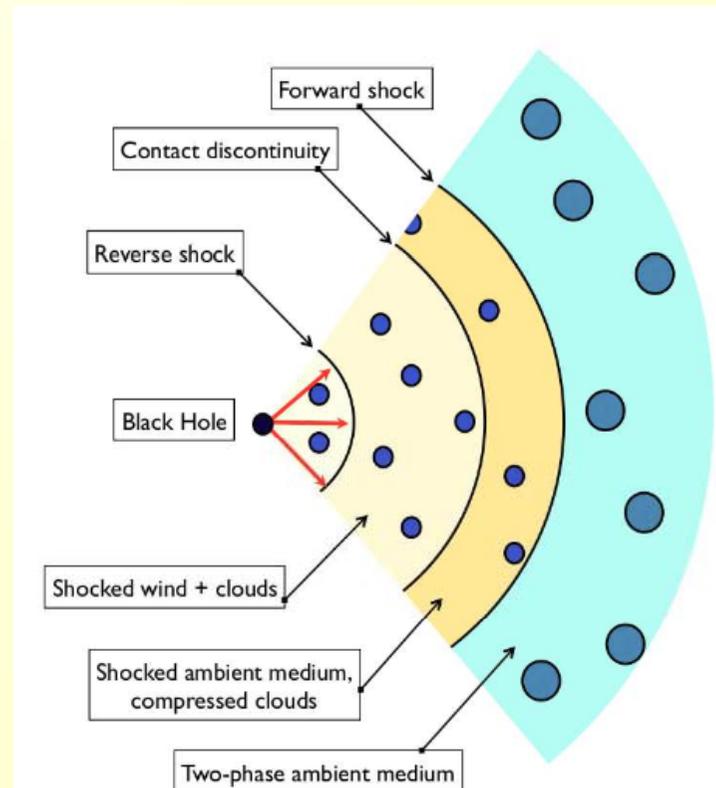


La plupart de l'énergie cinétique s'échappe dans les vides

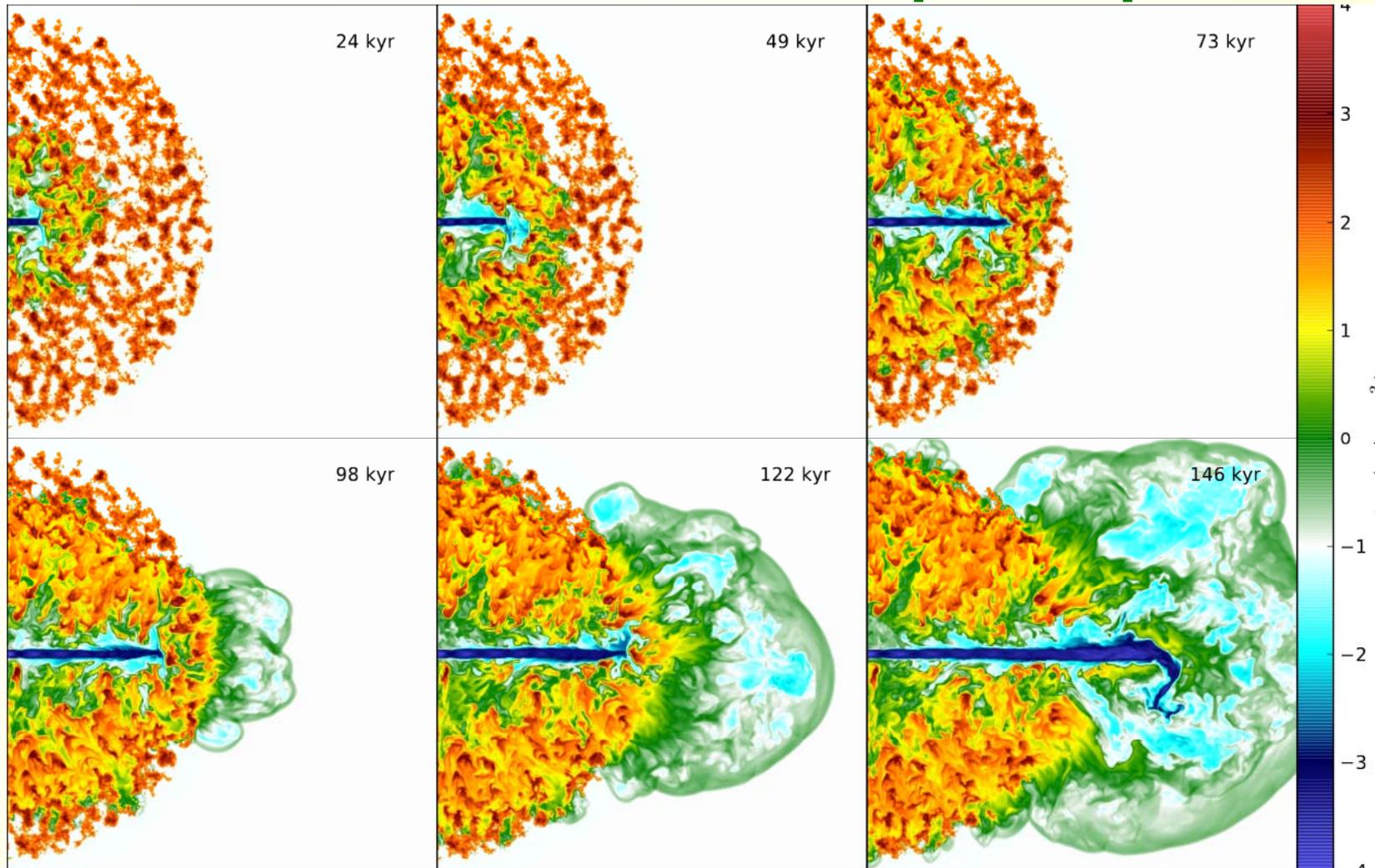
**Couplage moins efficace que prévu!**

Pourrait donner la relation  $M$ - $\sigma$

*Nayakshin 2014*



# Structure fractale 2pc-1kpc

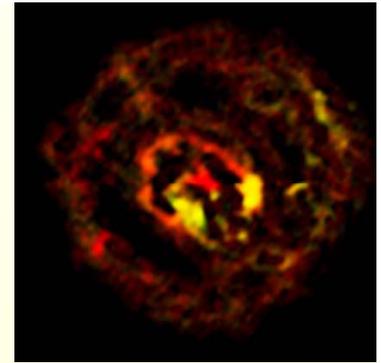


Jets relativistes efficaces *Wagner & Bicknell 2011*

# AGN de faible luminosité

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

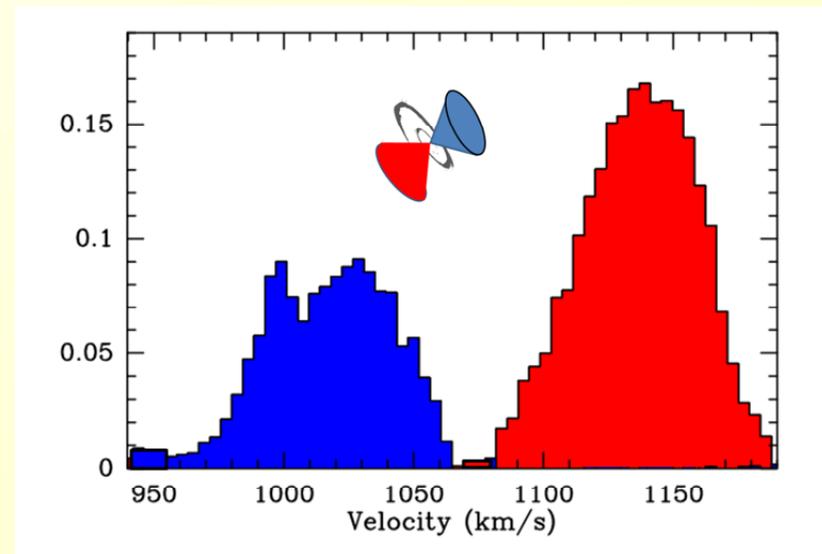
Le gaz moléculaire alimente le trou noir → flot



## Le plus petit flot détecté

Flot de 100km/s

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

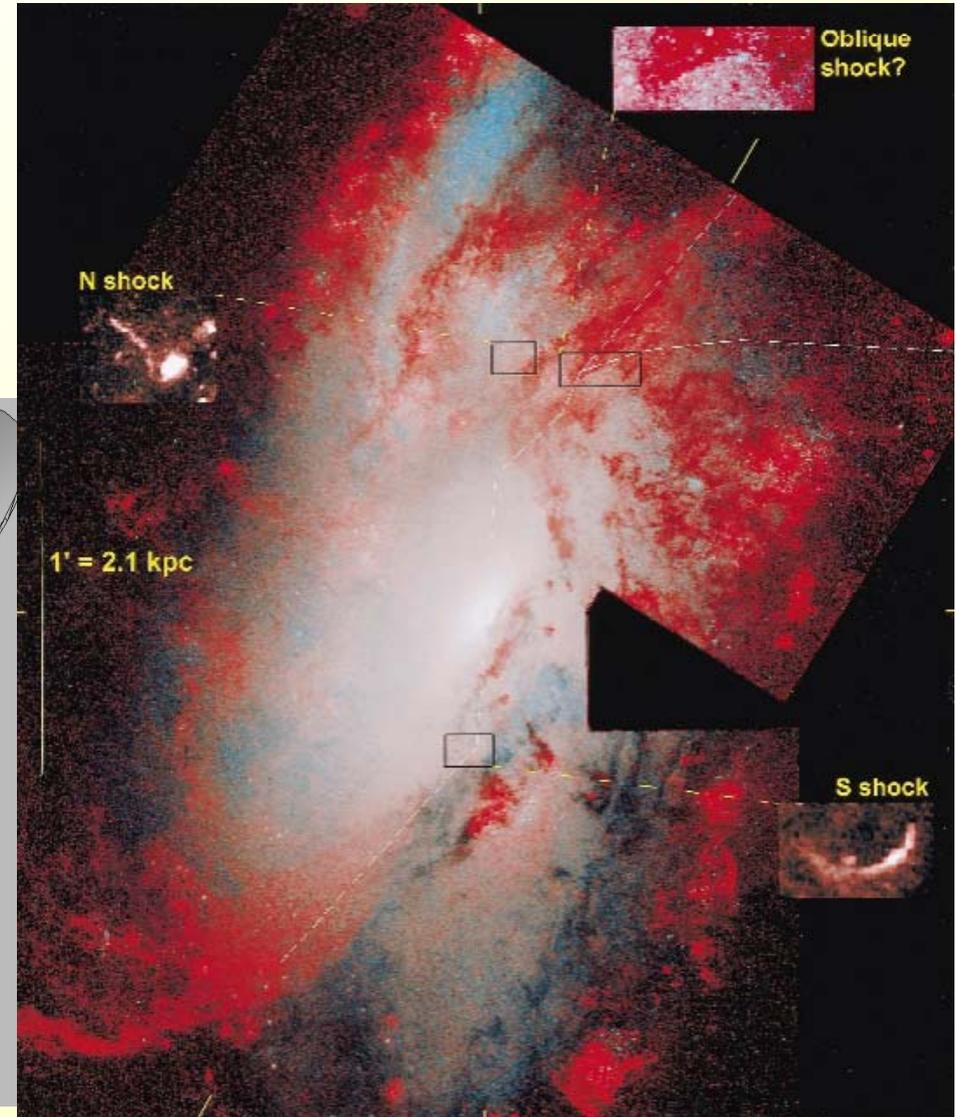
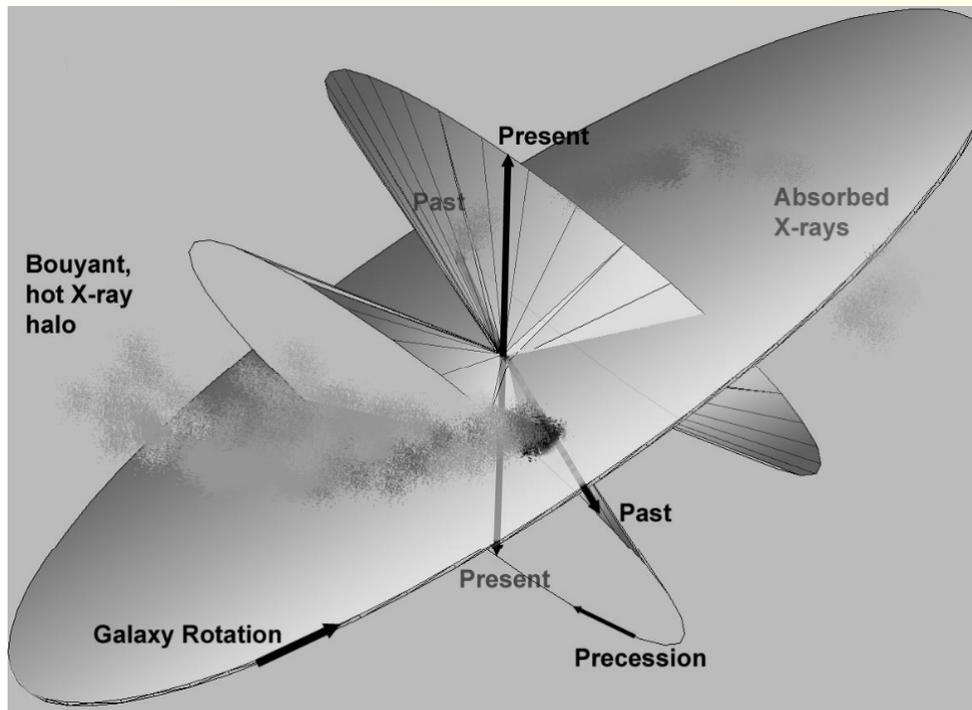


52

# 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

