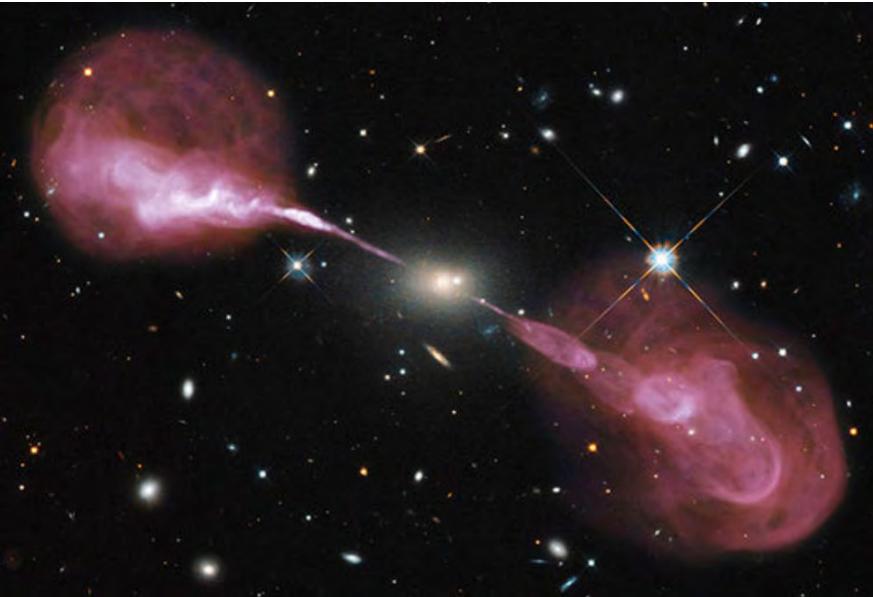




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Noyaux actifs et quasars primordiaux



Françoise Combes



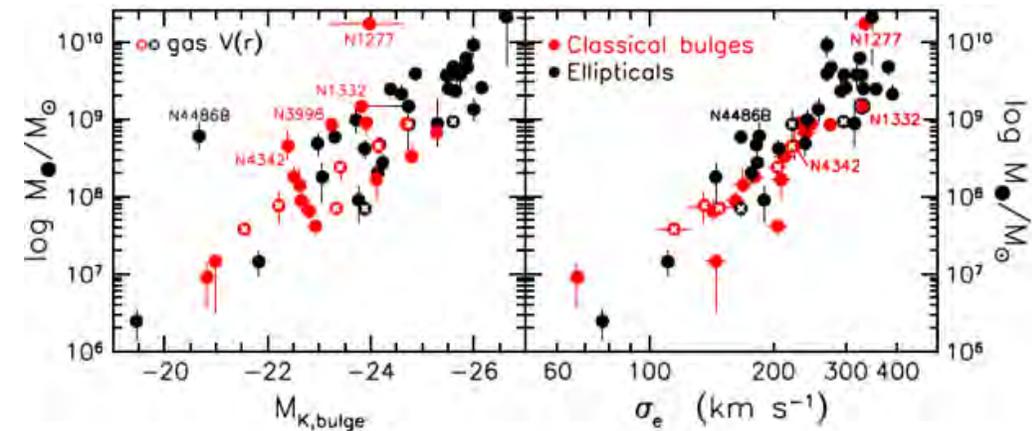
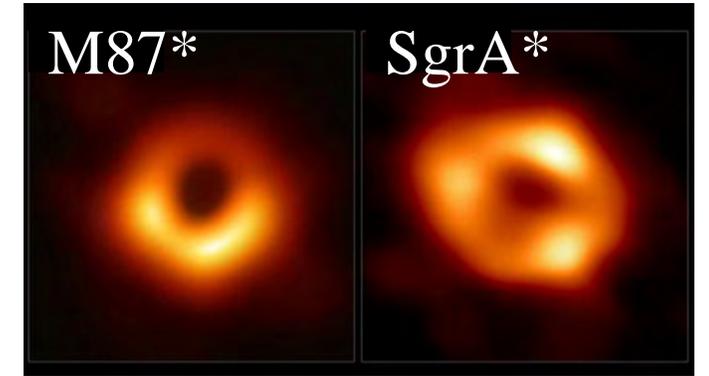
Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Les grandes lignes

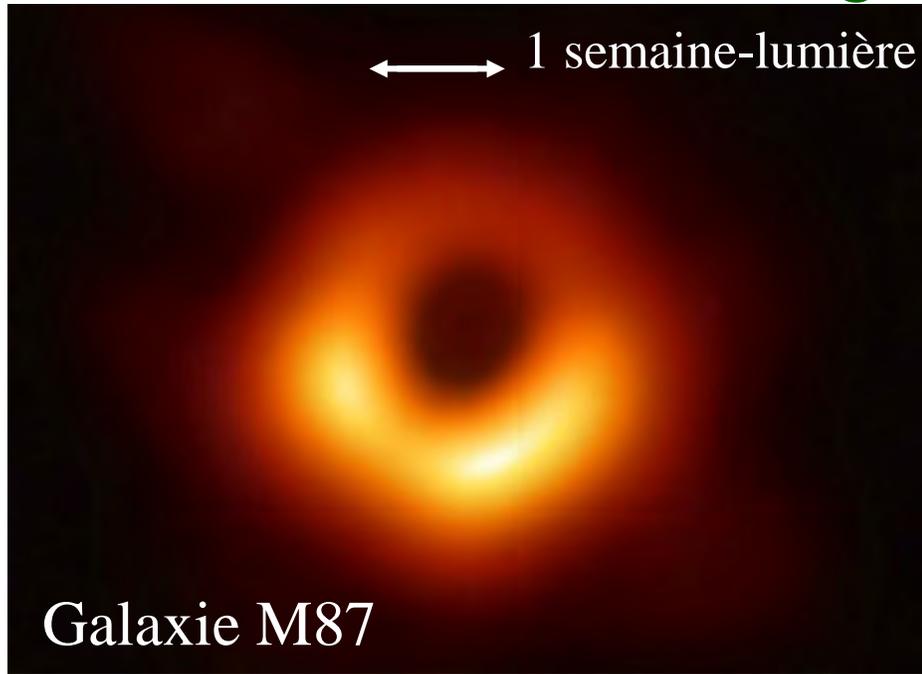
→ Propriétés et démographie des trous noirs super-massifs
Spin des trous noirs et efficacité de l'accrétion

→ Croissance des trous noirs en symbiose avec la croissance des galaxies, formation d'étoiles et feedback

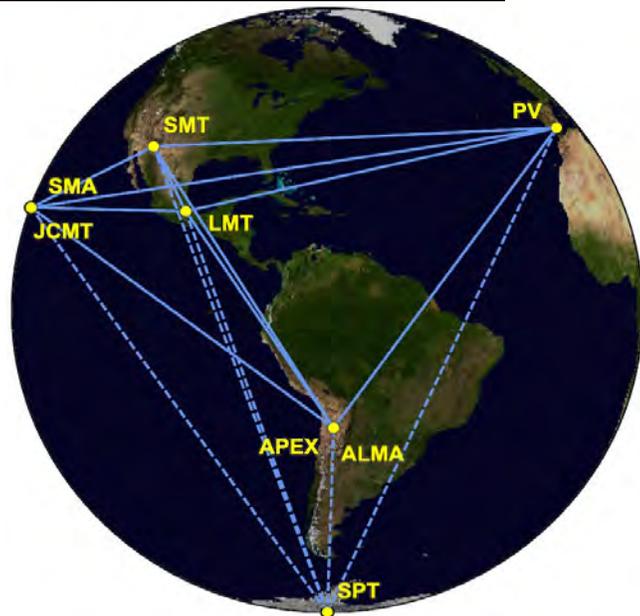
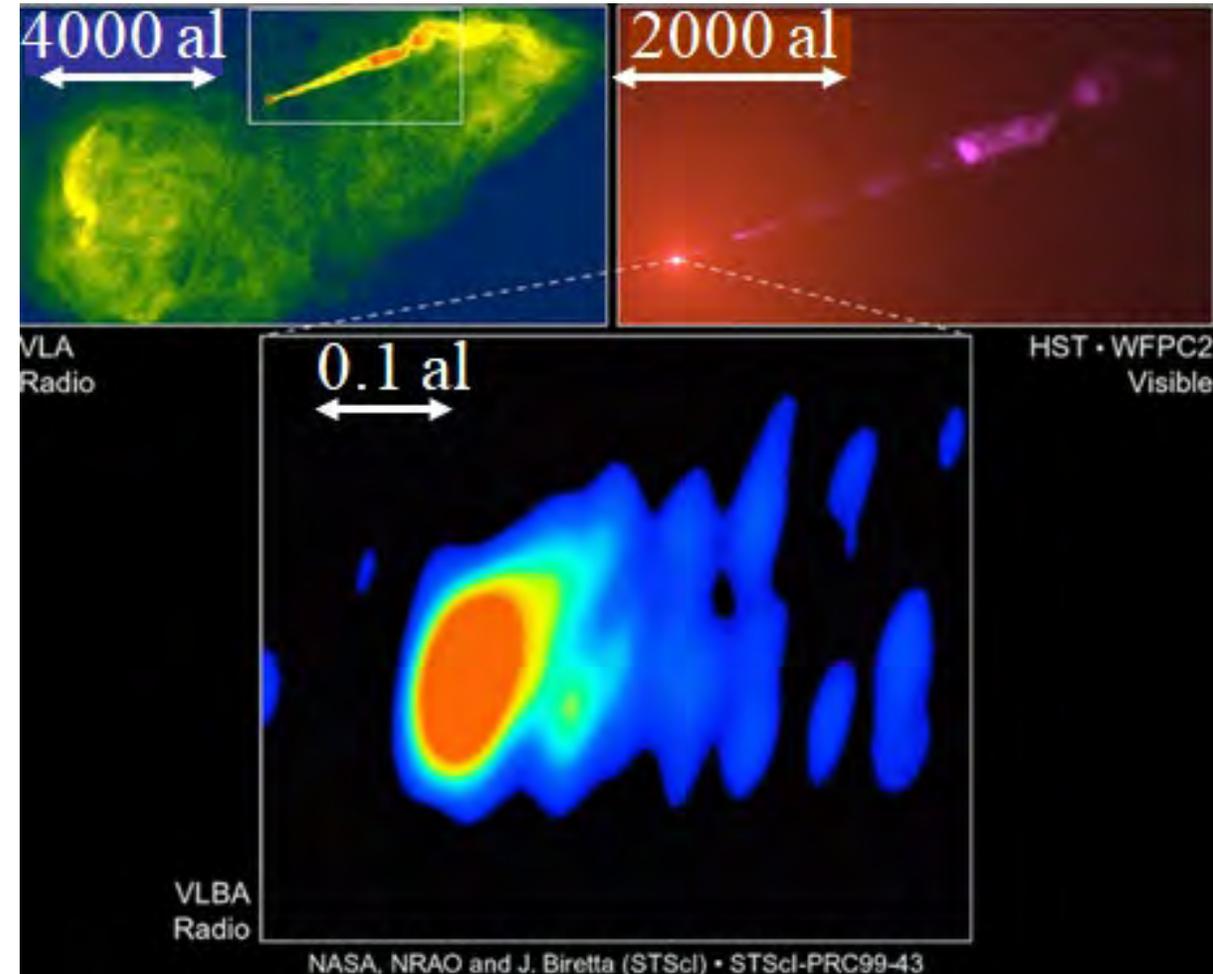
→ Comment former les trous noirs tôt dans l'Univers?
Formation des trous noirs de masse intermédiaire



Première image de l'ombre d'un trou noir



10 Avril 2019 EHT
« Event Horizon Telescope »

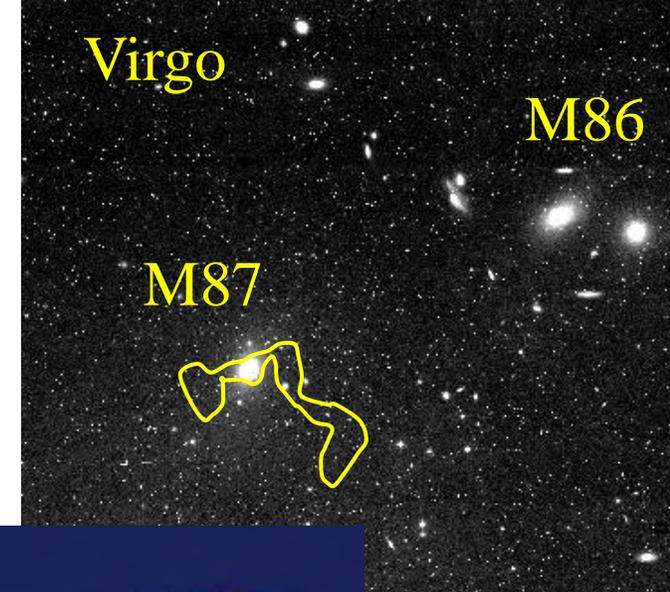


Événement multi-échelle

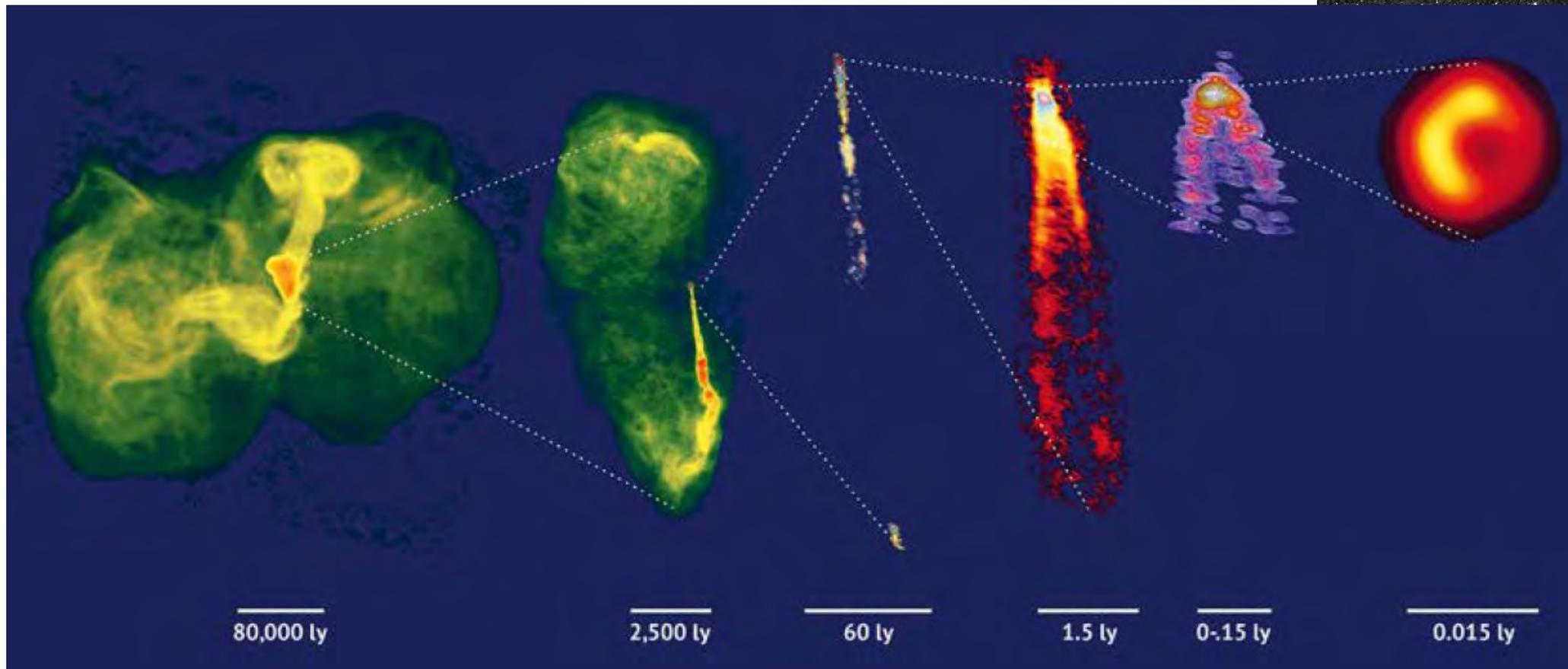
Rayonnement synchrotron, radio \rightarrow optique

\rightarrow rayons X

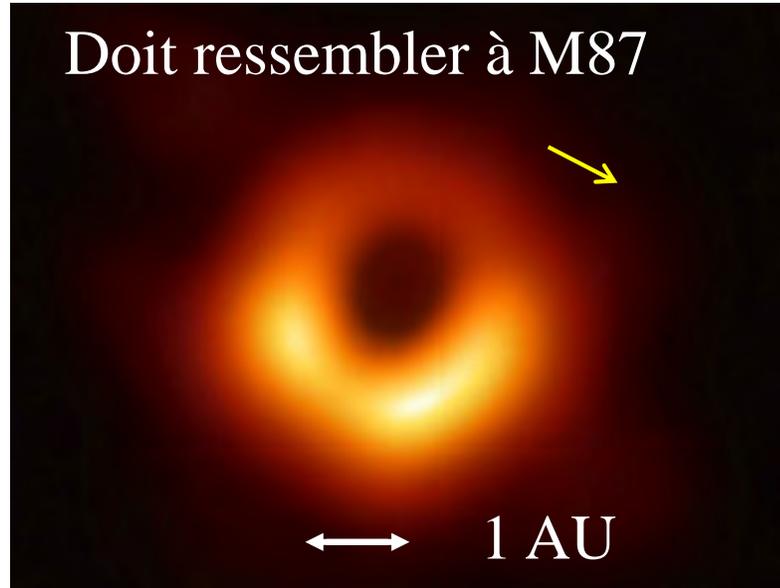
$M = 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$



$D = 16 \text{ Mpc}$



Pourquoi pas l'image de notre trou noir?



M87 est ~2000 fois plus loin
Mais de masse ~2000 fois plus grande!

→ **Même taille angulaire !**
Ombre du trou noir de 40 μ as

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

$R(\text{ombre}) \sim 2.5 \text{ fois } R(\text{horizon})$

$$R_h = 2GM/c^2$$

$$\Omega^2 = GM/R^3 \propto 1/M^2$$

$$T = 2\pi/\Omega \propto M$$

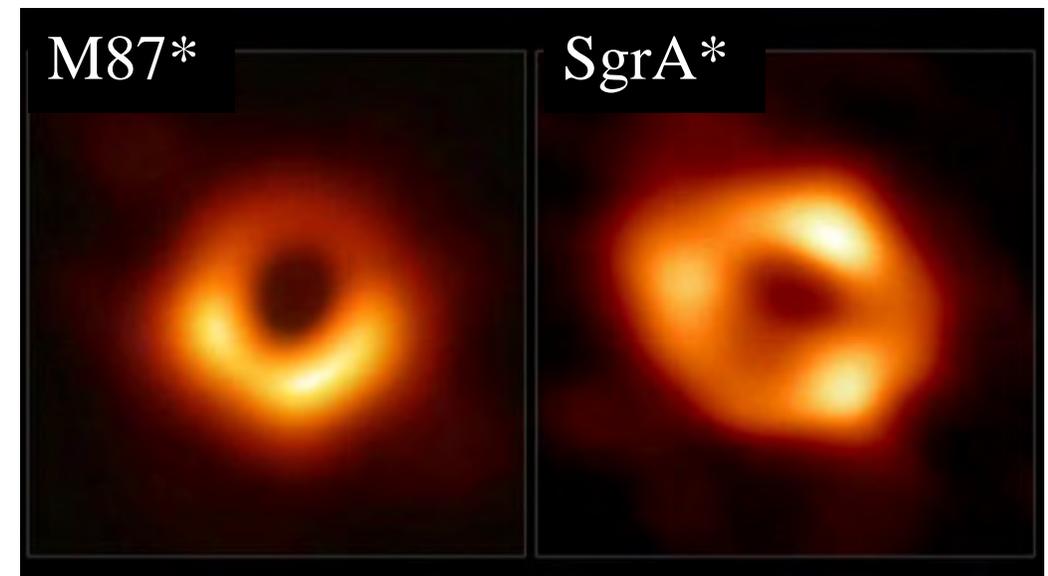
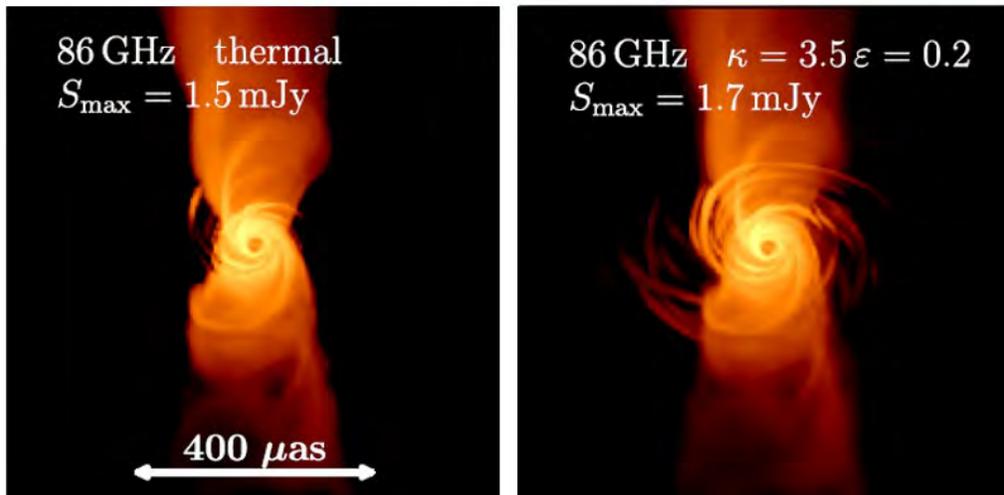
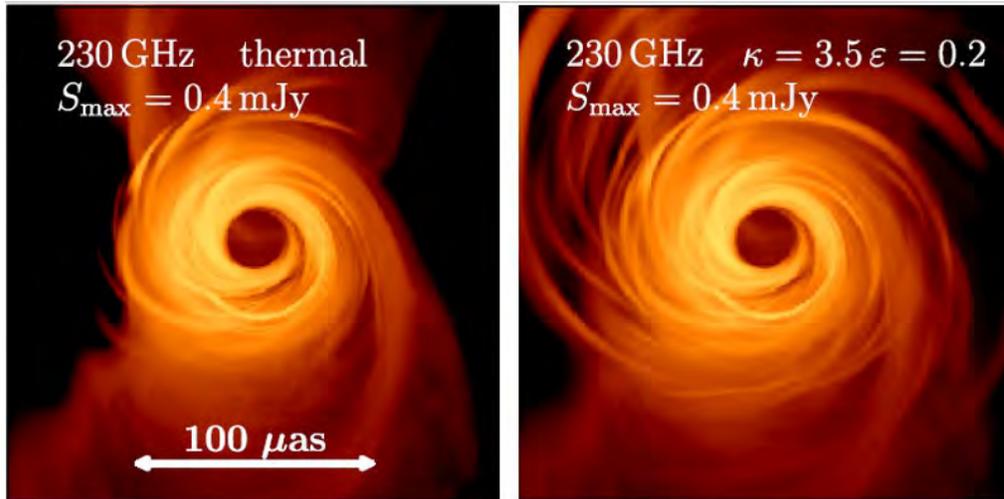
$D = 8 \text{ kpc}$



Et SgrA*, enfin!

12 Mai 2022, EHT

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

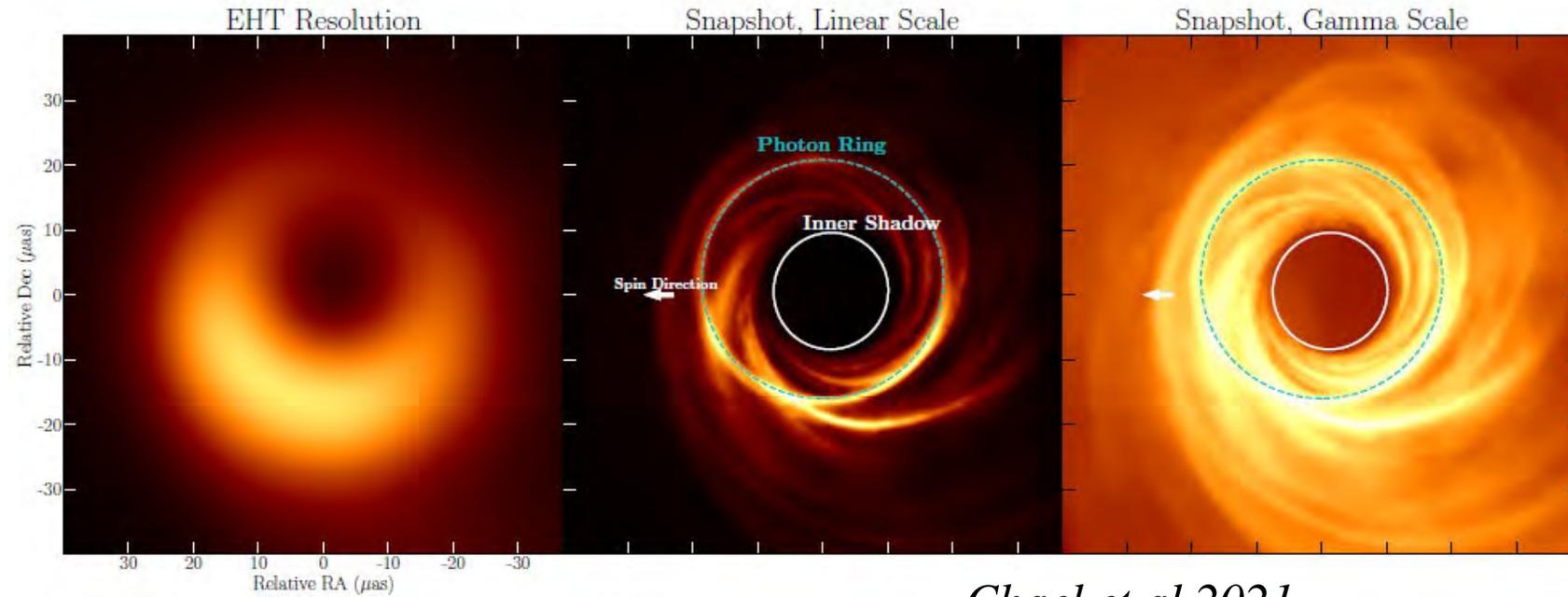


$R_{\text{horiz}}=0.08 \text{ UA}, R_{\text{ombre}}=0.2\text{UA}$

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

Interférométrie: combiner les
données enregistrées, avec une
horloge atomique

Anneau de photons



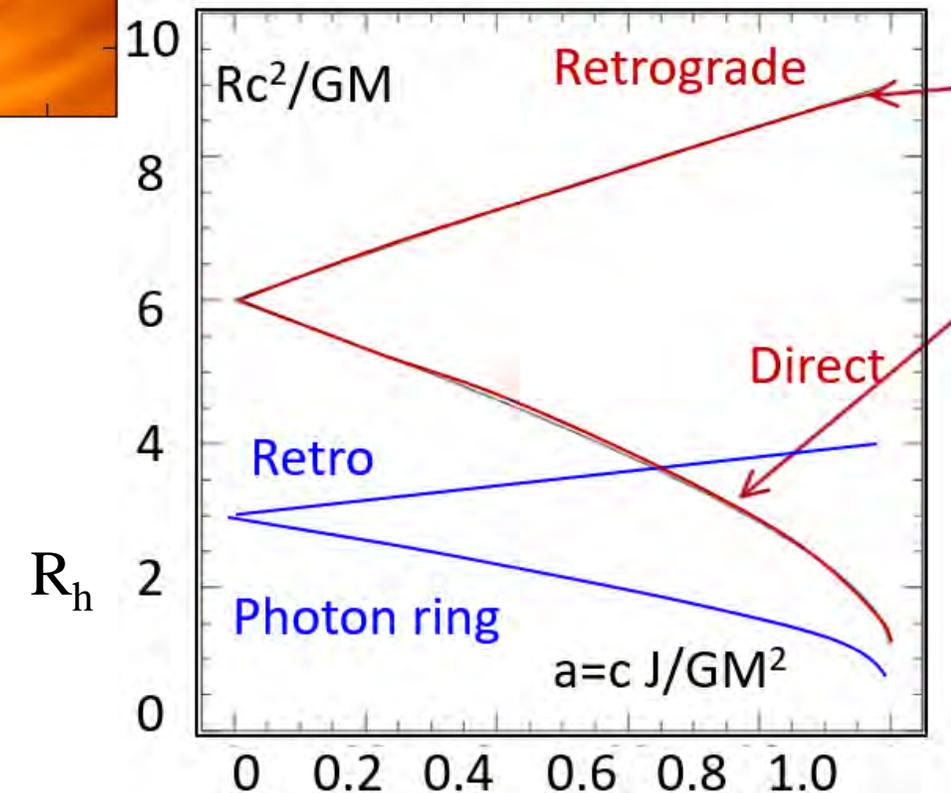
Chael et al 2021

Dernière orbite stable
du gaz, et des photons

$$R_h = 2GM/c^2$$

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



Détection du redshift gravitationnel, *GRAVITY Coll 2018*

Période de S2= 16 ans

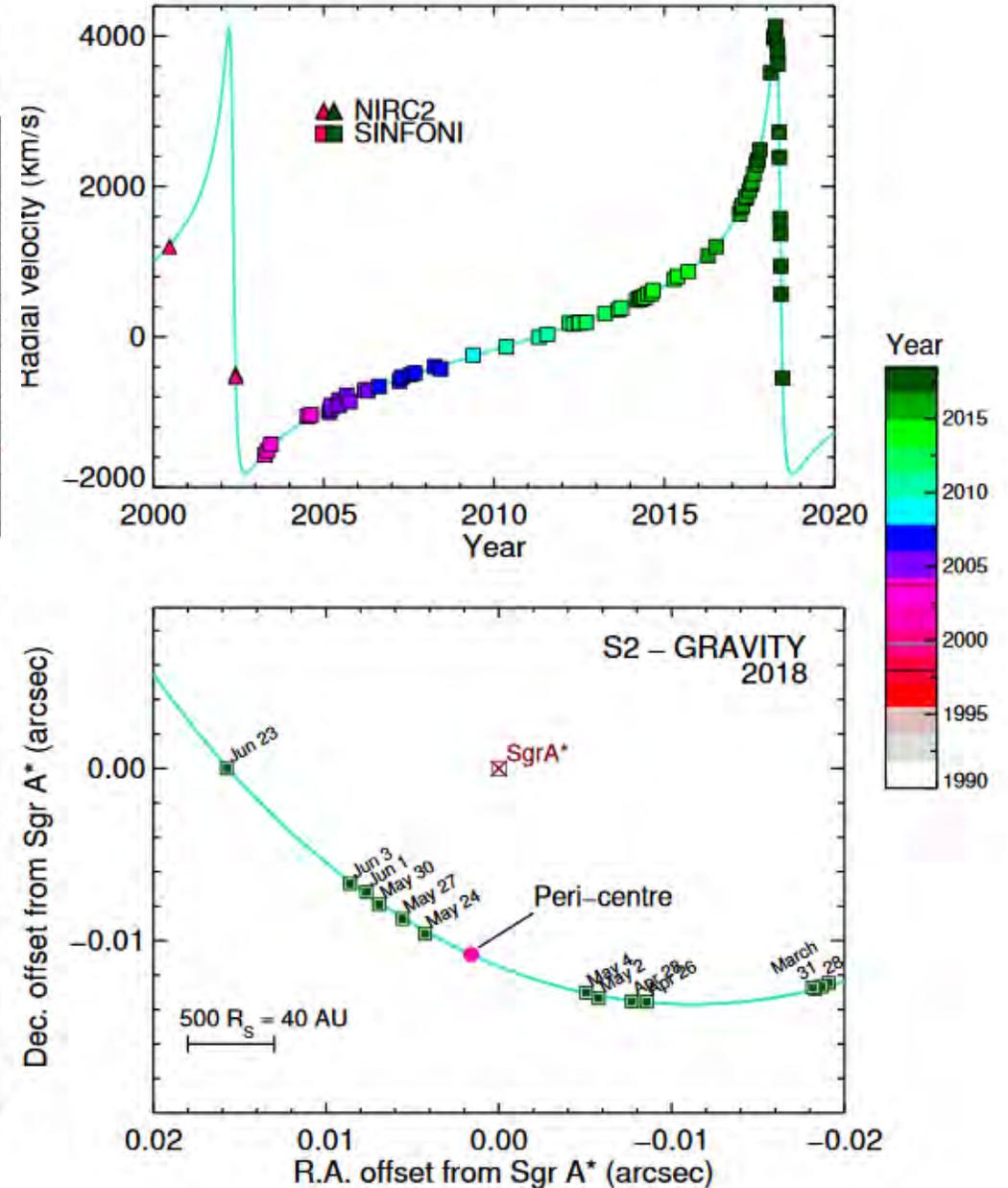
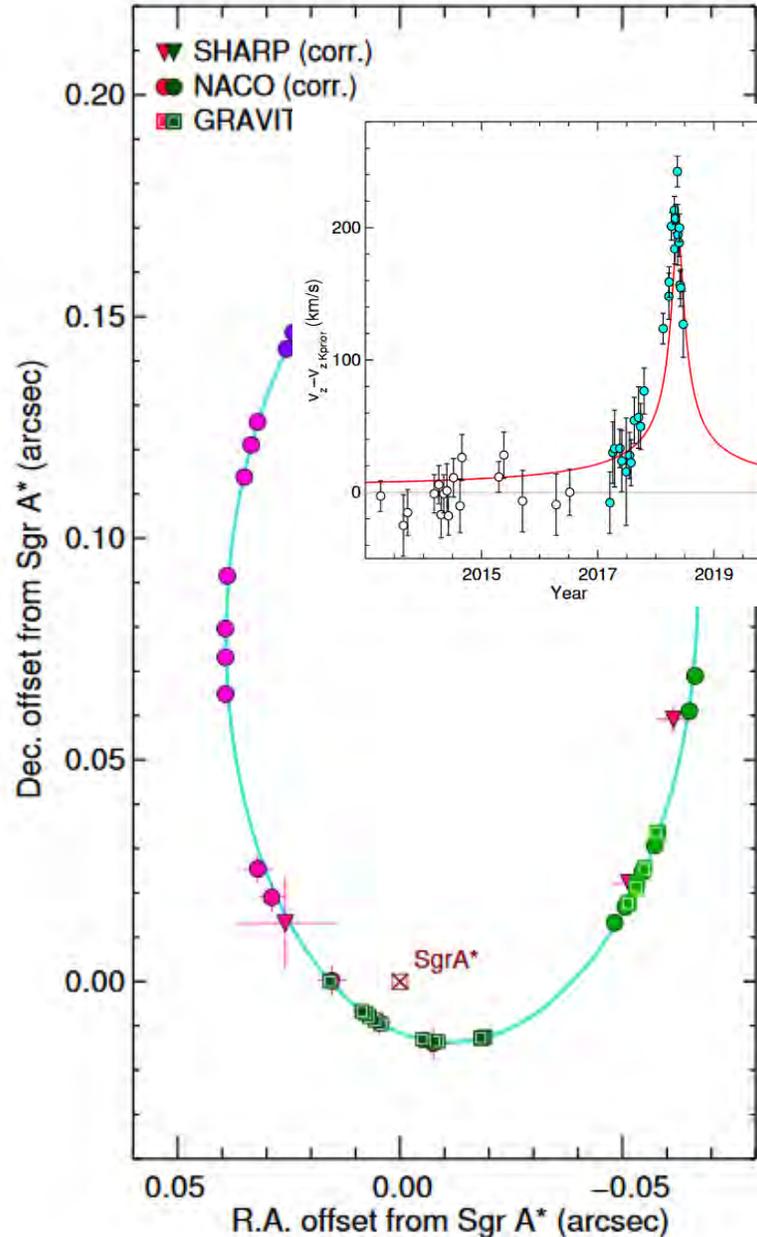
$$M_{\text{BH}} = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$$

Péricentre à 120 AU

En Mai 2018

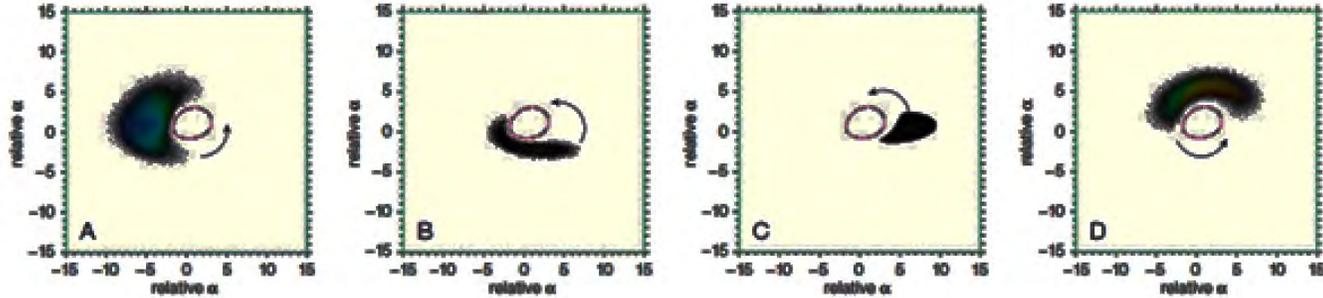
$$V_{\text{max}} = 7000 \text{ km/s}$$

Rougisement gravitationnel

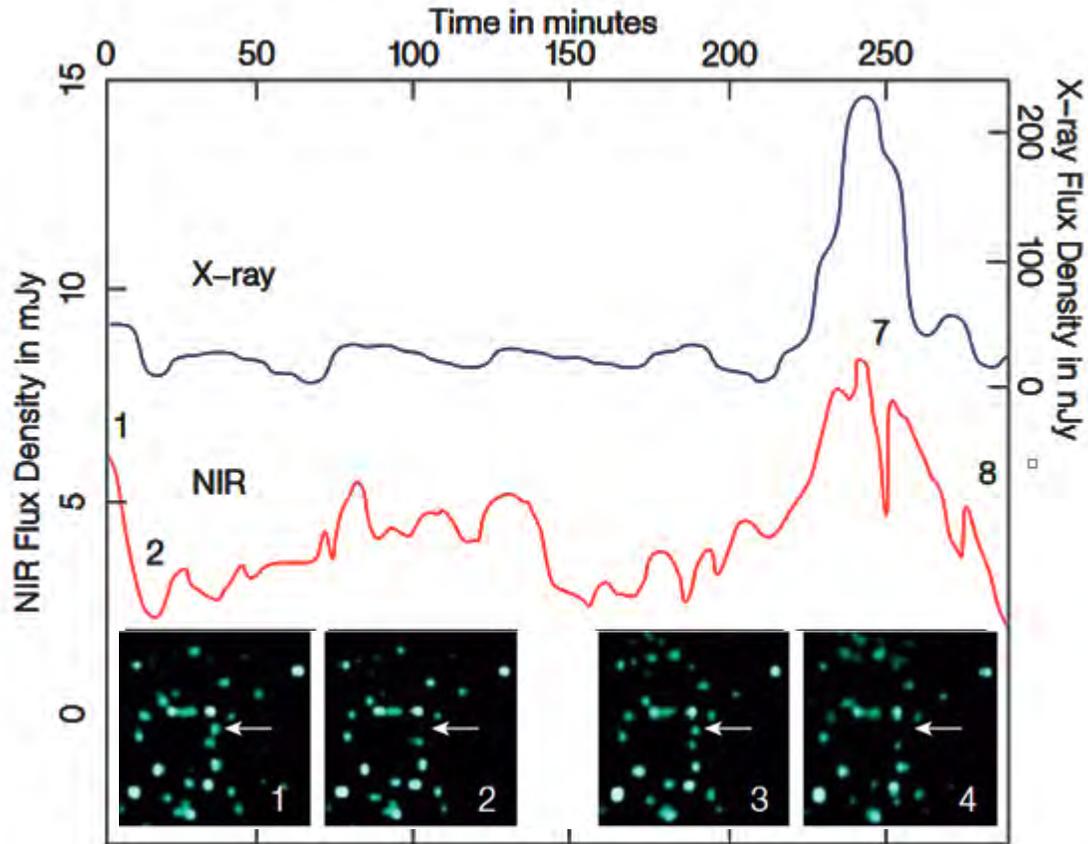
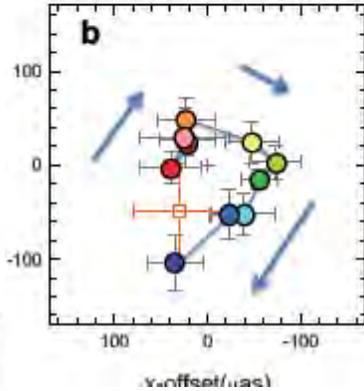
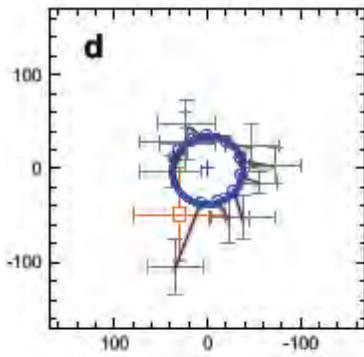


Sursaut Infrarouge du trou noir de la Galaxie

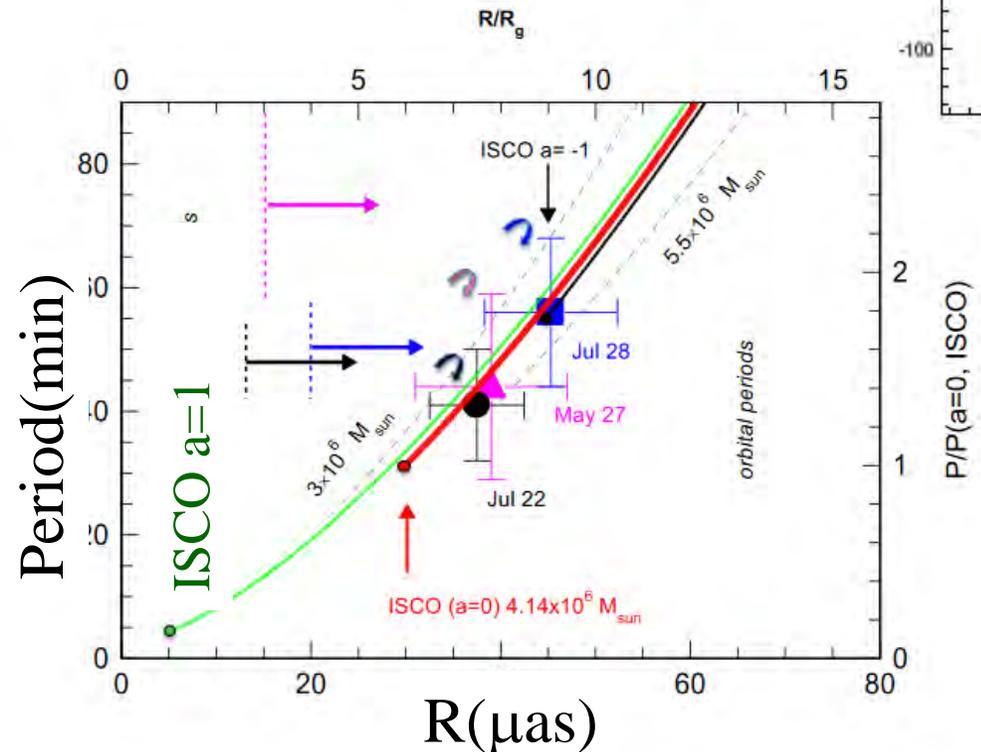
GRAVITY 2018



~30min



1.7 μ , NACO-VLT+Chandra, Eckart 2006



Spin du trou noir, et efficacité de l'AGN

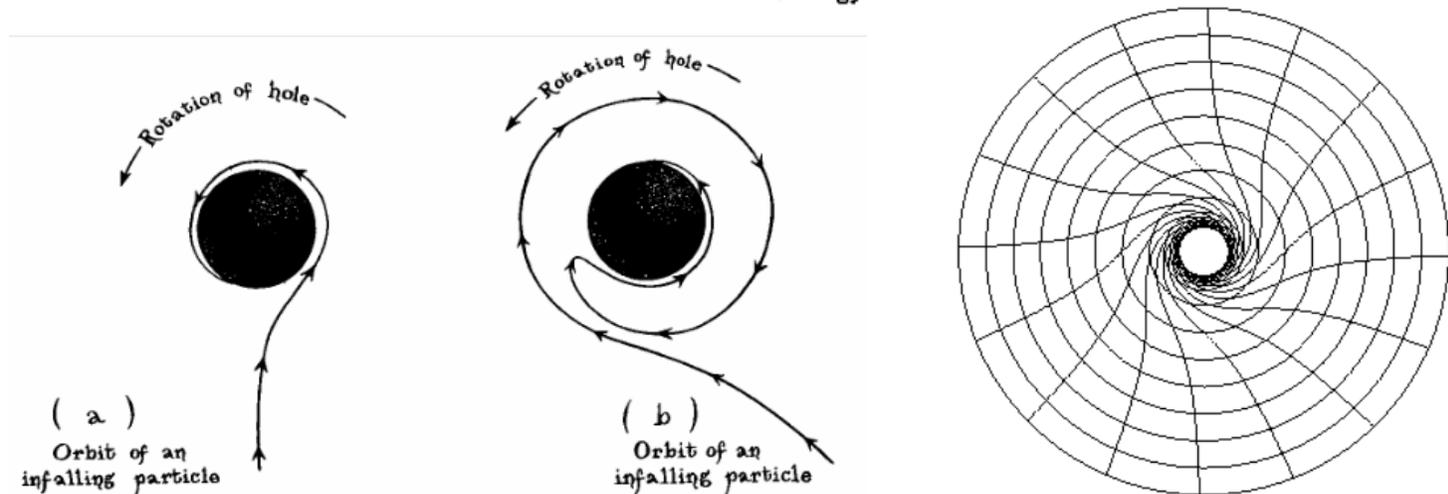
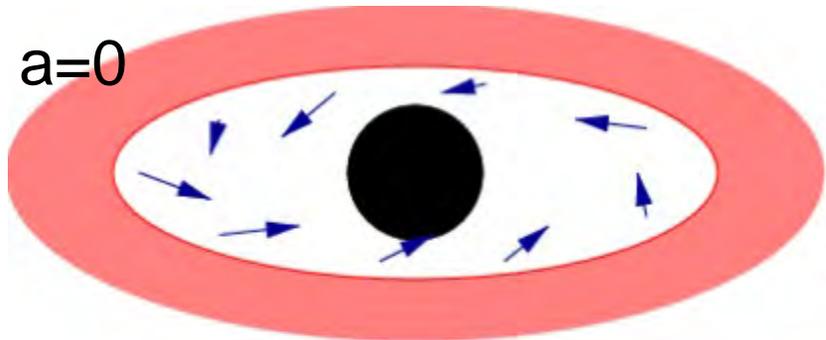
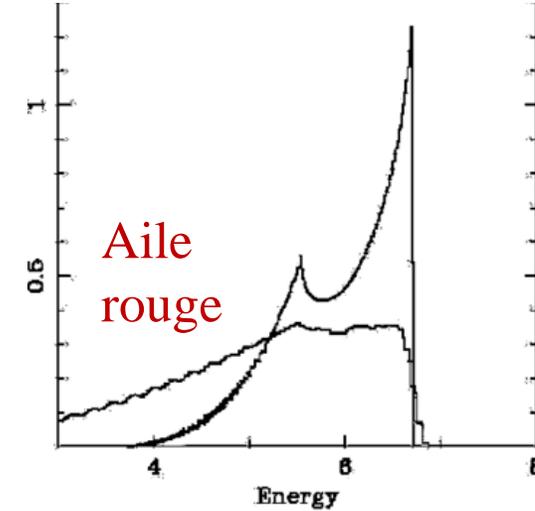
Orbites stables plus proches du trou noir, si a est maximum

$$a = c J / GM^2$$

Efficacité de rayonnement 6% pour $a=0$, jusqu'à 30% pour $a=1$

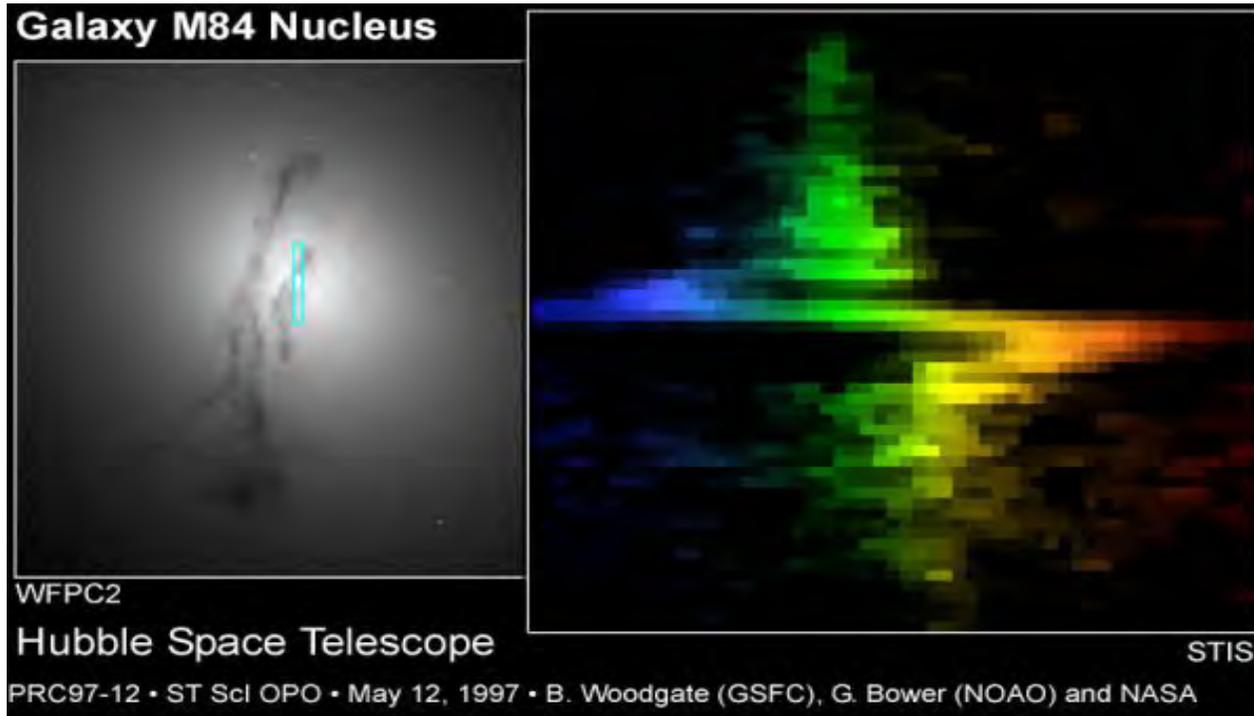
Energie gravitationnelle potentielle $\sim GmM/R_h = 1/2 mc^2$

Possible de mesurer le spin du trou noir, à partir de la variabilité observée, ou de la vitesse mesurée



Kip Thorne 1994

Masse des trous noirs et bulbes



Masses mesurées dynamiquement

Vitesses à ~ 10 pc du trou noir

Vitesses des étoiles ou du gaz

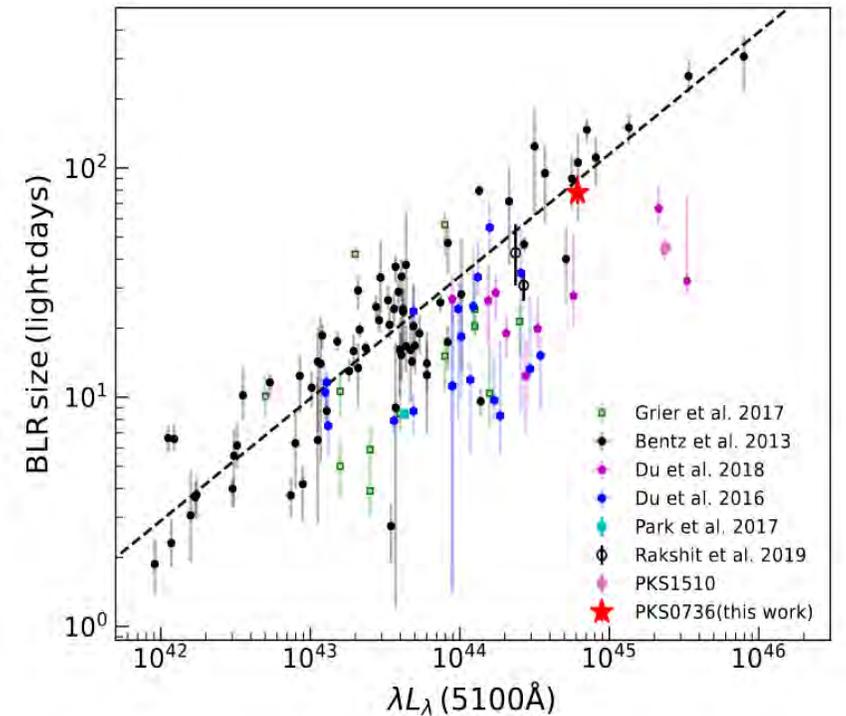
Rayon d'influence R_i du trou noir

$GM_{\text{BH}}/R_i \sim \sigma^2$ σ dispersion de vitesse

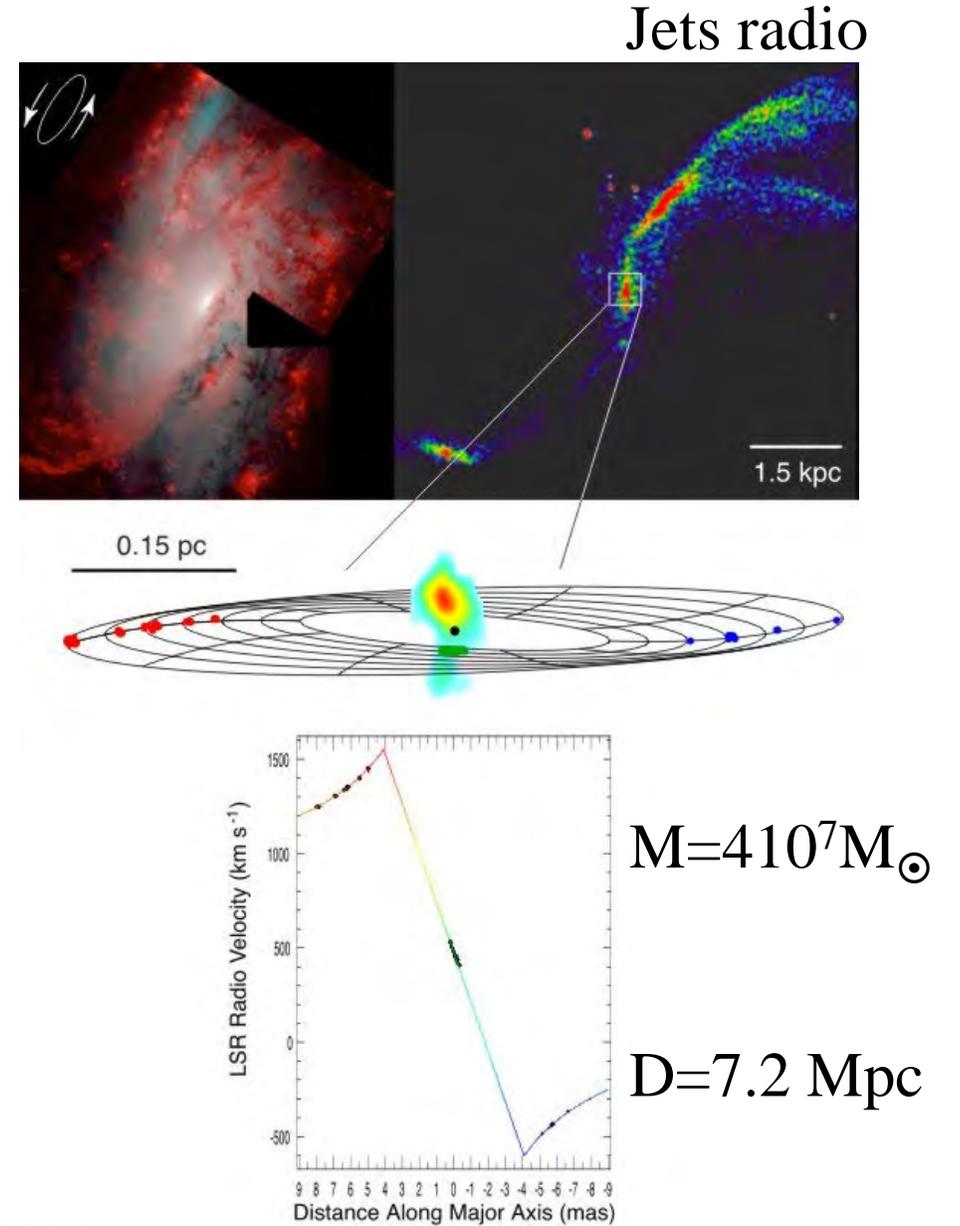
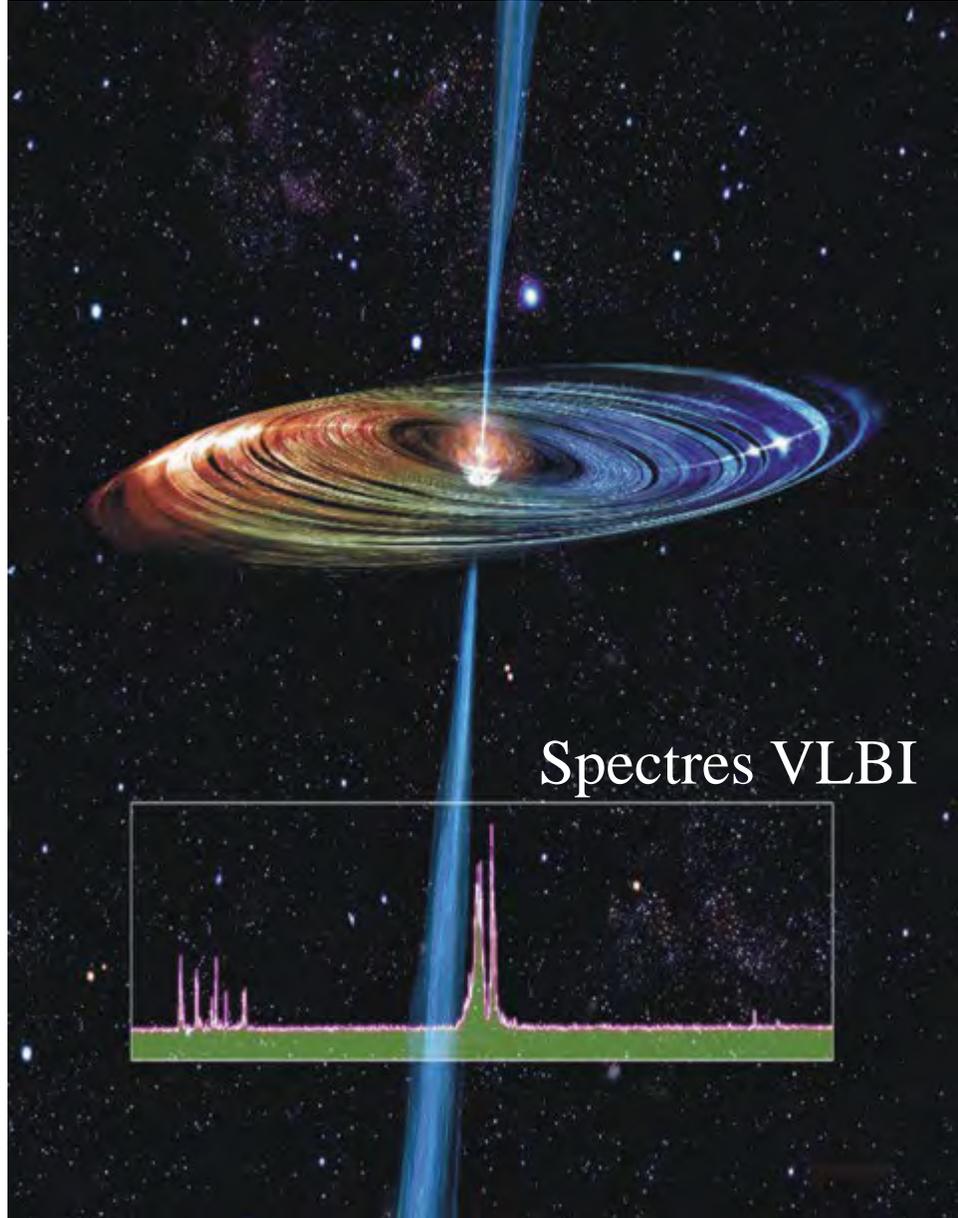
A grande distance, résolution spatiale insuffisante

→ Carte de réverbération, disque d'accrétion,
taille de la BLR $L_{\text{AGN}} \propto R_{\text{BLR}}^2$

AGN: on observe $\Delta V, L \rightarrow R_{\text{BLR}} \rightarrow M_{\text{BH}} \propto \Delta V^2 R_{\text{BLR}}$



NGC 4258: masers H₂O

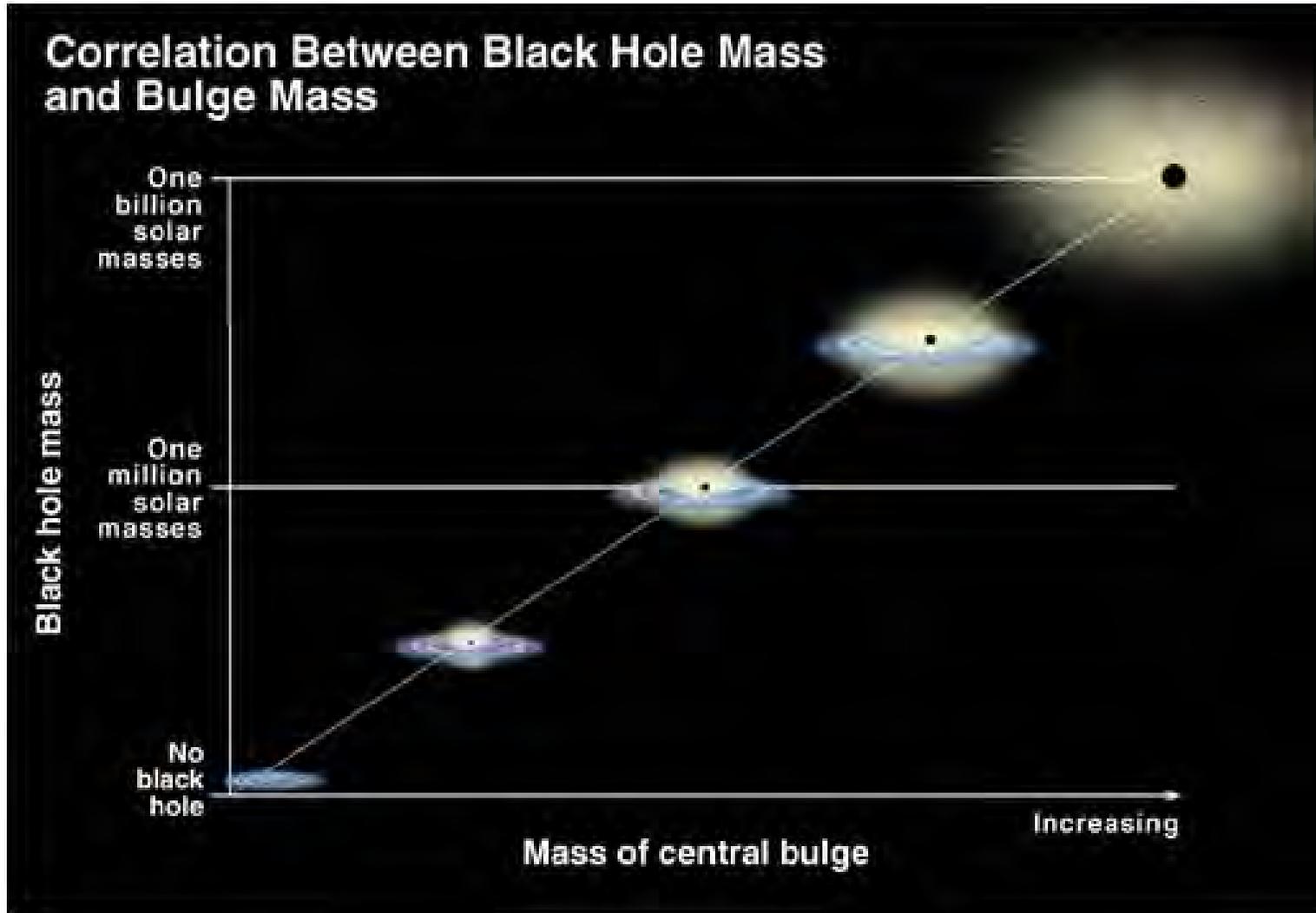


Greenhill et al 1995

Co-habitation trou noir - Galaxie

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

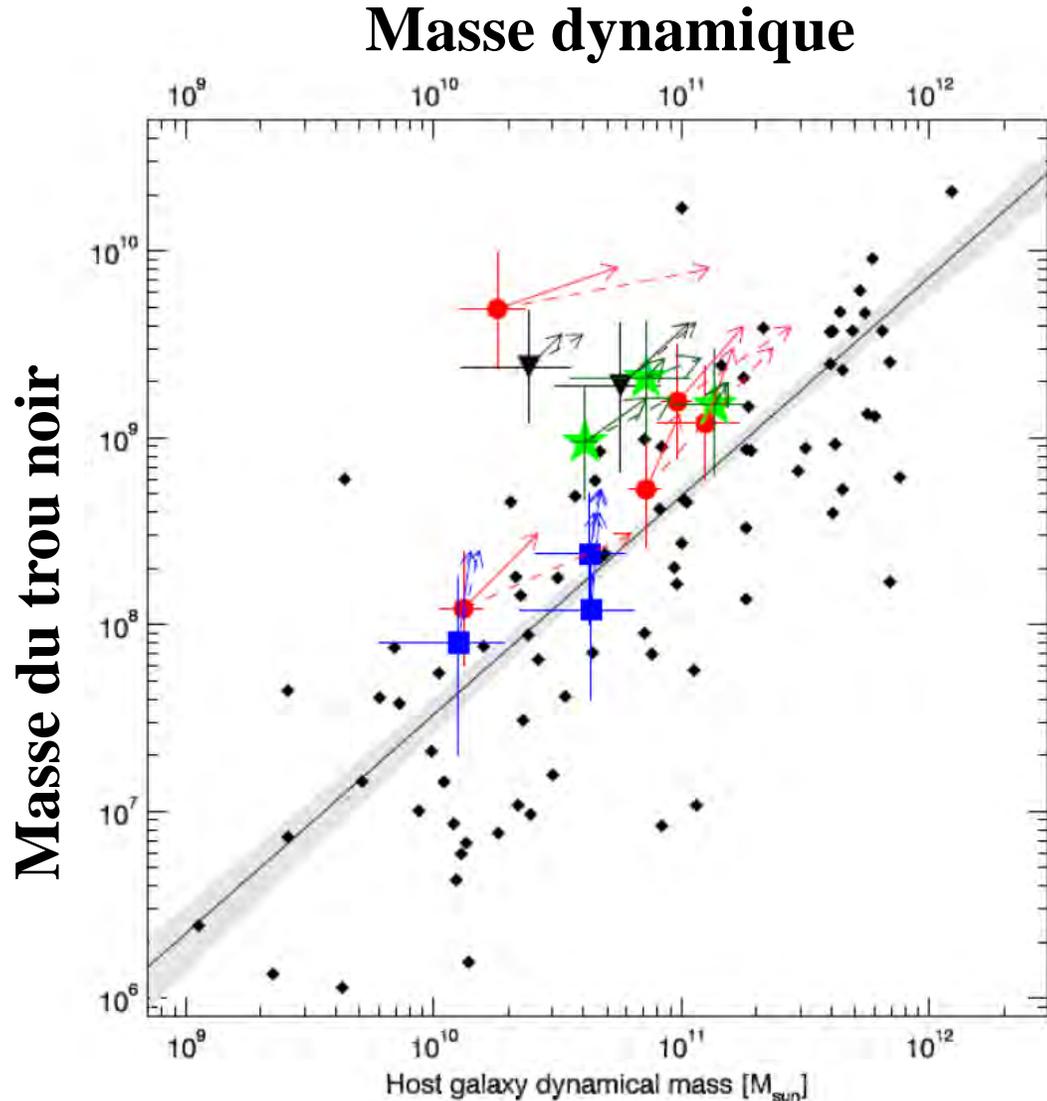
Qu'en est-il au début de l'Univers?



A grand z , on ne pourra pas distinguer bulbe et disque,

Relation entre MBH et
Masse dynamique
ou masse stellaire à défaut

$M_{\text{trou noir}}$ – Masse bulbe (ou σ_v), à $z \sim 6$



Trous noirs précoces?

QSO à $z=6$

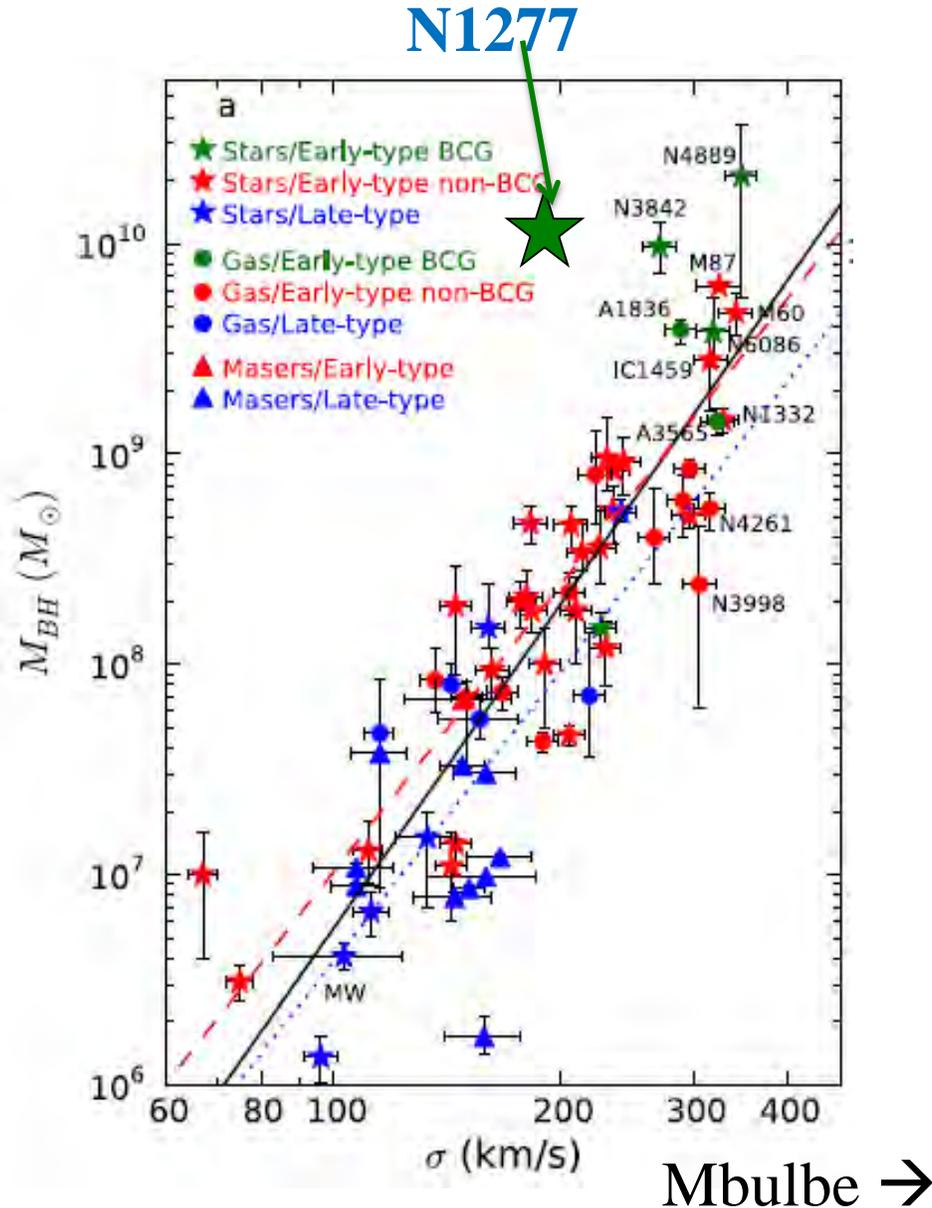
→ La masse des trous noirs est plus grande que prévue

→ Trajectoires durant les 50 prochains Myr

Venemans 2016

→ ALMA avec [CII] peut donner la morphologie, et les inclinaisons

Écarts à la relation M_{\bullet} - M_{bulbe} à $z=0$



$$M_{\text{bulbe}} \sim 700 M_{\odot}$$

Parfois, M_{BH} arrive un peu au-dessus, dans les amas de galaxies

Galaxies cannibales au centre

Avalent le gaz chaud avant la formation d'étoiles?

McConnell & Ma 2013



NGC 1277: un trou noir obèse?

Galaxies reliques

Formation stellaire stoppée

Age des étoiles > 10Gyr

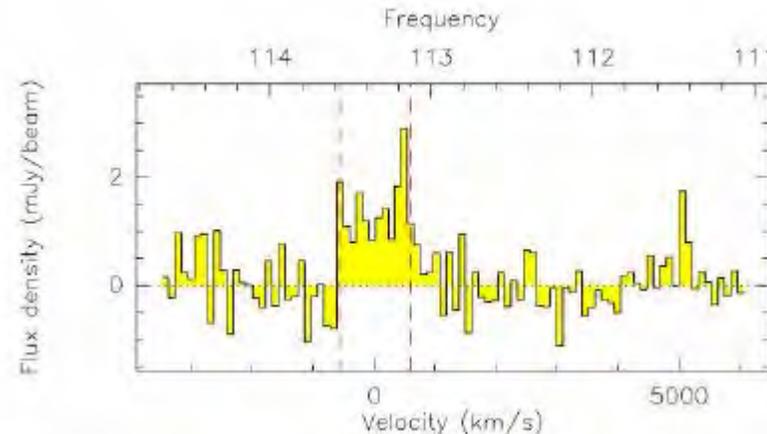
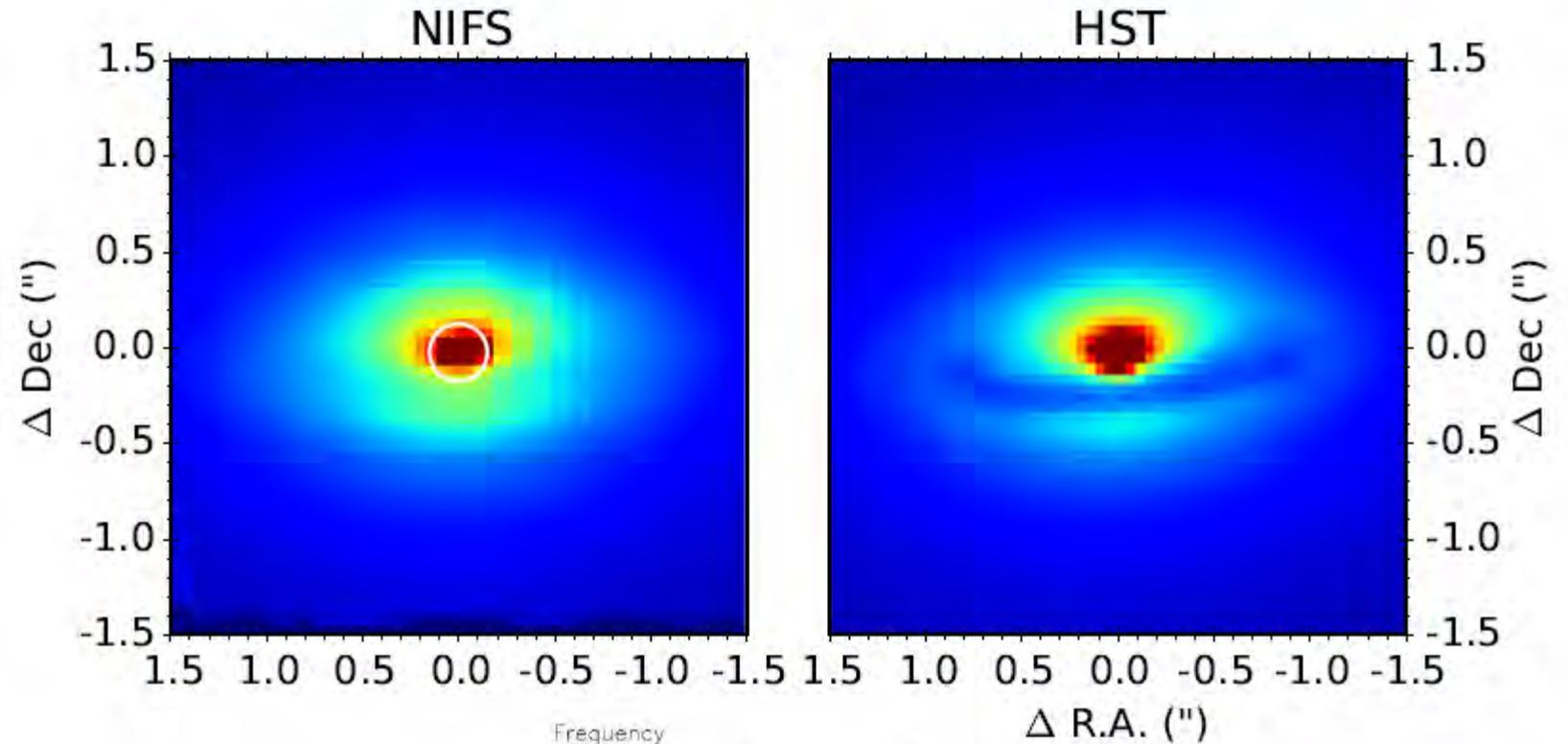
Uniquement dans les amas,
galaxies massives

Loin du centre, de la galaxie
cannibale

Trujillo et al 2014

$$M_{\text{BH}} = M_{\text{bul}}/2!$$

Vitesses stellaires + bulbe sous-estimé
contesté par *Emsellem (2013)*



Dynamique du gaz

$$\rightarrow M_{\bullet} = 0.5-1.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

Scharwaechter et al 2015

Pourquoi une relation entre trou noir et bulbe?

Compétition pour accréter le gaz -- ou bien rétroaction du trou noir (feedback)

Rayon de la sphère d'influence du trou noir $GM_{\bullet}/r_{\text{infl}} = \langle V^2 \rangle$

$$r_{\text{infl}} = GM_{\bullet}/\langle V^2 \rangle$$

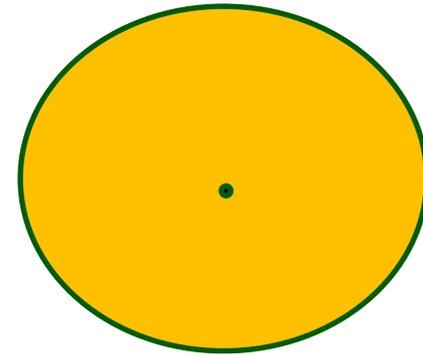
Corrélation observée $M_{\bullet} \sim 0.002 M_{\text{bulbe}}$

Masse du bulbe $M_{\text{bulbe}} \sim 5 \langle V^2 \rangle R_{\text{bulbe}} / G$

$$r_{\text{infl}} \sim 10^{-2} R_{\text{bulbe}}$$

→ Volume d'influence = 10^{-6} Volume du bulbe

Difficile d'imaginer des échanges gravitationnels d'information



Comment le trou noir influence le bulbe?

Energie renvoyée lors de la croissance du trou noir $\varepsilon \sim 0.1$

$$L = \varepsilon \, dm_{\text{acc}}/dt \, c^2$$

$$M_{\bullet} / M_{\text{bulbe}} = 0.5\%$$

$$dM_{\bullet}/dt = (1-\varepsilon) \, dm_{\text{acc}}/dt$$

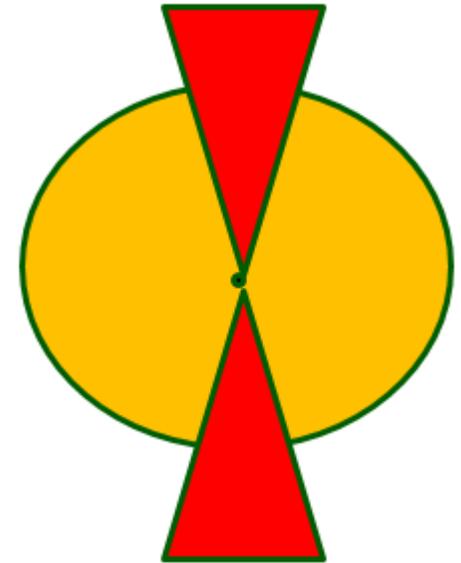
Energie de croissance $E_c = \varepsilon / (1-\varepsilon) M_{\bullet} c^2$

Energie gravitationnelle du bulbe $E_{\text{bulbe}} \sim M_{\text{bulbe}} \langle V^2 \rangle$

$$E_c / E_{\text{bulbe}} = \varepsilon / (1-\varepsilon) (M_{\bullet} / M_{\text{bulbe}}) c^2 / \langle V^2 \rangle \sim 400 !$$

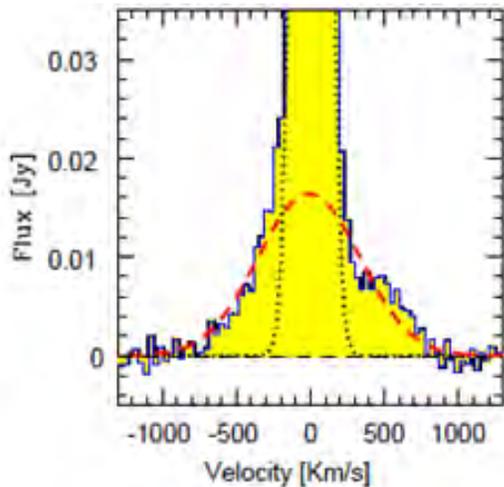
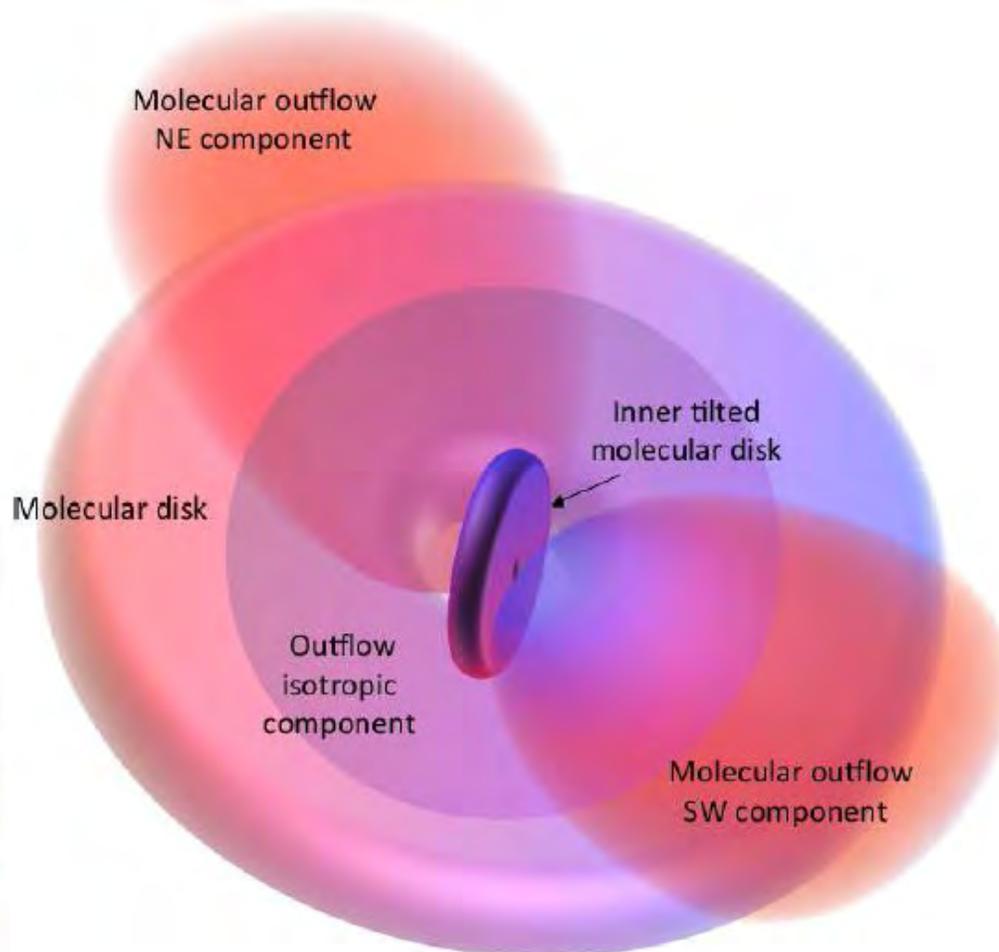
→ Le noyau actif déploie assez d'énergie pour détruire le bulbe

Même si une grande partie de cette énergie est perdue dans l'espace intergalactique, cela suffit pour modérer la croissance du bulbe



Outflow moléculaire: Mrk231, N4258...

Couplage entre AGN et disque maximisé
par l'orientation aléatoire des disques d'accrétion,
et donc des jets

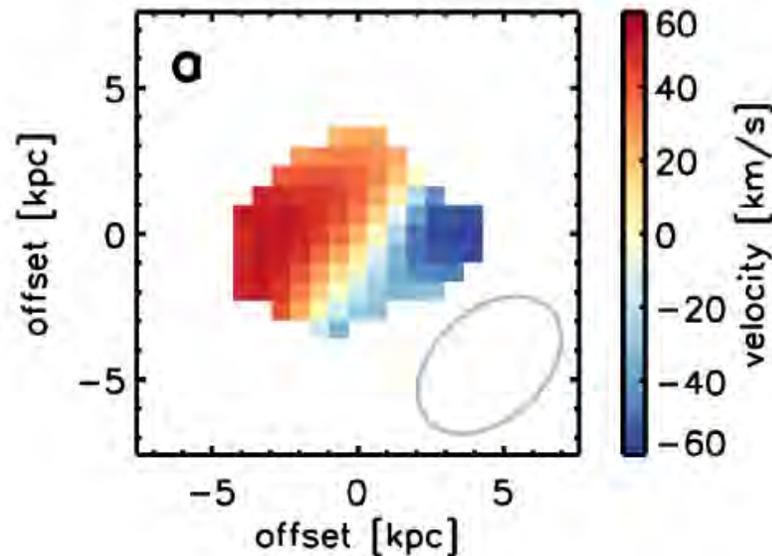
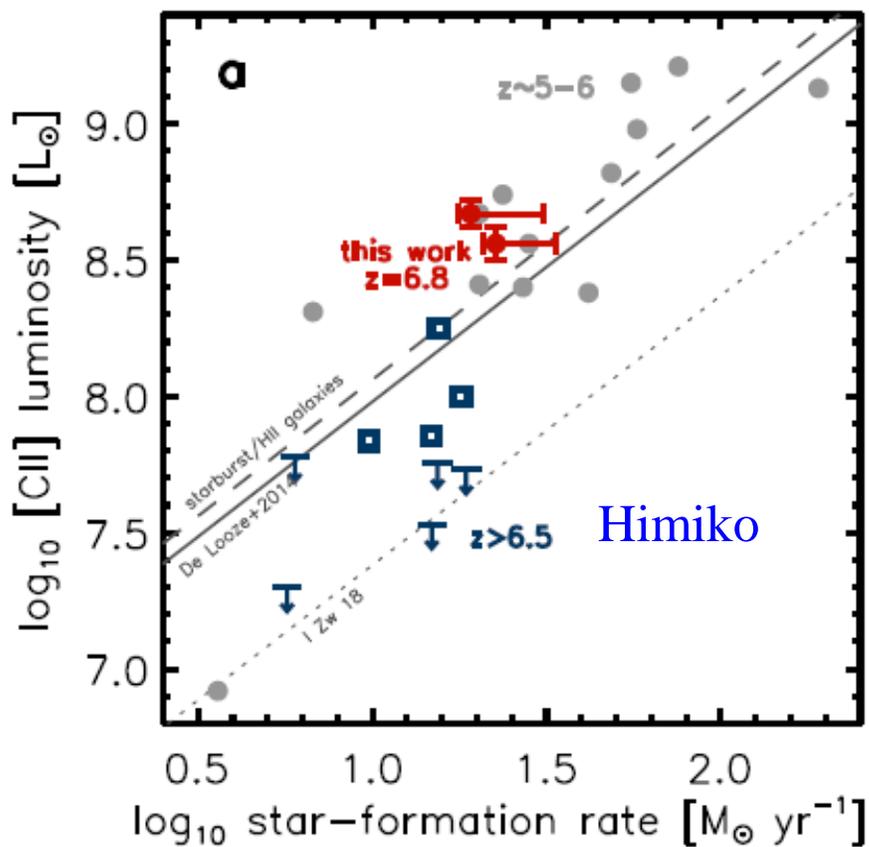


Mrk 231

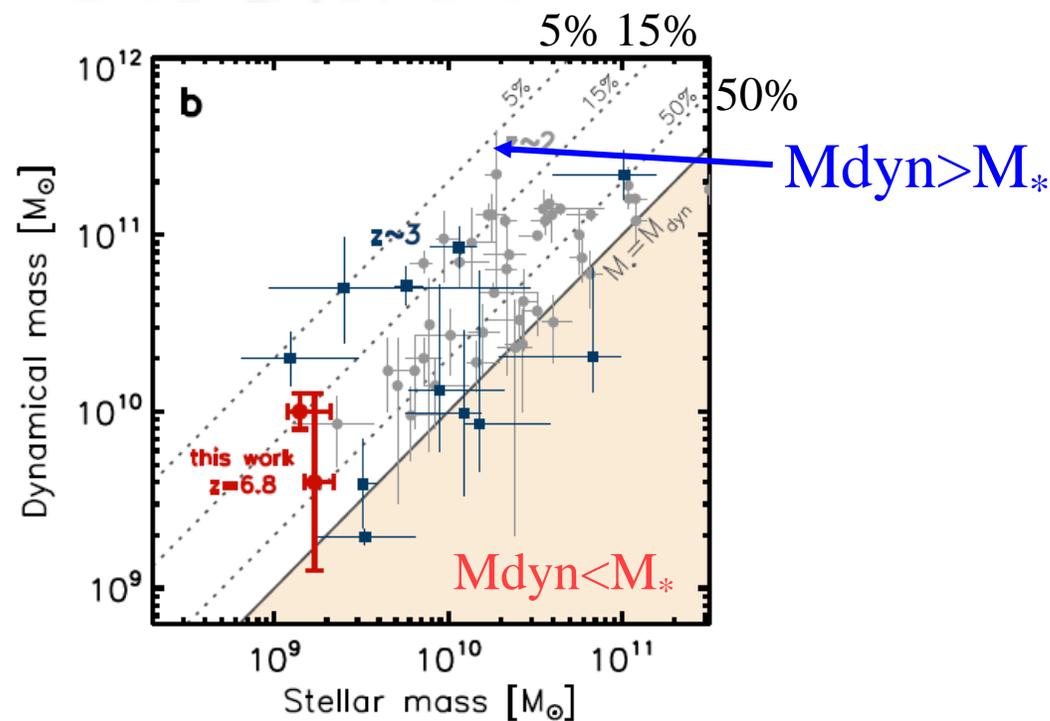
AGN et aussi starburst
Gaz éjecté 10^7 - $10^8 M_{\odot}$
Flot de $700 M_{\odot}$ /yr

Masse dynamique et formation d'étoiles

Masse dynamique dans 2kpc, très incertaine



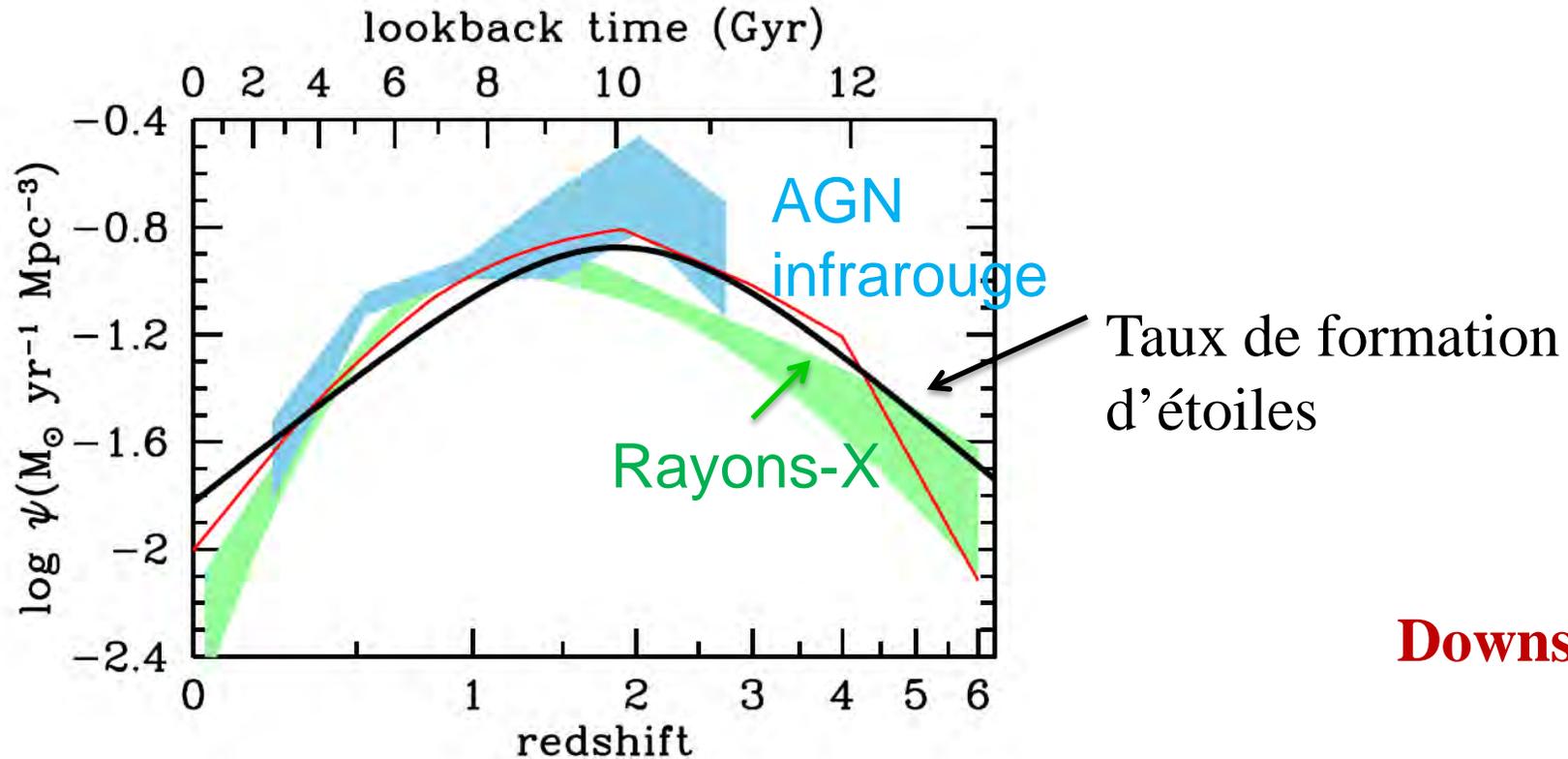
Carte de [CII]
Avec ALMA



Smit et al 2018

La croissance des trous noirs avec le temps

$$\text{Taux} = \text{Luminosité} / 0.1 c^2$$



Le taux de croissance des trous noirs, déduit de la Luminosité =
taux de formation d'étoiles / 3300

Problème au début de la croissance

Le taux de croissance est proportionnel à la masse

Pression de radiation $\text{Prad} \sim \text{gravité} \propto M$

$$L_{\text{Edd}} = 3.3 \times 10^{12} L_{\odot} (M/10^8 M_{\odot}) = 0.1 c^2 dM/dt$$

$$dM/dt = M/\tau \rightarrow M = M_0 \exp(t/\tau) \quad \tau = 45 \text{ Myr}$$

Si $M_0 = 10 M_{\odot}$ il faut 860 Myr pour atteindre $2 \times 10^9 M_{\odot}$

Mais de $z=20$ à $z=7$; $t = 600 \text{ Myr} \rightarrow 6 \times 10^6 M_{\odot}$

Solutions possibles

(1) Il est possible d'accréter efficacement avec $150 L_{\text{Edd}}$

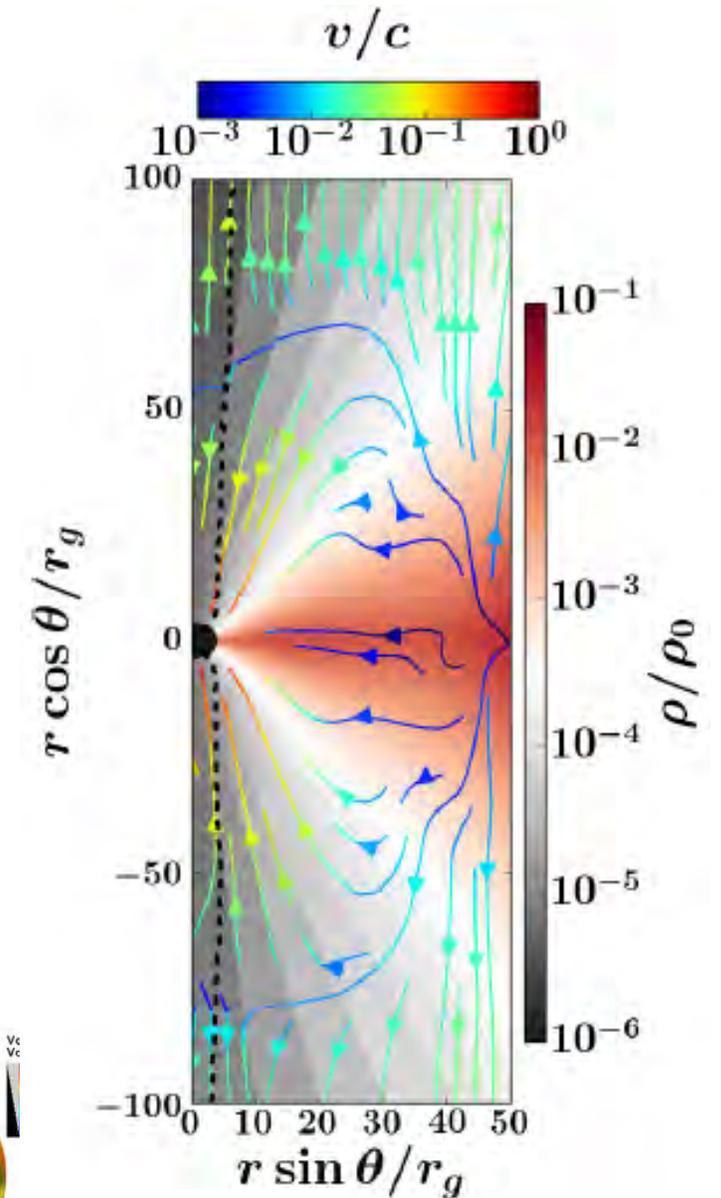
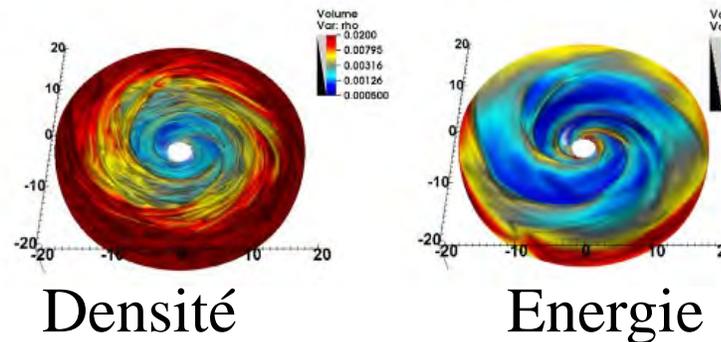
→ Outflows 15-30%

croissance en $\tau/10$, ou $\tau/100$!

(2) Effondrement direct en trou noir

Partir d'une graine plus massive

$10^{5-6} M_{\odot}$



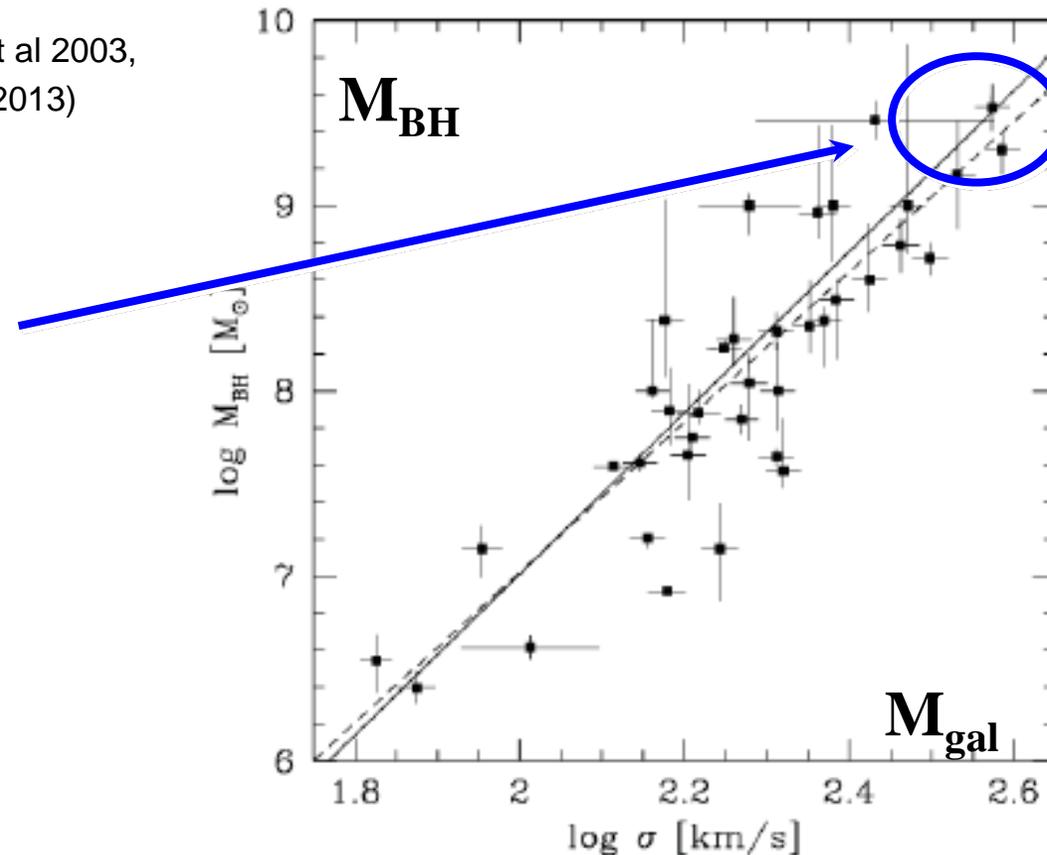
Jiang, Stone & Davis (2019)

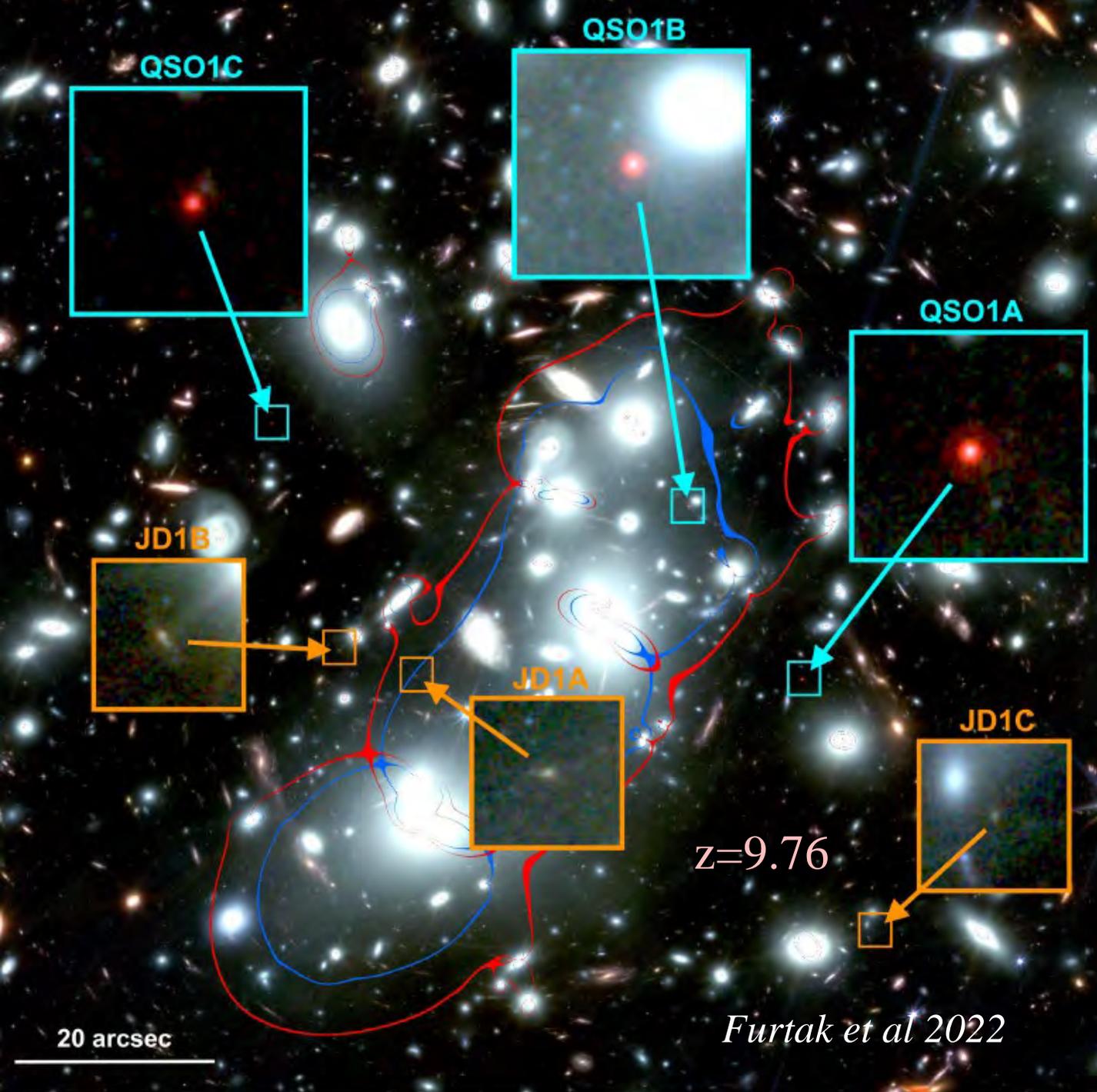
Les quasars sont présents très tôt

Les quasars les plus lointains connus, avec télescopes au sol et HST
SDSS 1148+3251 à $z=6.4$, J1120+0641 à $z=7.1$,
et avec le JWST, $z=7.2$ (Fujimoti et al 2022) $z=7.7$ (Furtak et al 2022)

ont des masses estimées de l'ordre de
 $M_{\text{BH}}=2-6 \cdot 10^9 M_{\odot}$ (Willott et al 2003, Barth et al 2003,
Venemans et al 2012, 2013)

Aussi massifs que les plus
gros trous noirs à $z=0$,
mais quand l'Univers
avait moins de <900 Myr !



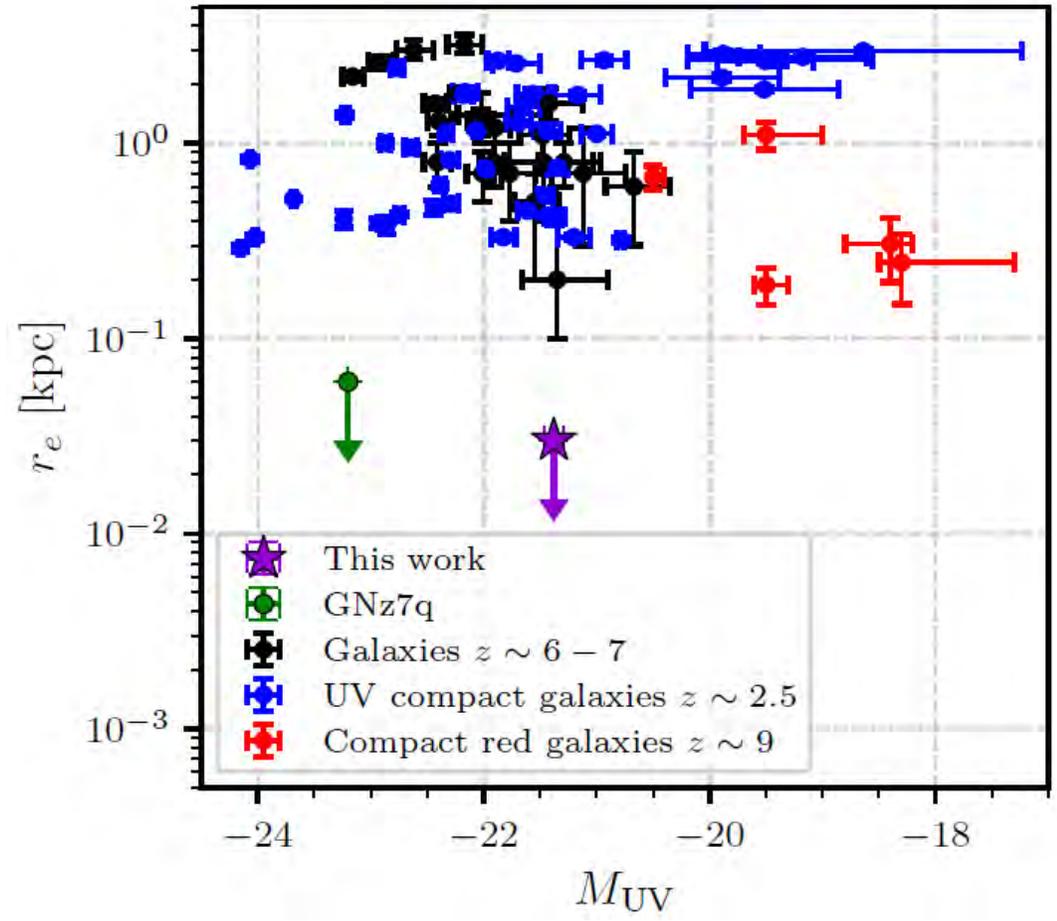


Quasar $z=7.7$ avec JWST

Amplifié par Abell2744 $z=0.3$

3 images, $\mu=7-8$, $M_* = 10^8 M_\odot$, 200 Myr

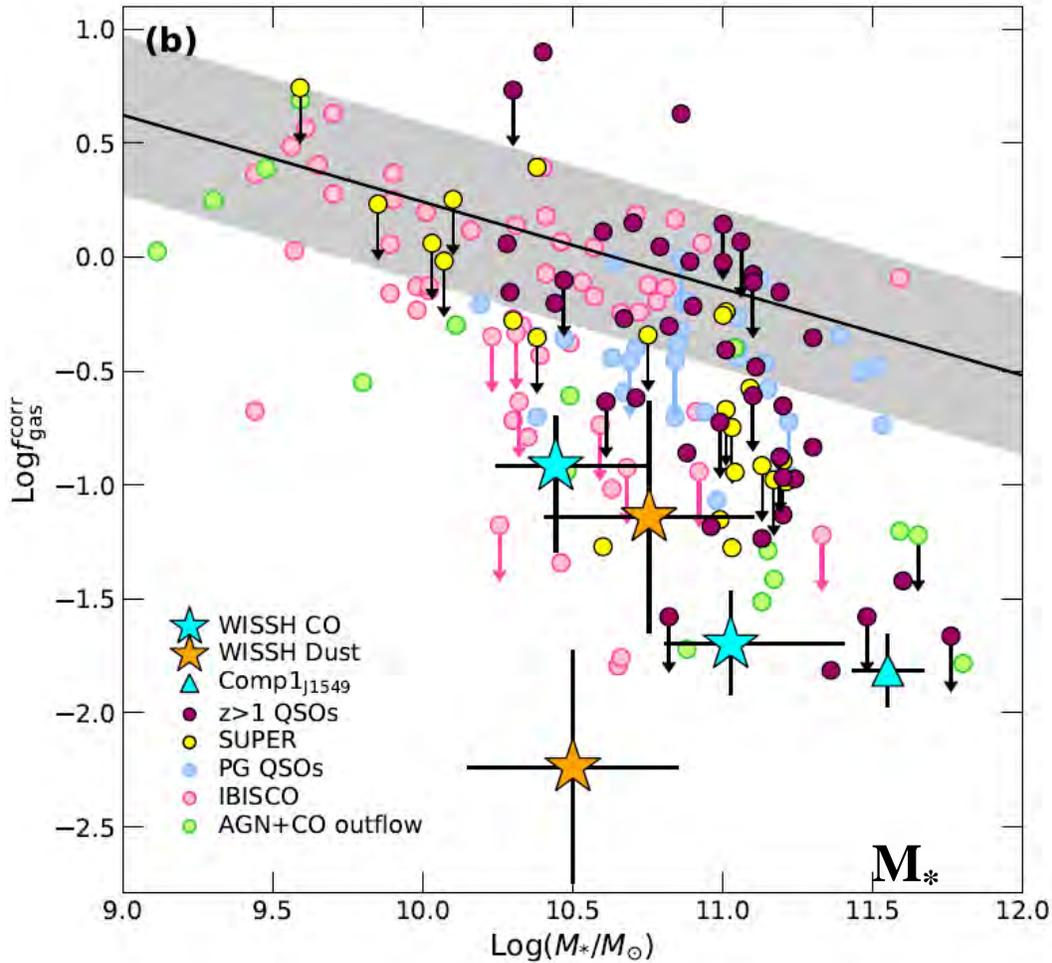
Ultra-compact $r_e < 30 \text{ pc}$



QSO avec ALMA à z=6

Neeleman et al 2021

Fraction de gaz



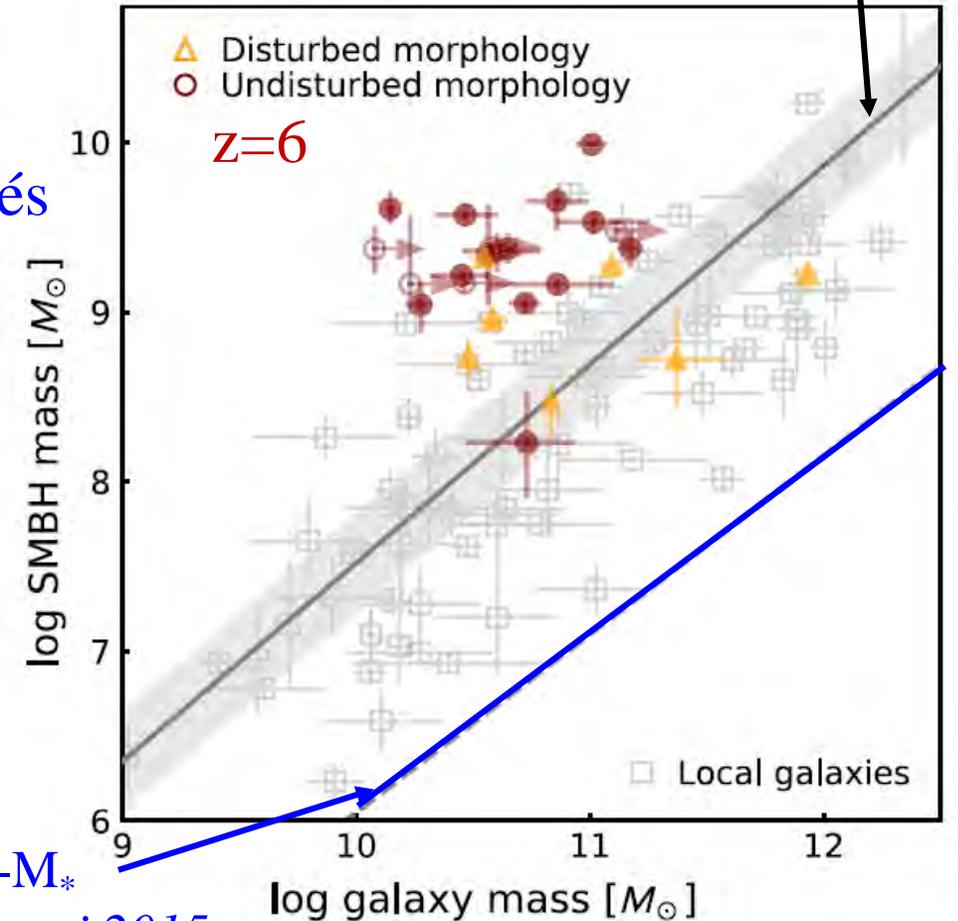
La fraction de gaz est inférieure pour les QSO
Effets du feedback?

Grand SFE

$t_{\text{dep}} \sim 50 \text{ Myr}$

Souvent perturbés
(compagnons)

Pente $\sim 1.1 M_{\text{BH}} - M(\text{Bulbe})$
Kormendy & Ho 2013

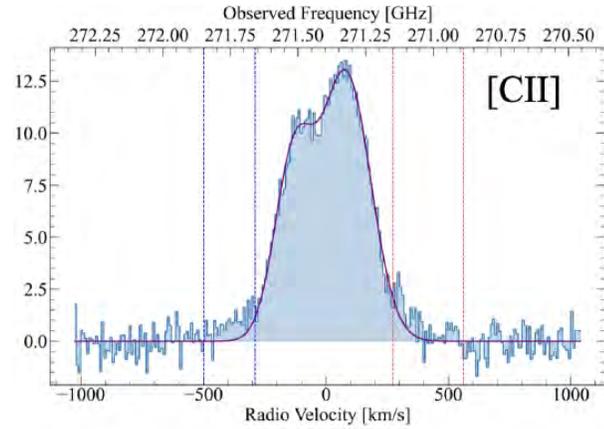
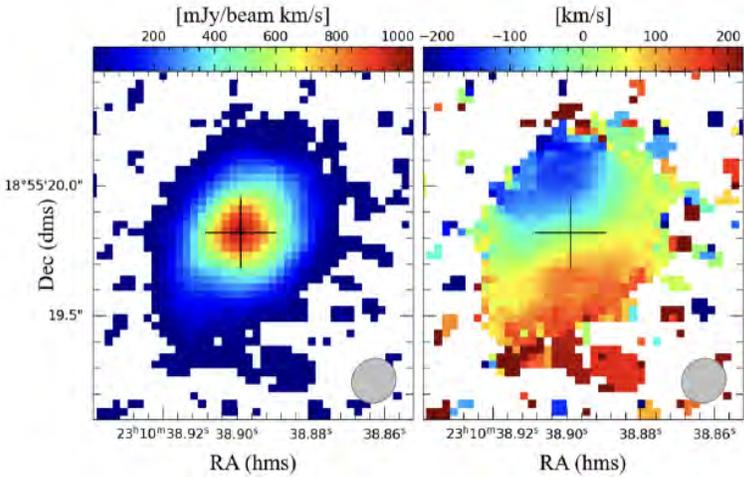


Pente $\sim 1 M_{\text{BH}} - M_*$

Reines & Volonteri 2015

WISSH (WISE-SDSS-Hyper) Bischetti et al 2021

Observation [CII], H₂O avec ALMA à z=6: J2310, isolé



Outflow $dM/dt = 1800-4500 M_{\odot}/yr$

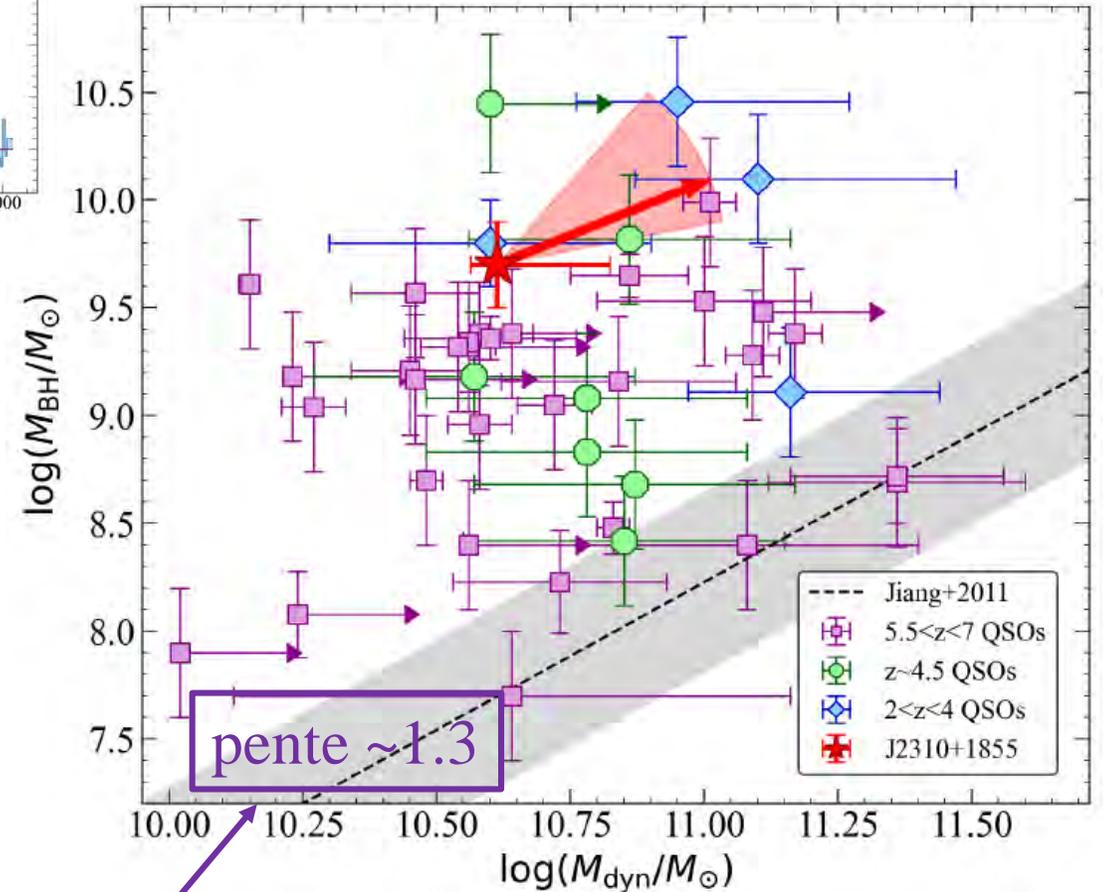
$$L_{TIR} = 2.5 \cdot 10^{13} L_{\odot}$$

$$T_{dust} = 71K \quad SFR = 1240 M_{\odot}/yr$$

Gaz/poussière ~ 100

$$SFR/M_{dyn} > dM_{BH}/dt/M_{BH}$$

→ Le trou noir croît moins vite que M_*



Tripodi et al 2022

Jiang et al 2011

Simulations

Hôte de Quasar

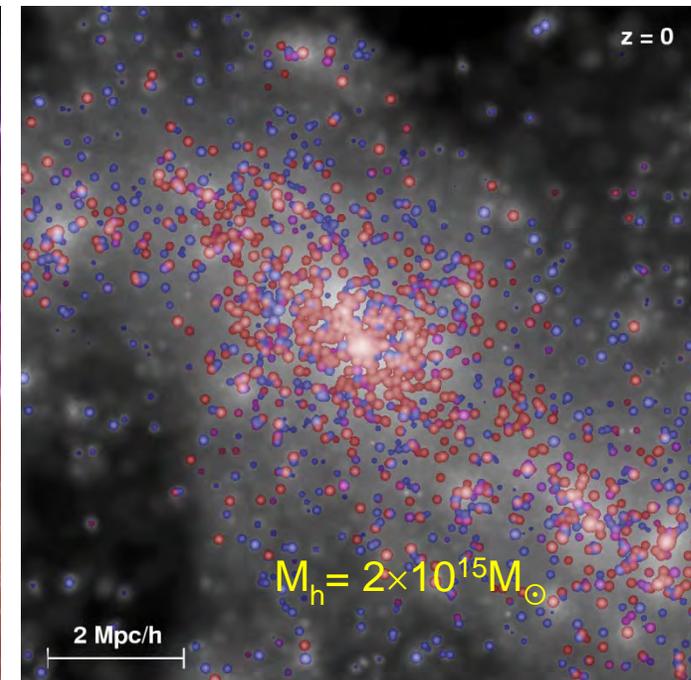
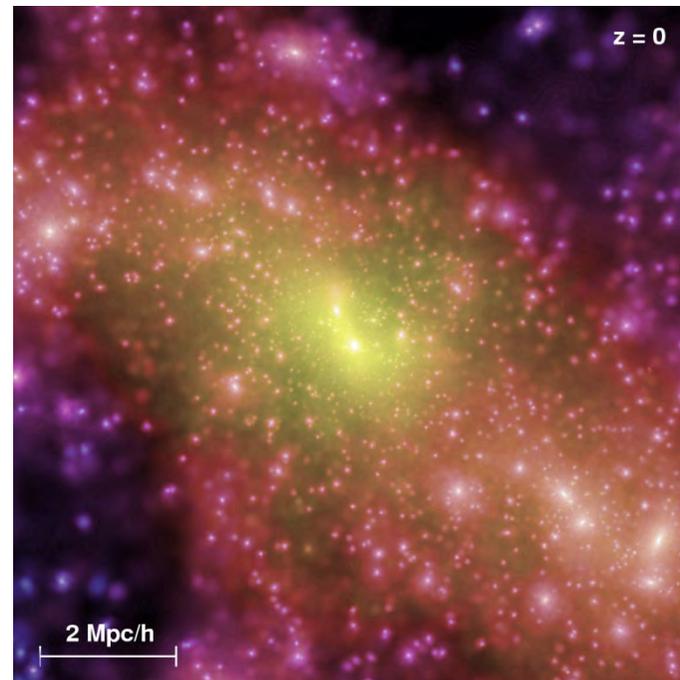
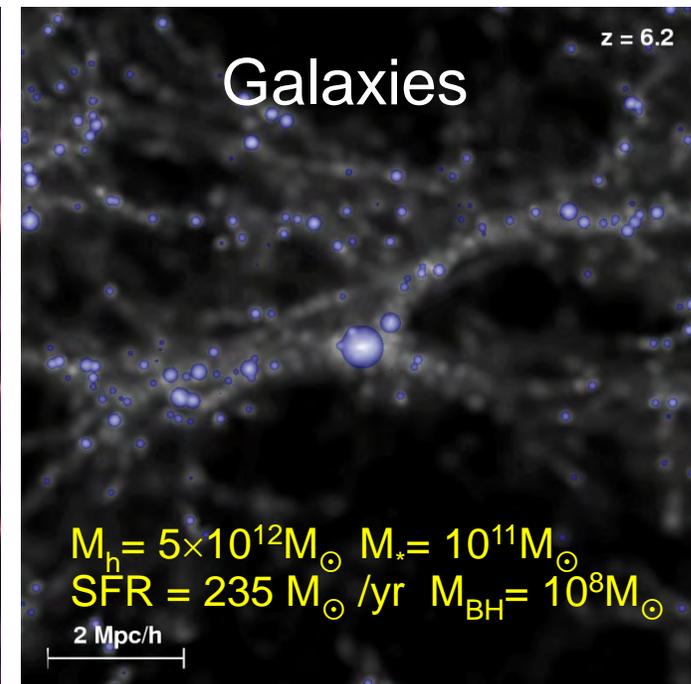
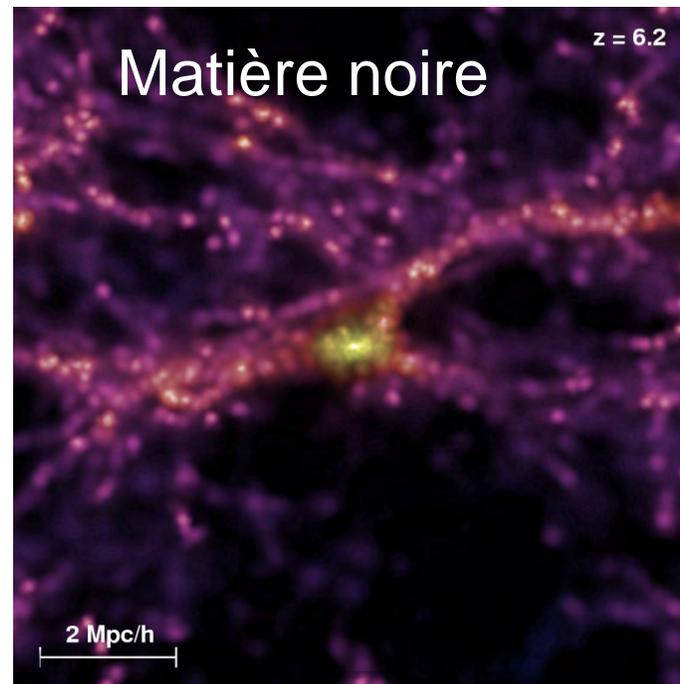
$$M_h = 5 \times 10^{12} M_\odot$$

Dépend de la masse
supposée des premières
graines

Descendant

$$M_h = 2 \times 10^{15} M_\odot$$

Les Quasars se
retrouvent dans les
galaxies cD au centre
des amas riches de
galaxies

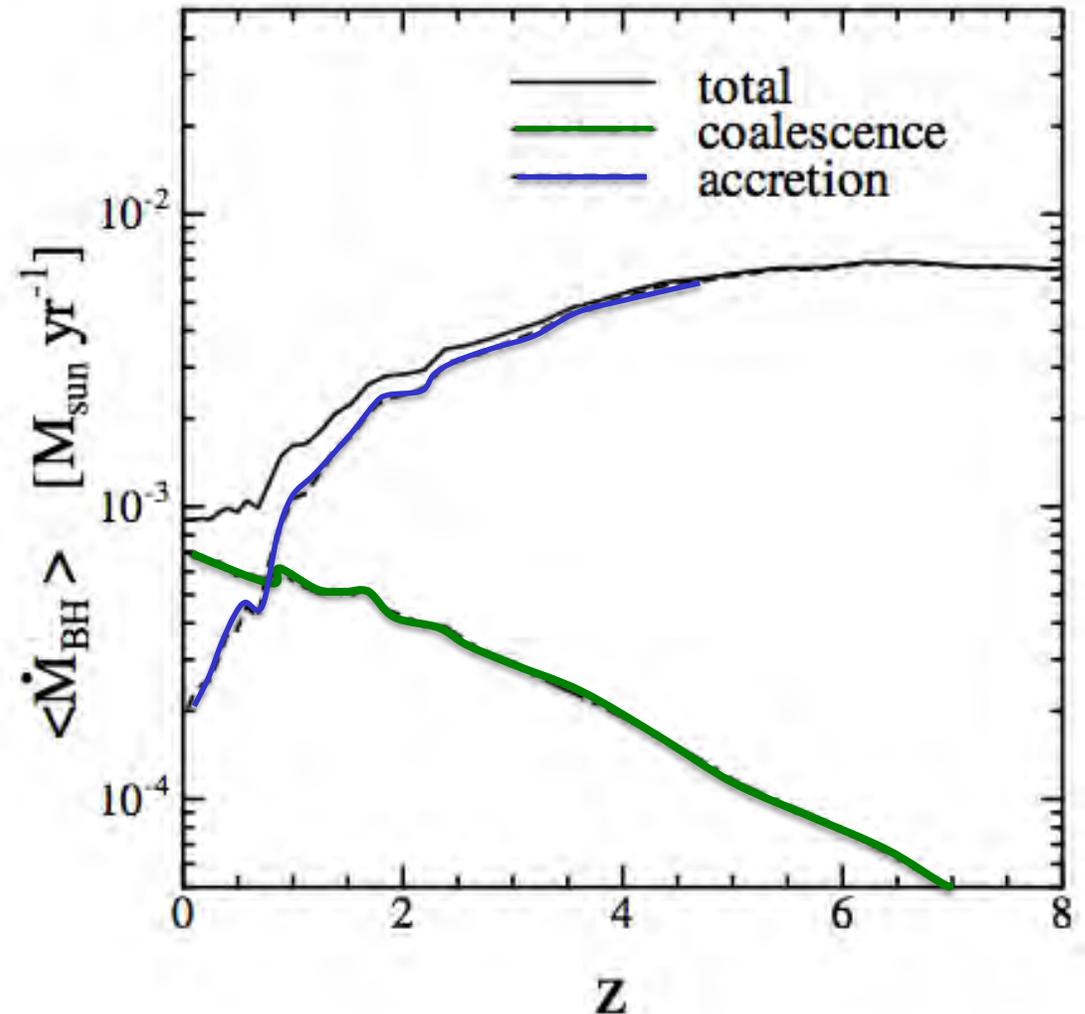


Croissance des trous noirs massifs

Enoki et al 2005

- La coalescence domine dM/dt pour $z < 1$
- Des halos aux trous noirs massifs
 - Physique du gaz
 - chauffage
refroidissement,
formation
d'étoiles
 - Accrétion
domine à grand z

Modèle SAM



Variations de la masse initiale

Calcul semi-analytique à partir d'Illustris original

(fseed=1) Graine $2 \times 10^5 M_{\odot}$

Puis modifiant fseed

λ gas spin: si trop élevé, la stabilité empêche l'effondrement, Z métallicité doit être faible

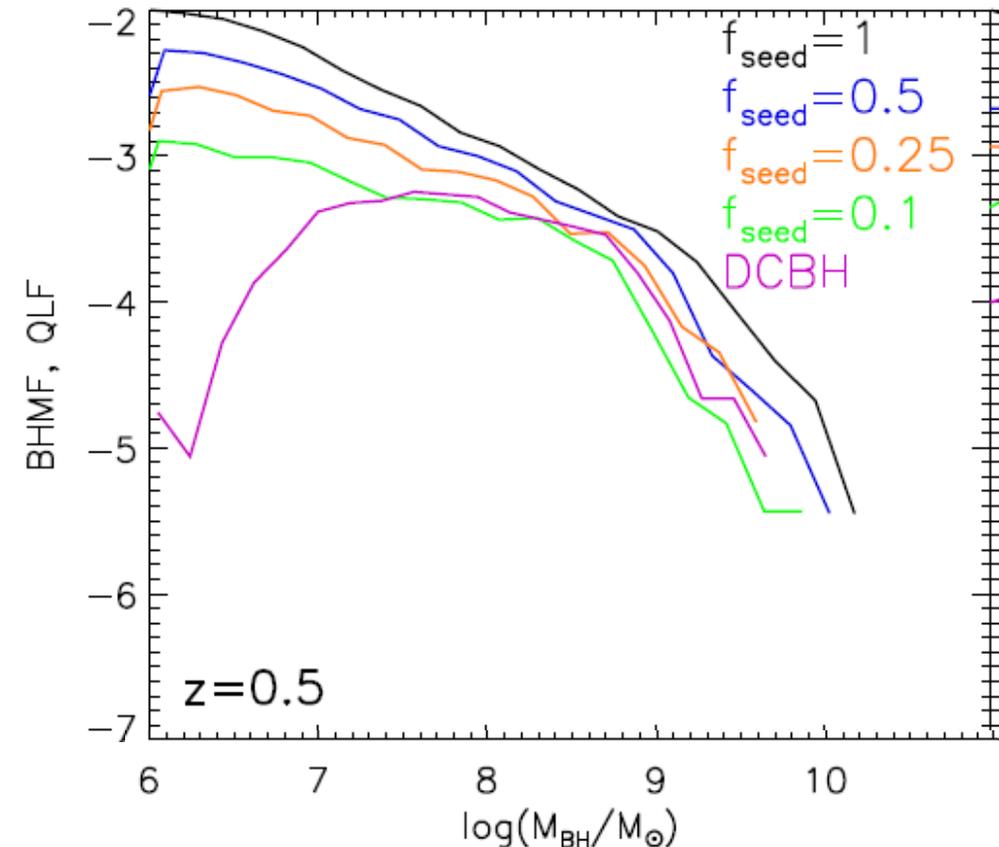
Même avec DCBH, le nombre de trous noirs massifs est bien inférieur à Illustris fseed=1

Selon fseed, le nombre de fusions de trous noirs varie de plus d'un ordre de grandeur

LISA et les pulsars (IPTA) devront trancher!

deGraf & Sijacki 2020

Illustris original fseed=1



DCBH = Direct Collapse
Effondrement direct

Comment former des trous noirs très tôt ?

- **Reste des super-étoiles Pop III**

- Des étoiles super-massives, car sans métaux

- $M_* \sim 10^3 M_\odot$, explosent en supernovae

- $M_\bullet \sim 10^2 M_\odot$



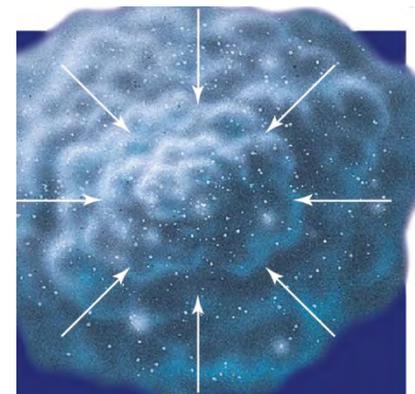
- **Effondrement direct (DCBH)**

- Nuages de gaz massifs et denses s'accumulent au centre

- Effondrement en étoile supermassive qui ne s'arrête pas de croître, jusqu'à l'effondrement en trou noir

- $M_* > 10^6 M_\odot$

- $M_\bullet > 10^4 M_\odot$

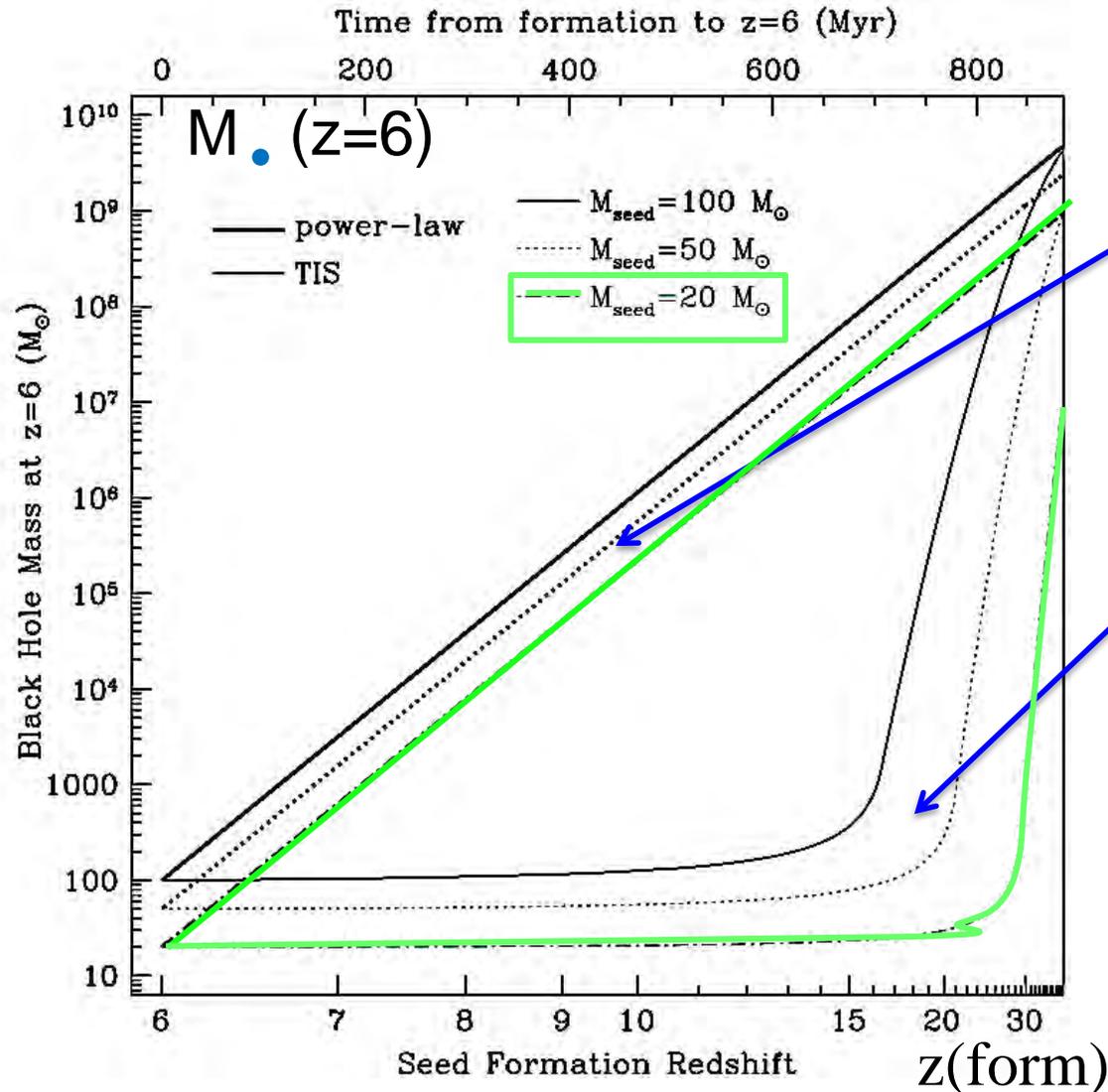


Formation des quasars à $z=6$

Possible avec des graines de $100 M_{\odot}$, sans super-Edd, mais alors il faut commencer à $z=30$

Accreter 60% du temps,

Et ne pas éjecter le trou noir !



Distribution de gaz piquée
Croissance continue à L_{Edd}

Ou en plateau, plus difficile

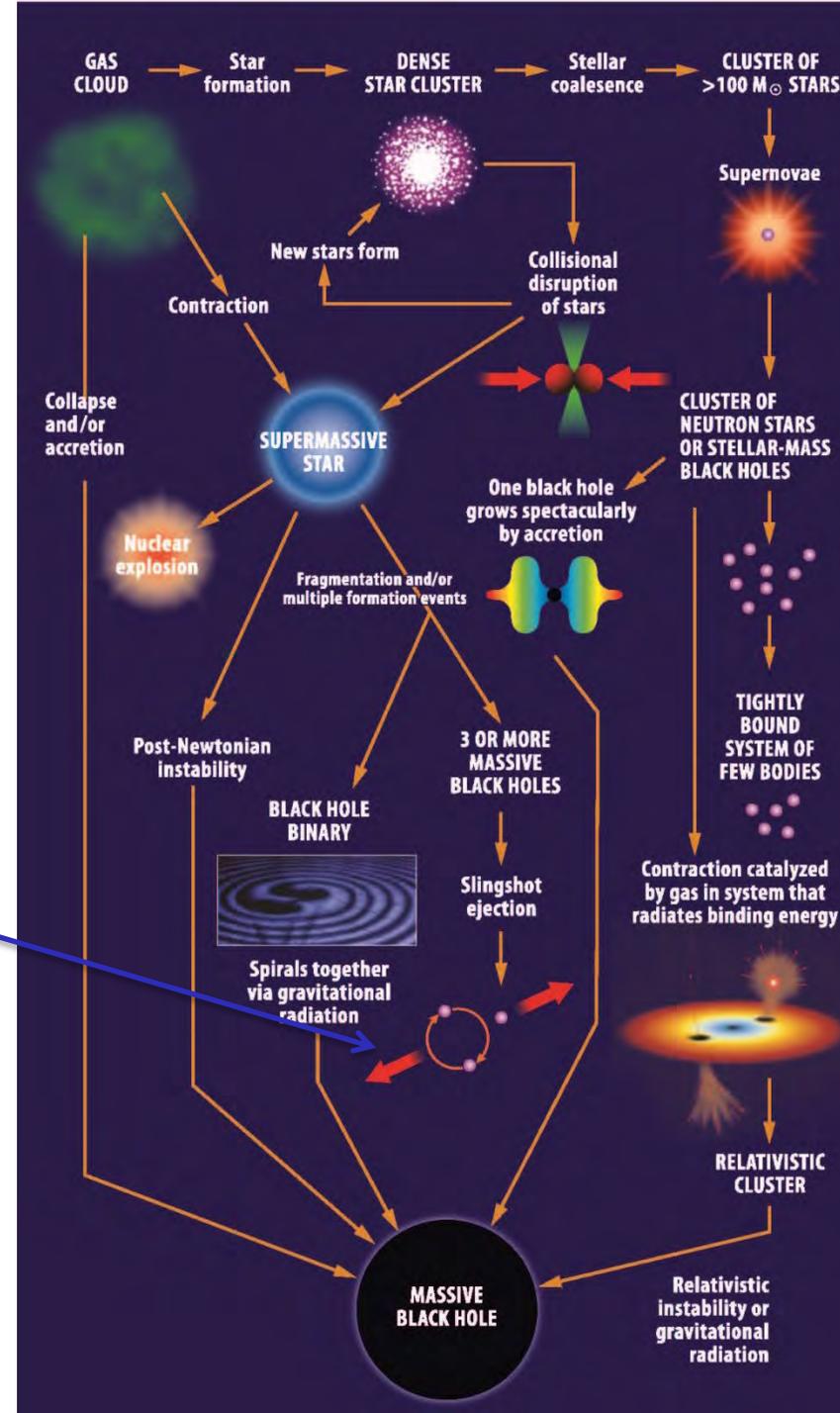
TIS = Truncated Isothermal
sphere

Tanaka & Haiman 2009

Scénarios possibles

Eviter l'effet de fronde
Ejection du 3ème trou noir

Begelman & Rees,
"Gravity's Fatal Attraction"
2nd Edition, 2010



Effet de fronde: éjection d'un 3^{ème} trou noir

Un des trous noirs (type 1, BLR) à $V \sim 1200 \text{ km/s}$

Type 2, obscurci, NLR: variabilité

Soit 3 trous noirs \rightarrow ou fusion d'un trou noir binaire
peut reculer (ondes GW asymétriques)

Évènement de qqes Myr

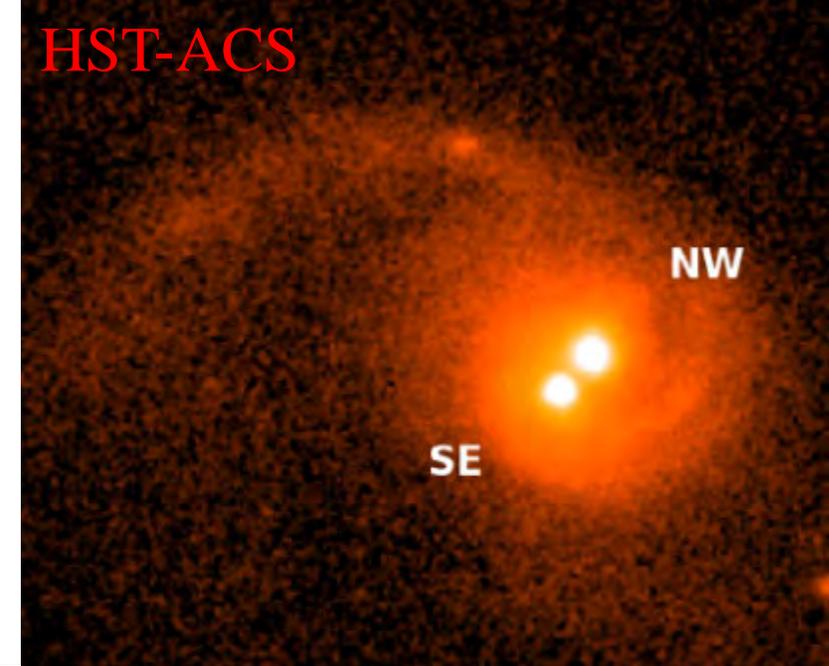
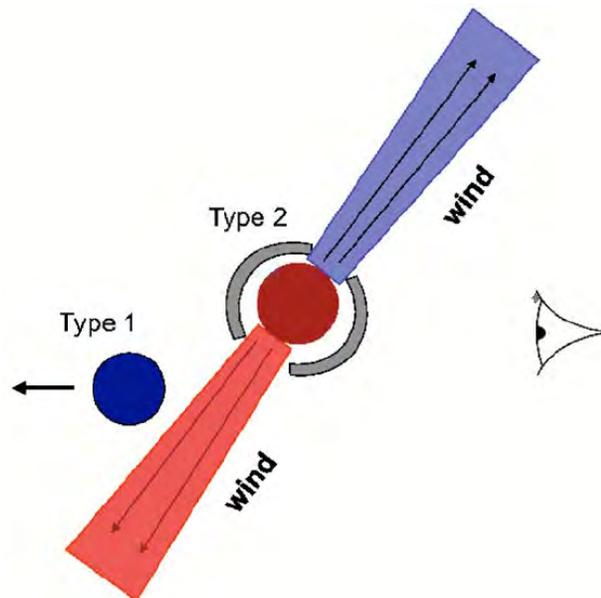
2 noyaux distants de 2.5kpc

La NLR et BLR en $H\beta$

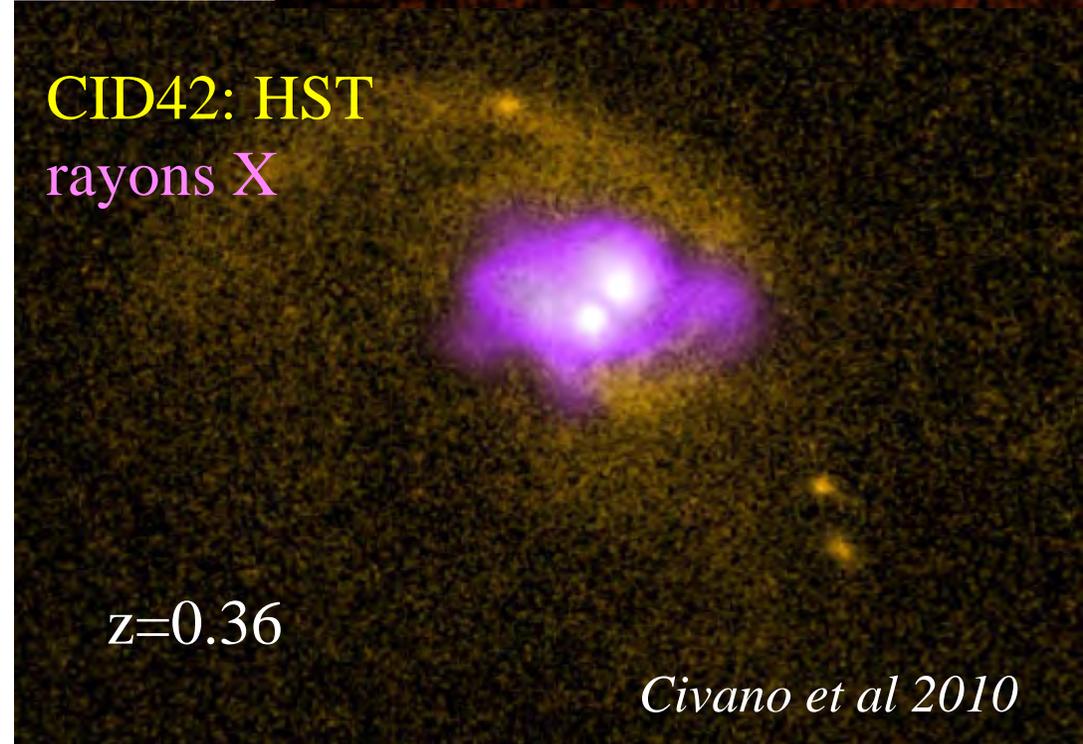
sont distants de 1200km/s

Rayons-X absorption/emission

Profil P-Cygni



CID42: HST
rayons X



$z=0.36$

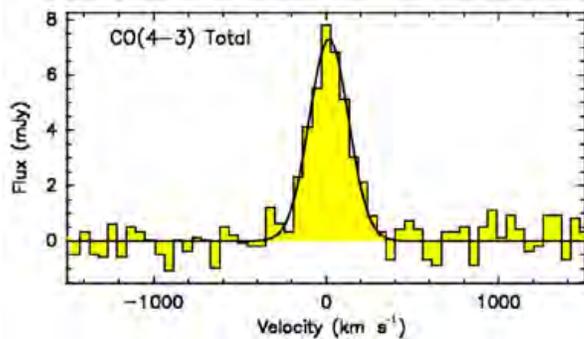
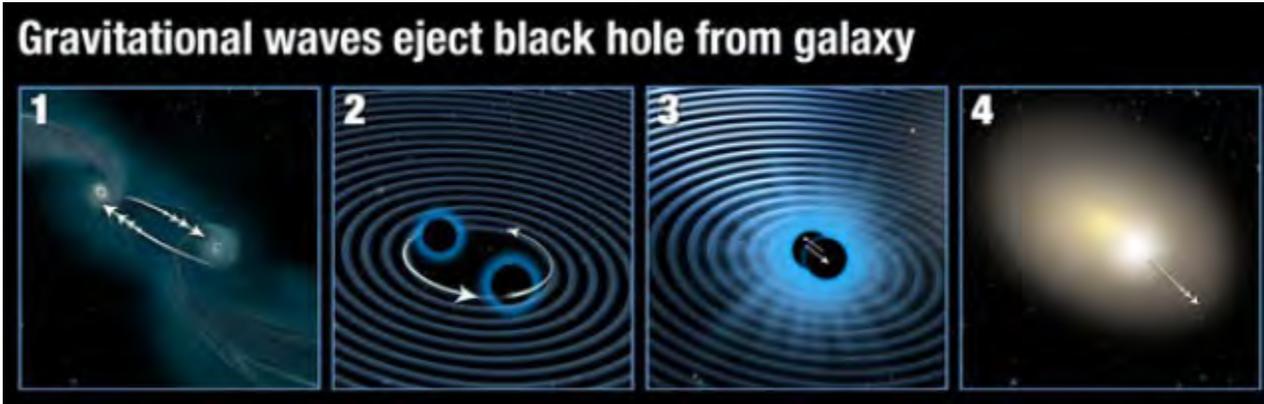
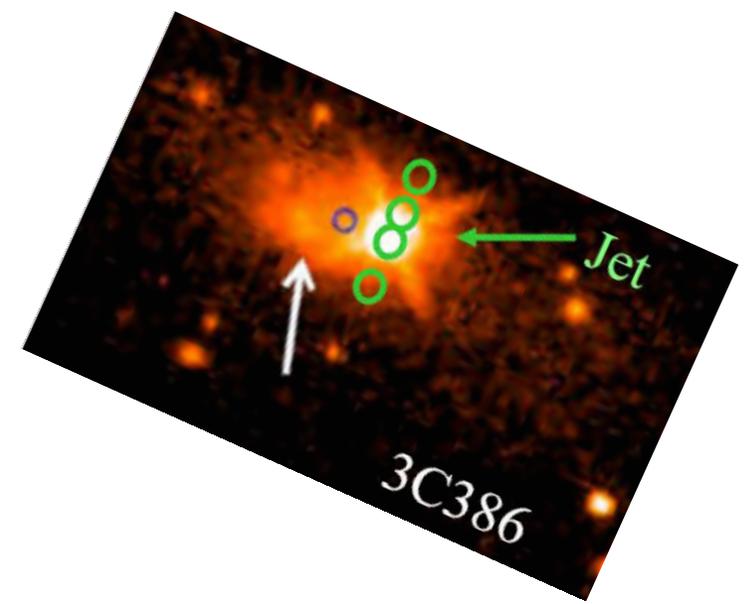
Civano et al 2010

Trou noir éjecté de sa galaxie

3C386: quasar au centre d'un amas à $z=1$

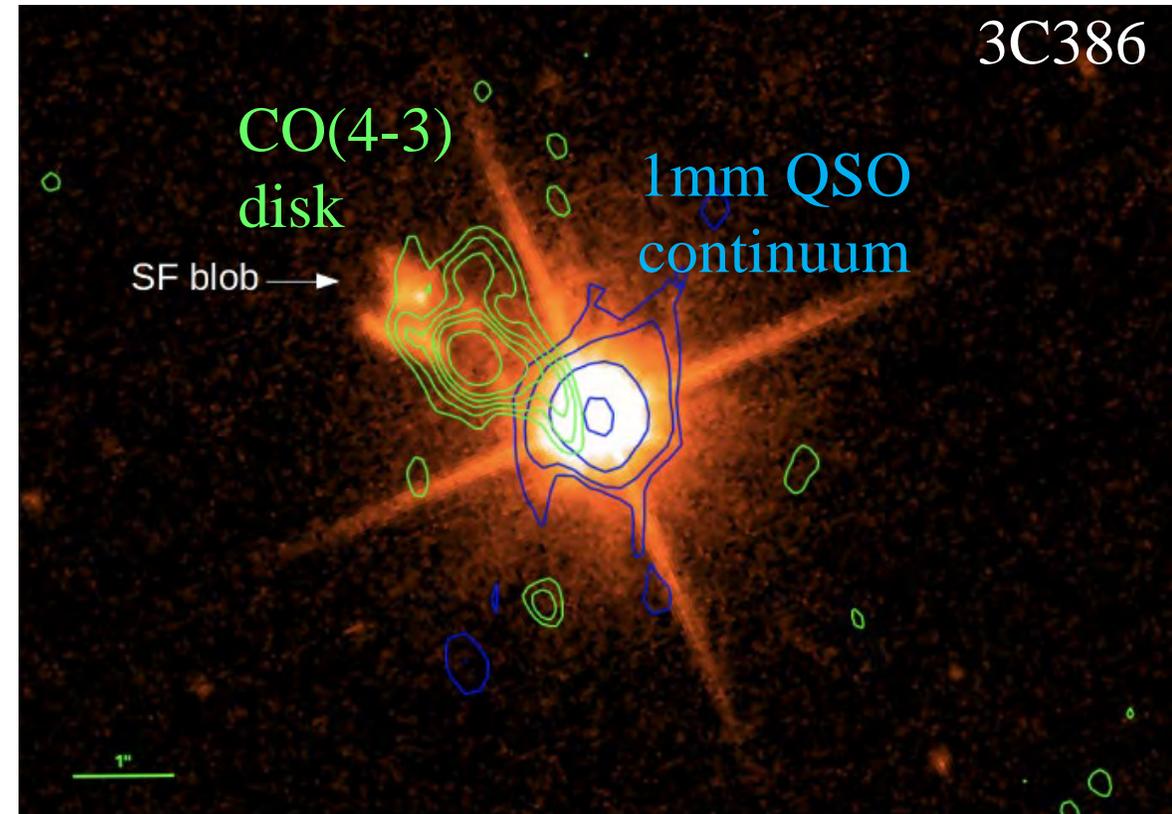
L'AGN radio-loud (BLR) est offset de $1''$, et 2000km/s par rapport au centre de la galaxie (NLR + CO)

Fusion de trous noirs \rightarrow émission GW anisotrope et recul



$$M_{\text{H}_2} = 8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

Castignani et al 2022



Formation des étoiles Pop III

Abel et al 2002

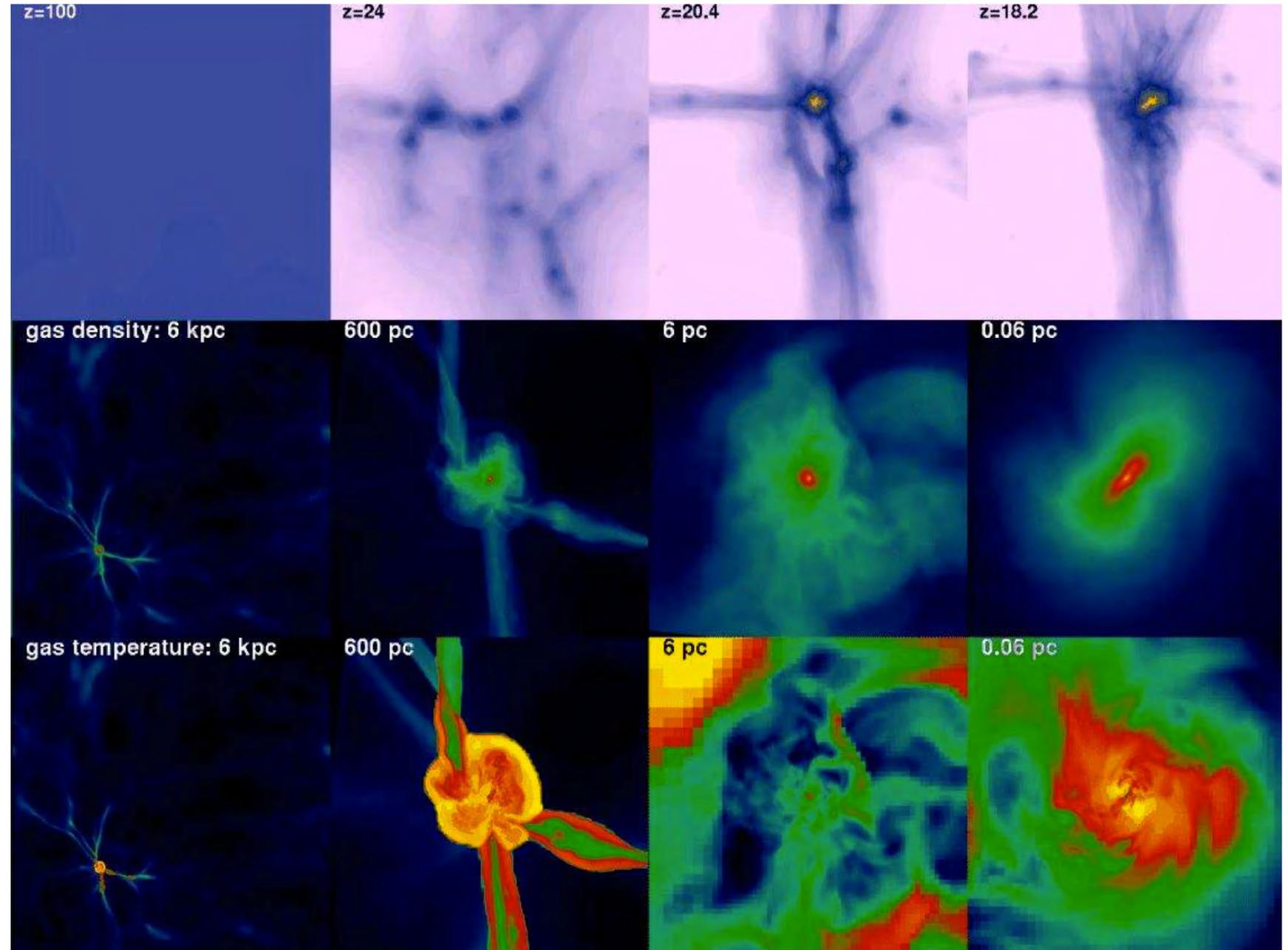
Le gaz primordial se refroidit grâce à H_2 et forme des étoiles dans des **mini-halos**

Pas de métaux, T élevée

Deviens opaque et ne se fragmente plus

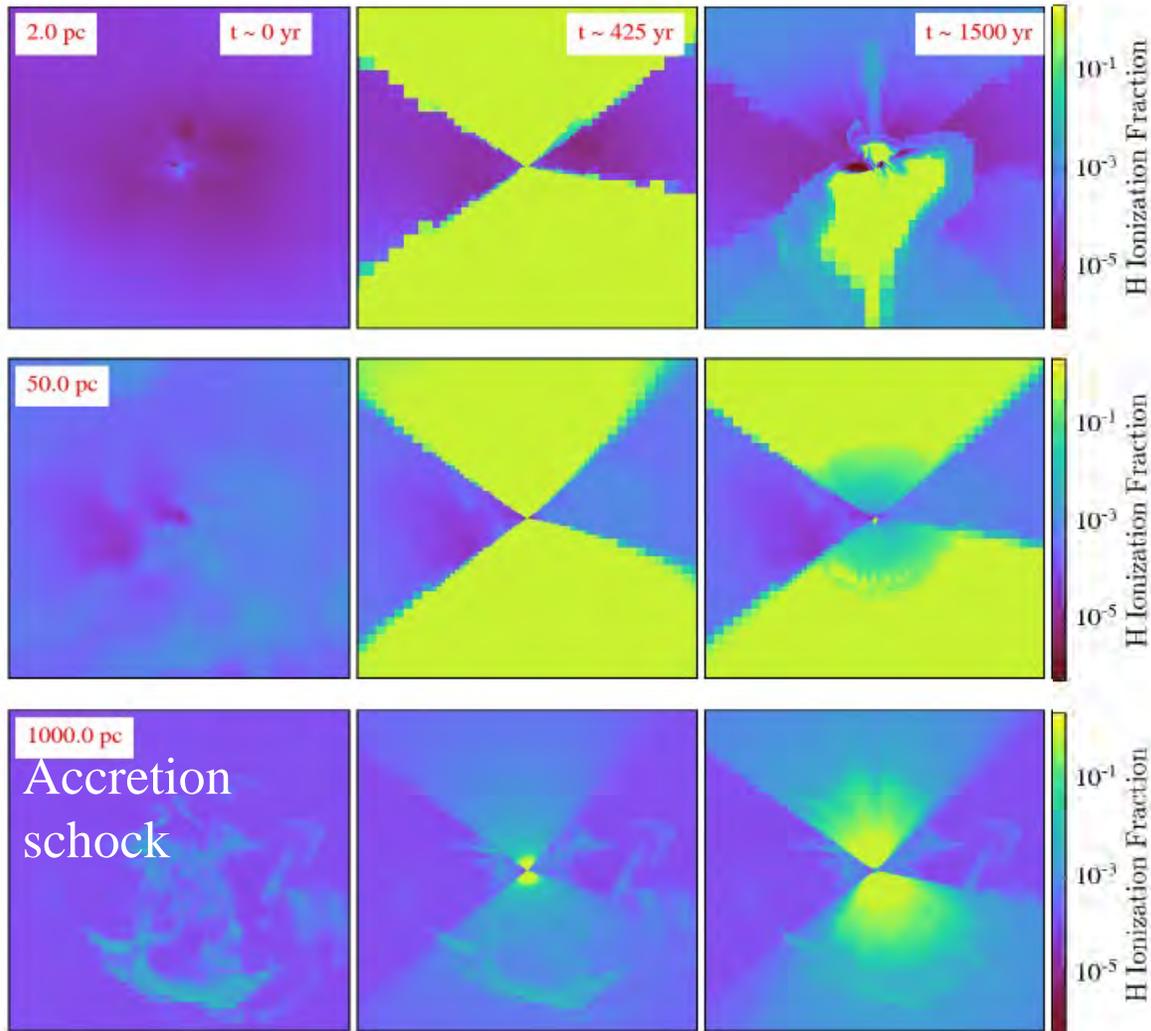
Masse des étoiles qq $100 M_{\odot}$

Feedback?

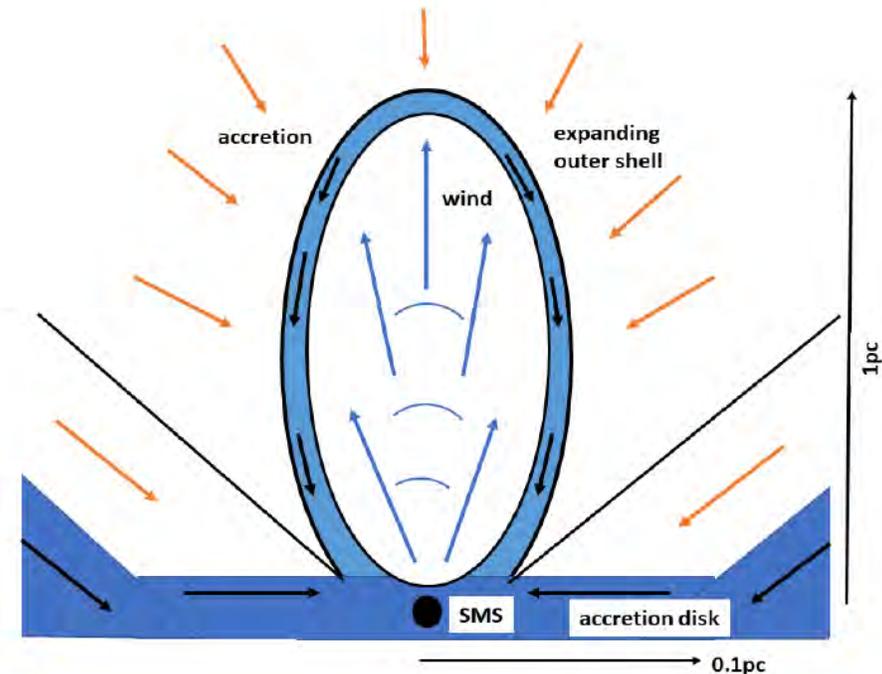
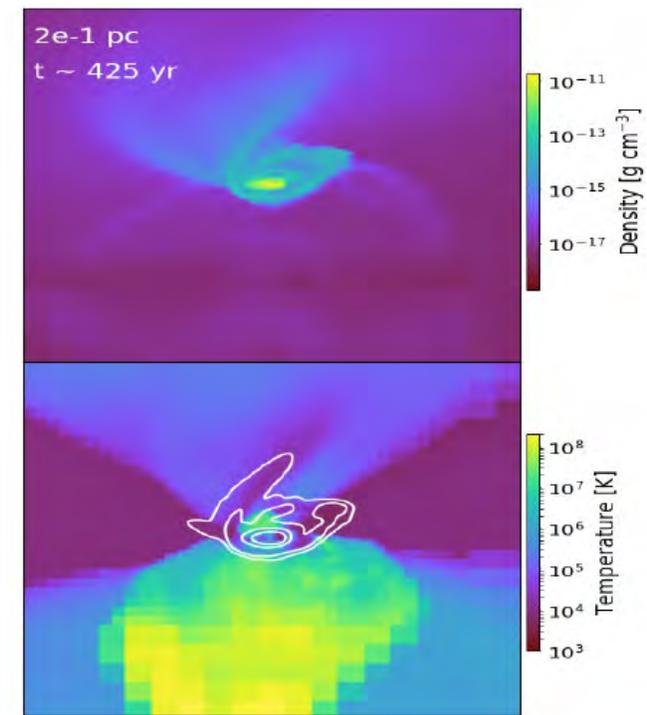


Effets du feedback

Luo et al 2022



Début à $z=16$, formation d'une étoile super-massive SMS, $10^5 M_{\odot}$, puis SMBH



Galaxie CR7 z=6.6: Ly α , HeII

Emetteur Ly α intense 10^{44} erg/s

Raie HeII-1640Å

Nécessite des étoiles PopIII

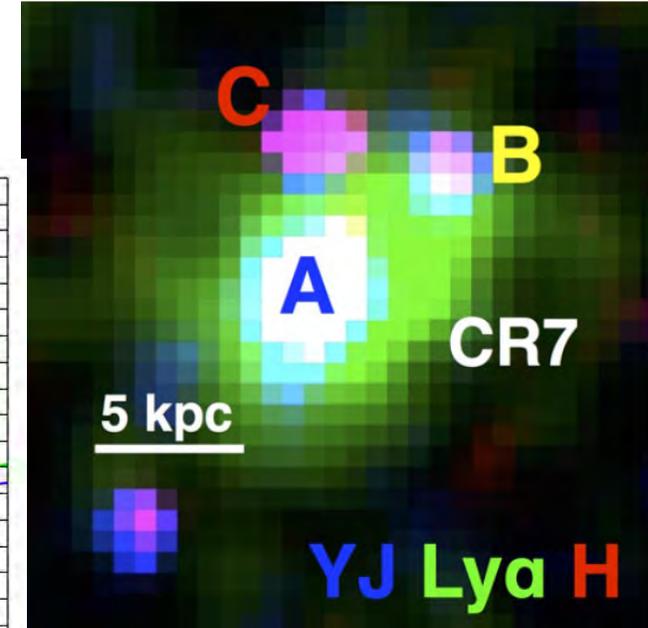
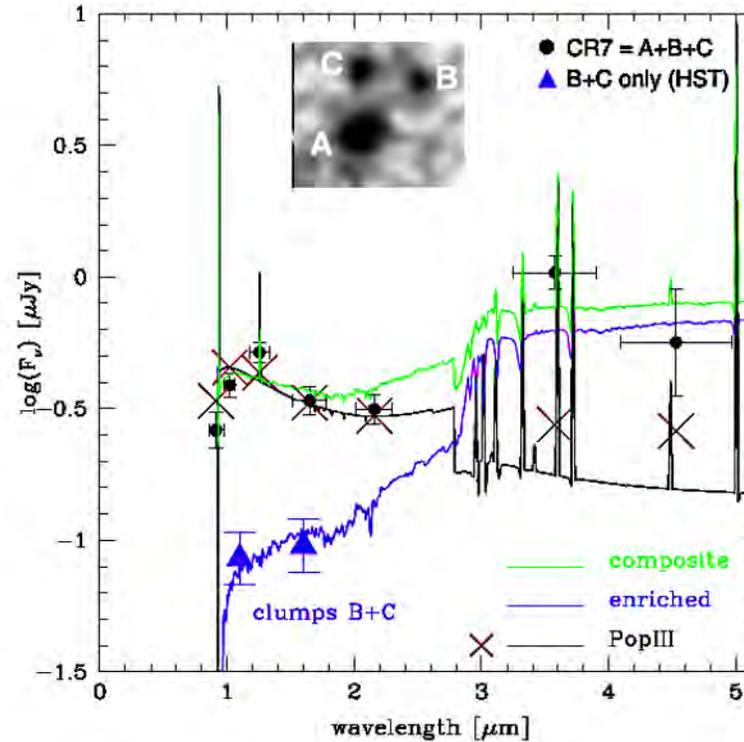
T= 100 000 K

Couleur très bleue de A ($\beta=-2.3$)

B+C rouges, contiennent toute la masse

→ La formation des étoiles PopIII migre du centre (BC) vers le bord (A)

Spectre ne favorise pas AGN dans CR7
Ou bien DCBH (mais pas de X, ni BLR)



→ Une onde de PopIII se forme en B, puis ionise l'espace sur 1 Mpc, l'onde PopIII se propage en A, permet au photons UV d'échapper et de mieux réioniser (100Myr)

Galaxie CR7: evidence d'un DCBH?

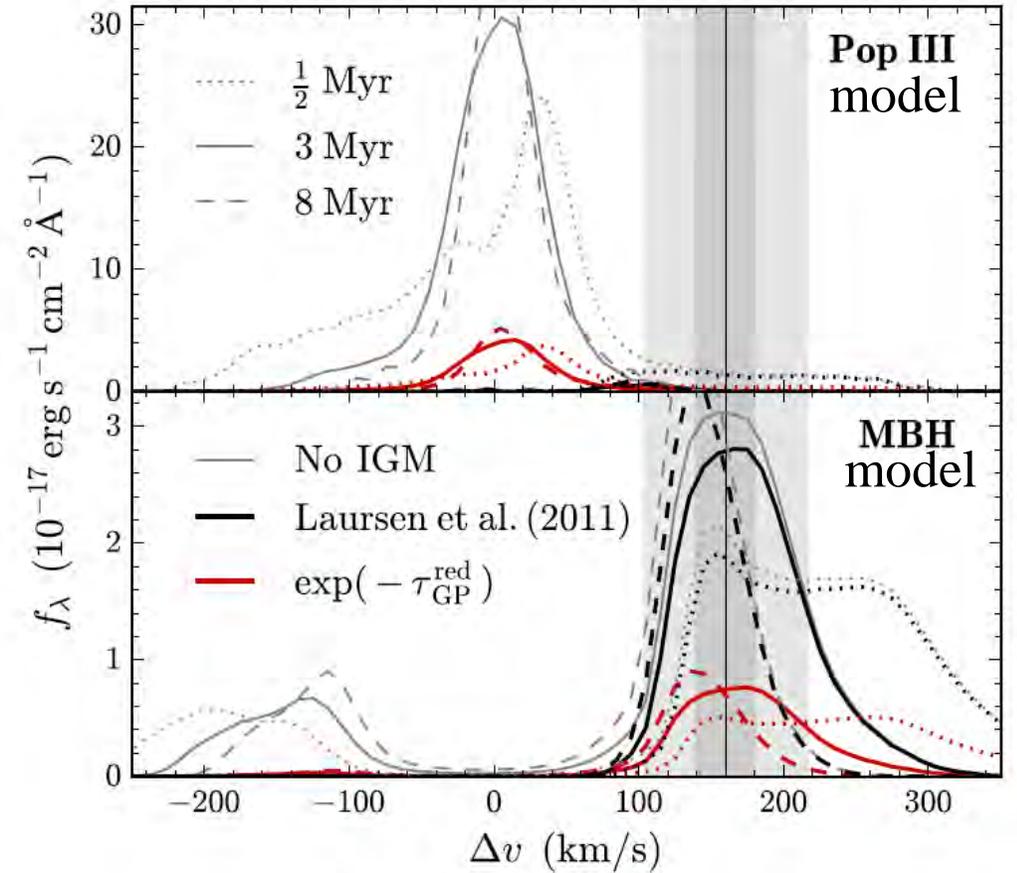
Différence de vitesse entre Ly α et HeII de 160km/s
Emission de Ly α sur 16kpc

Les étoiles PopIII ionisent, mais ne peuvent pas créer l'outflow, CR7 extrêmement pauvre en métaux

→ Doit y avoir un noyau actif, et un trou noir massif obscurci (Compton-thick)

Le trou noir a un rayonnement plus dur, il ionise moins, Les photons sont donc piégés, et une coquille de gaz peut se propager → outflow de 160km/s

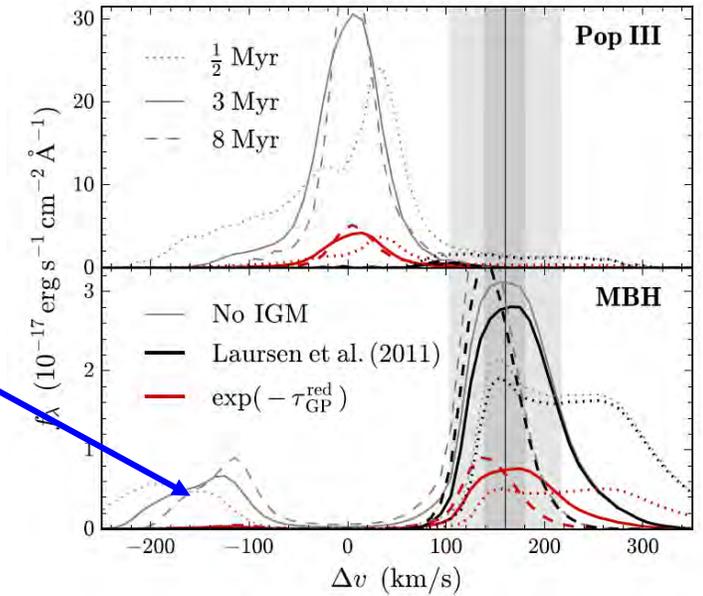
$M_{\text{vir}} \sim 10^9 M_{\odot}$



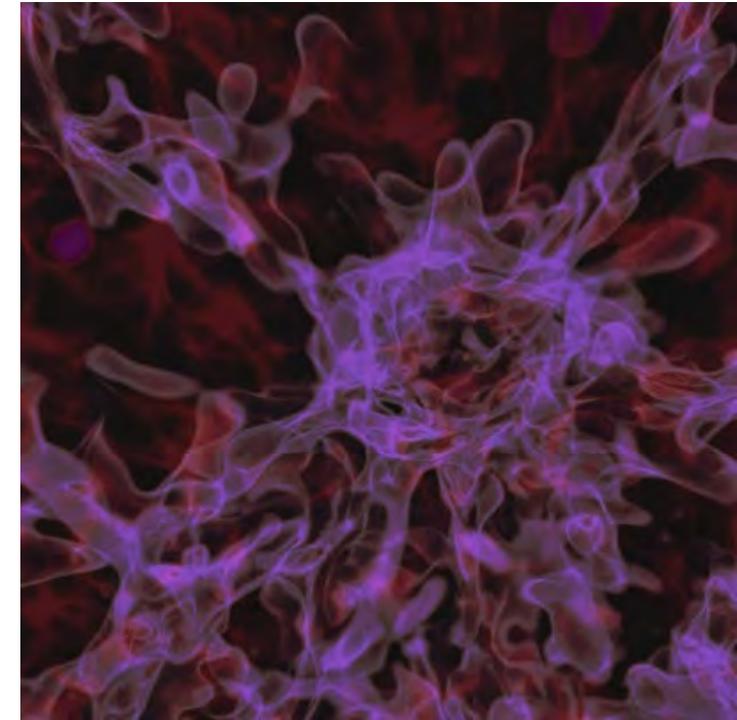
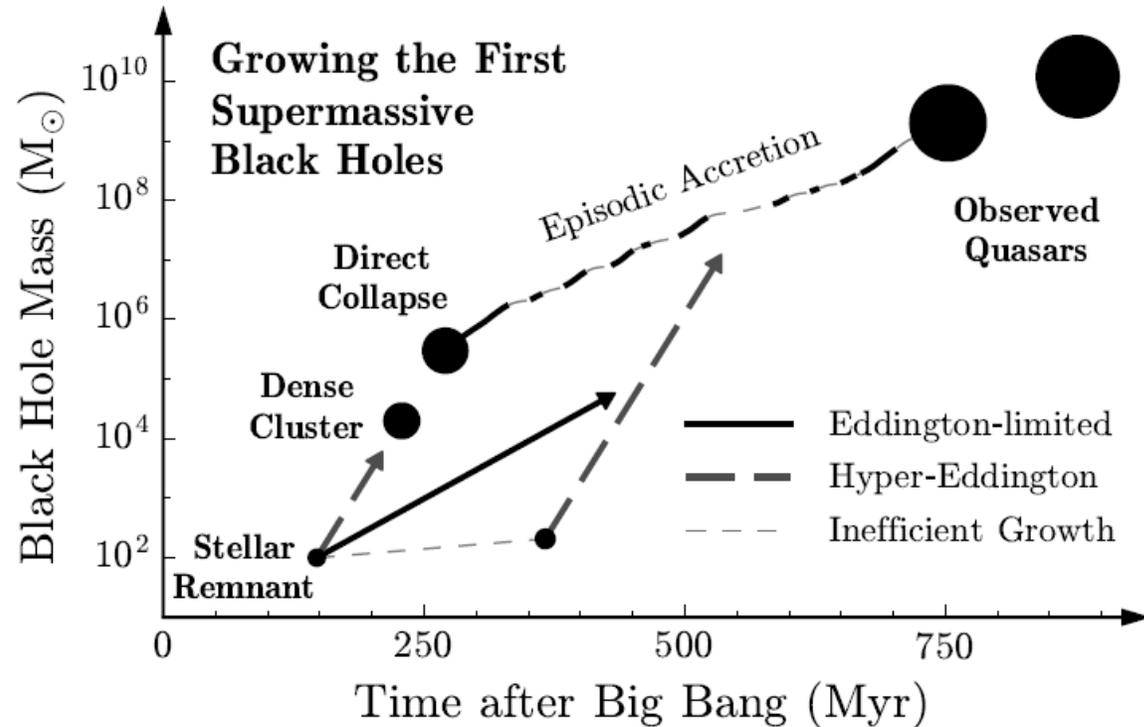
CR7 et les premiers trous noirs

L'effondrement direct du gaz dans une étoile géante (ou amas) forme un trou noir de $10^{5-6} M_{\odot}$

→ Permet les SMBH de $10^9-10^{10} M_{\odot}$



Coquille de gaz
→ outflow



Smith et al 2017

Formation d'une "QUASI-STAR"

Avec un trou noir à l'intérieur

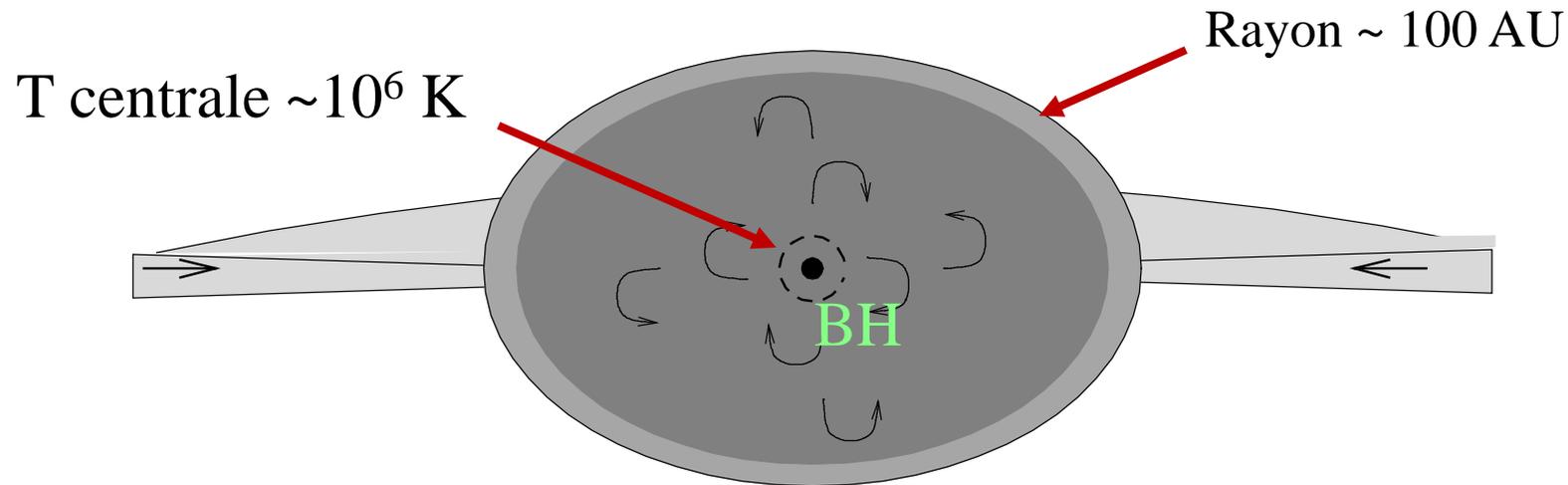
→ Dès que le taux d'accrétion $1 M_{\odot}/\text{yr}$, $z \sim 10-15$ (Pop III $z > 15-20$)

Une enveloppe convective, soutenue par la pression

Température photosphérique décroît avec la croissance du trou noir

A $T \sim 5 \cdot 10^8 \text{K}$, neutrinos refroidissent, causant **l'effondrement direct**

→ $M_{\bullet} = 10^{4-5} M_{\odot}$



Volonteri & Begelman 2010

Si l'enveloppe est 10 fois M_{BH} , elle peut s'évaporer, ou bien, après 100 Myr, explose en supernova
 $M_{\text{BH}} = 10^{4-6} M_{\odot}$



Des trous noirs massifs partout?

Elliptiques Géantes, S0



Les trous noirs
les plus massifs

$10^8-10^{10} M_{\odot}$

Spirales



Masse des trous
noirs prop. masse
du bulbe

$10^6-10^8 M_{\odot}$

Naines



qq trous noirs
mais pas
toujours

$10^4-10^5 M_{\odot}$

Amas
globulaires?



Peut-être

??

IMBH: est-ce qu'ils existent?

IMBH= Trous noirs de masse intermédiaire 10^2 - $10^5 M_{\odot}$

Doivent exister, si on ne peut pas **directement** former un trou de $10^6 M_{\odot}$

Ces trous noirs prennent un temps très long à tomber
au centre $t_{\text{fric}} \propto 1/M_{\text{BH}}$

Amas globulaires (M15?, G1 dans M31)

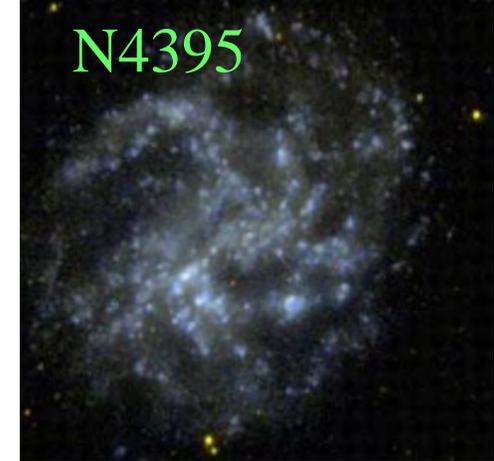
AGN dans les galaxies naines: NGC 4395 (*Filippenko 03, Merritt 13*)

$M_{\text{BH}} \sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$ (Seyf 1, pas de bulbe)

Faible ionisation, $L_{\text{bol}}/L_{\text{E}} = 2 \cdot 10^{-2}$ - $2 \cdot 10^{-3}$

pb des naines: amas stellaires nucléaires de $\sim 10^6 M_{\odot}$

Dans M33 $< 10^3 M_{\odot}$, facteur 10 en-dessous de M - σ



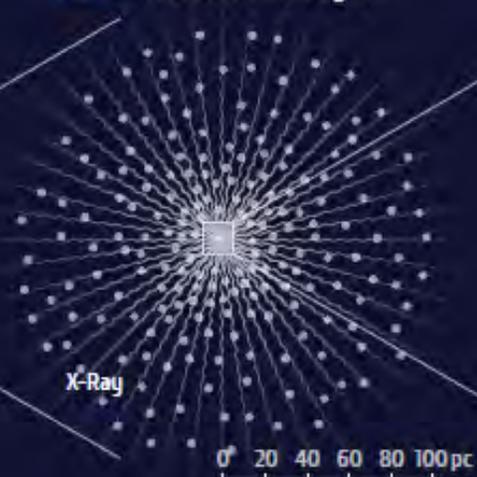
Détection du noyau actif?

Galaxy with an AGN



0 5 10 15 20 kpc

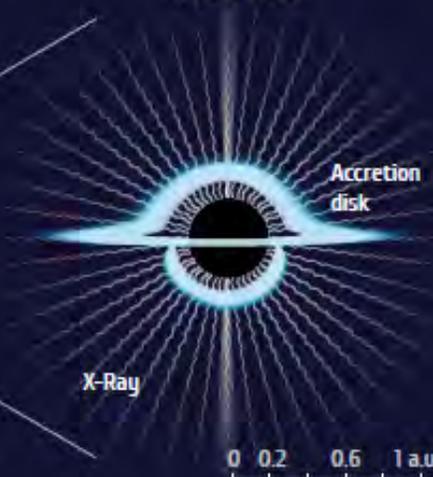
NLR — narrow line region



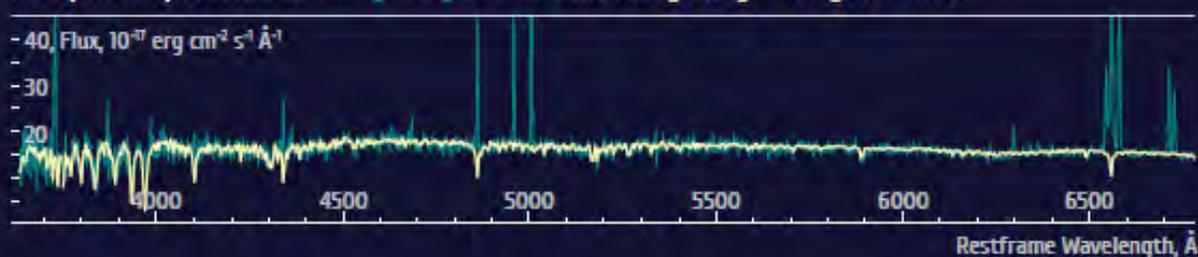
BLR — broad line region



Black hole



An optical spectrum of the galaxy centre and the galaxy starlight model



H α + [NII] emission lines



An optical spectrum of the galaxy centre with the galaxy starlight model subtracted



Narrow + Broad line model



Relation M_{BH} - M_{bulge}

305 candidats IMBH

$$3 \cdot 10^4 M_{\odot} < M_{\text{BH}} < 2 \cdot 10^5 M_{\odot}$$

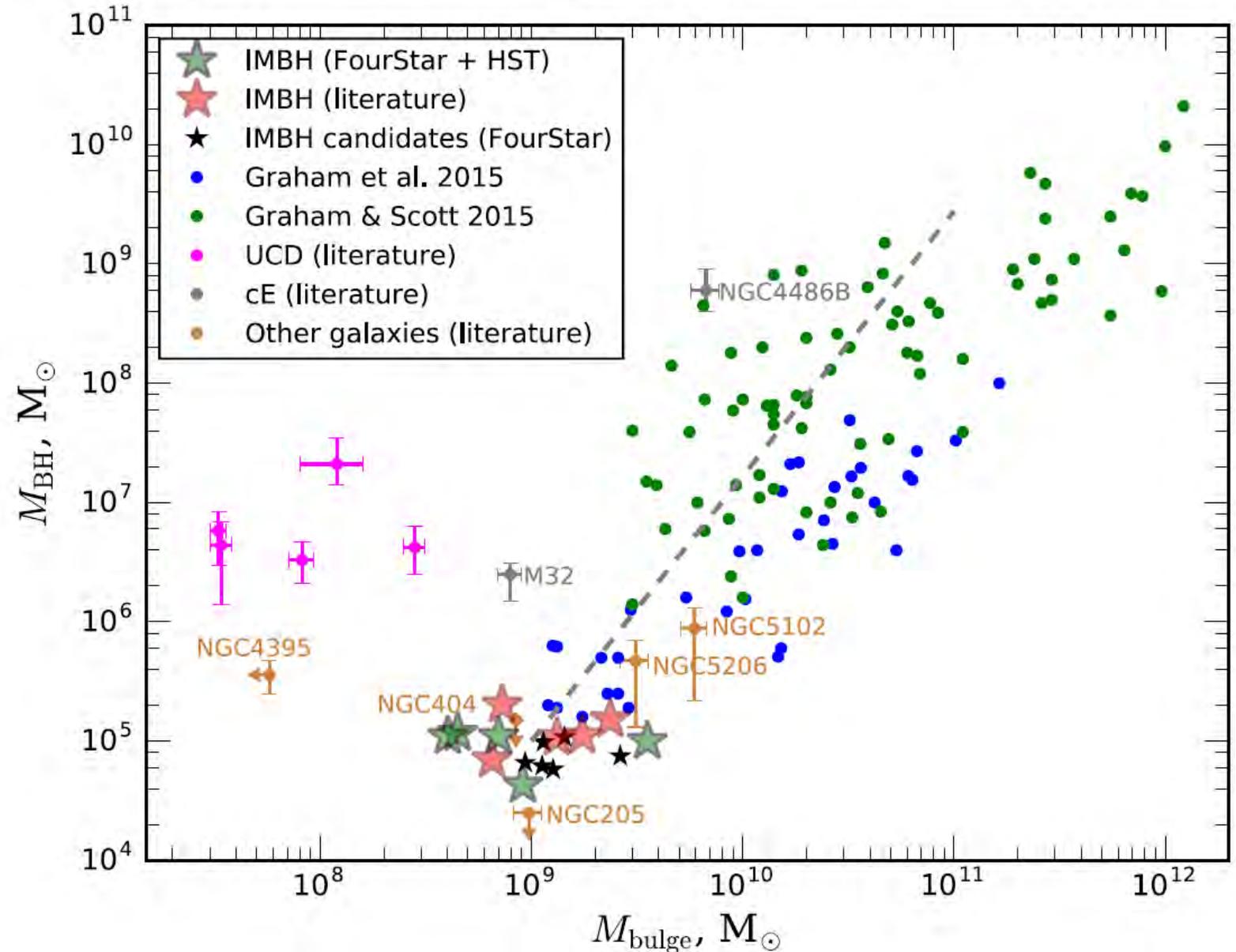
10 ont des rayons X

Possibles AGN

Suivent la relation M - σ

Chilingarian et al 2018

IMBH= Intermediate Mass BH



ULX Sources X Ultra-lumineuses

Depuis les années 1980, on détecte des sources de rayons X de luminosité exceptionnelle $L > 10^{39} \text{ erg/s} = L_{\text{Edd}} (M=10 M_{\odot})$

Il en existe en moyenne une par galaxie: $10^{39} < L < 10^{41} \text{ erg/s}$

Autres possibilités: --une binaire X avec un émission concentrée dans un faisceau vers l'observateur

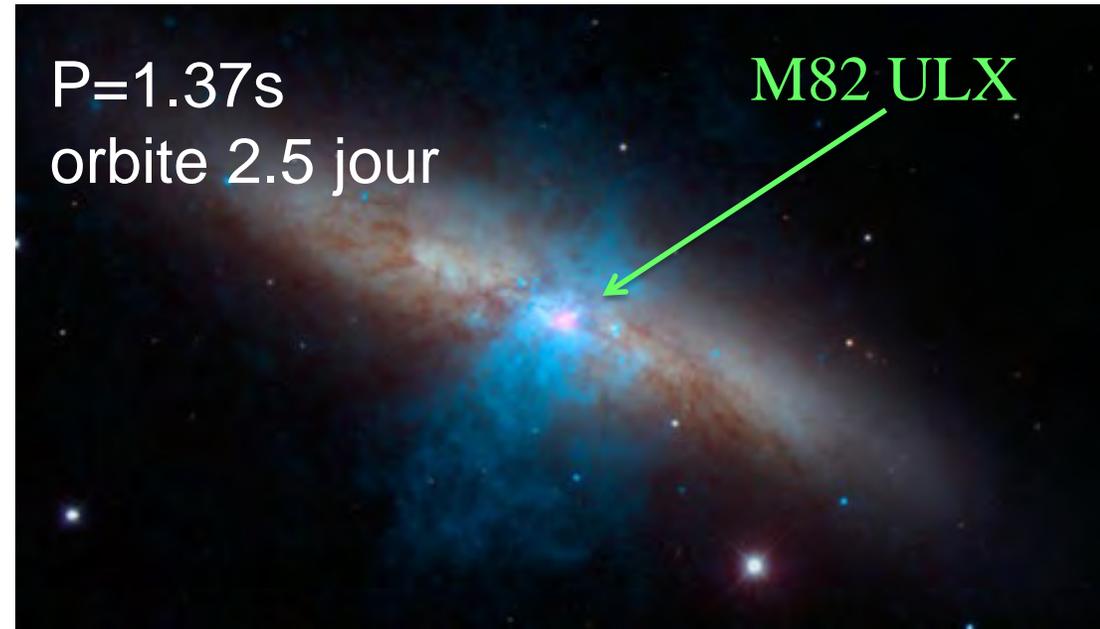
Bachetti et al 2014: pulsar dans M82

--Luminosité supérieure à L_{Edd}

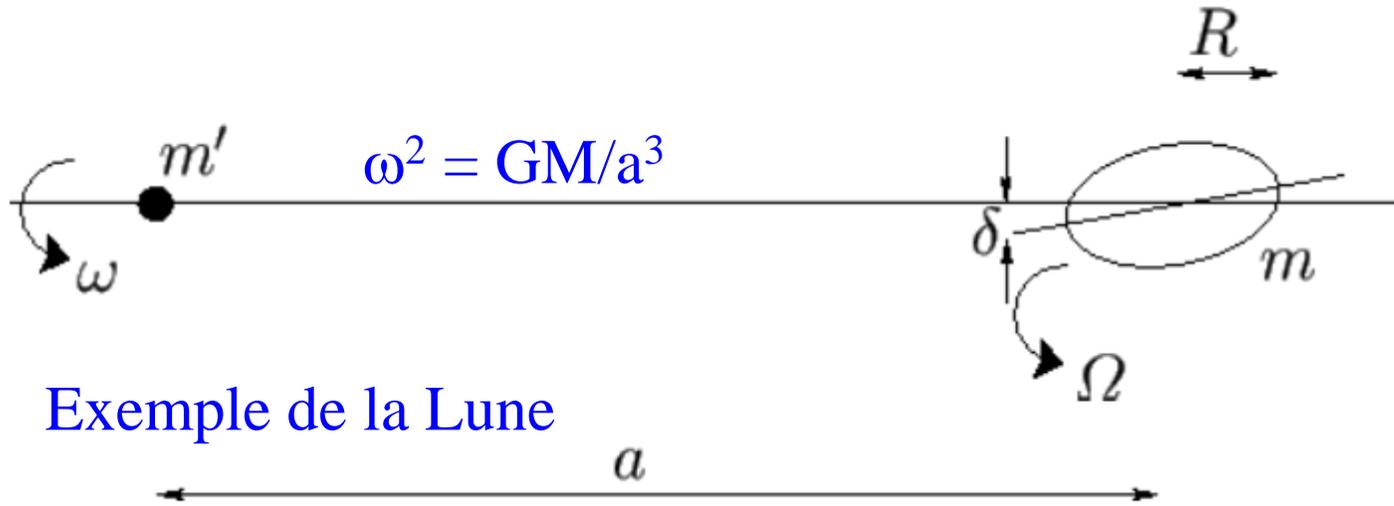
La plupart observées avec des pulsations

→ pulsars, étoiles à neutron

rayonnant à $100 L_{\text{Edd}}$



Accrétion sur une étoile à neutron



Exemple de la Lune

δ Positif $\rightarrow m'$ est accélérée

Observer les pulses nécessite une coïncidence entre R_m et R_{sph} (sphérisation), où la pression de radiation éjecte le gaz

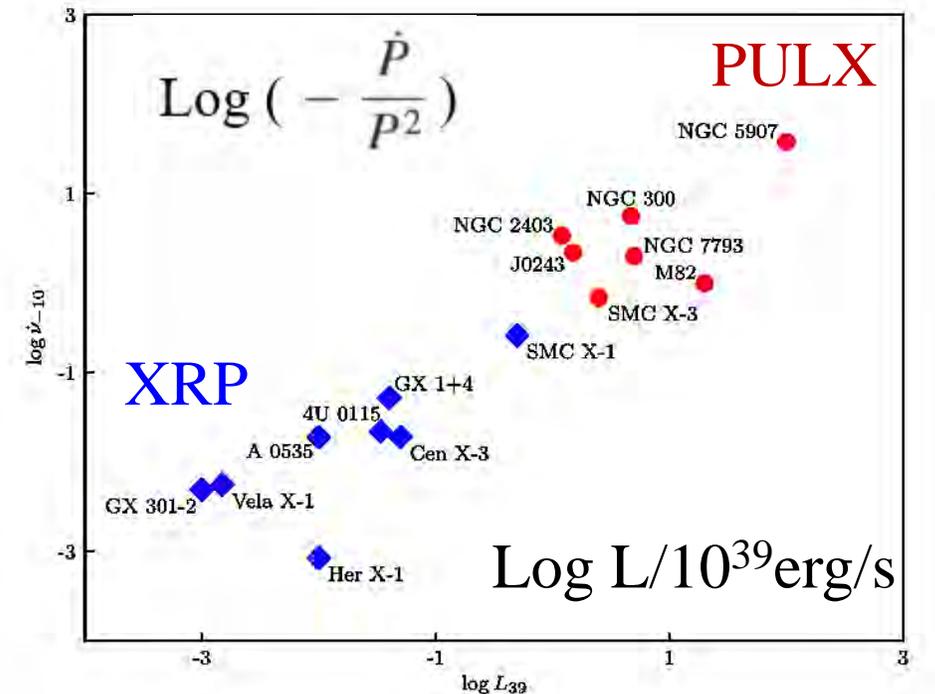
Pour $R < R_m$ le champ magnétique entraîne les particules le long des lignes de champ

\rightarrow Il se peut qu'une grande majorité des ULX soit des pulsars

Il faut que la matière s'approche à une distance telle que $\omega > \Omega$

Sinon la matière est repoussée par les couples de marée

\rightarrow Req lorsque $\omega = \Omega$ Req $\sim R_m$



Trous noirs dans les galaxies naines?

Ferré-Mateu et al 2021

937 naines: 580 UCD et 357 cE

UCD $10^{6-8} M_{\odot}$ **CE** $10^{8-10} M_{\odot}$

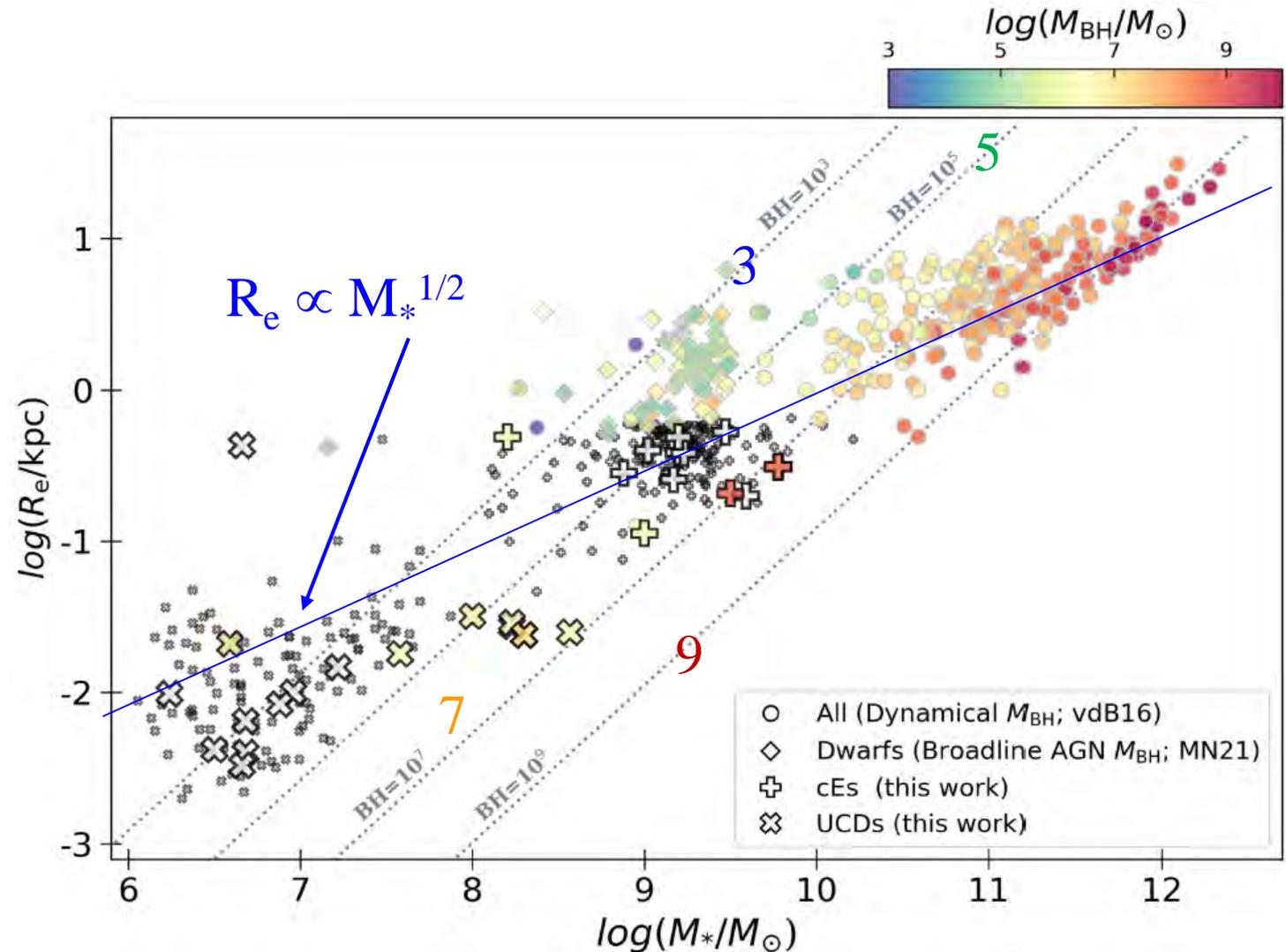
La luminosité X: certains sont des candidats AGN, 1.2%

Une dizaine

Bien plus faible que les 10% des galaxies plus massives

Calcul de M_{BH} : dynamique?
Mais aussi M/L croît vers le centre

→ Plan fondamental (R_e , M_* , M_{BH})

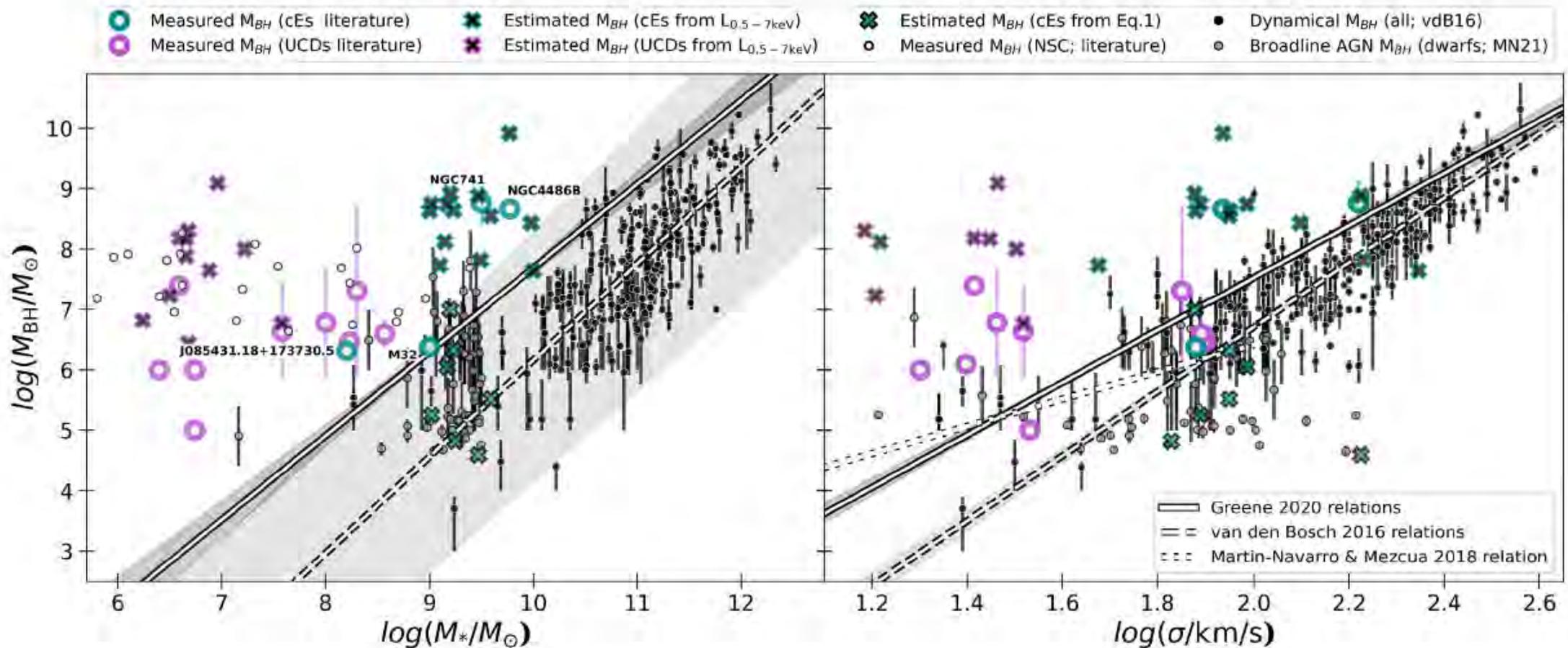


IMBH ou bien SMBH ?

Ferré-Mateu et al 2021

Les trous noirs sont plus massifs qu'attendu

→ Ces UCD/cE pourraient provenir de galaxies plus massives qui ont été épluchées dans les amas de galaxies

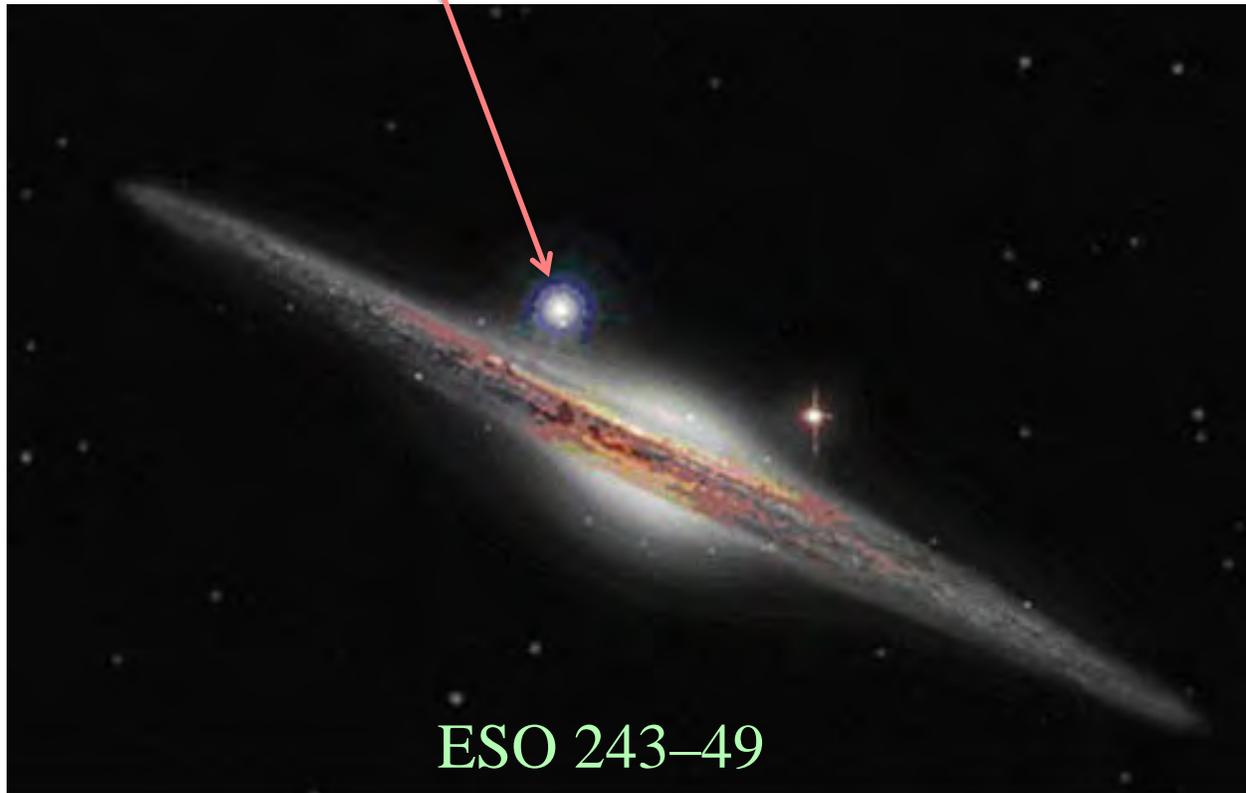


HLX-1: le premier IMBH?

ULX dans ESO 243–49, $D=95$ Mpc, 10^{42} ergs/s, 10^2 - $10^5 M_{\odot}$ BH

Farell et al 2009, Webb et al 2010, Godet et al 2009

Soria et al 2013: $H\alpha$ même redshift, associée à ESO243-49



Variation 4-8 semaines

→ Disque d'accrétion

$R \sim 1$ AU, $e=0.95$

Etoile compagnon perd de la masse au péricentre

$10^{-5} M_{\odot}$ /an pourrait durer 0.1 – 1 Myr

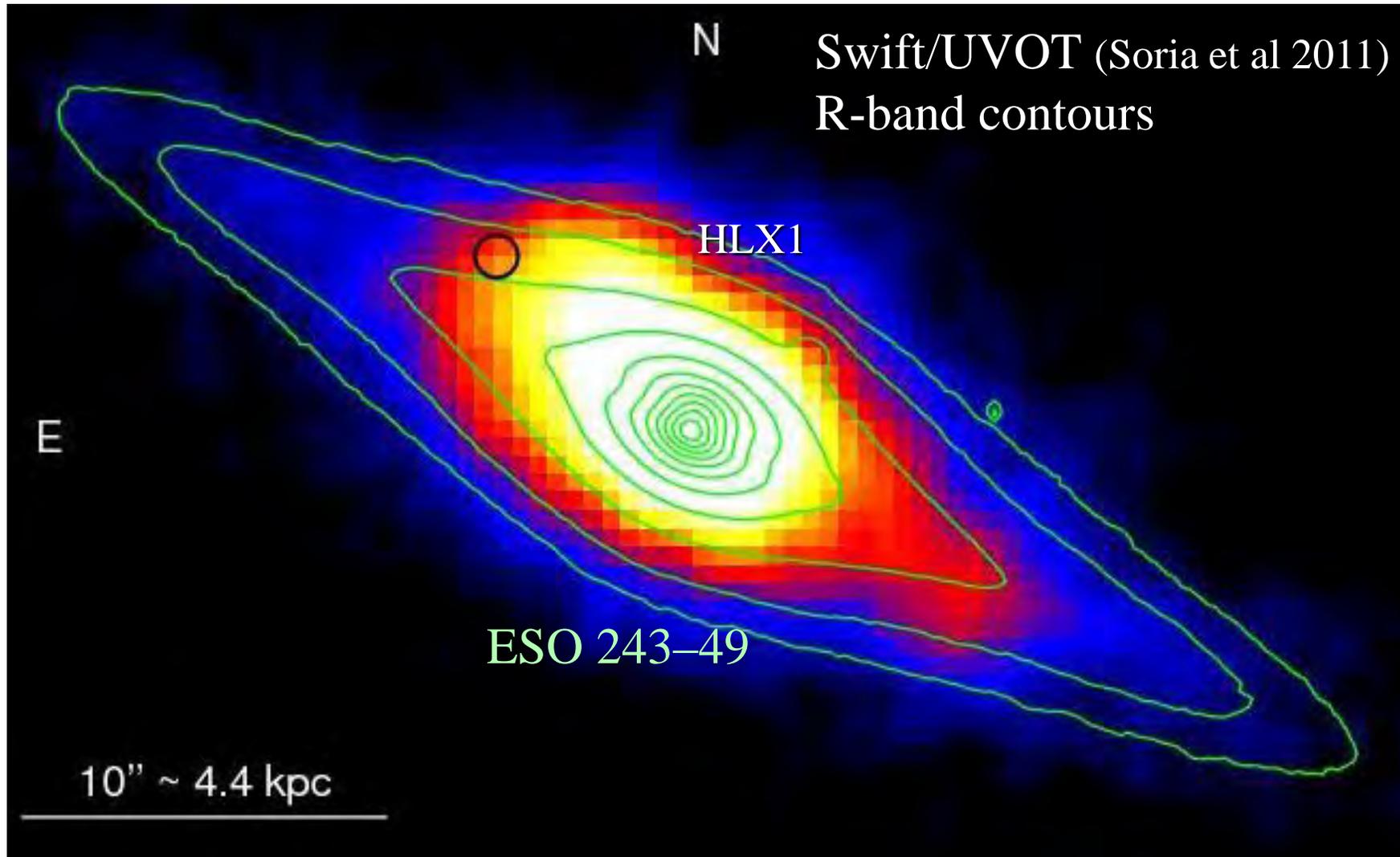
Dans un amas nucléaire?

Sursauts X

Peut-être dûs à une étoile en orbite autour du IMBH

Godet et al 2014

Formation d'étoiles dans ESO243-49 (UV à 2000 Ang, asymétrique)



Swift/UVOT (Soria et al 2011)
R-band contours

HLX1

ESO 243-49

10" ~ 4.4 kpc

Hypothèse d'une
naine épluchée de son
enveloppe,

Ou bien trou noir
éjecté?

$M_{\text{BH}} = 2.8 \cdot 10^6 M_{\odot}$
Cseh et al 2015

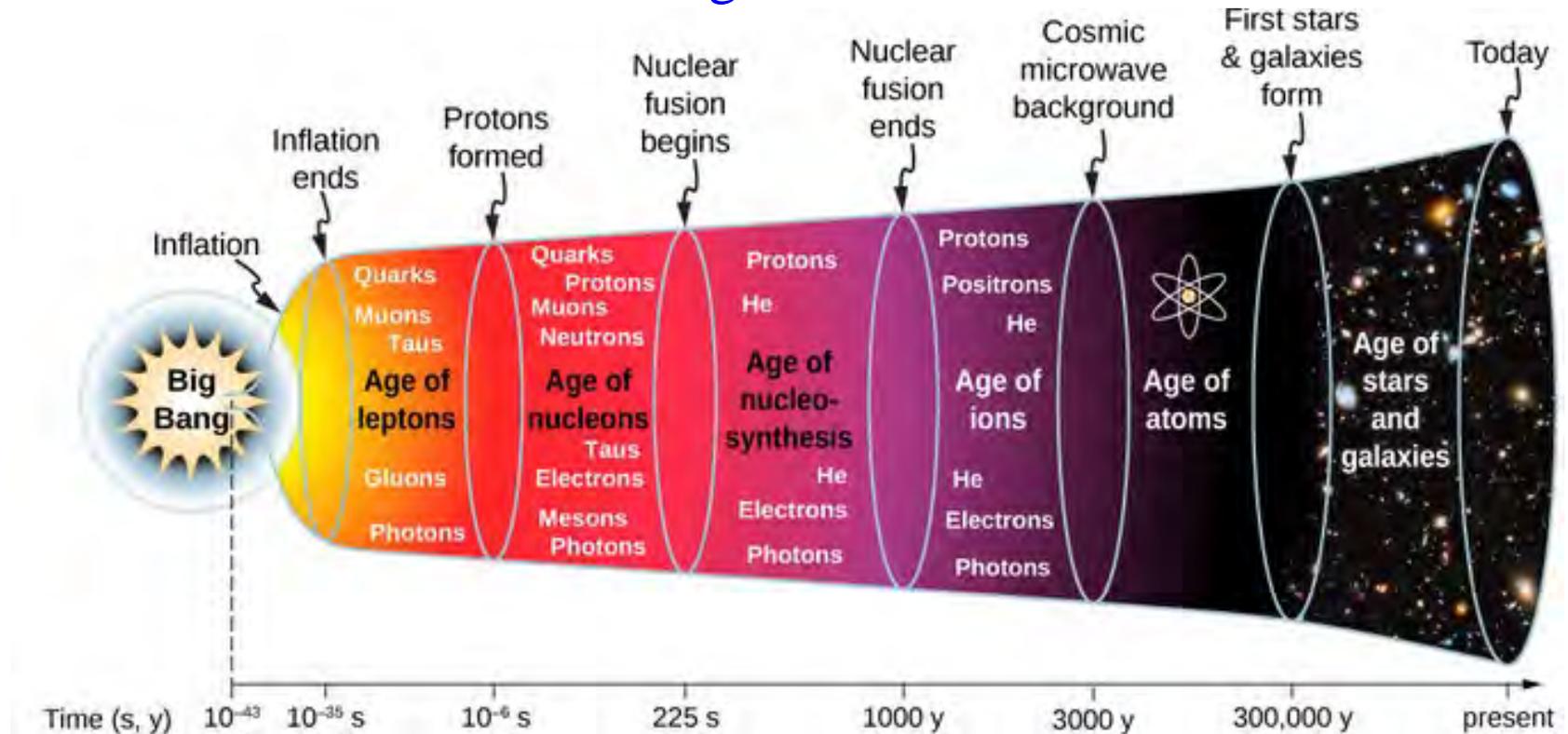
$M_{\text{BH}} (\text{ESO 243-49}) = 10^{7-8} M_{\odot}$

La formation d'étoiles est-elle associée à HLX1 ou juste en projection?

Les mécanismes de formation des IMBH

→ Trous noirs primordiaux? (10^{-35} s)

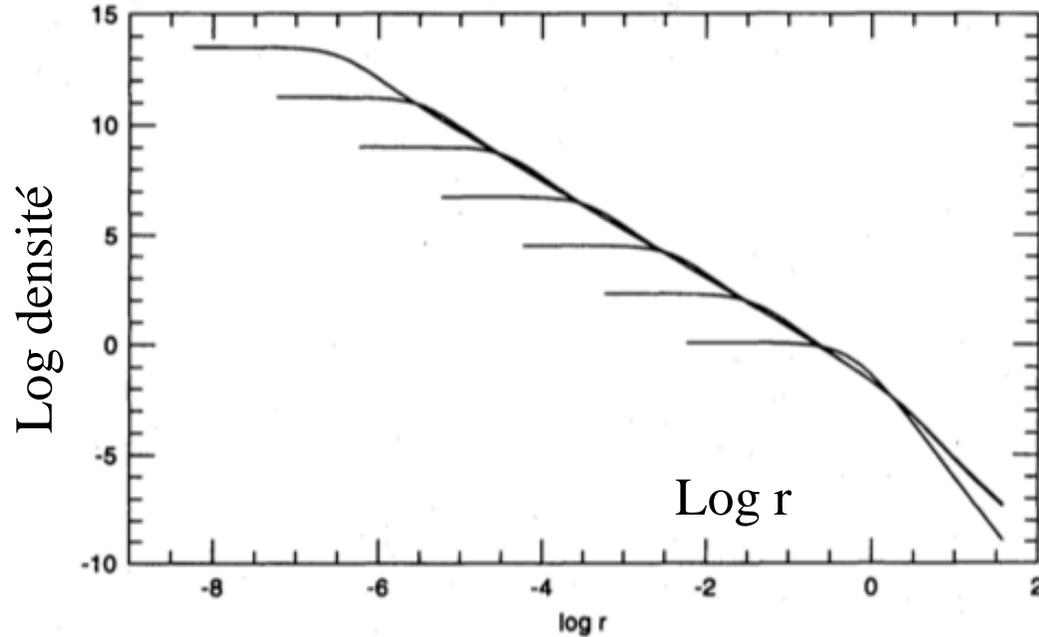
→ Amas denses d'étoiles: amas globulaires



→ Etoiles supermassives de Pop III

→ Accrétion de gaz, d'étoiles, comme les supermassifs

Effondrement du cœur d'un amas globulaire



Relaxation à deux corps

$$t_{relax} = 0.34 \frac{\sigma^3}{G^2 m \rho \ln \Lambda}$$

Le transfert d'énergie du centre vers le bord produit l'effondrement du cœur, en $10 t_{relax}$

$$t_{relax} \approx \frac{0.8 \text{Gyr}}{\ln(0.1N)}$$

Au centre, les collisions entre étoiles produisent un emballement, et la formation d'un trou noir → Core Collapse

Formation des IMBH: GW190521

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

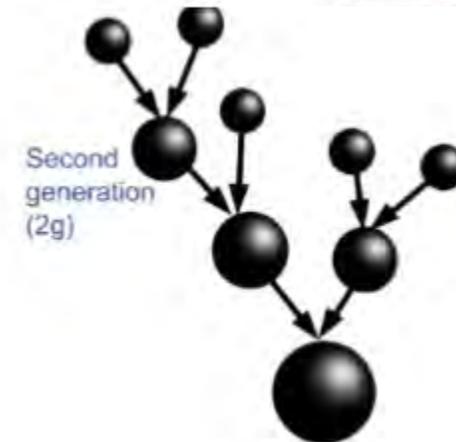
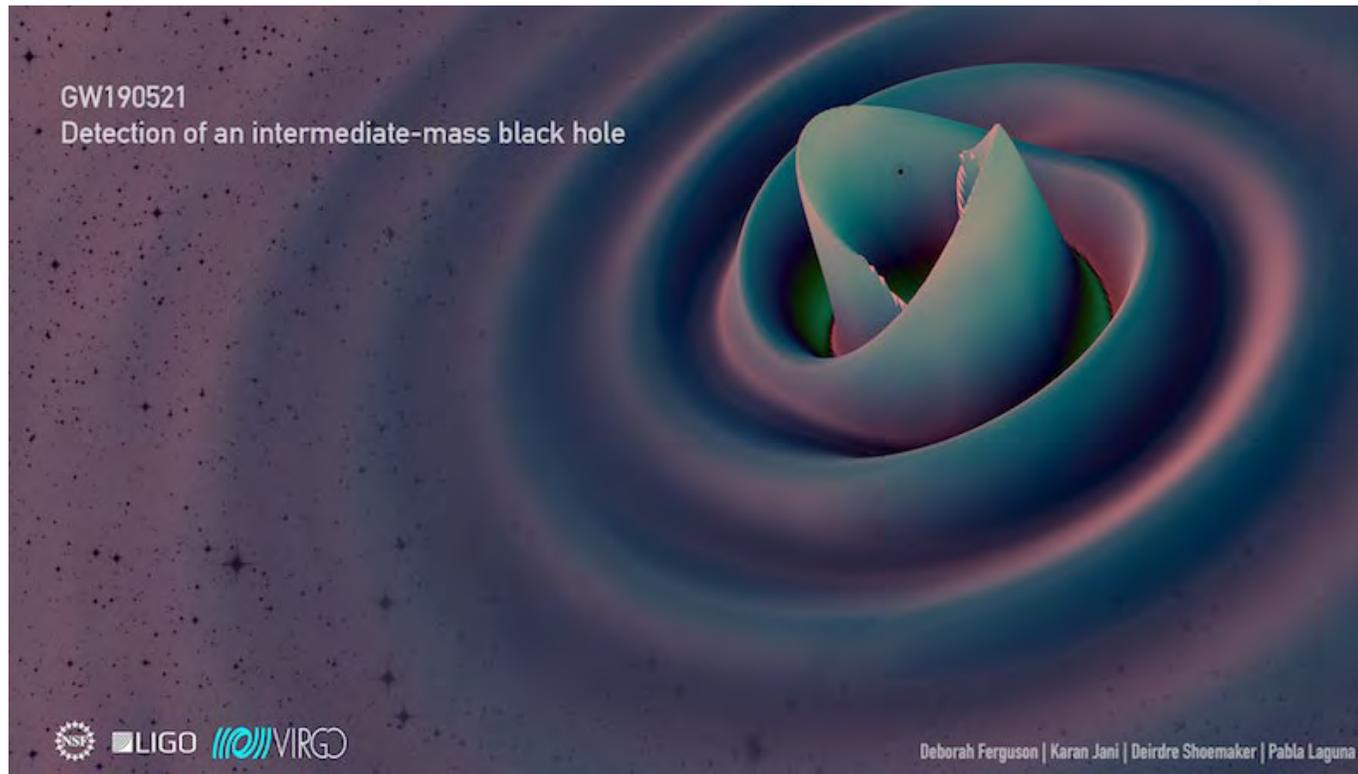
Instabilité de création de paires $e^{-} e^{+}$

Entre 60 et 130 M_{\odot}

→ Trous noirs de **masse intermédiaire (IMBH)**

Rare $< 0.08 / \text{Gpc}^3/\text{yr}$

Amas globulaire



Amas d'étoiles

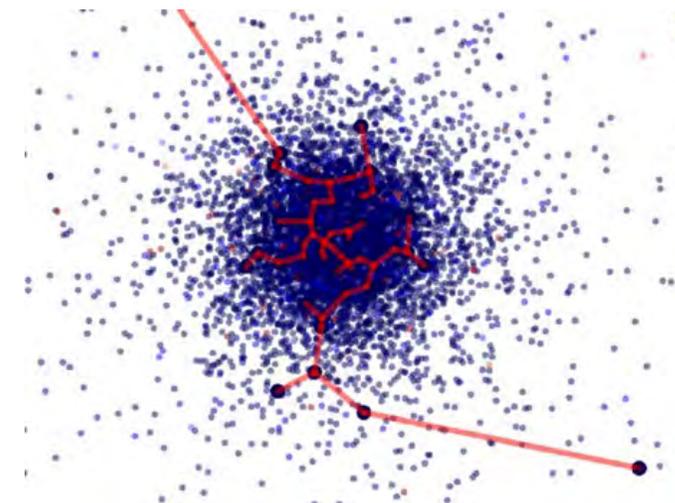
Evolution dynamique → collapse du cœur,
capacité négative

Mais, les binaires réchauffent, et empêchent le collapse

Simulations: plus d'équipartition,
les objets massifs tombent au centre
→ effondrement du coeur

Il faut que $T_{\text{relax}} < 100$ Myr, boule de neige

Amas globulaires: sources possibles de IMBH: GW190521
Mais certains amas N6397: aucune évidence

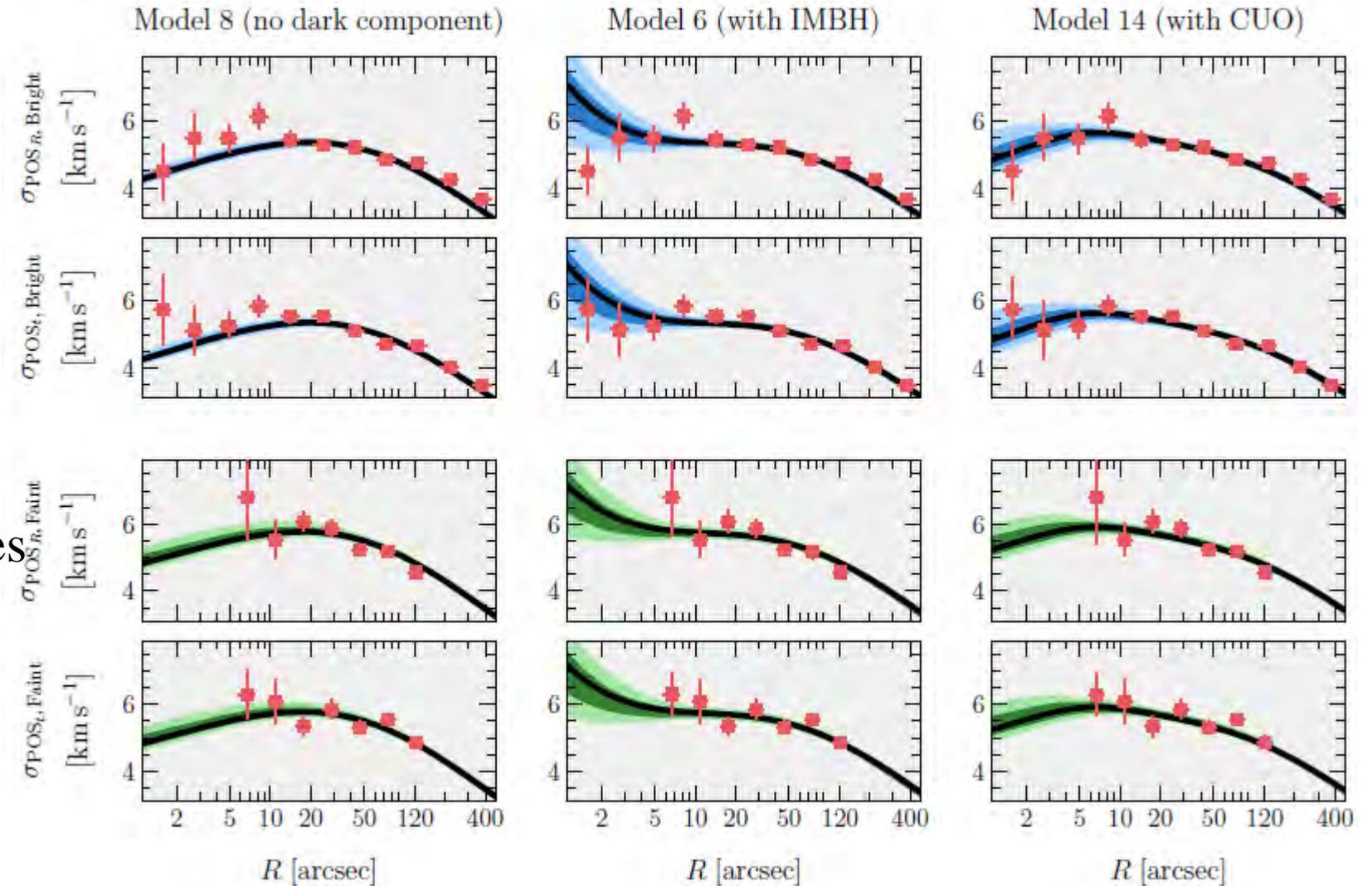


NGC6397: amas globulaire: aucune évidence de trou noir

Vitral & Mamon 2021

Evidence d'une masse
sombre de 0.6-2% $M(\text{amas})$

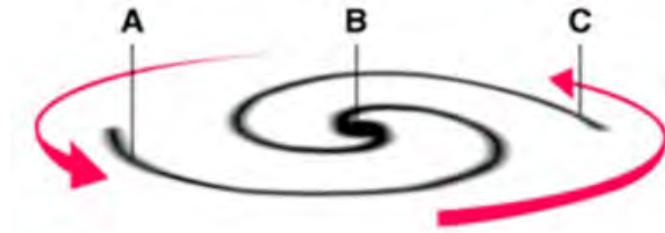
Mais pas de trou noir,
Plutôt masse diffuse
Ensemble de naines blanches
de 1000-2000 M_{\odot}



CUO Central Unresolved Object

Comment détecter les IMBH?

Dynamique → perturbations de vitesses
(galaxies naines, faible luminosité)



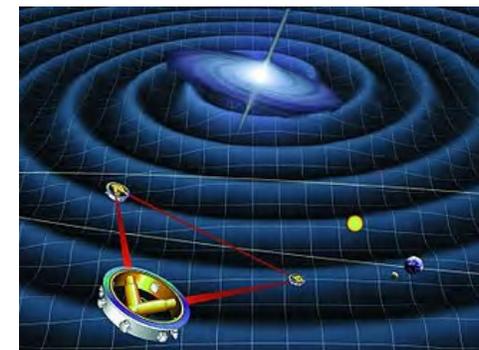
Accrétion: Rayons X → ULX

Lentilles gravitationnelles (micro-lensing
MACHOS, EROS, LMC)



Progéniteurs, et produits → métaux, lumière de fond

Ondes gravitationnelles → LIGO-Virgo /LISA



Accrétion de gaz? Ségrégation?

Ségrégation: les étoiles massives tombent au centre
Equipartition mv^2

Pas de gaz détecté

Si jamais il existe du gaz → inefficace pour rayonner
AGN en Radio, rayons X: limites supérieures

Densité centrale en $r^{-1.75}$

Ségrégation en masse des étoiles

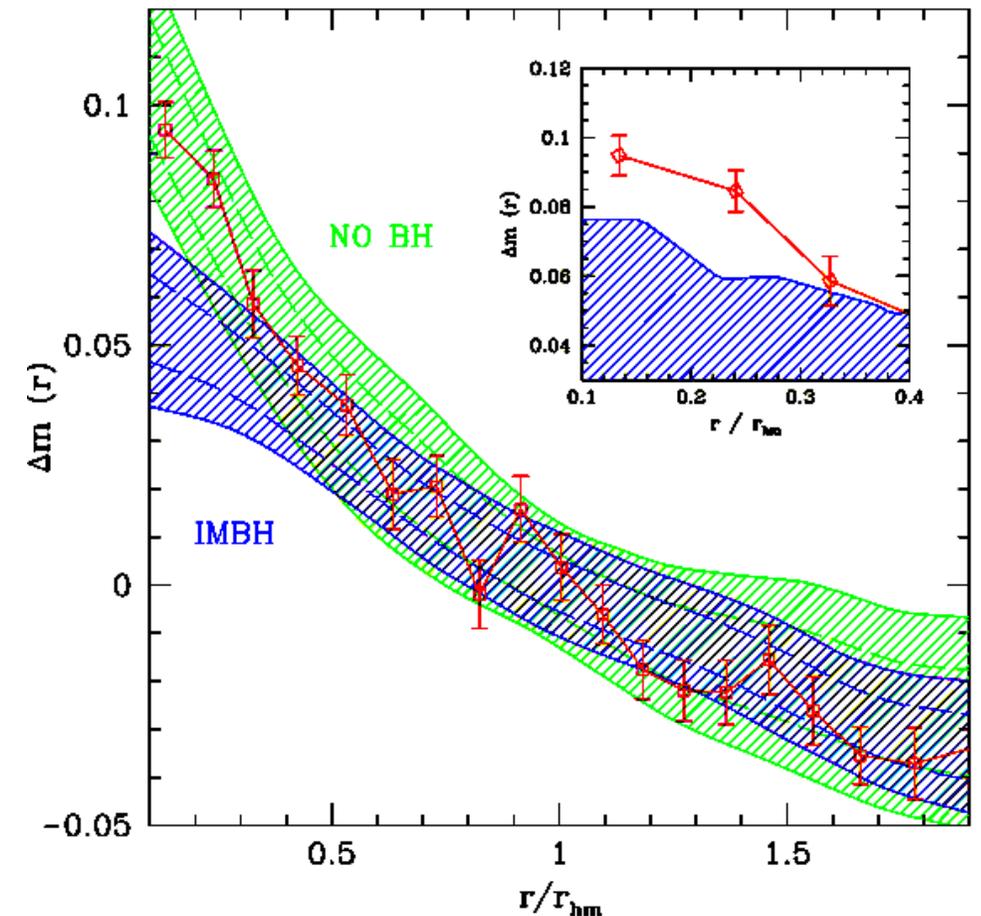
un IMBH diffuserait les étoiles
et supprimerait la ségrégation

Simulations avec ou sans IMBH

→ Observations de N2298: ségrégation

$M_{\text{BH}}/M_{\text{amas}} < 1\%$

Pasquato et al 2009



Détection par la dynamique

Sphère d'influence du trou noir $r < 1''$

Amas G1 dans Andromède (*Gebhardt 2005*)

Accroissement de la dispersion

$$\rightarrow M_{\text{BH}} = 1.8 \cdot 10^4 M_{\odot}$$

Possible noyau d'une galaxie naine tronquée

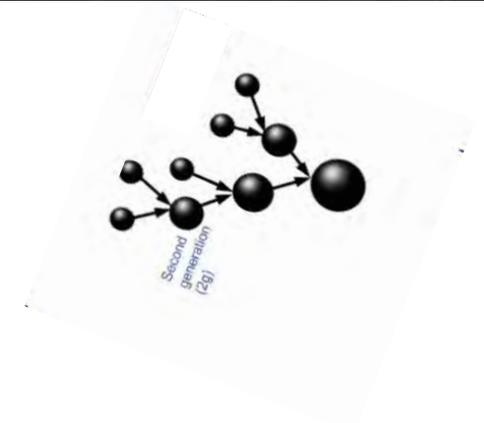
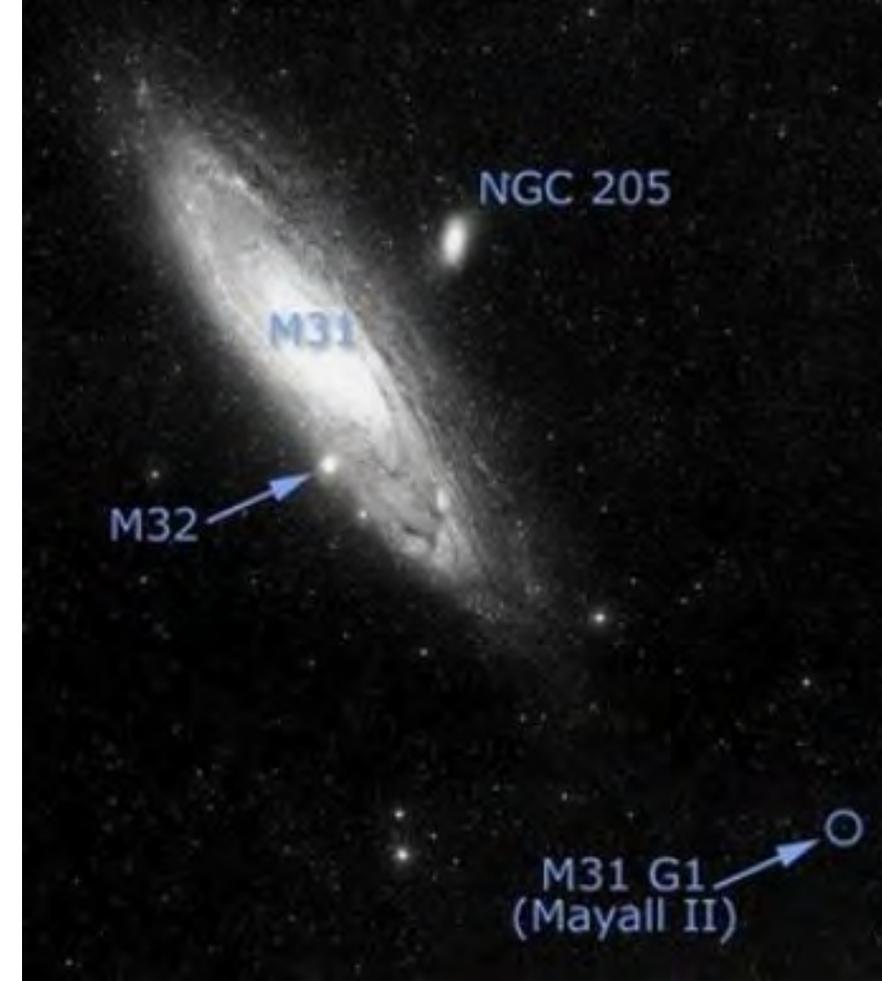
Amas M15 dans notre Galaxie?

Pas de rayons-X, pas de radio, forte rotation au centre ?

Omega-Cen: noyau de galaxie détruite? Noyola et al 2008

→ Pas d'évidence de IMBH dans les amas

GW190521: formation dans un amas d'étoiles ou disque nucléaire?



Résumé

→ Trou noir supermassif (10^6 - $10^9 M_{\odot}$) dans chaque galaxie croissent en symbiose

→ Comment se forment les trous noirs super-massifs?
-- Très tôt, très vite, $z=6$ $T < 1$ Gyr
-- Effondrement direct de gaz (DCBH), ou bien quasi-star (PopIII), ou amas d'étoiles

→ On recherche activement les trous noirs de masse intermédiaire!

