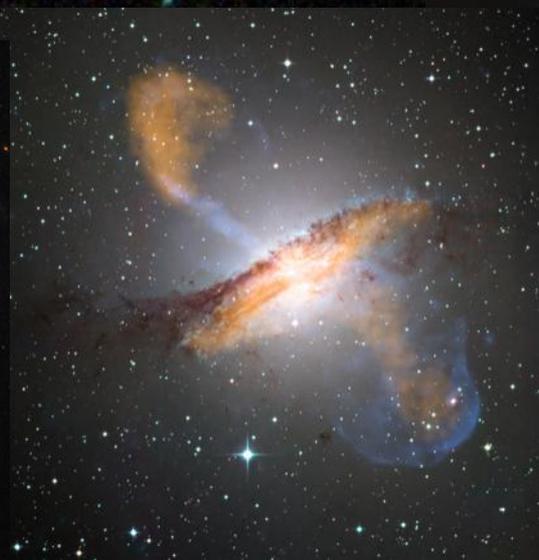
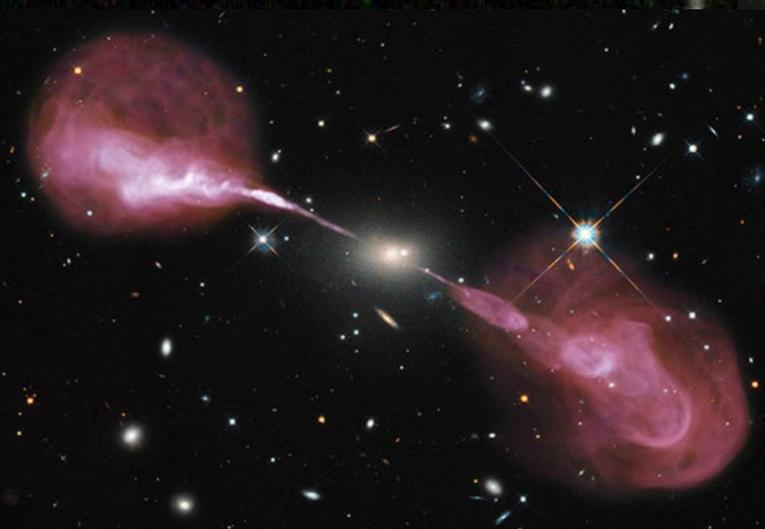




COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

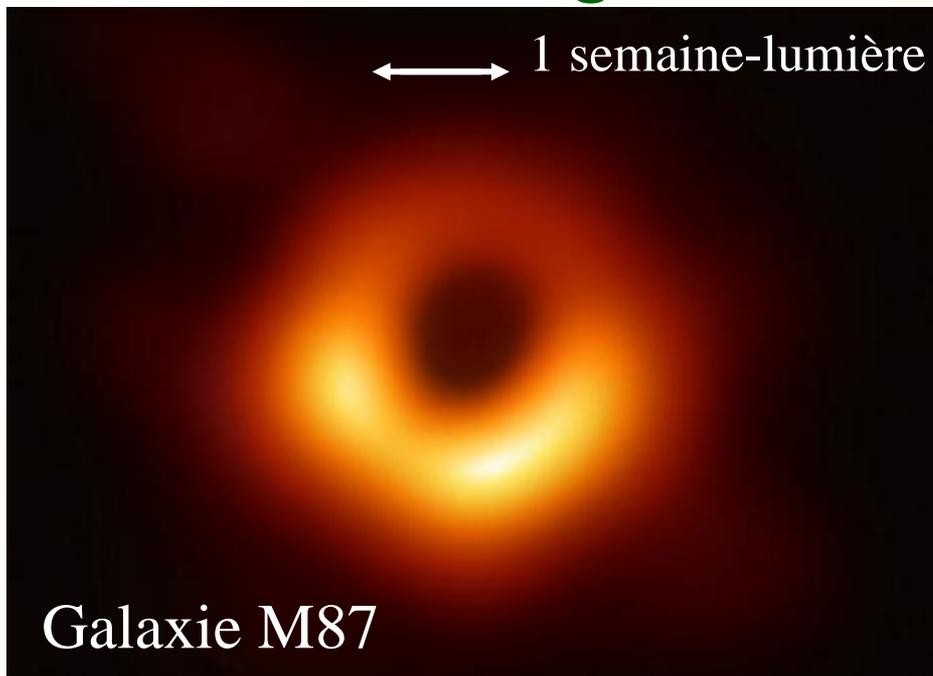
*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# La croissance des trous noir

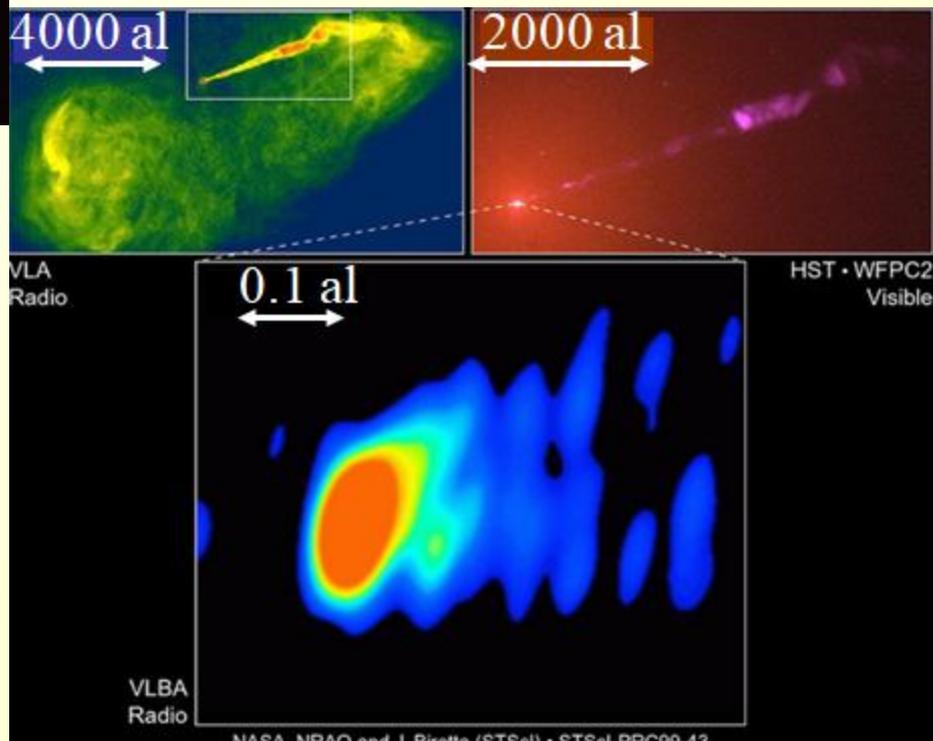
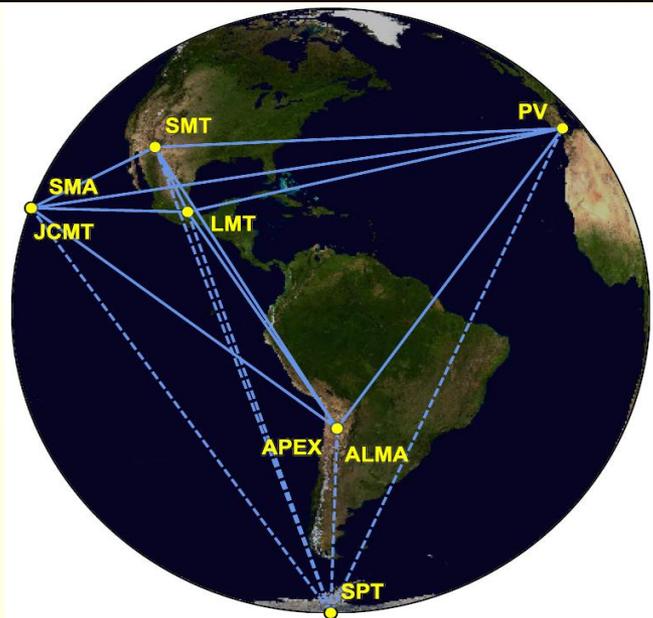


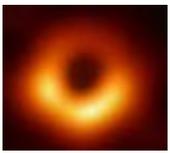
Françoise Combes  
**Observatoire de Paris**  
Février 2021

# Première image de l'ombre d'un trou noir



10 Avril 2019 EHT  
« Event Horizon Telescope »

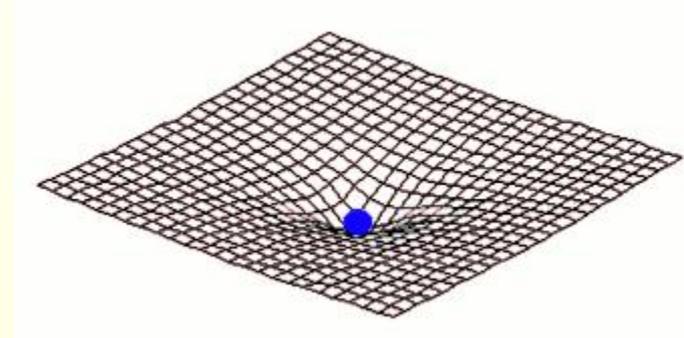




# Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Toute masse  $M$  déforme l'espace

Mais un trou noir est une singularité

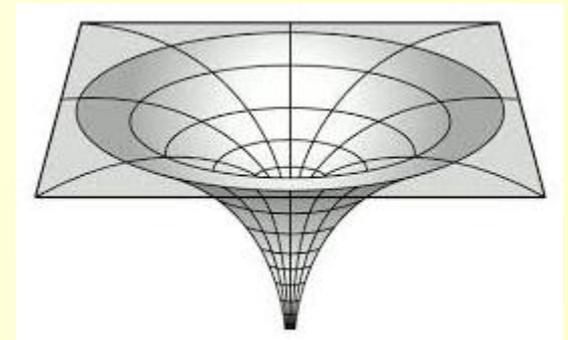


**Horizon du trou noir:  $V_{\text{ech}} = c$      $V_{\text{ech}}^2 = 2 GM/R$**

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

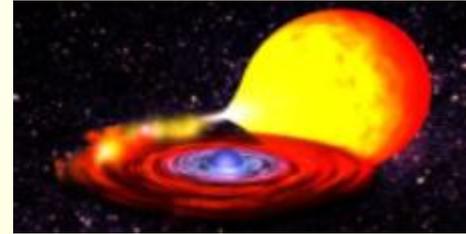
Pour un TN de  $1 M_{\odot}$ ,  $R_s = 3\text{km}$

*Un trou noir n'a pas de cheveux!*  
Masse et spin seulement



# Deux sortes de trous noirs

1. **Trous noirs de masse stellaire**, étoile massive en fin de vie  $\sim 3-50 M_{\odot}$



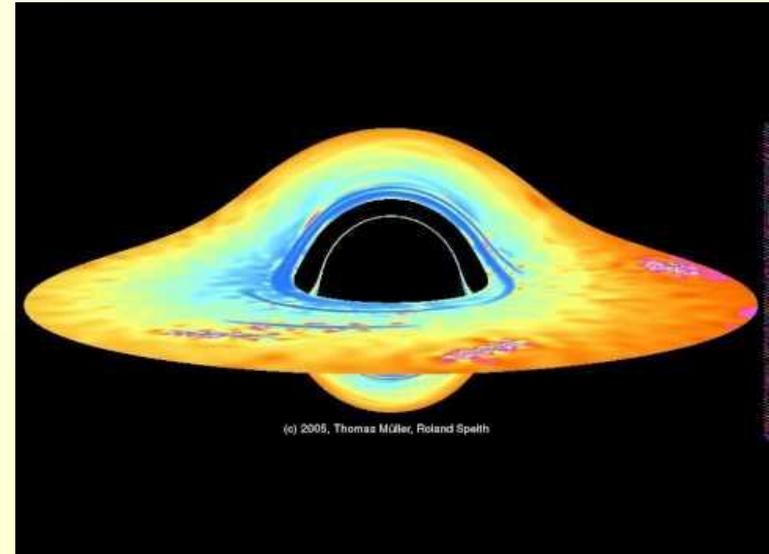
2. **Trous noirs super-massifs**: noyaux de galaxie

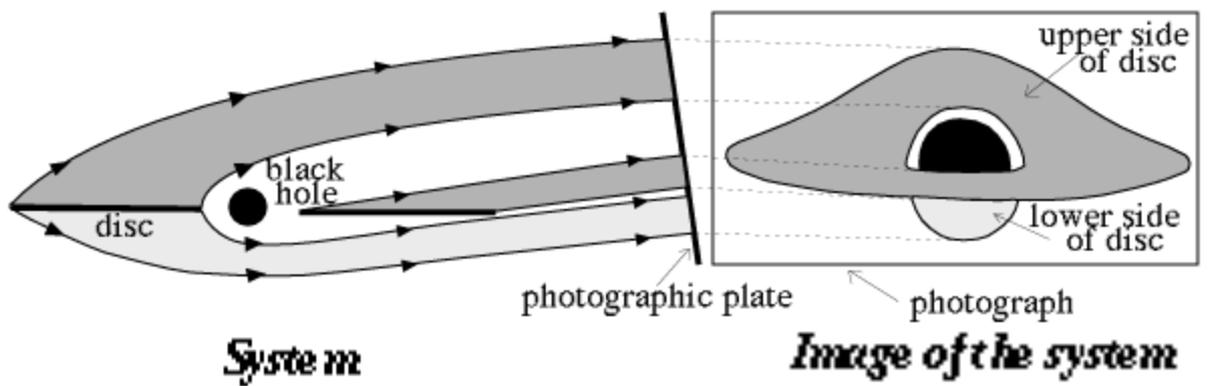
Rayon du trou noir d'un milliard de  $M_{\odot} = 2$  heures-lumière

La densité moyenne d'un trou noir décroît comme  $1/M^2$

Très faibles forces de marée

→ pas de destruction à l'entrée d'un TN Super-massif!

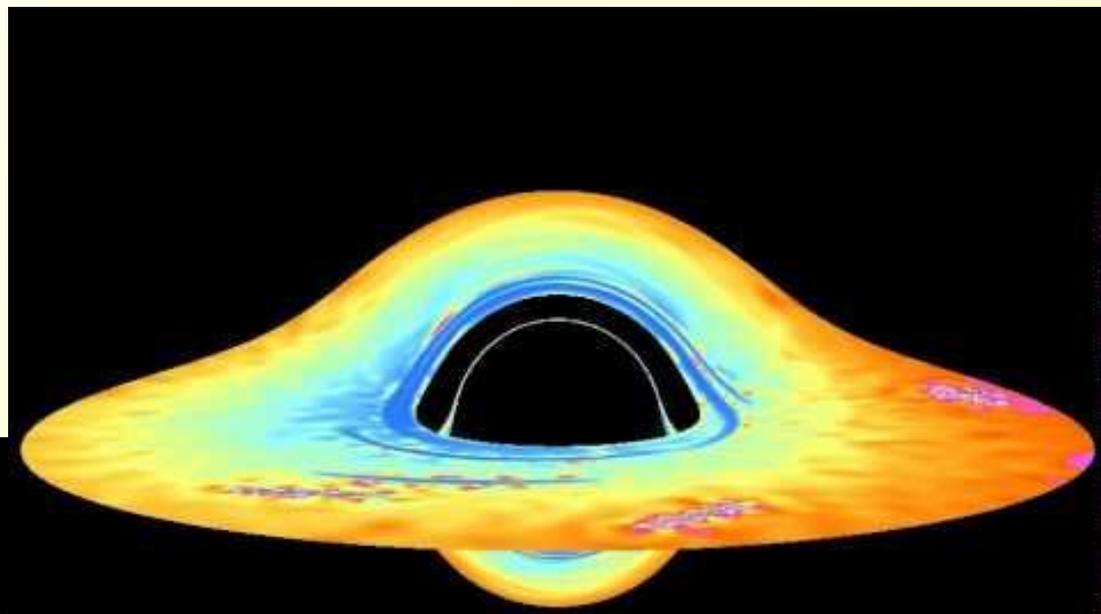




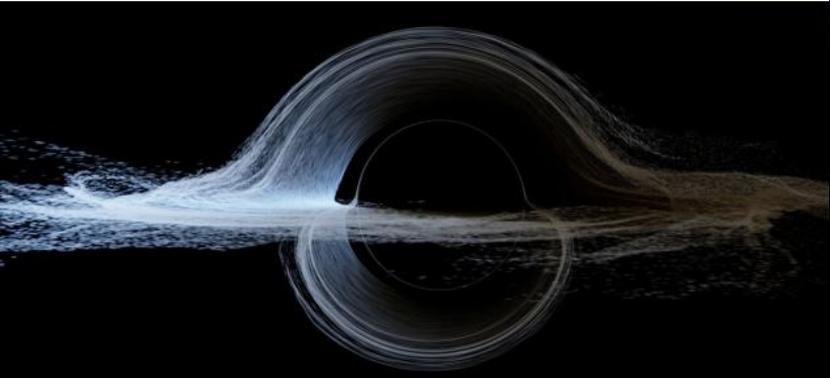
Le trou noir est entouré d'un disque brillant  
On l'observe à 10°

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

On voit aussi le dessous!



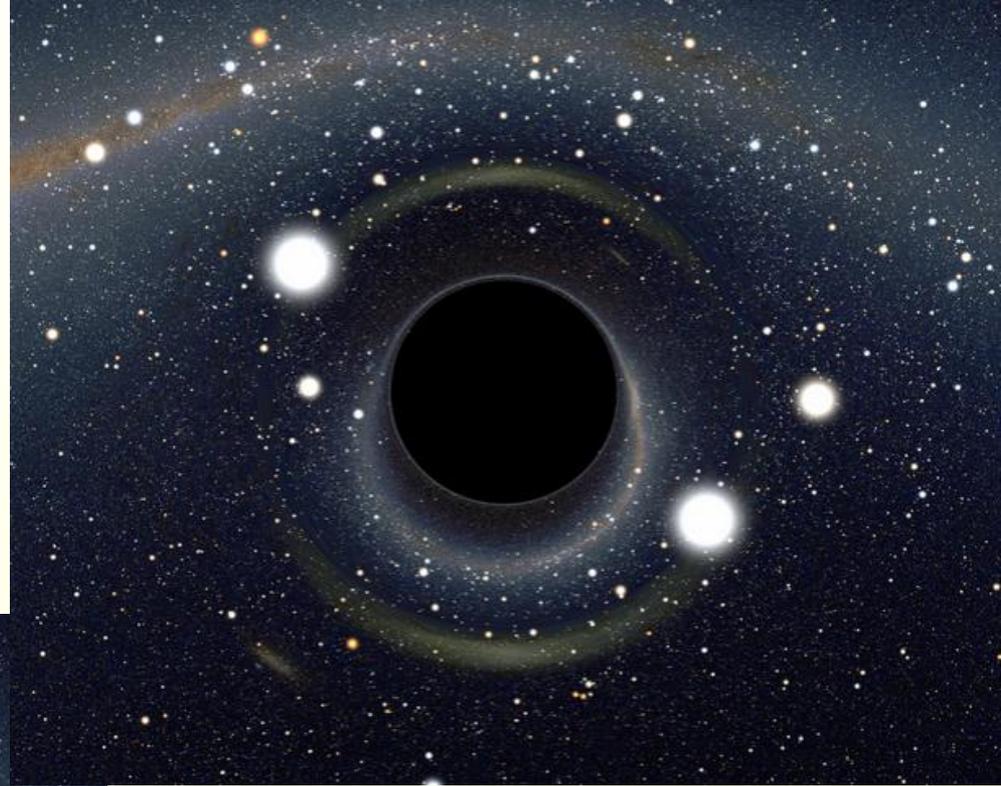
(c) 2005, Thomas Müller, Roland Speth



**Un trou noir dévie les rayons lumineux**

**→ Déformation des images**

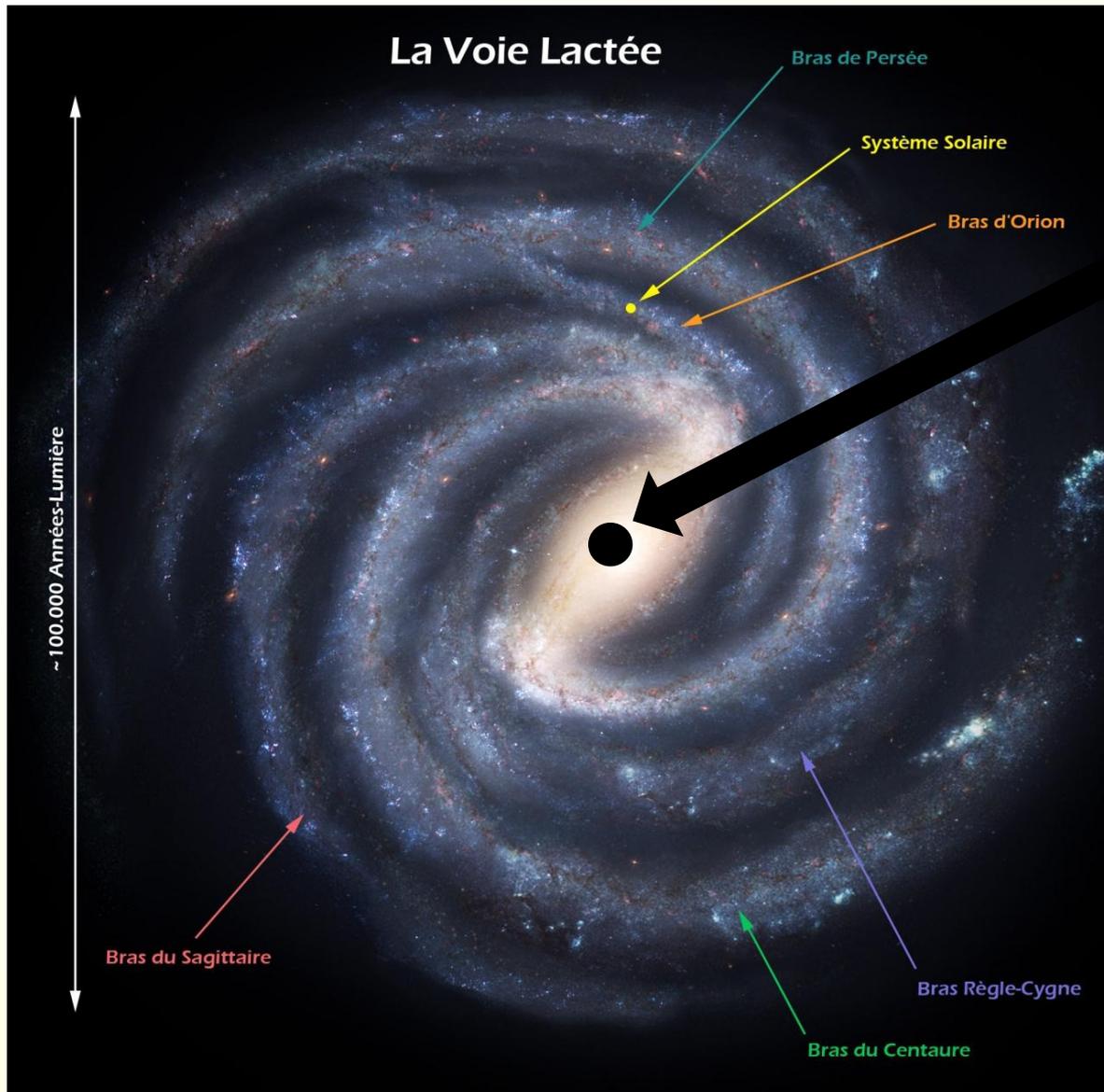
Nuages de Magellan et  
Voie Lactée



Trou noir entre nous et  
les Nuages de Magellan

*Alain Riazuelo*

# Notre galaxie: la Voie Lactée



Trou Noir



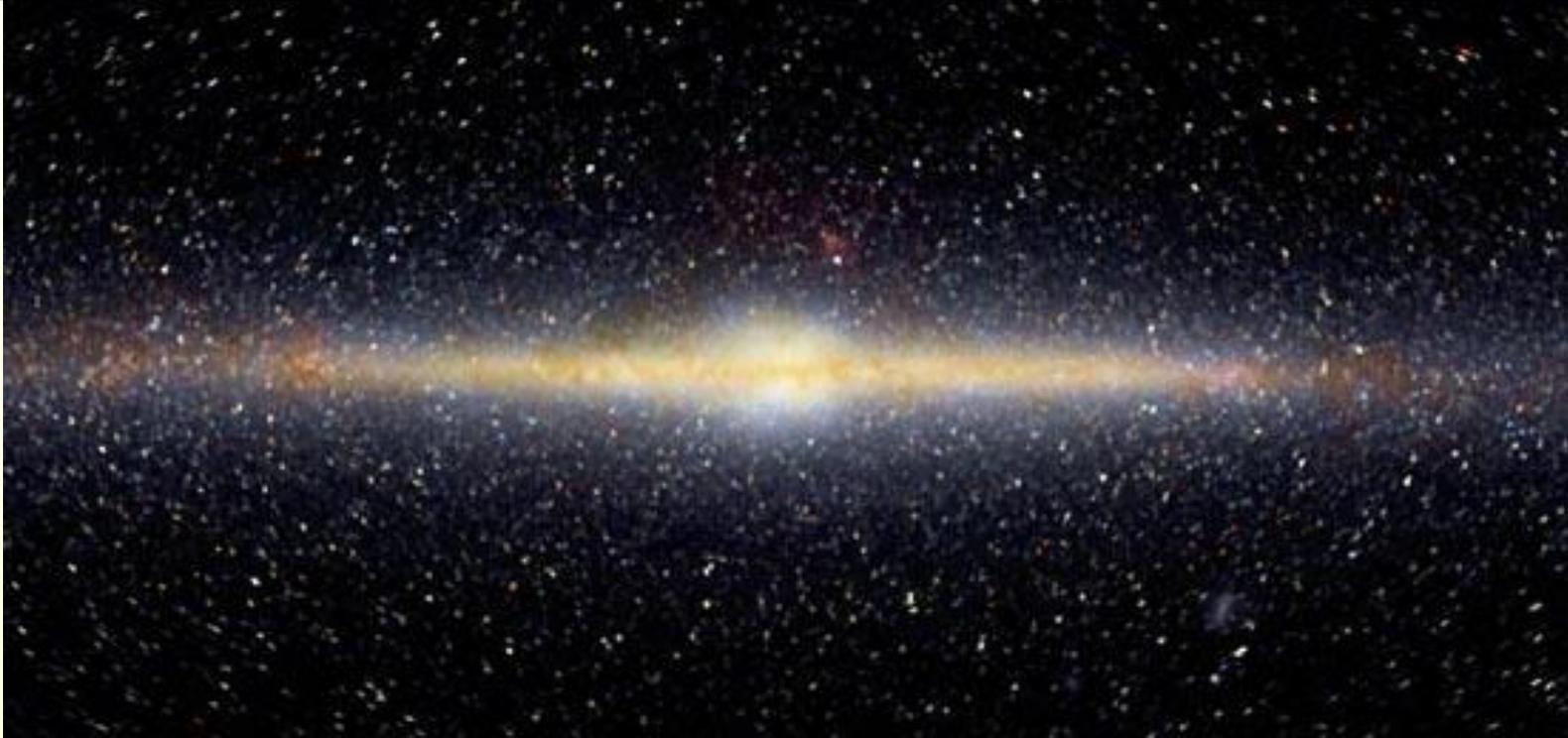
# Images en optique, infra-rouge



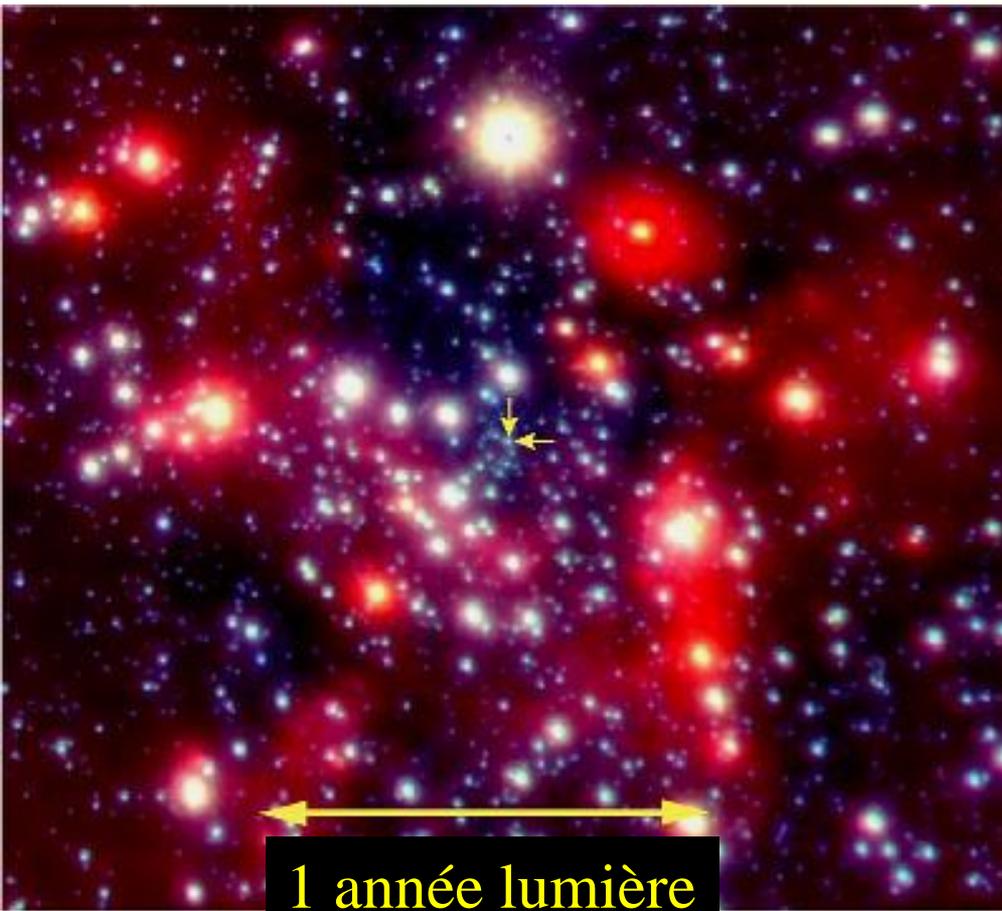
Barre

Bulbe en  
cacahuète

2MASS



# Astrométrie et mouvements propres au centre galactique

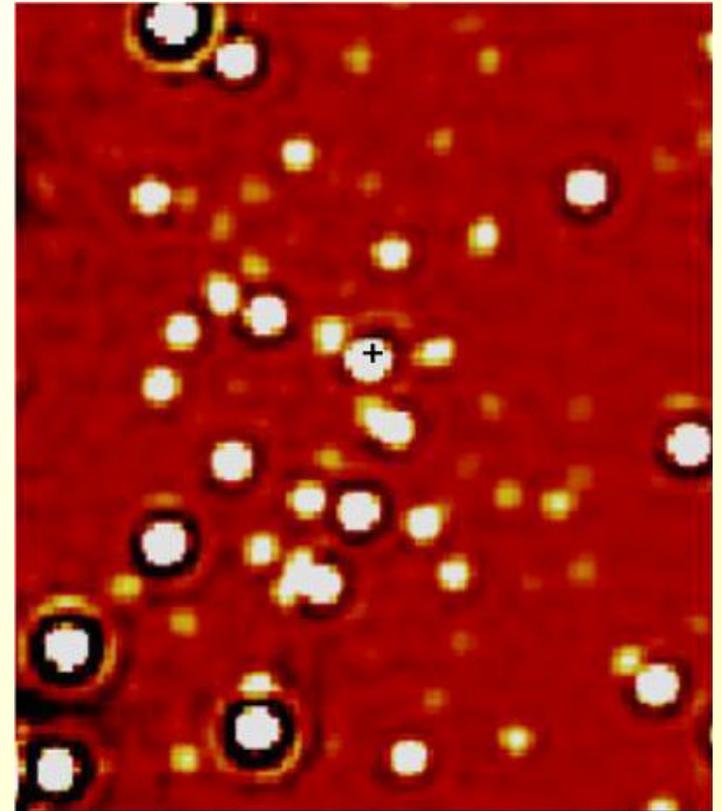


1 année lumière

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)

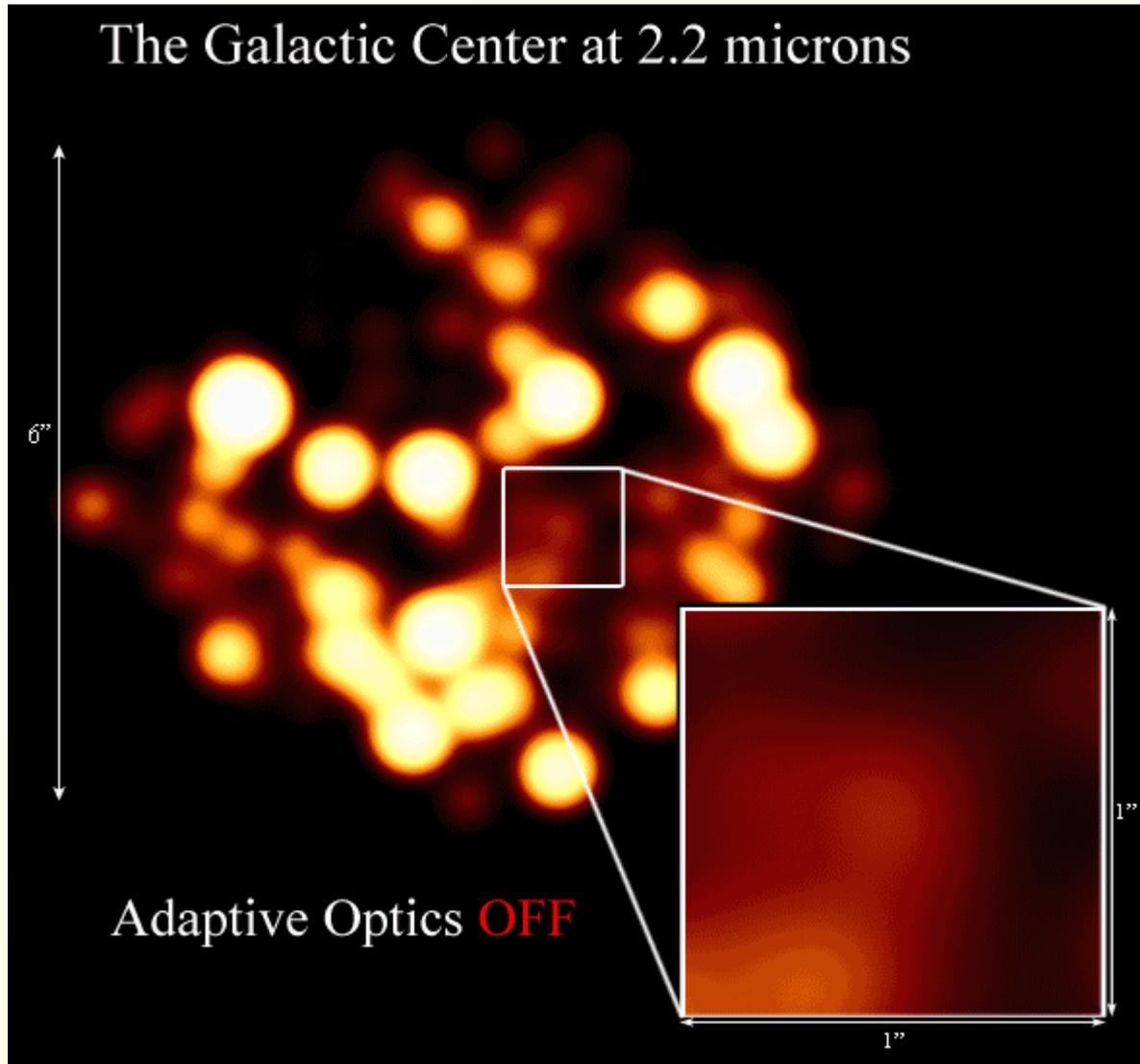
ESO PR Photo 23b/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



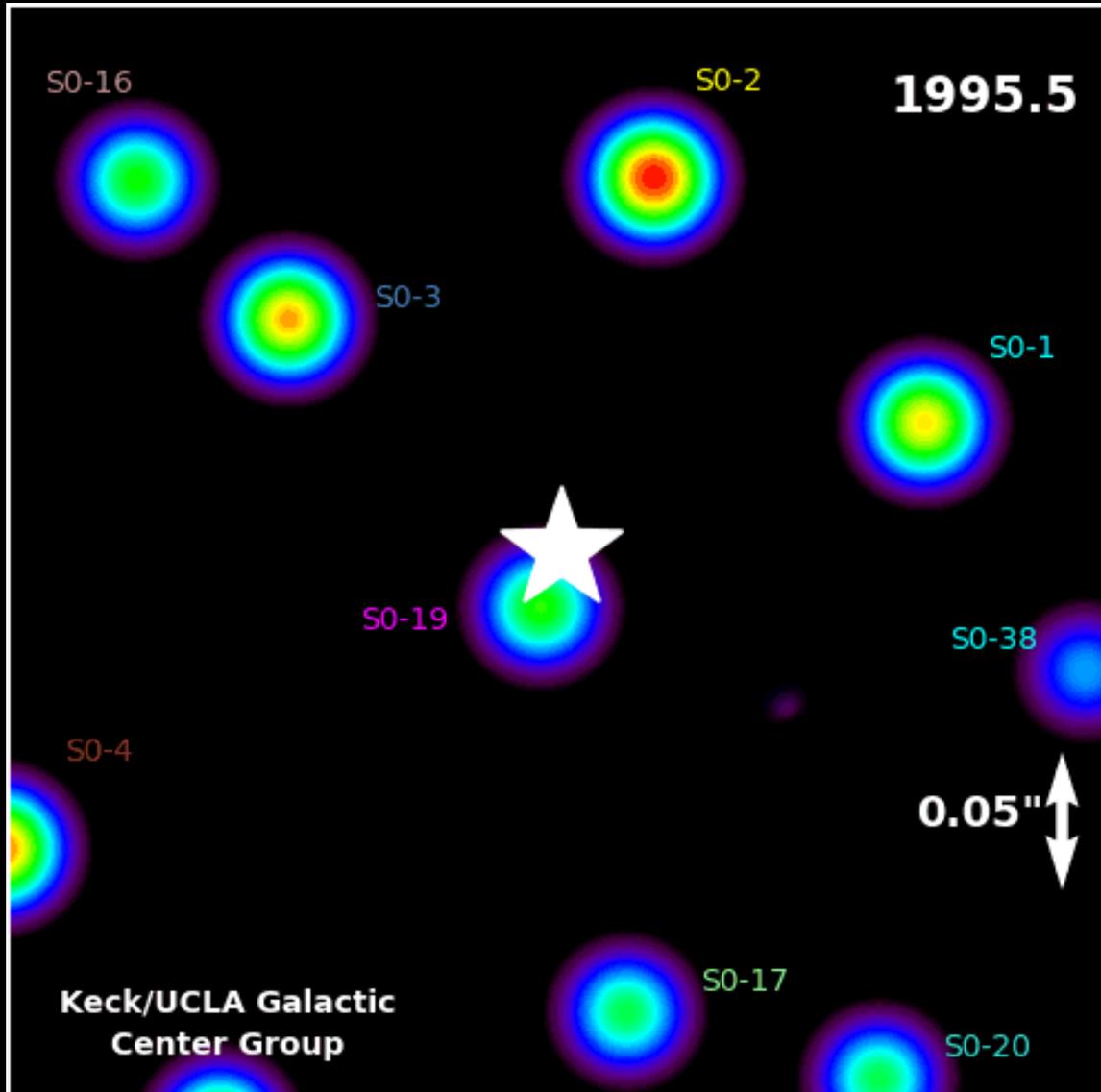
VLT-optique adaptative

# Les effets de l'optique adaptative

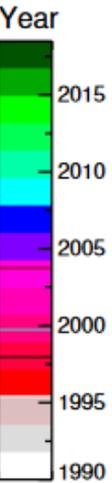
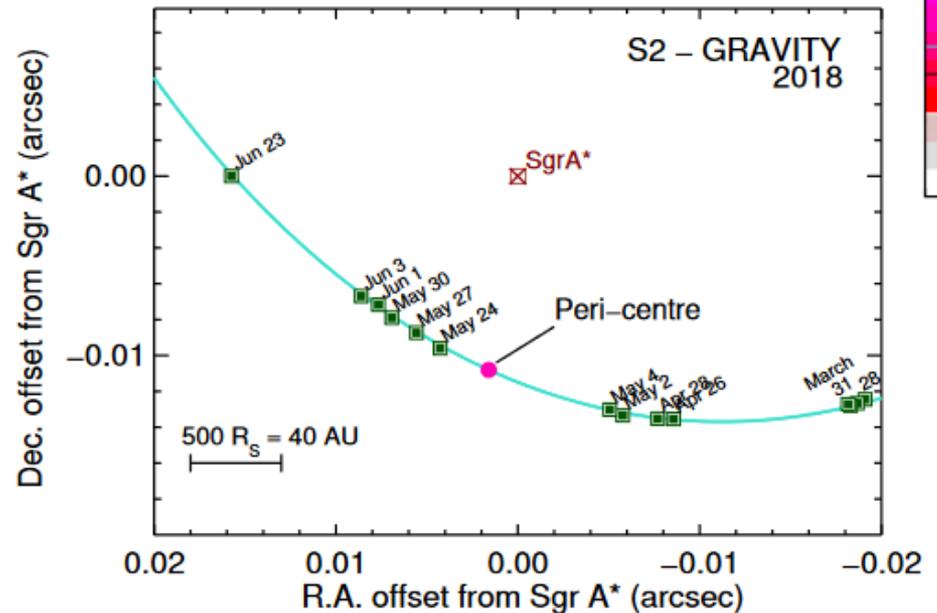
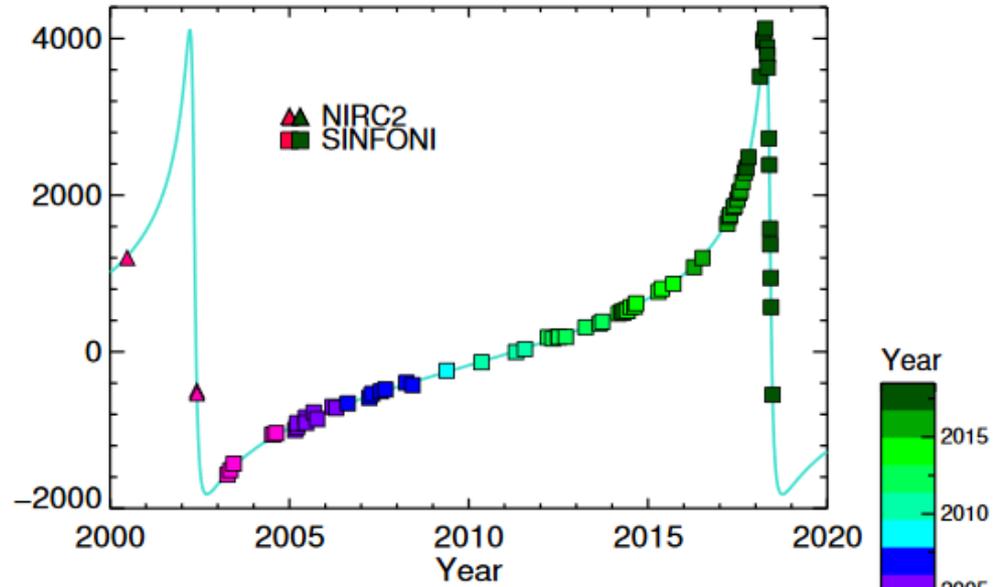
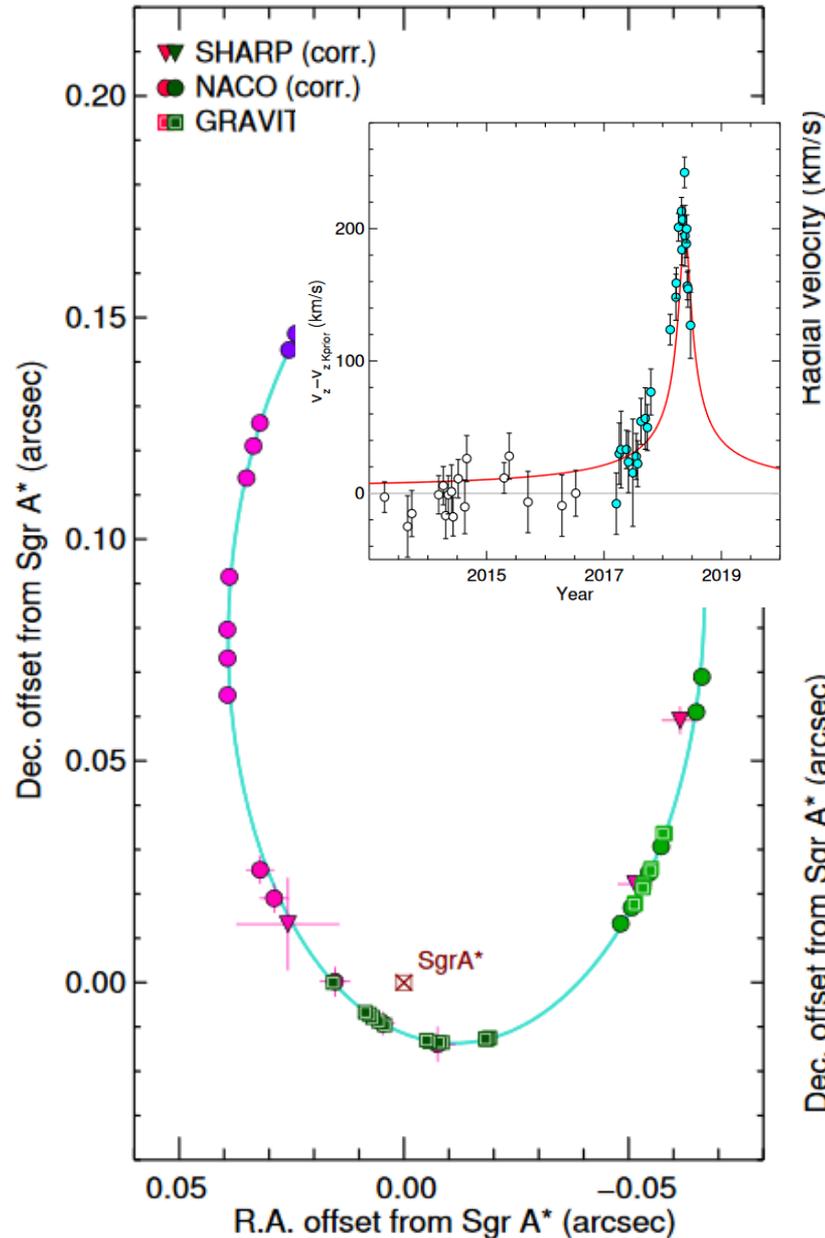


Corrige des  
turbulences de  
l'atmosphère

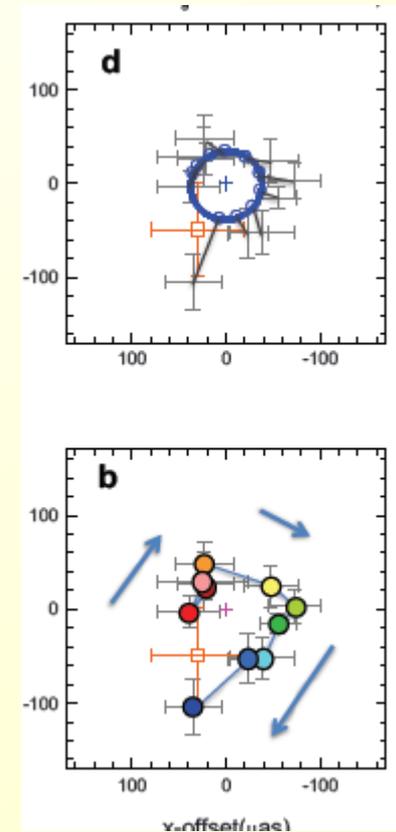
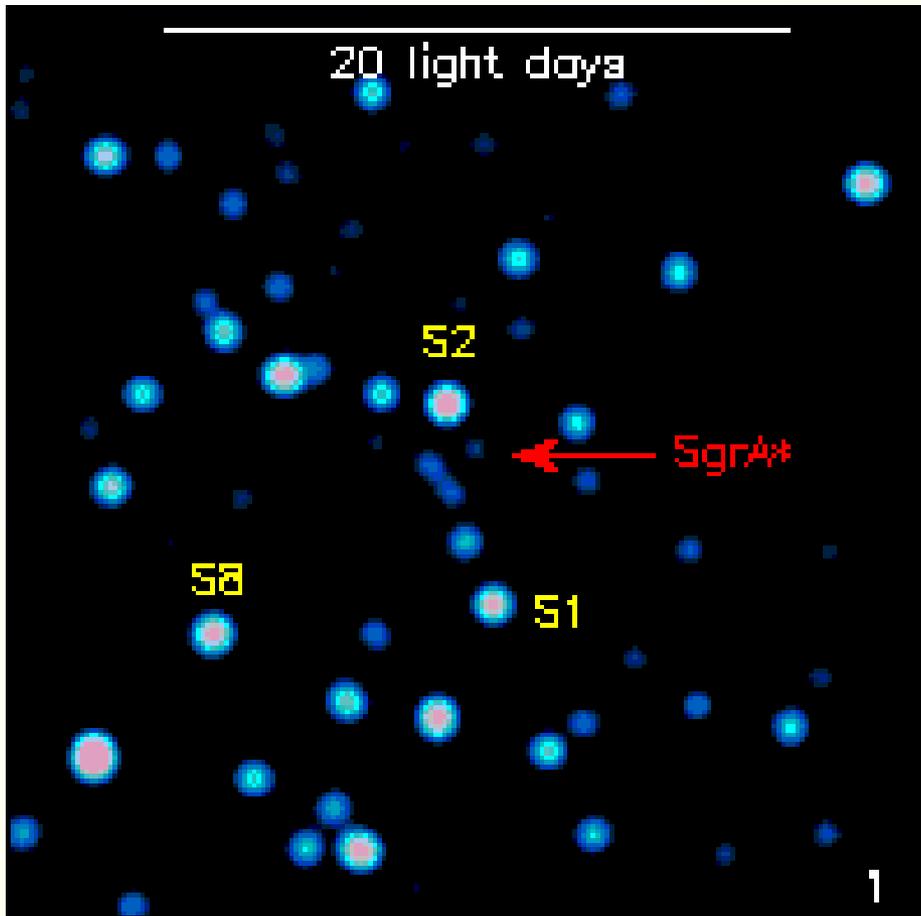
# Animation du mouvement des étoiles, dans le centre de la Voie Lactée



# Détection du redshift gravitationnel, *GRAVITY Coll 2018*



# Sursaut Infrarouge du trou noir de la Galaxie

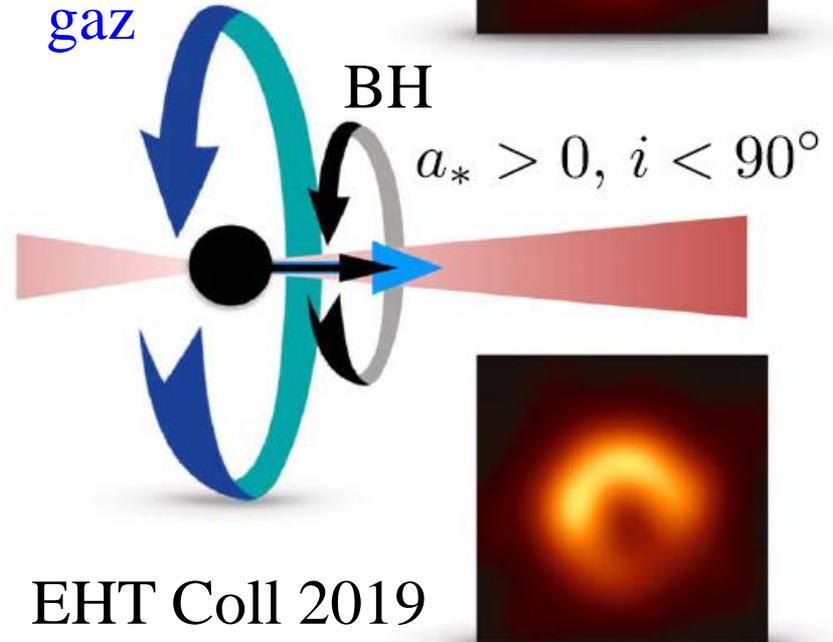
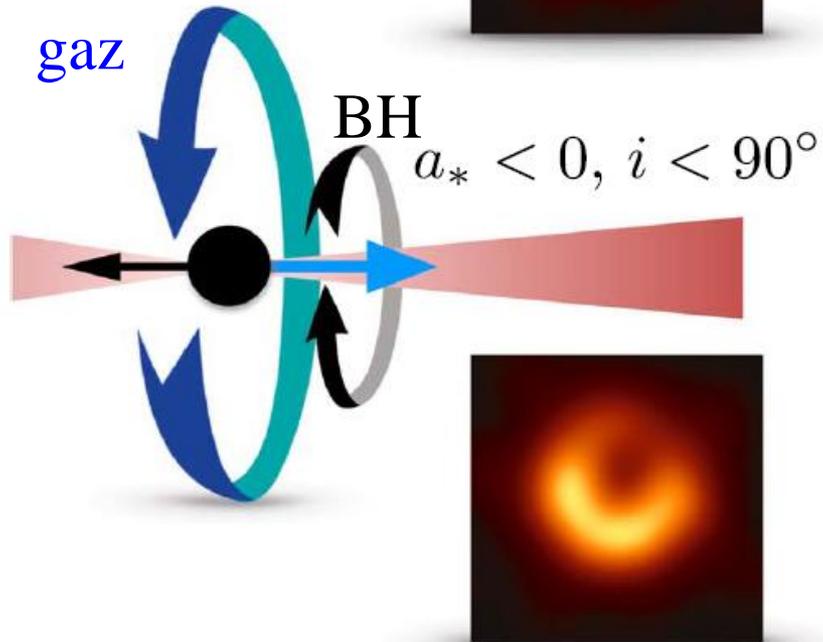
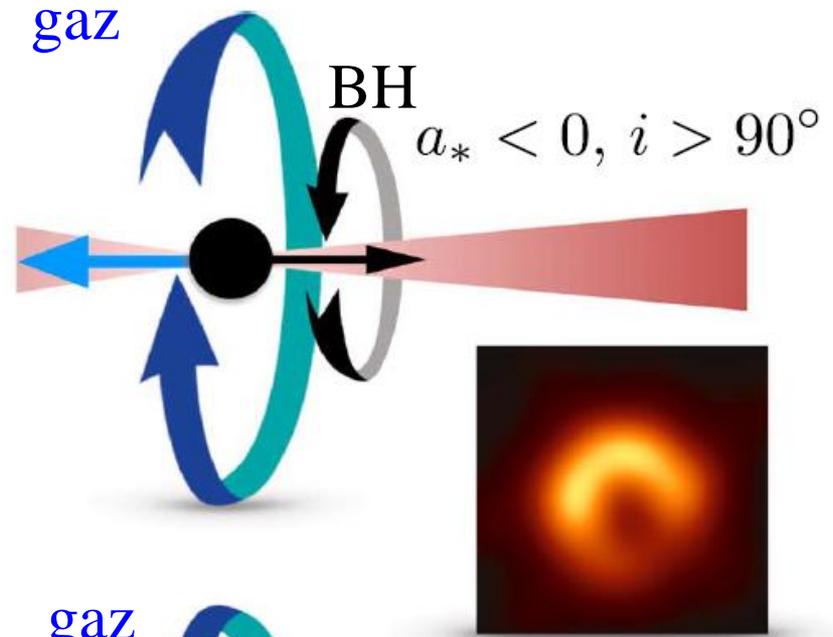
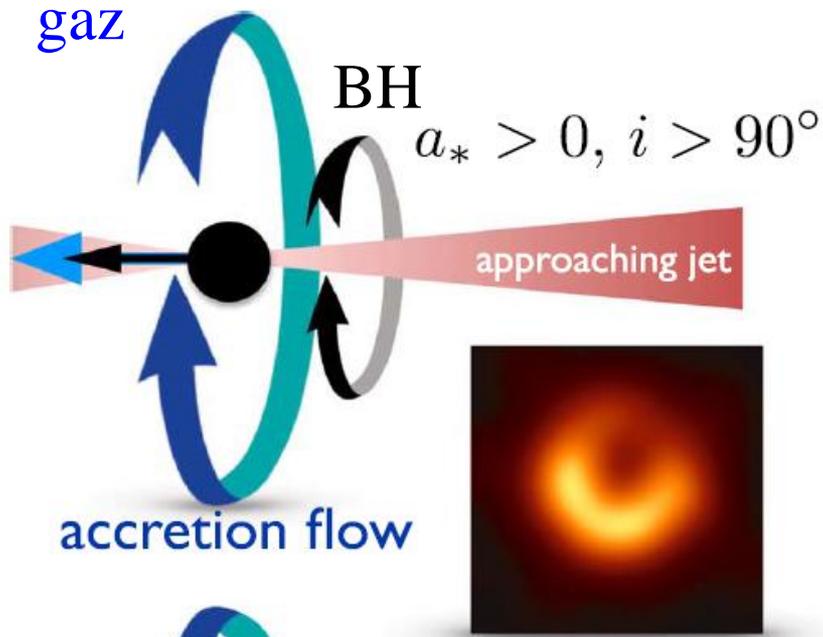


GRAVITY 2018

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

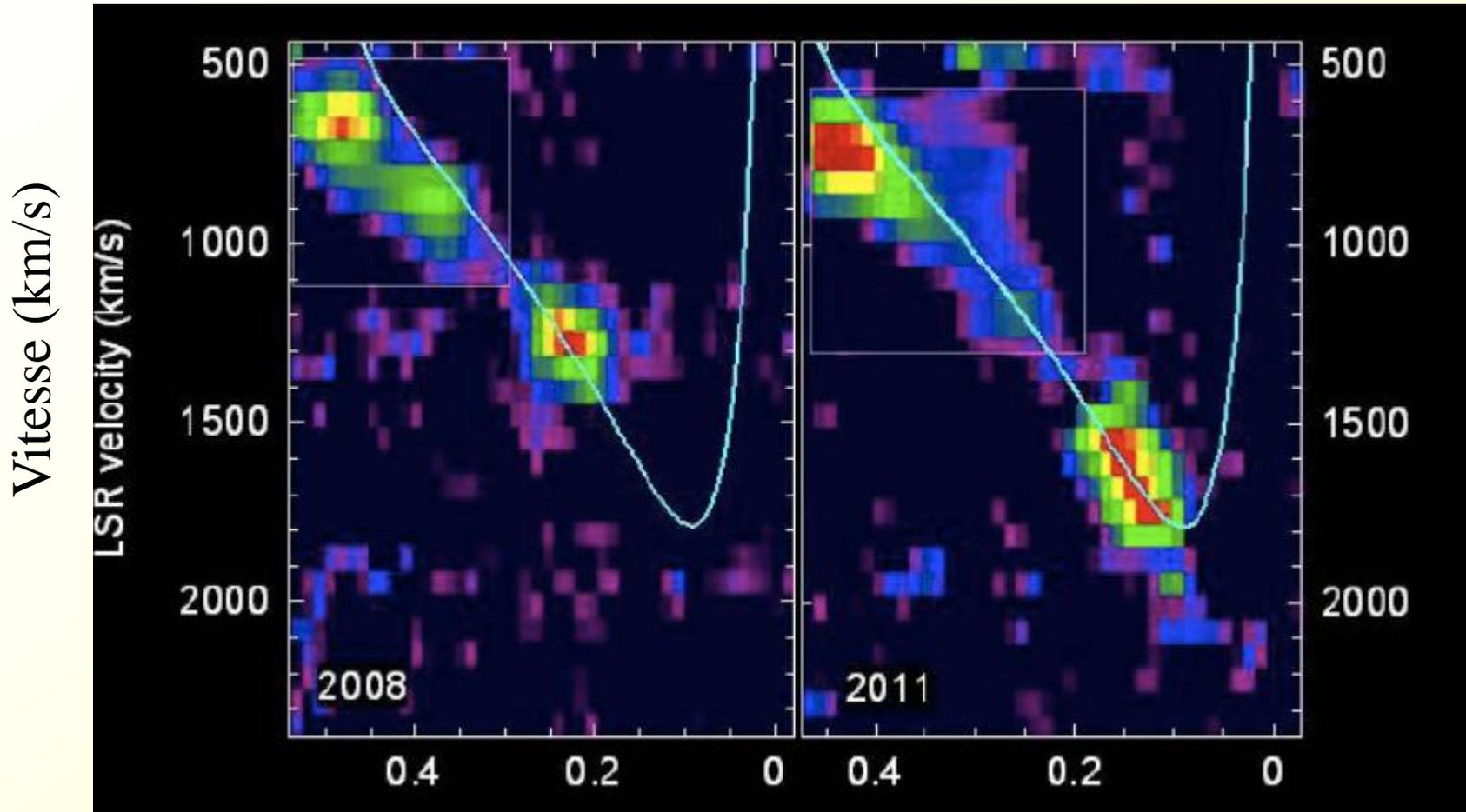


# Le trou noir de M87



EHT Coll 2019

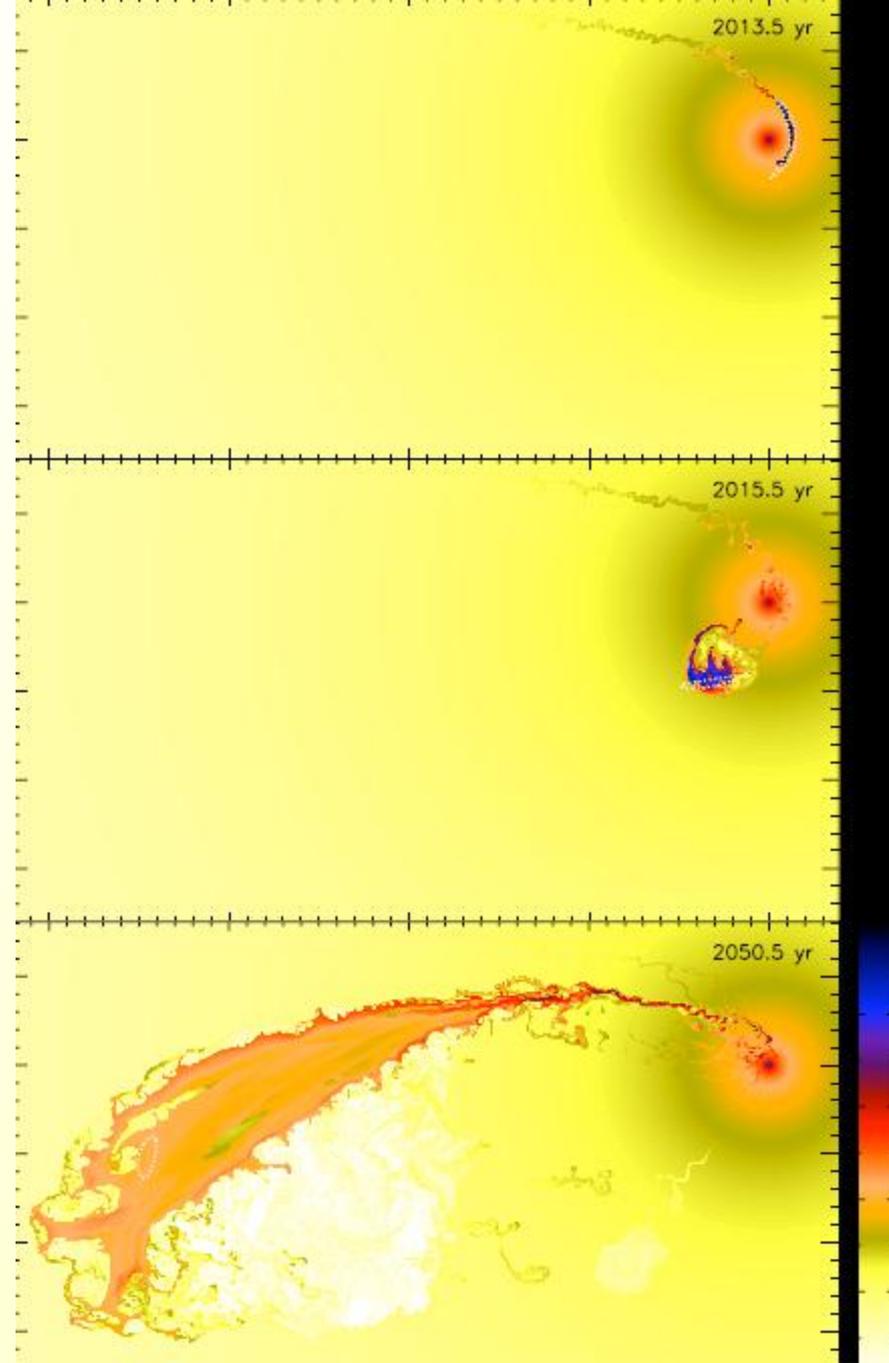
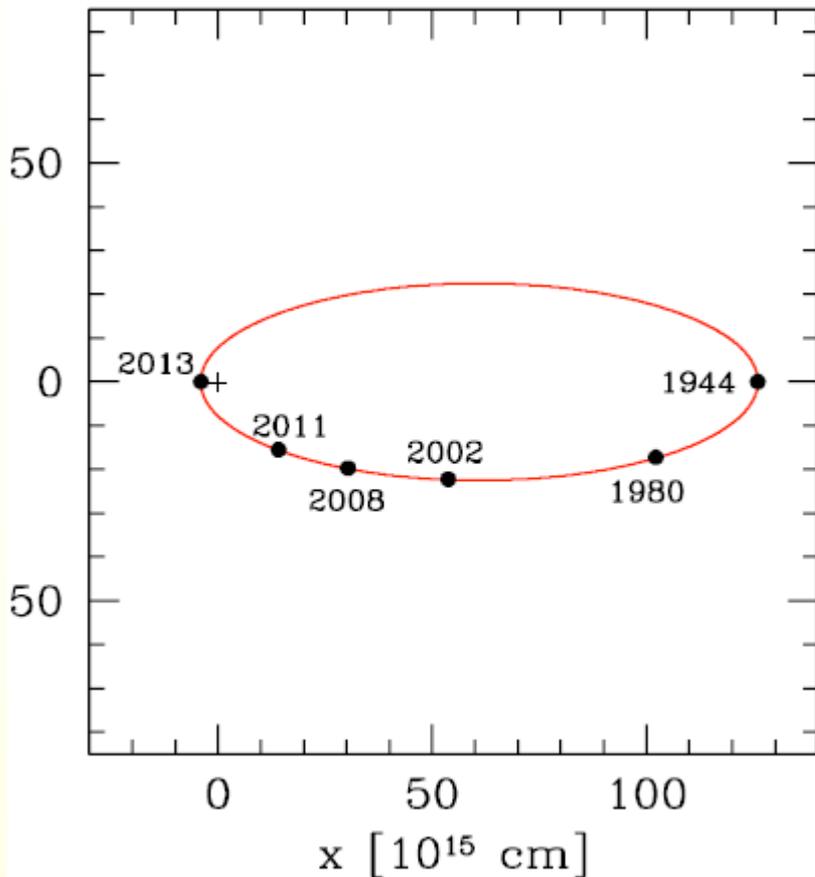
# Découverte d'un nuage de gaz en 2011



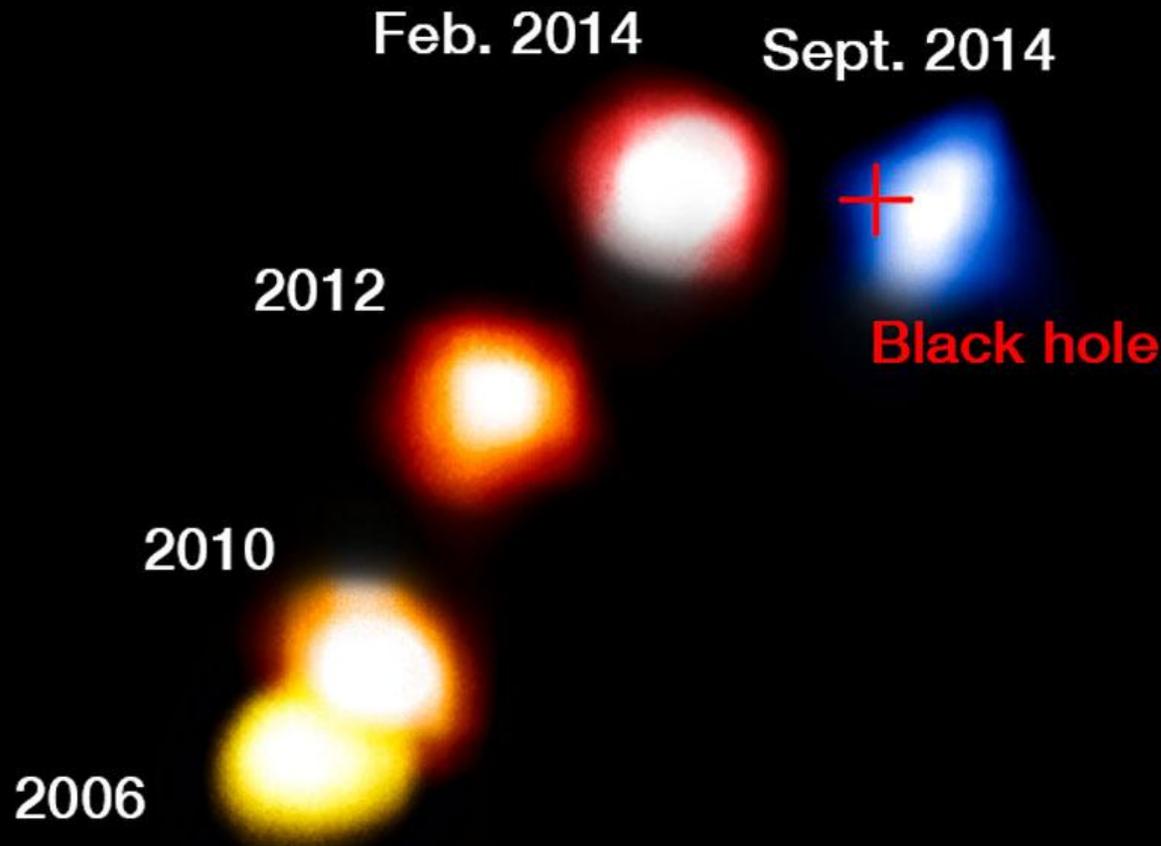
Distance au trou noir en arcsec (=0.1 al)

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

137 ans de période

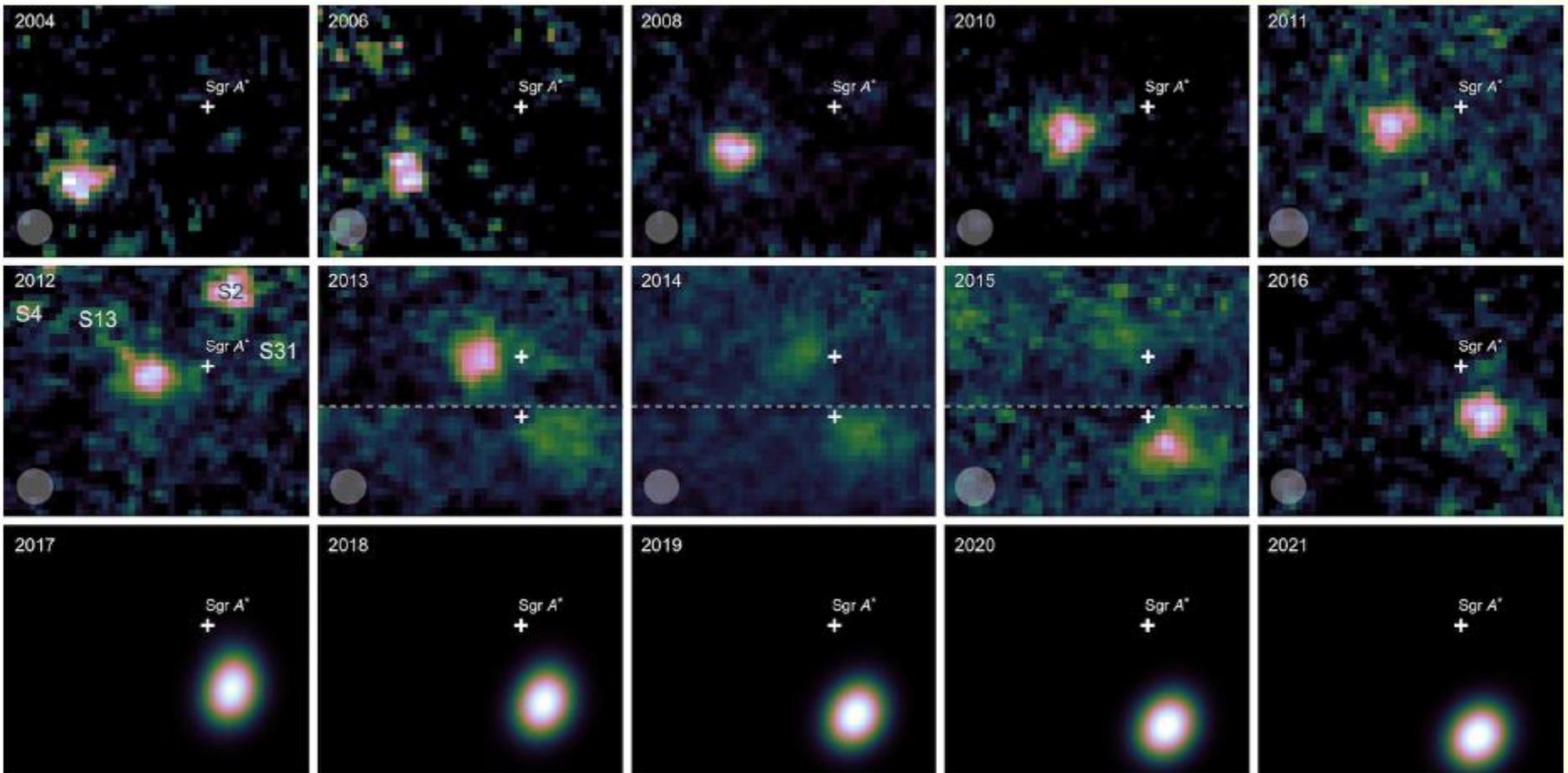


# Images après le péricentre (26 Mars 2015)



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

# Prédictions jusqu'en 2021



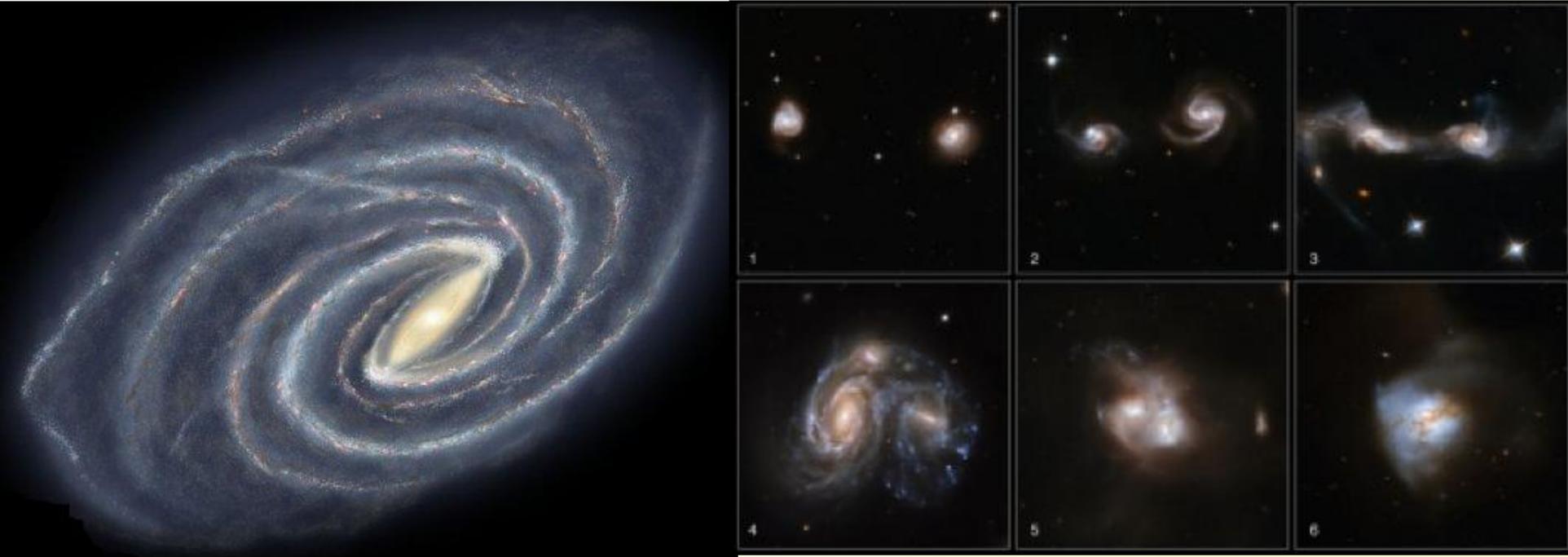
0.6 x 0.5 “

# Interaction et fusion avec Andromède



# Perspectives pour la Voie lactée...

Dans quelques 3 Ma



Fusion des trous noirs

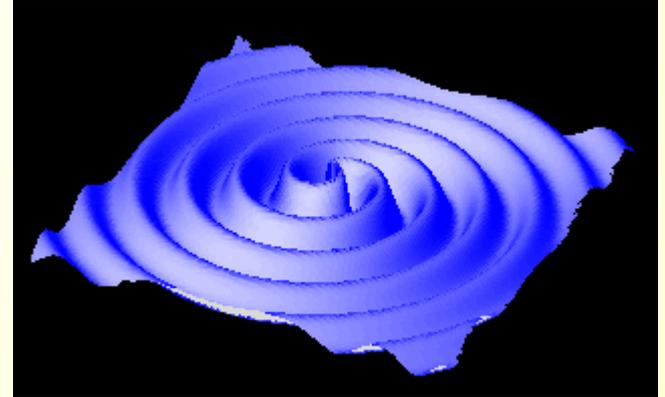


→ Ondes gravitationnelles

# Ondes gravitationnelles

Binaire en rotation  
dont un trou noir

→ ondes gravitationnelles  
qui propagent la perturbation

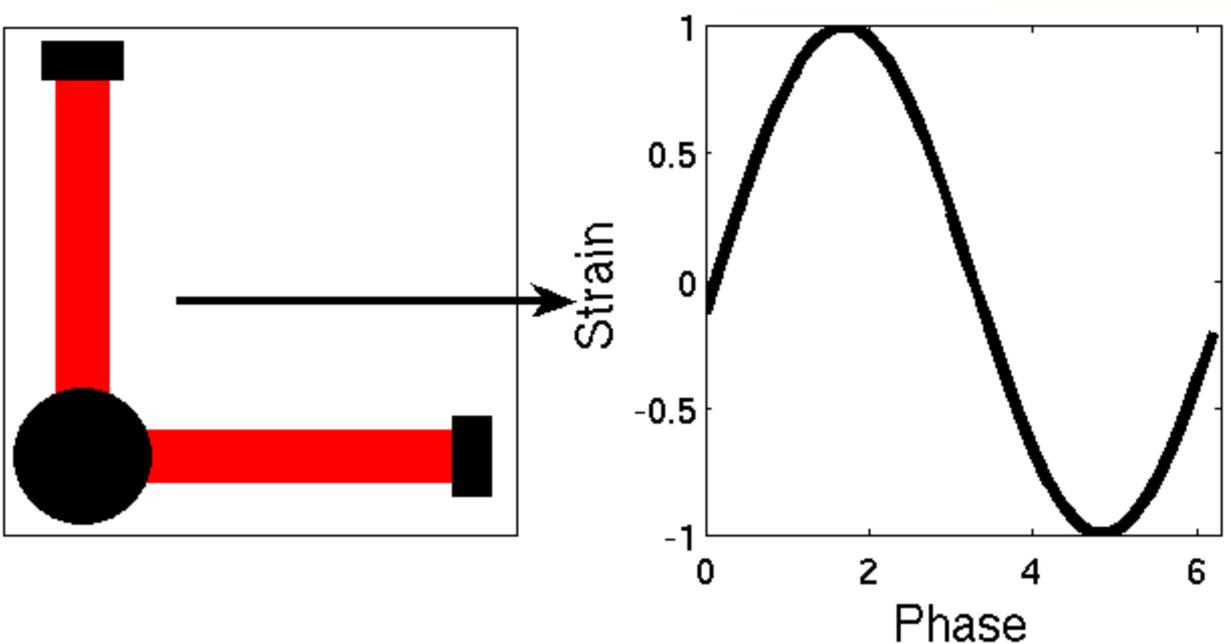


Masse transférée du compagnon  
stellaire au trou noir

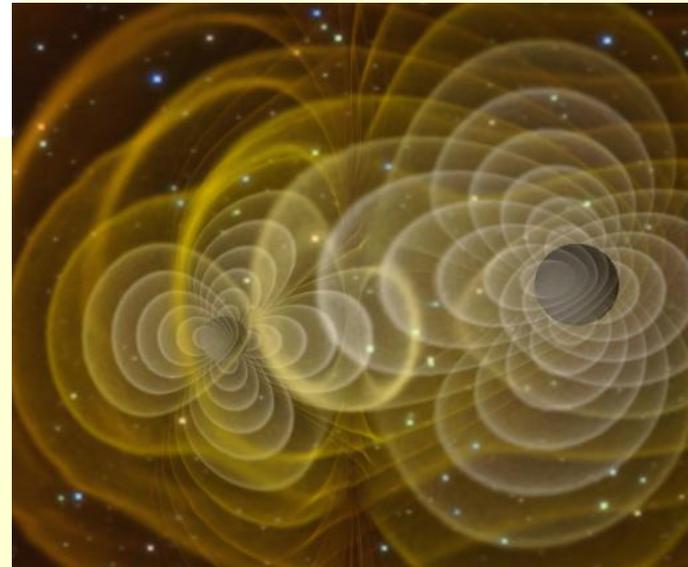
→ ondes gravitationnelles

# Interféromètres LIGO, Virgo..

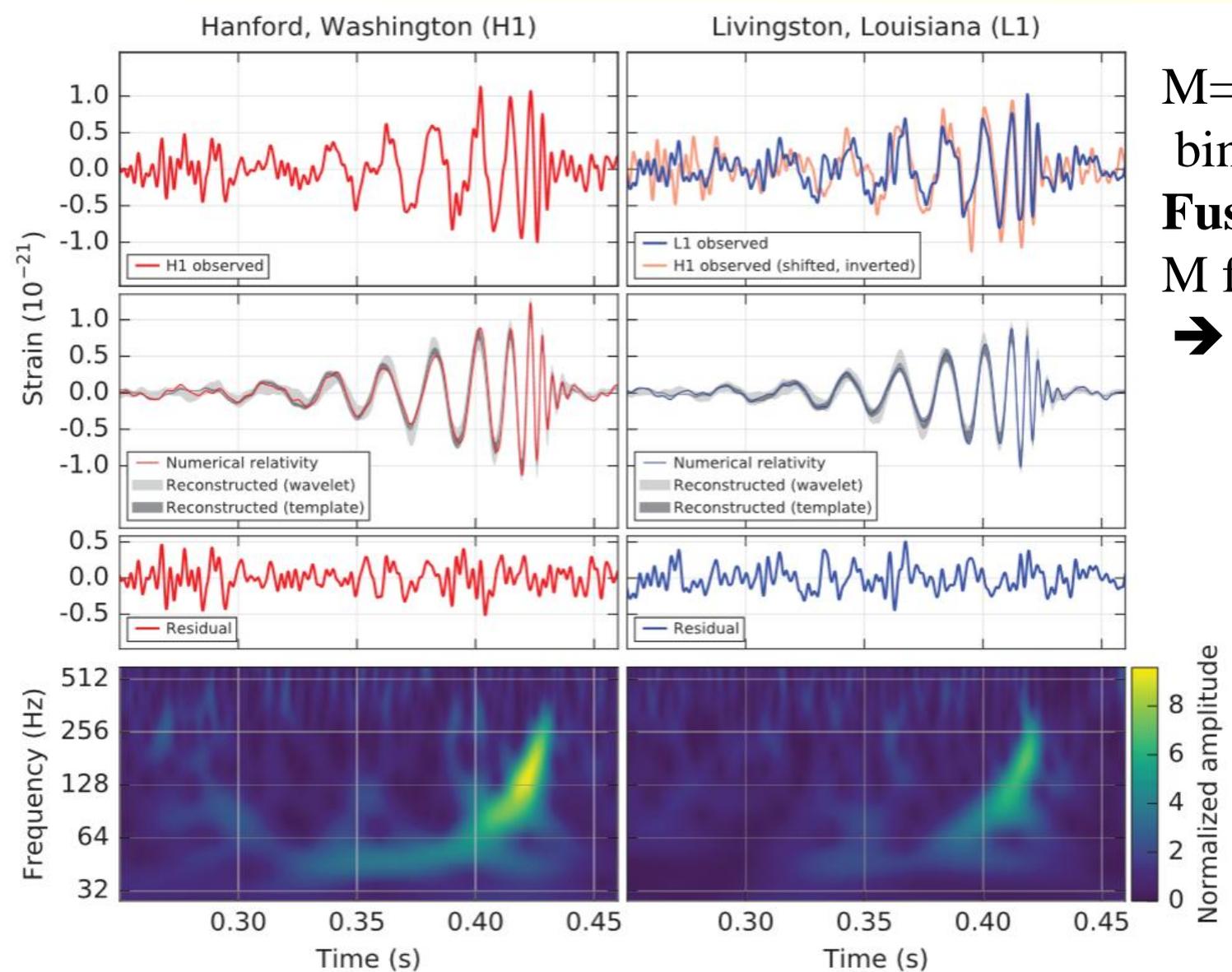
- Principe de mesure des ondes gravitationnelles



$$\Delta L/L \sim 10^{-21}$$



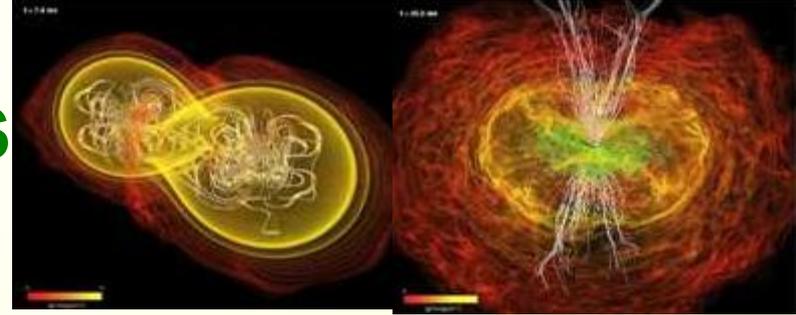
# Première détection: GW150914, LIGO



$M = 29$  et  $36 M_{\odot}$ ,  
binaire de  $65 M_{\odot}$   
**Fusion en 1/3 sec**  
 $M$  finale  $62 M_{\odot}$   
→ perte de  $3 M_{\odot}$

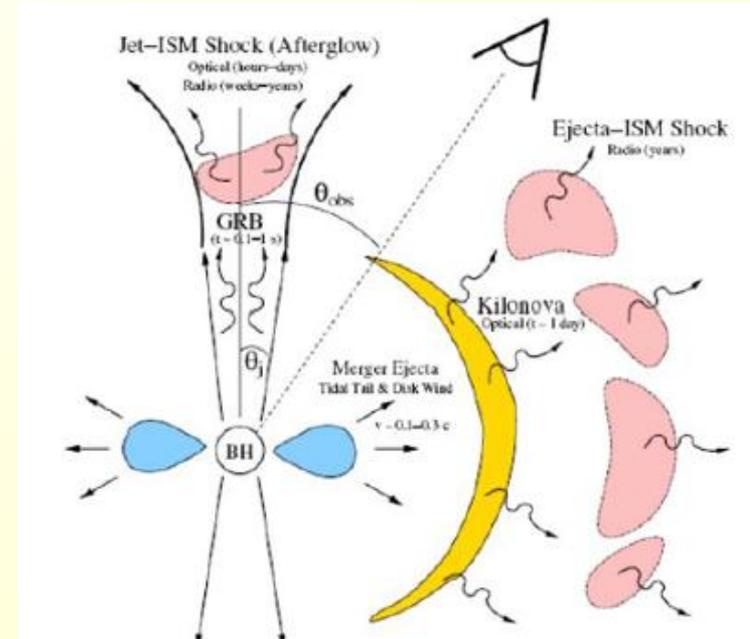
$\Delta L/L \sim 10^{-21}$   
 $D = 410 \text{ Mpc}$   
1.3 milliard al

# Fusion de 2 étoiles à neutrons



La fusion de 2 étoiles à neutrons en Août 2017, a produit une **kilonova**  
Événement multi-messagers des rayons gamma à la radio

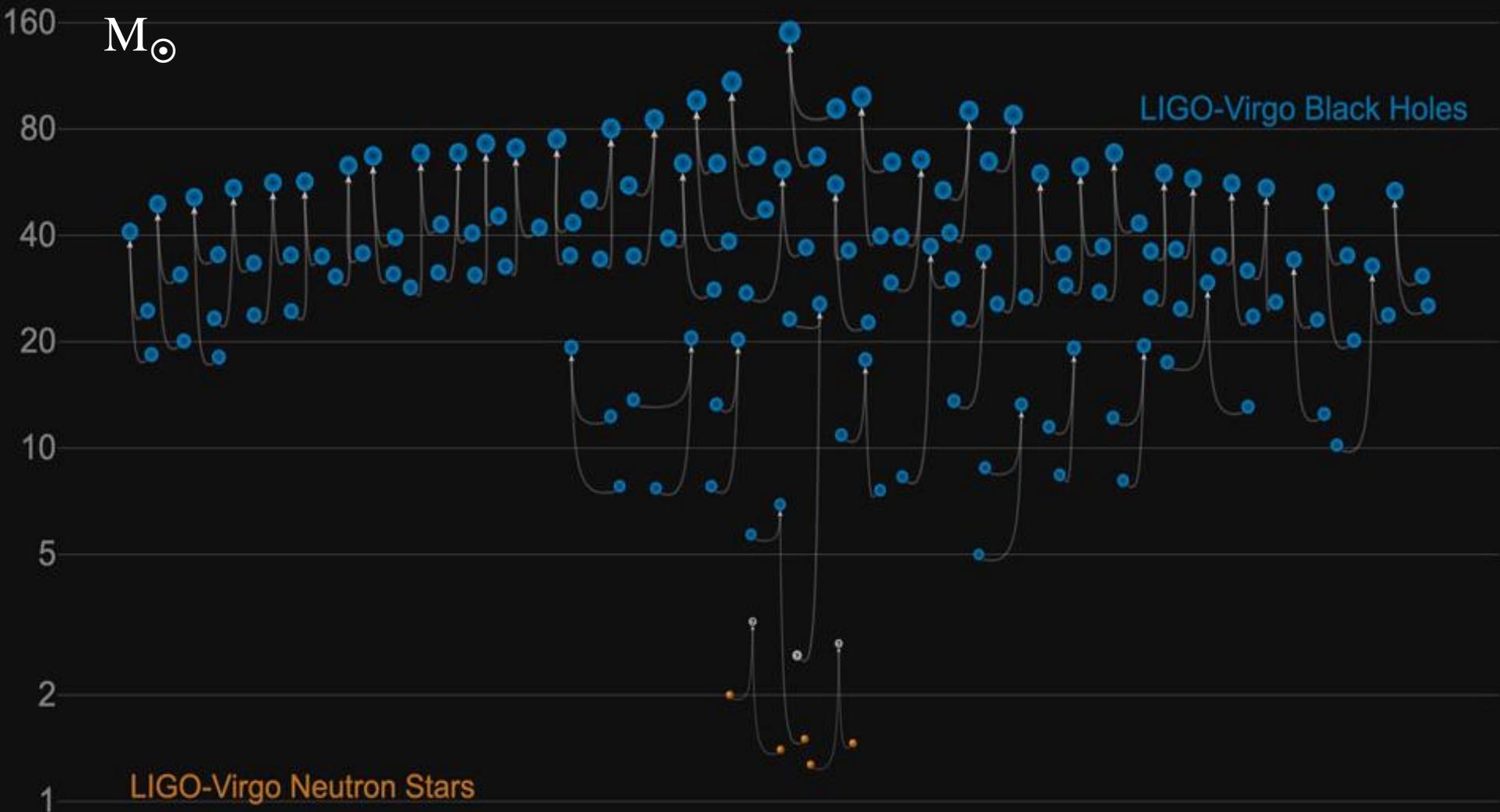
Distance de la galaxie NGC4993, 40 Mpc (~130 million al, ou  $4 \times 10^{15}$  secondes)



$$\left| \frac{c_{GW}^2}{c^2} - 1 \right| < 6 \times 10^{-15}$$

Contraintes sur la masse du graviton, et les théories de gravité modifiée

# Masses du cimetière des étoiles



GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

# La plus grande masse: GW190521

$$65 + 85 M_{\odot} \rightarrow 142 M_{\odot}$$

Instabilité de création de paires  $e^{-} e^{+}$

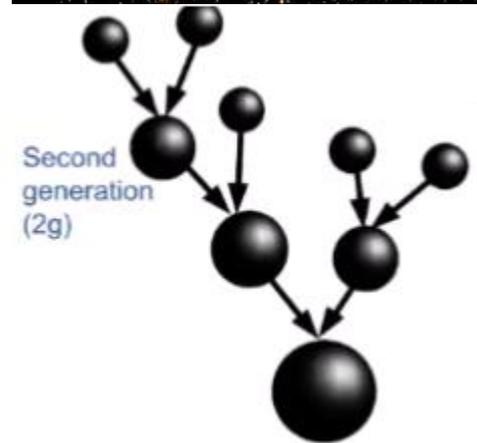
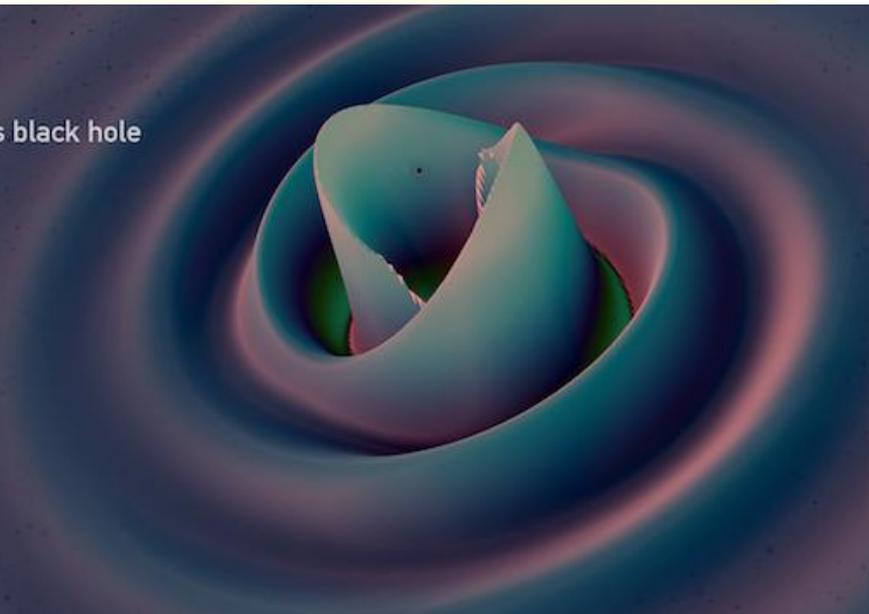
Entre 60 et 130  $M_{\odot}$

→ Trous noirs de **masse intermédiaire**

Amas globulaire



GW190521  
Detection of an intermediate-mass black hole

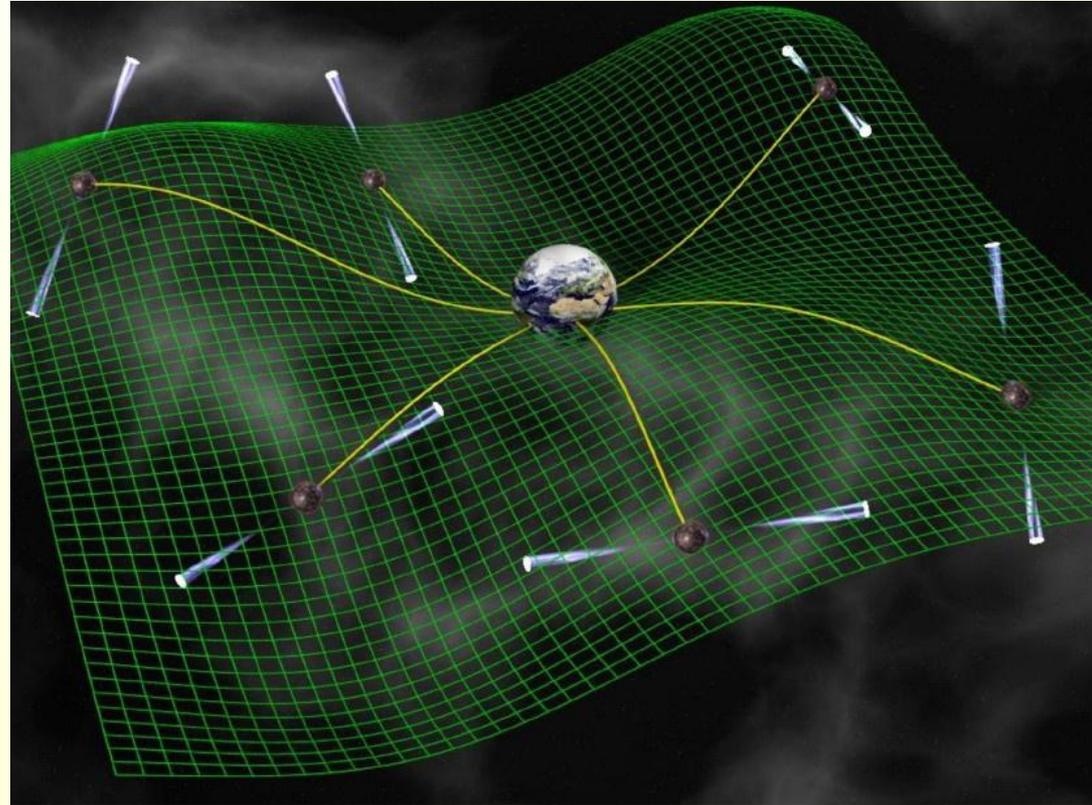


# 20000 Pulsars avec SKA

**PTA: pulsar timing arrays.** Le suivi des pulsars ms  
Les ondes ont des fréquences nanoHz ( $\lambda \sim 30$  année-lumière)  
Retrace les déformations de  
l'espace

→ détection des ondes  
gravitationnelles

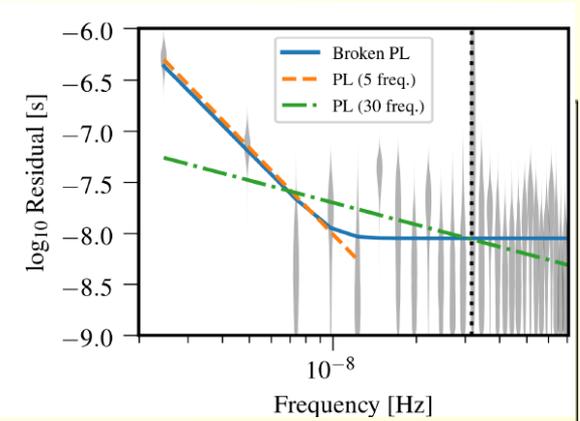
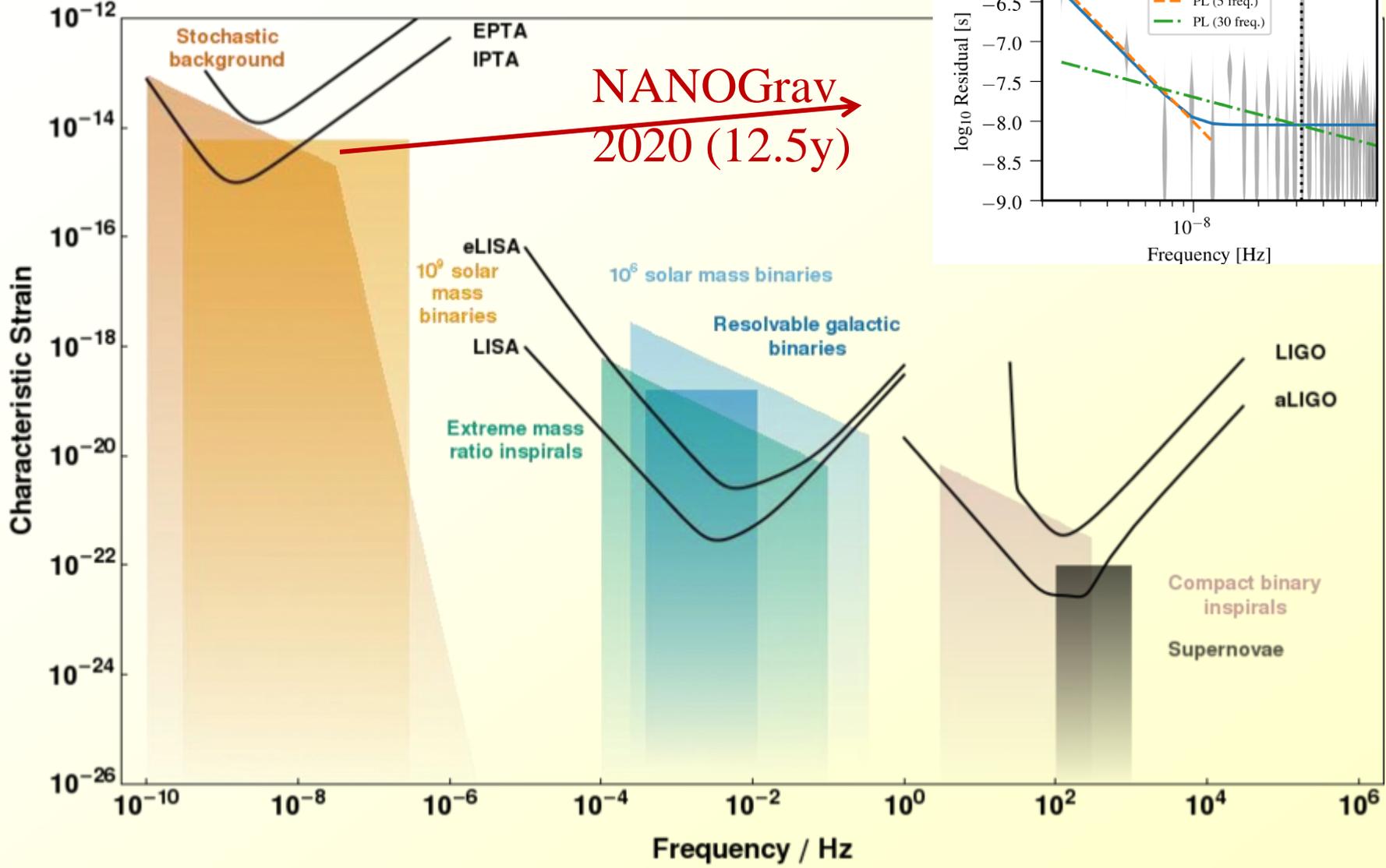
GW venant de la fusion de  
trous noirs super-massifs



Ou bien fond stochastique dû à l'ensemble des fusions

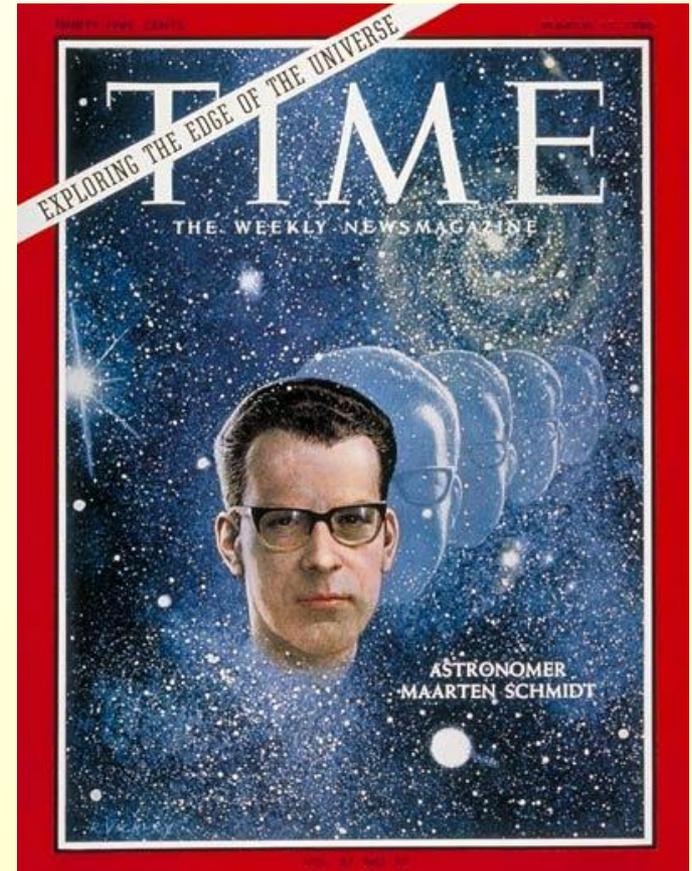
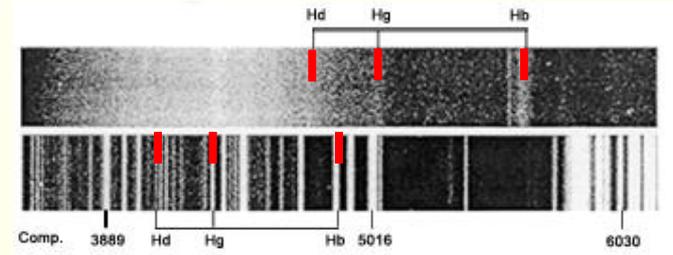
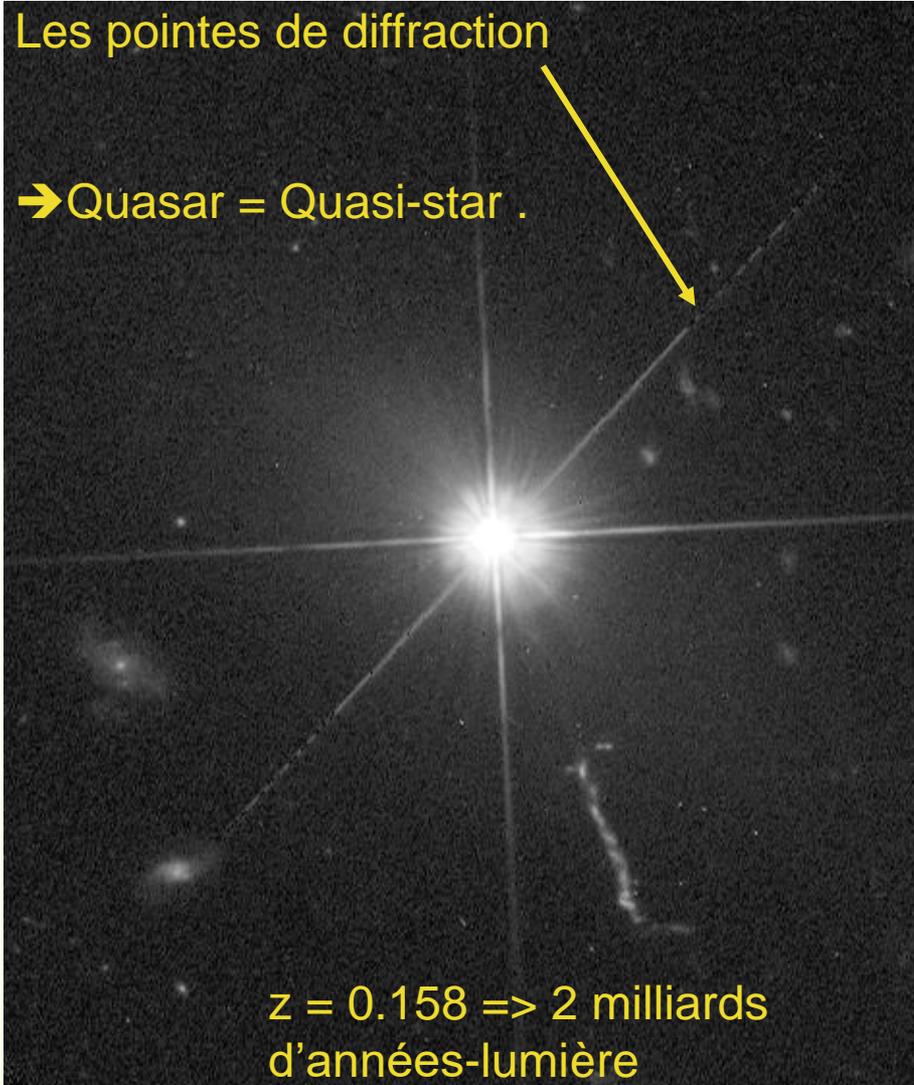
# GW avec Différentes Missions

EPTA: European Pulsar Timing Array - IPTA

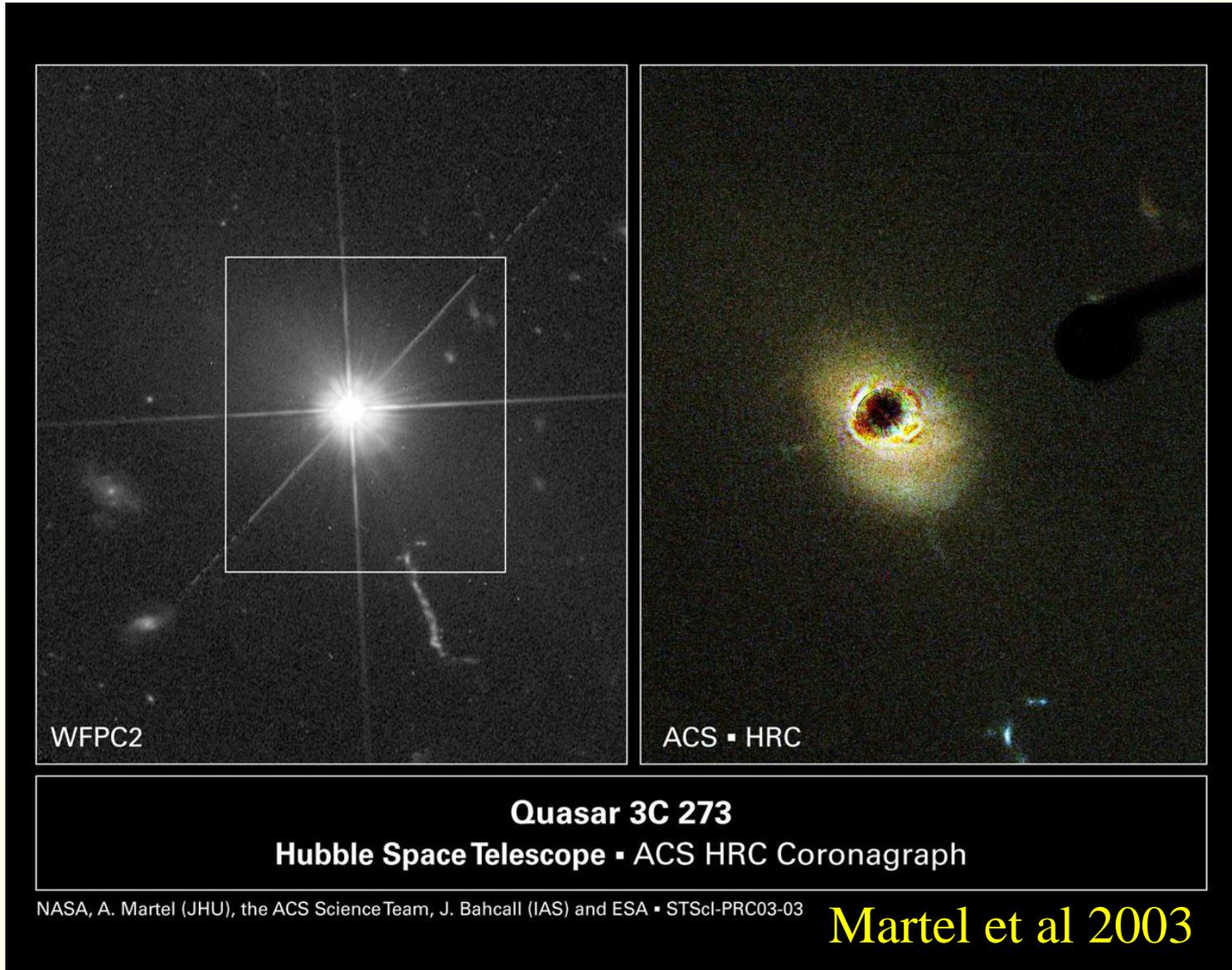


Nano-fréquence  $\lambda \sim 10a$

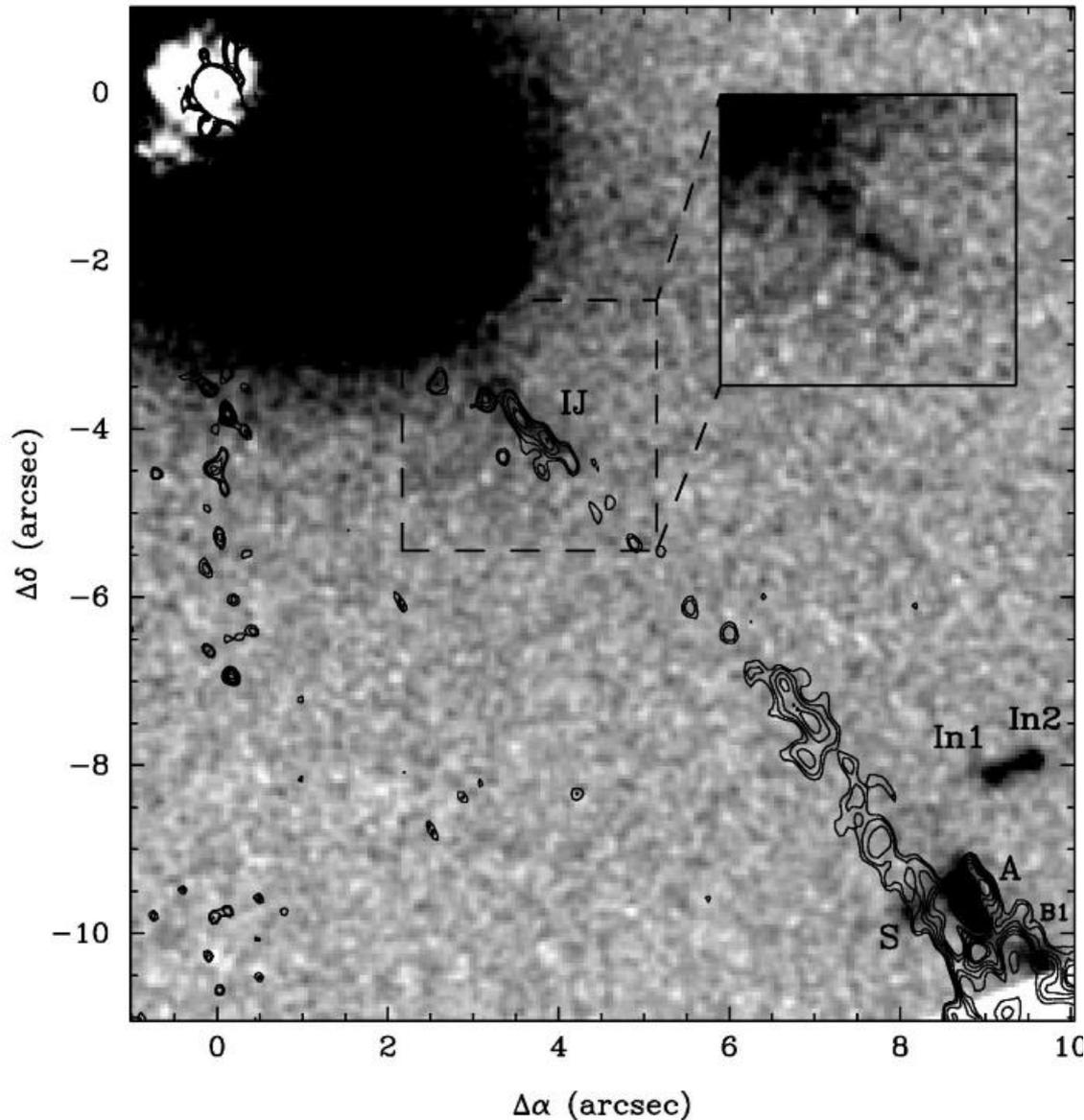
# Découverte par Maarten Schmidt du premier quasar 3C273 en 1963



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

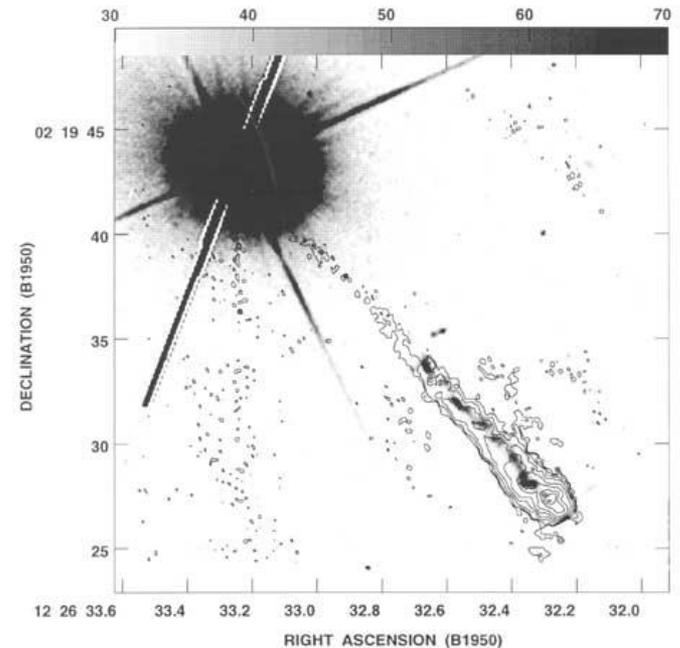


# Superposition image Radio

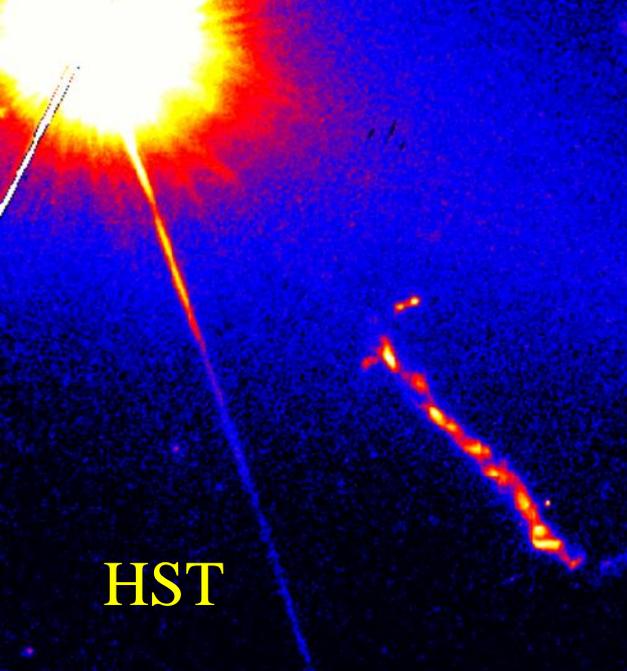


Jet radio: contours  
// jet optique (HST)

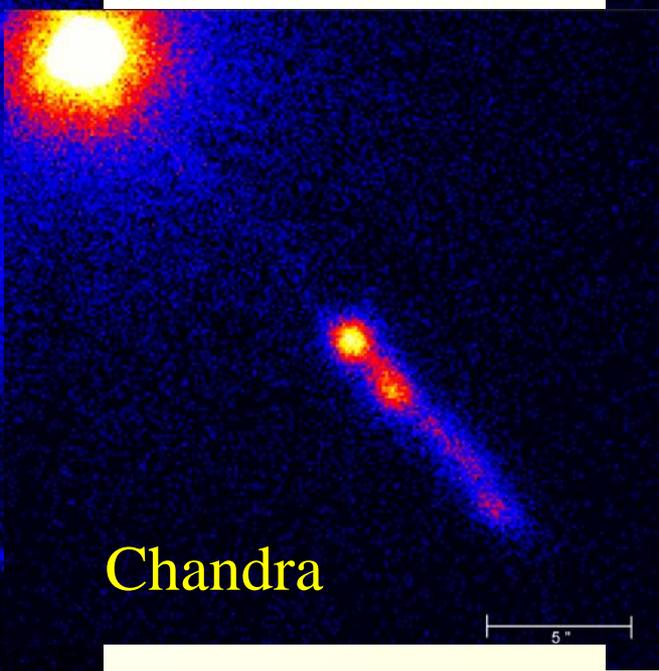
67kpc de long



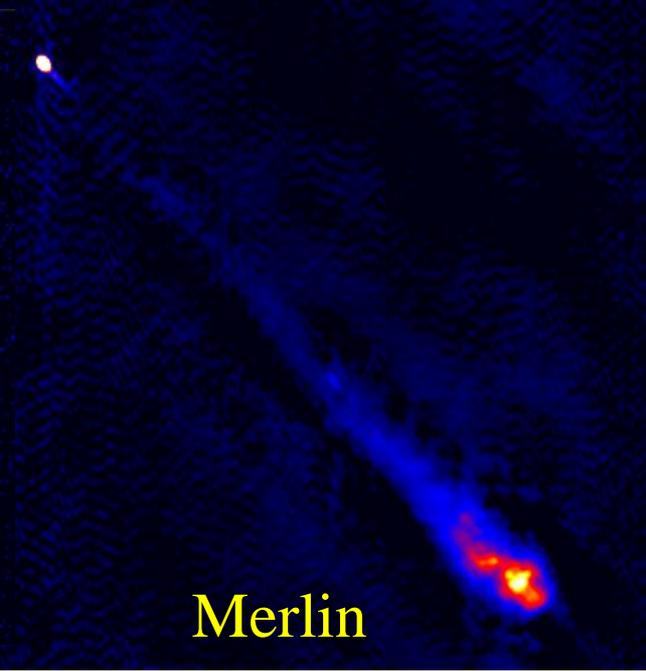
HST+Merlin



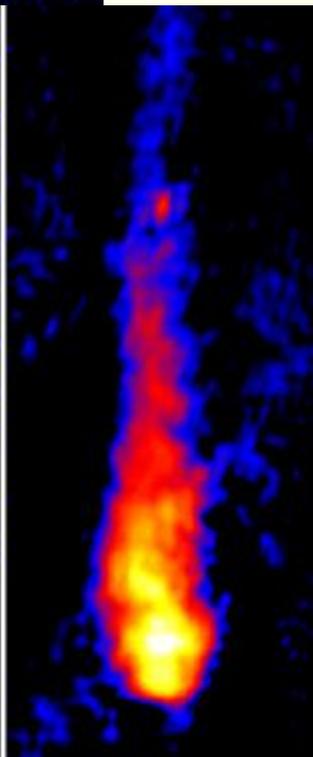
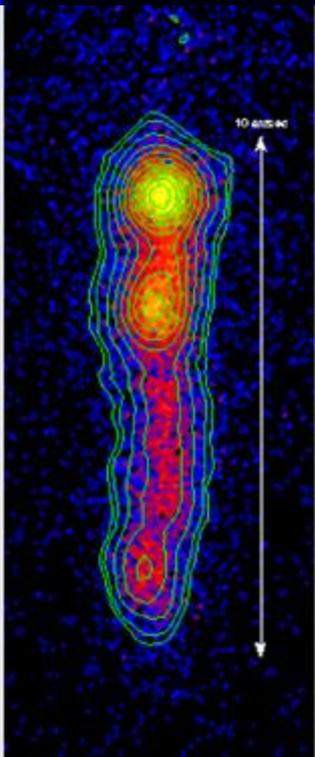
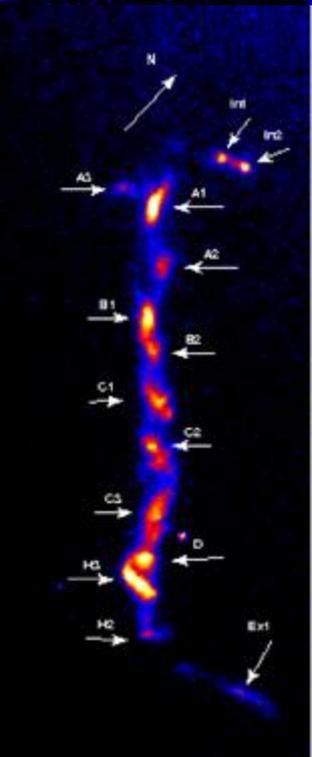
HST



Chandra

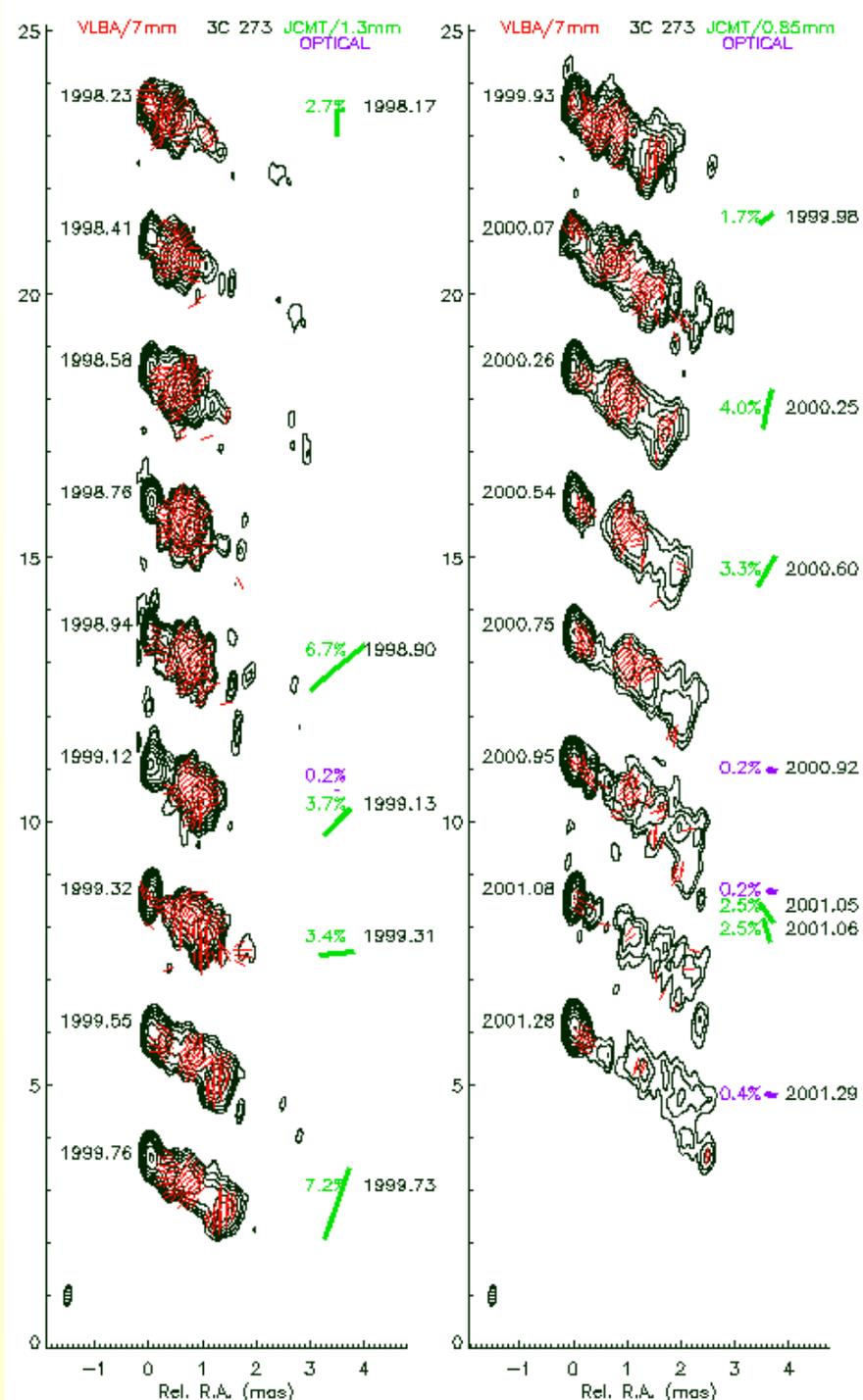
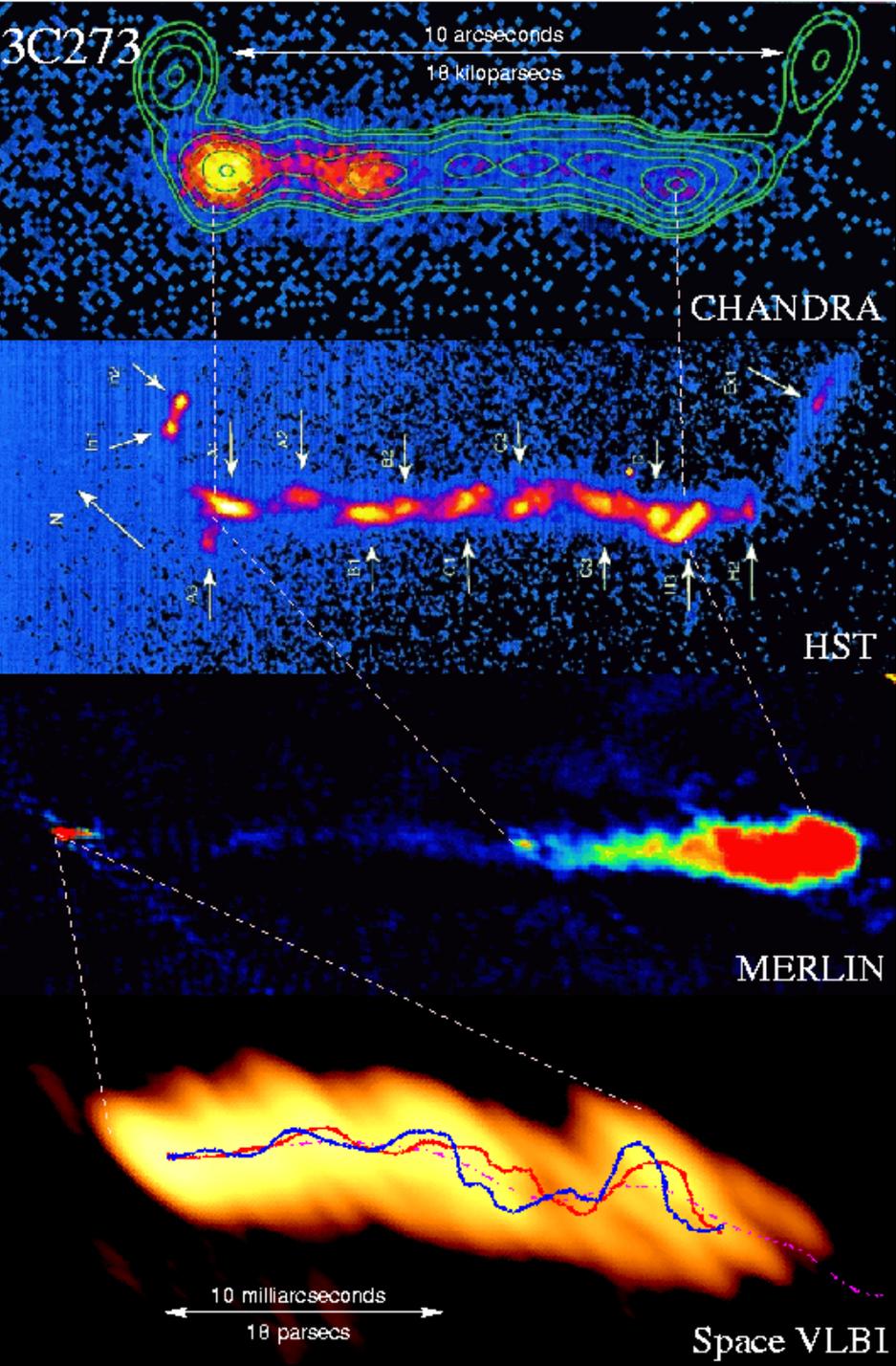


Merlin



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)

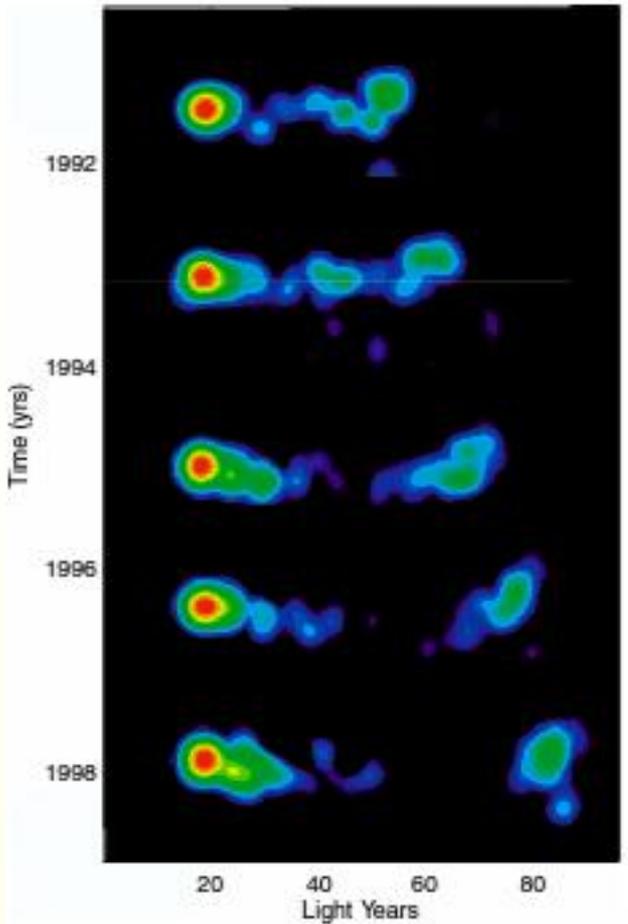


# Les jets sont super-luminiques

B a la vitesse  $v$ , par rapport A

$$y = r \sin \theta \quad t = r/v$$

Jet radio dans 3C279



La lumière venant de B met moins de temps à nous atteindre que celle de A

Temps observateur pour que l'objet aille de A vers B

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

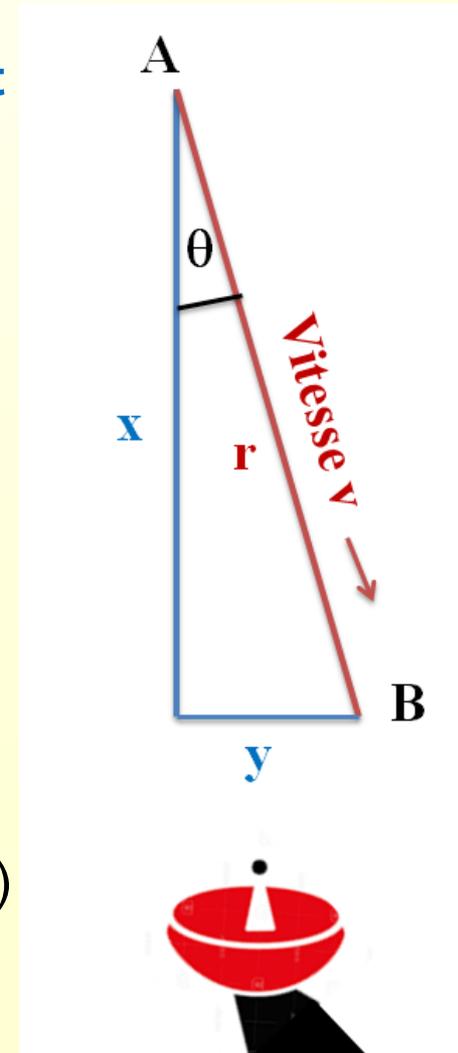
$$t_{\text{app}} = (r/v) - (r/c) \cos \theta$$

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

Vitesse apparente sur le ciel

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

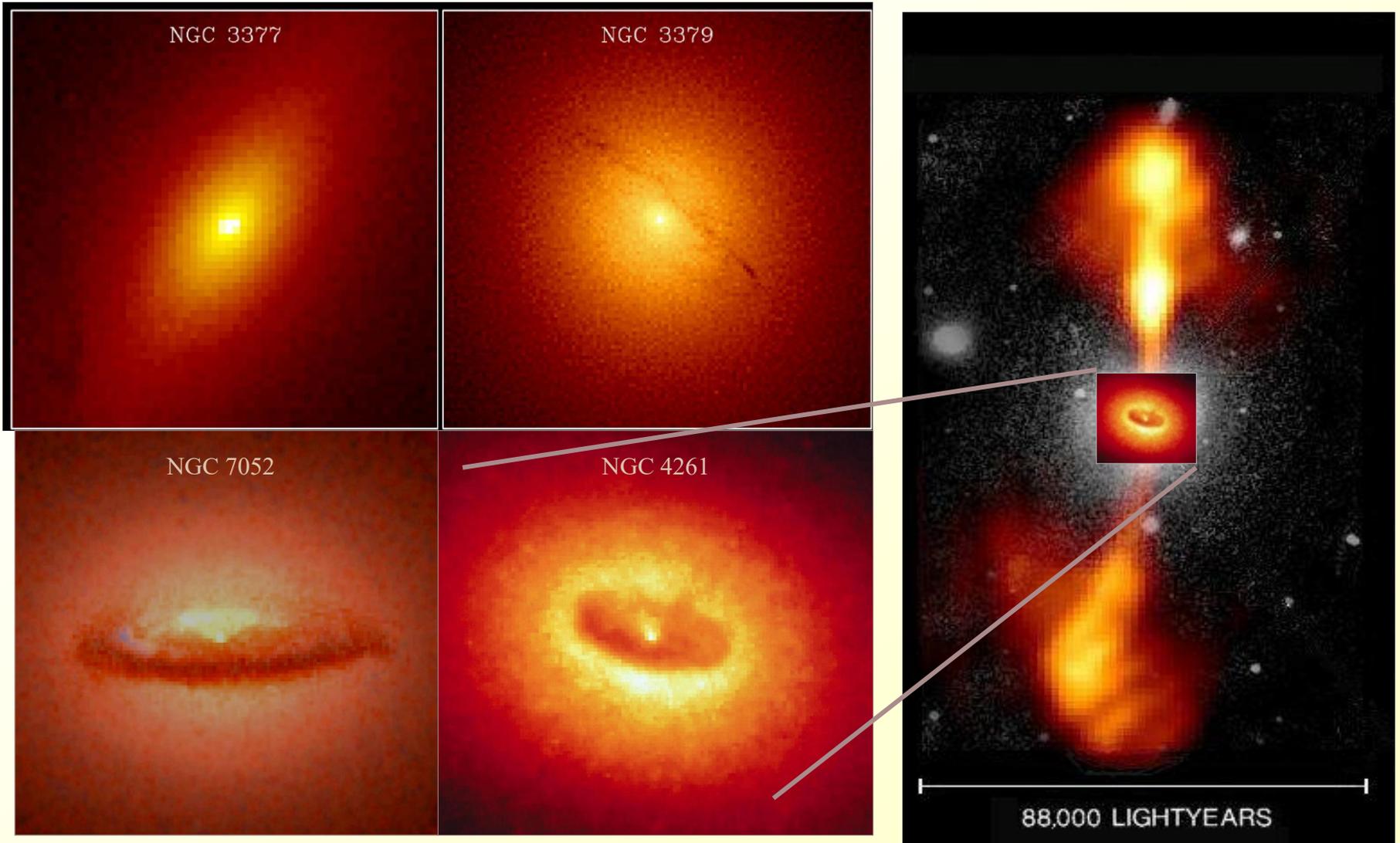
$$v_{\text{app}} = (v \sin \theta) / (1 - \beta \cos \theta)$$



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

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

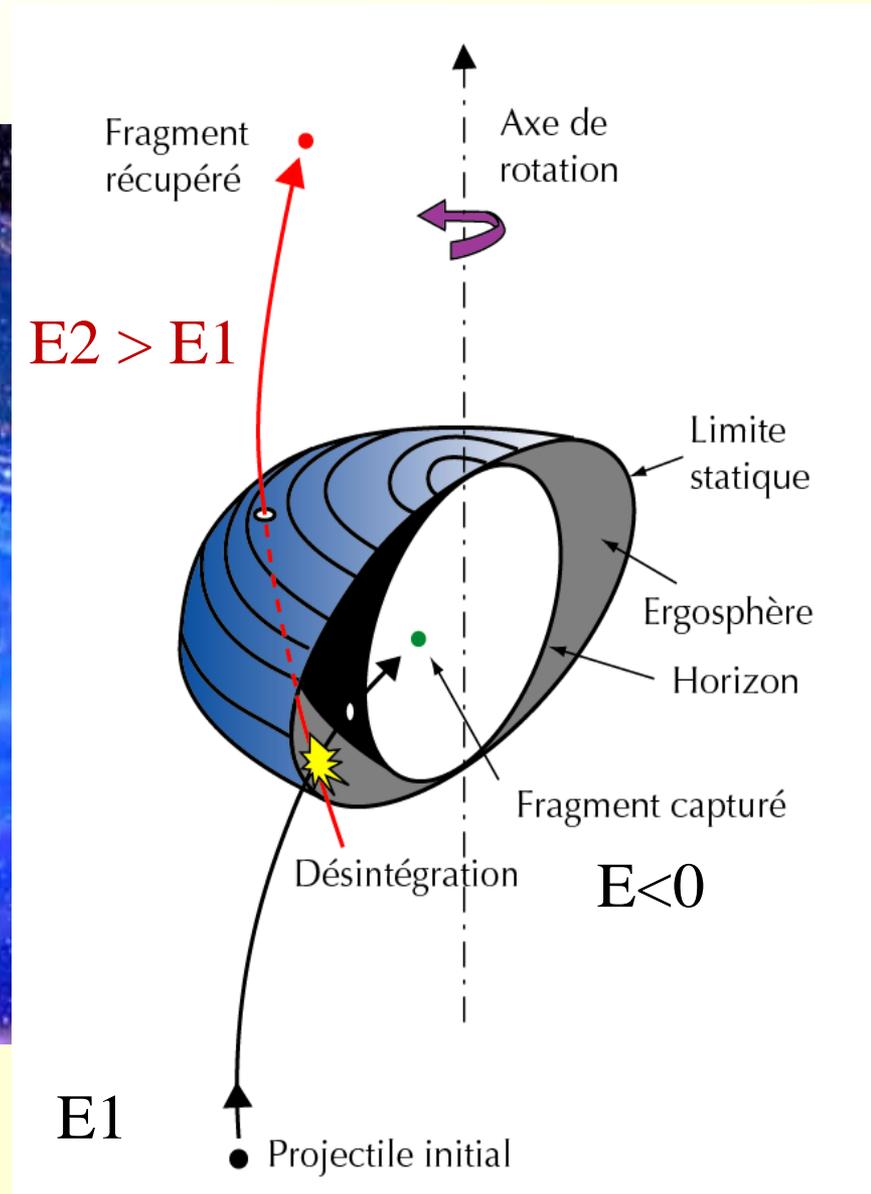
# Les sphéroïdes abritent des trous noirs, qui sont à l'origine des noyaux actifs de galaxies (AGNs)



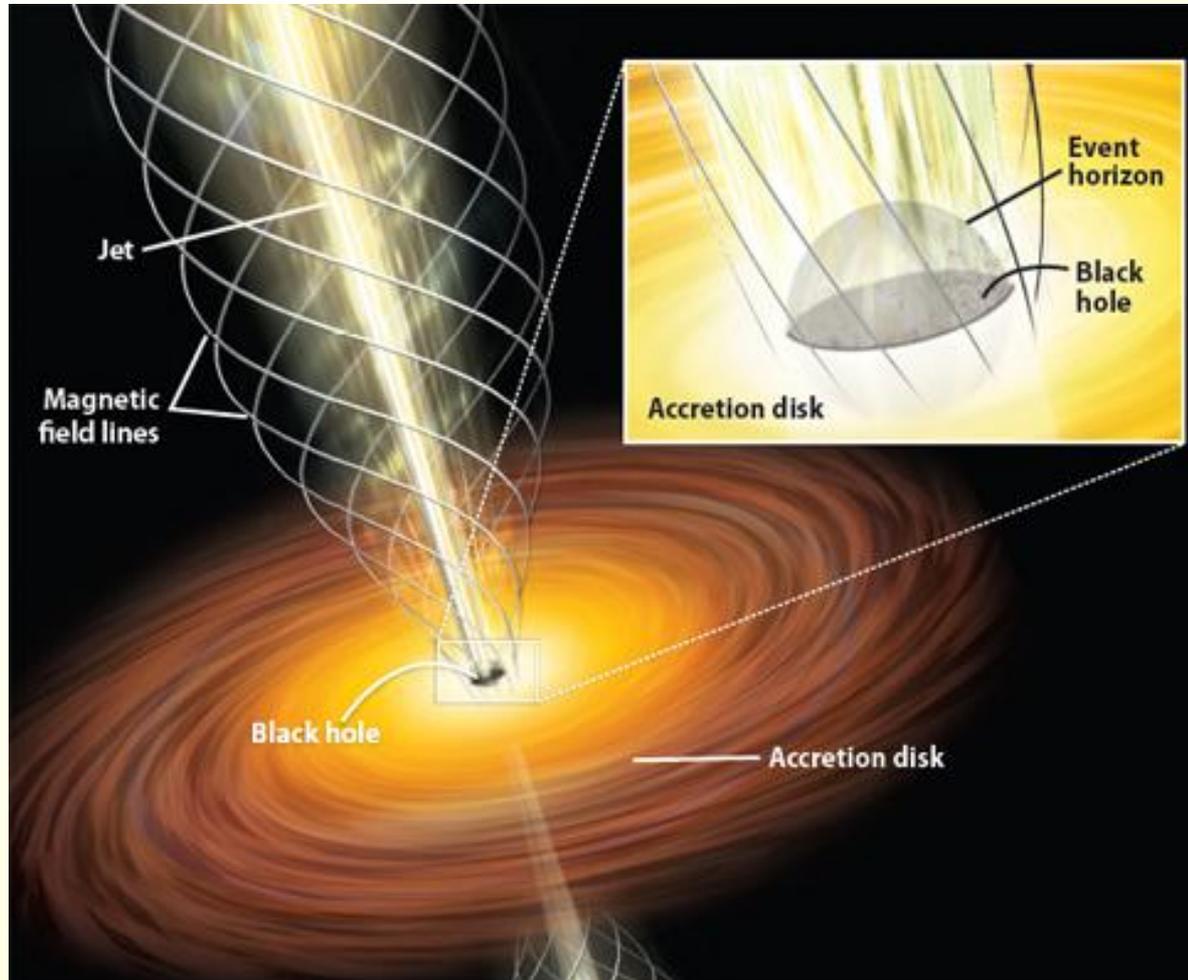
# Trou Noir en rotation: origine des Jets Radio?



Processus de Penrose



# Les jets sont confinés par des champs magnétiques



# Ejection de plasma: lobes radio

Cygnus A

Image radio, VLA

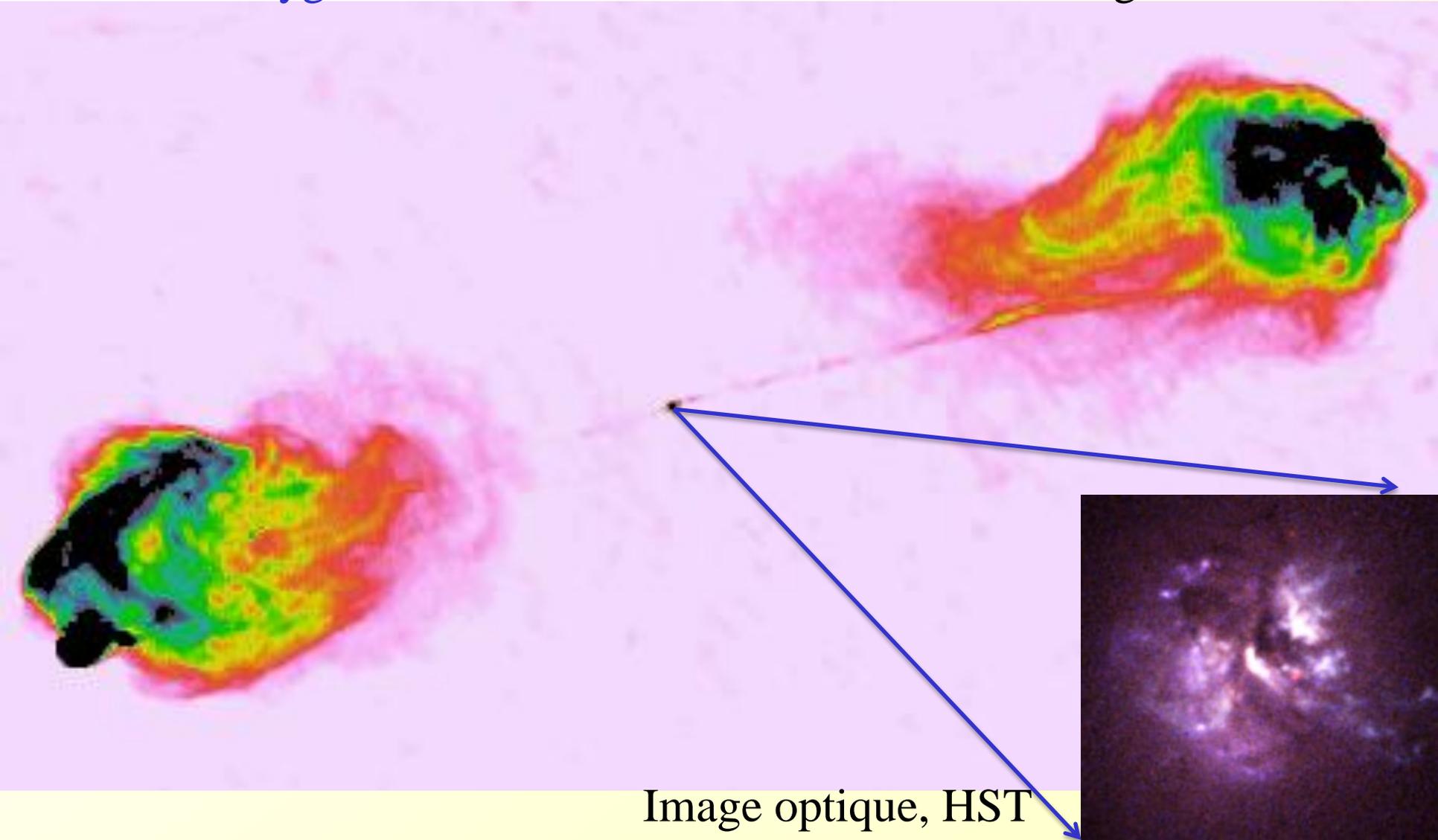
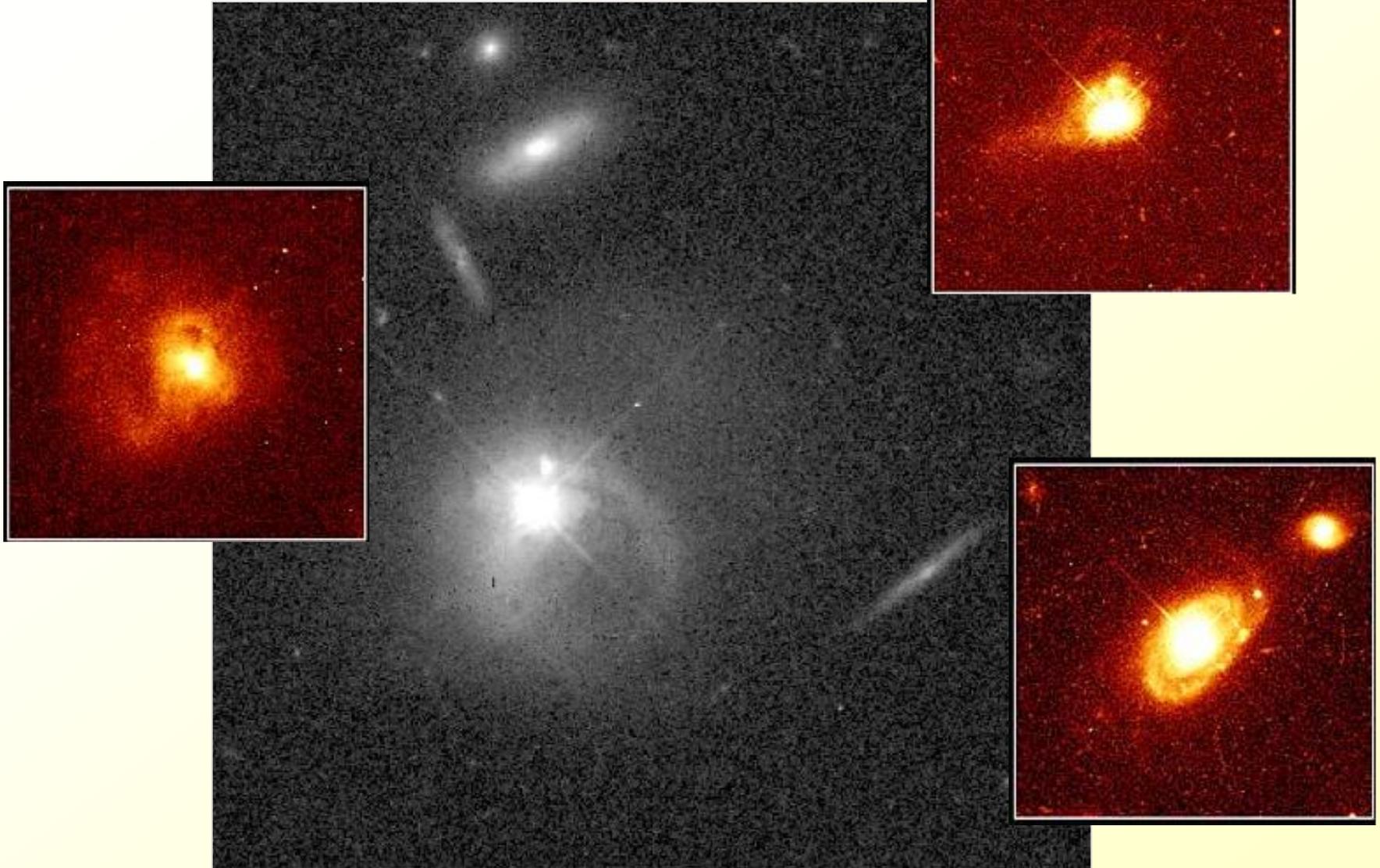


Image optique, HST

# La majorité des quasars sont observés dans les fusions de galaxies

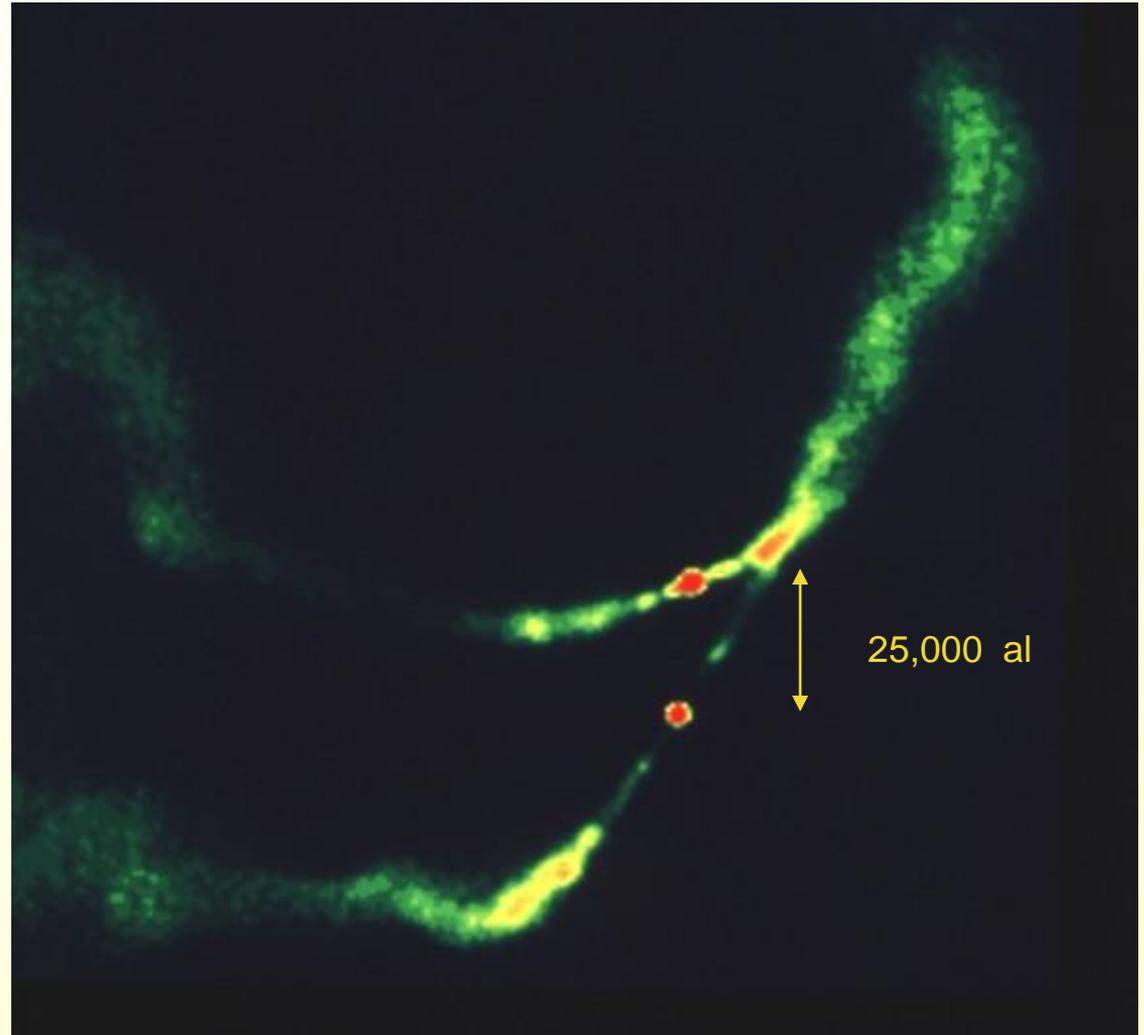
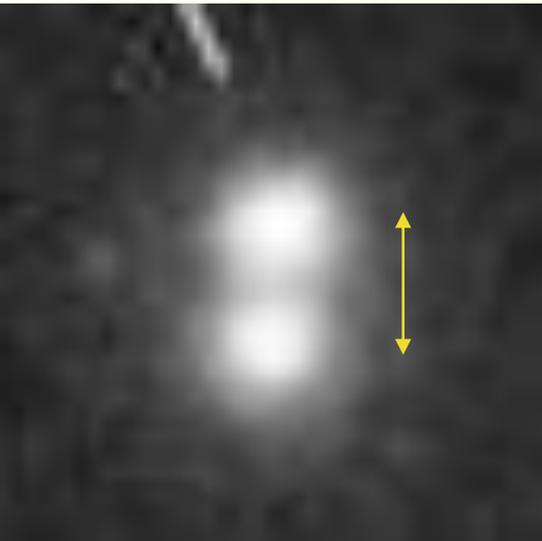


Brassage violent du gaz → alimentation du trou noir

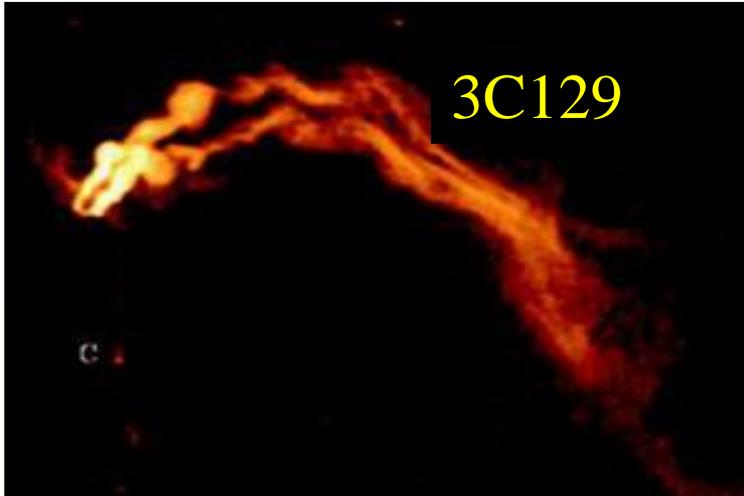
# Un quasar double, en train de fusionner: 3C75, $z=0.023$

Image radio, VLA

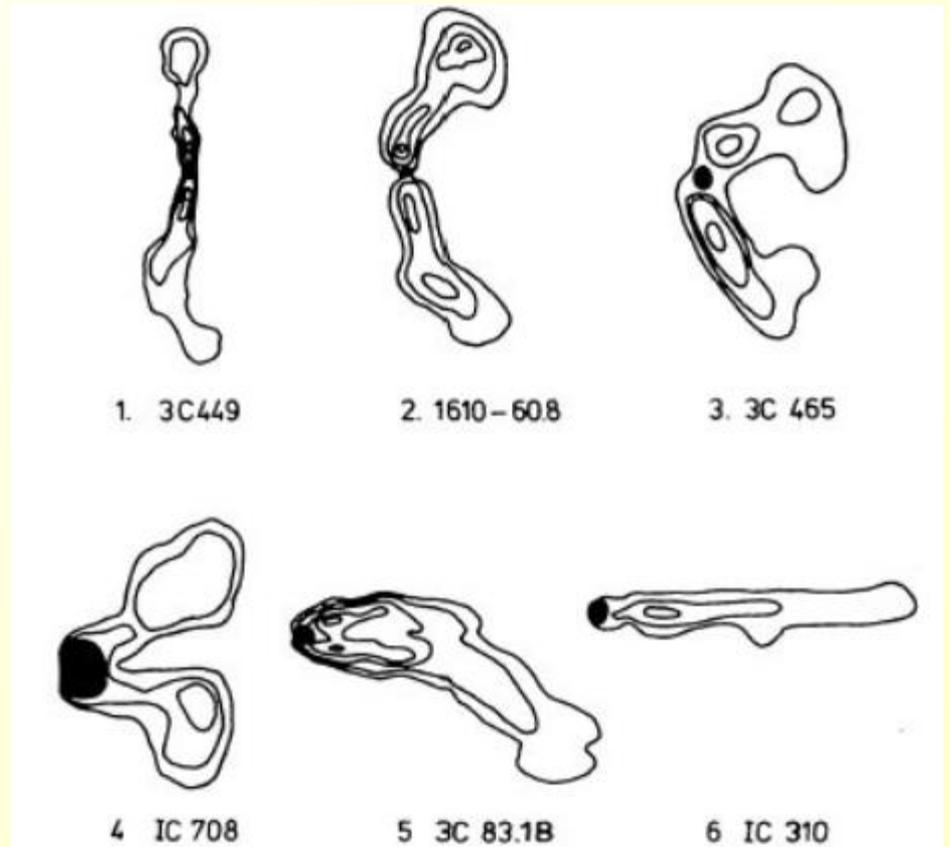
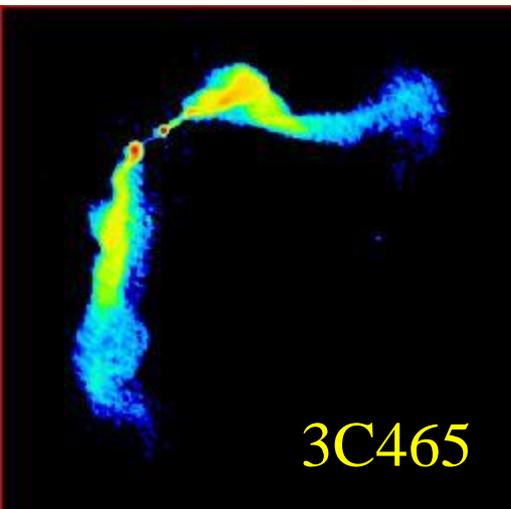
Image optique HST



# Lobes radio, galaxies en mouvement



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



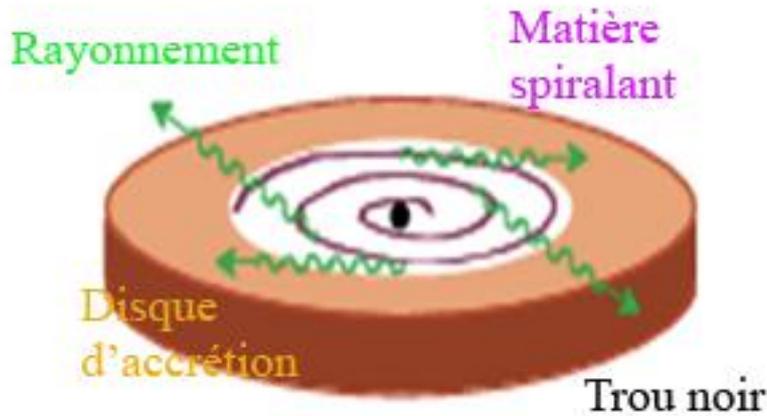
# Efficacité de la production d'énergie

En spiralant 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

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



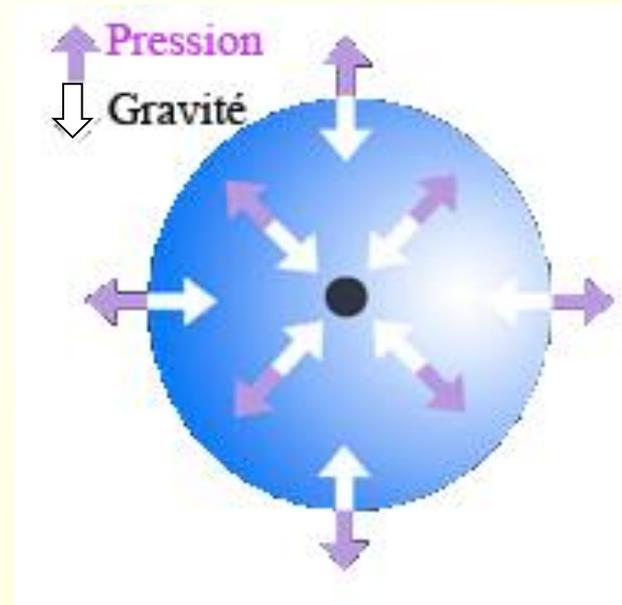
Efficacité de conversion en rayonnement : **10% de  $mc^2$**

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

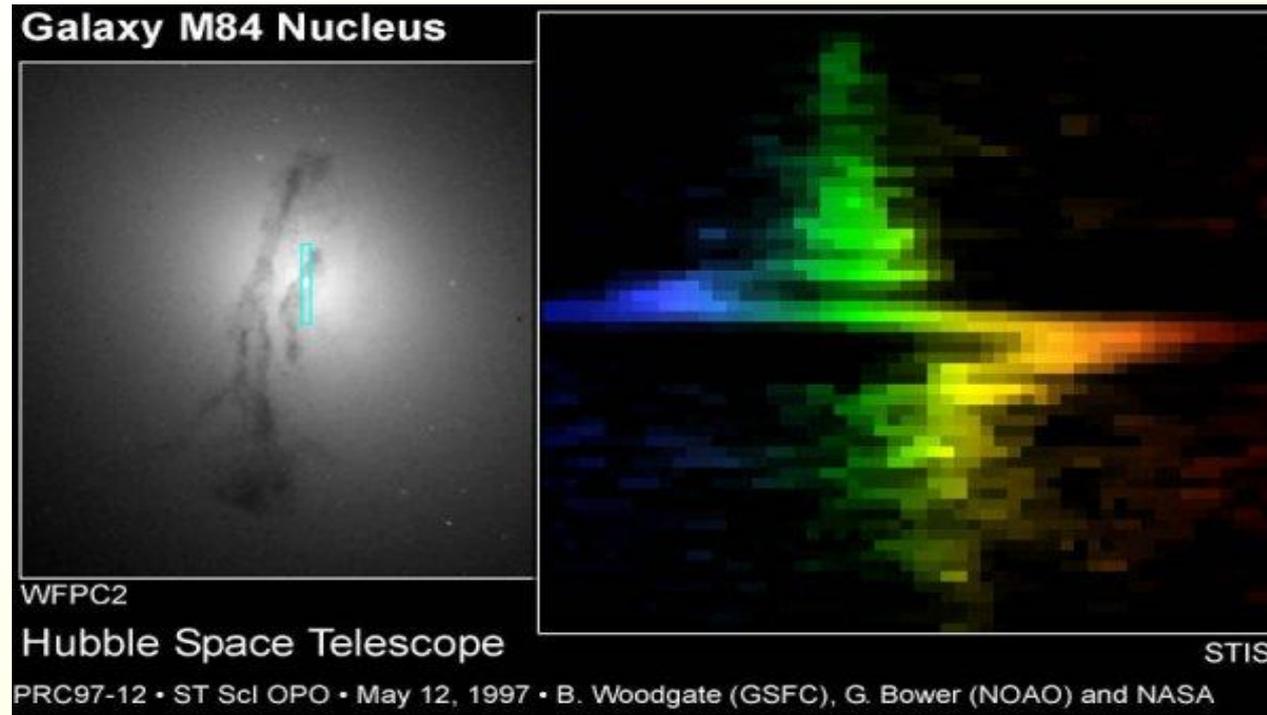


$$L_E = 3.3 \times 10^{12} L_{\odot} (M/10^8 M_{\odot})$$

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

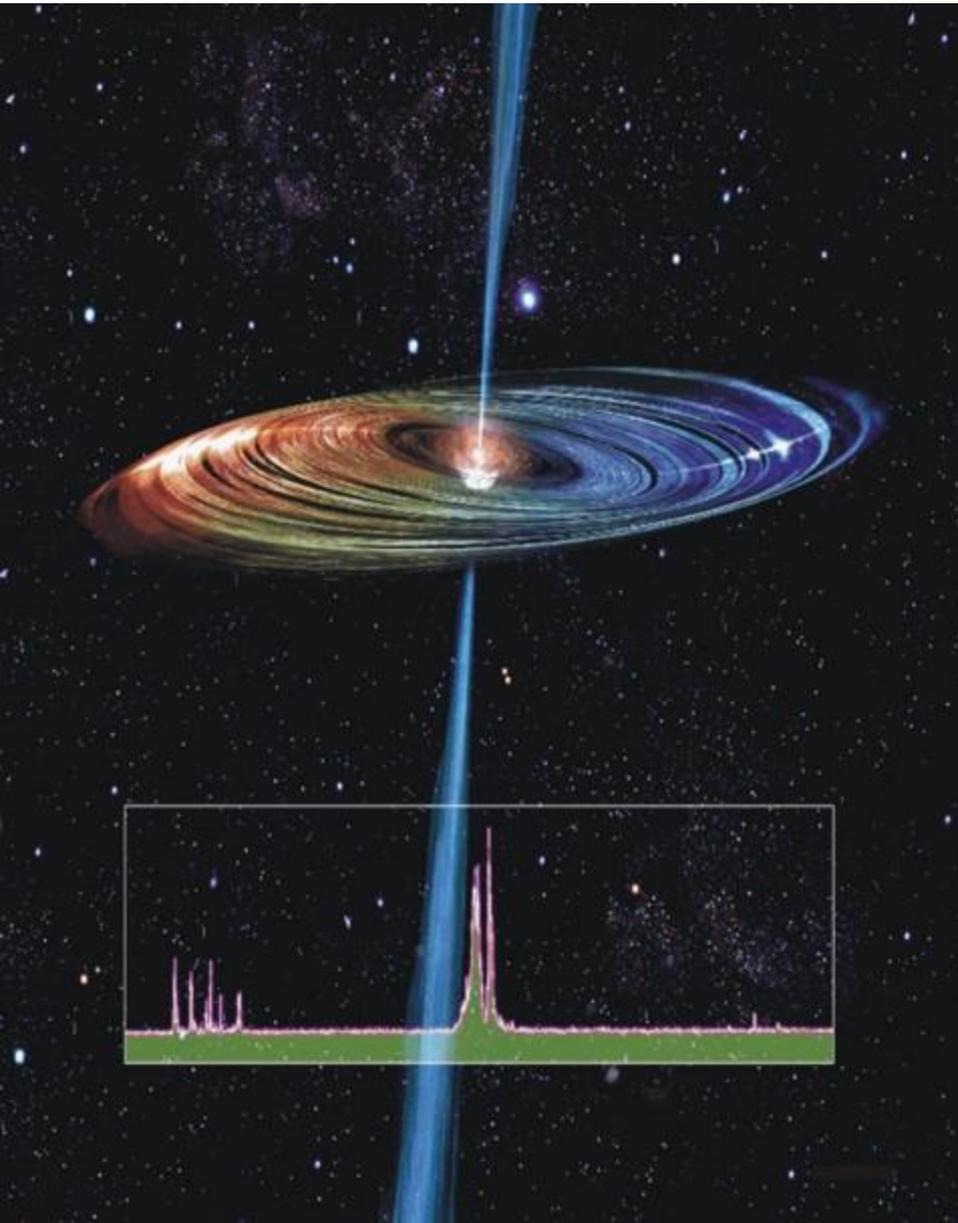
$$2M_{\odot}/\text{an} (M/10^8 M_{\odot})$$

# Mesure de la masse du trou noir

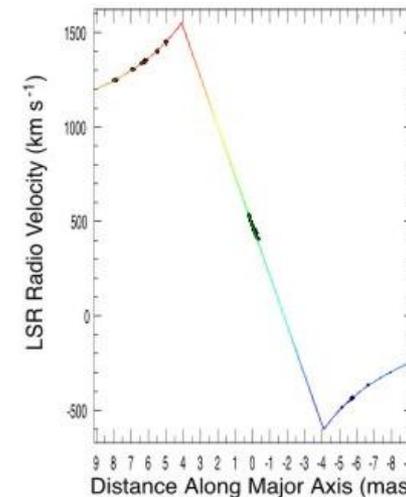
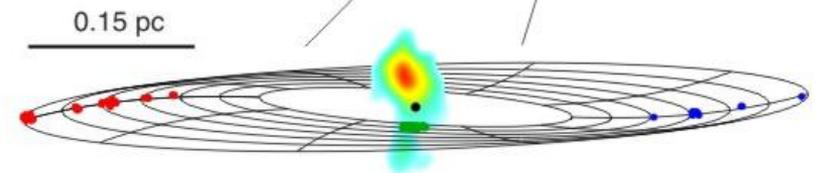
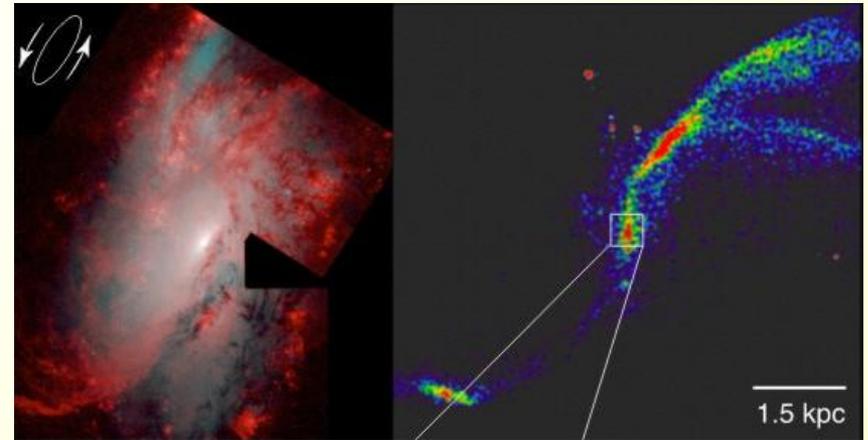


- Masses mesurées dynamiquement
- Mesure des vitesses à  $>10$  pc du trou noir
- A grands distance, mesures moins précises

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



Jets radio



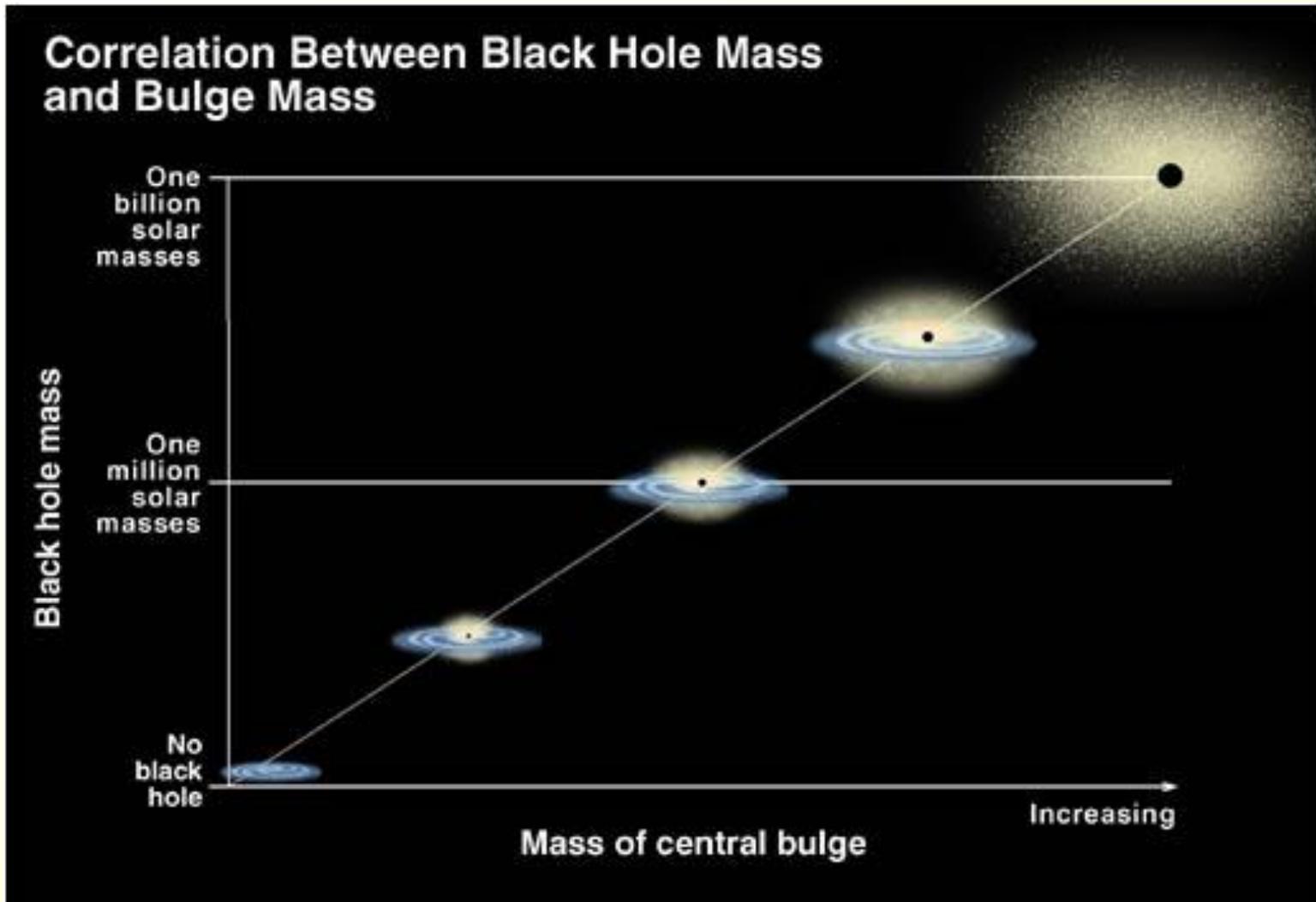
$M=4 \times 10^7 M_{\odot}$

$D=7.2 \text{ Mpc}$

# Co-habitation trou noir - Galaxie

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

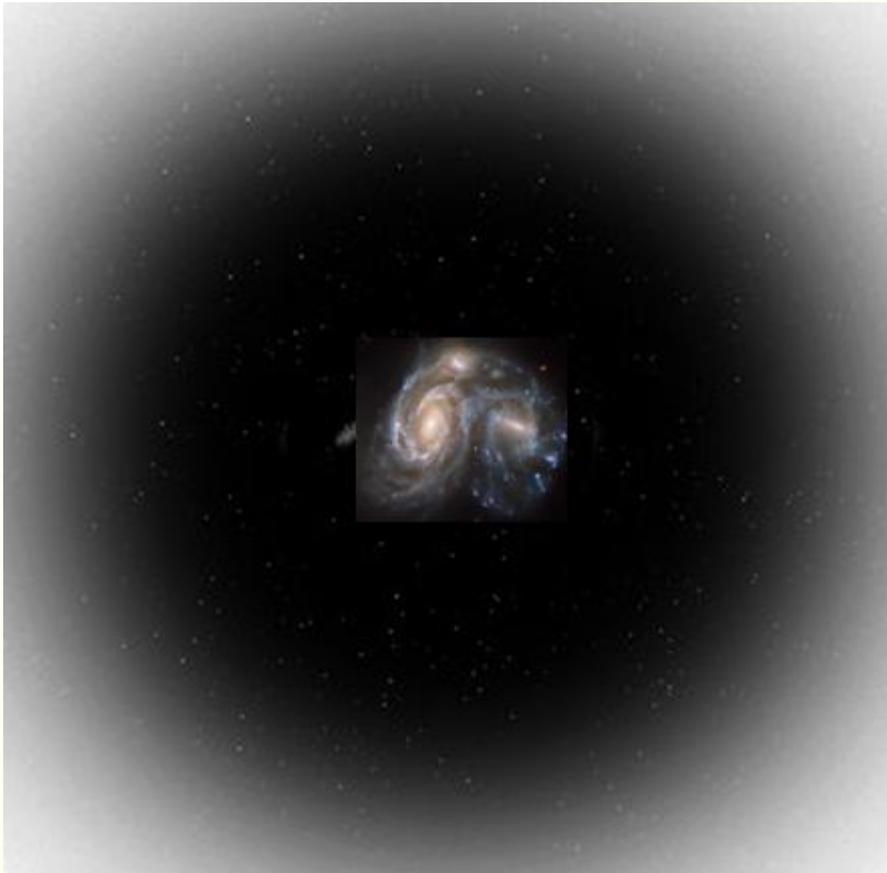
Qu'en est-il au début de l'Univers?



# Matière noire et atomes des galaxies

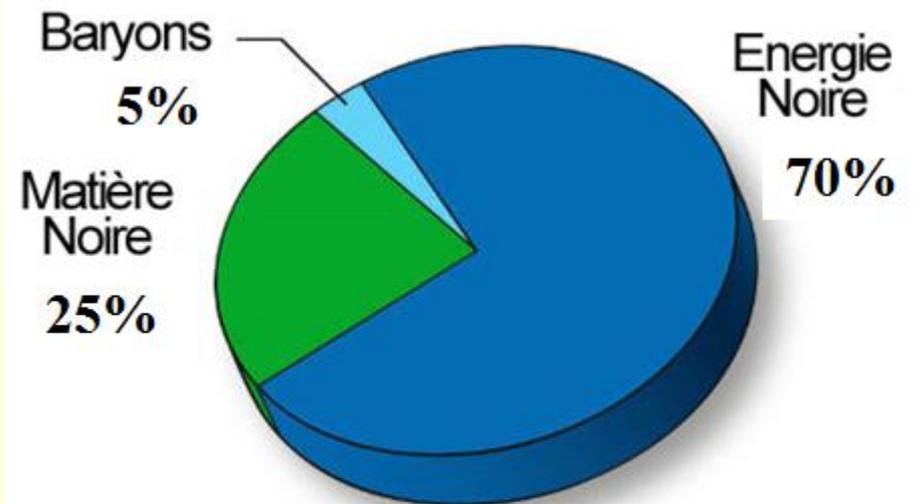
Rapport observé dans les galaxies

Atomes/MN < 0.04



Rapport dans l'Univers

Atomes/MN = 0.2



→ Les atomes sont éjectés des galaxies

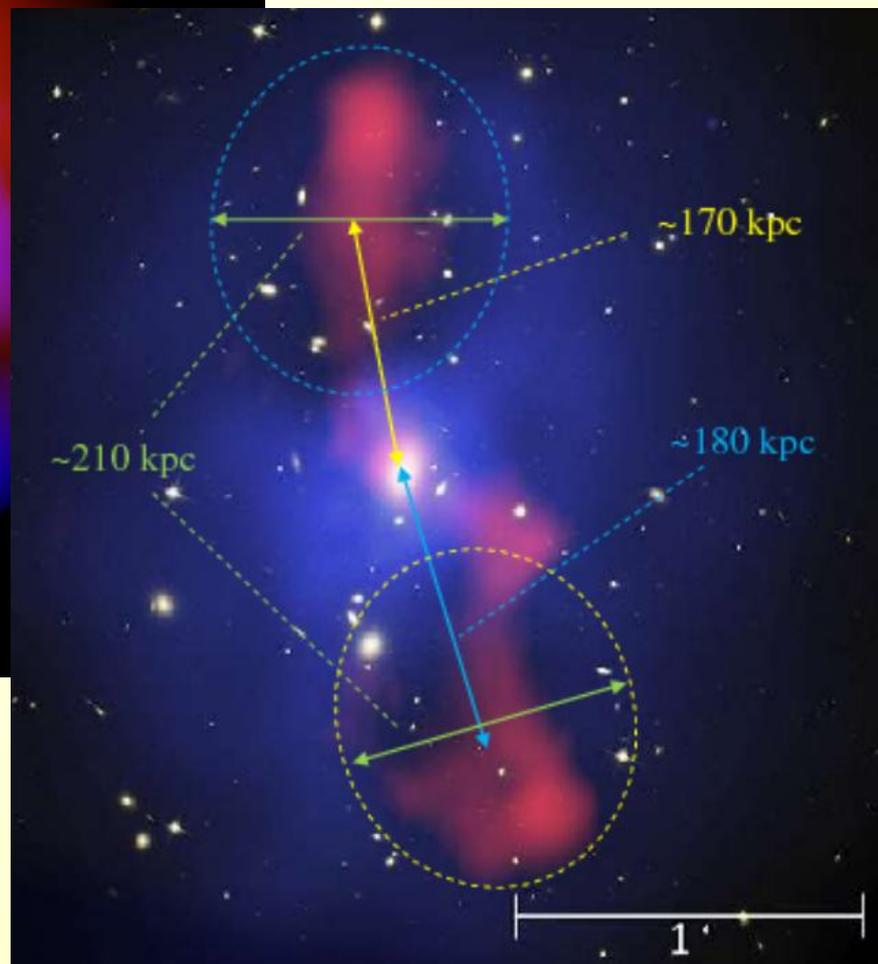
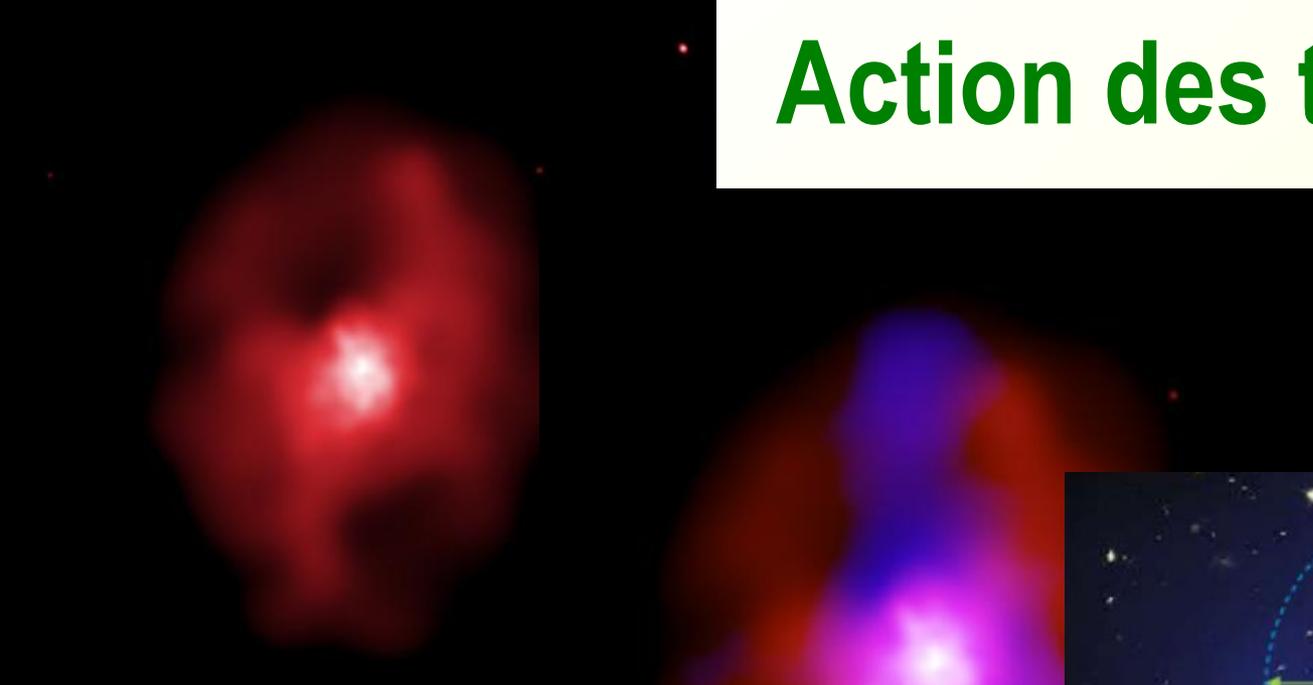
# Gaz ( $T=10$ millions K) dans les amas

Amas de Persée



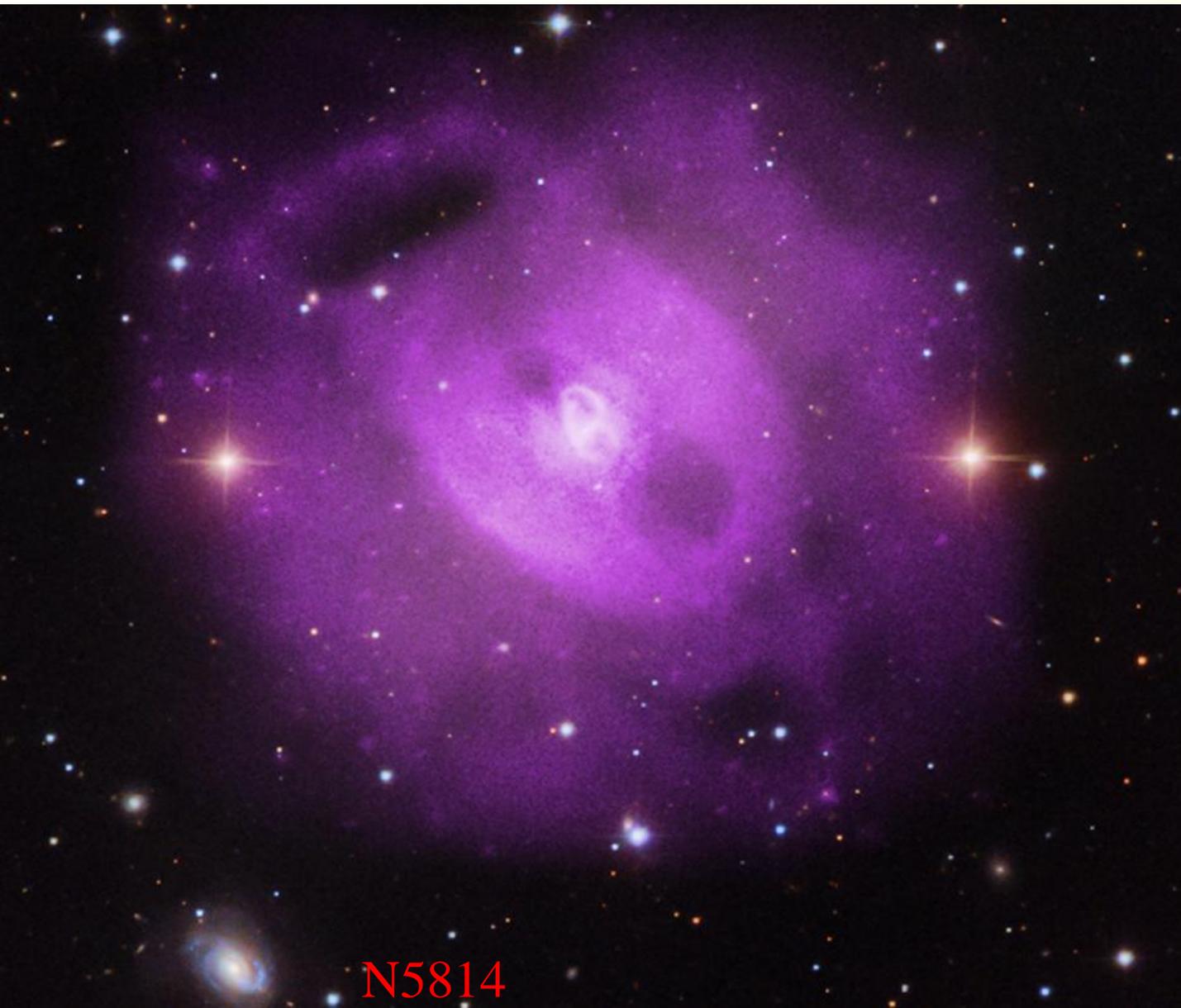
# Action des trous noirs

## Amas de Galaxies



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

# 3 paires de cavités dans NGC 5813



AGN: activité  
périodique  
1, 10, 30kpc

Période 10 Myr

Sur 30kpc, ou  
50Myr, activité  
continue

Chocs Mach2

N5814

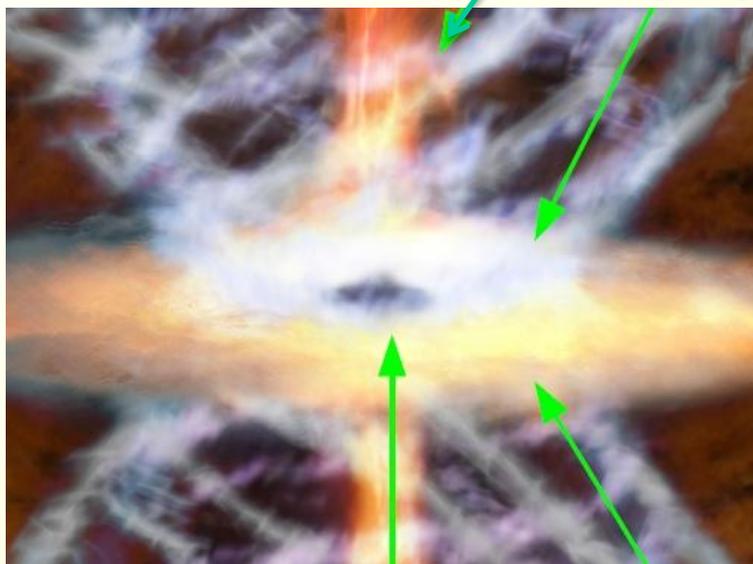
# UFO: « Ultra-Fast Outflow »

Raies Fe XXV/XXVI en absorption

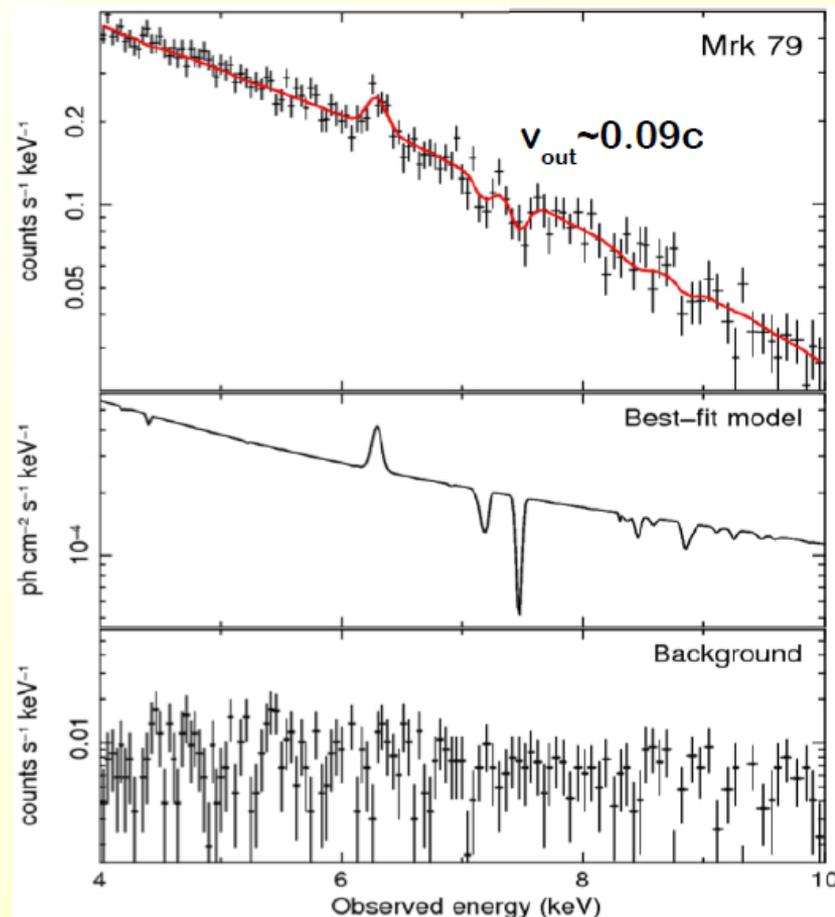
Gaz très ionisé, et relativiste

Flots de gaz en rayons X

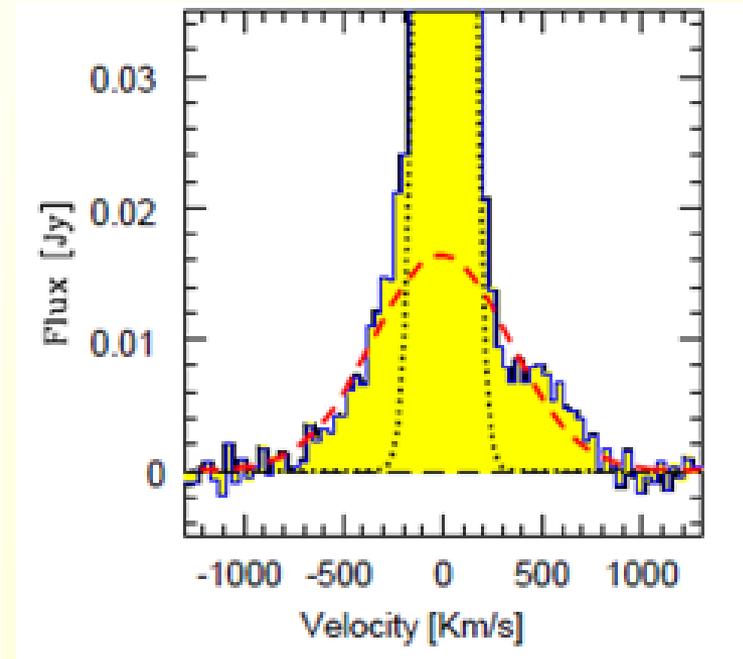
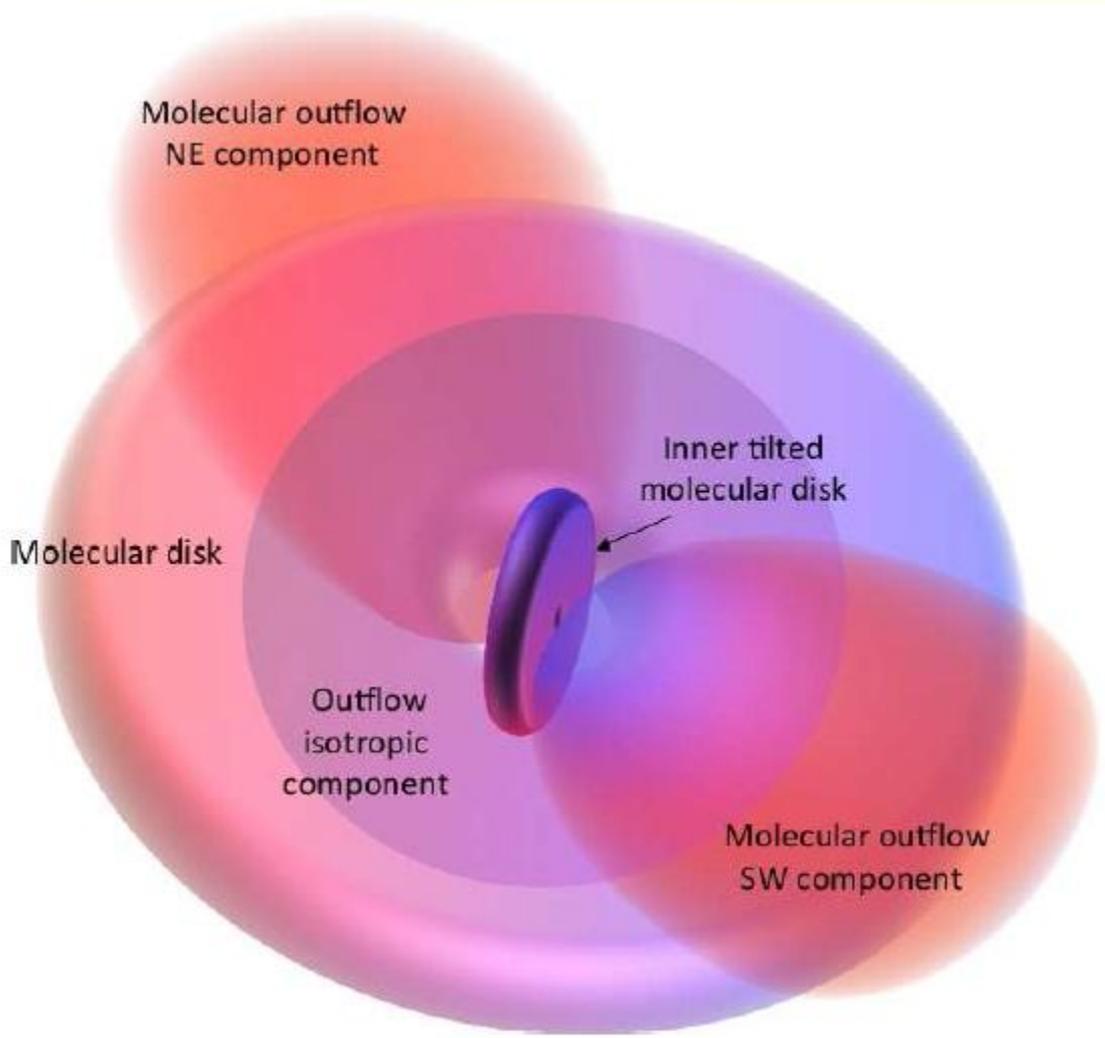
$V > 10\,000\text{ km/s}$



Trou noir Disque d'accrétion



# UFO+ flot moléculaire Mrk231



## Mrk 231

AGN et aussi starburst

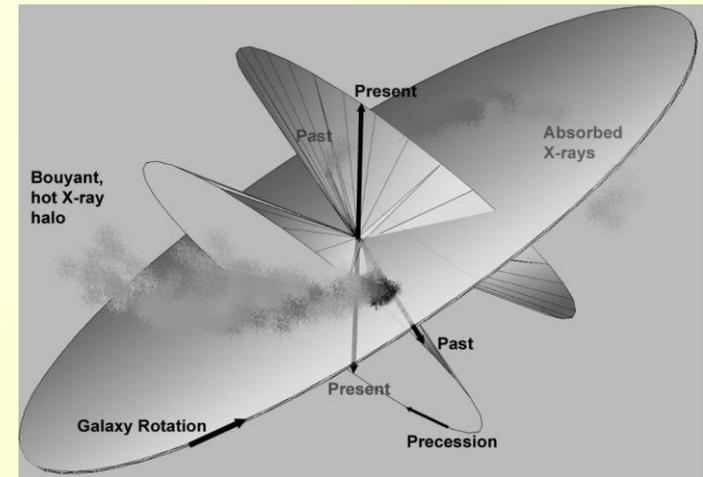
Gaz éjecté  $10^7$ - $10^8 M_{\odot}$

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

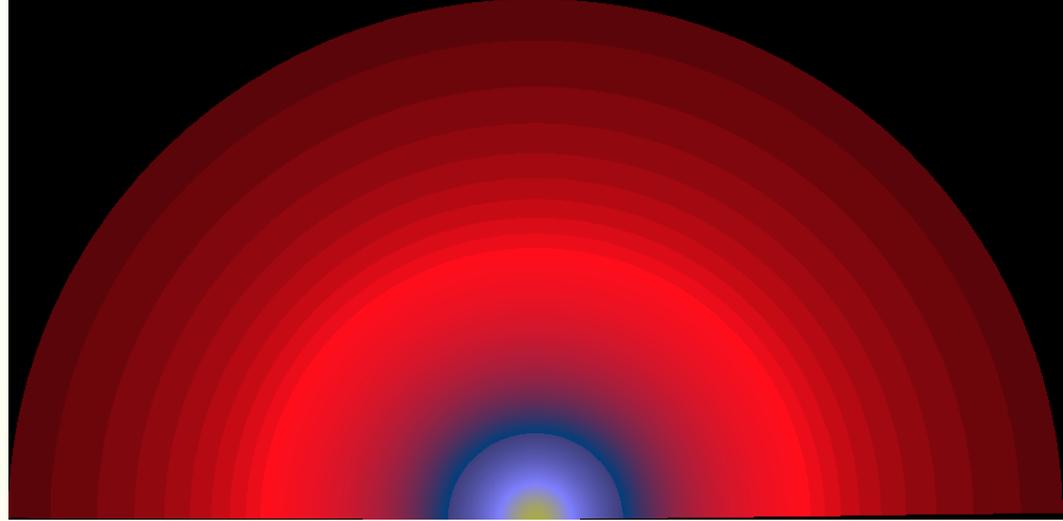
# Jet dans le plan du disque



NGC 4258



# CONCLUSION



→ Trous noirs supermassifs ( $10^6$ - $10^9 M_{\odot}$ ) et galaxies croissent en symbiose

→ Les éjections de gaz sont très fréquentes, les trous noirs gloutons rejettent une part de leur nourriture (UFO, gaz moléculaire)

→ Ce phénomène de feedback est efficace, pourrait expliquer que la plupart des atomes sont en dehors des galaxies

# Univers violent et variable

