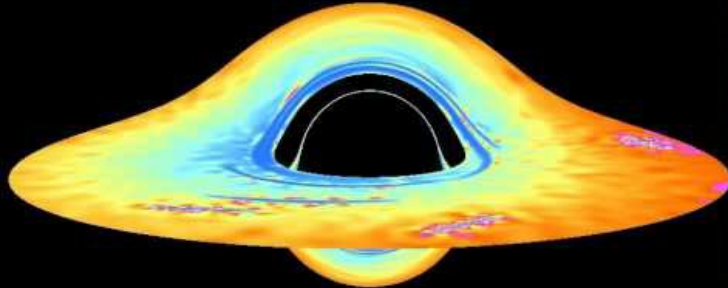




COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*



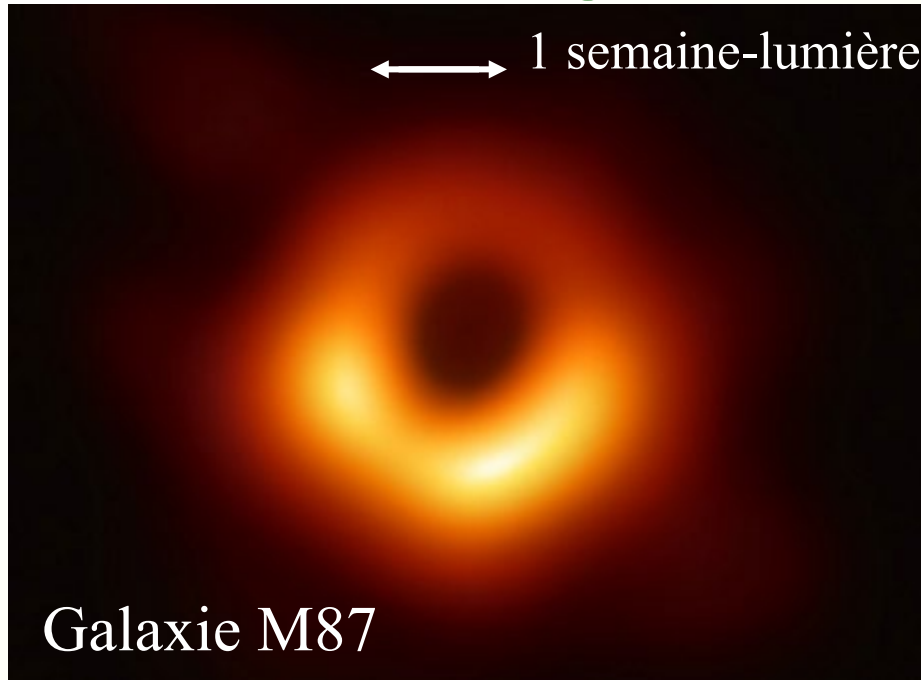
(c) 2005, Thomas Müller, Roland Speith

# Les quasars: des trous noirs vraiment troublants

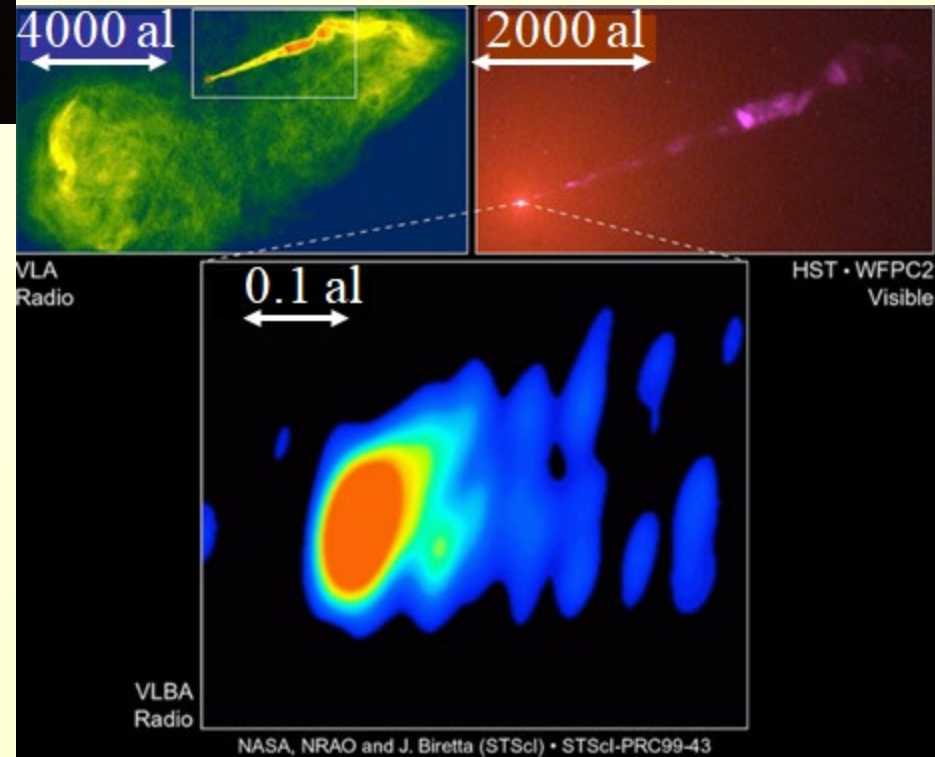
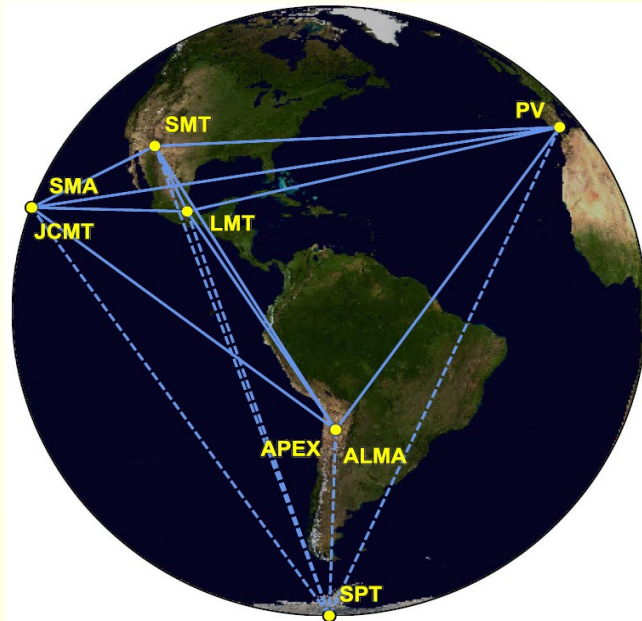


Françoise Combes  
**Observatoire de Paris**  
Octobre 2022

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



10 Avril 2019 EHT  
« Event Horizon Telescope »



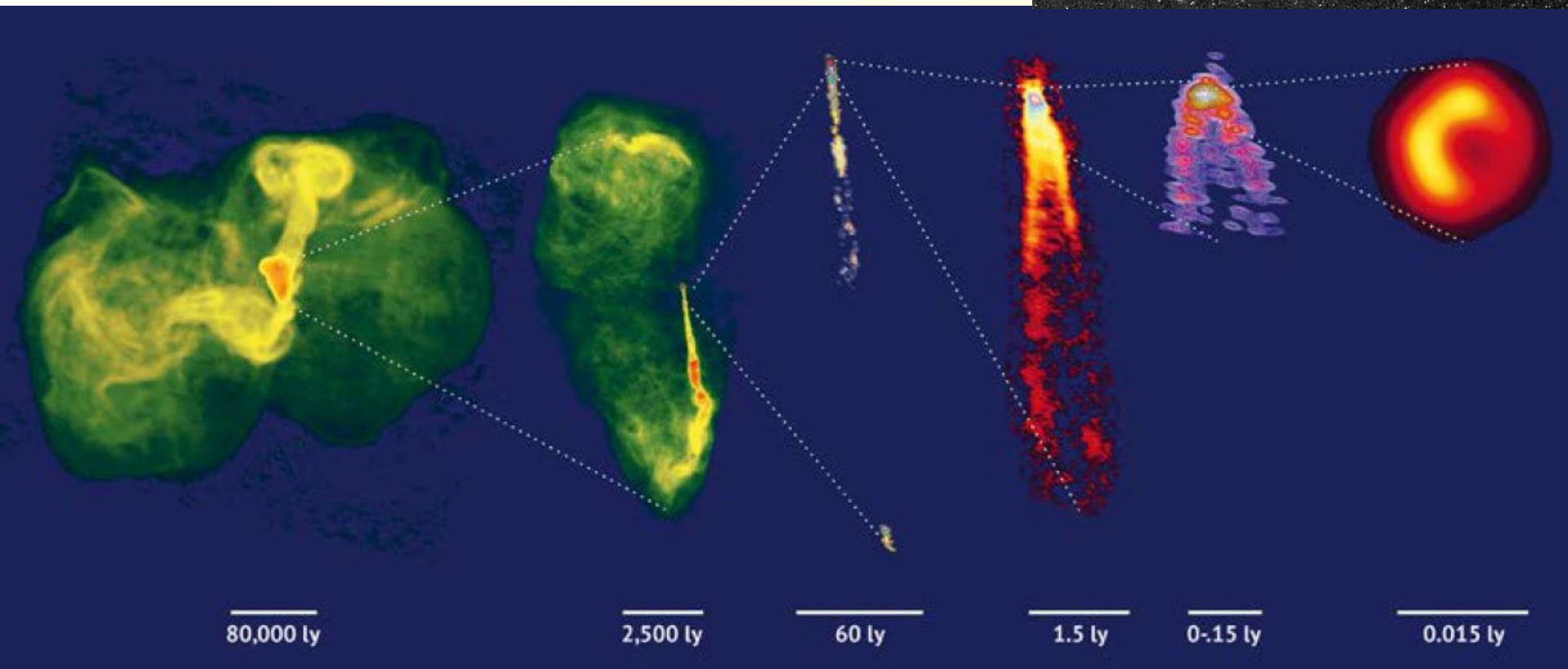
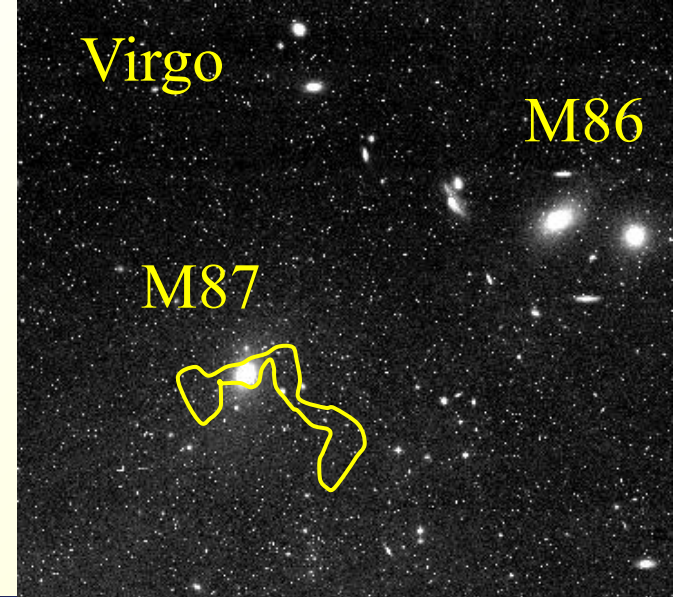


# Événement multi-échelle

Rayonnement synchrotron, radio  $\rightarrow$  optique

$\rightarrow$  rayons X

$M = 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$





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

John Michell (1784) & Pierre-Simon Laplace (1795)

Vitesse d'échappement  $> c$

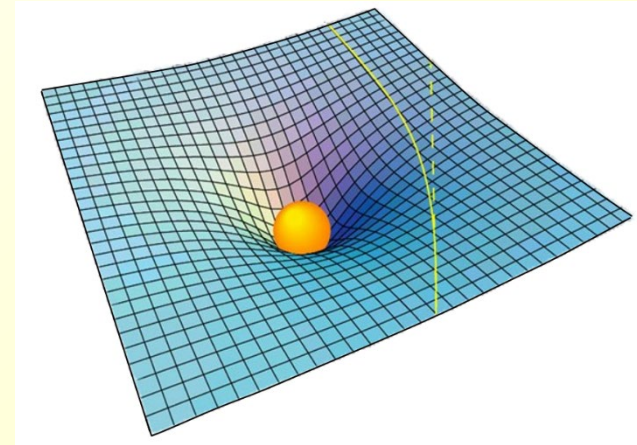
Relativité Générale: Einstein (1915), Schwarzschild (1916)

Horizon:  $R_s = 2 GM/c^2$      $V_{ech}^2 = 2 GM/R$

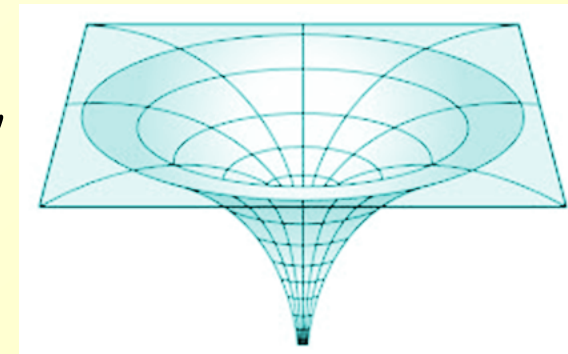
Rotation: Kerr (1963) -- avec symétrie

Solution topologique

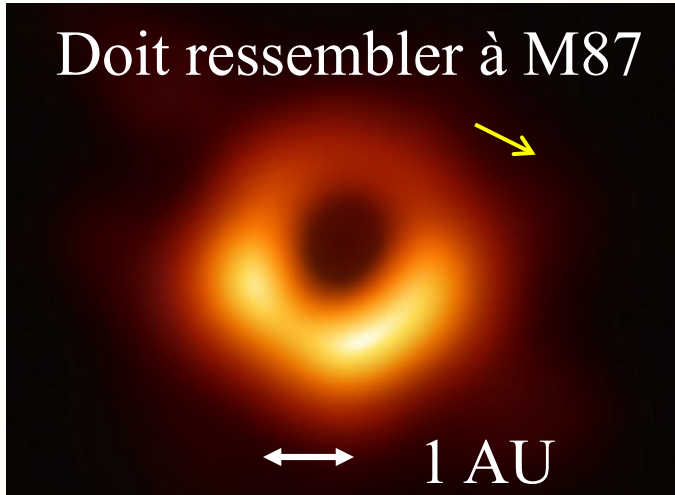
Penrose (1965) → Prix Nobel 2020



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



# Pourquoi pas l'image de notre trou noir?



M87 est  $\sim 2000$  fois plus loin  
Mais de masse  $\sim 2000x$  plus grande!

→ **Même taille angulaire !**  
**Ombre du TN de  $40 \mu\text{as}$**

La période est bien plus petite  
 $T \propto M$  **30min au lieu de 50 jours**

Prix Nobel de Physique 2020



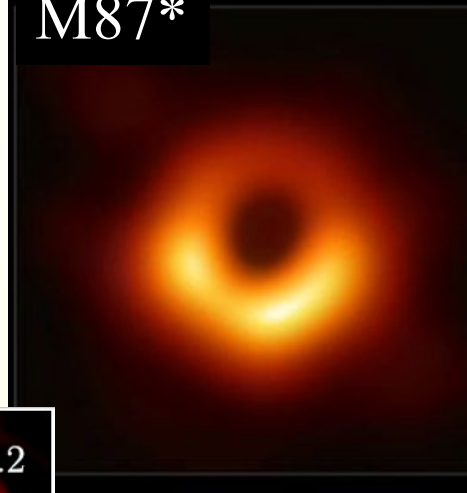


# Et SgrA\*, enfin!

12 Mai 2022, EHT

$R = 26 \mu\text{as} = 0.2 \text{UA} = 1.6 \text{min-lum}$

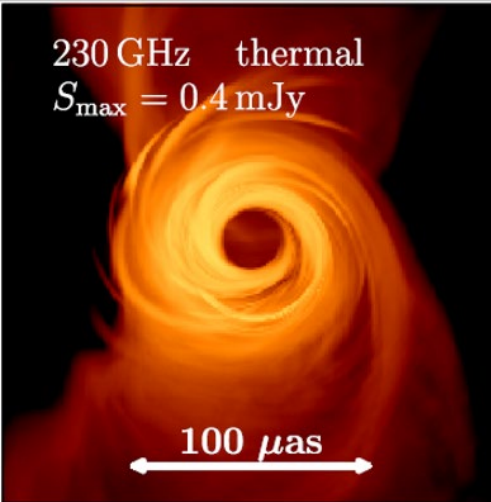
M87\*



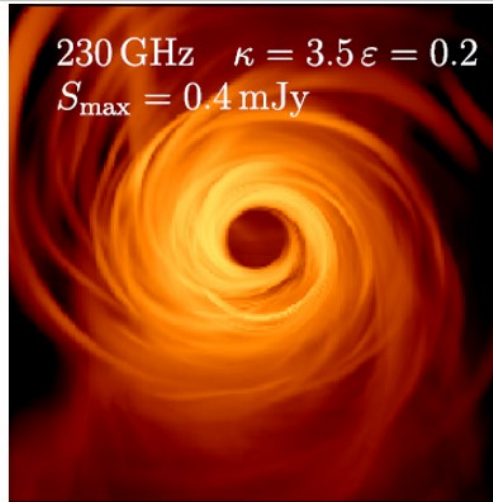
SgrA\*



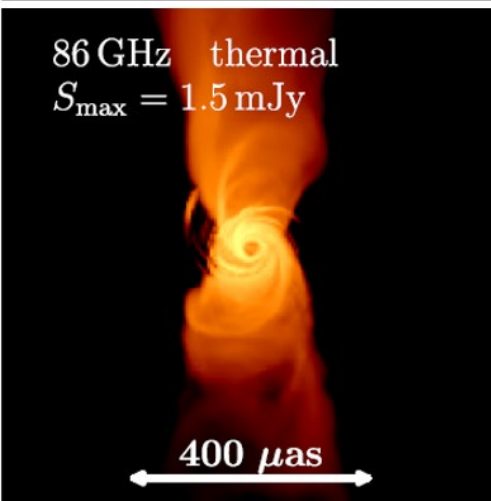
230 GHz thermal  
 $S_{\text{max}} = 0.4 \text{ mJy}$



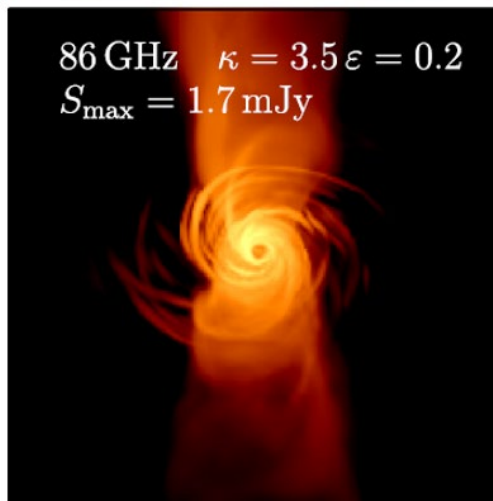
230 GHz  $\kappa = 3.5 \varepsilon = 0.2$   
 $S_{\text{max}} = 0.4 \text{ mJy}$



86 GHz thermal  
 $S_{\text{max}} = 1.5 \text{ mJy}$



86 GHz  $\kappa = 3.5 \varepsilon = 0.2$   
 $S_{\text{max}} = 1.7 \text{ mJy}$

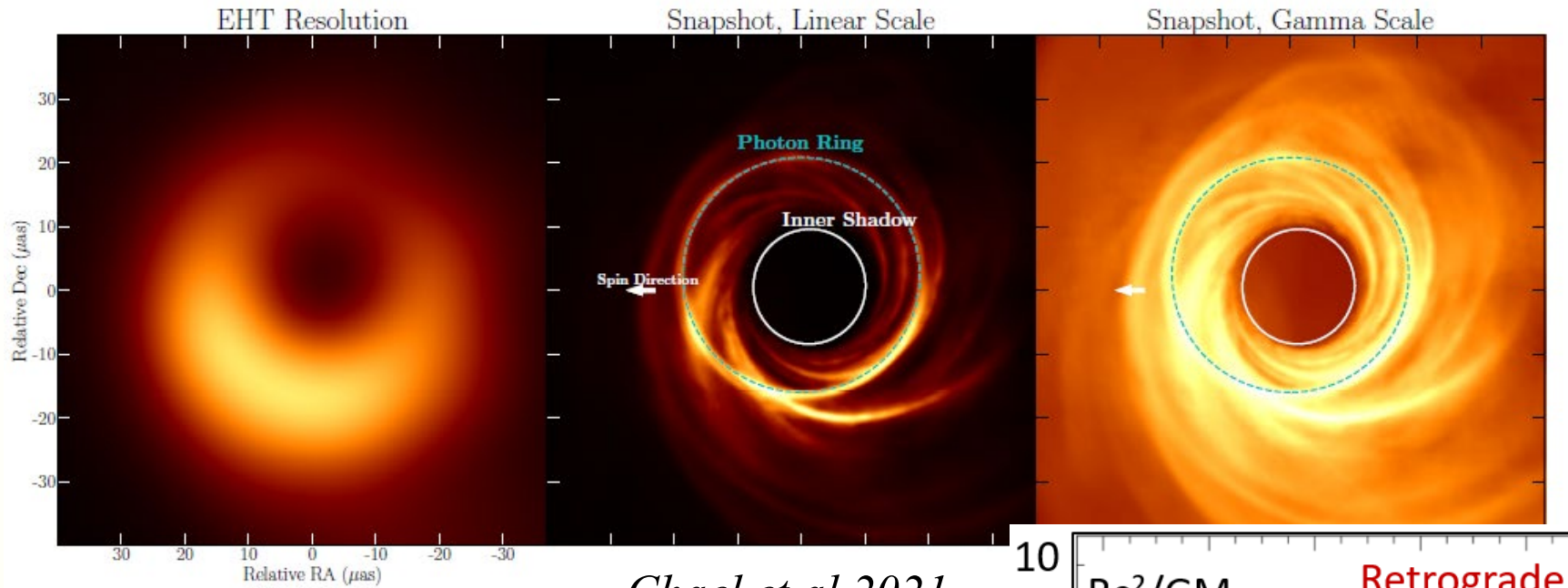


$R_{\text{horiz}} = 0.08 \text{ UA}, R_{\text{ombre}} = 0.2 \text{ UA}$

Observé en Avril 2017 aussi  
Mais beaucoup plus difficile  
à interpréter, calculer

Interférométrie: combiner les  
données enregistrées, avec une  
horloge atomique

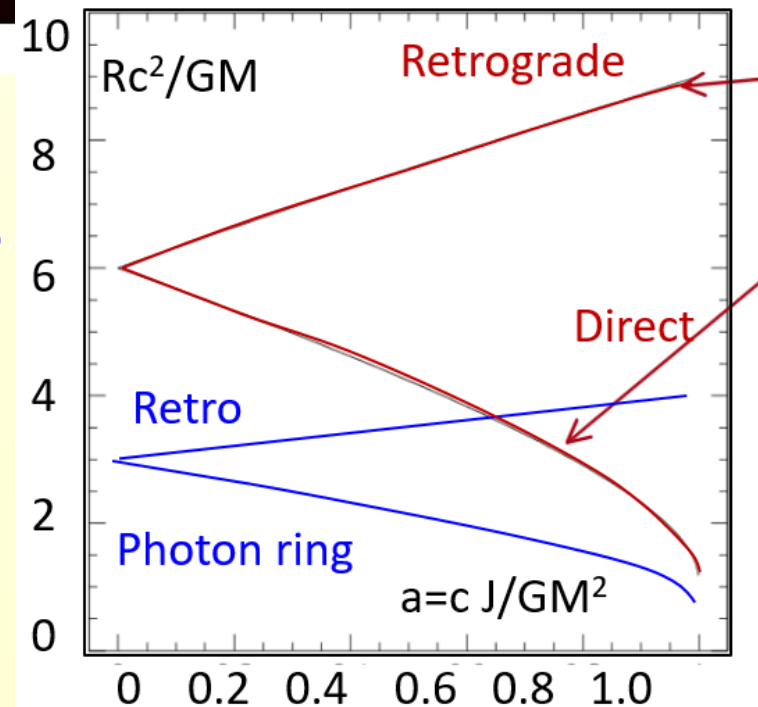
# Anneau de photons



*Chael et al 2021*

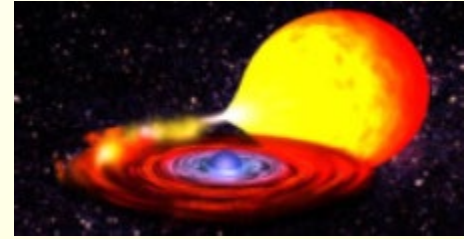
La taille de l'anneau de photons et ISCO  
Innermost Stable Circular Orbit du gaz  
indiquent le spin du trou noir

Selon le sens de rotation du gaz



# Deux sortes de trous noirs

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



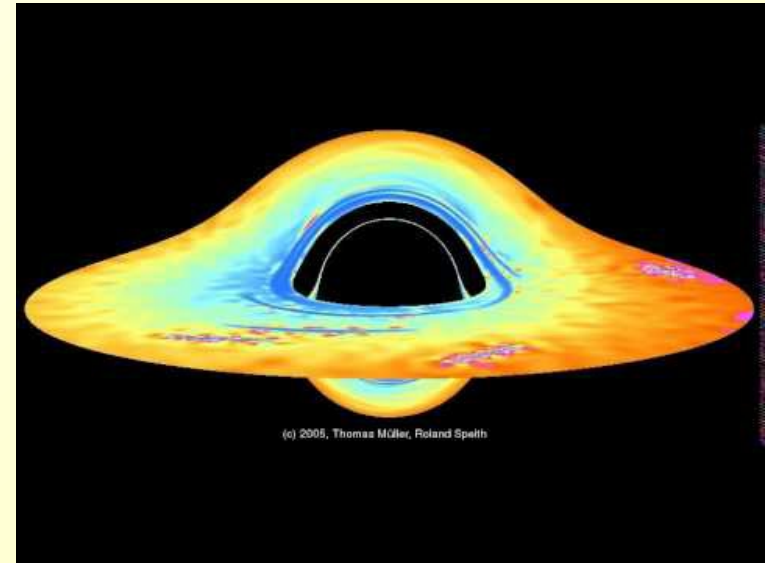
2. Trous noirs super-massifs: noyaux de galaxie

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!





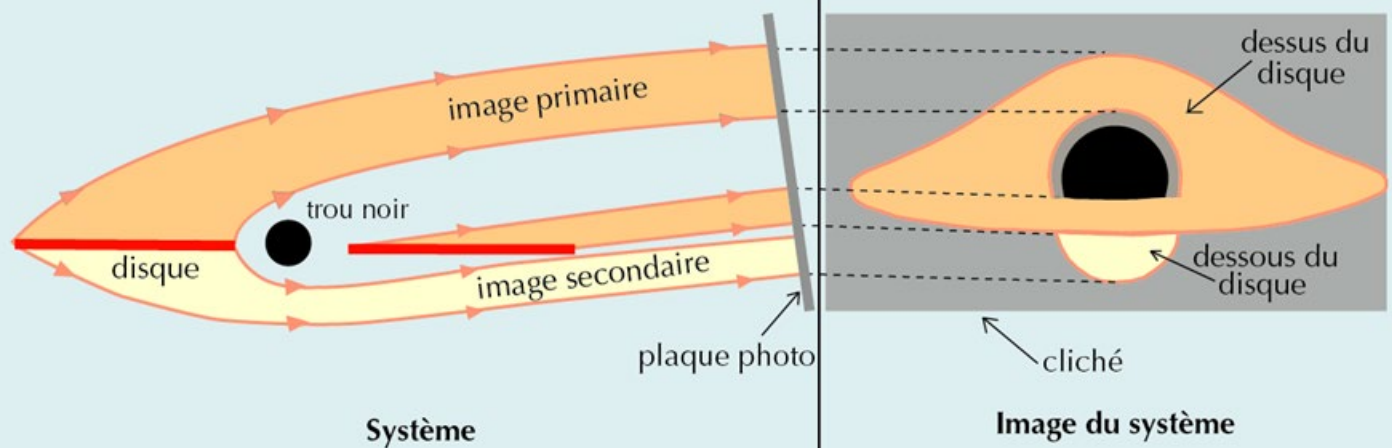
# Elongation en spaghetti

Forces de marée: différence entre les forces de gravité,  $GM/r^3$   
→ comparaison des densités moyennes

A partir de  $M = 10^8 M_{\odot}$   
Les forces de marée ne jouent plus



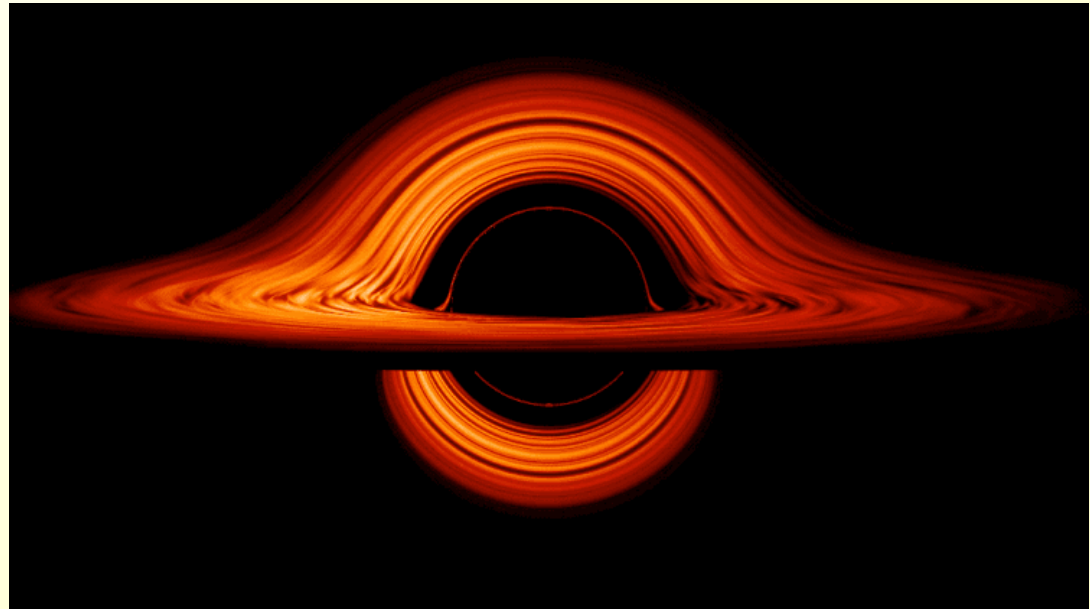
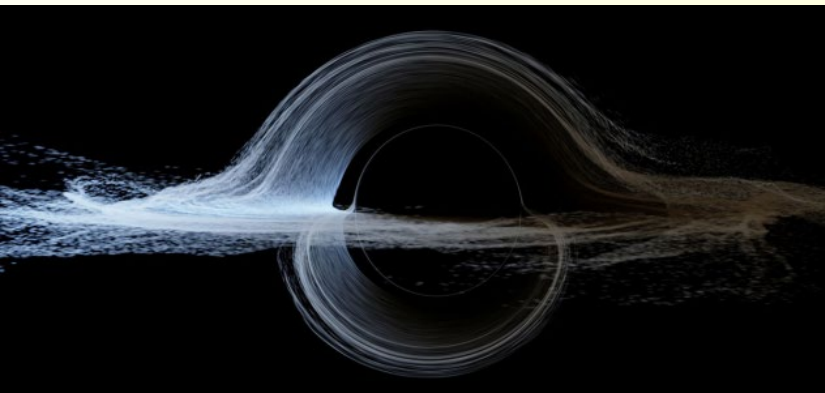
Les étoiles sont avalées entières



Trou noir  
+disque brillant  
observé à  $10^\circ$

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

On voit aussi le  
dessous!

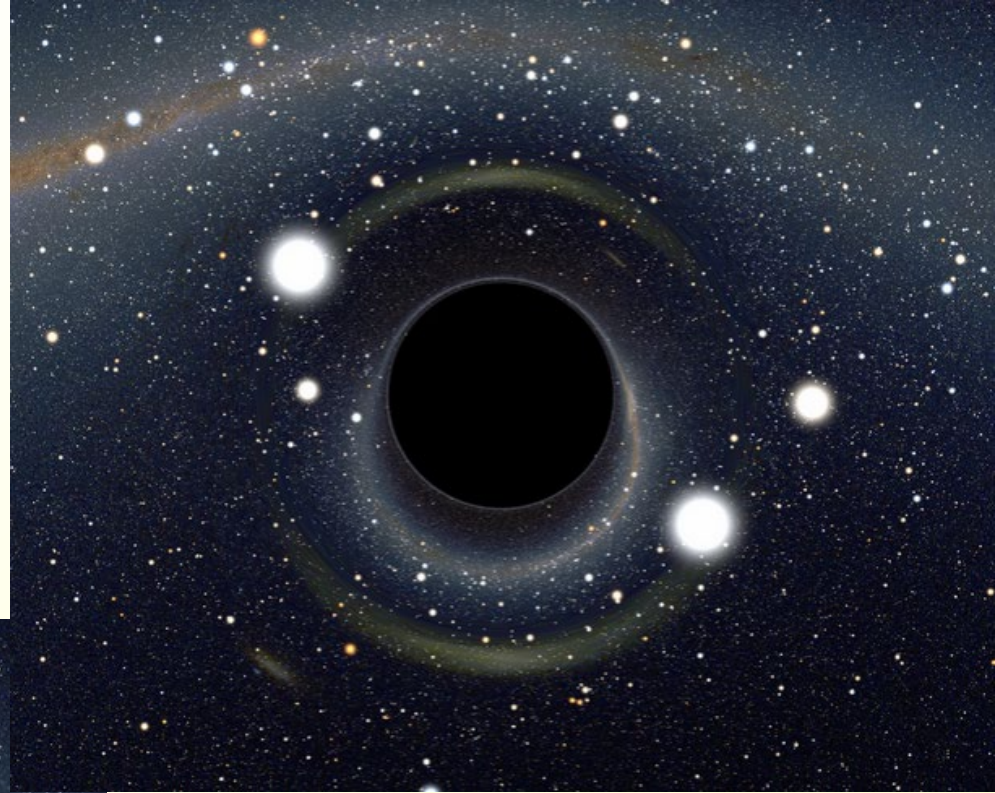


*Interstellar* (2014)

**Un trou noir dévie les rayons lumineux**

**→ Déformation des images**

Nuages de Magellan et  
Voie Lactée

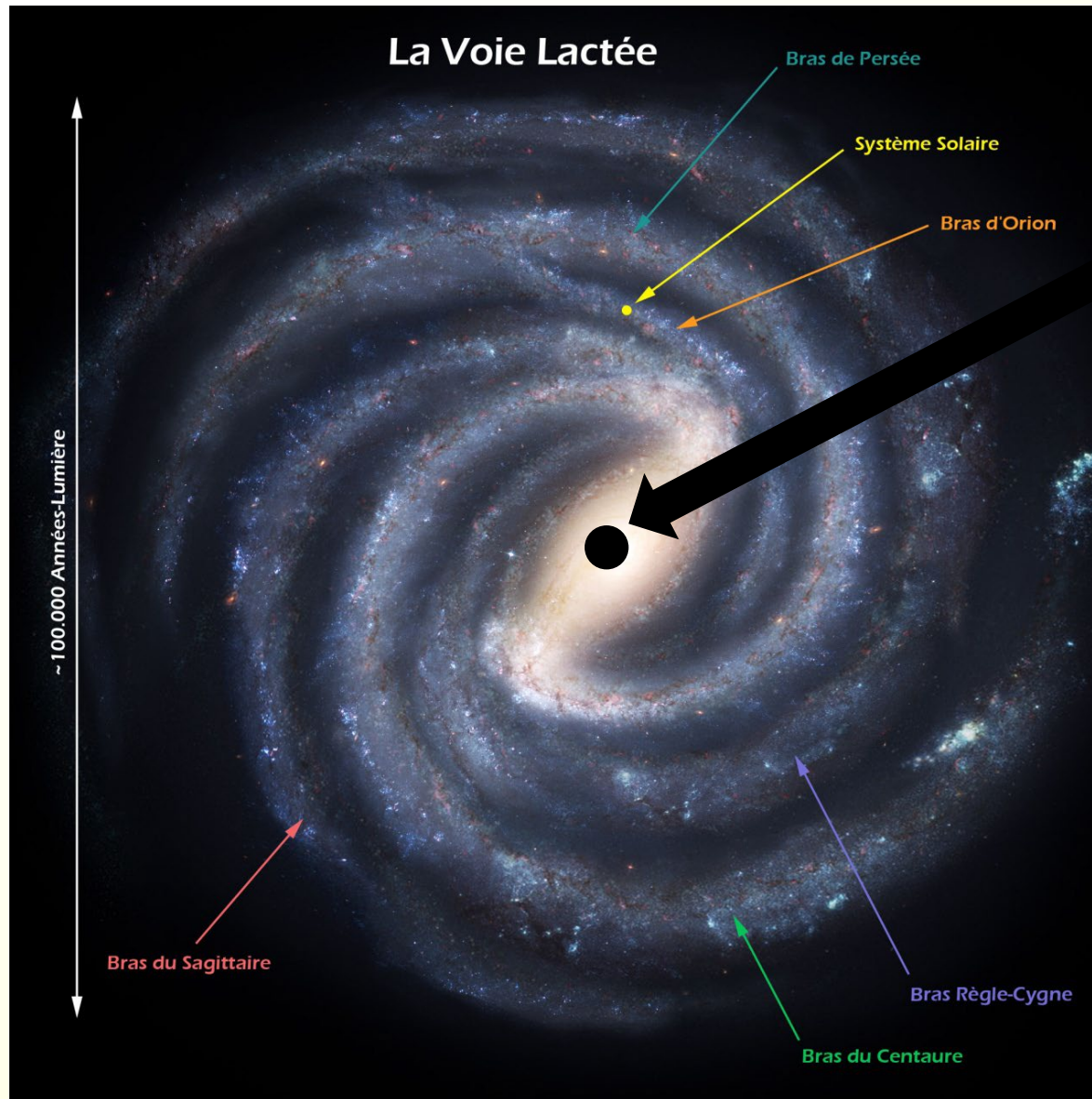


Trou noir entre nous et  
les Nuages de Magellan

*Alain Riazuelo*



# Notre galaxie: la Voie Lactée



Trou Noir



← 100 000 années-lumière →

# Images en optique, infra-rouge



Barre

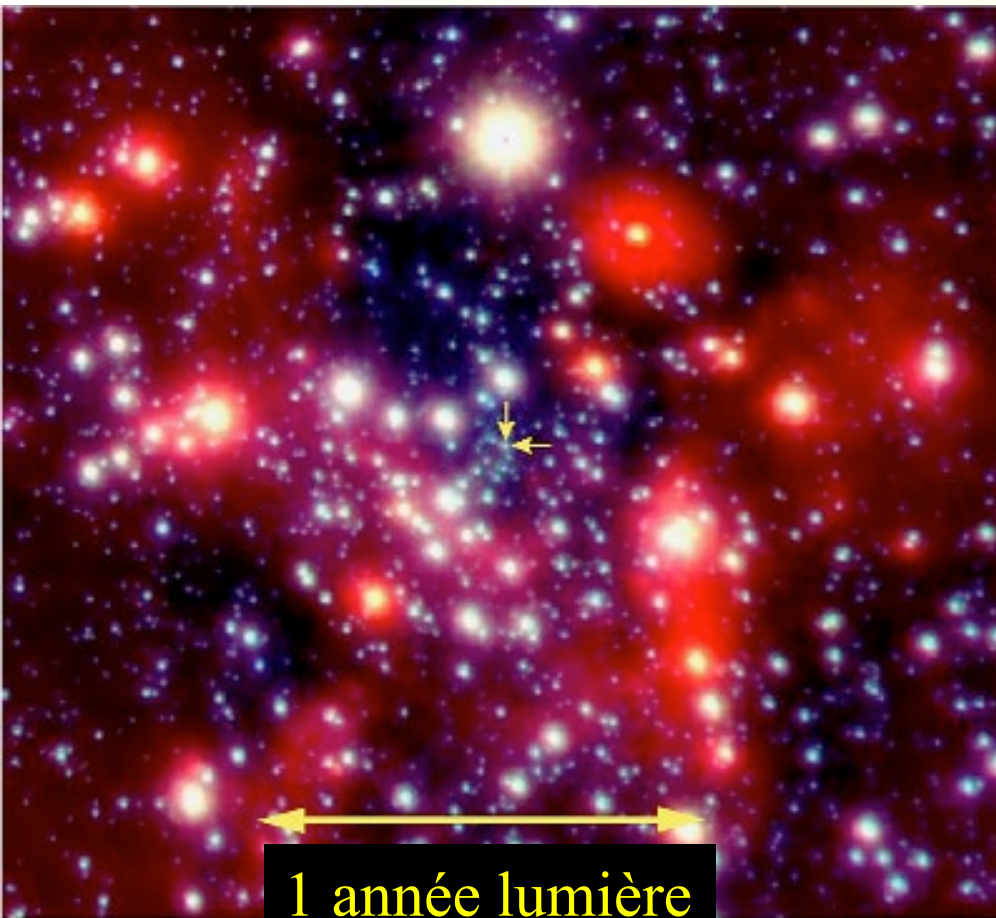
Bulbe en  
cacahuète

2MASS





# Astrométrie et mouvements propres au centre galactique

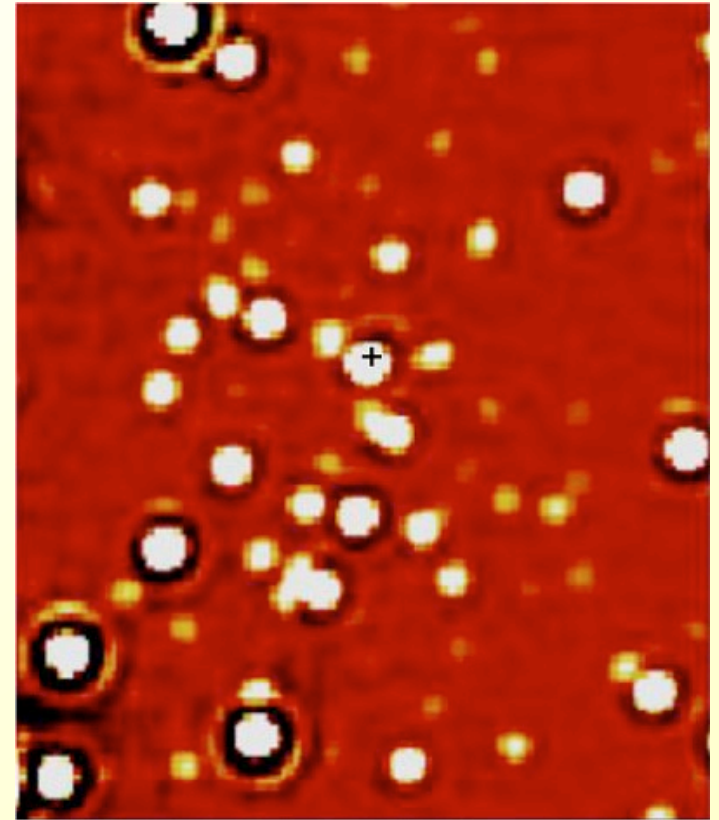


1 année lumière

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 (detail)  
(VLT YEPUN + NACO)

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

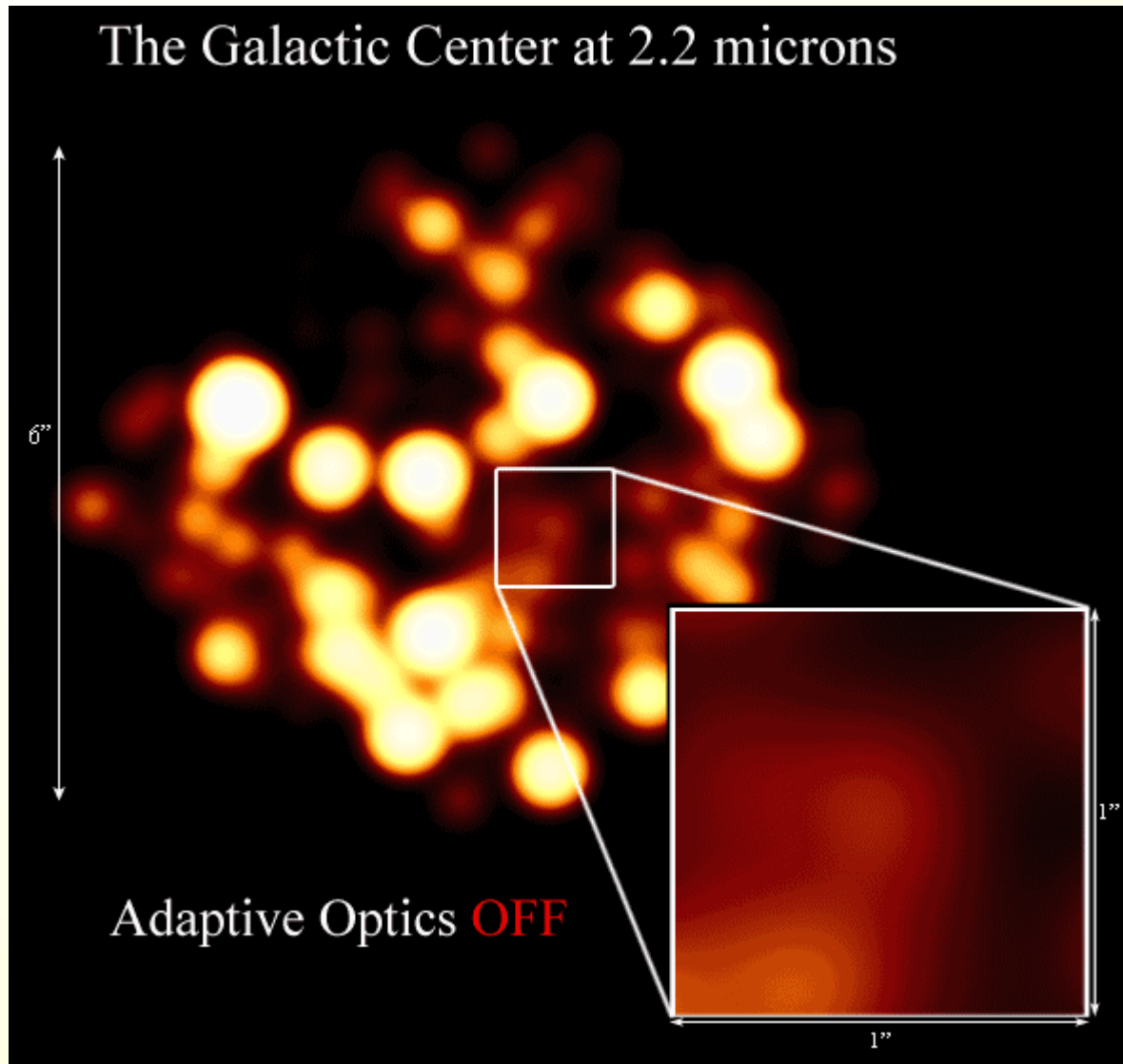
© European Southern Observatory



VLT-optique adaptative

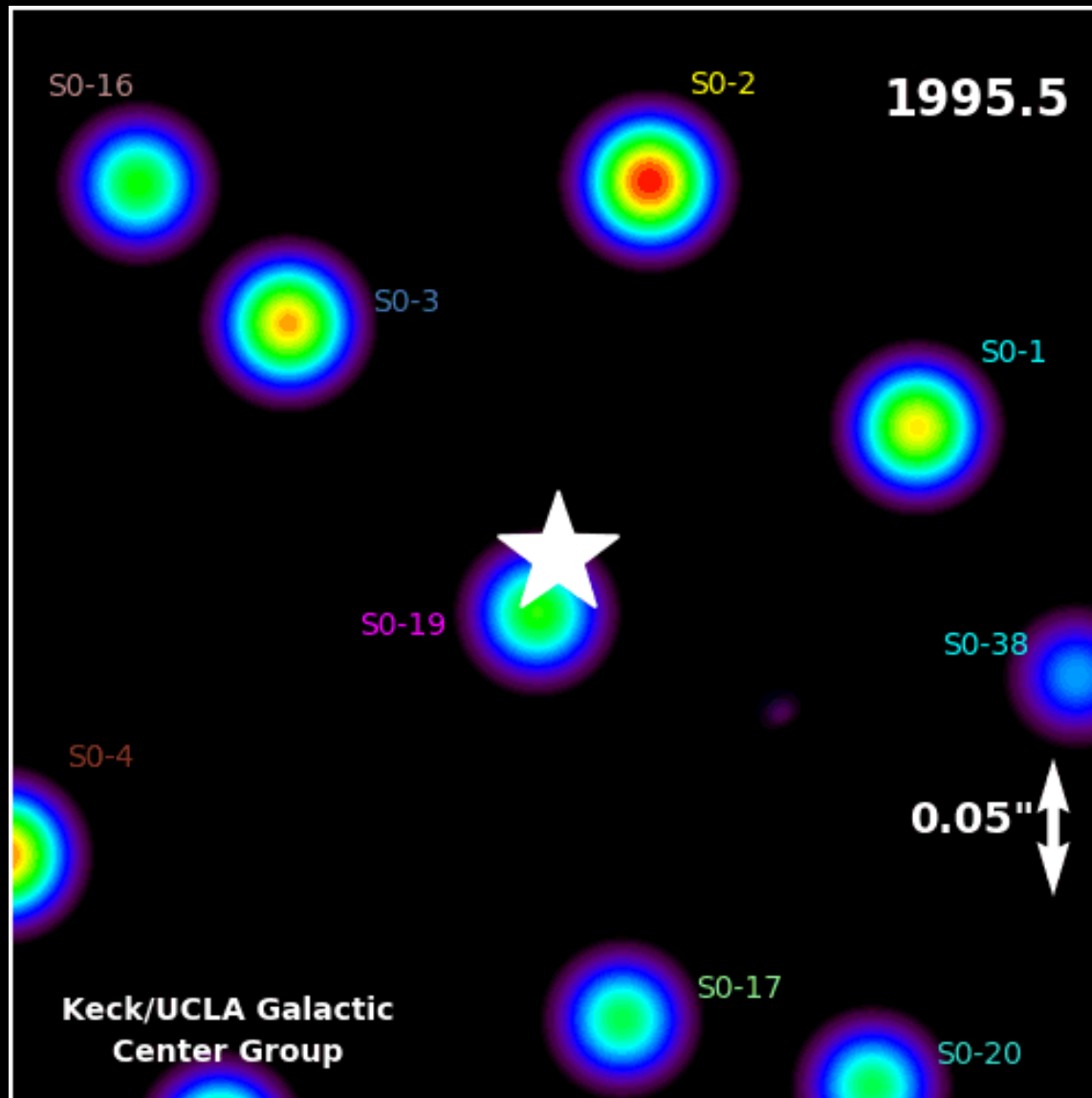


# Les effets de l'optique adaptative

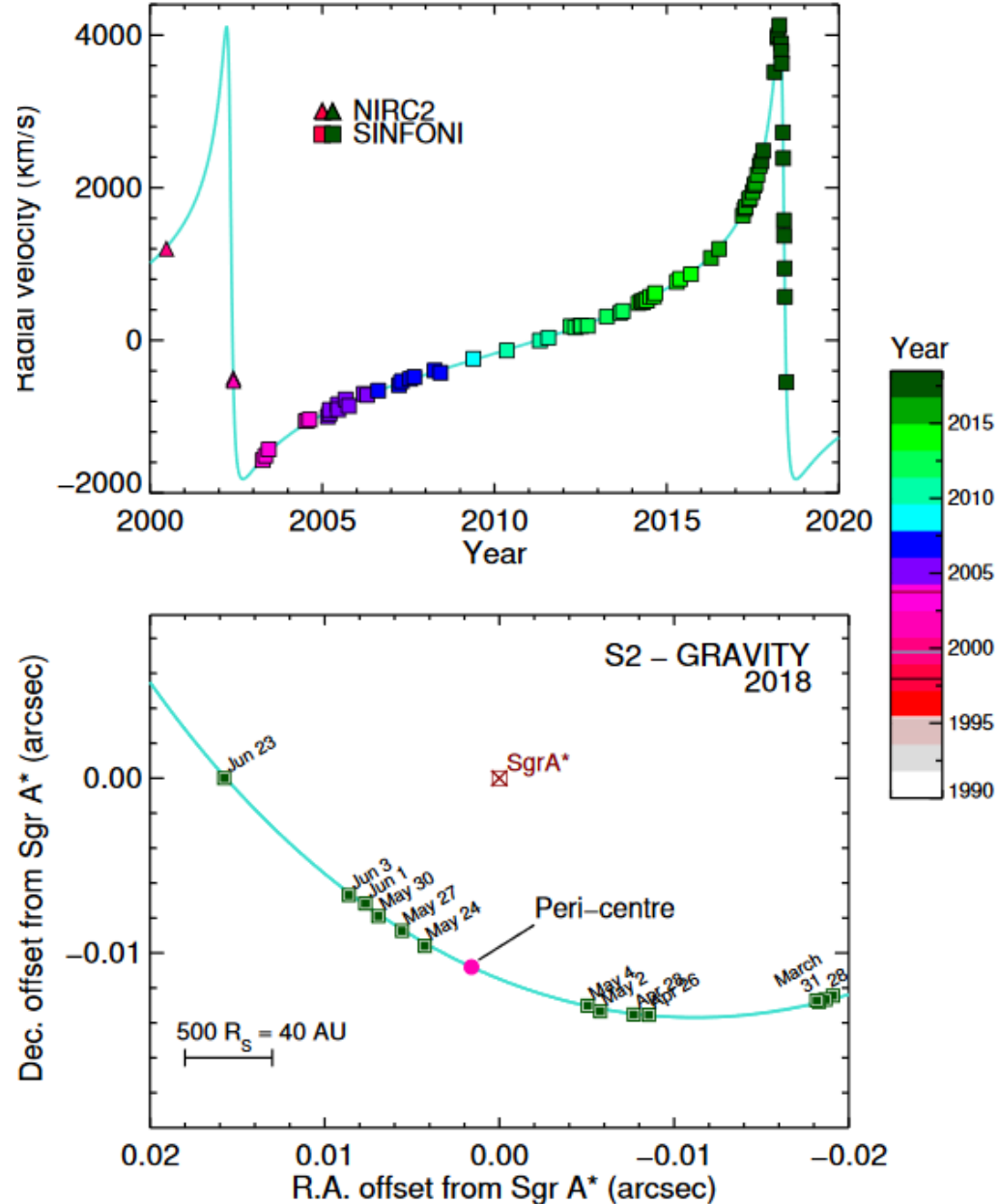
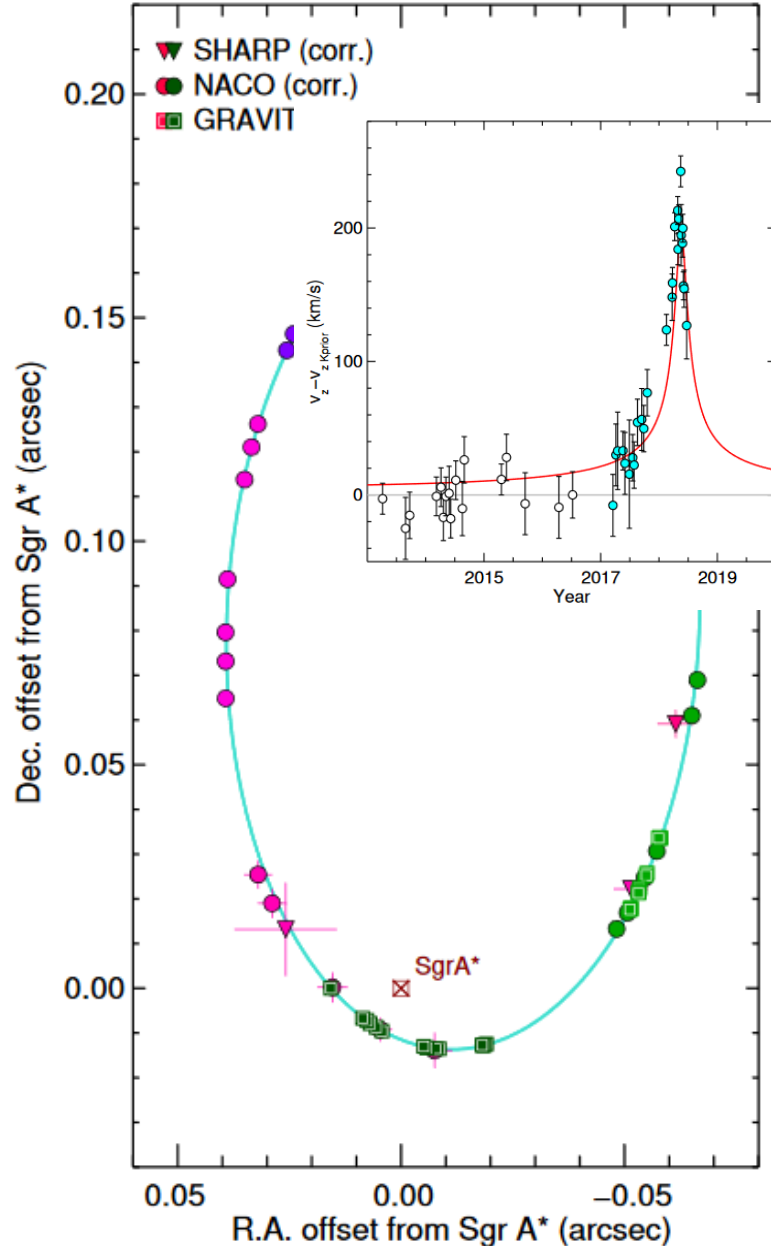


Corrige des  
turbulences de  
l'atmosphère

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

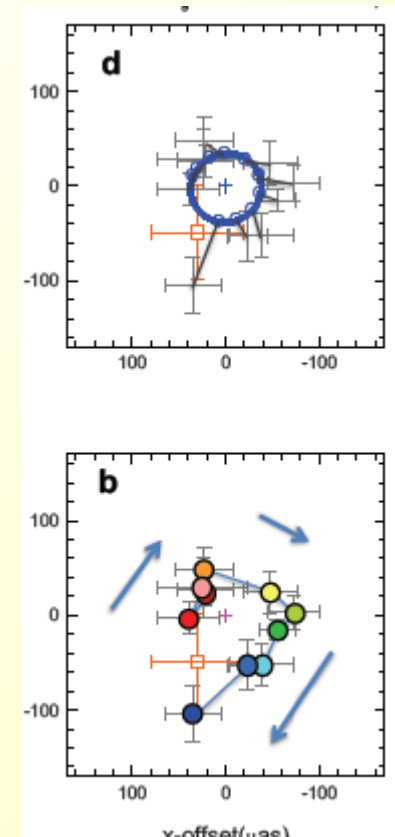
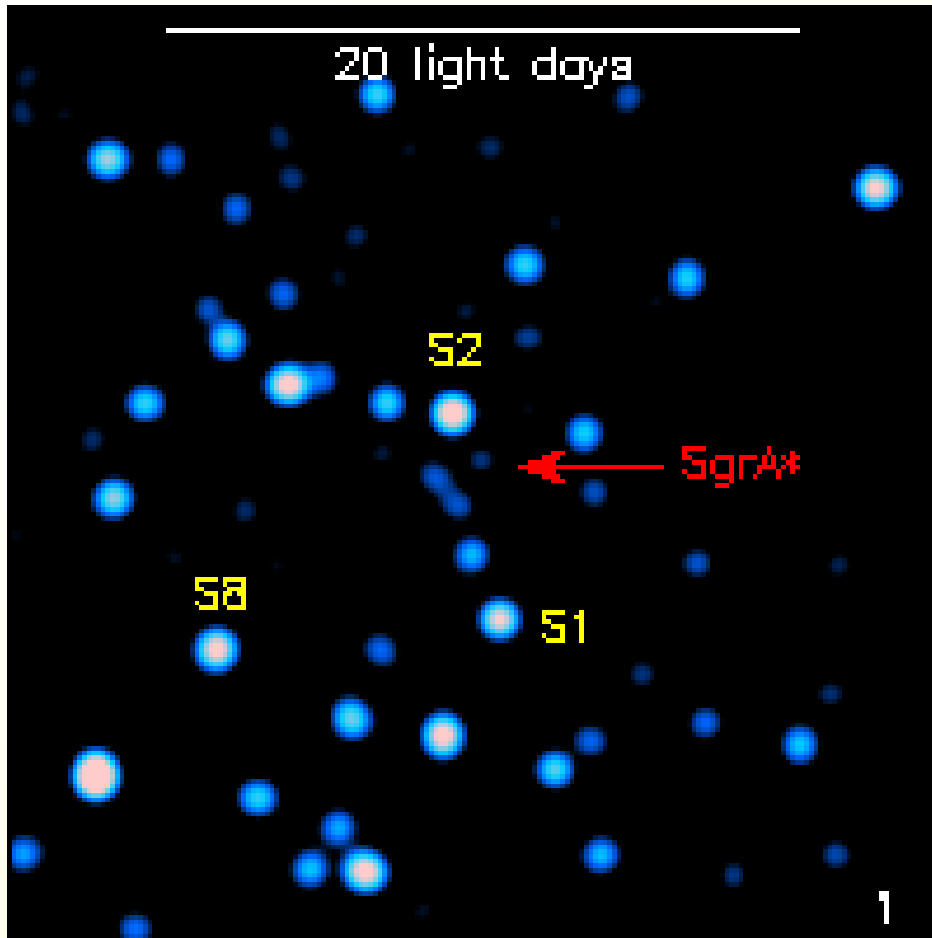


# Détection du redshift gravitationnel, *GRAVITY Coll 2018*





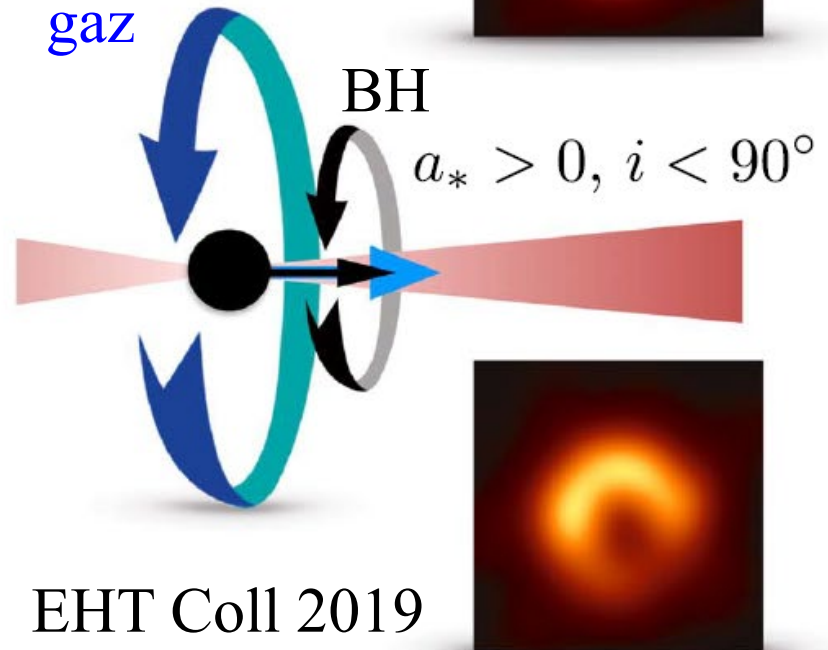
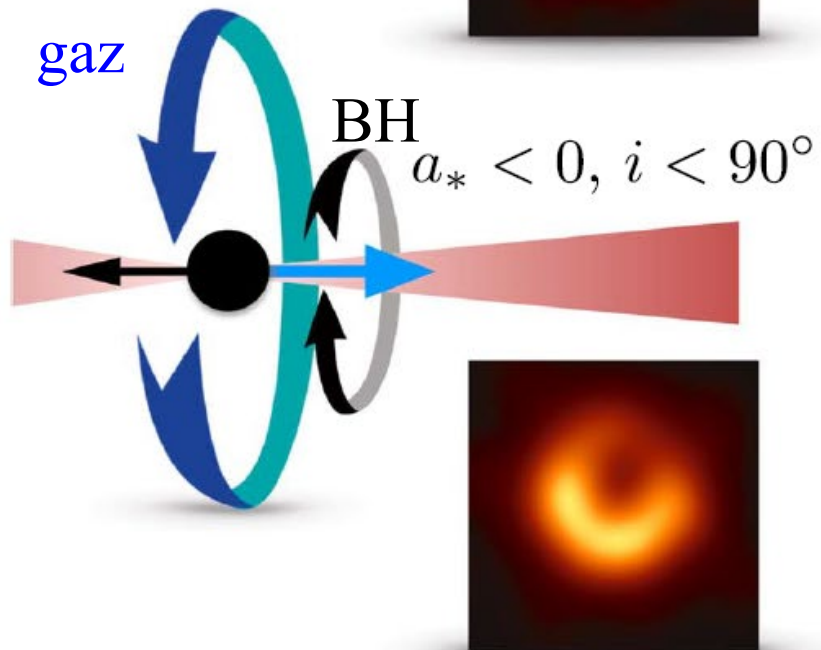
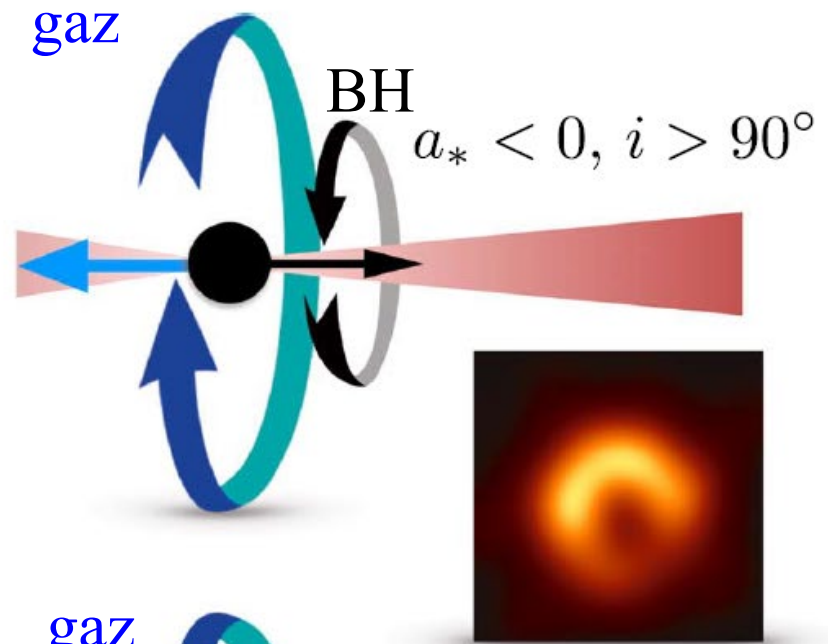
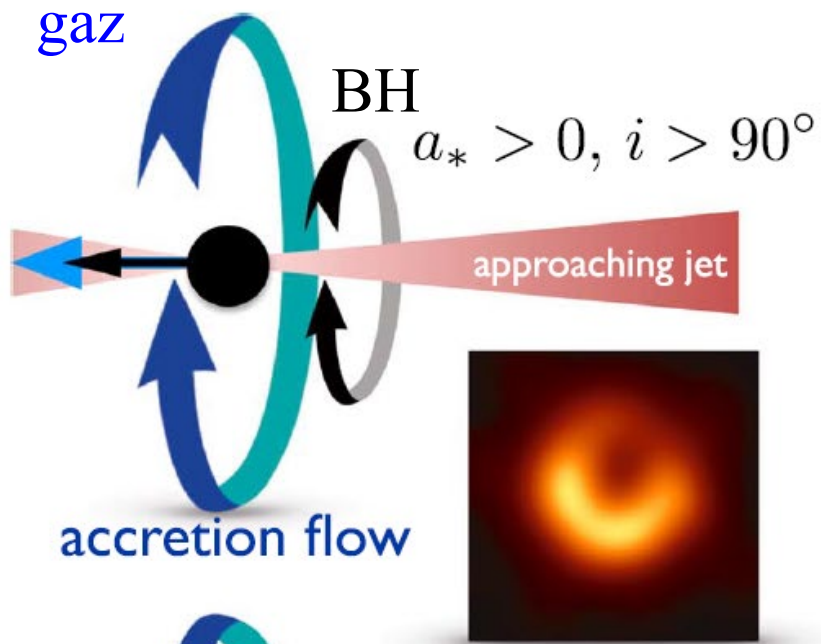
# Sursaut Infrarouge du trou noir de la Galaxie



GRAVITY 2018

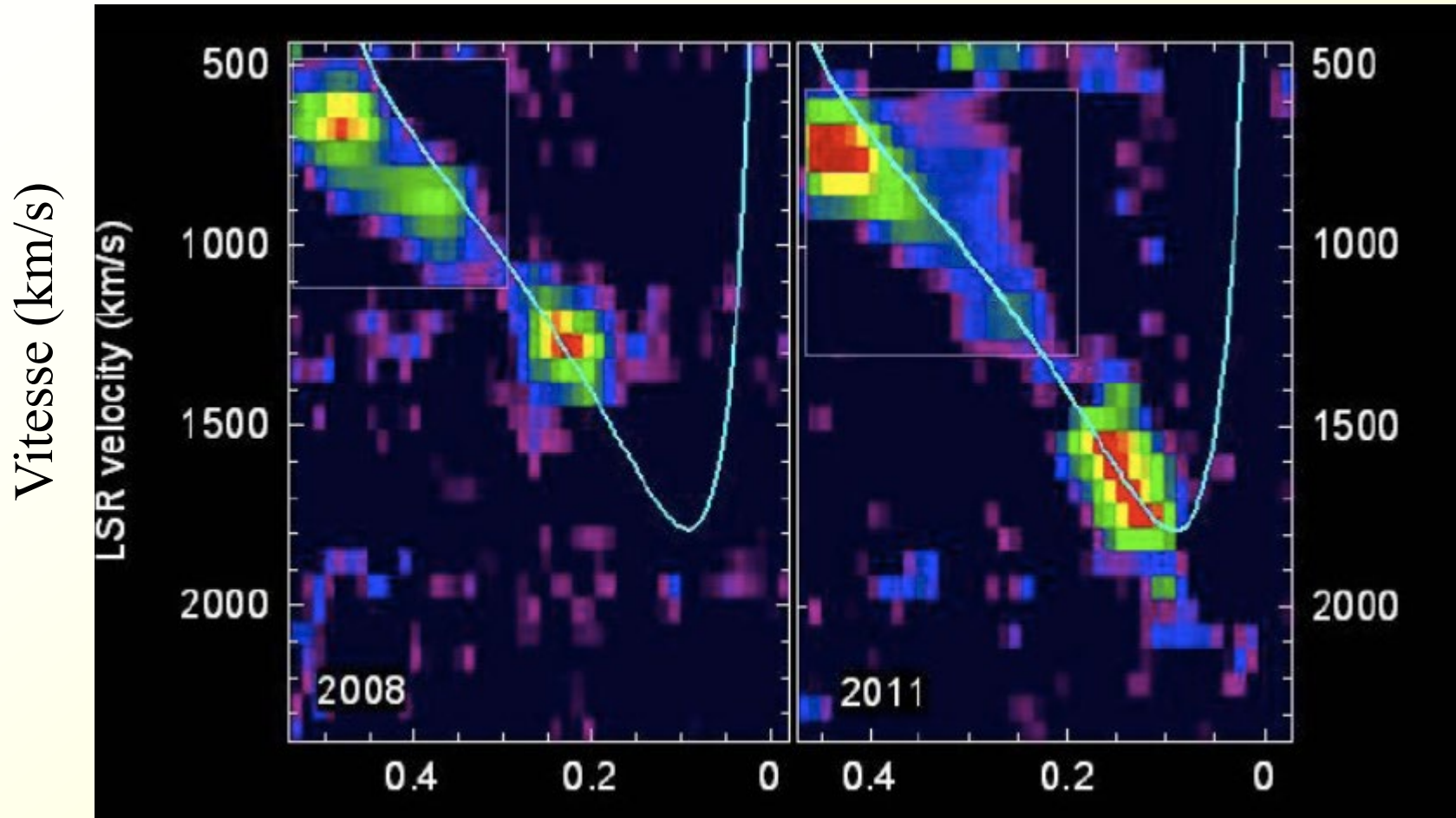
1.7microns, NACO, VLT, 30min, Mai 2003

# Le trou noir de M87



EHT Coll 2019

# Découverte d'un nuage de gaz en 2011

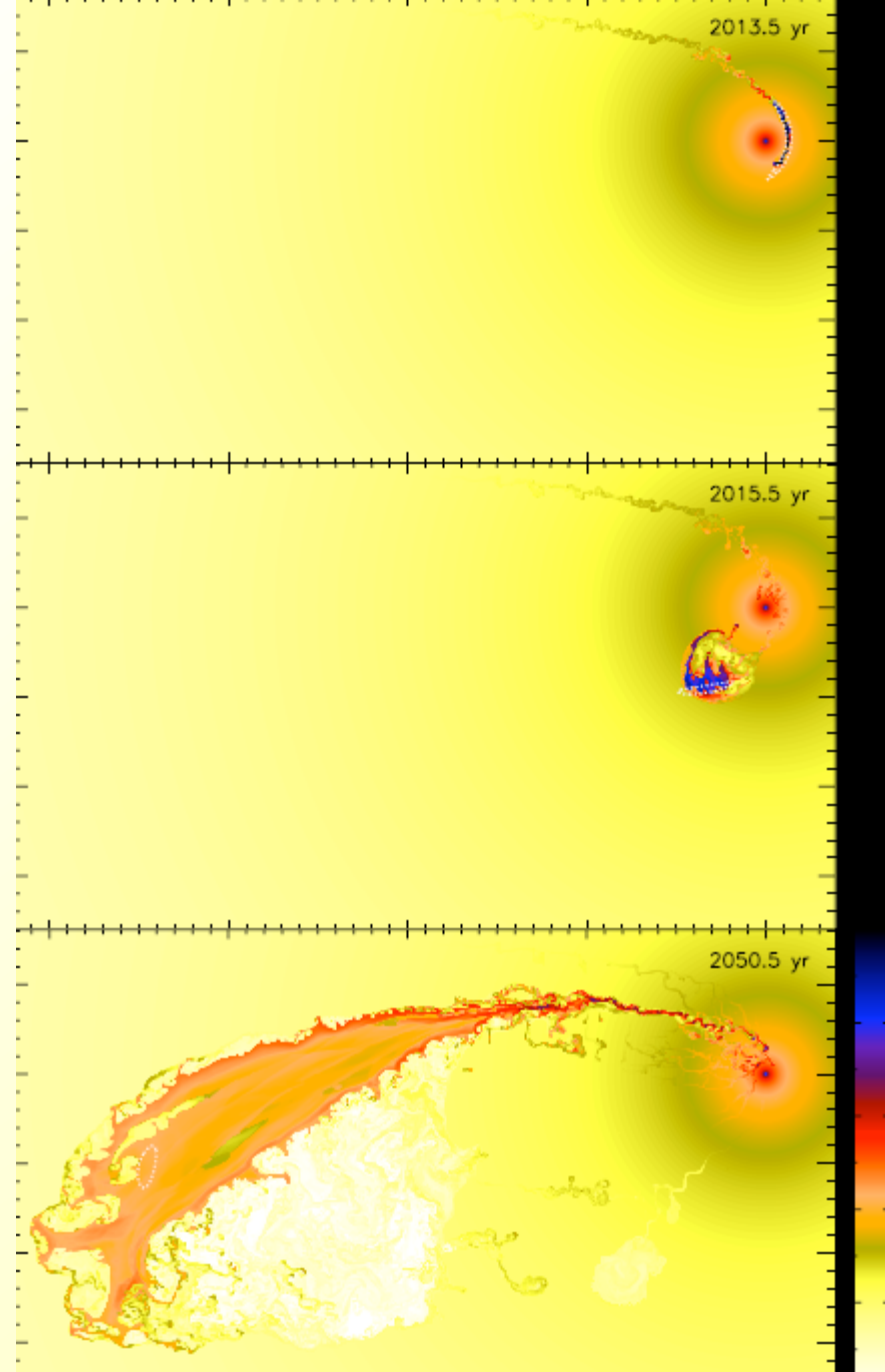
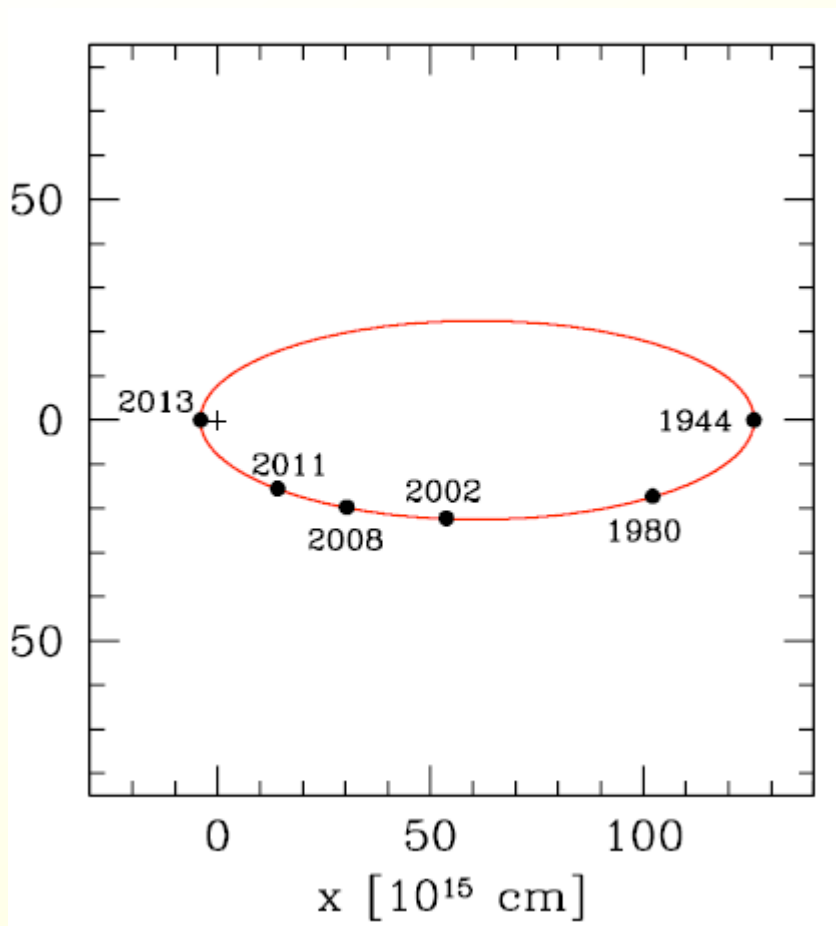


Distance au trou noir en arcsec (=0.1 al)

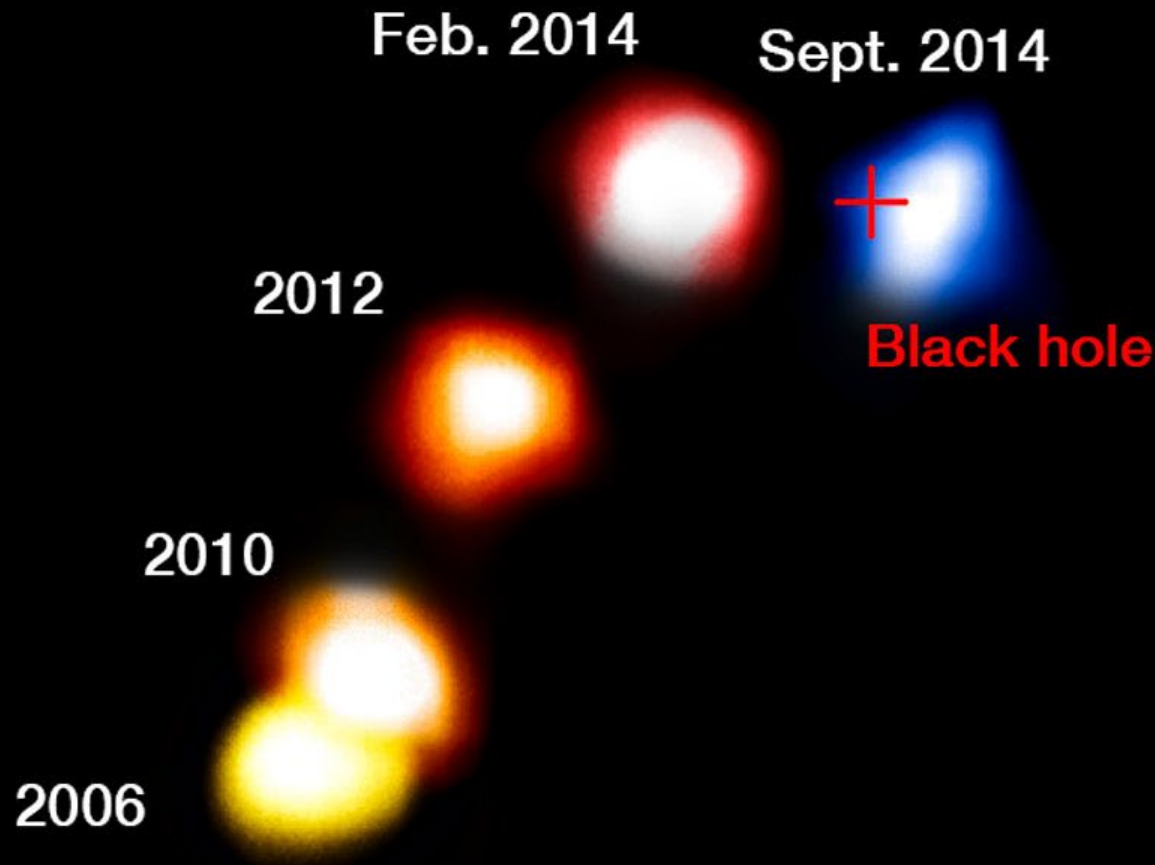


# Orbite du nuage de gaz ( $10^{-5} M_{\odot}$ )

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



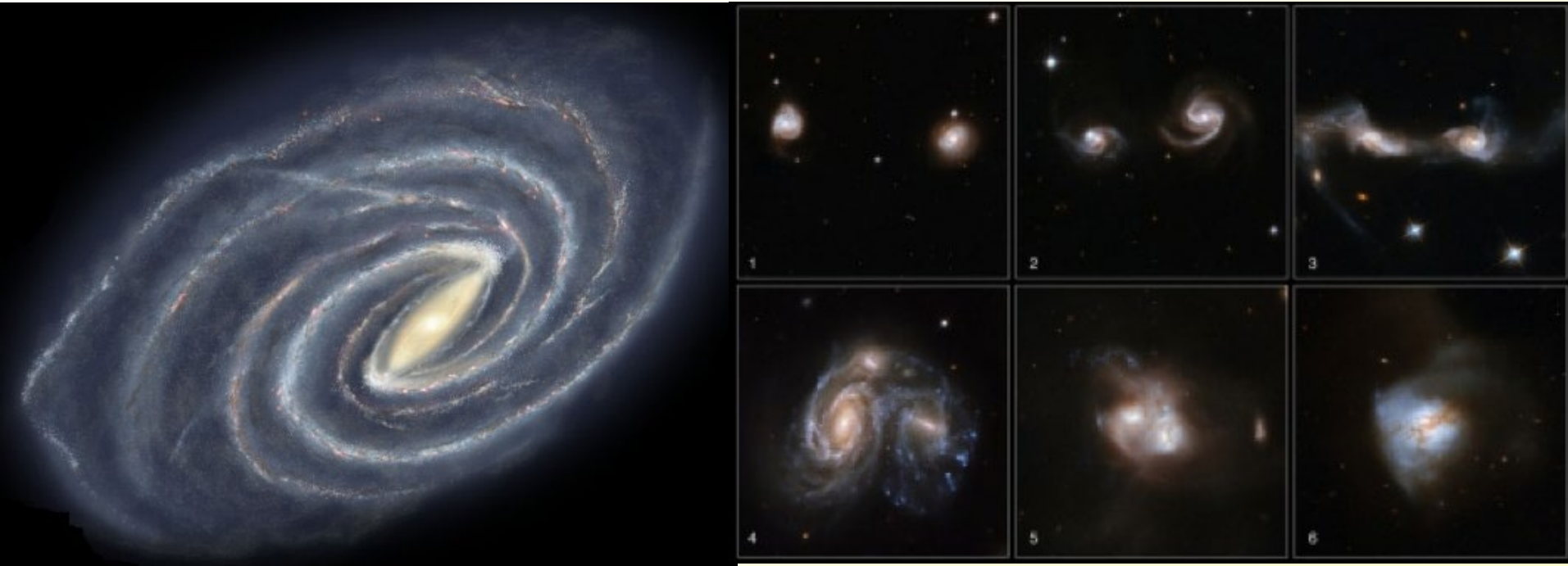
# Interaction et fusion avec Andromède



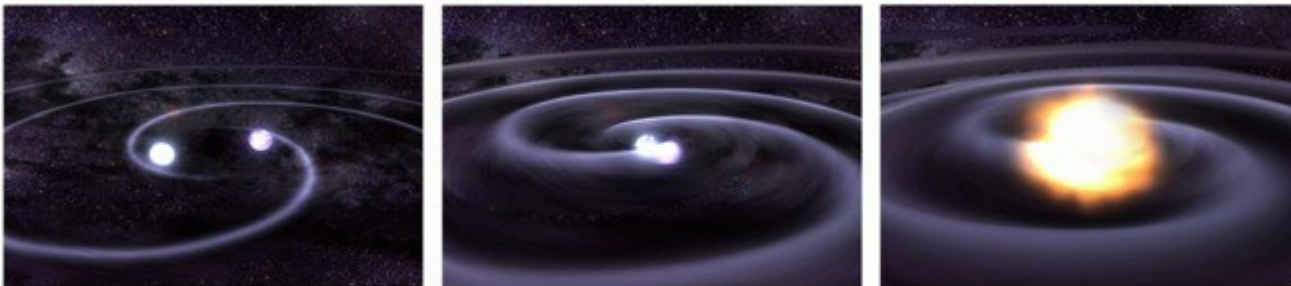


# Perspectives pour la Voie lactée...

Dans quelques 3 Ma



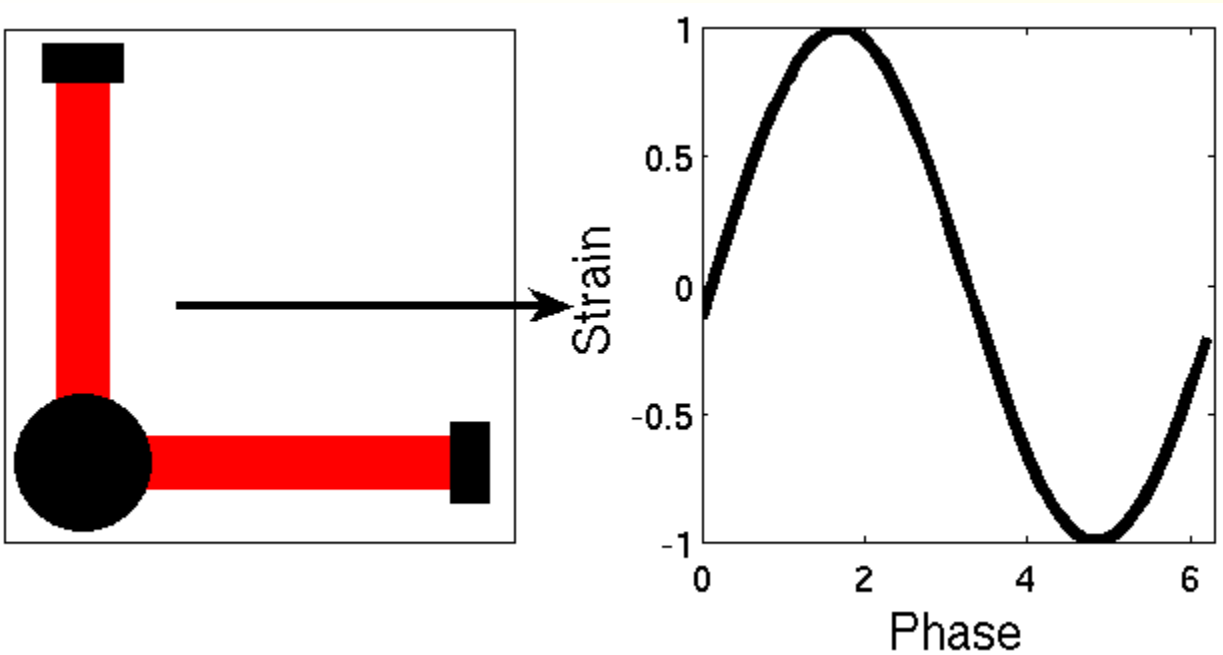
Fusion des trous noirs



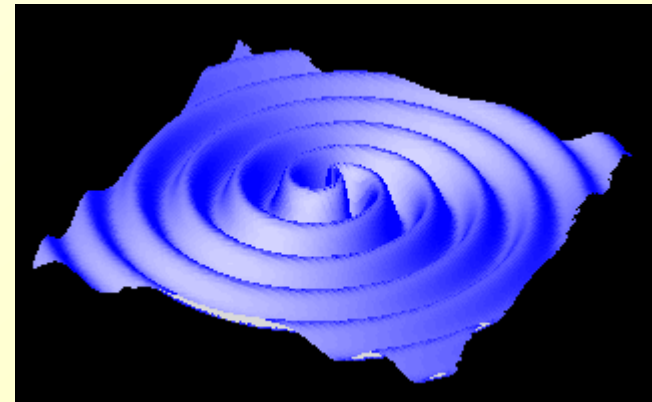
→ Ondes  
gravitationnelles

# Interféromètres LIGO, Virgo..

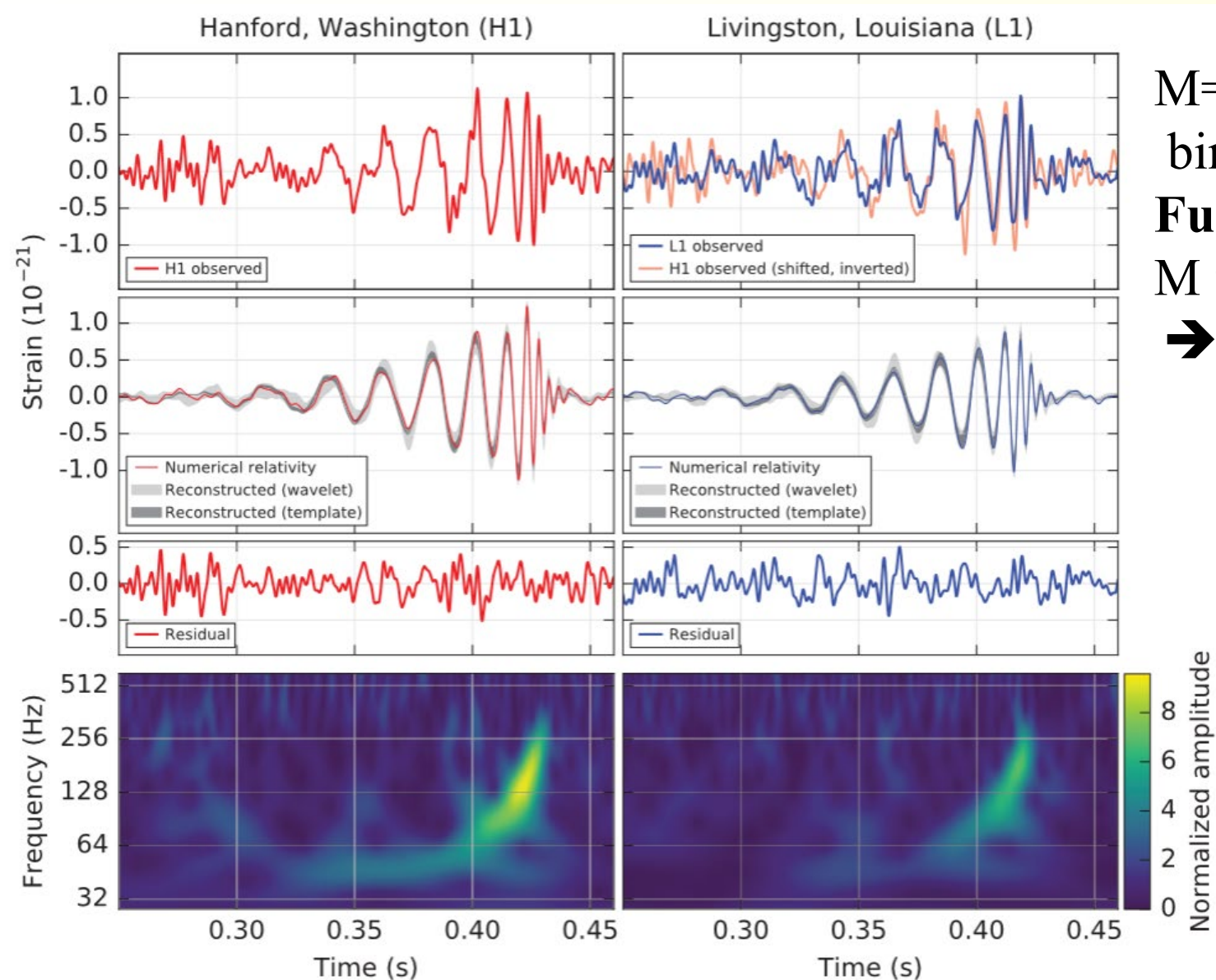
- Principe de mesure des ondes gravitationnelles



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



# 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

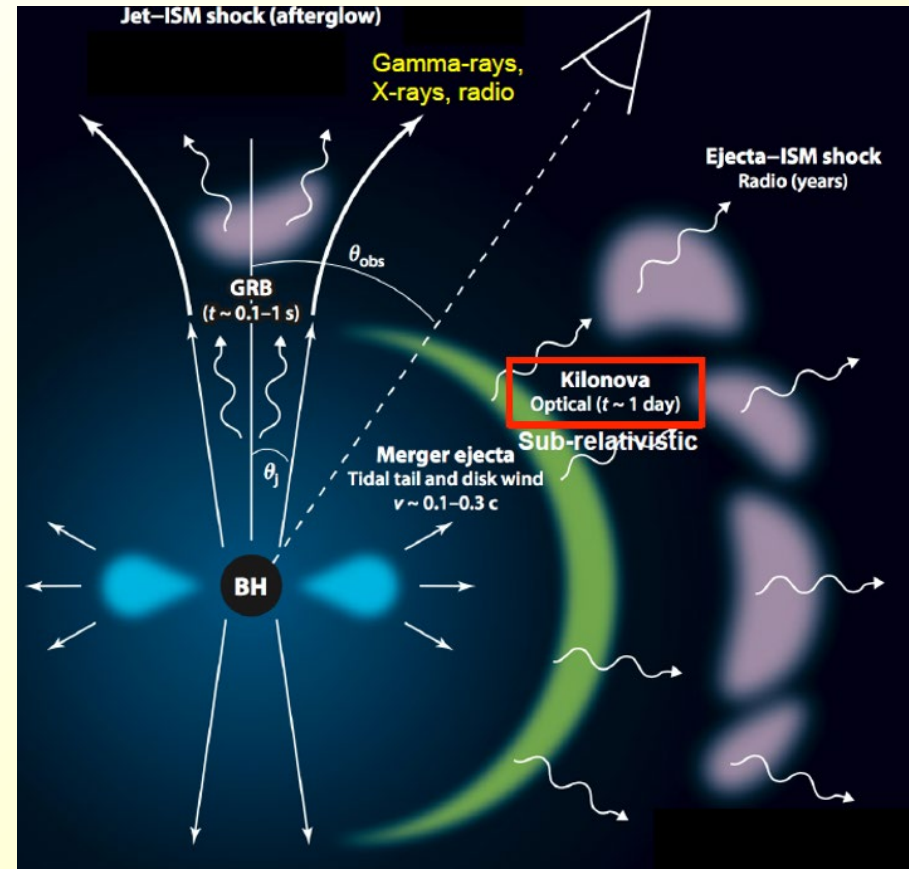
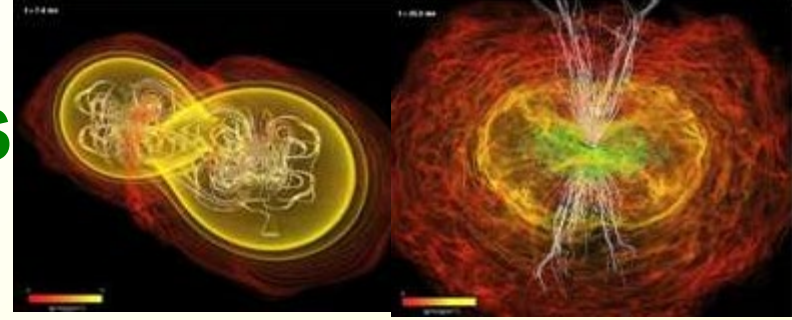


# Fusion de 2 étoiles à neutrons

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

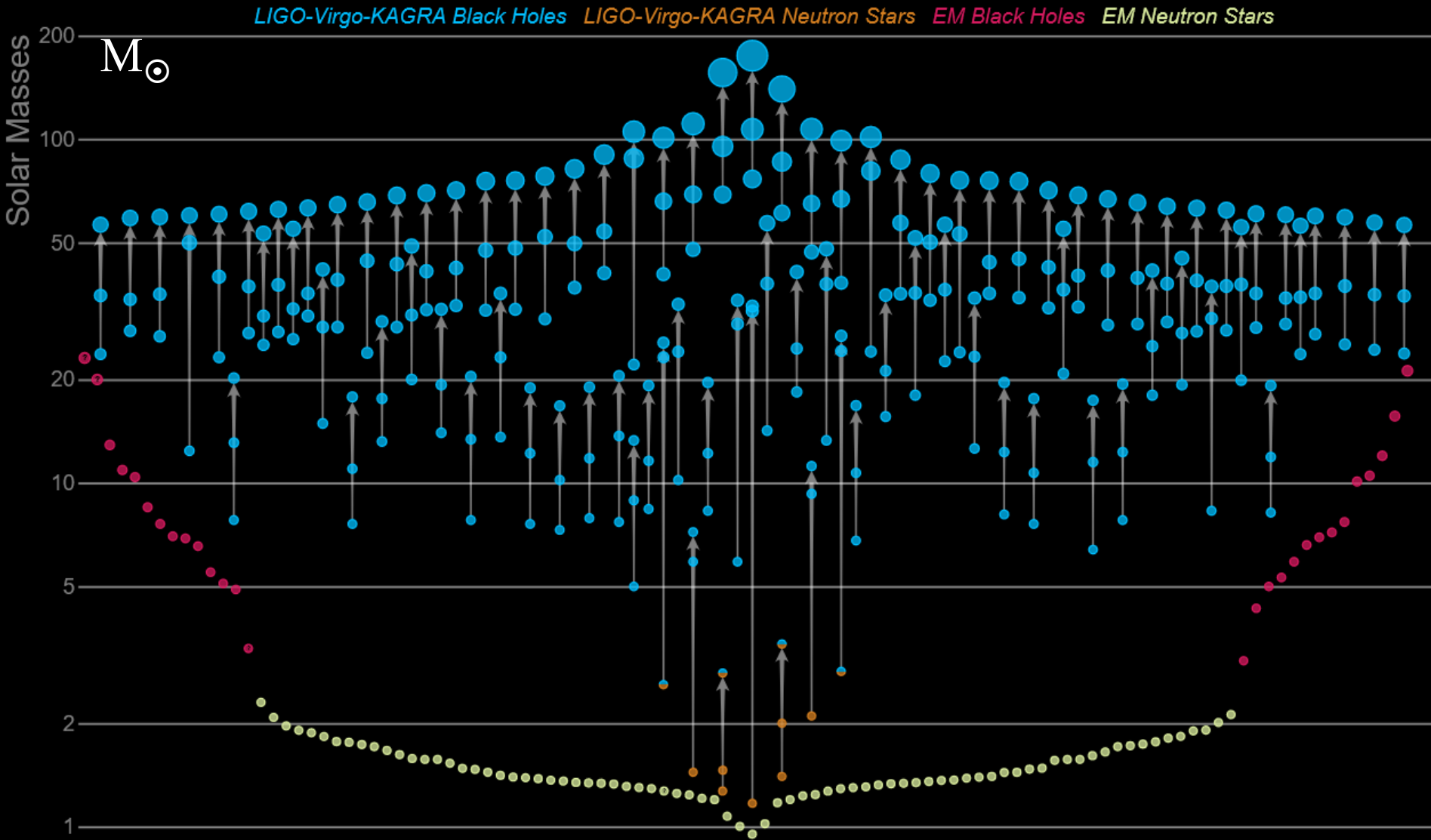
Distance de la galaxie NGC4993,  
40 Mpc (~130 million al,  
ou  $4 \times 10^{15}$  secondes)

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



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

# Masses du cimetière des étoiles



# La plus grande masse: GW190521

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

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

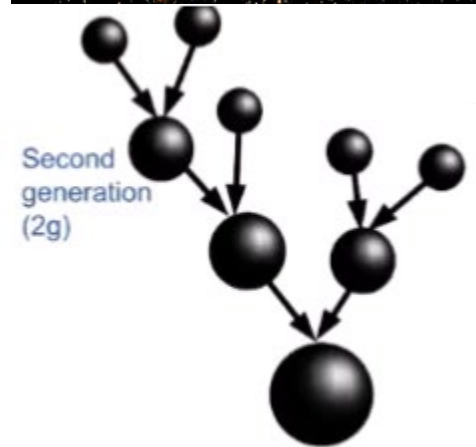
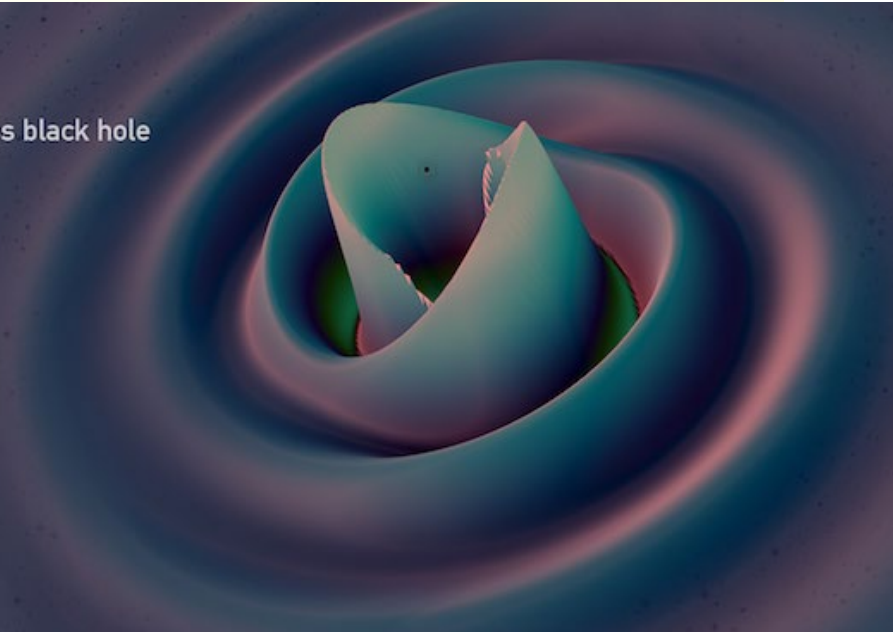
Entre 60 et 130  $M_{\odot}$

→ Trous noirs de **masse intermédiaire**

Amas globulaire



GW190521  
Detection of an intermediate-mass black hole



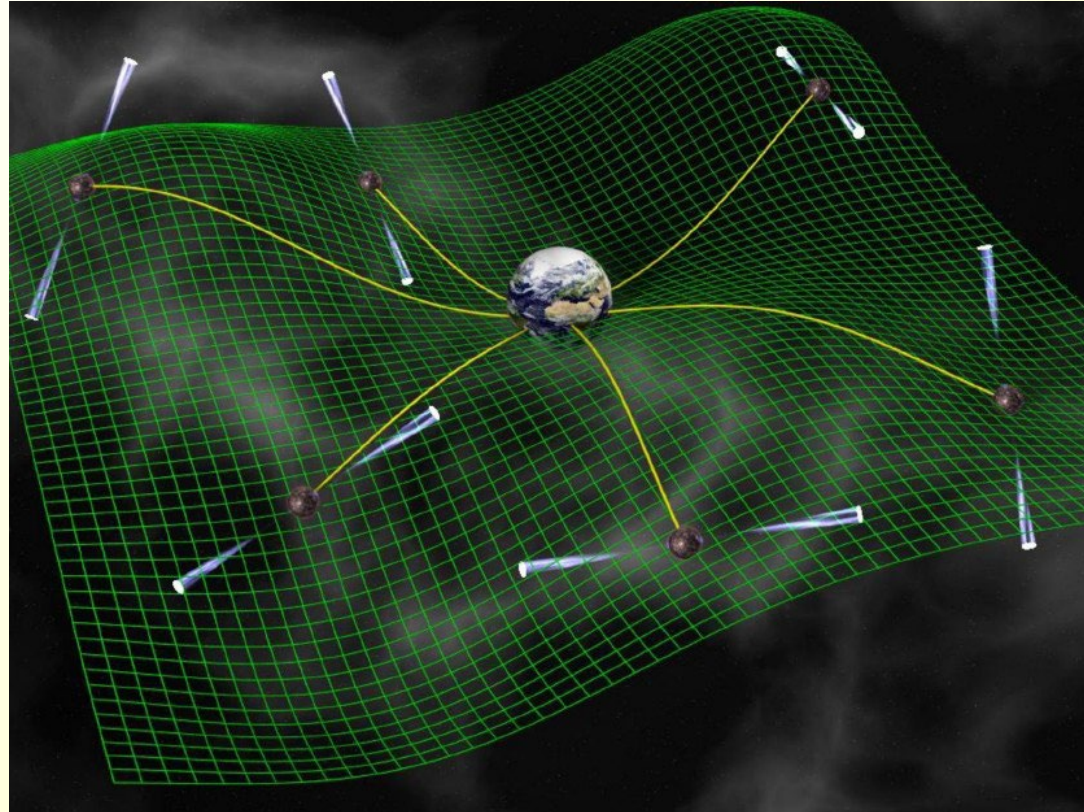


# 20000 Pulsars avec SKA

**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

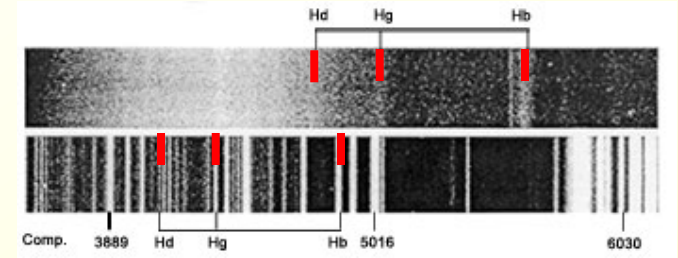
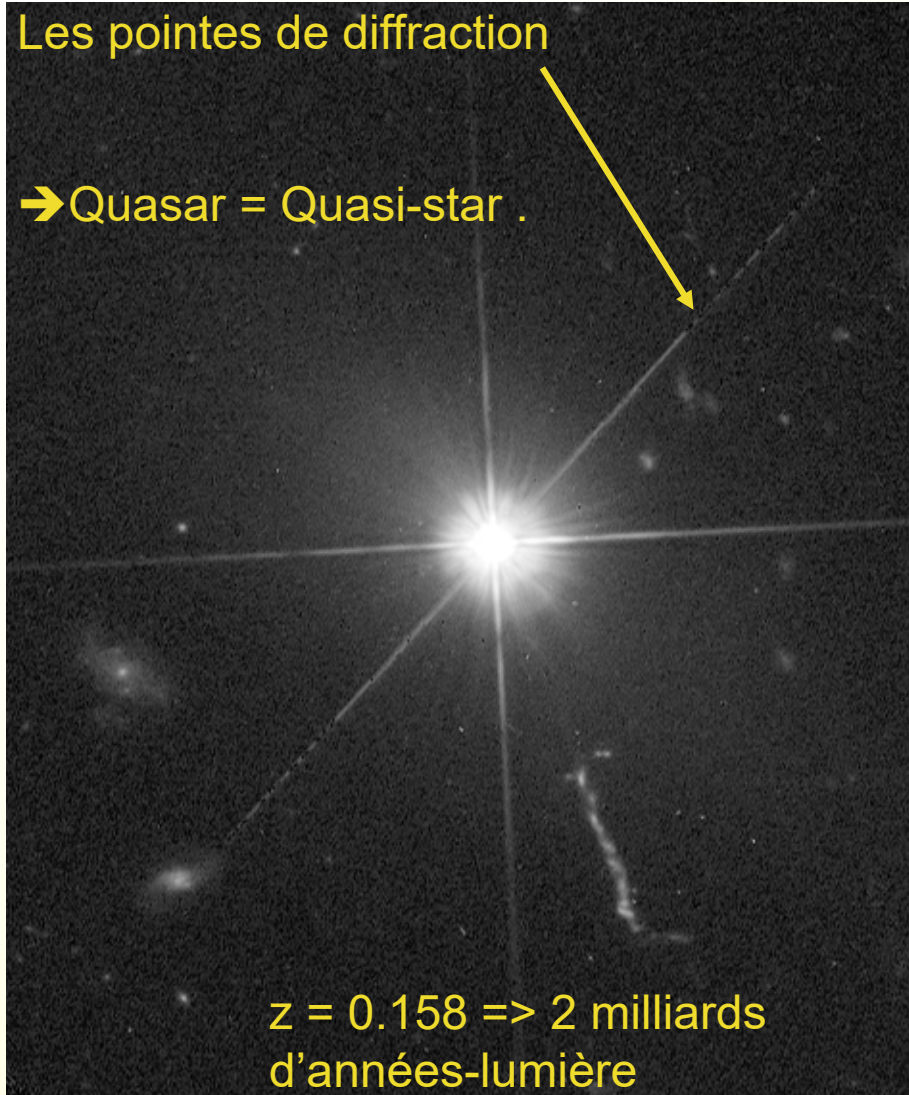
→ détection des ondes  
gravitationnelles

GW venant de la fusion de  
trous noirs super-massifs



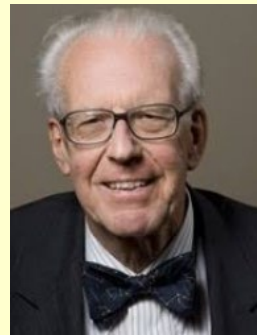
Ou bien fond stochastique dû à l'ensemble des fusions

# Découverte du premier quasar 3C273 en 1963



Radio sources (catalog 3C)  
Détectées dans les 1950'

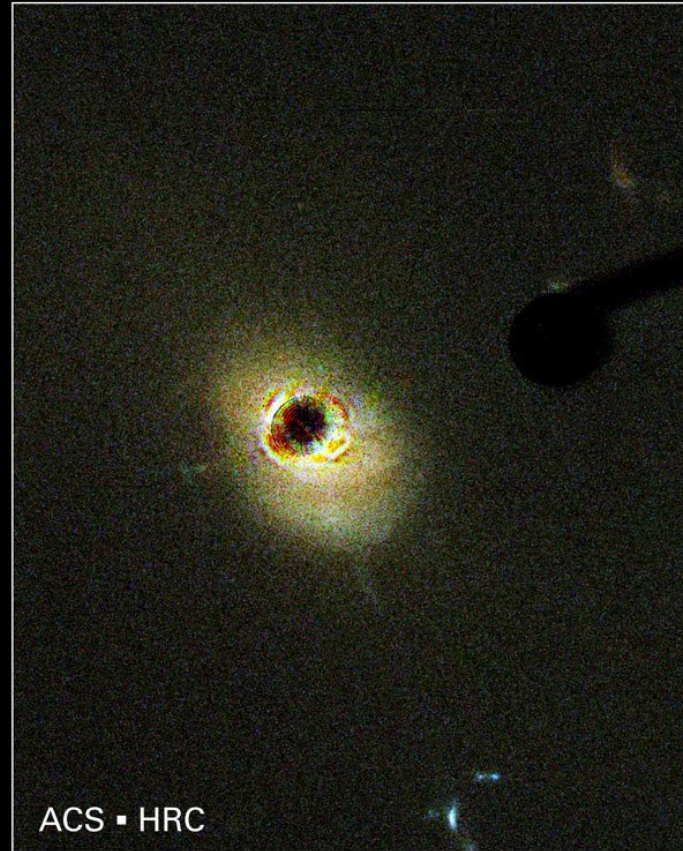
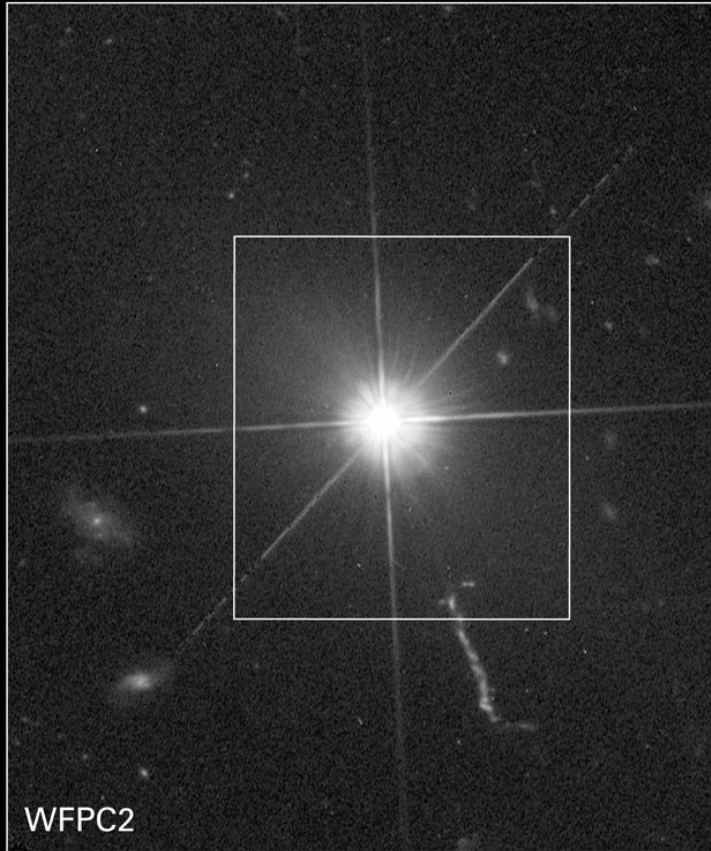
Correspondances optiques?  
Mystérieuses étoiles  
Quasi-star  
 $L=10^3 L(\text{galaxie})$



Maarten Schmidt



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



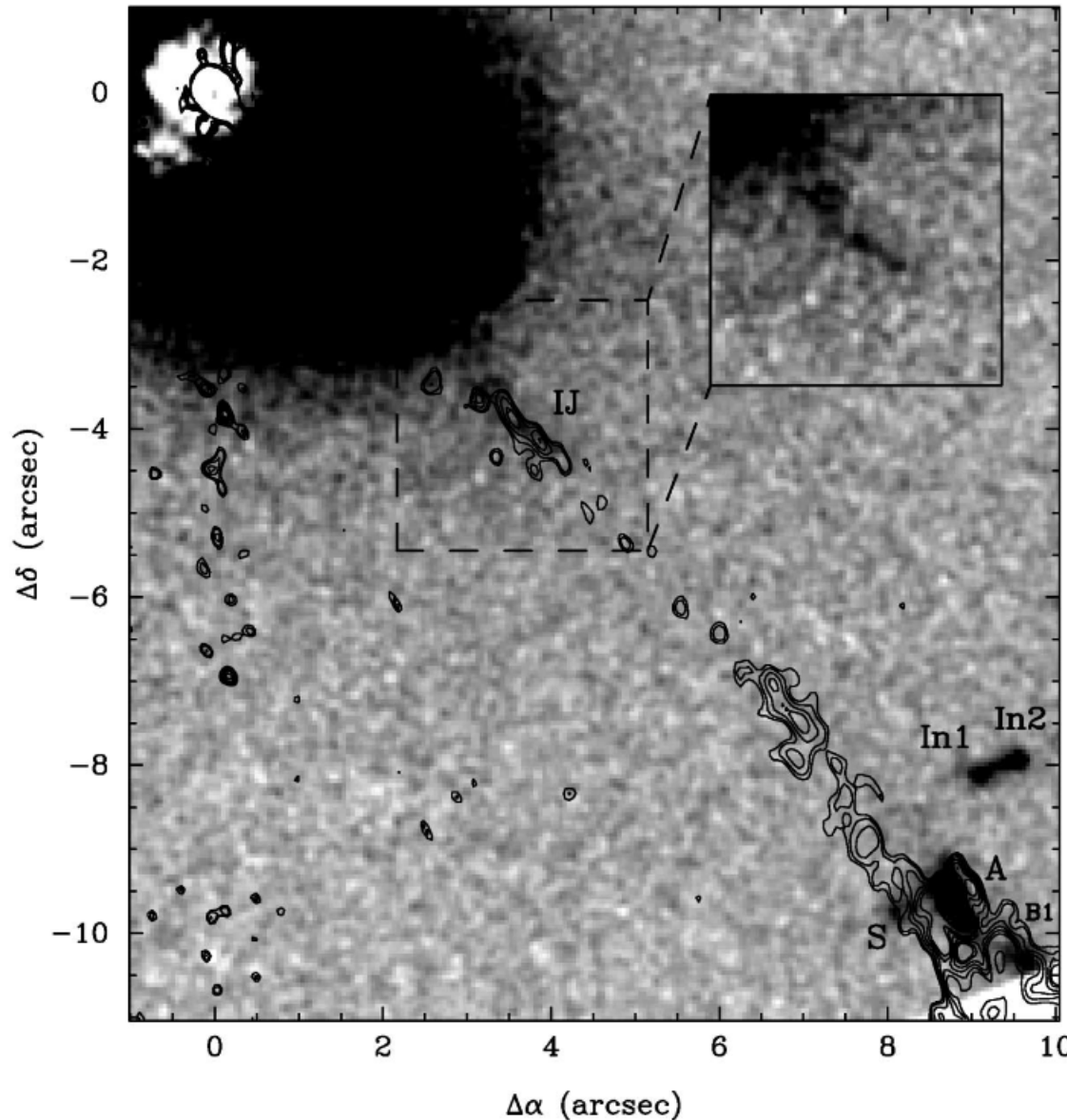
**Quasar 3C 273**  
**Hubble Space Telescope ▪ ACS HRC Coronagraph**

NASA, A. Martel (JHU), the ACS Science Team, J. Bahcall (IAS) and ESA ▪ STScI-PRC03-03

**Martel et al 2003**

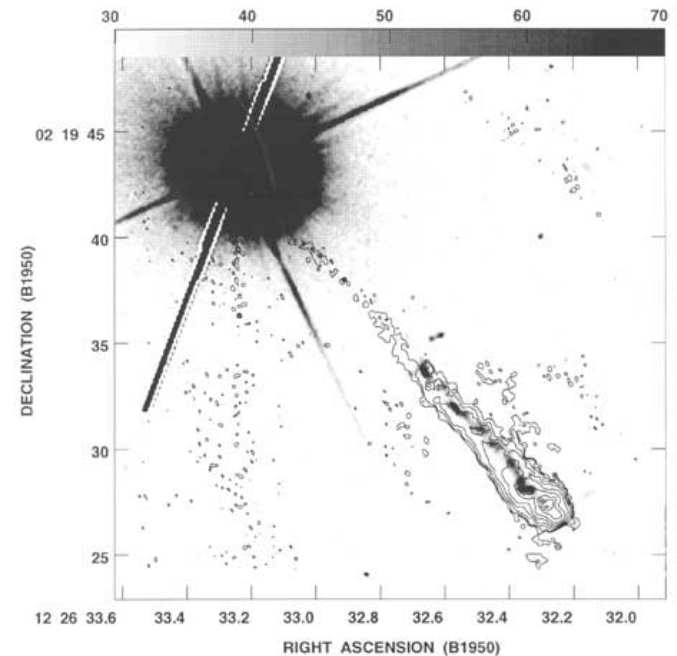


# Superposition image Radio

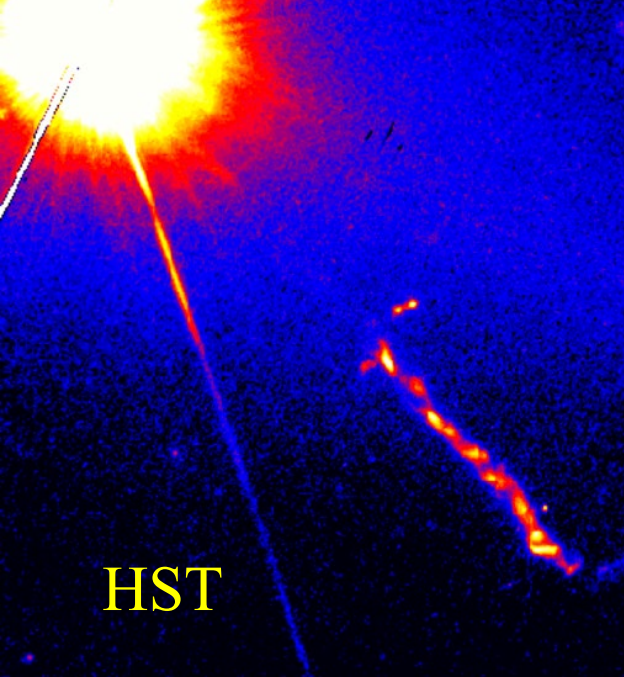


Jet radio: contours  
// jet optique (HST)

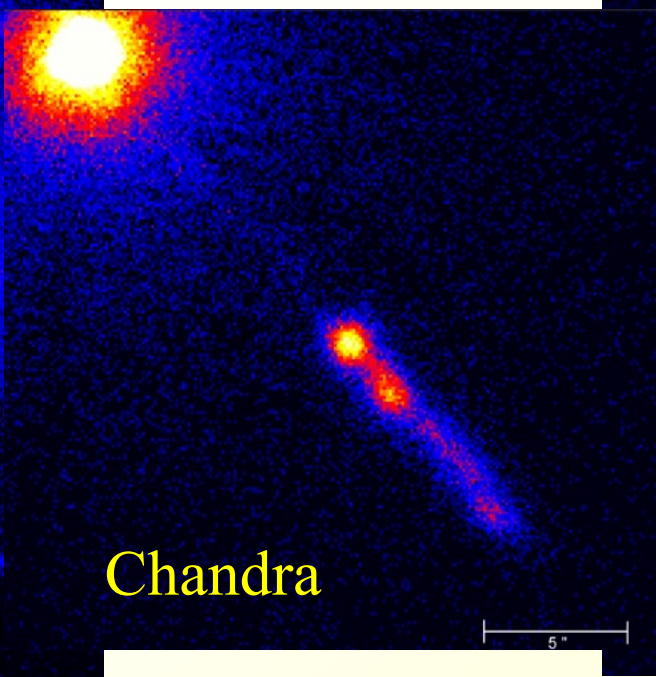
67kpc de long



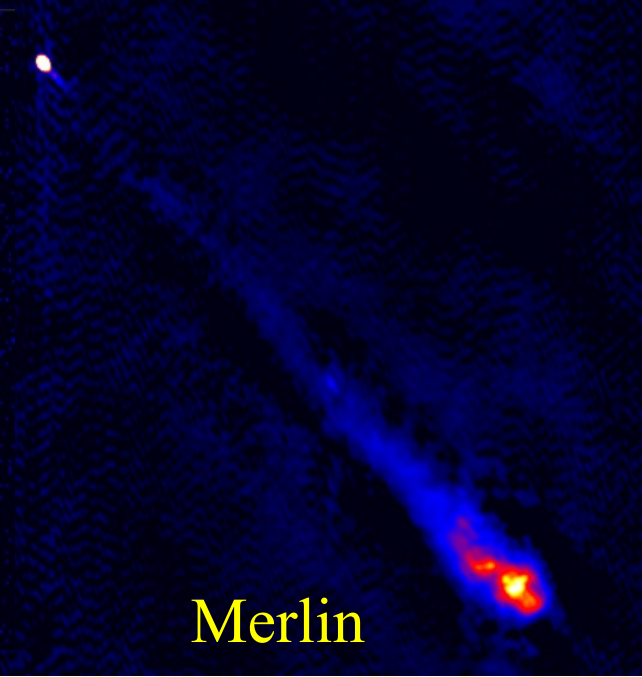
HST+Merlin



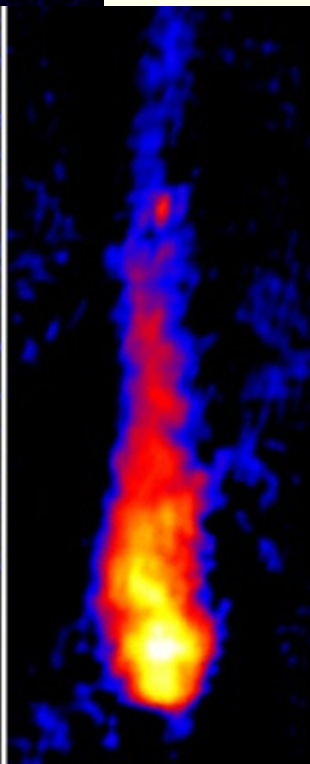
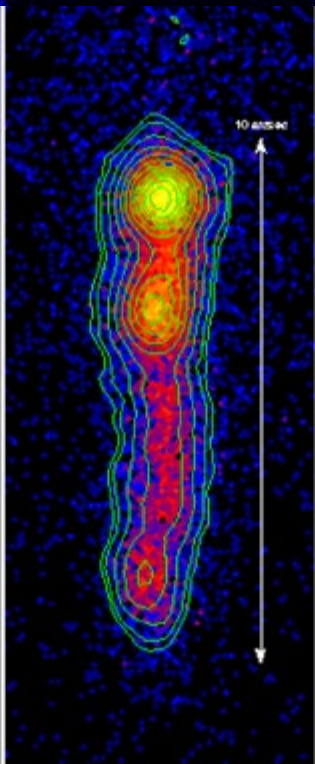
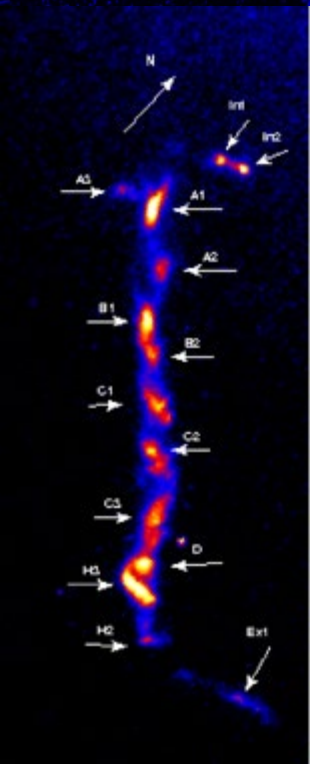
HST



Chandra



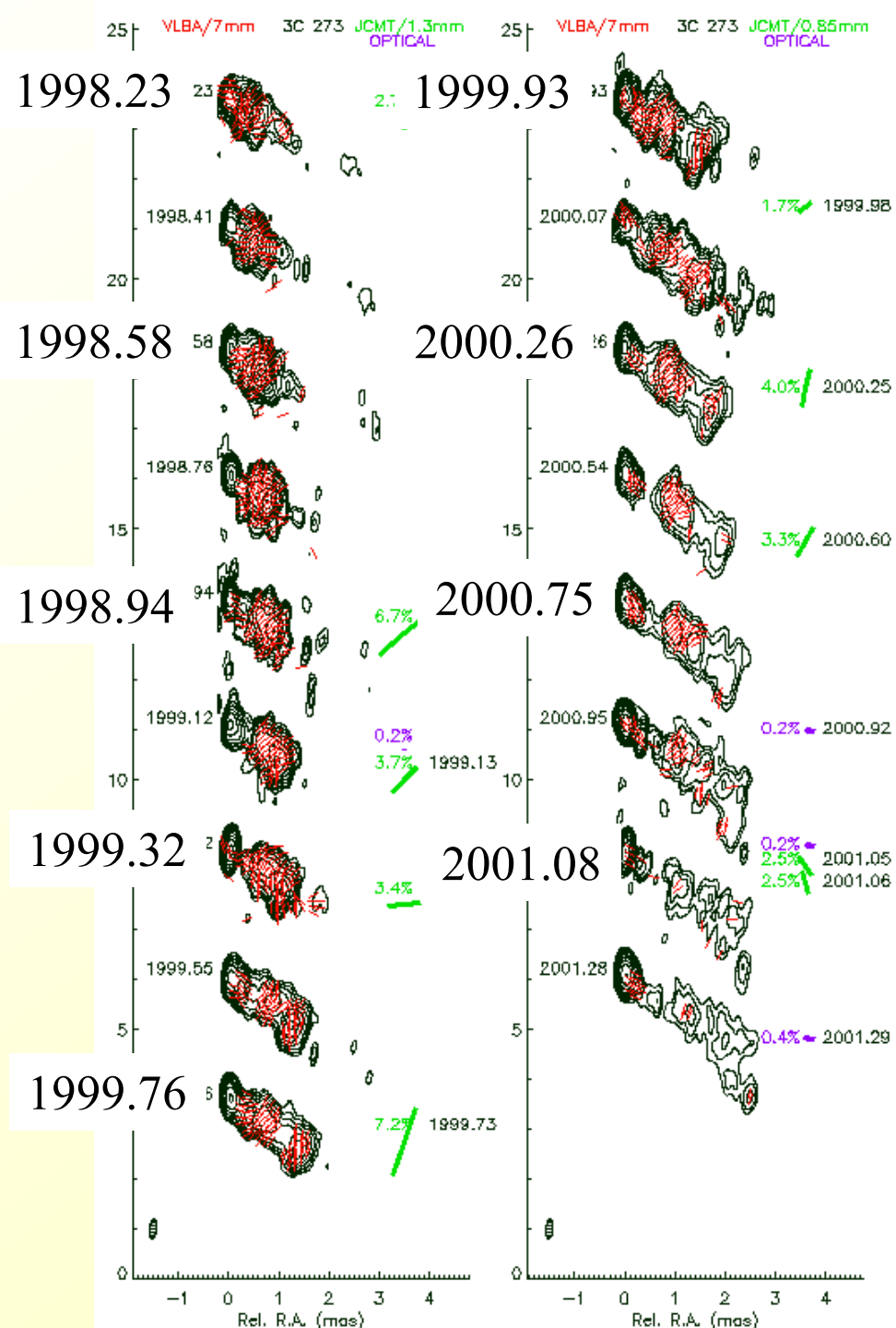
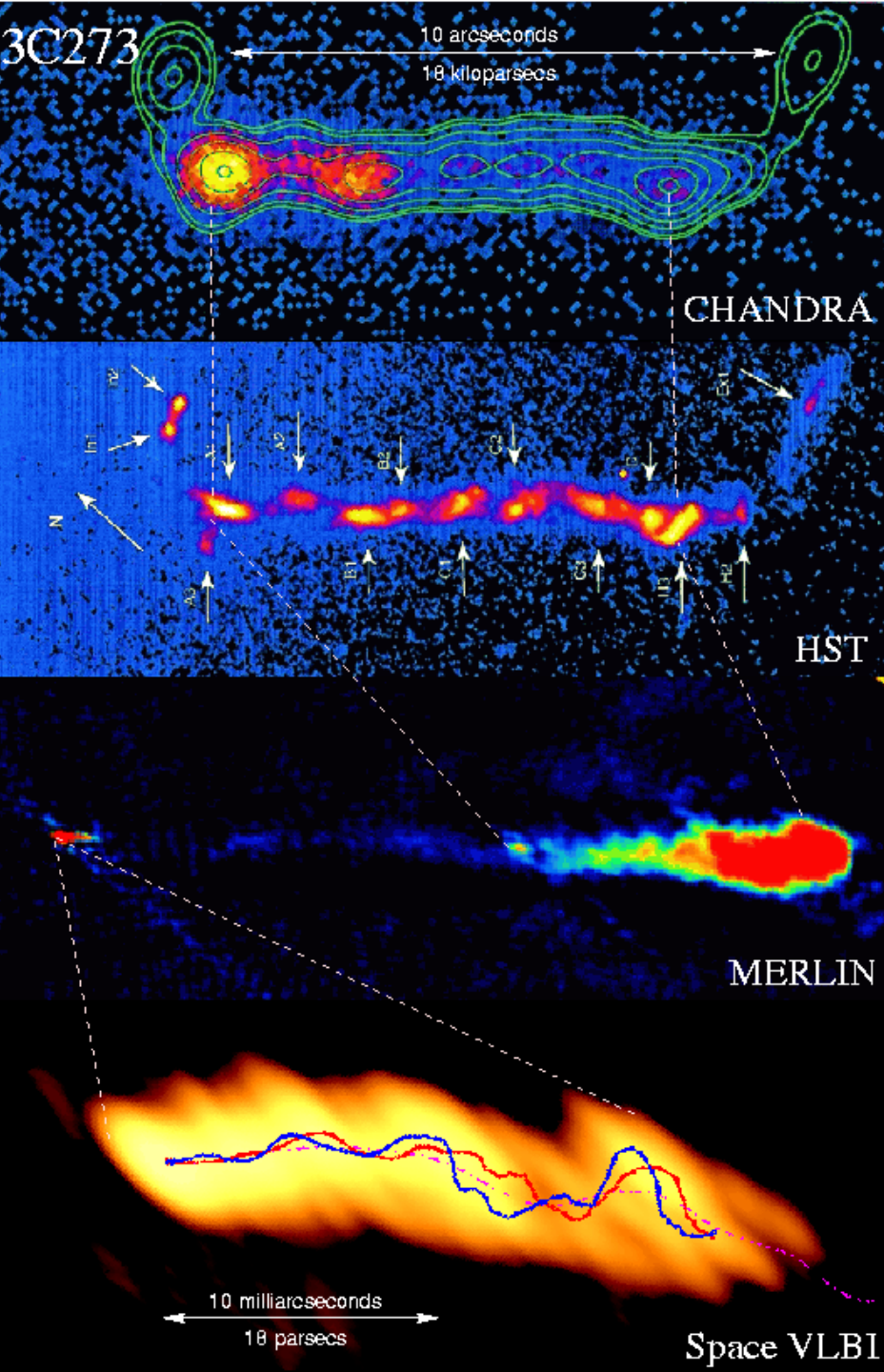
Merlin



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)



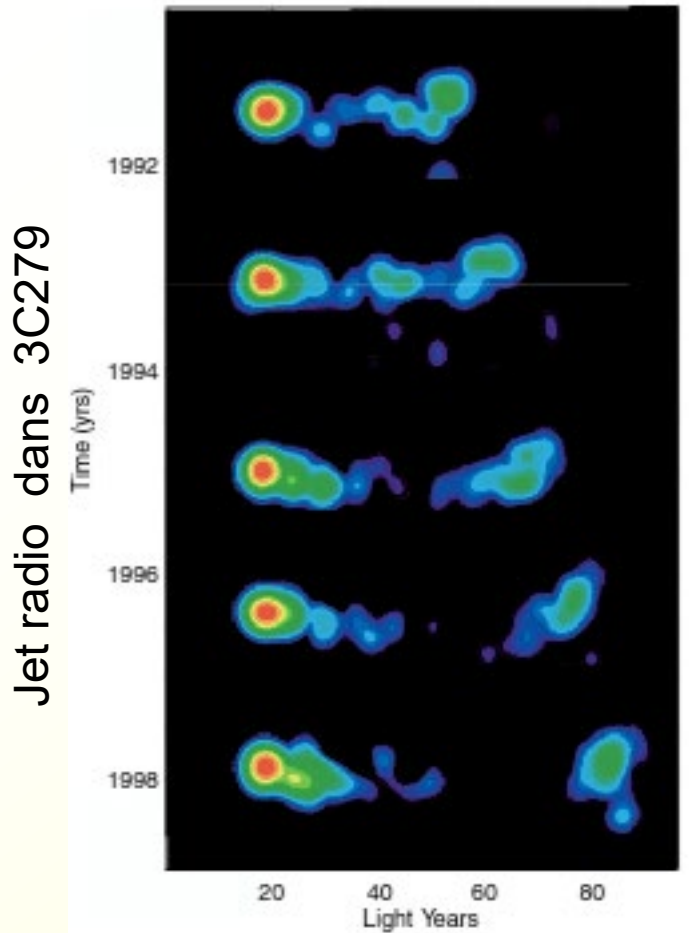




# Les jets sont super-luminiques

B a la vitesse  $v$ , par rapport A

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



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

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

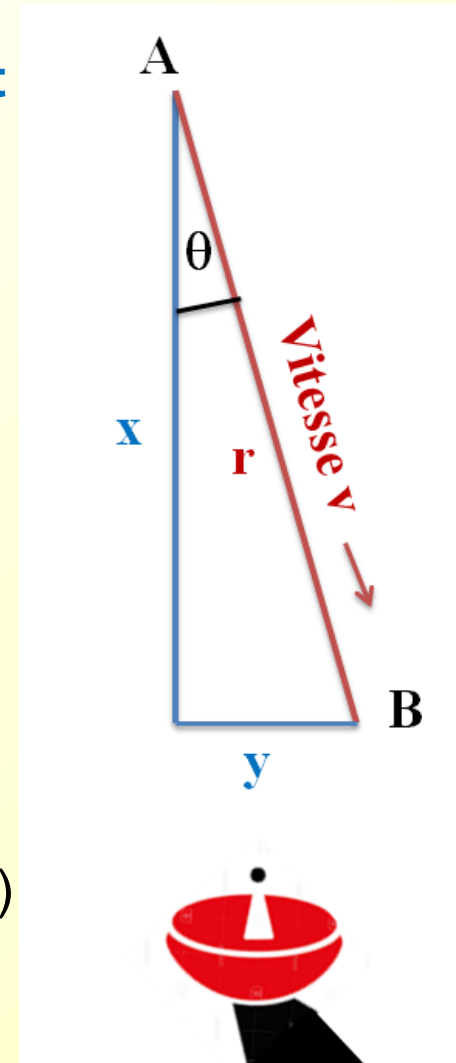
$$t_{\text{app}} = (r/v) - (r/c) \cos \theta$$

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

Vitesse apparente sur le ciel

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

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



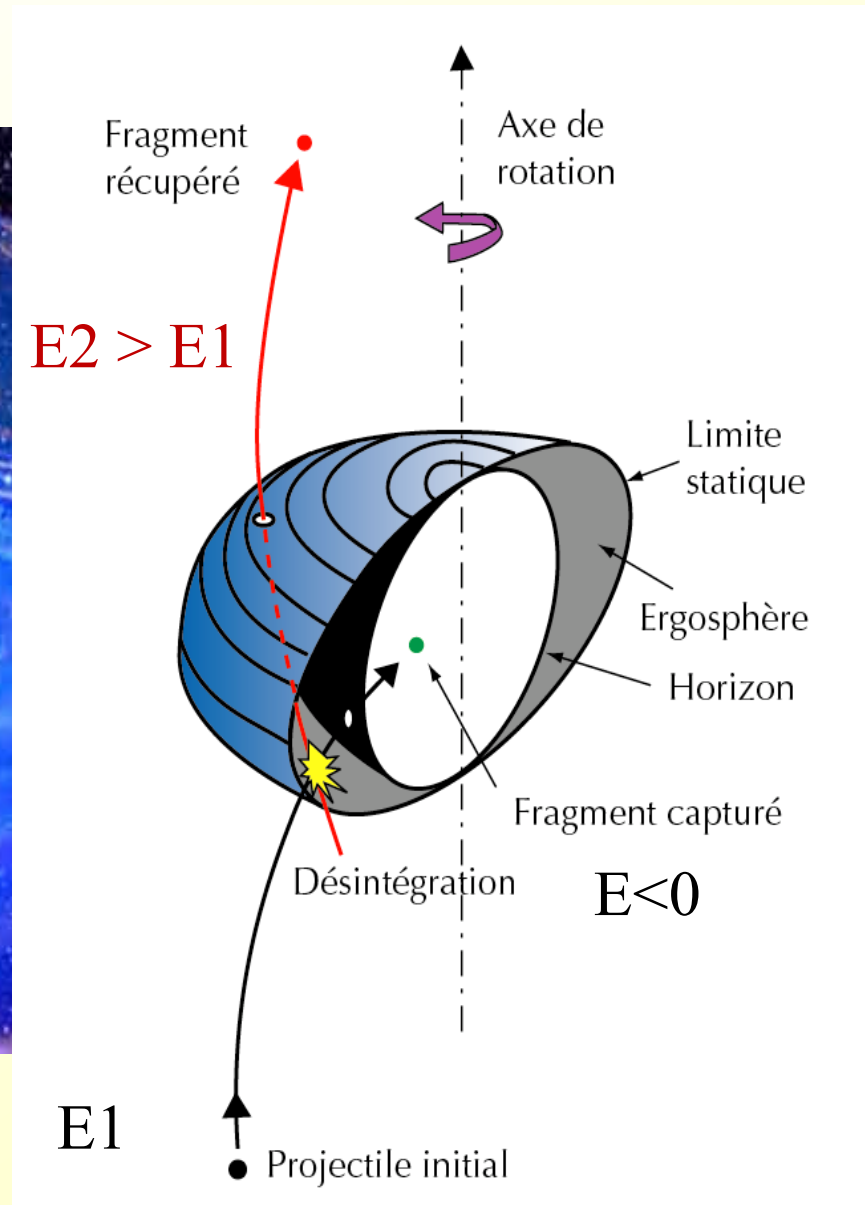
Pour  $v \ll c$ ,  $\beta = v/c \sim 0 \rightarrow v_{\text{app}} = v \sin \theta$

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

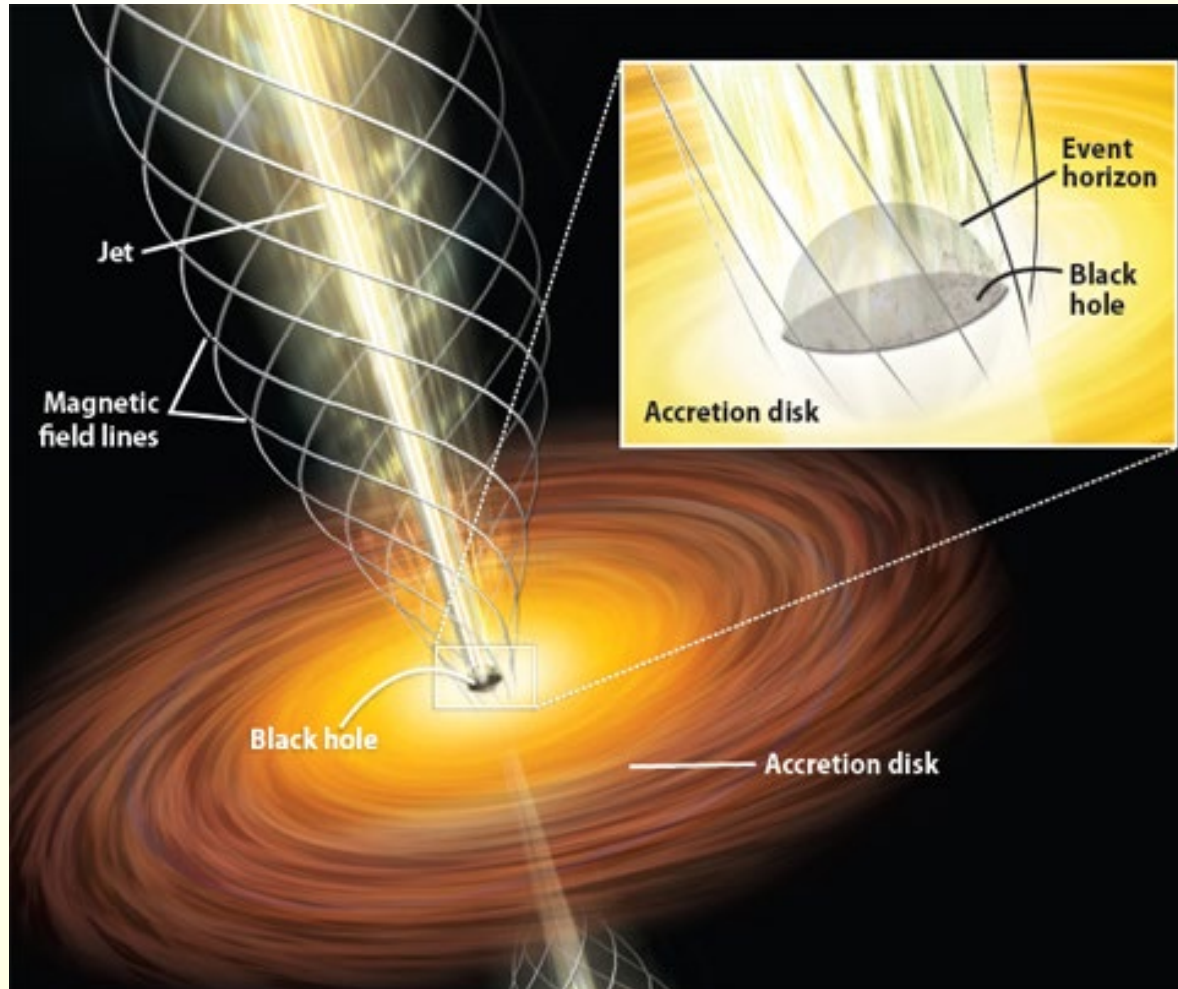
# Trou Noir en rotation: origine des Jets Radio?



Processus de Penrose



# Les jets sont confinés par des champs magnétiques





# Ejection de plasma: lobes radio

Cygnus A

Image radio, VLA

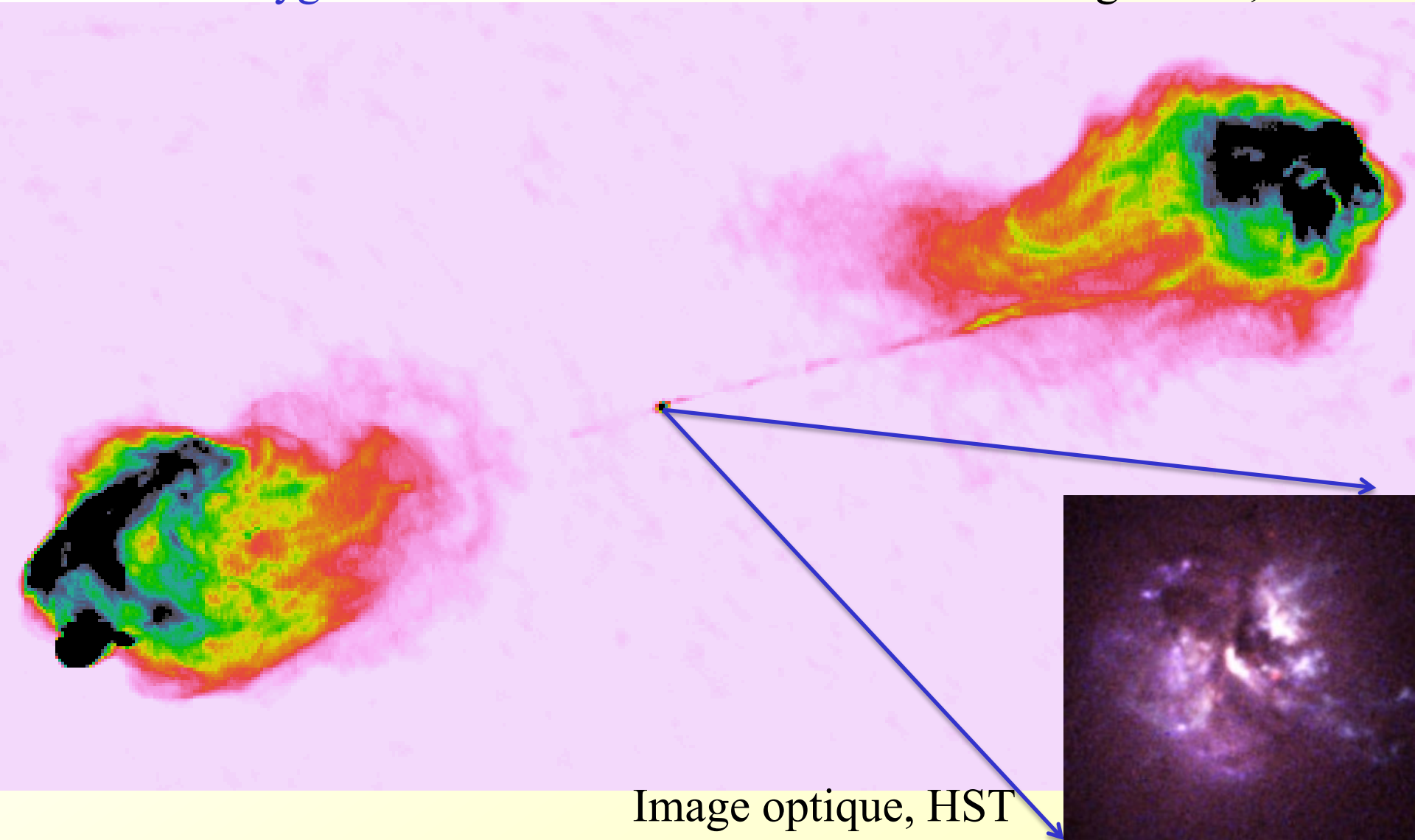


Image optique, HST

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

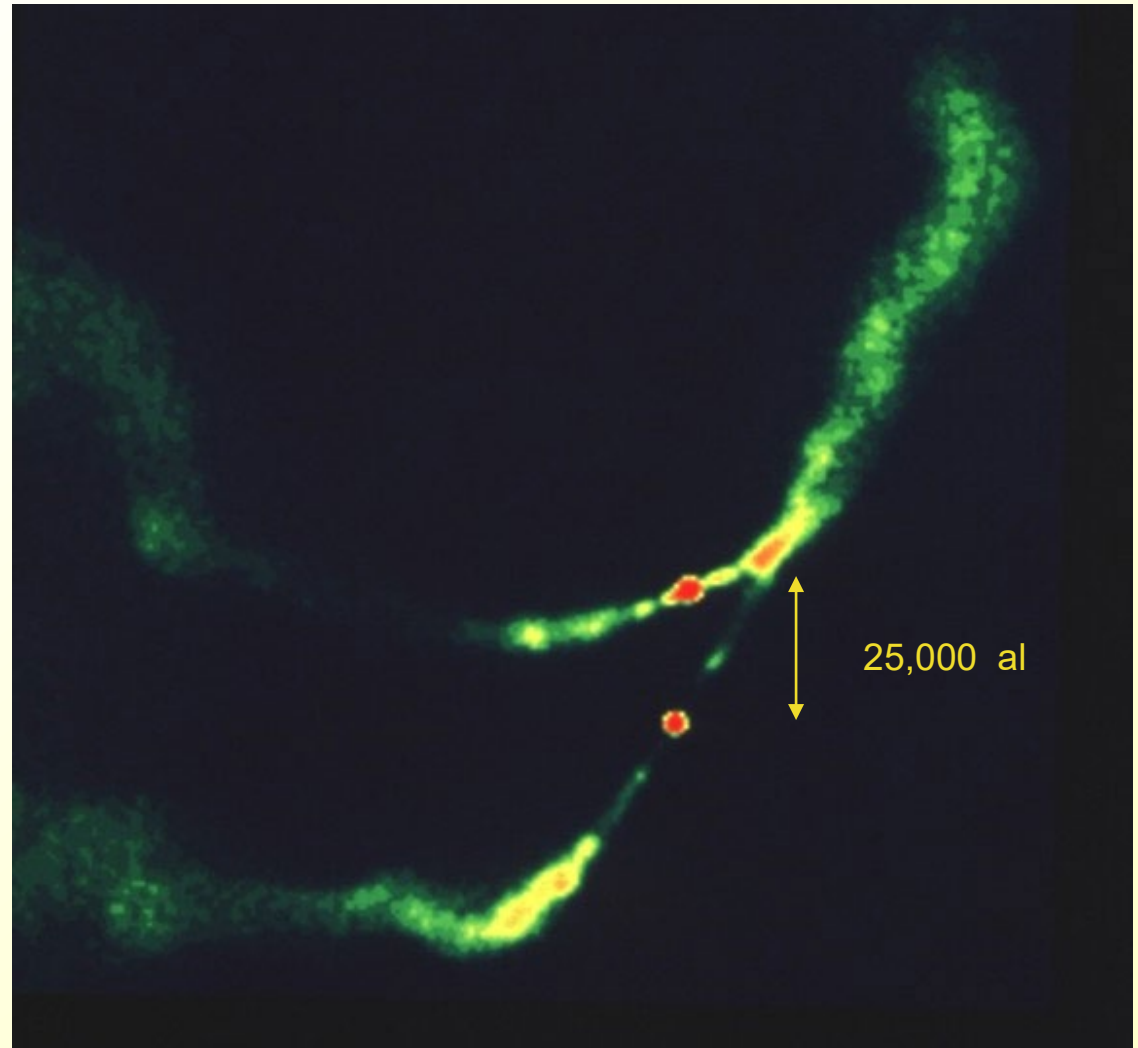
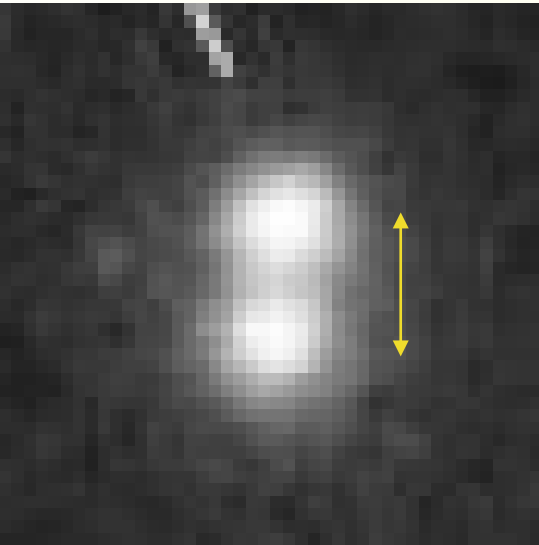


Brassage violent du gaz → alimentation du trou noir

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

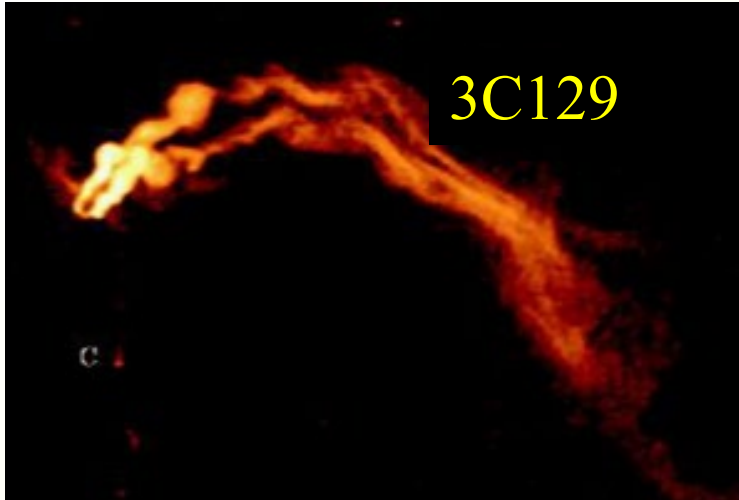
Image radio, VLA

Image optique HST

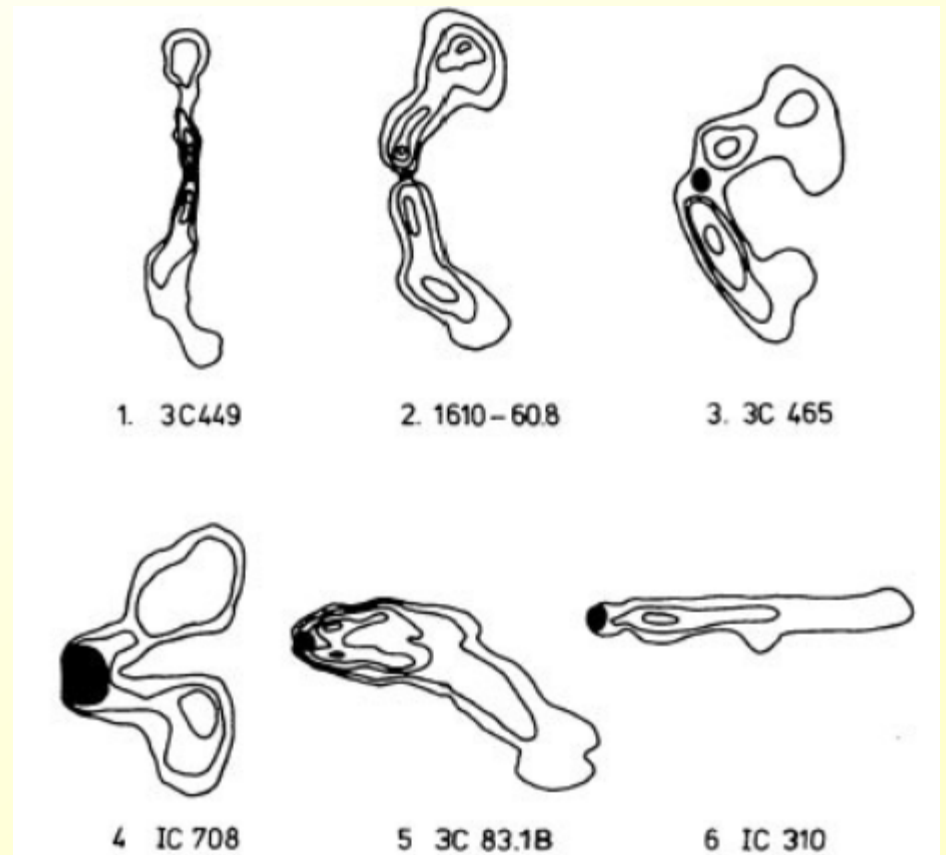
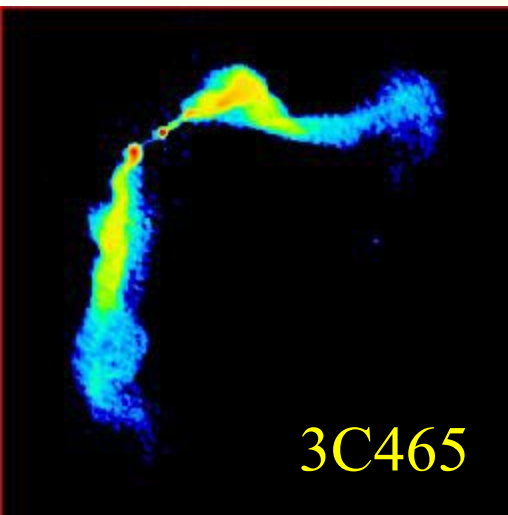




# Lobes radio, galaxies en mouvement



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



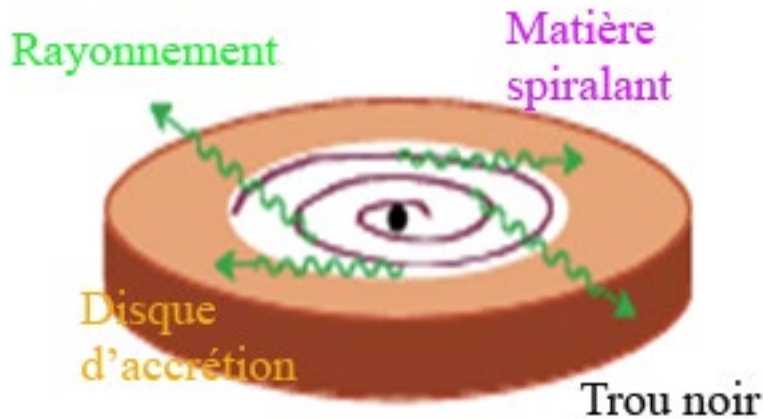
# Efficacité de la production d'énergie

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  $mc^2$**

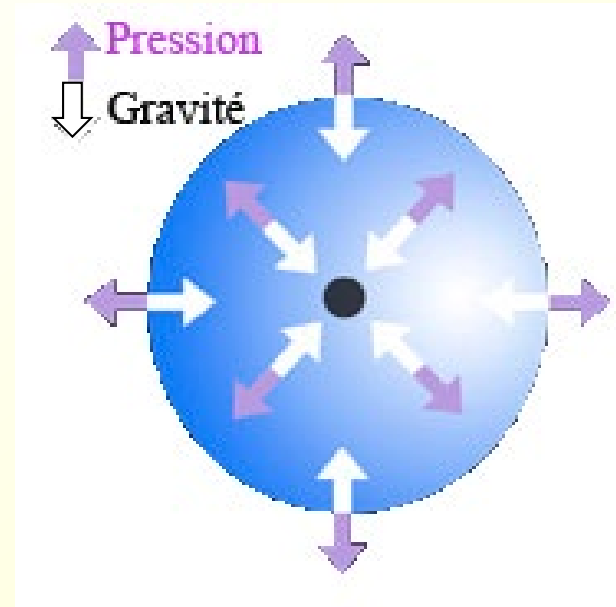
Les réactions nucléaires dans les étoiles < 1%

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

# Limite d'Eddington

La pression de radiation  
compense la gravité

→ Le gaz ne peut plus tomber



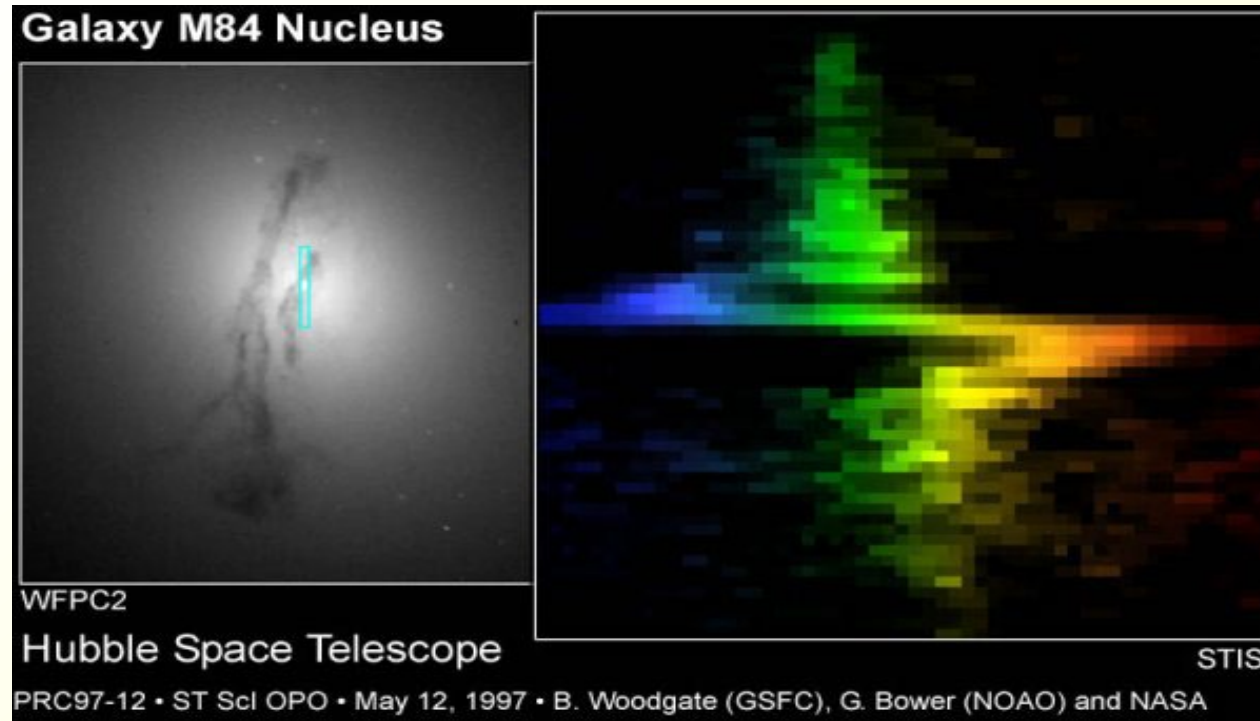
$$L_E = 3.3 \times 10^{12} L_{\odot} (M/10^8 M_{\odot})$$

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

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

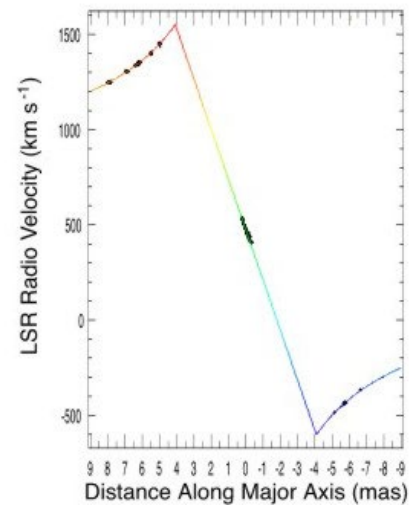
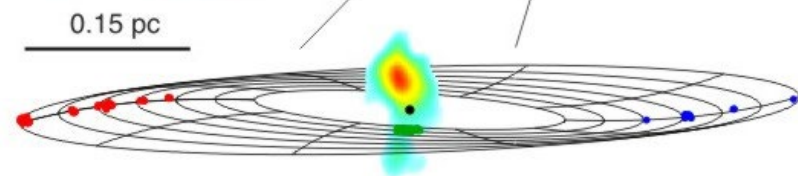
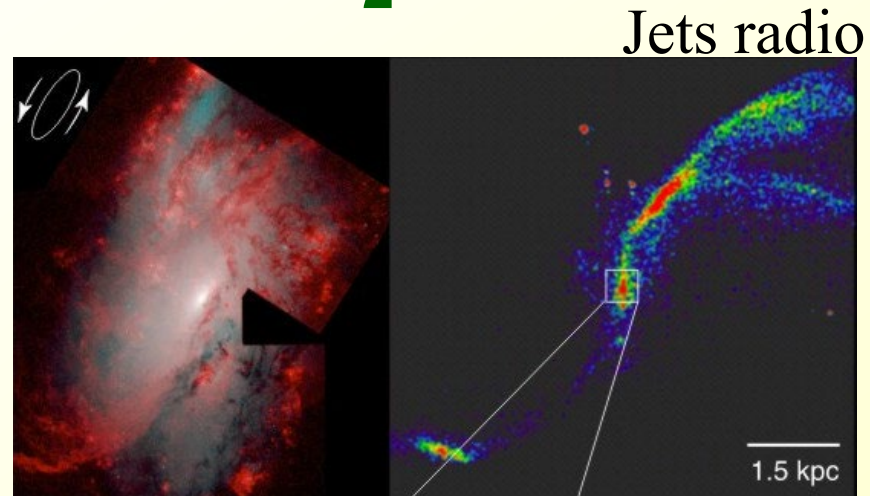
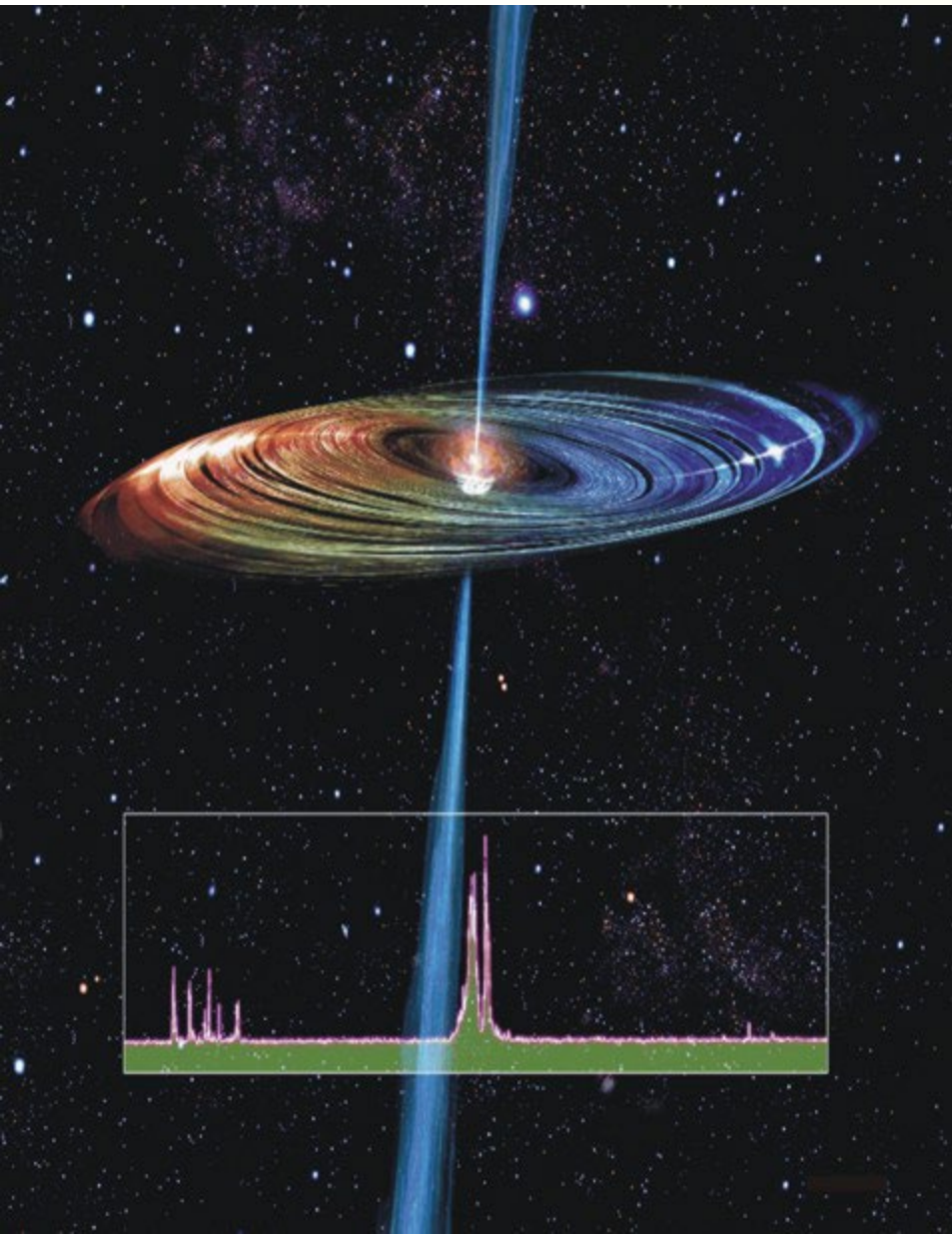


# Mesure de la masse du trou noir



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

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



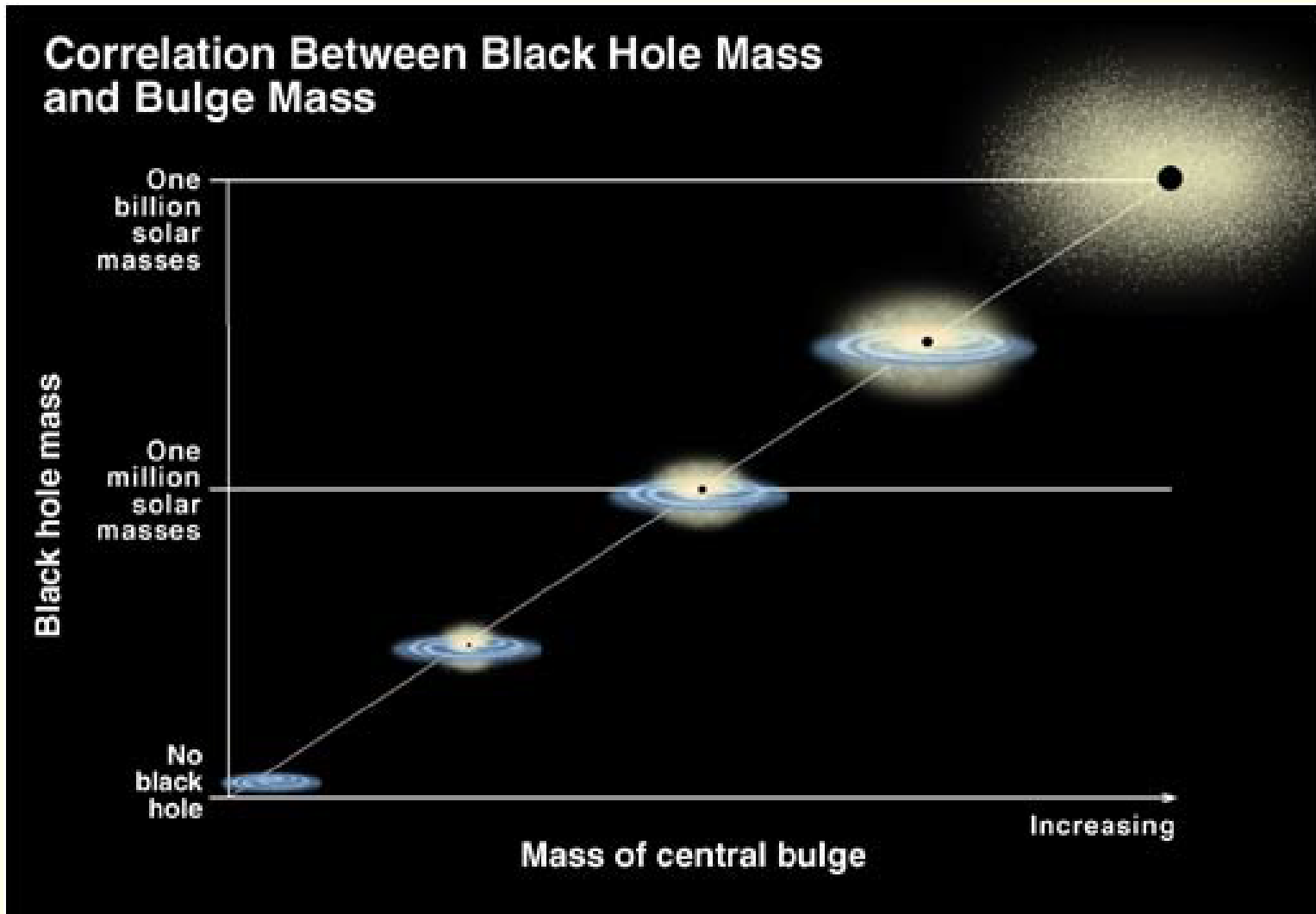
$M=4 \times 10^7 M_{\odot}$

$D=7.2 \text{ Mpc}$

# Co-habitation trou noir - Galaxie

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

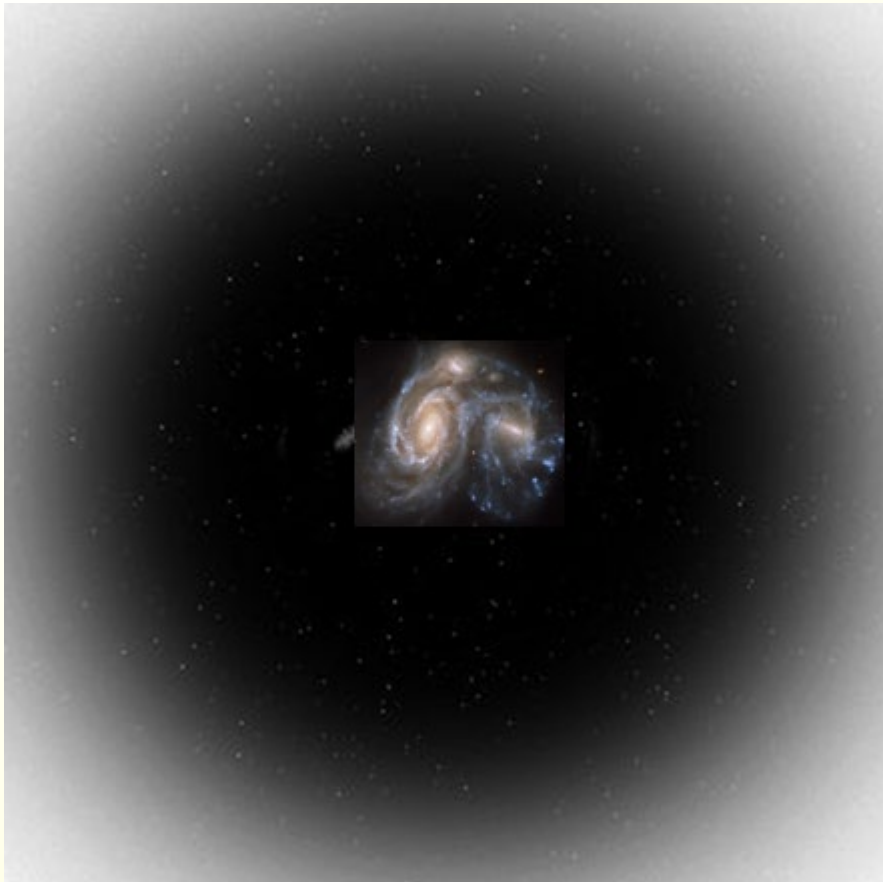
Qu'en est-il au début de l'Univers?



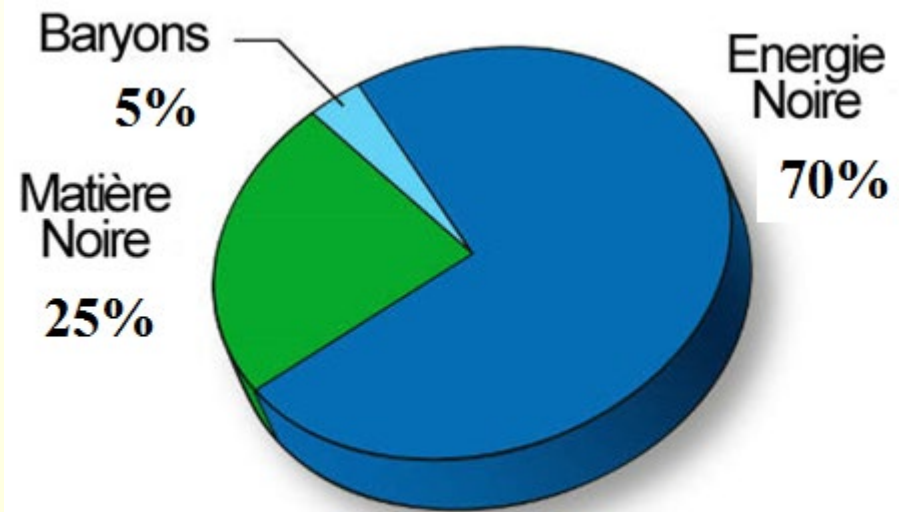


# Matière noire et atomes des galaxies

Rapport observé dans les galaxies  
 $\text{Atomes/MN} < 0.04$



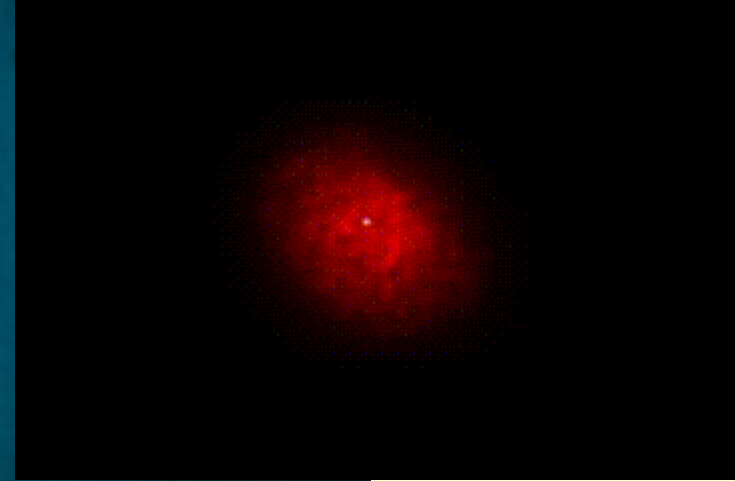
Rapport dans l'Univers  
 $\text{Atomes/MN} = 0.2$



→ Les atomes sont éjectés  
des galaxies

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

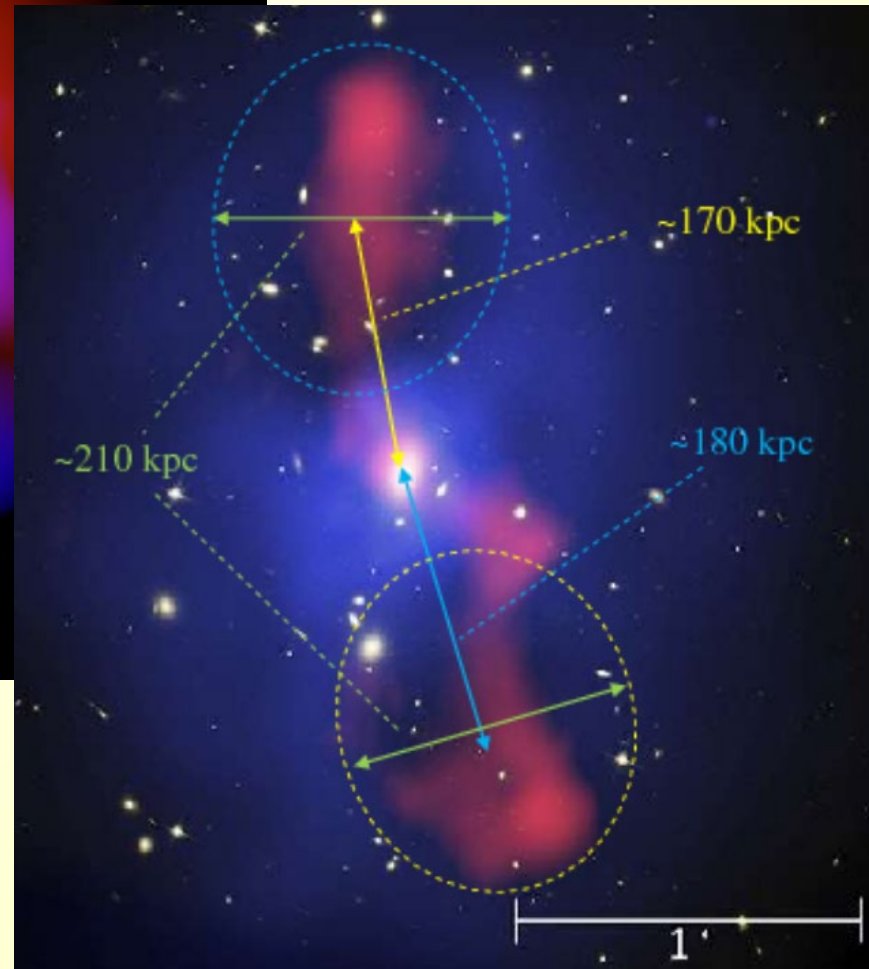
Amas de Persée



# Action des trous noirs

## Amas de Galaxies

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





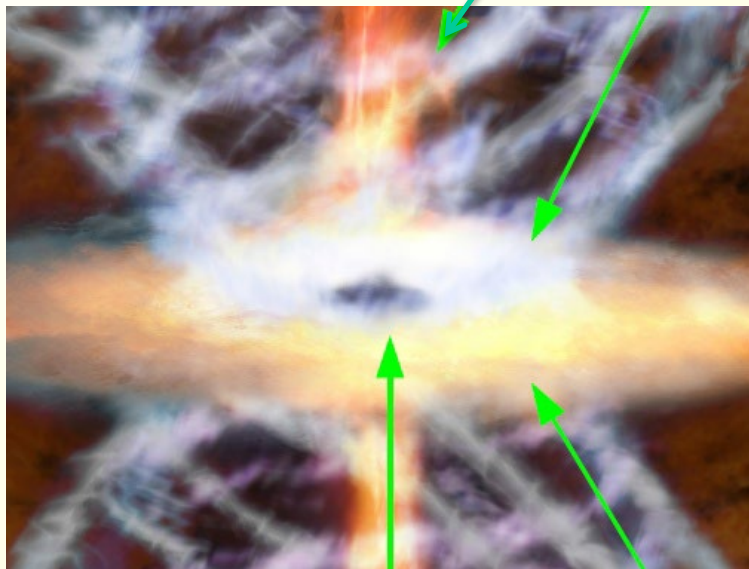
# UFO: « Ultra-Fast Outflow »

Raies Fe XXV/XXVI en absorption

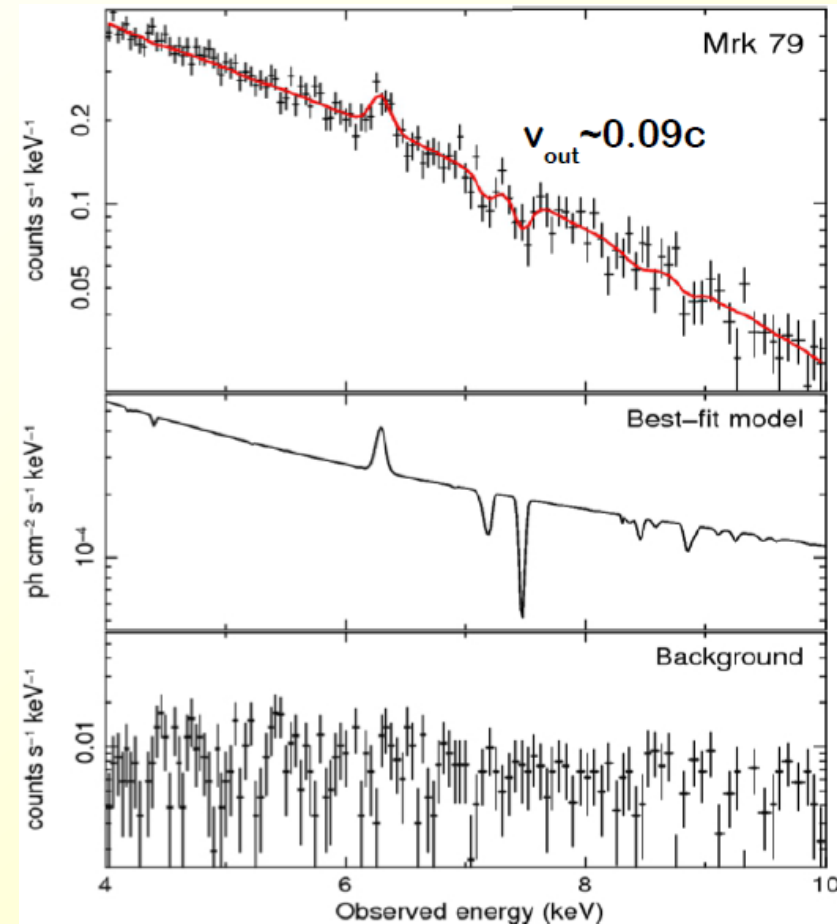
Gaz très ionisé, et relativiste

Flots de gaz en rayons X

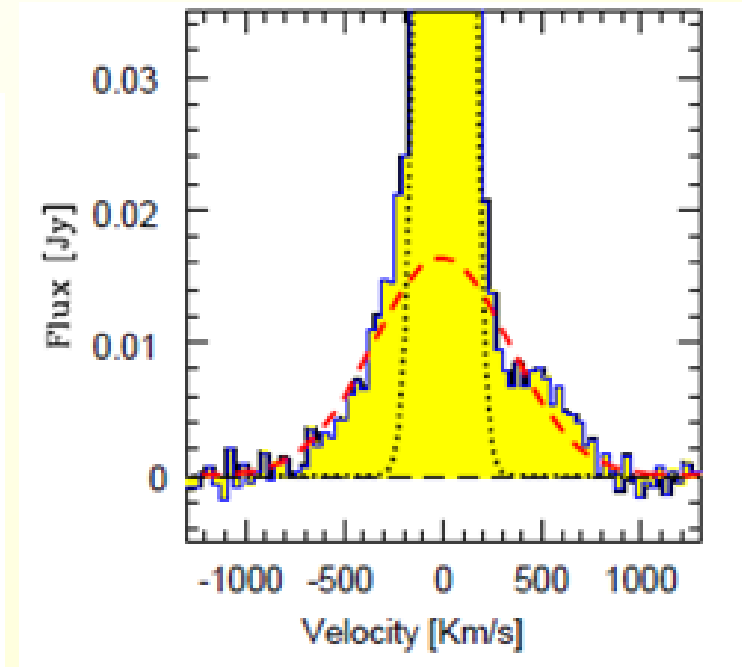
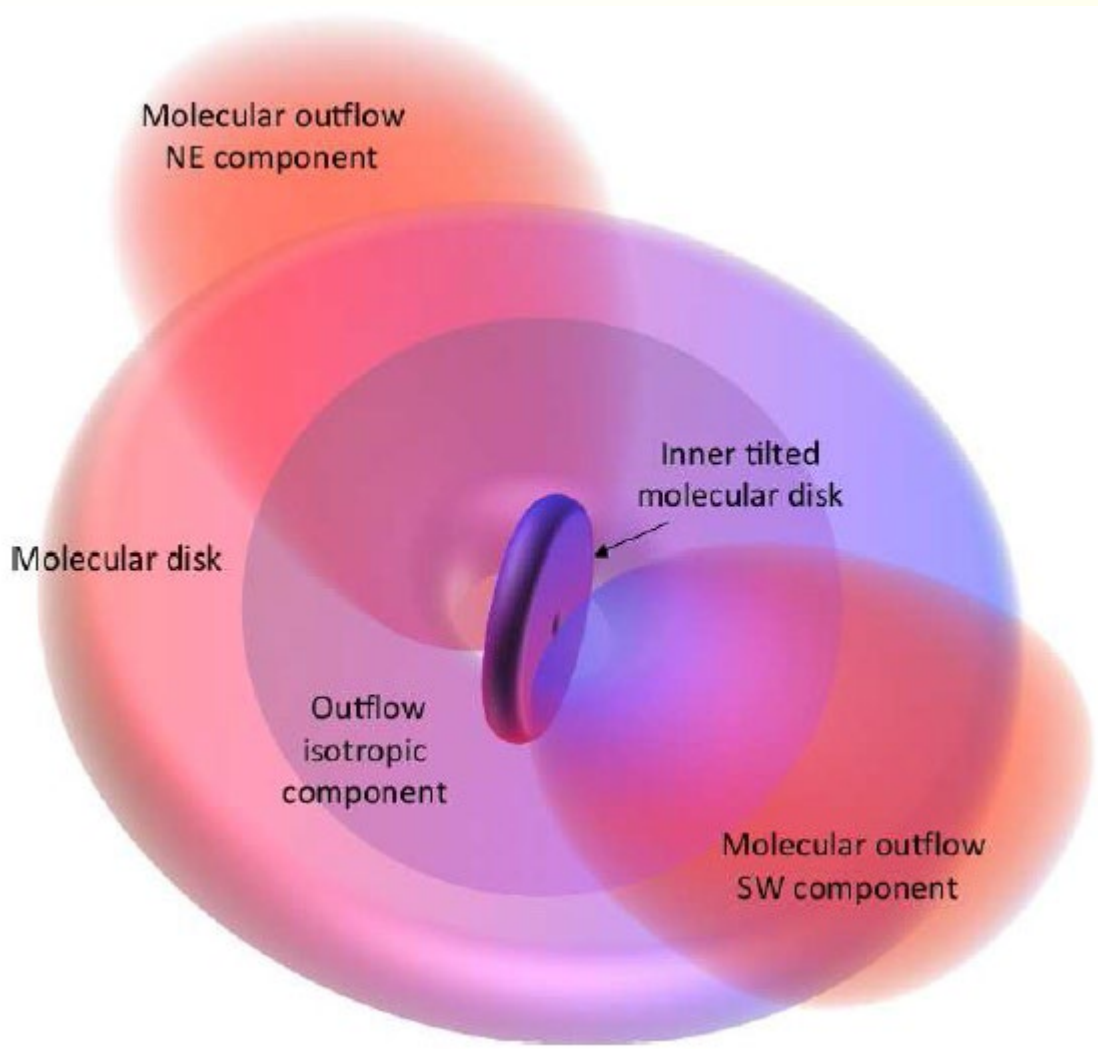
$V > 10\,000\text{ km/s}$



Trou noir Disque d'accrétion



# UFO+ flot moléculaire Mrk231



## Mrk 231

AGN et aussi starburst

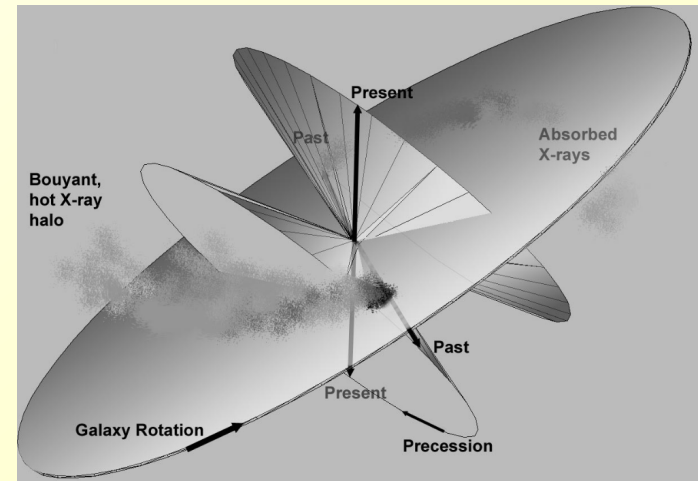
Gaz éjecté  $10^7$ - $10^8 M_{\odot}$

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

# Jet dans le plan du disque

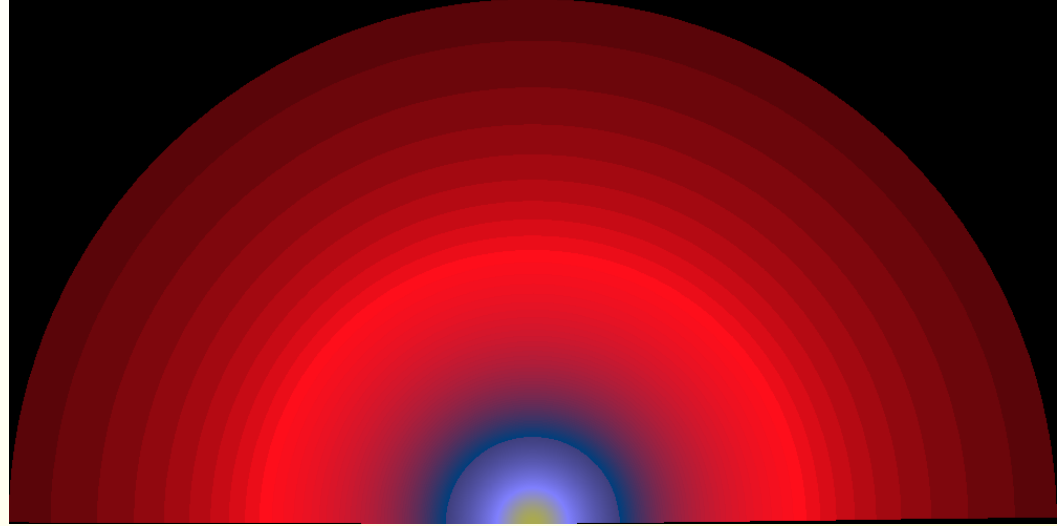


NGC 4258





# 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

