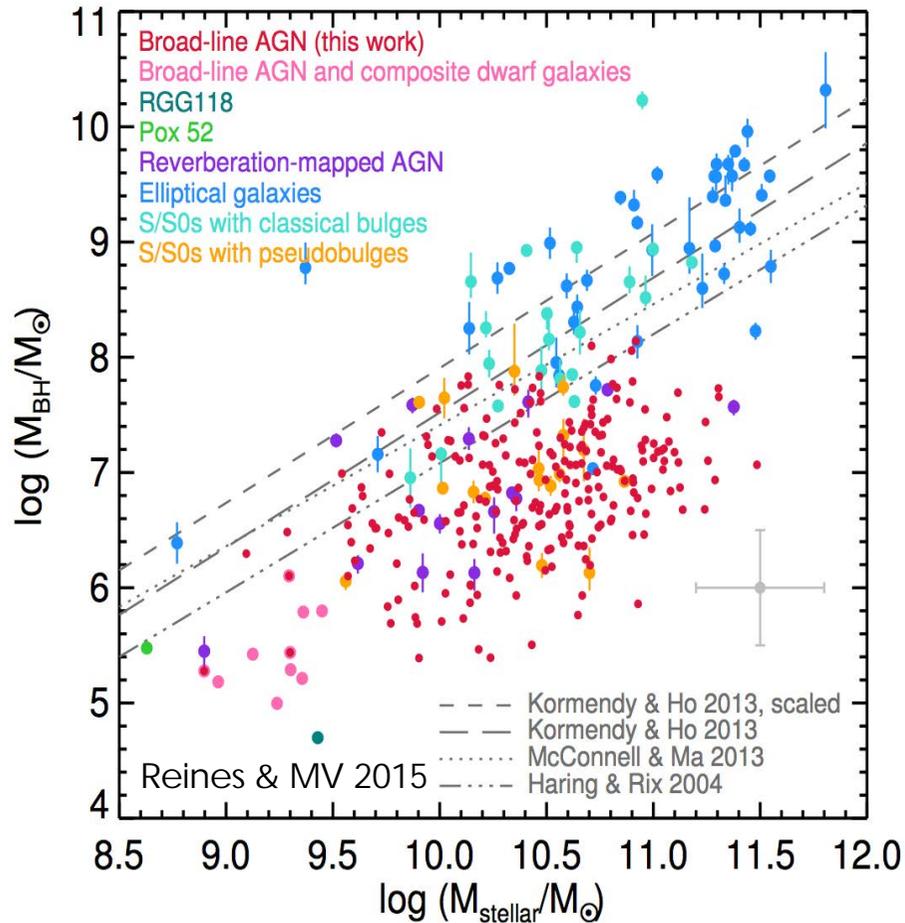


La formation rapide des trous noirs à grand z

Marta Volonteri
Institut d'Astrophysique de Paris

Trous noirs à $z=0$



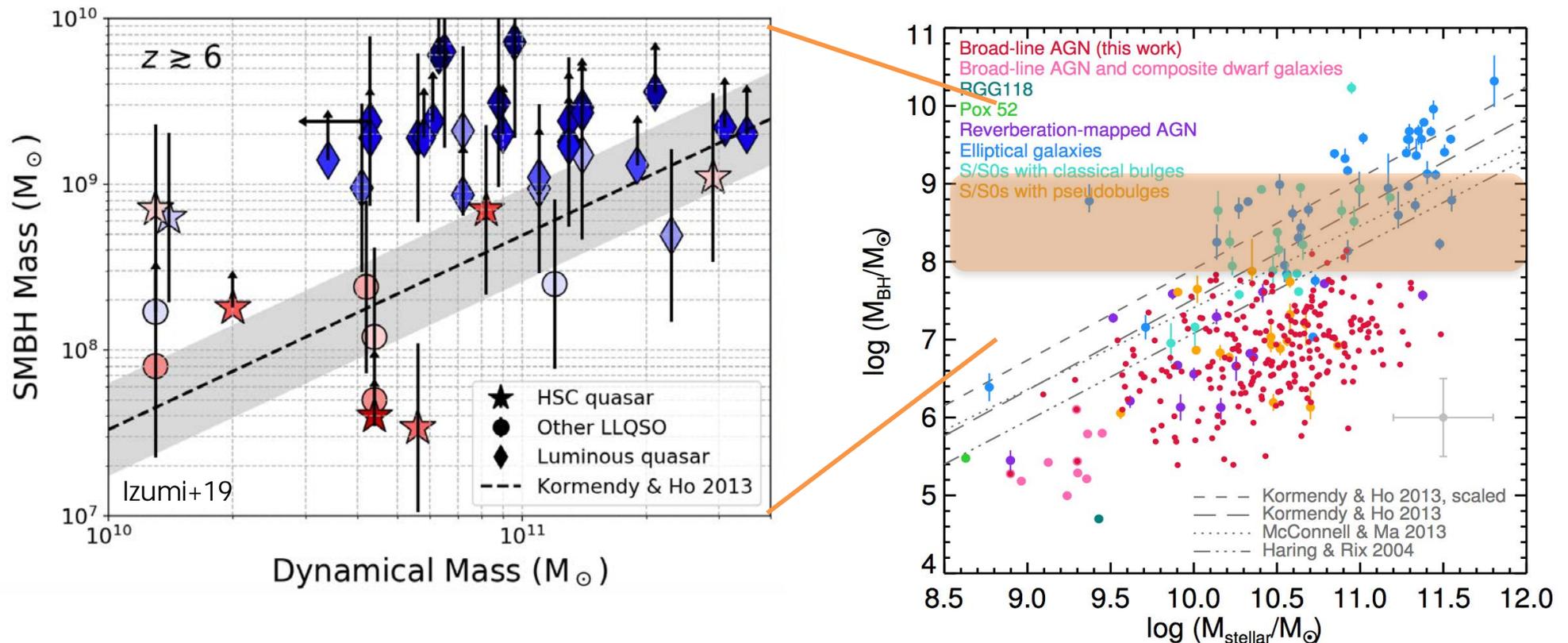
La masse d'un trou noir massive représente environ un (dix-)millième de celle de la galaxie dans laquelle il se trouve

Cela suggère que leur croissance / évolution est liée pendant l'évolution cosmique

Quasars à grand z

Les quasars ont été détectés à de très grandes distances, ce qui correspond à un âge très jeune de l'Univers :
 $z \sim 6$ correspond à 1 milliard d'années après le Big Bang.

Malgré leur jeunesse, ils sont alimentés par des trous noirs aussi massifs que les plus massifs d'aujourd'hui.



Quasars à grand z

Comment se forment les trous noirs?

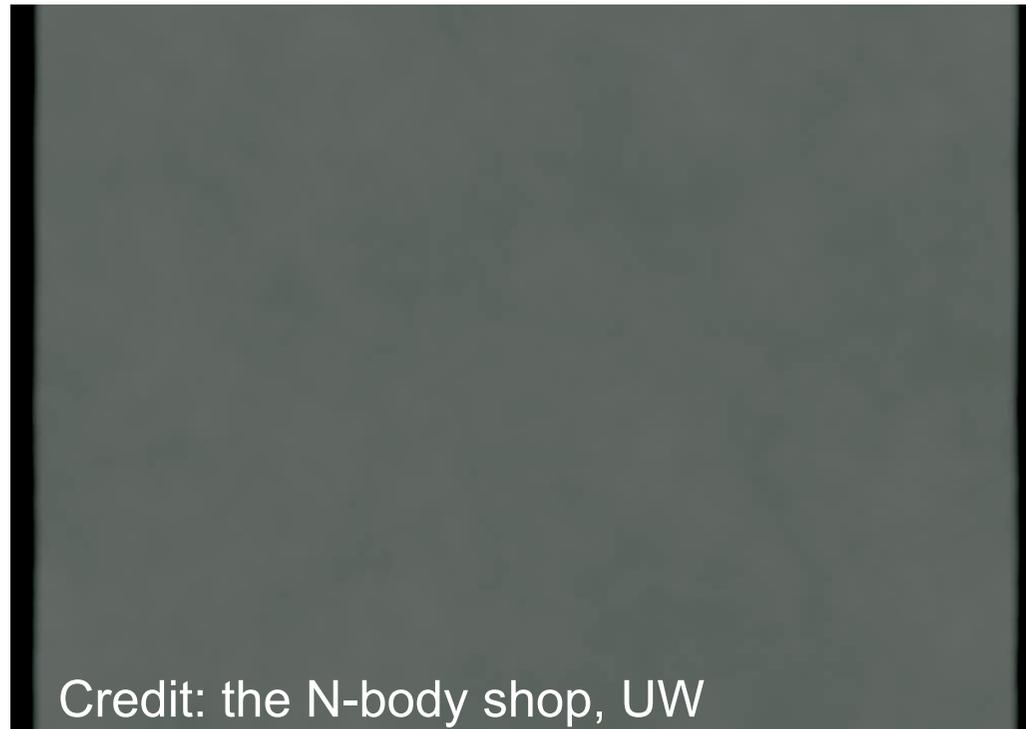
Comment ces trous noirs se sont développés si vite?

Quel est la relation entre trou noir et masse de galaxie ?

Formation des structures cosmiques

L'univers après le Big Bang n'était pas complètement uniforme

Les instabilités gravitationnelles dues à la distribution non uniforme de la matière ont provoqué la condensation de la matière sombre dans de régions gravitationnellement liées

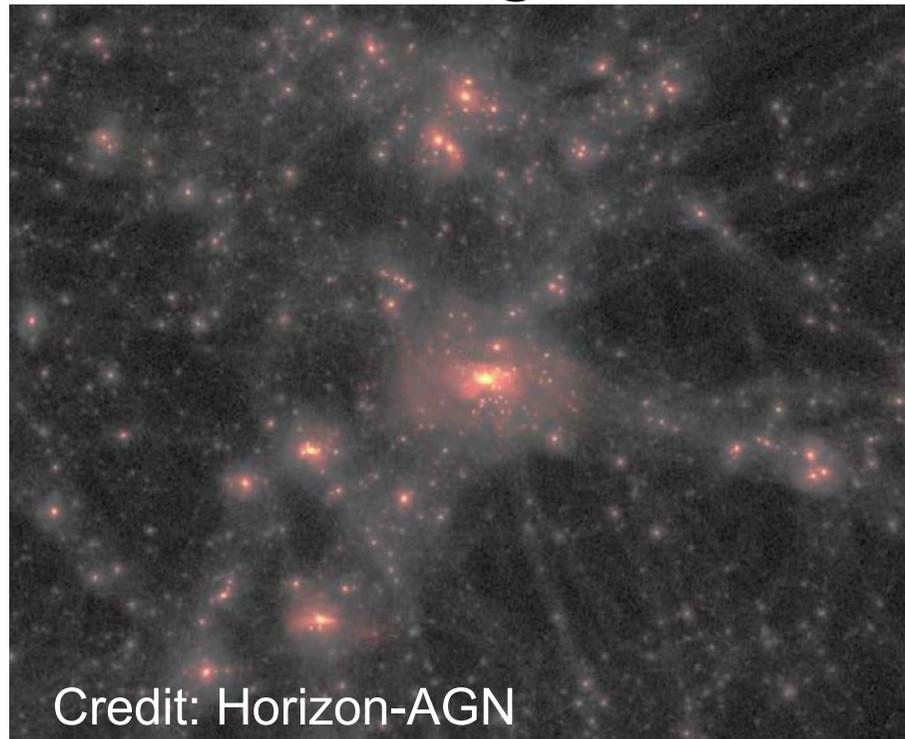


Credit: the N-body shop, UW

Formation des structures cosmiques

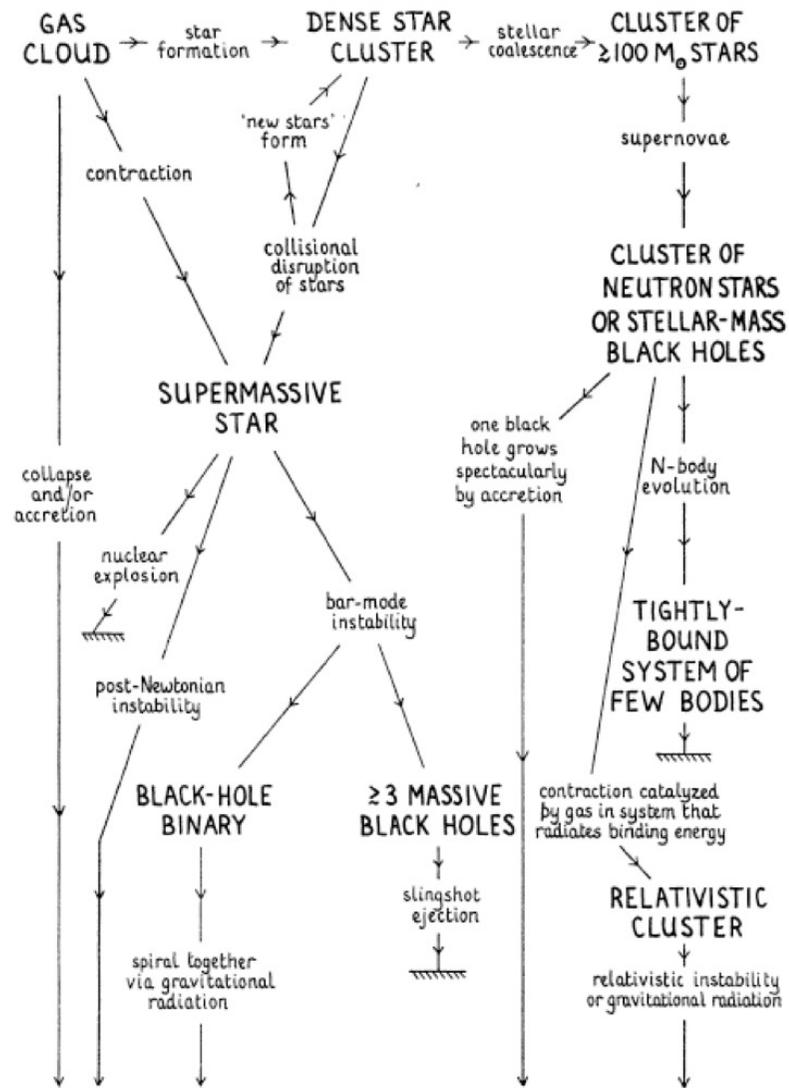
Les halos de matière noire se détachent de l'expansion globale, s'effondrent sur eux-mêmes et forment une galaxie au centre

Les galaxies se forment aux pics de densité dans une structure à grande échelle. Les trous noirs massifs participent à l'évolution des galaxies



Credit: Horizon-AGN

La formation des trous noirs massifs

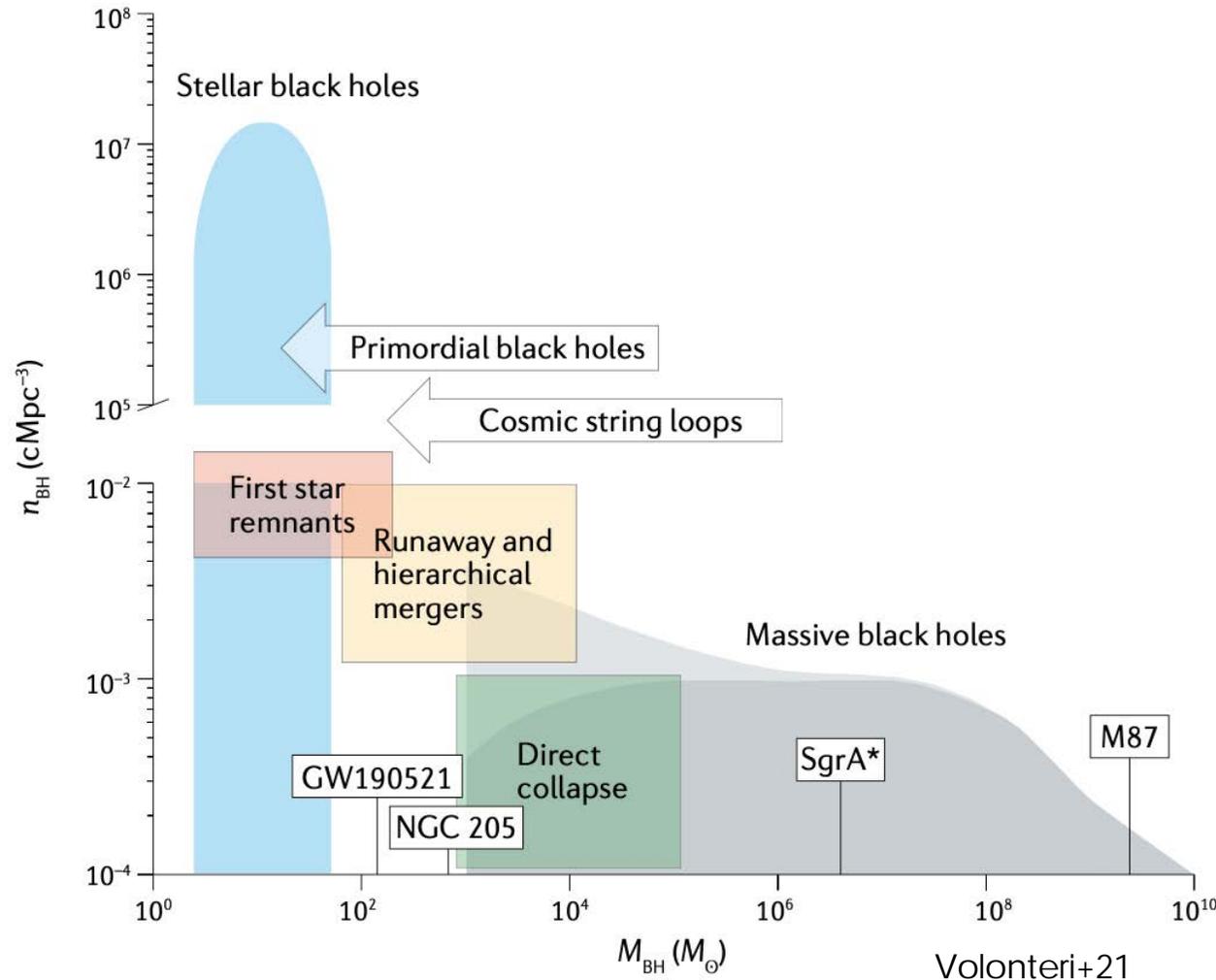


massive black hole

La formation des trous noirs massifs

Les mécanismes prédisent différentes masses de graines, temps de formation, environnement et abondance de MBH

Ils ne sont pas mutuellement exclusifs !



* les trous noirs primordiaux et les boucles de cordes cosmiques sont placés à des densités de nombres arbitraires

Restes des premières étoiles

(e.g., Madau & Rees 2001)

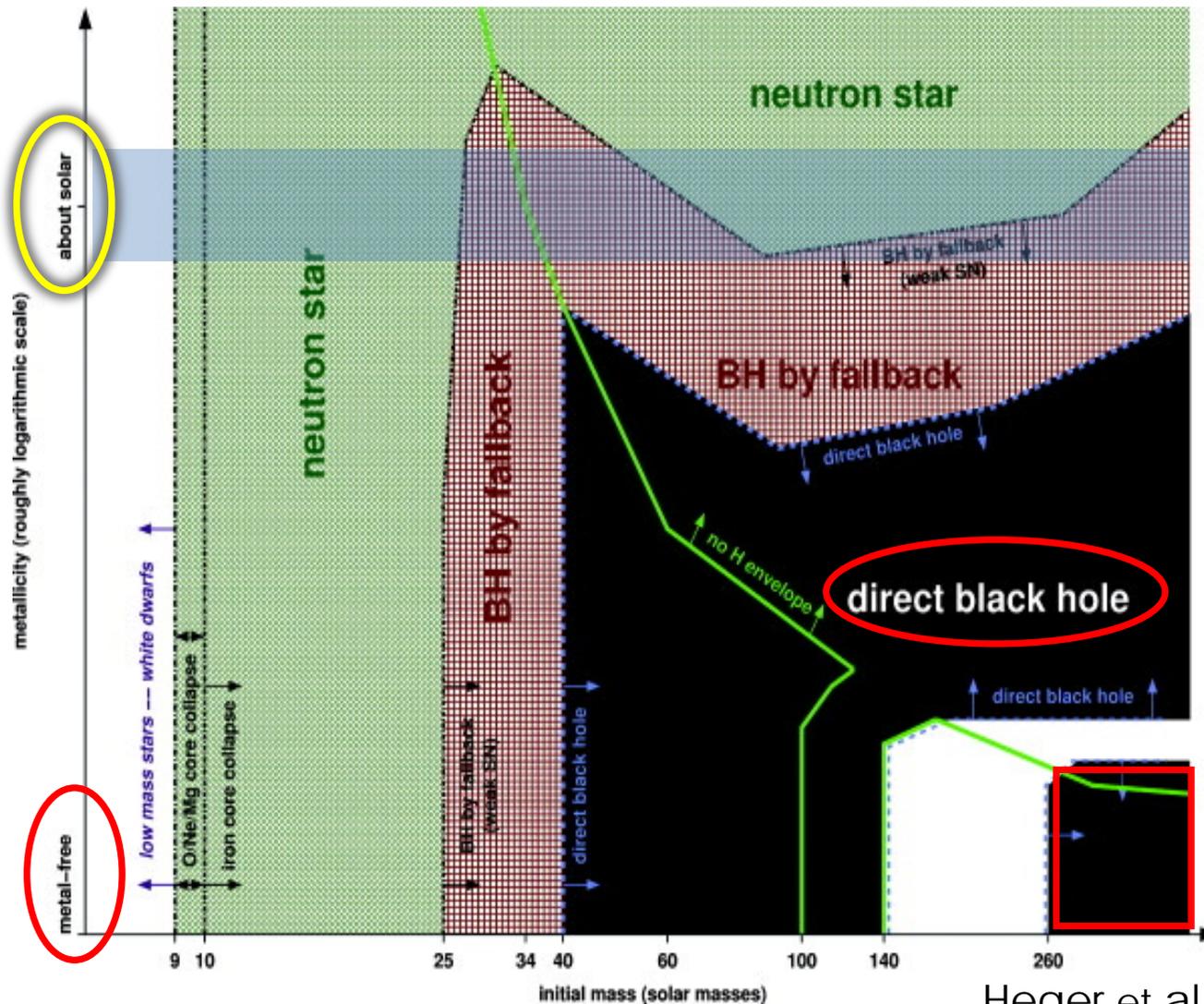
Certaines simulations suggèrent que les premières étoiles sont massives $M \sim 100-600 M_{\text{soleil}}$ (par exemple, Abel et al. 2002 ; Bromm et al. 2003)

Les premières étoiles avec $M > 260 M_{\text{soleil}}$ laissent des BH restants avec $M \geq 100 M_{\text{soleil}}$ (Fryer, Woosley & Heger 2003)

Des estimations récentes suggèrent des masses d'étoiles inférieures $M < 100 M_{\text{soleil}}$. Difficile qu'ils puissent grossir (Smith et al. 2018) => peu probable qu'il s'agisse de graines MBH

Restes des premières étoiles

L'absence d'éléments lourds (au-delà de He) limite la perte de masse due aux vents stellaires



“ Effondrement direct ”

(e.g. Bromm & Loeb 2003, Begelman, MV & Rees 2006)

Formation d'une étoile supermassive s'effondrant dans un MBH de $\sim 10^4$ - $10^5 M_{\text{soleil}}$

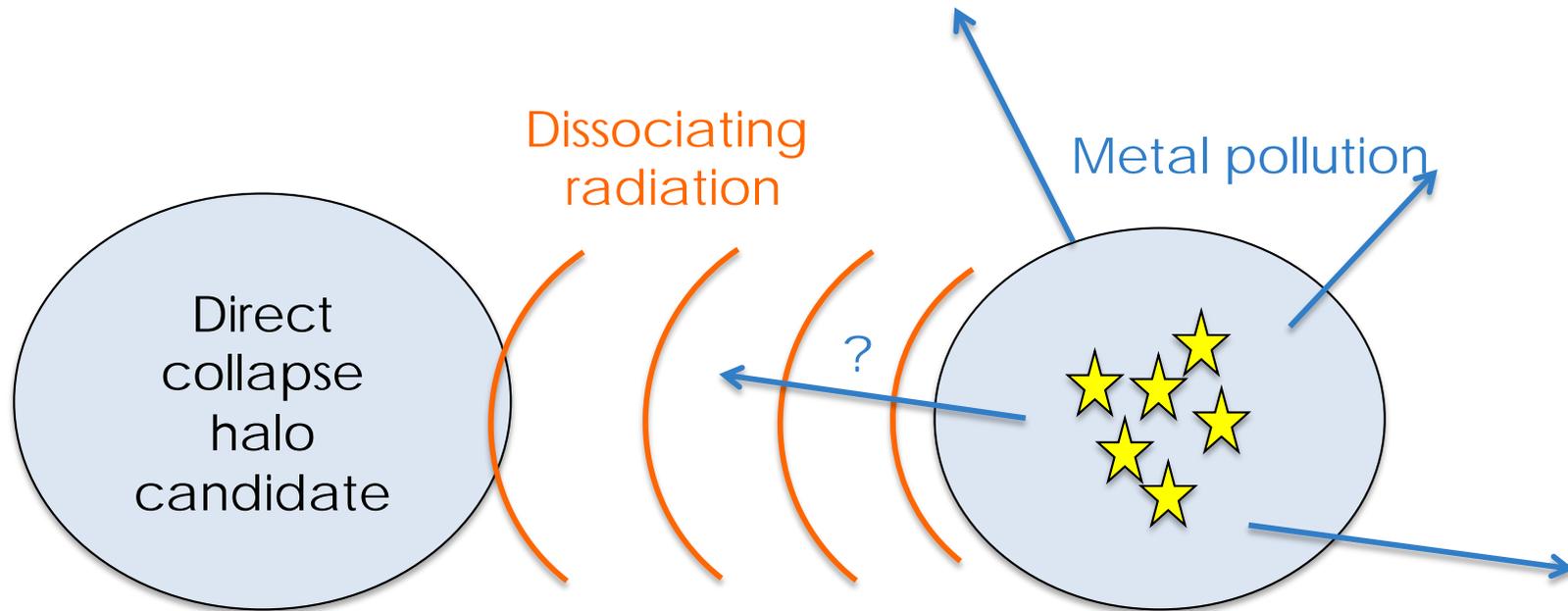
Possible si la formation d'étoiles « normales » est supprimée et la majeure partie du gaz est accrétée sur une protoétoile centrale

Exigences:

- retarder la formation des étoiles
- composition du gaz primordial
- supprimer la formation de molécules, H₂

“Effondrement direct”: halos synchronisés

(Visbal et al. 2014)



Halo candidat à l'effondrement direct

- $M_h > 10^{7-8} M_\odot$
- Pas de métaux, pas de H_2
- Rayonnement UV pour dissocier H_2

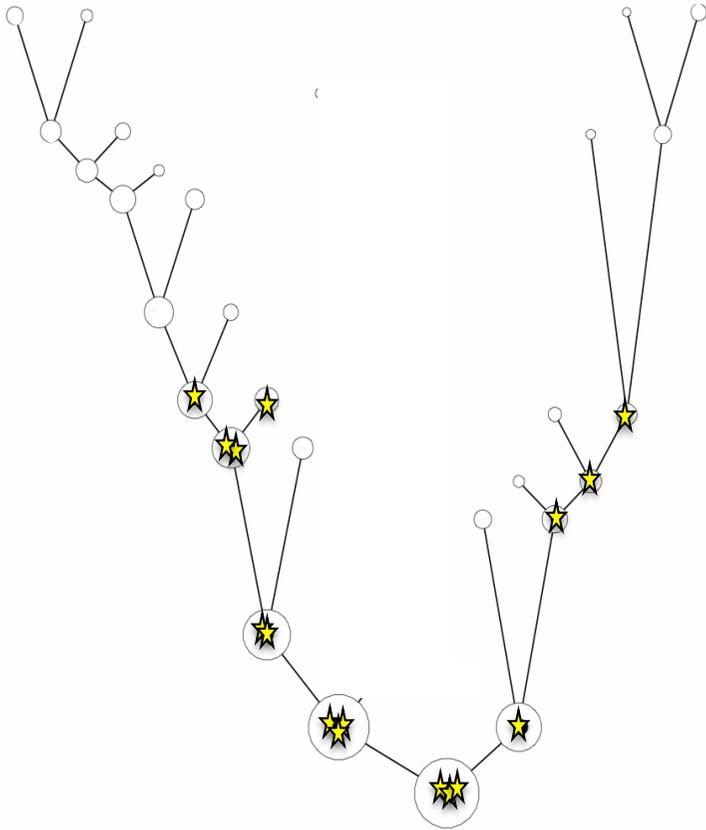
Halo avec formation d'étoiles

- Rayonnement UV -> dissocier H_2
- Libère aussi des métaux dans les environs

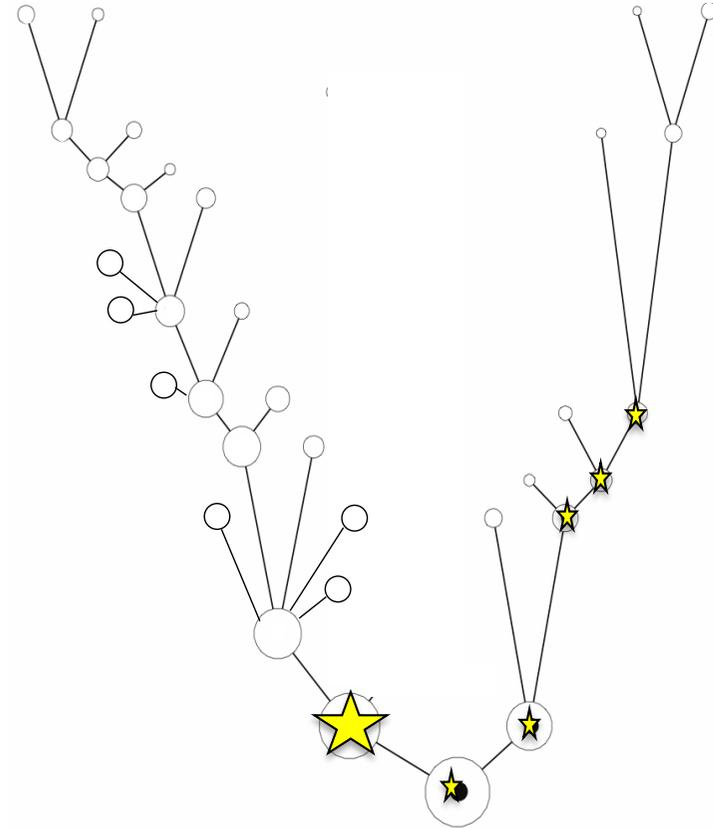
→ La formation d'étoiles cruciale pour le rayonnement et les métaux

“Effondrement direct”: chauffage dynamique

(Wise et al. 2019)



Le gaz a le temps de se refroidir et de former des étoiles normales



Le gaz n'a pas le temps de se refroidir et de former des étoiles, puis refroidissement soudain et formation d'une étoile supermassive -> trou noir

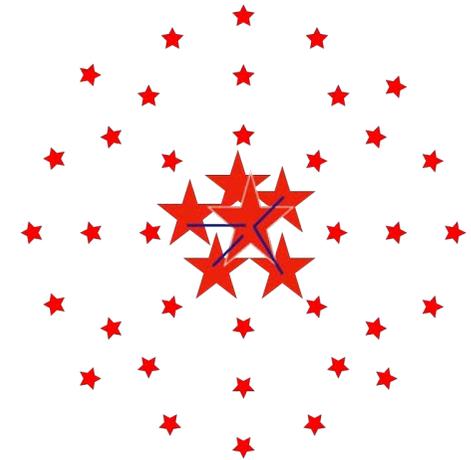
Effondrement du cœur d'un amas stellaire nucleaire: fusions d'etoiles

(Omukai et al. 2009; Devecchi & MV 2009, Devecchi et al. 10, 12; Schleicher et al. 2022)

Ségrégation de masse dans l'amas d'étoiles nucléaires : les étoiles massives coulent vers le centre

Les collisions stellaires forment une étoile très massive

A faible métallicité \Rightarrow trou noir massif $\sim 10^3 M_{\text{soleil}}$



Effondrement du cœur d'un amas stellaire nucleaire: fusions de trous noirs stellaires

(Davies et al. 2011, Antonini et al. 2019)

Ségrégation de masse dans l'amas d'étoiles nucléaires : les trous noirs coulent vers le centre

Fusion de TN stellaires normalement éjectés (3 corps, GW)

Les BH fusionnent \Rightarrow trou noir massif $\sim 10^3 M_{\text{soleil}}$

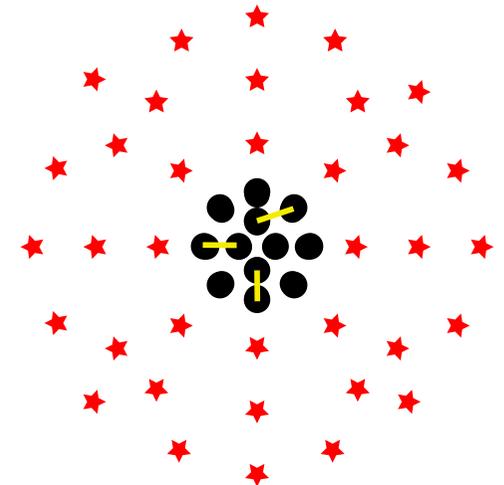


Figure credit: A. Lupi

Restes des premières étoiles

Trop léger => maintenant nous pensons qu'ils ne peuvent pas être des graines

“Effondrement direct”

Halos synchronisés très rares => peu de chances d'être des graines

Échauffement dynamique plus courant, mais masse de graines $< 10^4 M_{\text{soleil}}$

Effondrement du cœur d'un amas stellaire

Susceptible de se produire. Masse de graines $\sim 10^3 M_{\text{soleil}}$

La croissance des trous noirs

La limite d'Eddington : la pression de rayonnement vers l'extérieur est égale à la force gravitationnelle vers l'intérieur

$$a_{rad}(r) = \frac{\kappa(\rho, T)L(r)}{4\pi r^2 c} \quad g(r, t) = -\frac{GM_{\bullet}(t)}{r^2}$$

Si $a_{rad} > |g|$ le rayonnement repousse le gaz et l'accrétion est stoppée

La croissance des trous noirs

Dans la plupart des conditions, luminosité < limite d'Eddington ($f_{\text{Edd}} \leq 1$):

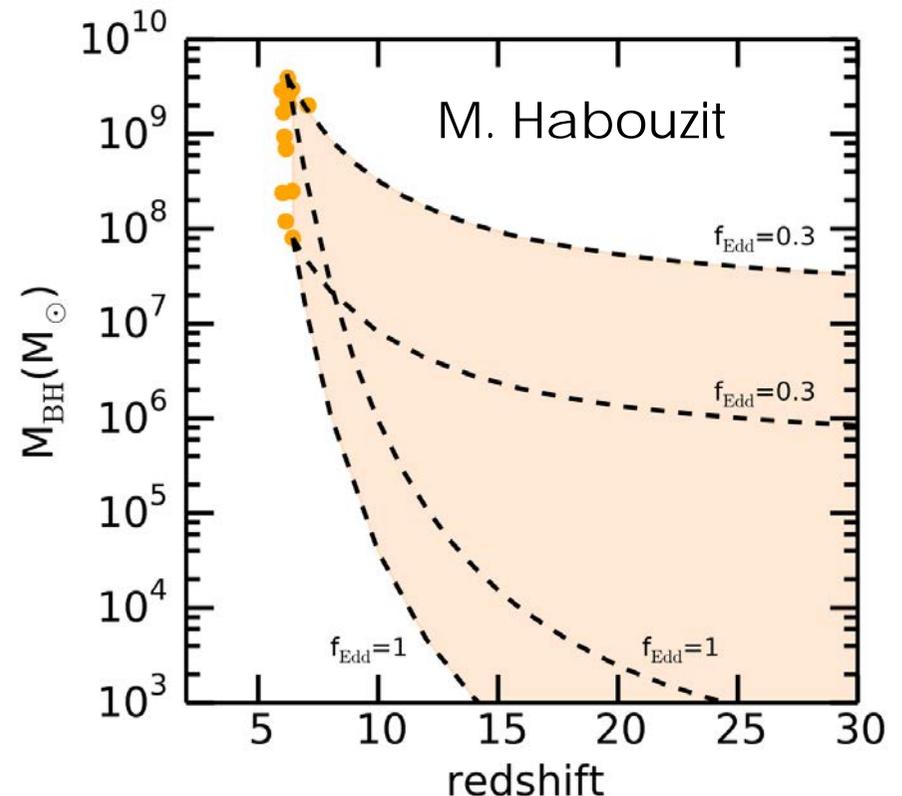
La masse croît dans le temps comme :

$$M(t) = M_0 e^{\left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon} f_{\text{Edd}} \frac{t}{0.45 \text{Gyr}}\right)}$$

Pour atteindre $10^9 M_{\text{soleil}}$ par $z=7$ un MBH de masse initiale $1e4 M_{\text{soleil}}$ doit s'accréter à $f_{\text{Edd}} \sim 1$ depuis $z=20$ (100 millions d'années après le Big Bang)

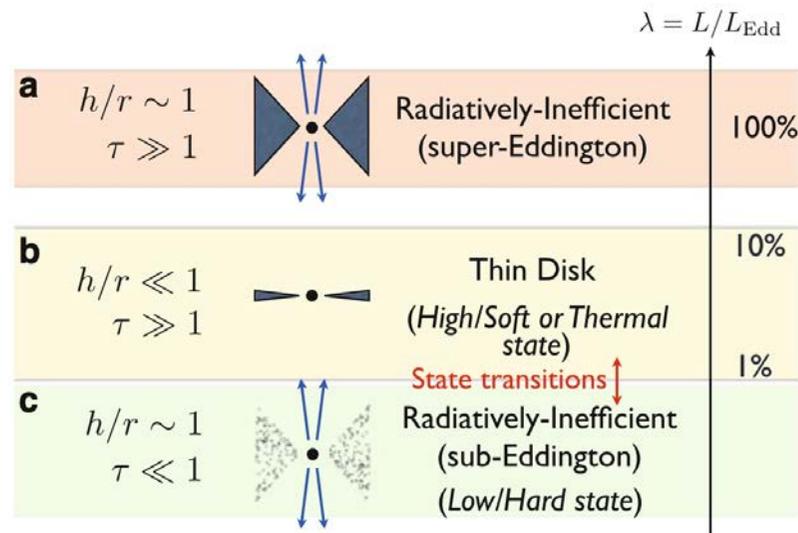
Caveat: la rétroaction de la supernova est suffisante supprimer l'accrétion de trous noirs dans les galaxies de faible masse retardant la croissance

(Dubois+14)



La croissance des trous noirs

La limite d'Eddington : dans la réalité pas de symétrie sphérique => disques d'accrétion



Tchekhovskoy+15

Accrétion de Super-Eddington observée lorsque les trous noirs détruisent les étoiles

Caveat: SuperEddington crée des jets puissants qui repoussent les gaz — ne dure que peu de temps (Regan+19, Massonneau+22)

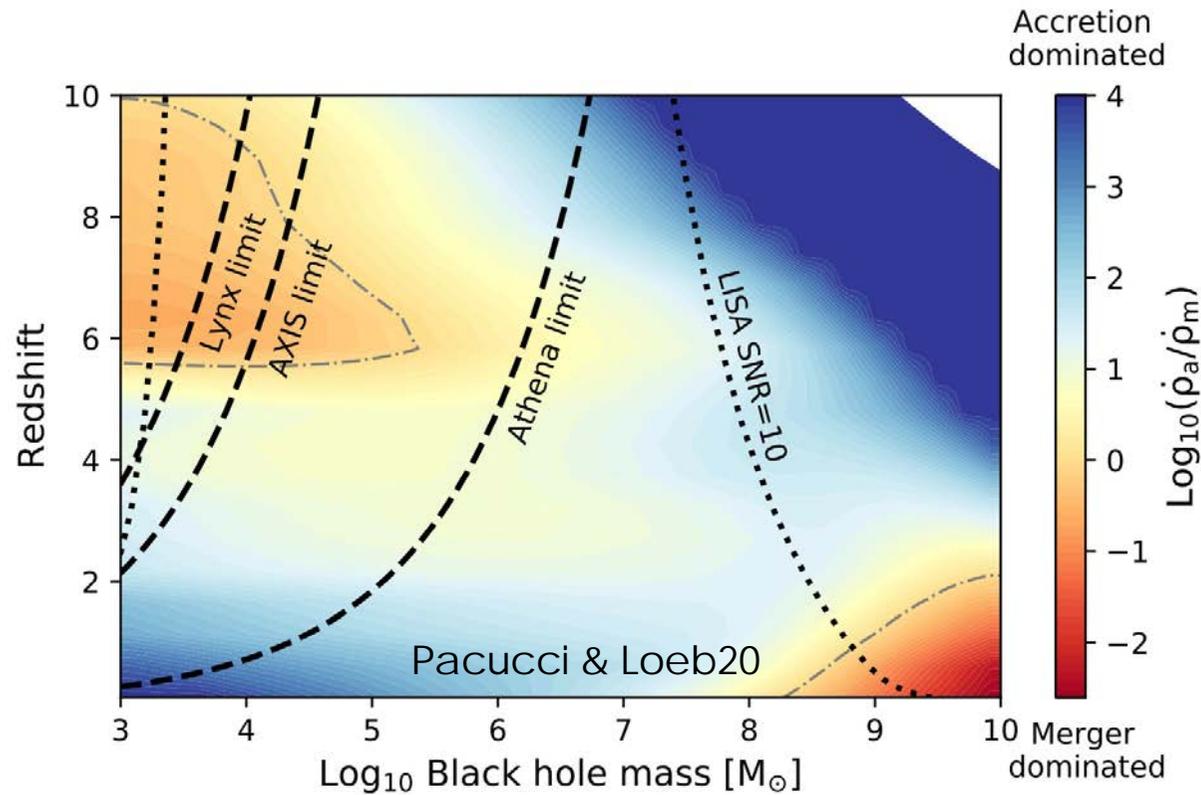
La croissance des trous noirs massifs

Fusions entre trous noirs



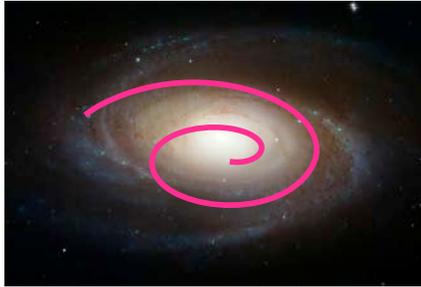
Si la plupart des galaxies hébergent des TNs, les TNs puissent fusionner au fur et à mesure que les galaxies fusionnent => croissance de masse supplémentaire

Fusions entre trous noirs



A priori les fusions peuvent dominer (rouge/orange) la croissance des certains TNs à grand z

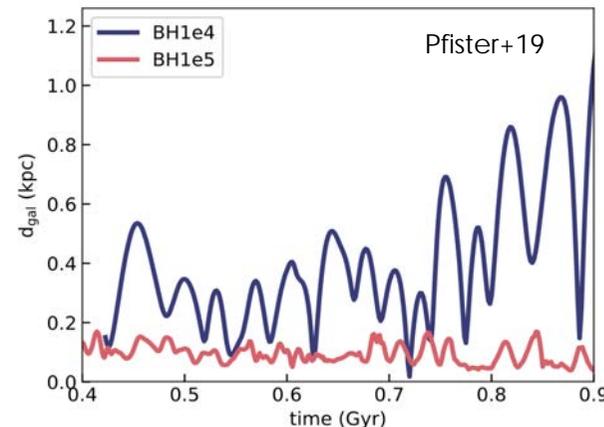
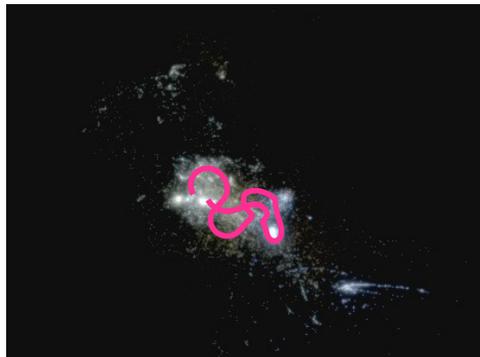
Fusions entre trous noirs



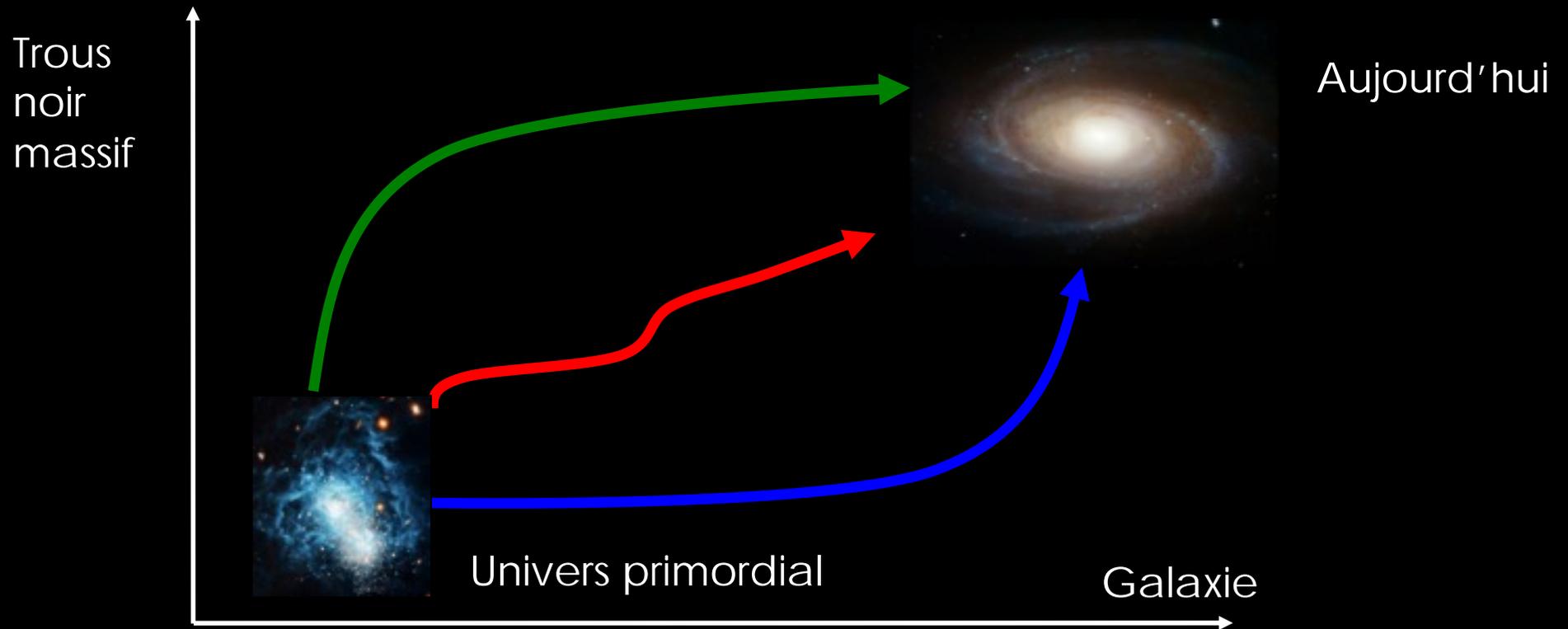
Dans une galaxie "lisse", la friction dynamique provoque une décroissance orbitale vers le centre (Binney & Tremaine) :

$$t_{\text{df}} = 0.67 \text{ Gyr} \left(\frac{a}{4 \text{ kpc}} \right)^2 \left(\frac{\sigma}{100 \text{ km s}^{-1}} \right) \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-1} \frac{1}{\Lambda}$$

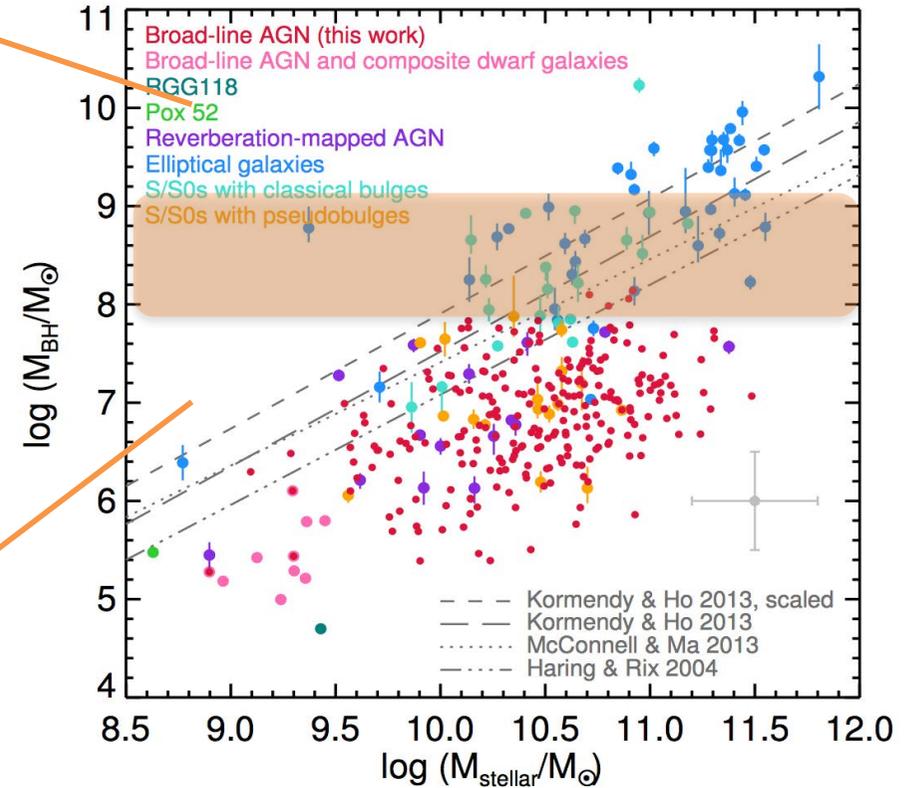
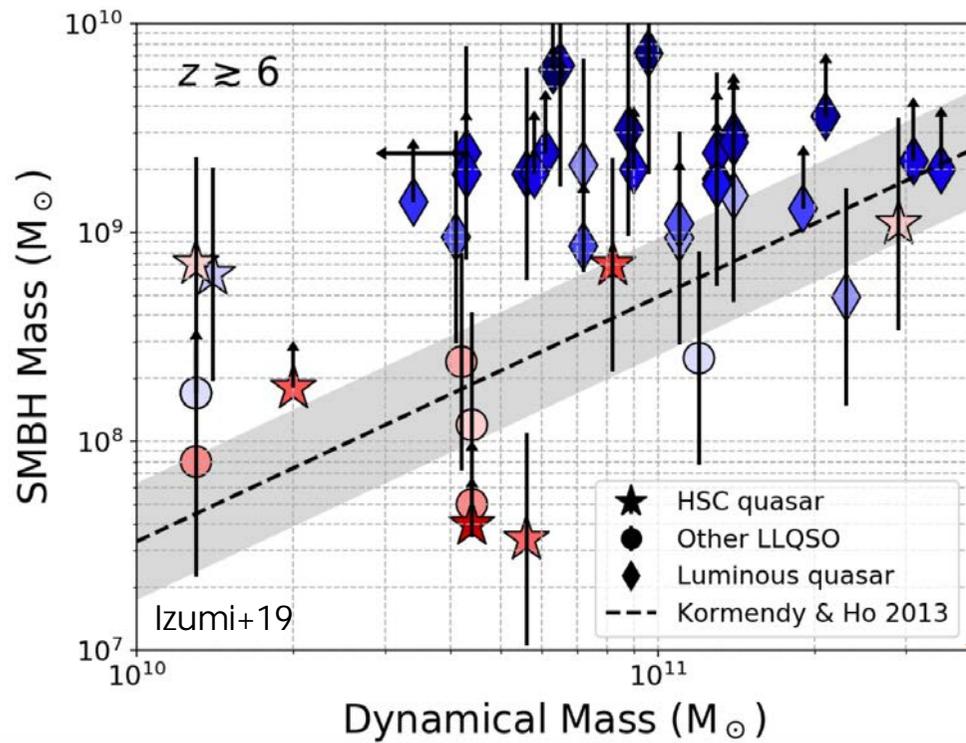
De nombreuses galaxies naines - surtout à grand z - ne sont pas du tout "lisses" et elles n'ont pas de centre (Pfister+19, Ma+21) : dynamique erratique. Les fusions ne sont pas garanties.



L'évolution des trous noirs dans les galaxies

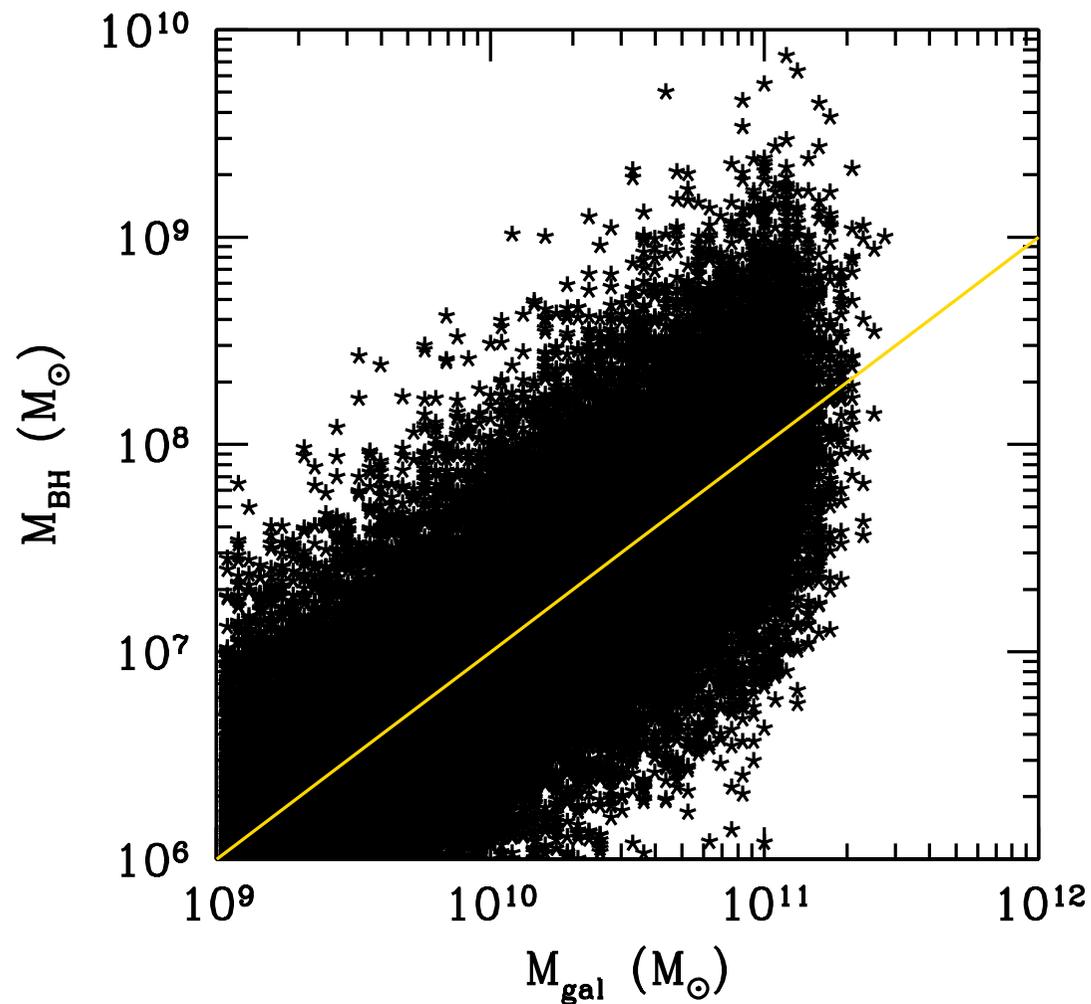


Masses des trous noirs vs galaxies



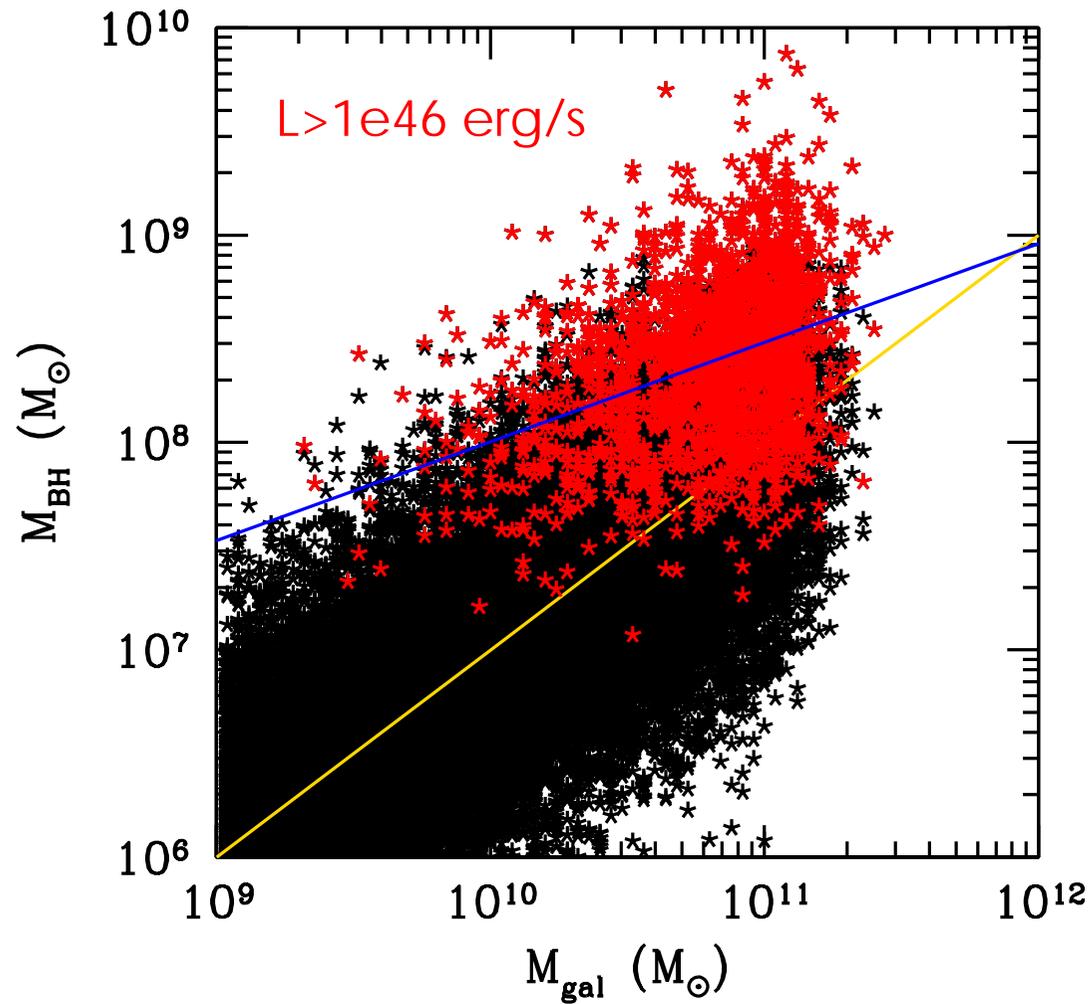
Les masses de MBH semblent être plus grandes, à masse de galaxie fixe, qu'aujourd'hui

Masses des trous noirs vs galaxies

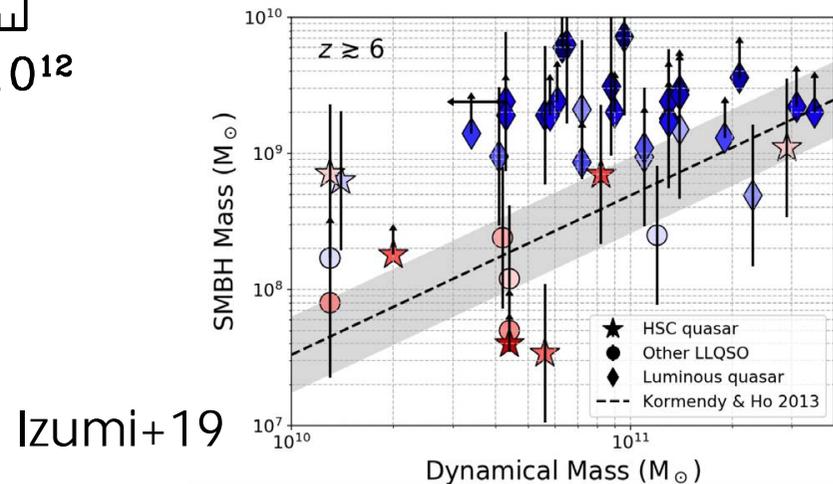


Lauer's bias: les quasars sont souvent sélectionnés à l'aide de levés photométriques à flux limité. Les MBH trop massifs par rapport à la relation moyenne seraient plus brillants et seraient surreprésentés dans l'échantillon sélectionné

Masses des trous noirs vs galaxies

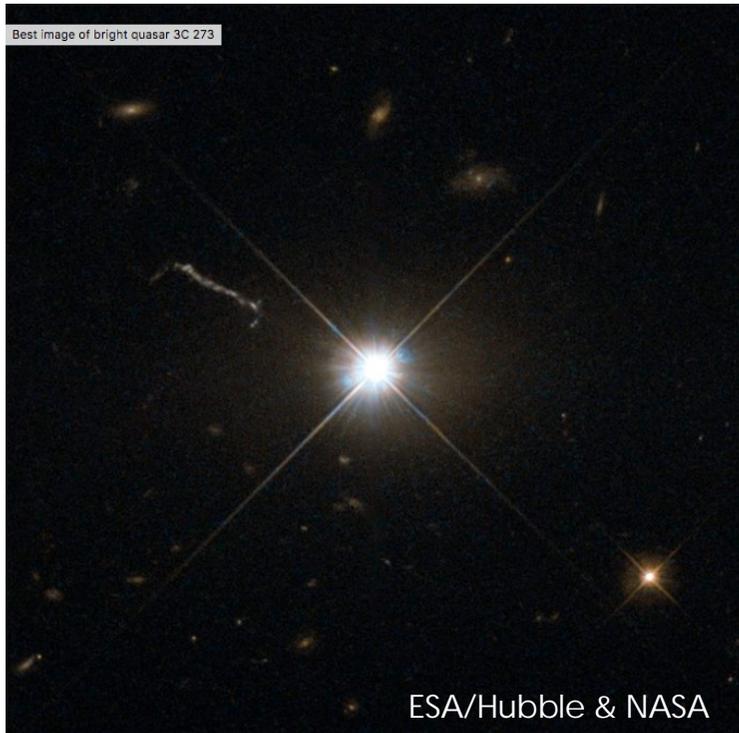


Lauer's bias: les quasars sont souvent sélectionnés à l'aide de levés photométriques à flux limité. Les MBH trop massifs par rapport à la relation moyenne seraient plus brillants et seraient surreprésentés dans l'échantillon sélectionné



Izumi+19

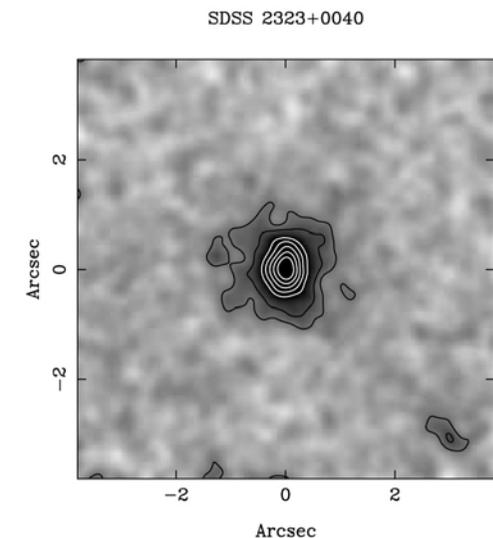
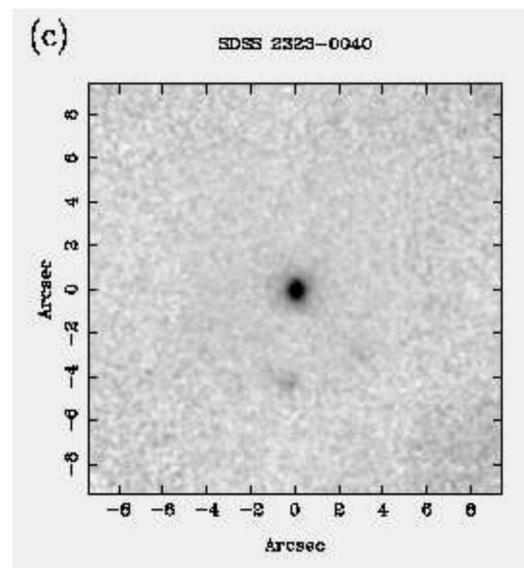
Masses des trous noirs vs galaxies



Le quasar est beaucoup plus brillant que la galaxie

Besoin de soustraire la lumière du quasar, mais très difficile pour les quasars les plus brillants et les plus éloignés

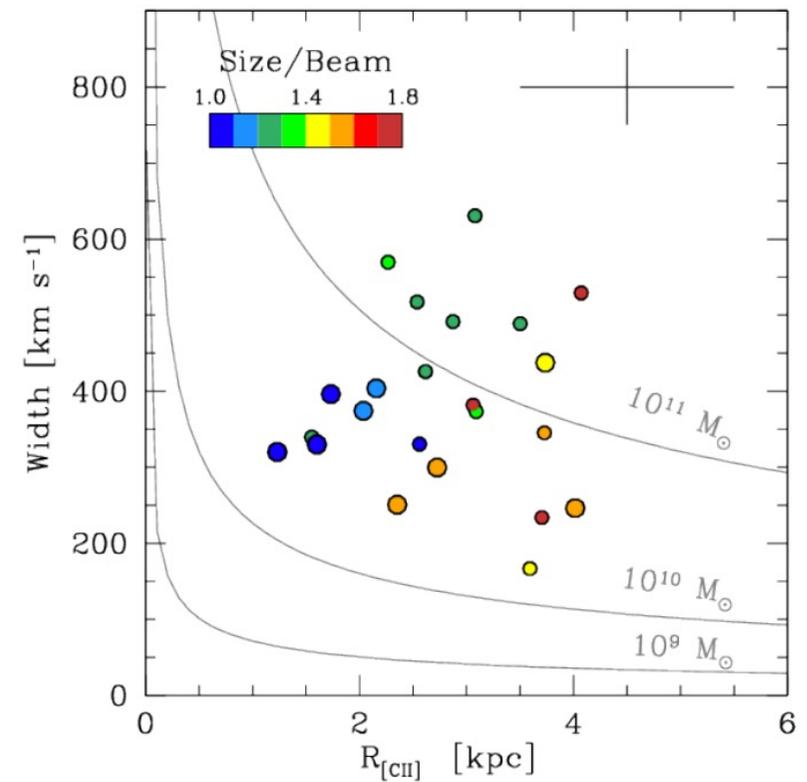
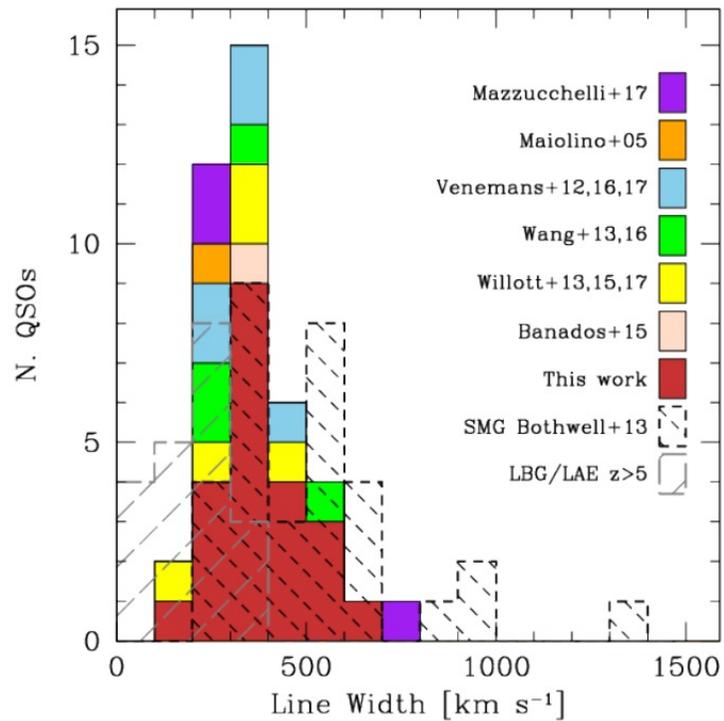
Lacy+02



Masses des trous noirs vs galaxies

Masse dynamique : à partir de la distribution de gaz

$$M = v^2 R / G$$



Decarli+18

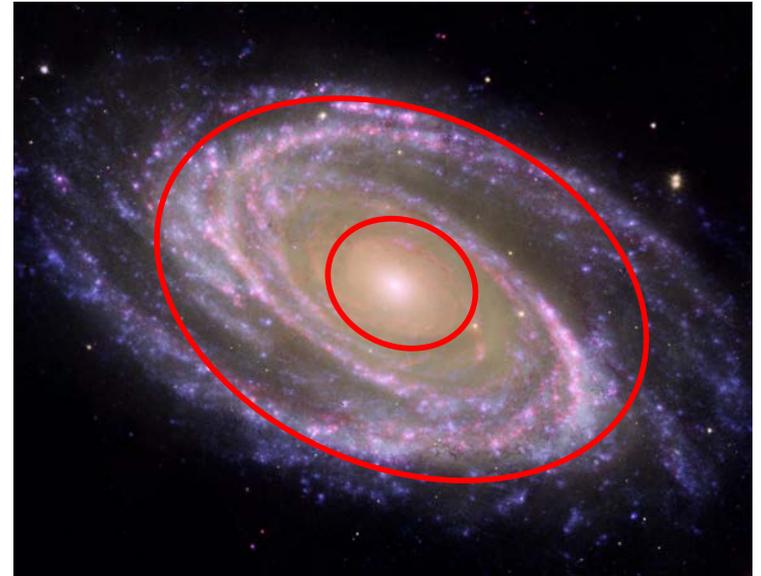
Masses des trous noirs vs galaxies

Masse dynamique : à partir de la distribution de gaz

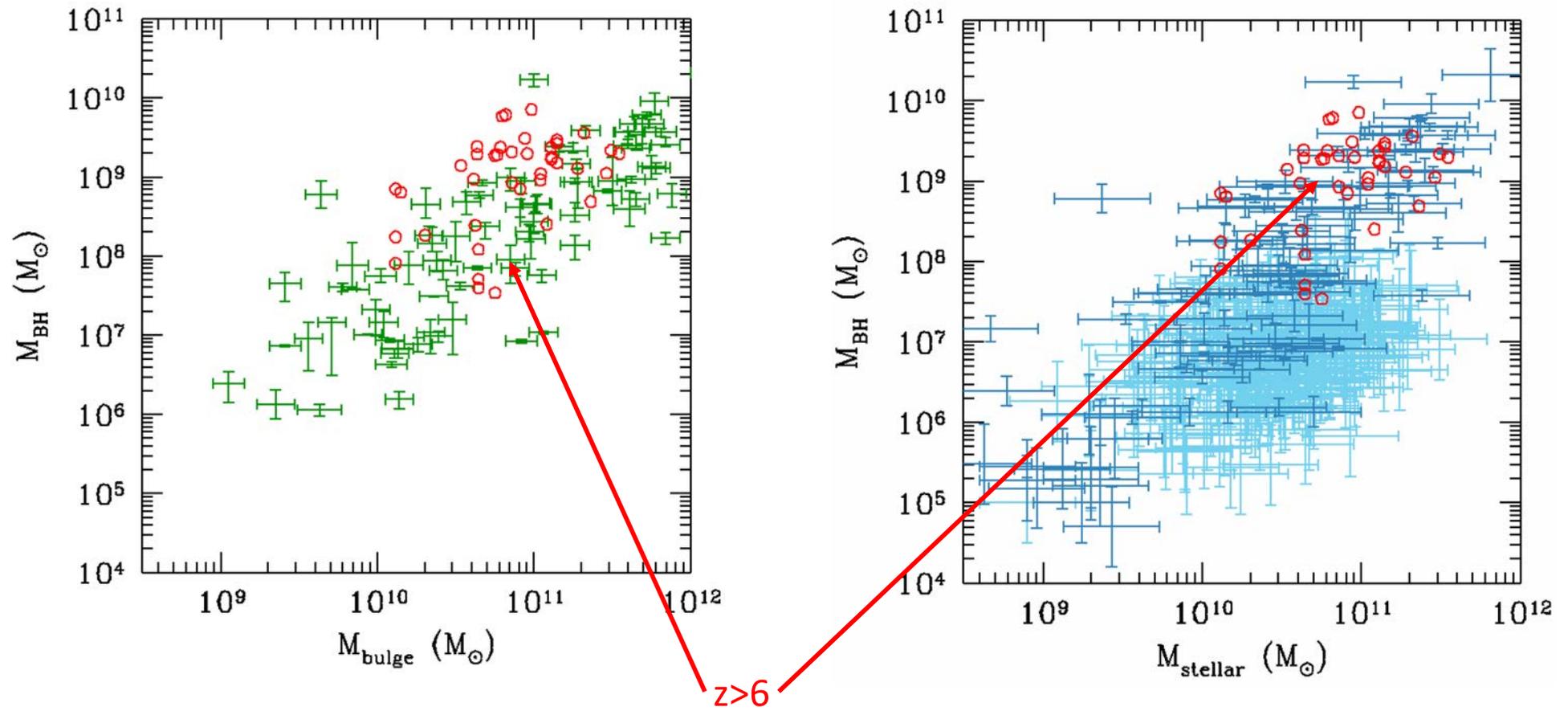
Masse bulbe \neq Masse dynamique

Masse stellaire \neq Masse dynamique

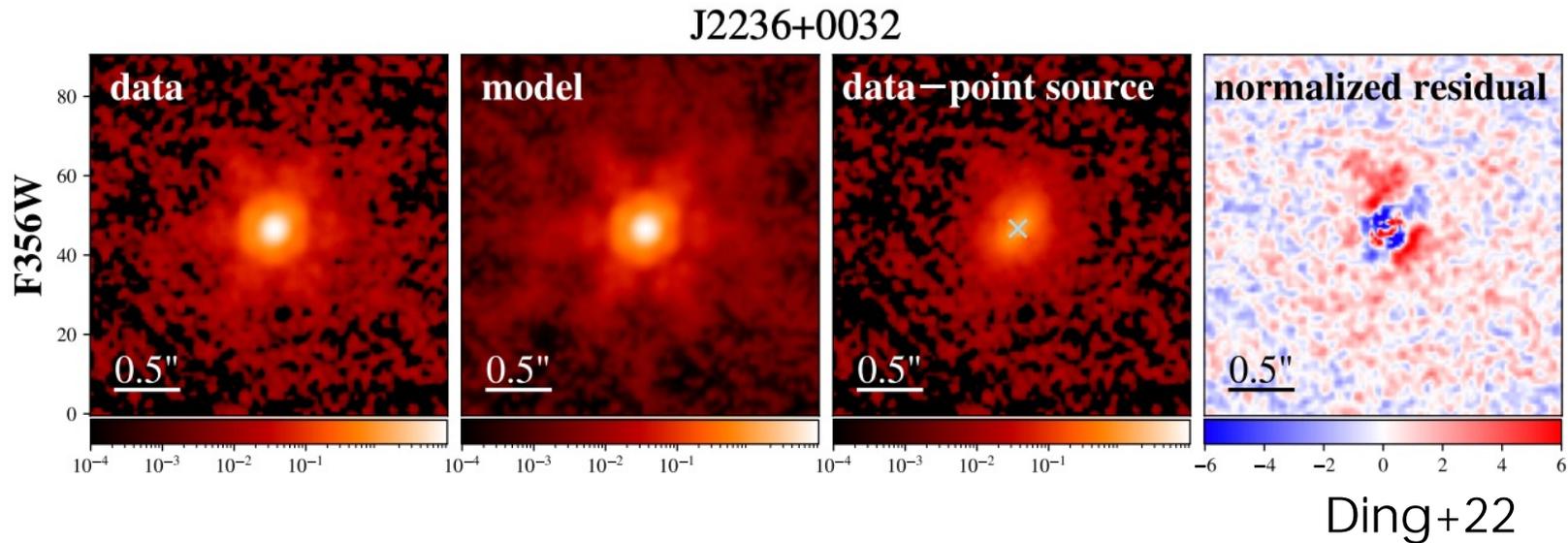
Masse stellaire \neq Masse bulbe



Masses des trous noirs vs galaxies



Masses des trous noirs vs galaxies: une nouvelle époque avec JWST

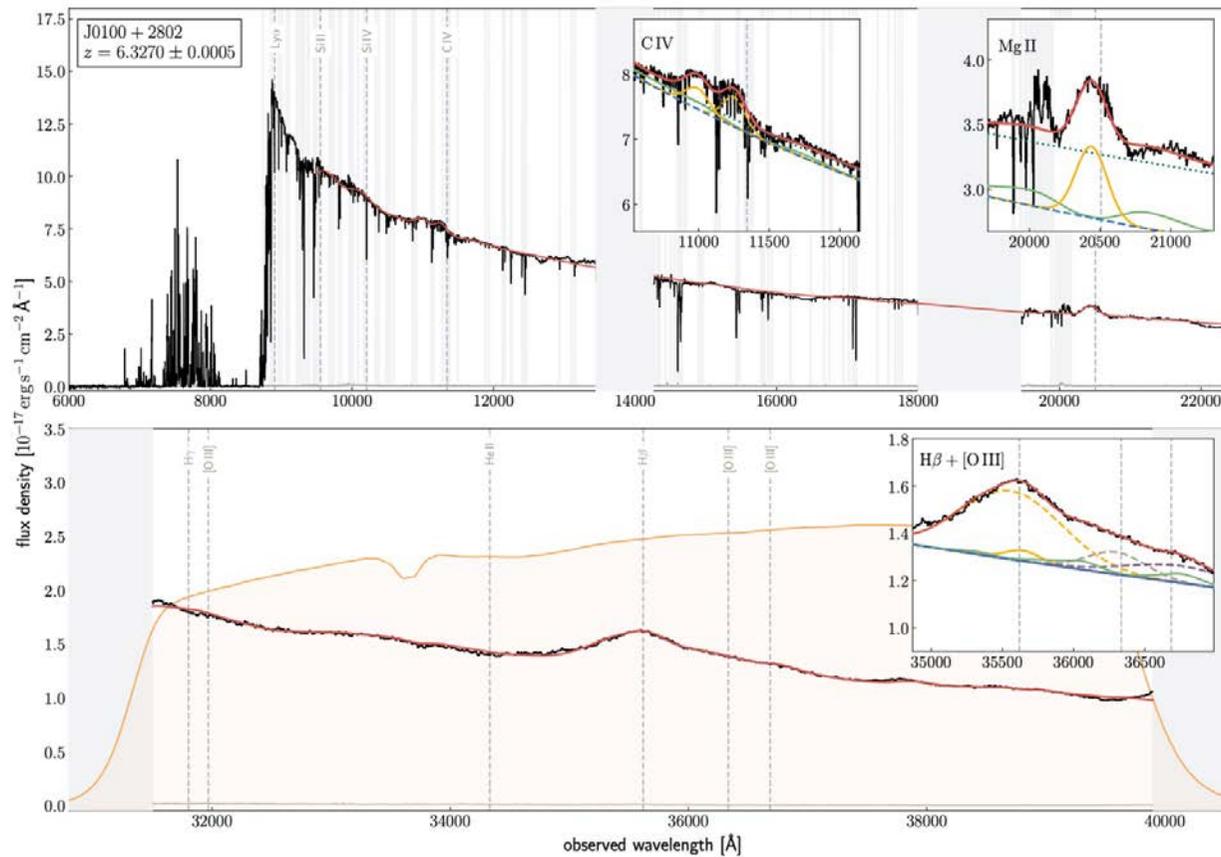


Masses stellaires !

Masses des trous noirs vs galaxies: une nouvelle époque avec JWST

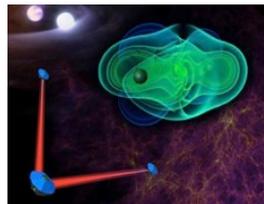
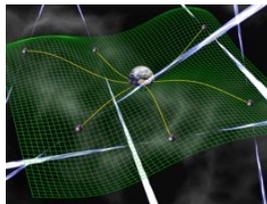
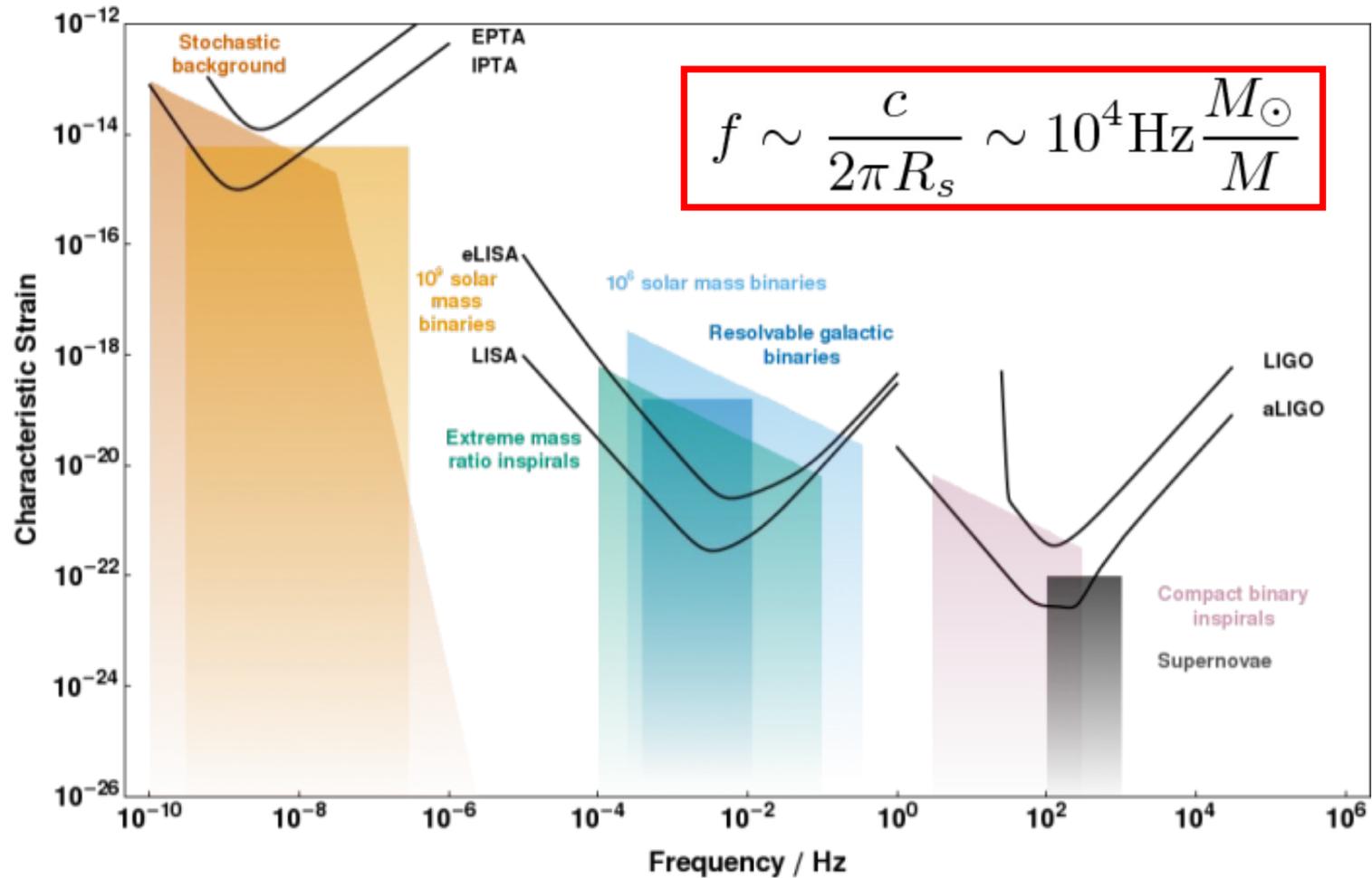
4

A.-C. EILERS ET AL.

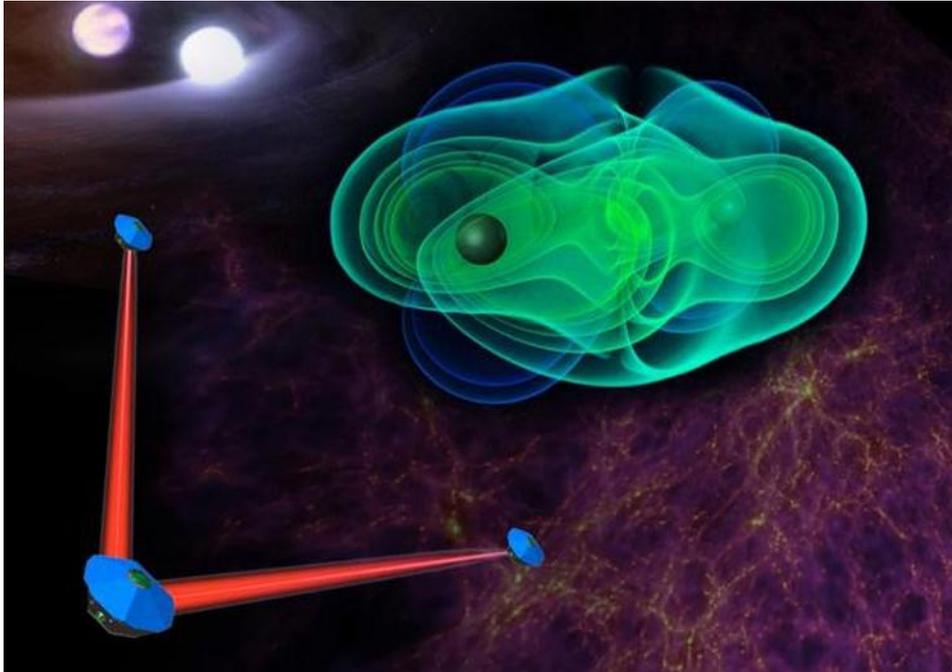


Des masses de trous noirs plus sûres !

Dans l'attente de LISA



Dans l'attente de LISA



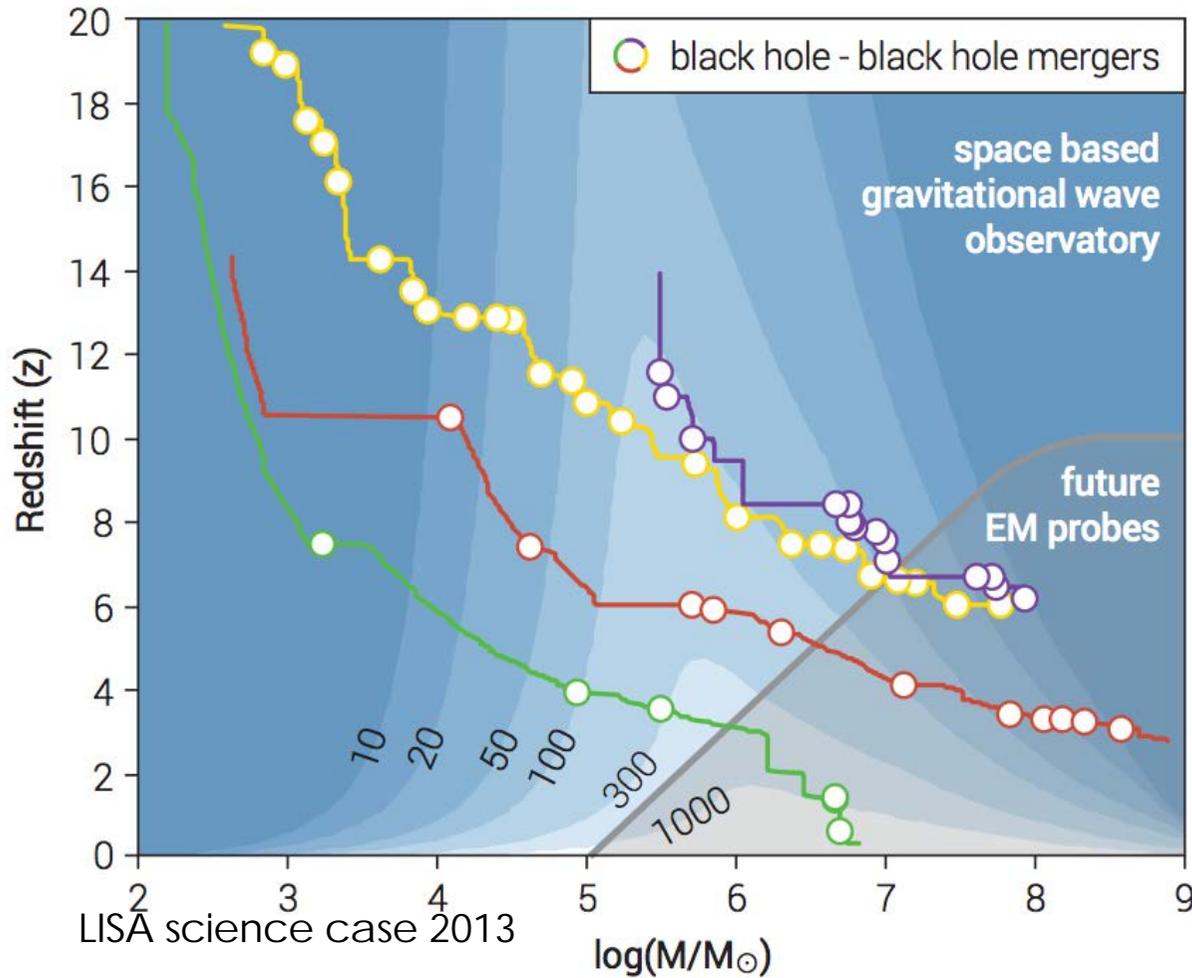
LISA fonctionne d'une manière similaire à LIGO/Virgo/Kagra : mesurer l'étirement de l'espace-temps en utilisant l'interférométrie et les lasers.

La longueur des bras est inversement proportionnelle à la fréquence : à basse fréquence, les bras sont longs.

Pour détecter les ondes gravitationnelles provenant de trous noirs massifs de $\sim 10\,000$ à 10 millions de masses du Soleil il faut une longueur de bras de 2,5 millions de km

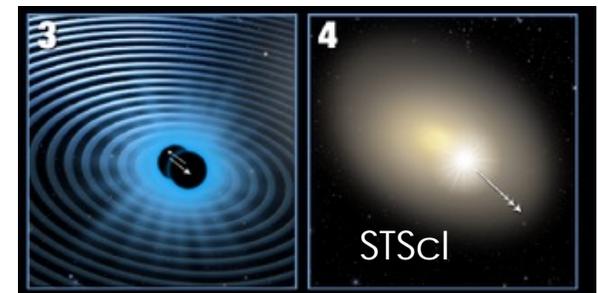
Rayon de la Terre: 6,371 km => il faut aller dans l'espace

Dans l'attente de LISA



Caveats:

- Le recul GW peut éjecter les MBH (Haiman04)
- Délais de fusion MBH incertains (ex. Colpi14)



Conclusions

Les trous noirs massifs habitent le centre de la plupart des galaxies actuelles

Leurs processus de formation sont encore largement inconnus

Les trous noirs massifs ont grandi principalement par accrétion

La production d'énergie des trous noirs actifs façonne leur environnement grâce à la rétroaction

La fusion de trous noirs massifs promet un nouvel espace de découverte et permet de sonder l'époque de leur formation