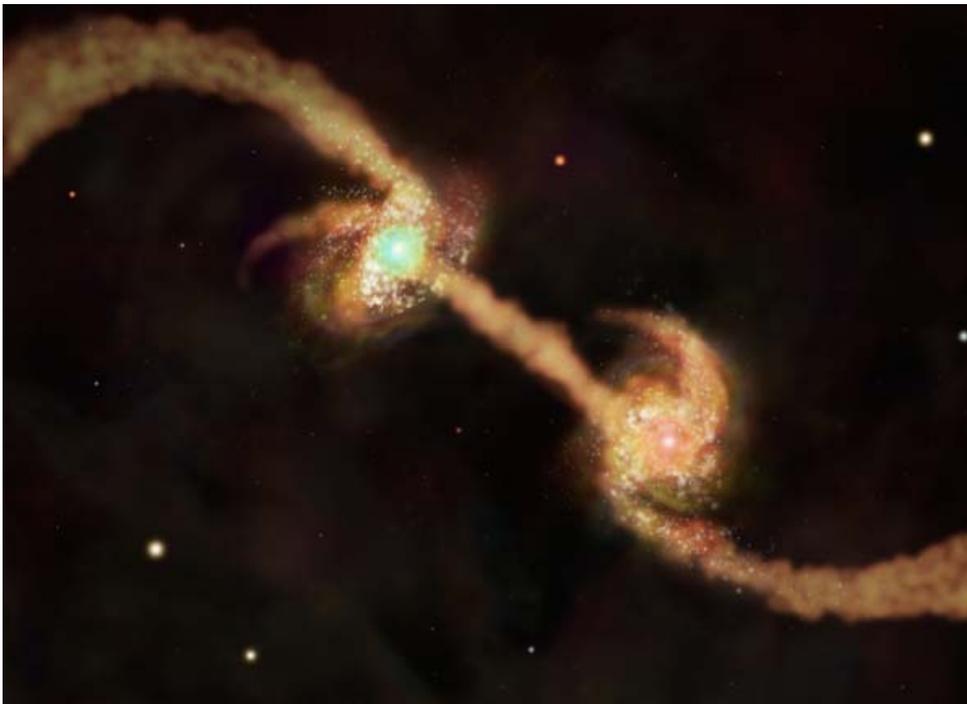




COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

## Fusion de galaxies et Trous noirs binaires



**Françoise Combes**

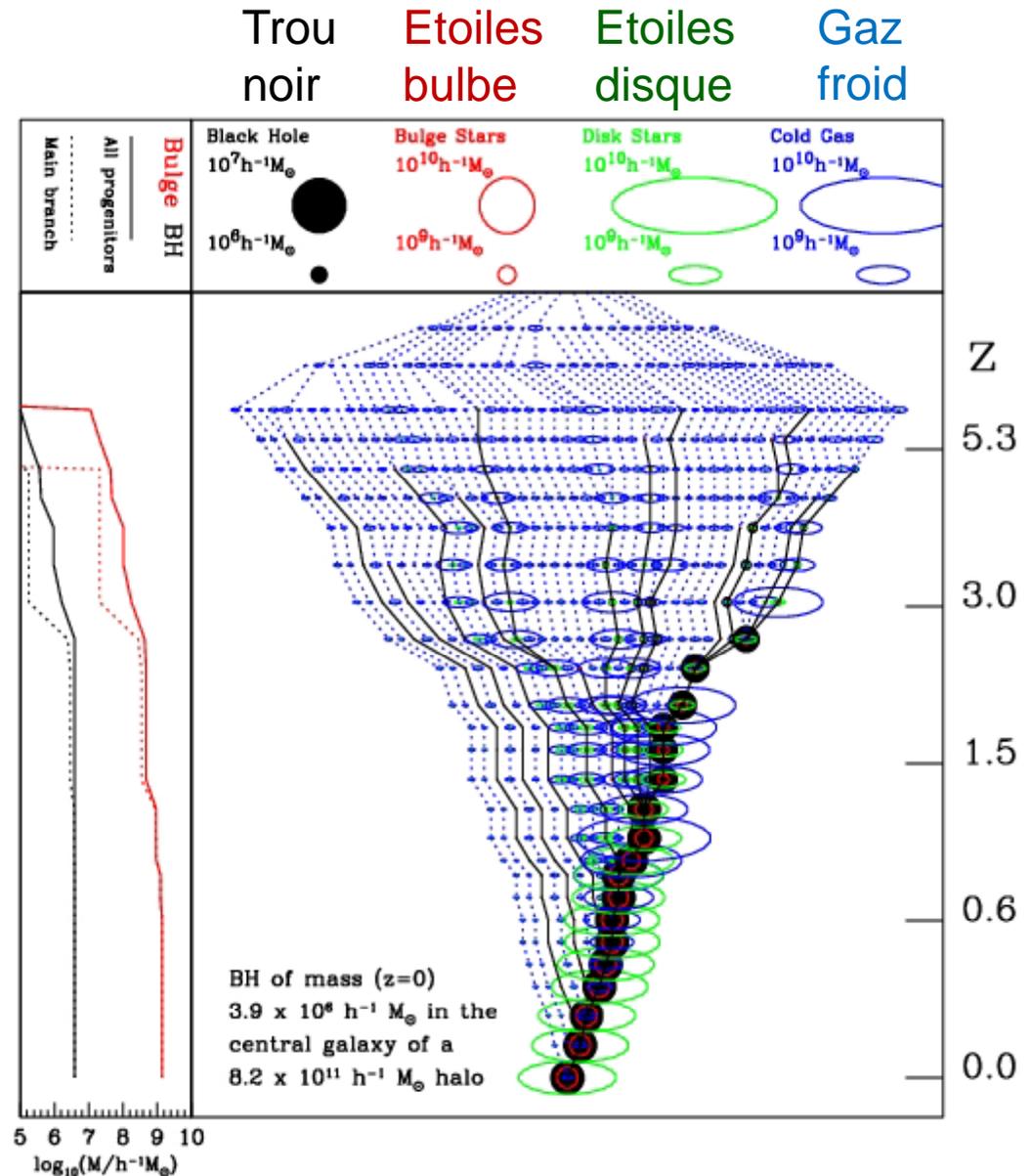


Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

# Croissance des trous noirs par fusion

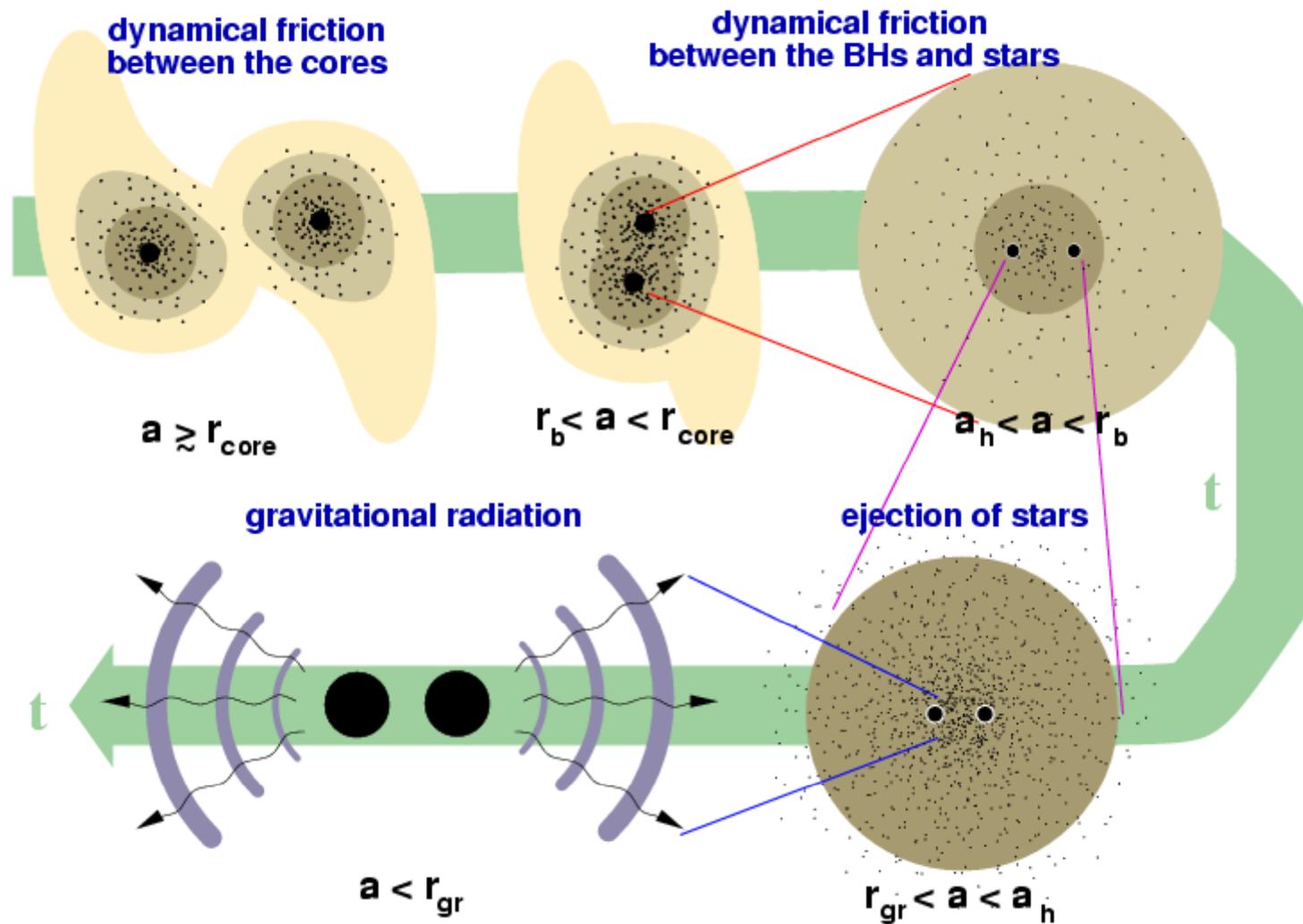
Les trous noirs nucléaires peuvent fusionner lors de la coalescence de galaxies

Mais parfois pourraient être éjectés par les ondes gravitationnelles et le recul associé



# Friction dynamique sur les étoiles, le gaz, puis ondes gravitationnelles

## MERGING OF BHs DUE TO



Interaction  
3 corps  
BH+BH+\*

# Echelles de temps de la fusion

La friction dynamique sur les étoiles, en un temps  $t_{\text{fric}}$  pour chaque trou noir individuel

$$t_{\text{fric}} = \frac{1.17}{\ln \Lambda} \frac{r^2 V_c}{GM_{BH}} = \frac{1.17}{\ln \Lambda} \frac{M(< r)}{M_{BH}} t_{\text{orb}}$$

Ceci jusqu'à ce que la paire ( $M_1, M_2$ ) devienne liée, soit à une séparation  $a_b$

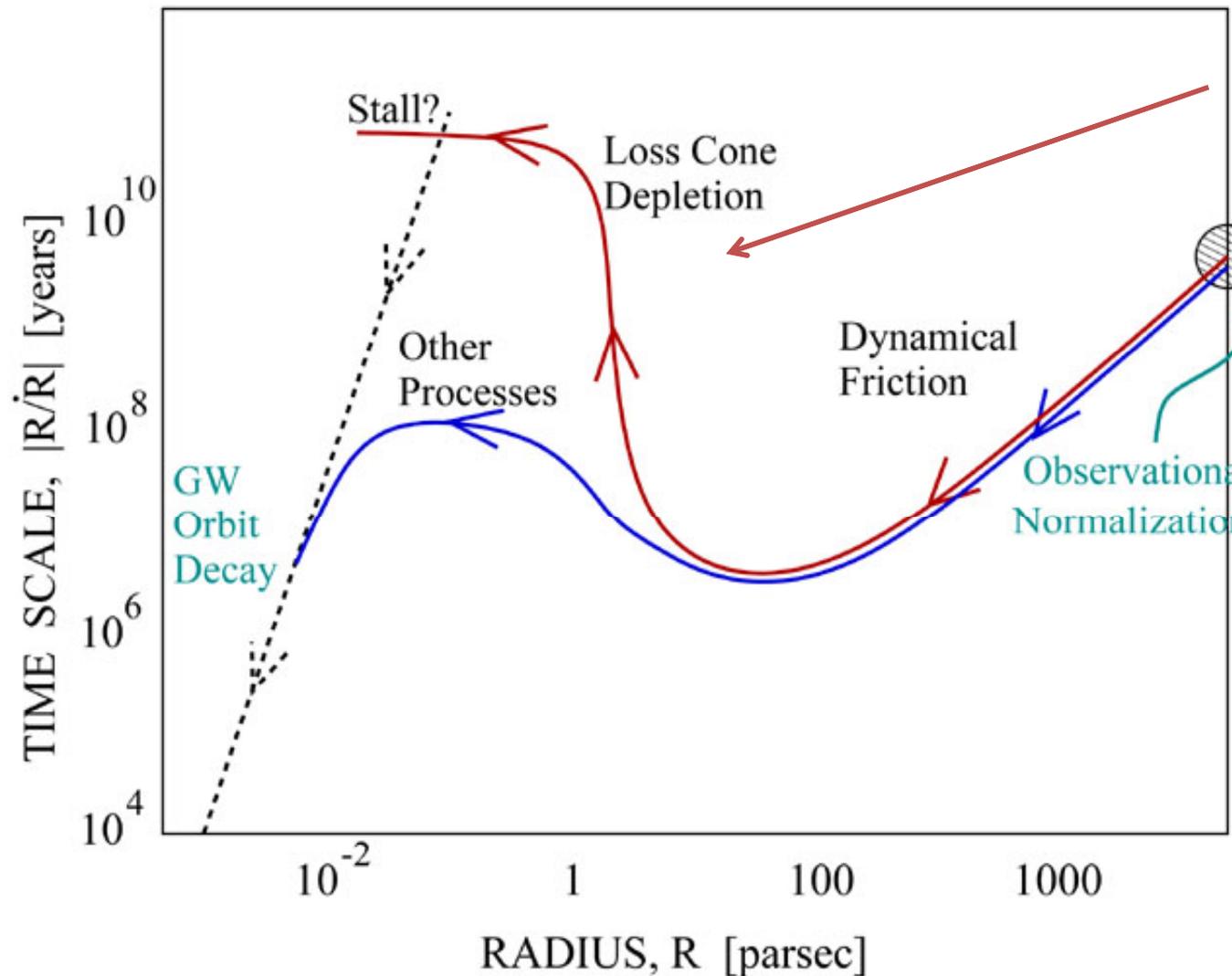
$$a_b = \frac{G(M_1 + M_2)}{2\sigma^2}$$

La binaire alors se resserre en éjectant des étoiles, mais les étoiles manquent, c'est le phénomène du cône de perte ou « **loss cone** »

Les étoiles avec ce moment angulaire ont déjà été éjectées

→ S'il y a du gaz (dissipatif) vers le centre, il pourrait échanger du moment, et c'est une solution pour arriver à la distance (0.01pc) où les ondes gravitationnelles prennent le relai

# Evolution de la binaire

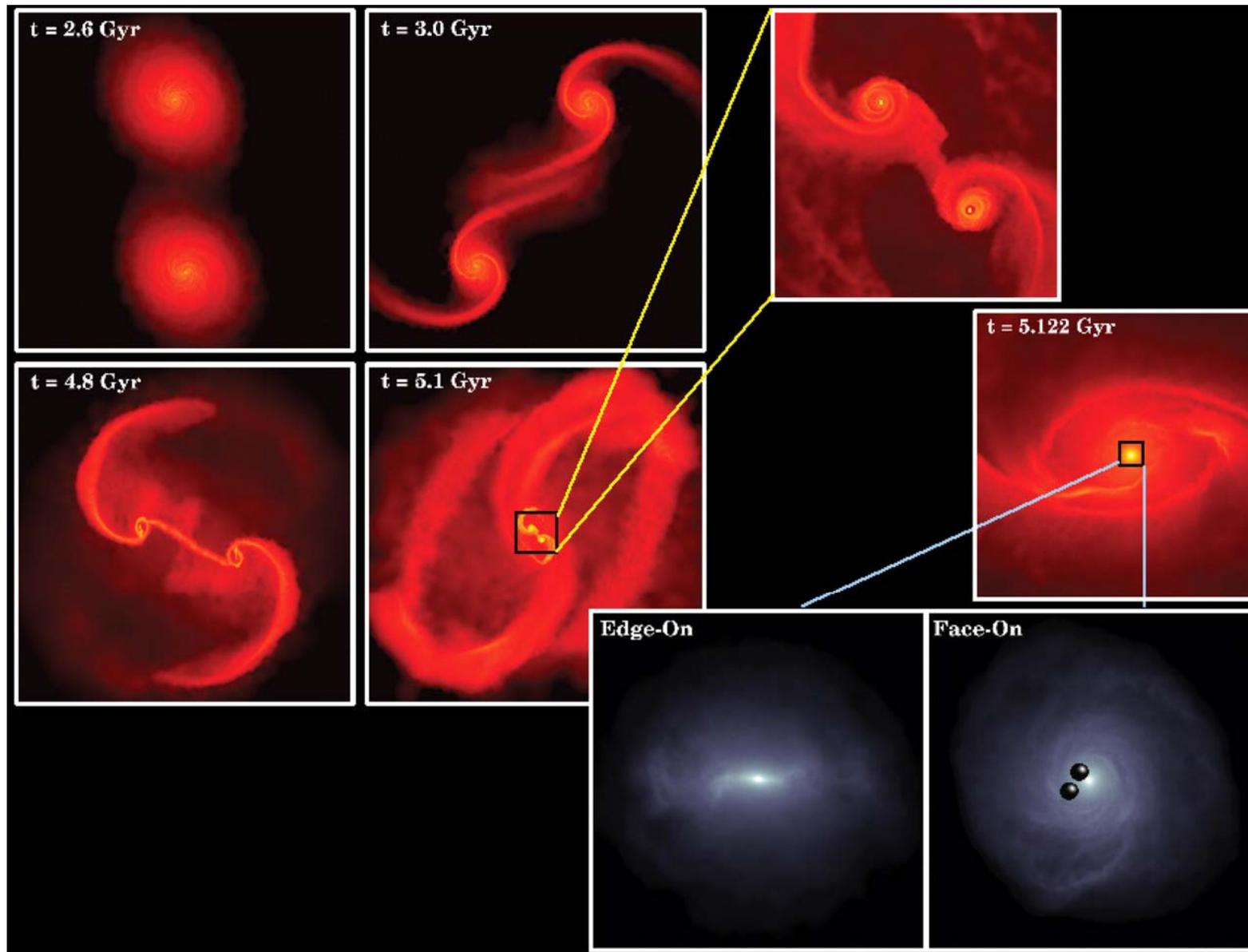


Problème du passage en-dessous de 1pc

Les ondes gravitationnelles font perdre énergie et moment angulaire en un temps  $\sim 10^3$  yr  $10^8 M_{\odot}$ , 0.01pc

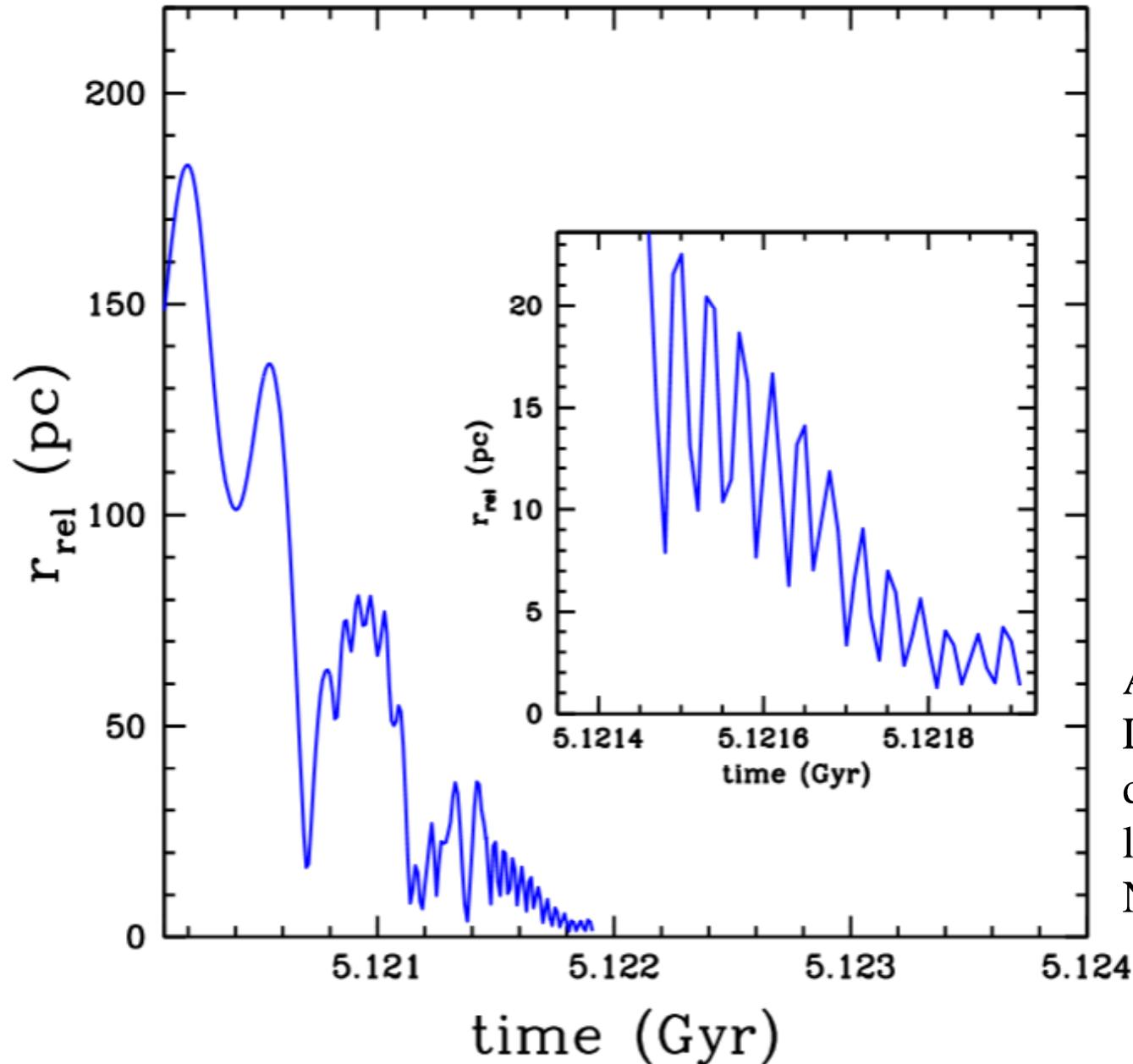
$$t_{GR} = \frac{5c^4 a^4}{256G^3 M_1 M_2 (M_1 + M_2)}$$

# Fusion de galaxies avec gaz



Deux TN  
 $3 \times 10^6 M_{\odot}$   
jusqu'à  
séparation  
 $\sim 1 \text{ pc}$   
→ fusion  
possible  
grâce au  
disque de  
gaz  $M \sim$   
 $3 \times 10^9 M_{\odot}$ ,  
 $r \sim 80 \text{ pc}$

# Orbite des deux trous noirs

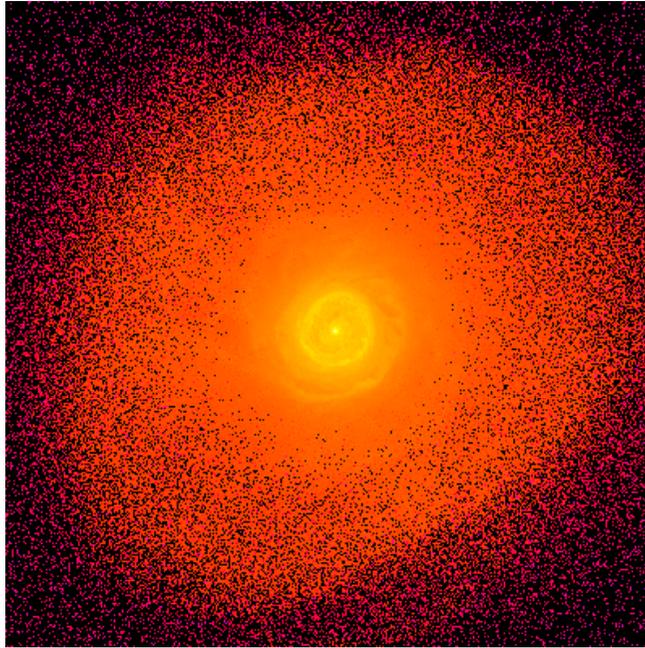


L'orbite reste  
excentrique  
jusqu'à la fin

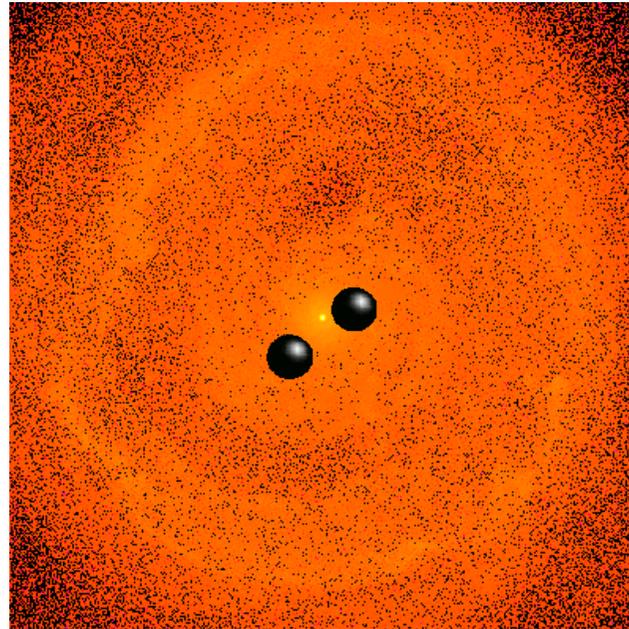
Attention:  
Les résultats  
dépendent de  
la résolution  
Nbre de particules, etc..



# Plus de résolution spatiale

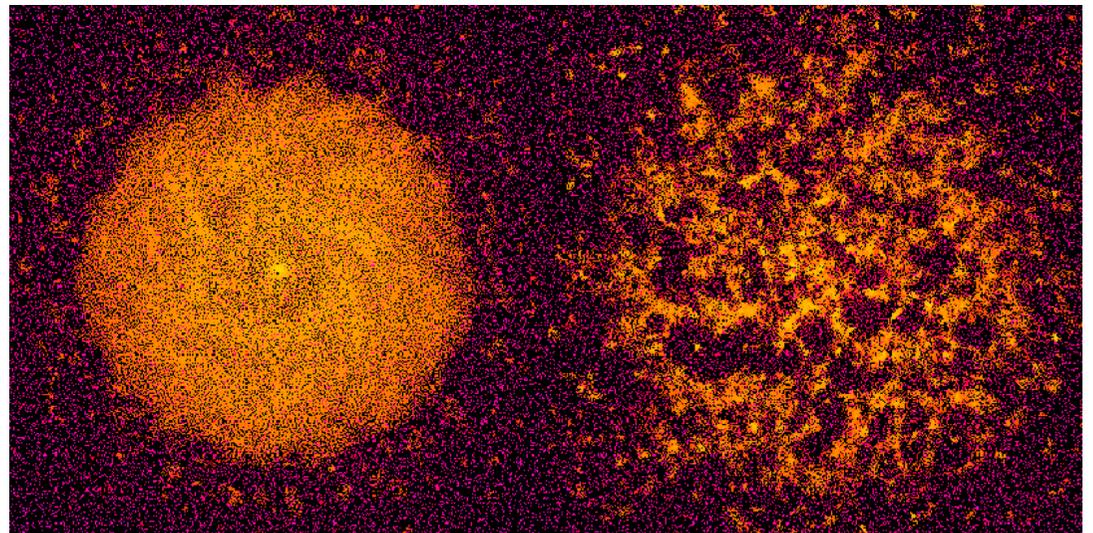


Boîte de 120pc



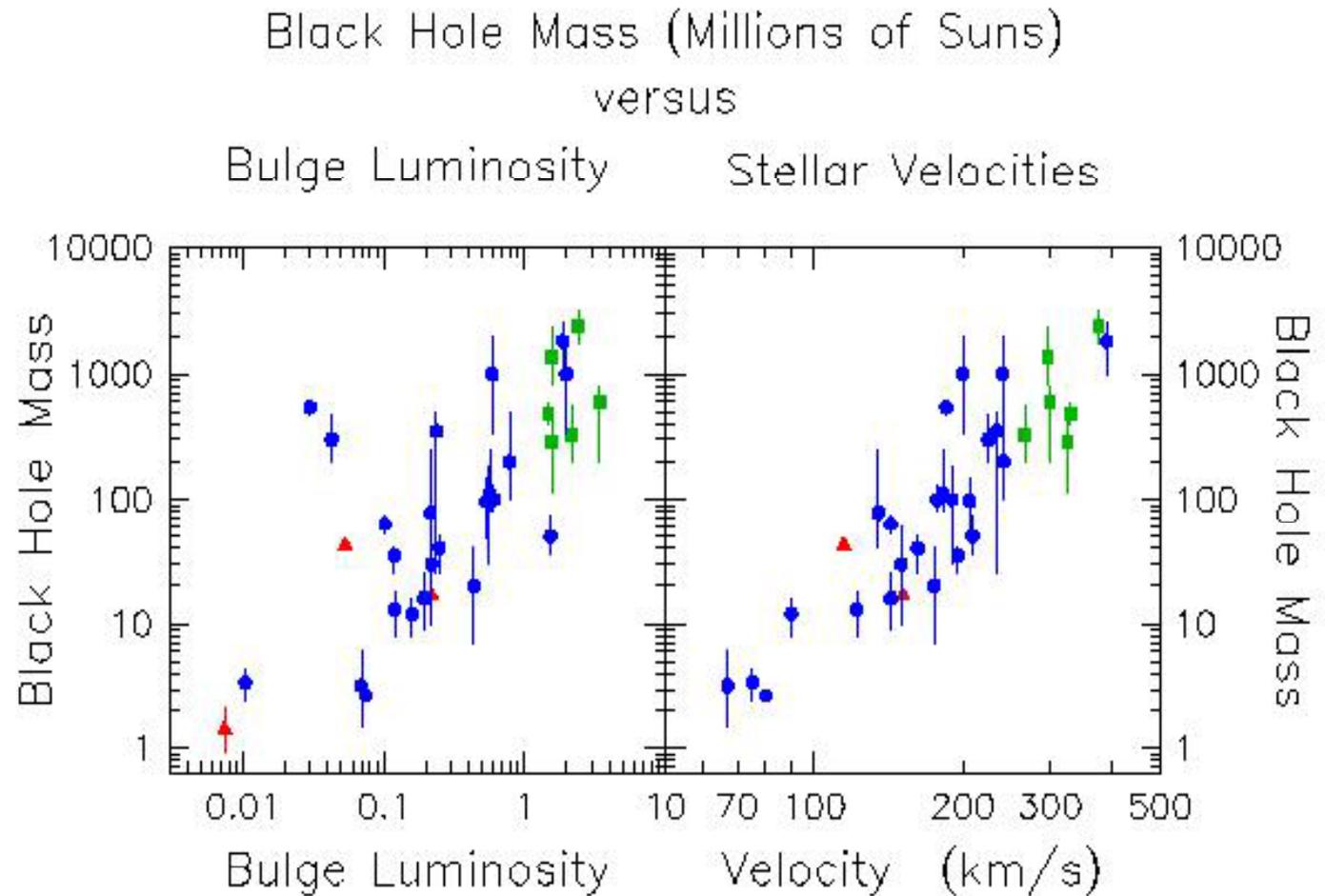
Boîte de 6pc

Mais difficile d'éviter la formation d'étoiles !



# Explique la loi d'échelle, $M_{\bullet}$ - $M_{\text{bulbe}}$ , ou $M_{\bullet}$ - $\sigma$ ?

$$M_{\bullet} = 0.2\% M_{\text{bulbe}}$$



Bleu: vitesses des étoiles    Vert: vitesses du gaz  
Rouge: disques avec masers  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ..

(Magorrian et al 98, Ferrarese & Merritt 01, Shields et al 02)

# Rôle des fusions dans la relation $M_{\bullet}$ - $M_{\text{bulbe}}$ ?

Essentiellement accrétion de gaz, et parfois fusion de galaxies

**Accrétion limitée par les couples de gravité**

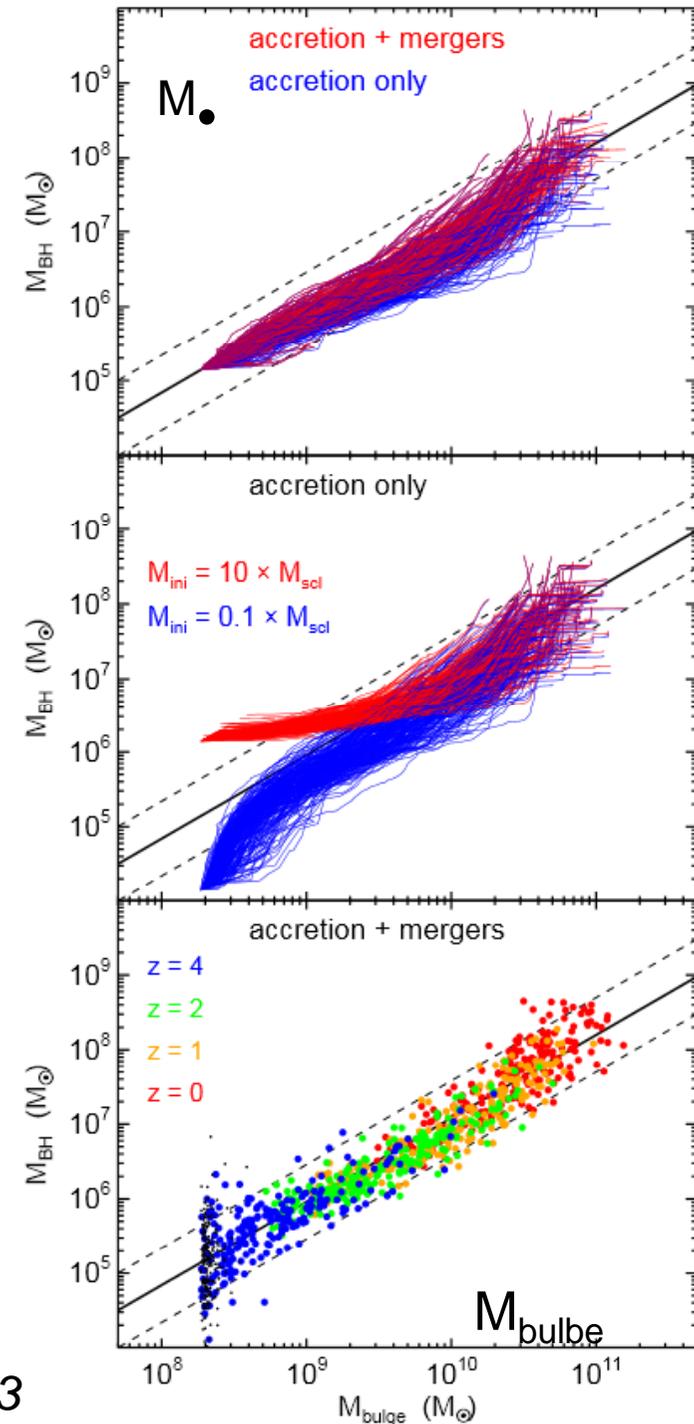
Evolution numérique

Relation  $M$ - $\sigma$  à partir de graines de TN

L'effet des conditions initiales est vite effacé

**$dM_{\text{BH}}/dt \sim \text{SFR}$  avec dispersion**  
**Feedback pas vraiment nécessaire**

*Angles-Alcazar et al 2013*

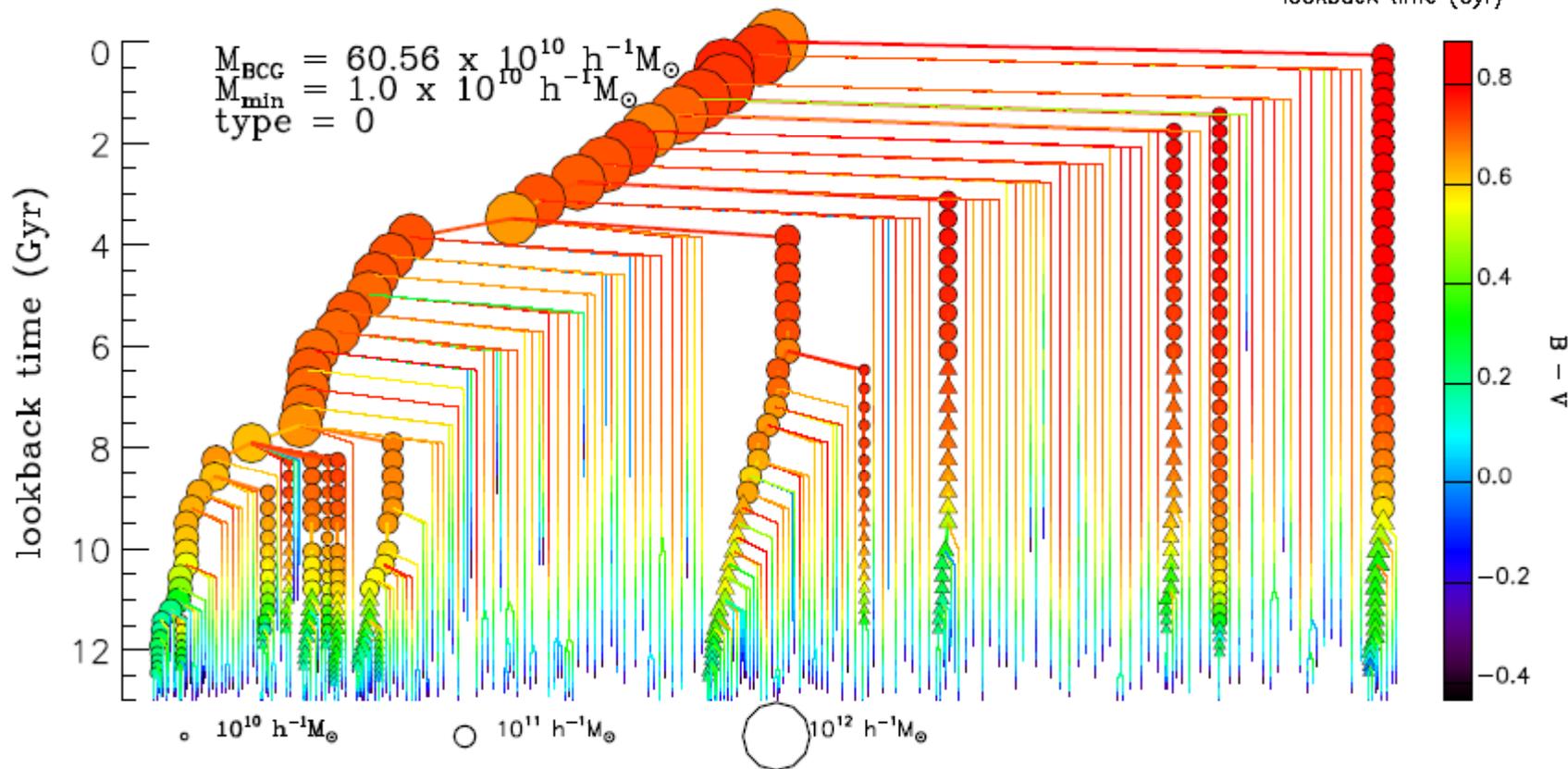
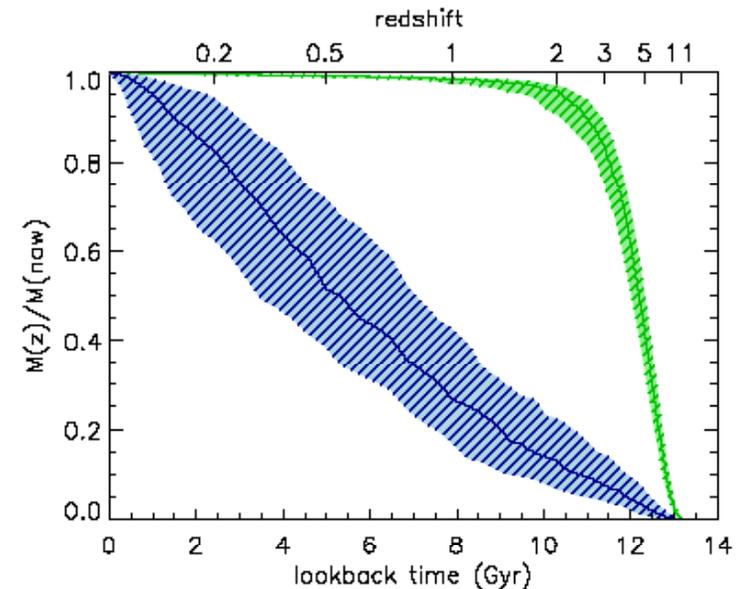


# Formation anti-hiérarchique

Fusions sans formation d'étoiles depuis  $z=1$   
 50% des étoiles formées à  $z=5$ ;  
 assemblage de la masse après  $z=0.5$

*De Lucia & Blaizot 2007*

## Accrétion sur les trous noirs avant $z=2$ ?



# Premier quasar binaire résolu à $z=0.44$

**Les AGN sont grégaires: Excès de Quasars plus proche de 40kpc d'un autre quasar** (*Hennawi et al 2006 Myers et al 2007, 2008*)

Les QSO se trouvent dans les environnements riches

SDSS J125455.09, A & B: Distance 21kpc en projection

A/B = cst sur tout le spectre, même couleur

DV  $\sim 200$ km/s -- queues de marée – interactions de galaxies

NLR/BLR régions très différentes: A en accrétion

**Lentille gravitationnelle?**

Pas de lentille détectable, pas de raies d'absorption provenant de la lentille

*Green et al 2010*

*Plutôt galaxies binaires*

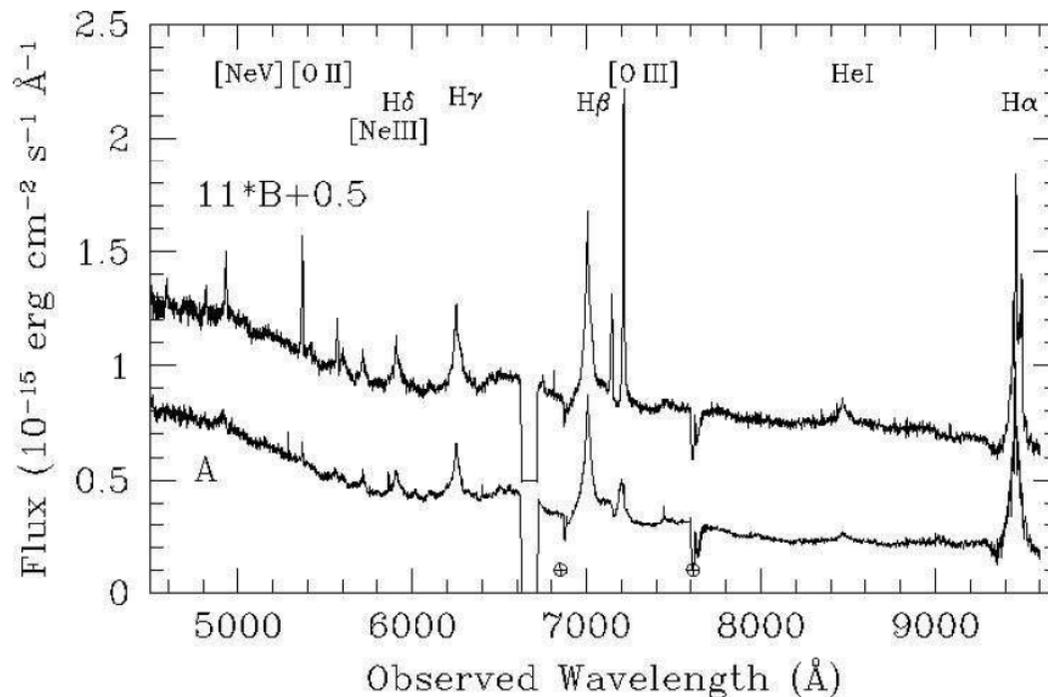
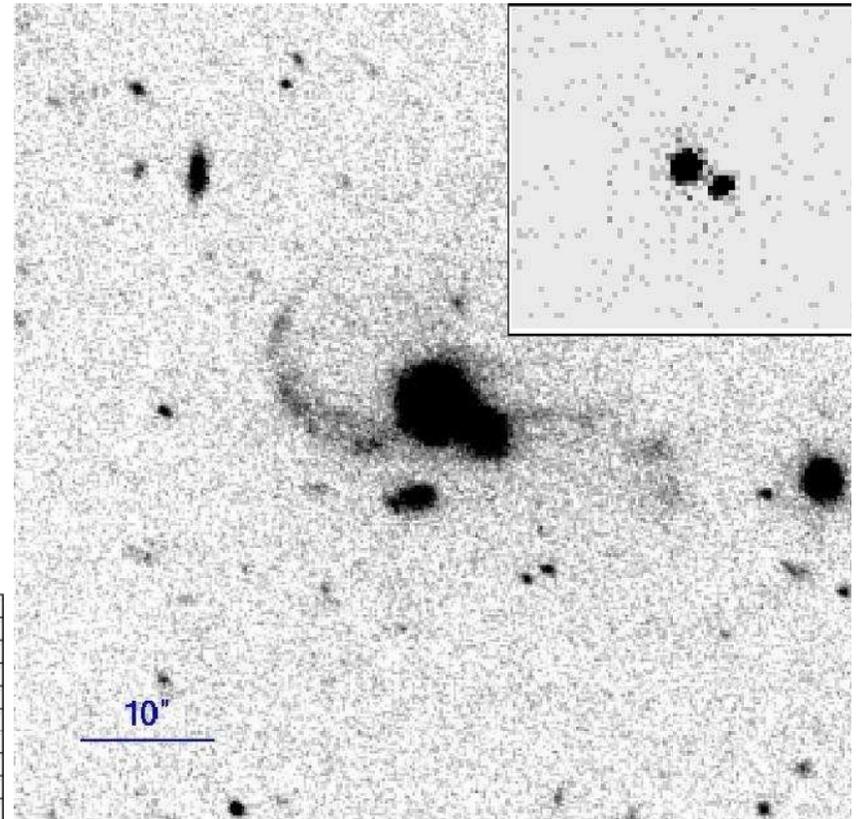
*que TN binaires*

$R_{infl} \sim 200pc$



# Premier quasar binaire à $z=0.44$

Fusion en cours, de deux AGN de type I: systèmes non-obscurecis  
Radio silencieux, vus de face par effet de sélection (petit DV)  
Possible de mesurer la masse des TN  
 $3 \cdot 10^8$  &  $6 \cdot 10^7 M_{\odot}$



*Green et al 2010*

Un des quasars accrète à  $L_{\text{Edd}}$

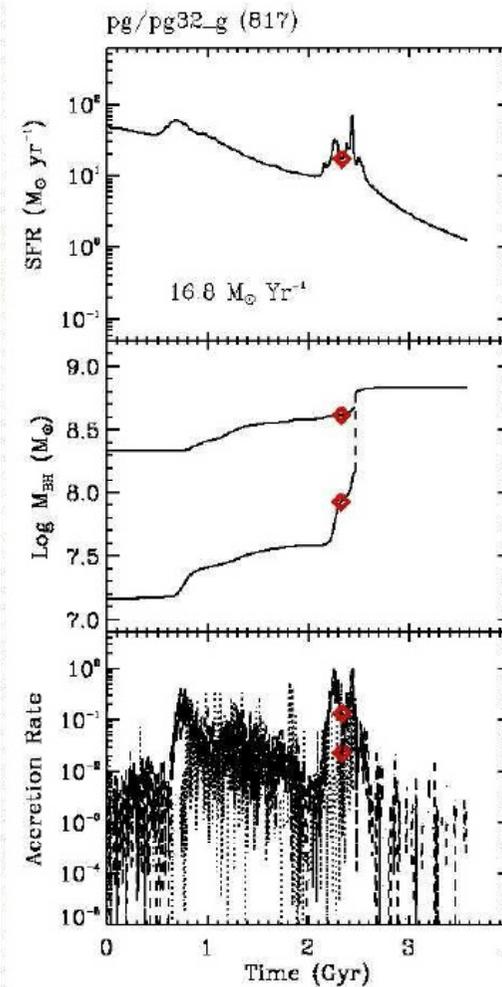
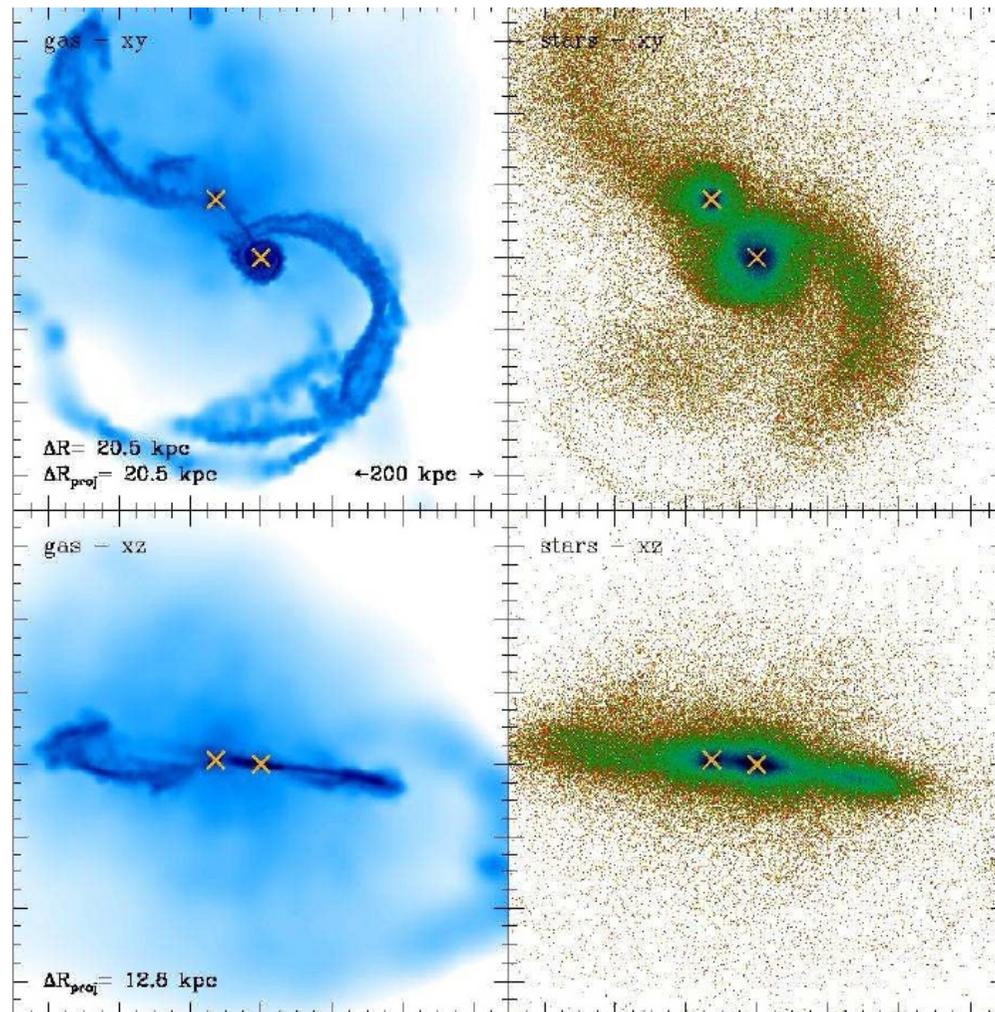
# Simulation des quasars binaires

Gaz en bleu, Etoiles au milieu

SFR et  $M_{\text{BH}}$  en fonction du temps

Taux d'accrétion en fonction du temps

*Green et al 2010*



SFR

$M_{\text{BH}}$

Accrétion

# CID-42 dans COSMOS à $z=0.359$

*Civano et al 2010*

Distance entre les deux AGN = 2.5kpc

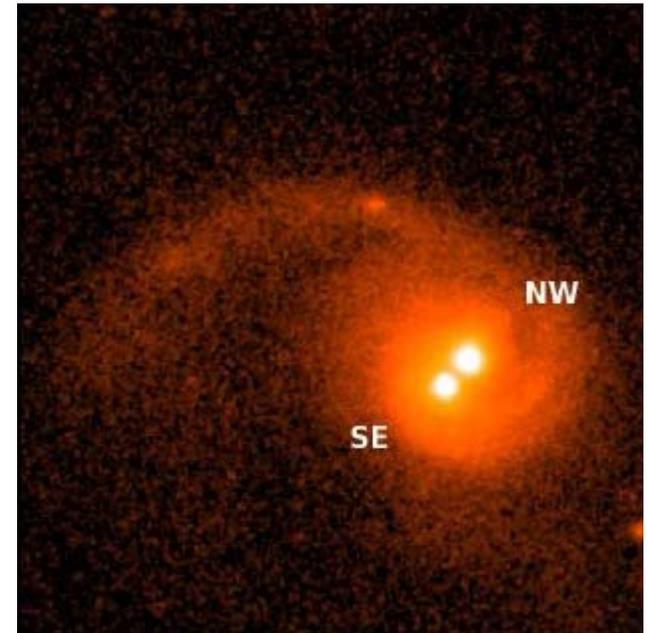
1200 km/s entre NLR et BLR  $H\beta$

Forte raie d'absorption large du fer en rayons X,  
+ émission, profil P-cygni inversé

**(1) Une onde gravitationnelle (GW) fait reculer le trou noir,**  
surpris 1-10 Myr après la fusion, ou

**(2) 2 AGN de Type 1/Type 2 dans la même galaxie où celui de**  
Type 1 recule dû à l'effet **de fronde produit par un triplet**  
de trous noirs

Dans le 2ème cas, la raie d'absorption en X est expliquée  
comme un flot sortant (BAL) du noyau d'avant-plan (un AGN de Type 2)  
absorbant le continu de l'AGN de Type 1 derrière, qui illumine  
le vent, autrement indétectable

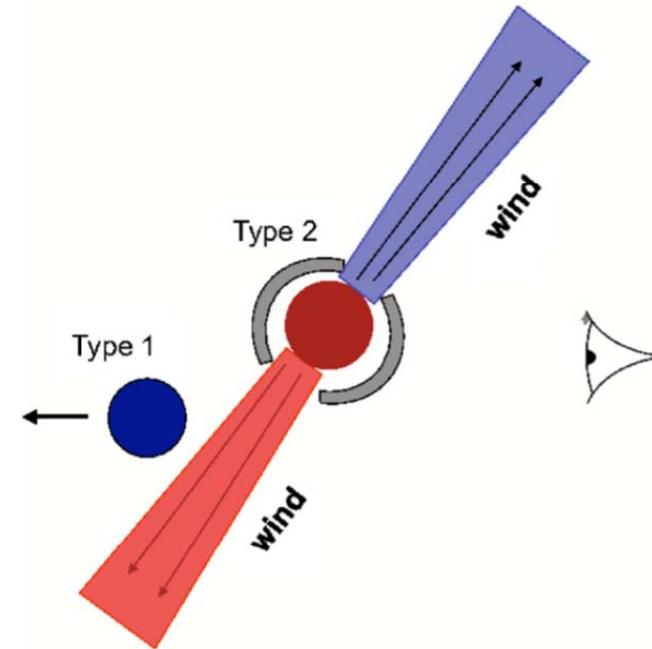
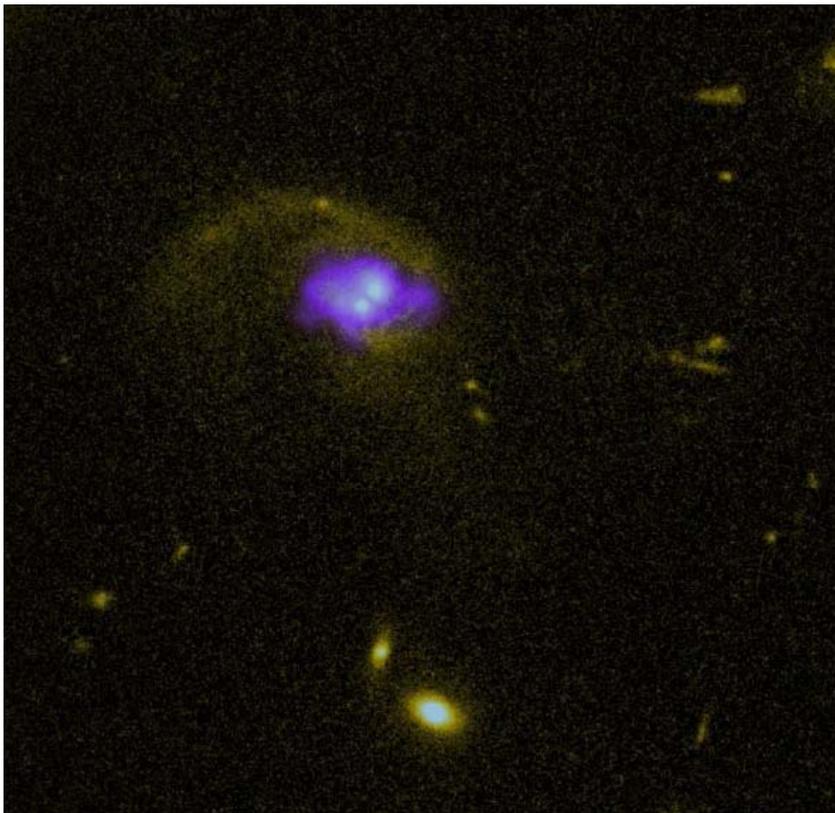


# Rare dans le champ de COSMOS

Séparation entre les 2 AGN = 2.5kpc

DV= 1200 km/s

*Civano et al 2010*



Dans le champ COSMOS  
 $10^6$  galaxies,  $2 \cdot 10^4$  spectres

On s'attend à 30 cas d'AGN binaires  
(*Volonteri & Madau 2008*)

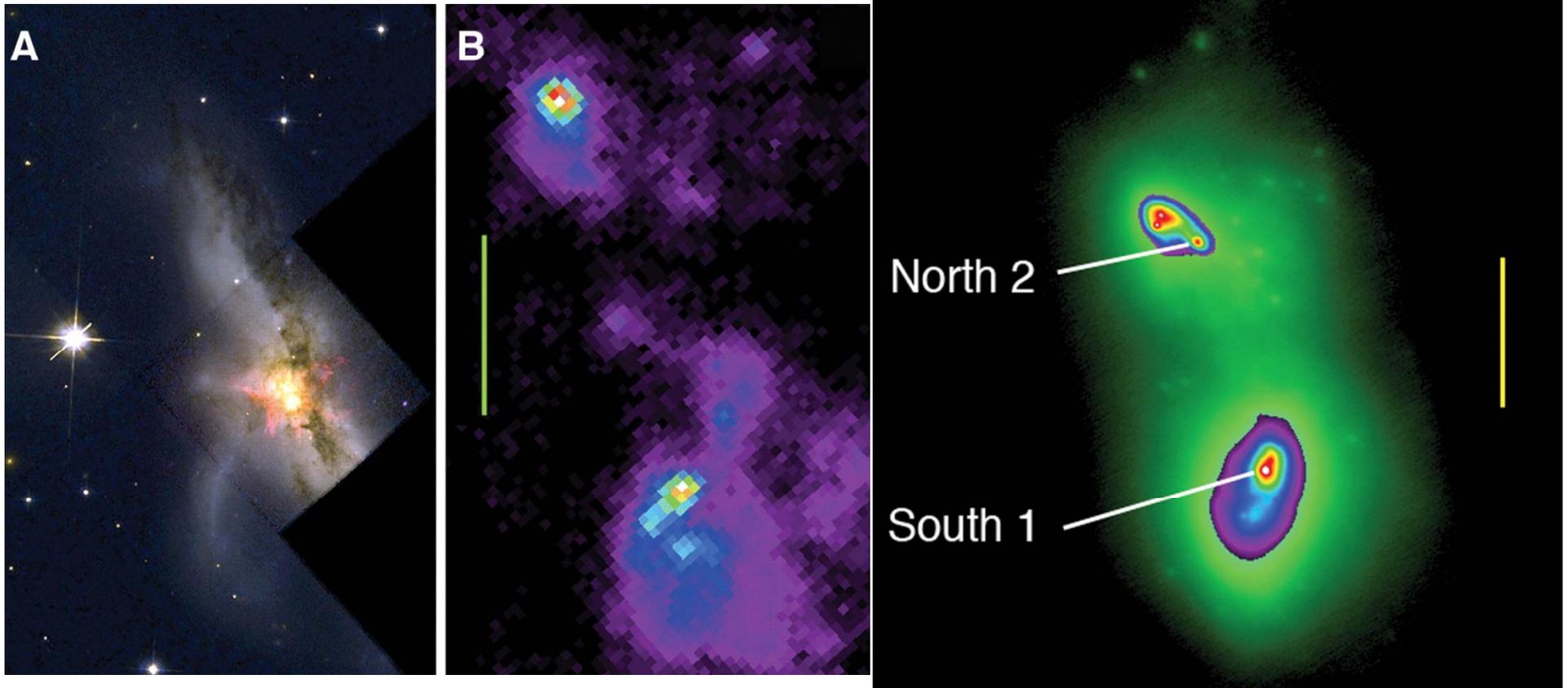
En fait, un seul!

# AGN binaire dans NGC 6240

Optique

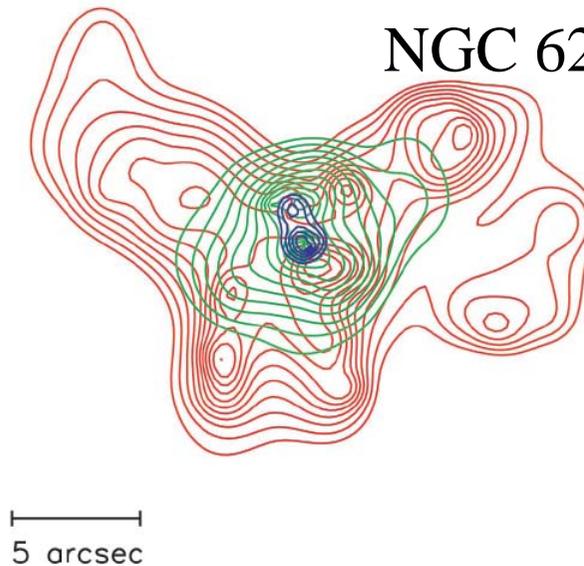
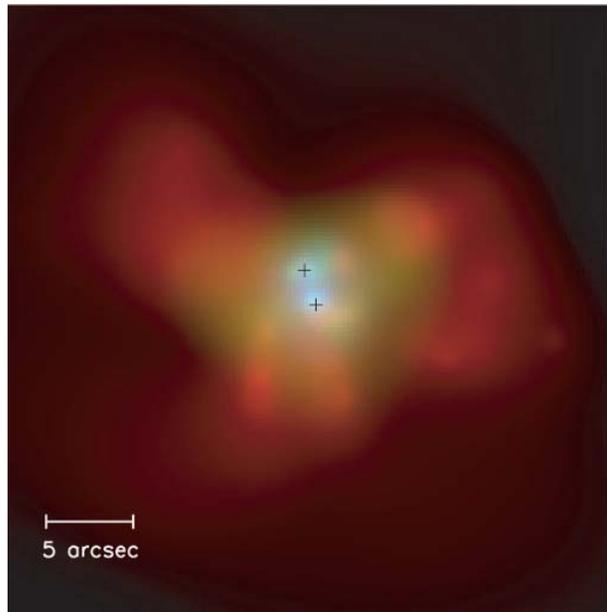
Optique (zoom)

NIR K (zoom)



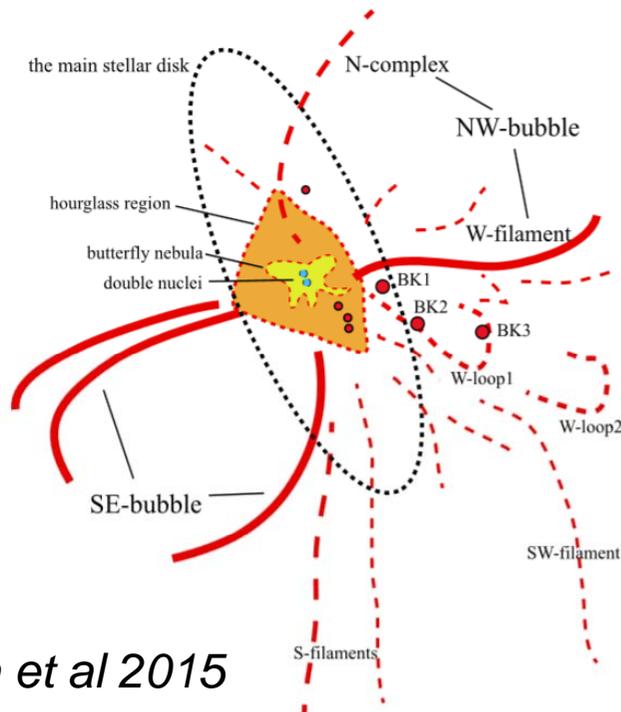
NGC 6240 est une fusion en cours. Les deux noyaux sont des AGN en radio et en rayons X. Ils sont entourés chacun d'un disque  
Séparation 800pc

# Les AGN binaires sont très rares localement

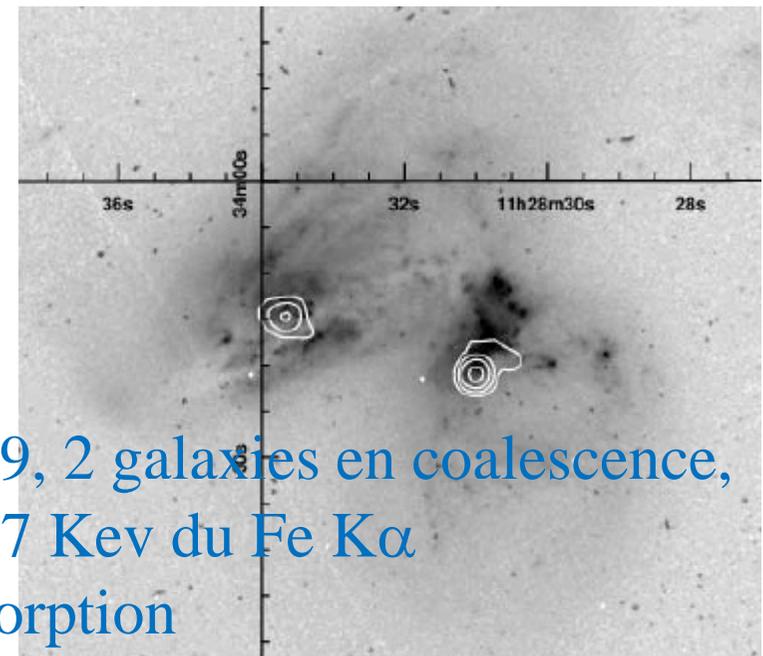


NGC 6240: une fusion starburst  
*Komossa et al 2003*

Raies Fe  $K\alpha$  en absorption  
vents  
Séparation  $\sim 1$ kpc



*Yoshida et al 2015*



Arp 299, 2 galaxies en coalescence,  
Raie 6.7 Kev du Fe  $K\alpha$   
En absorption

# Radio sources binaires localement extrêmement rares

Fe K $\alpha$  lines, Absorptions

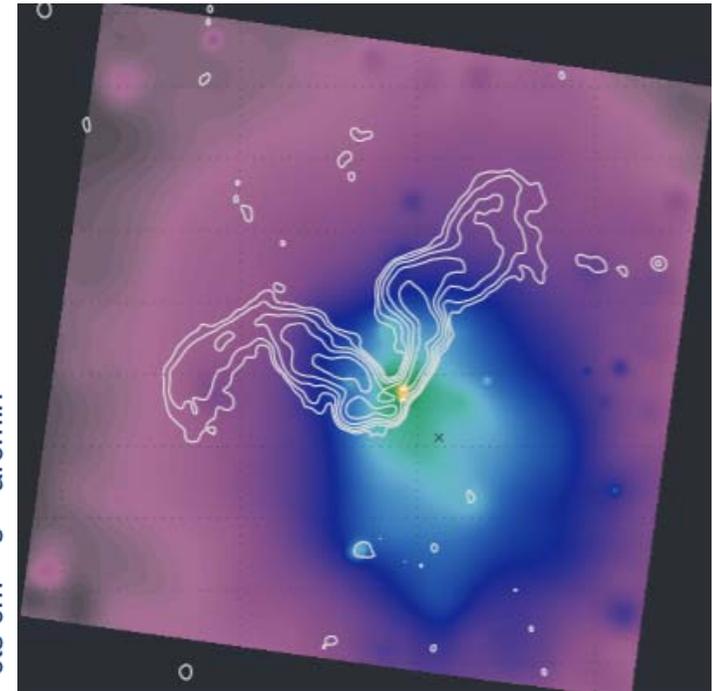
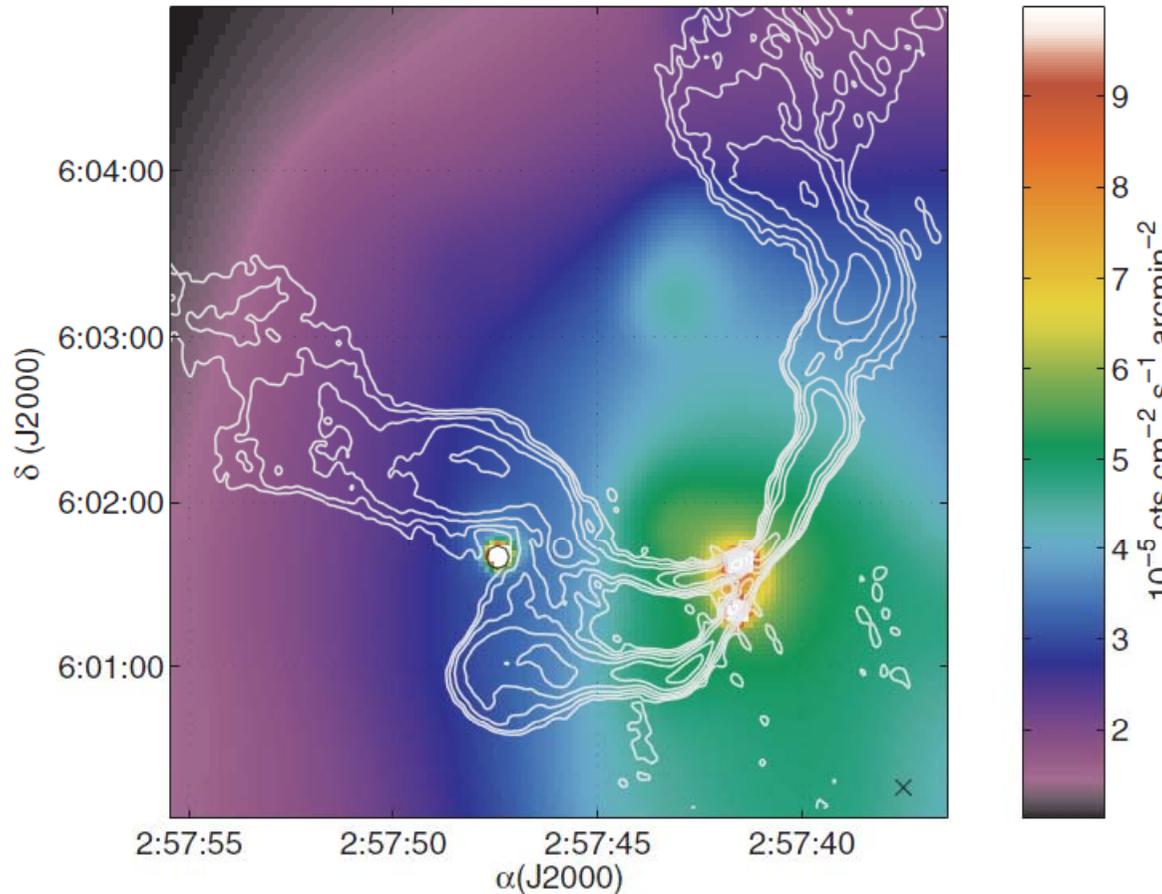
Vents rapides

Séparation 1.2kpc  $\rightarrow$  fusion

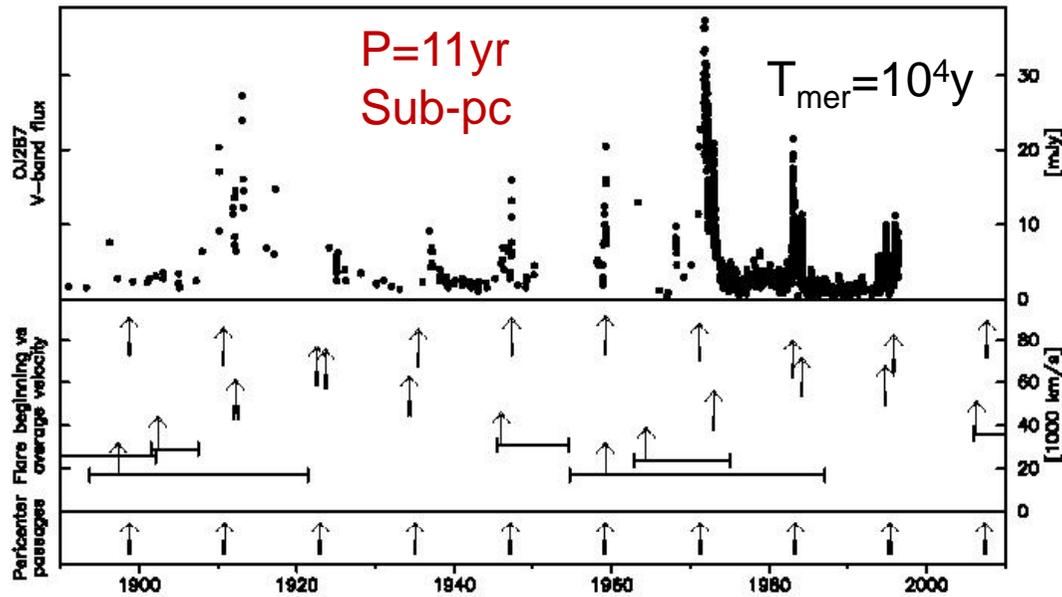
*Pas de flot de refroidissement*

*Hudson et al 2006*

3C75 in Abell 400

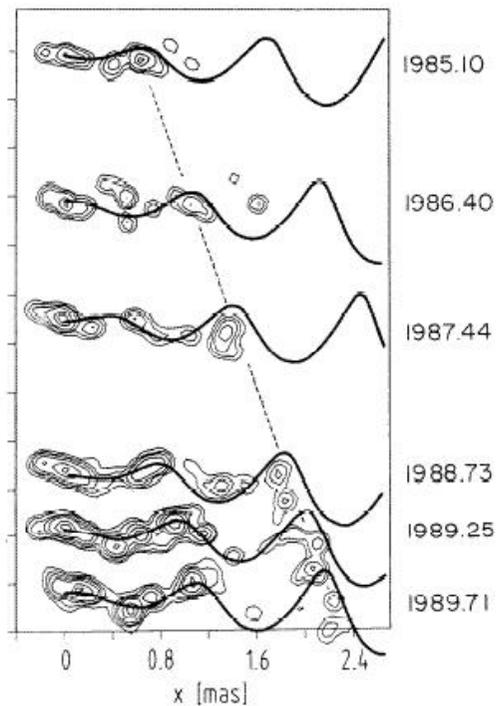


La binaire bouge dans  
l'amas avec 1200 km/s



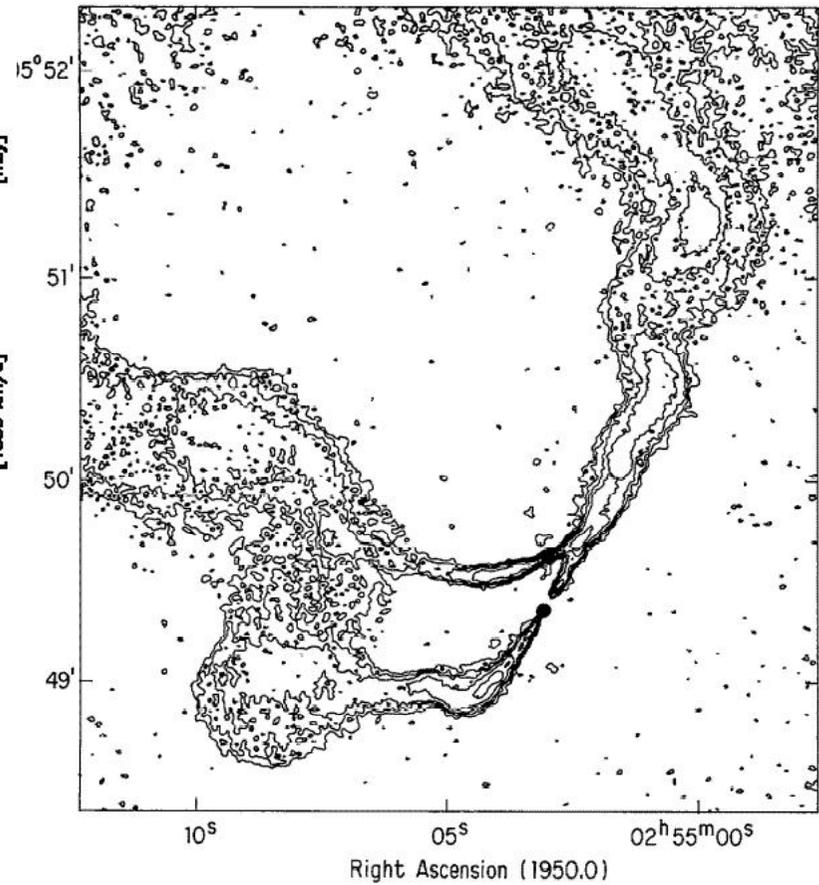
OJ287, courbe de lumière sur 100yrs

*Pietila 1998*



*Roos et al 1993*

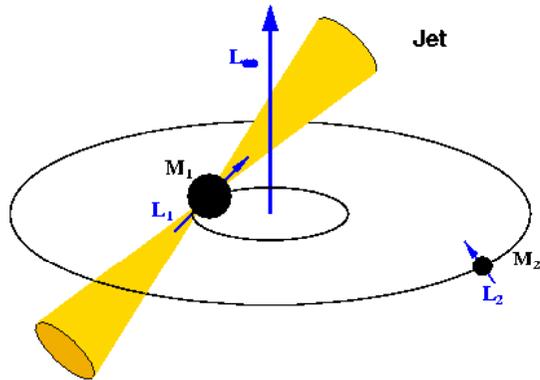
Carte VLBI du jet de 128+738  
oscillations dues au mouvement orbital  
du trou noir, de période 3.2 yr



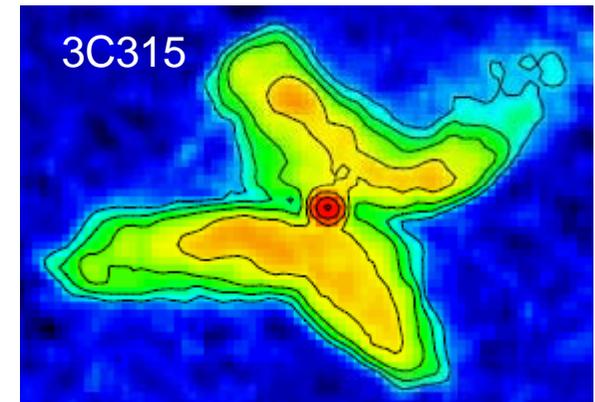
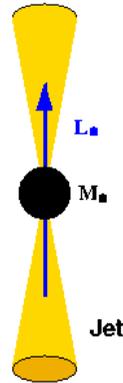
**3C75**, *Owen et al 1985*

# Re-orientation des jets radio

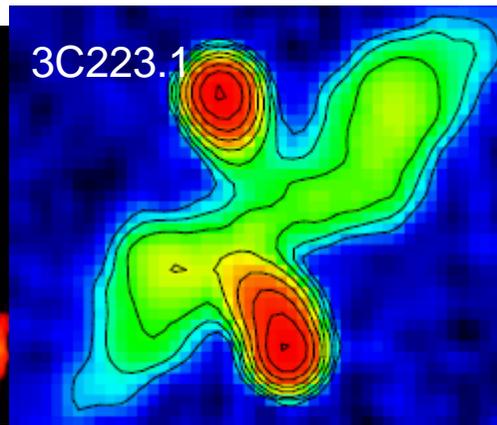
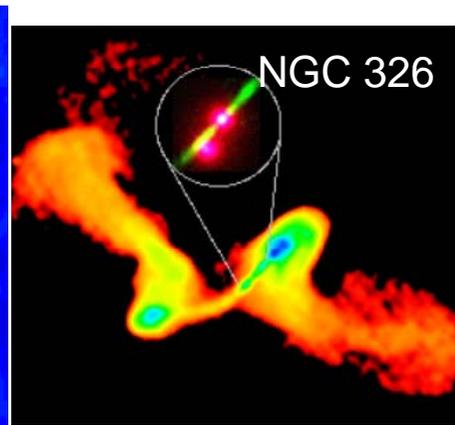
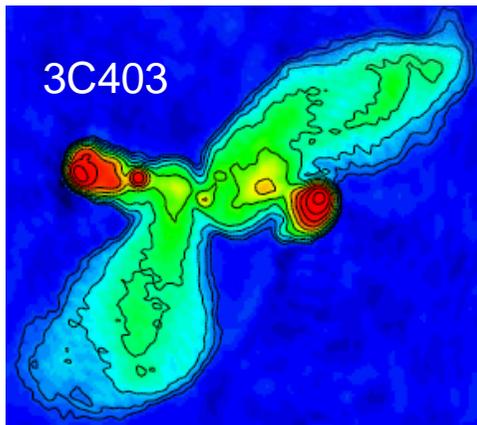
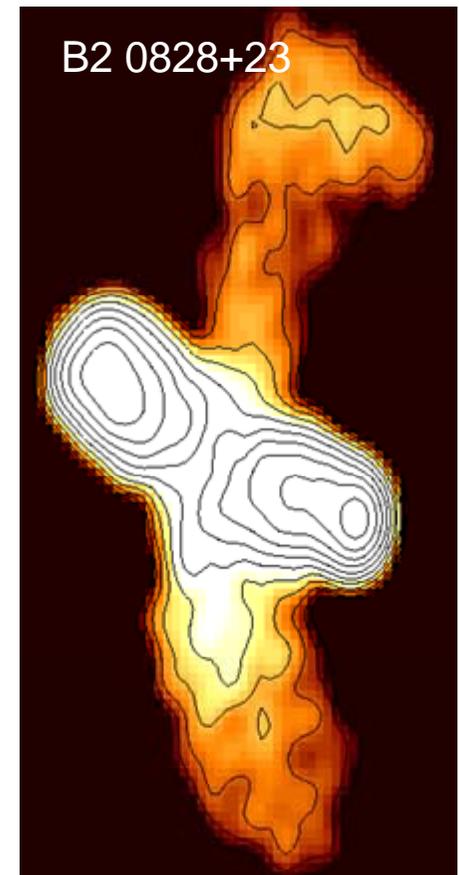
Before merging:



After merging:



La présence d'une morphologie en X des jets radio pourraient être la signature d'une fusion de trous noirs (compatible age des jets, etc..)



Parma et al 1985,  
Rottmann 2001 <sup>21</sup>

# Survey de candidats AGN binaires

50 sources avec double pics de [OIII] (AO-Keck)

Mais souvent NLR étendue..

*H. Fu et al 2011, 2012*

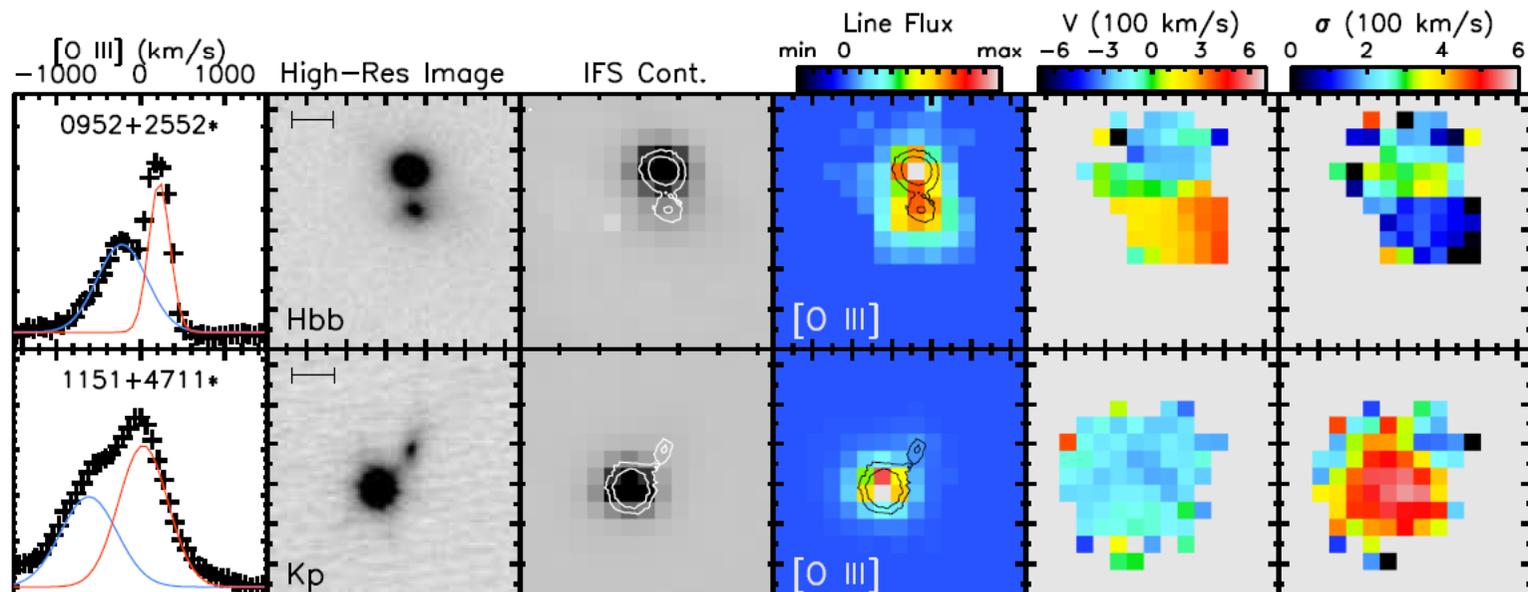
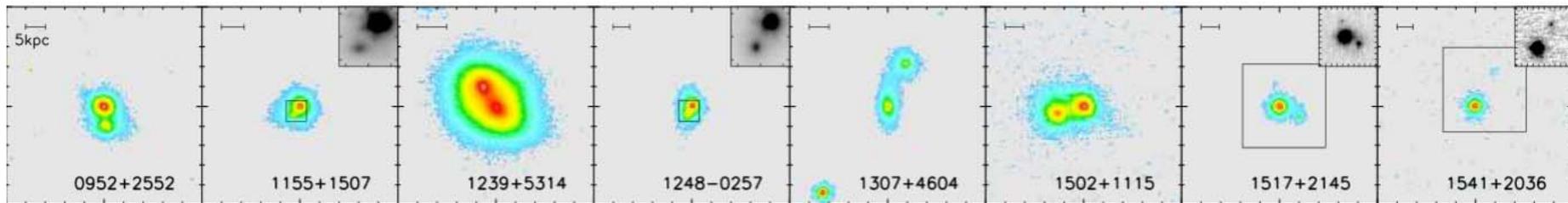
*Eracleous et al 2012*

$0.03 < z < 0.56$ , morphologies perturbées

Exceptions de la relation M- $\sigma$ , dues aux fusions

Nbre de fusions croît

avec  $z$ :  $f \sim (1+z)^4$



# Statistique AGN binaires H. Fu et al 2011

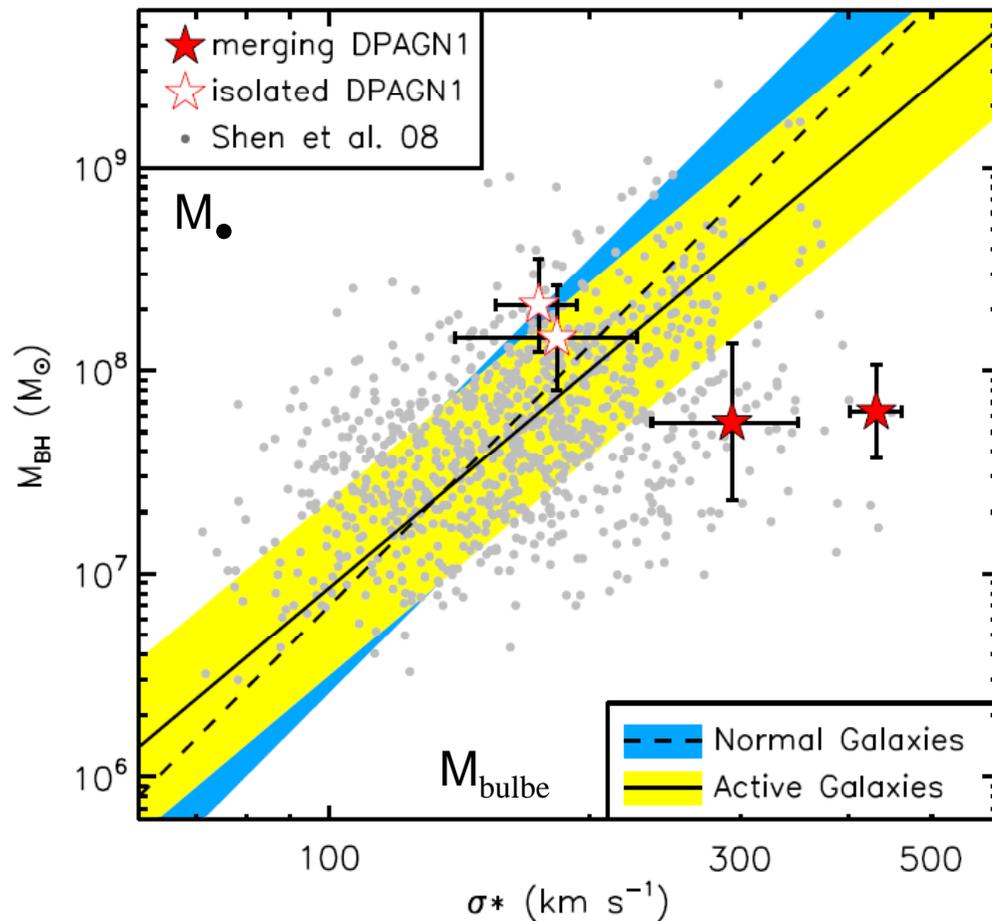
La fraction de radio sources détectées est plus grande:

30% au lieu de 10%

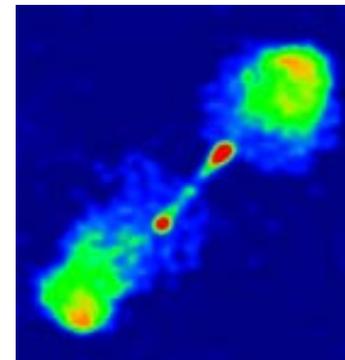
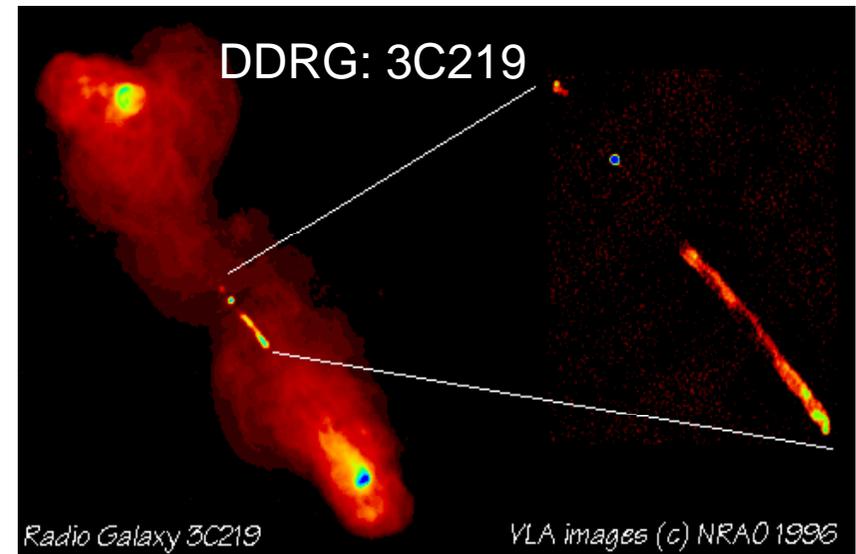
47% AGN-1 binaire, contre 24% AGN-2

Emission radio déclenchée par la fusion?

Galaxie radio Double-Double?



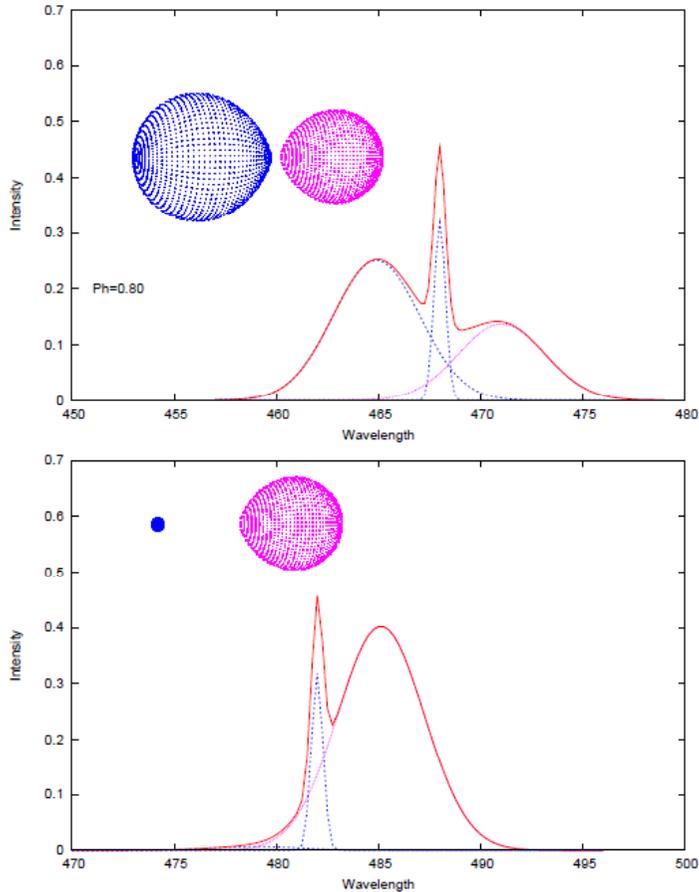
$\sigma$  sur-évalué à cause de la fusion



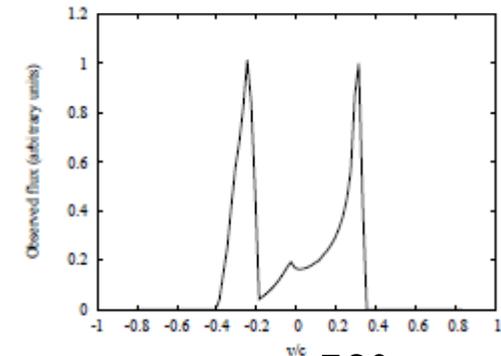
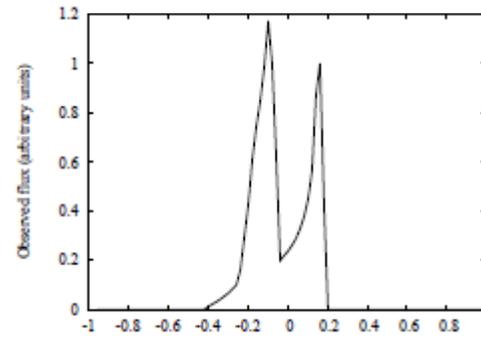
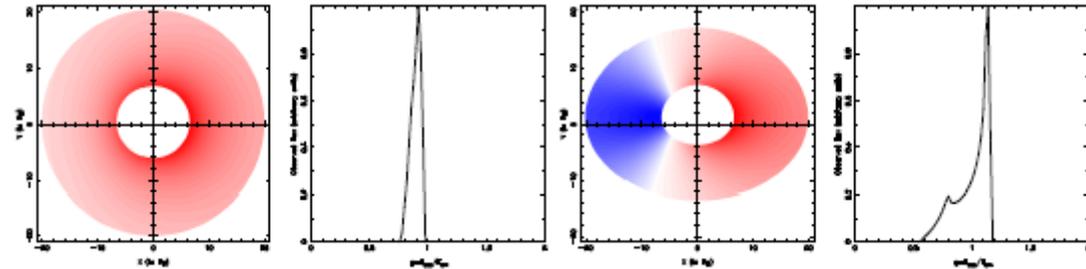
1155+266  
Abell1452

# Critères de recherche de binaires serrées

Raie H $\beta$

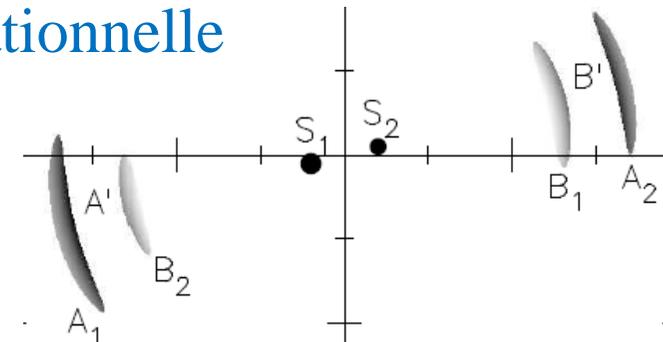


Raie K $\alpha$  du Fer ionisé



- Variabilité
- Lentille gravitationnelle

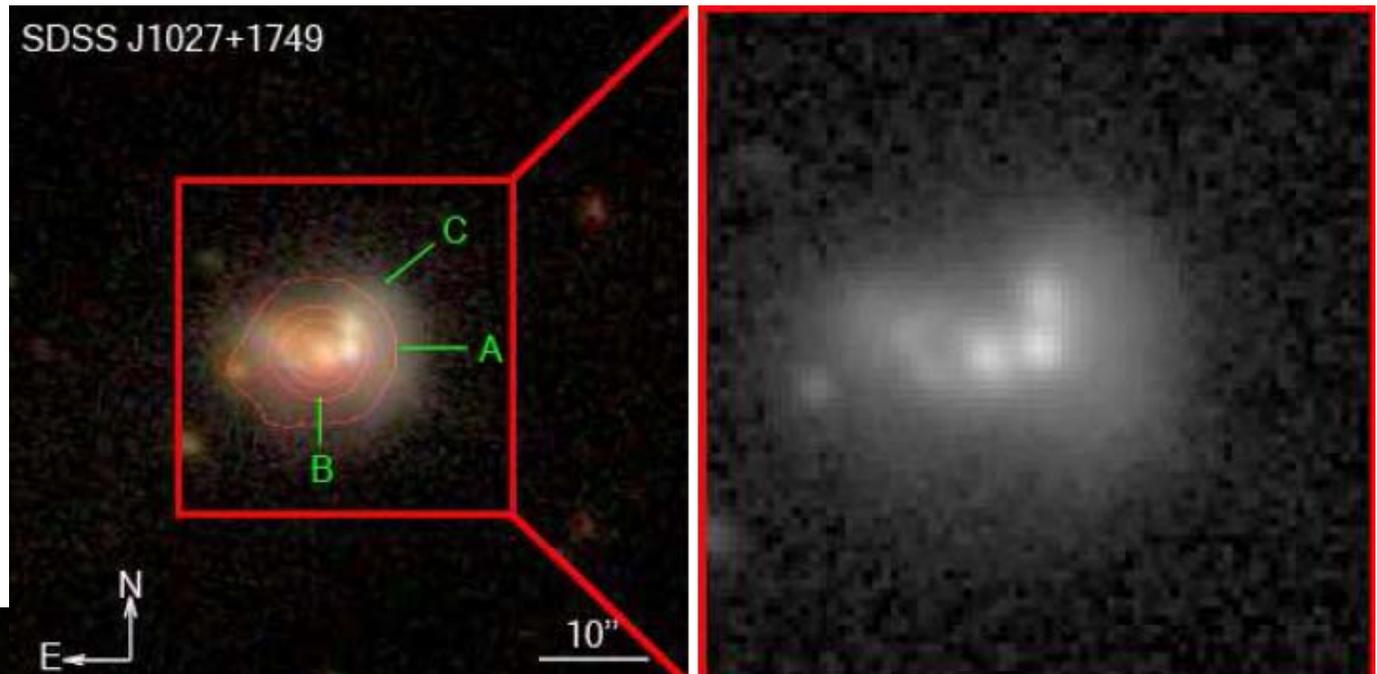
Double BLR Popovic 2012  
 <16% SMB 0.03-0.2pc Ju et al 2013



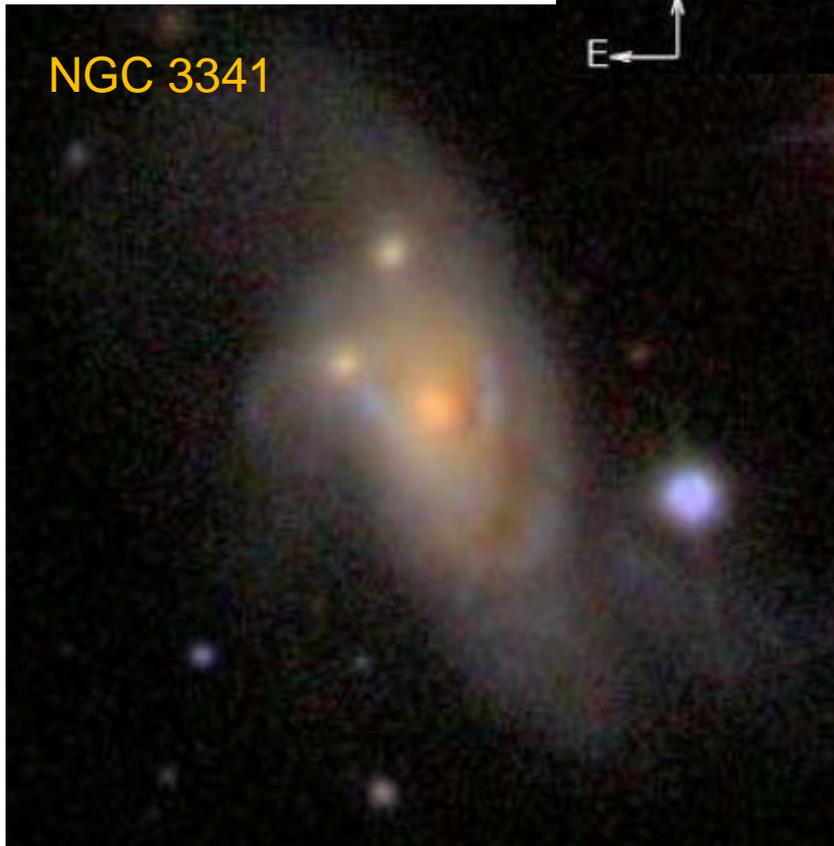
# AGN triples

Séparation  $\sim 3\text{kpc}$

Liu et al 2011



NGC 3341



$z=0.066$  Les trois noyaux sont confirmés actifs par leur spectre et raies d'émission

$$M_{\bullet} > 10^8 M_{\odot}$$

Friction dynamique, temps de fusion 8 et 40 Myr respectivement

Probabilité  $5 \cdot 10^{-5}$

# Recensement Radio des AGN binaires

Sur 3114 sources VLBI: **seulement un cas!** **4C+37.11 (7.3pc)**  $z=0.055$   
(sur 12 bons candidats, 11 rejetés par les mouvement relativistes)

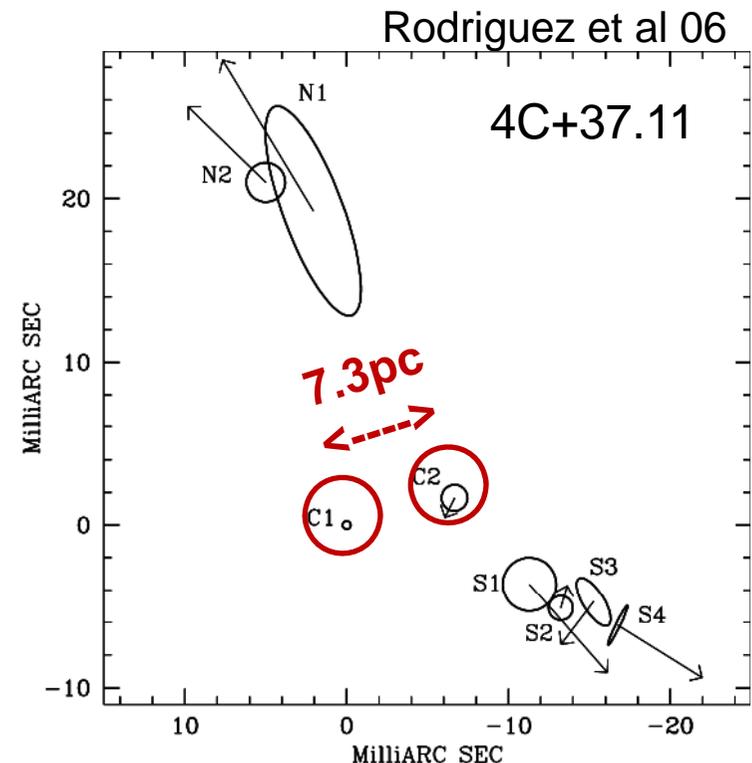
→ **Moins de 500 Myr durée de vie pour des paires de trous noirs de masses  $\sim 10^8 M_{\odot}$**

Evidence circonstancielle que l'état relatif de l'émission radio dans une paire de trous noirs supermassifs est corrélée si leur séparation est moins de 2.5 kpc.

## Pourquoi si rare?

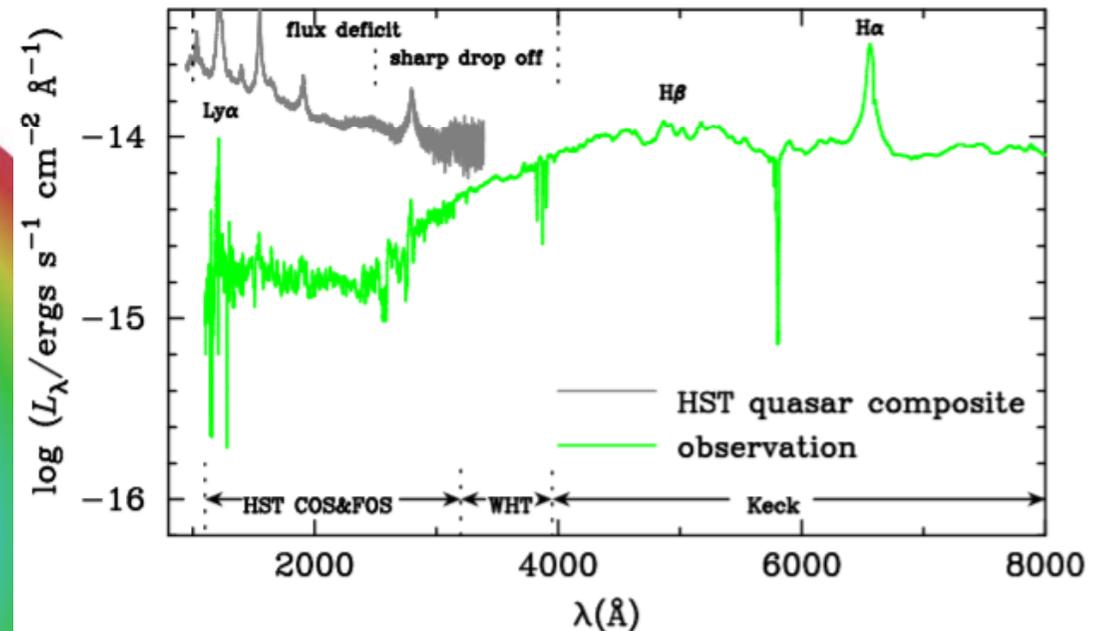
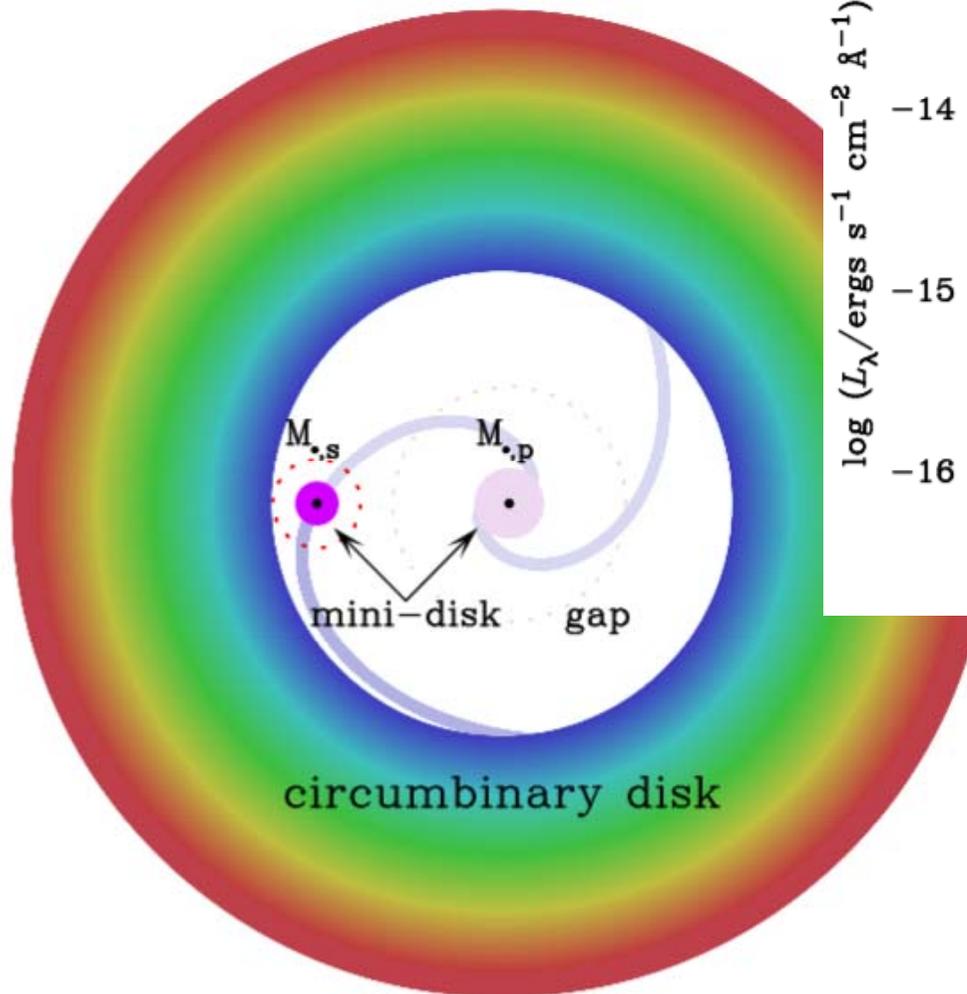
- 1) Obscurcies par la poussière: ULIRGs
- 2) Echelle de temps très courte
- 3) L'époque des fusions est à grand  $z$

Burke-Spolaor 2011



# TN binaires dans Mrk231? Fusion/starburst

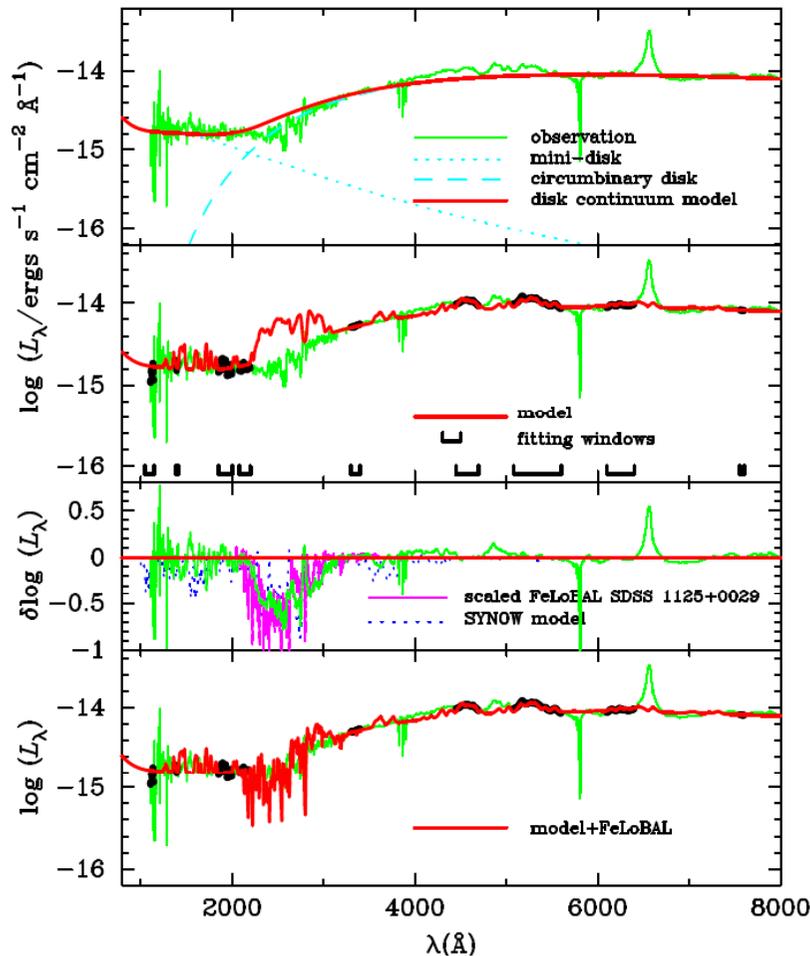
Ouverture d'un fossé dans le disque, de largeur fonction du rapport de masse entre les deux TN (mini-disque, rayon de Roche)



Le déficit entre 1000 et 4000  $\text{\AA}$  suggère la présence du fossé  
Yan, Lu et al 2015

# Binaire de TN, séparation Milli-pc, Mrk 231

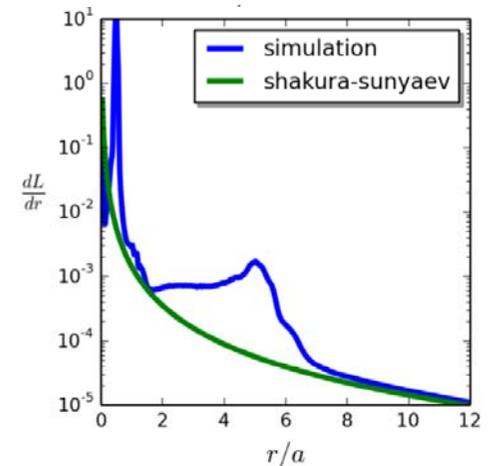
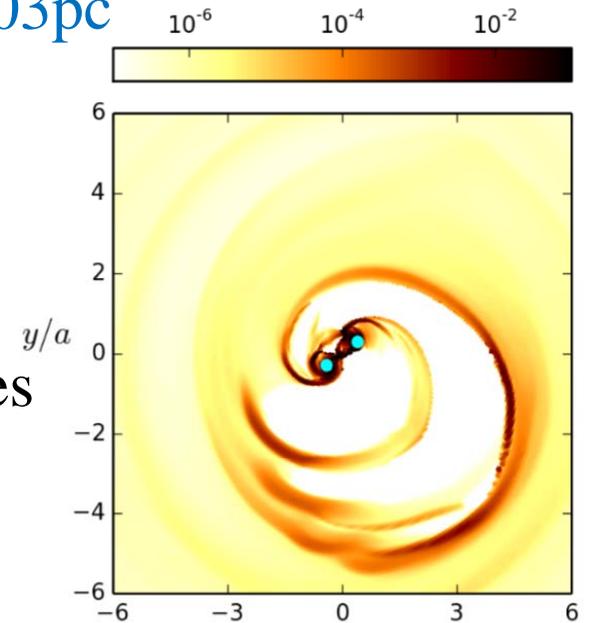
Distance entre les deux trous noirs  $590 \text{ AU} = 0.003 \text{ pc}$   
 Période 1.2yr, masses  $1.5 \cdot 10^8 M_{\odot}$  et  $4.5 \cdot 10^6 M_{\odot}$



Cible pour des ondes gravitationnelles  
 10 nanoHz

Fusion en  $10^5 \text{ yr}$   
 Change de  $40''$   
 par orbite

Yan et al 2015

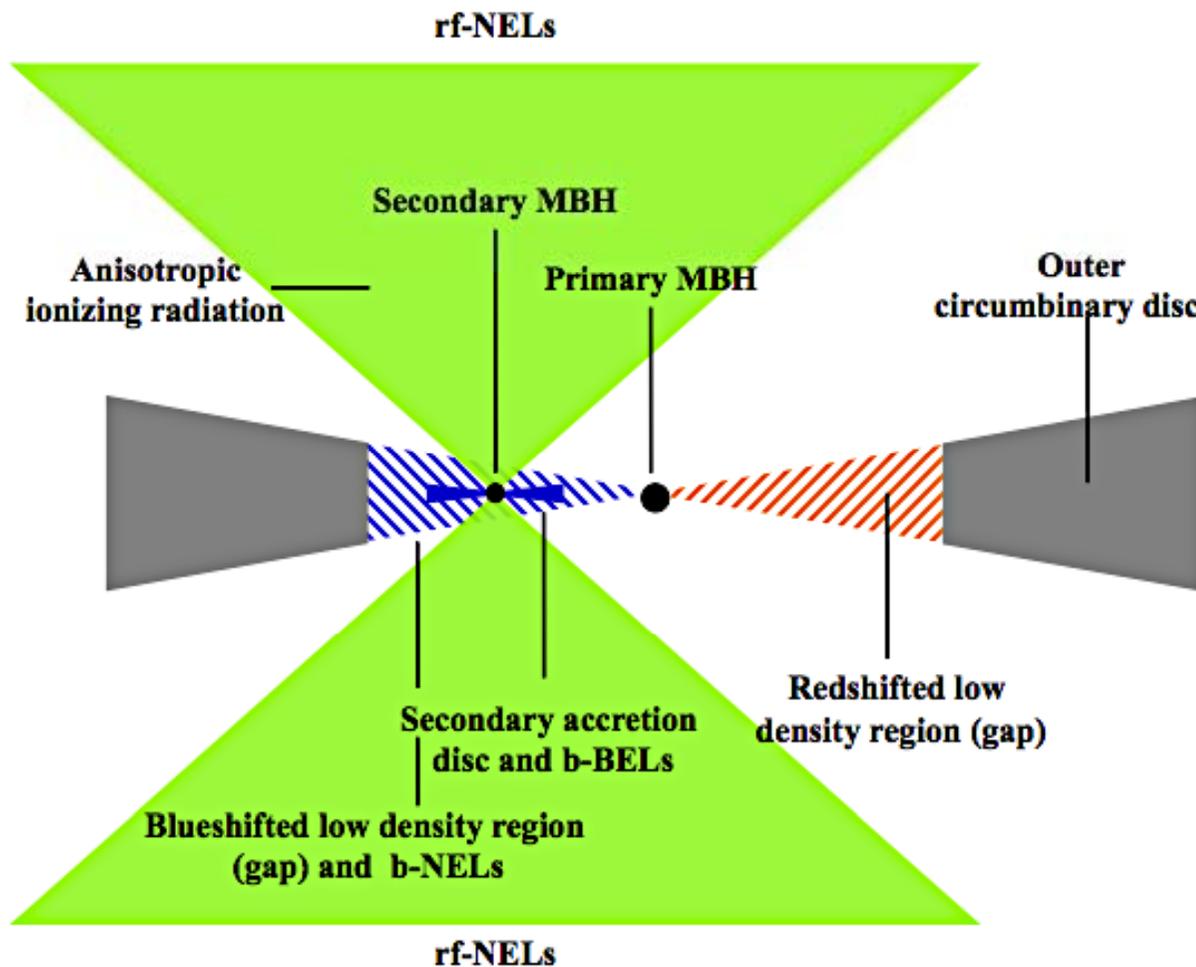


Farris et al 2015

# Binaires de TN massifs, < 1pc

VLBI 10mas=50pc  
Bondi, Perez-Torres

2 BLR séparées par 3500km/s  
3<sup>ème</sup> système, raies en abs à V intermédiaire



SDSS1536+0441

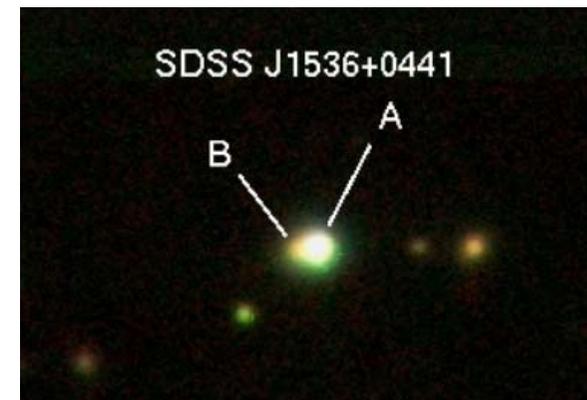
$z=0.38$

Boroson & Lauer 2009

Chornok et al 2010

Period 100yrs?

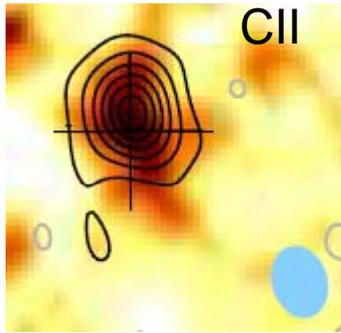
dist=0.1pc?



Ou bien kpc pair of QSO

Decarli et al 2009

# Les QSO les plus distants à z~6



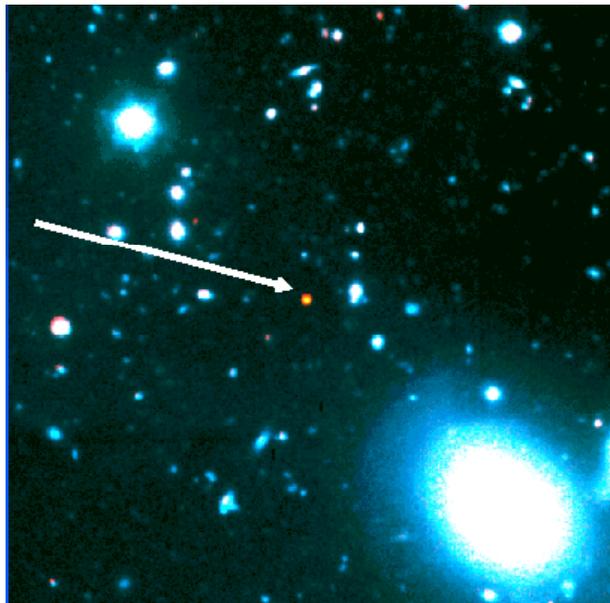
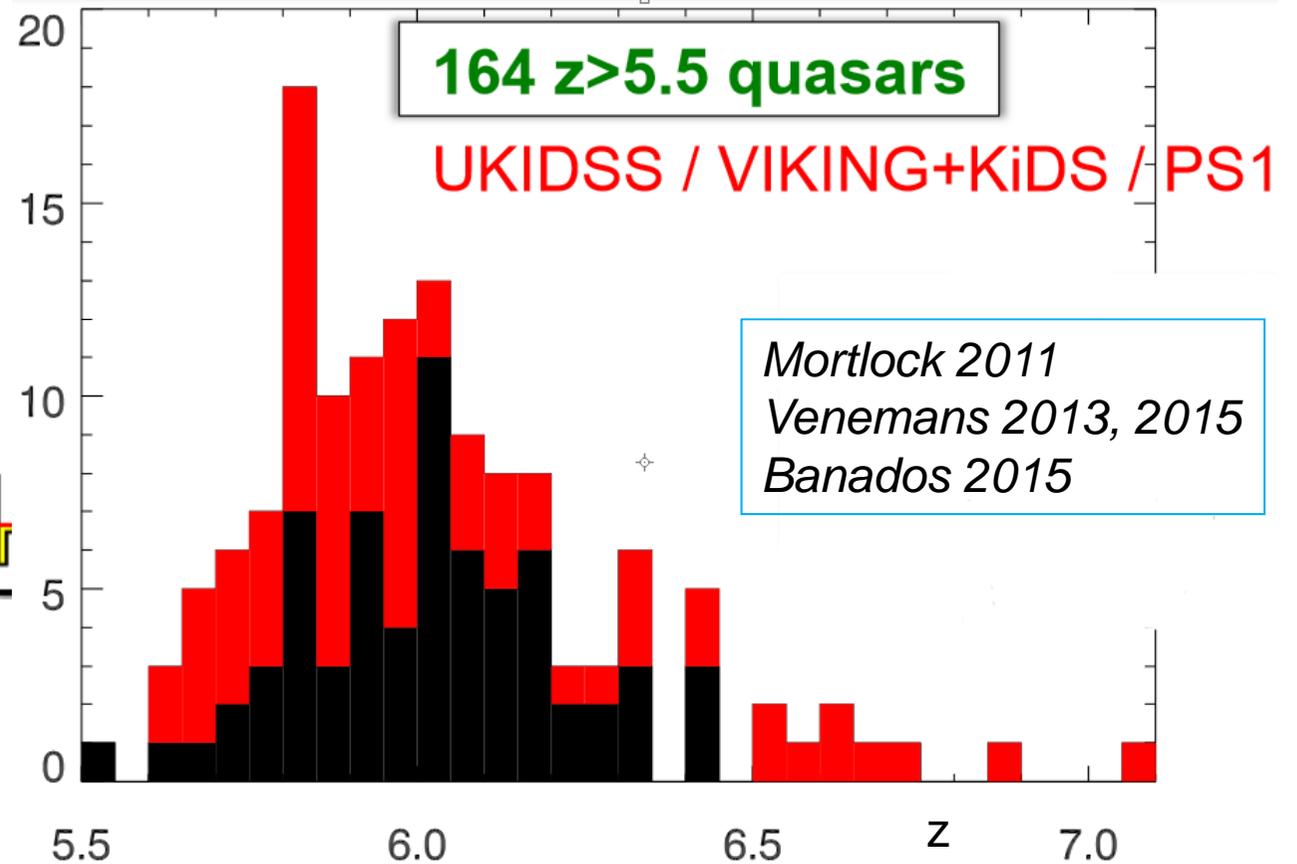
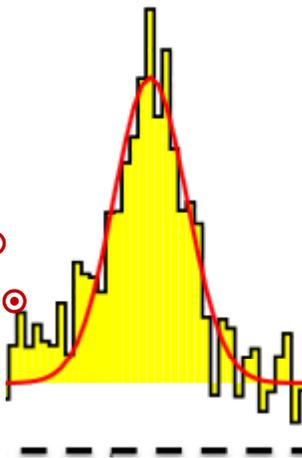
Beam 0.3" PdB

Age  $\leq 1$  Gyr

ALMA

LCII =  $2-4 \cdot 10^9 L_{\odot}$

LFIR =  $1-8 \cdot 10^{12} L_{\odot}$



$M_{\text{dust}} \sim 10^8 M_{\odot}$  (Bertoldi et al 2003)

$M_{\text{BH}} = 1.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$  (Willott et al 2003)

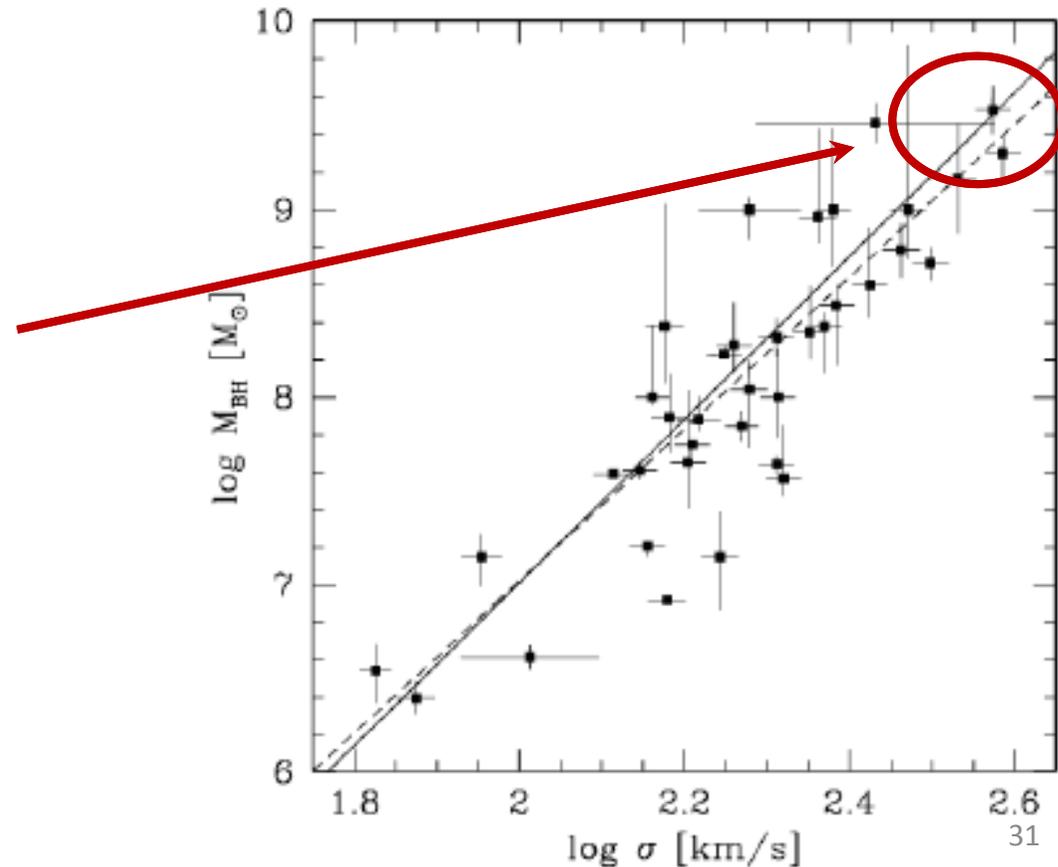
1kpc scale starburst,  $1000 M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$

# Les quasars sont présents très tôt

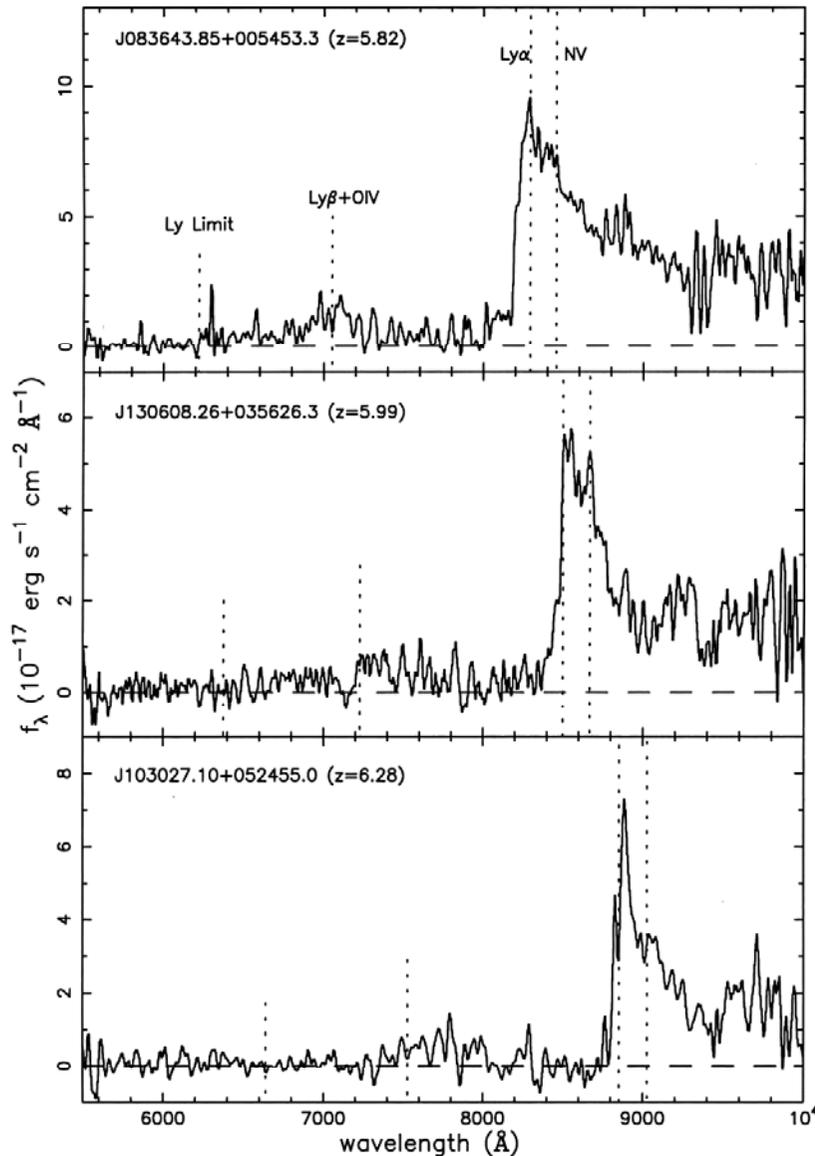
Les quasars les plus lointains connus  
SDSS 1148+3251 à  $z=6.4$ , J1120+0641 à  $z=7.1$ , etc..  
ont des masses estimées de l'ordre de

$$M_{\text{BH}} = 2-6 \cdot 10^9 M_{\odot} \text{ (Willott et al 2003, Barth et al 2003, Venemans et al 2012, 2013)}$$

**Aussi massifs que les plus  
gros trous noirs à  $z=0$ ,  
mais quand l'Univers  
avait moins de  $<1$  Gyr !**



# Les Quasars d'âge 500 Myr



**Comment accumulent-ils une masse de  $M_{\text{bh}} \sim 4 \cdot 10^9 M_\odot$  ?**

Masse de départ  $\sim 4 M_\odot$

→ Multiplié par e, 20 fois

Avec luminosité Eddington  
Le temps nécessaire pour  
Multiplier par e  
 $40 (\epsilon/0.1) \text{ Myr}$

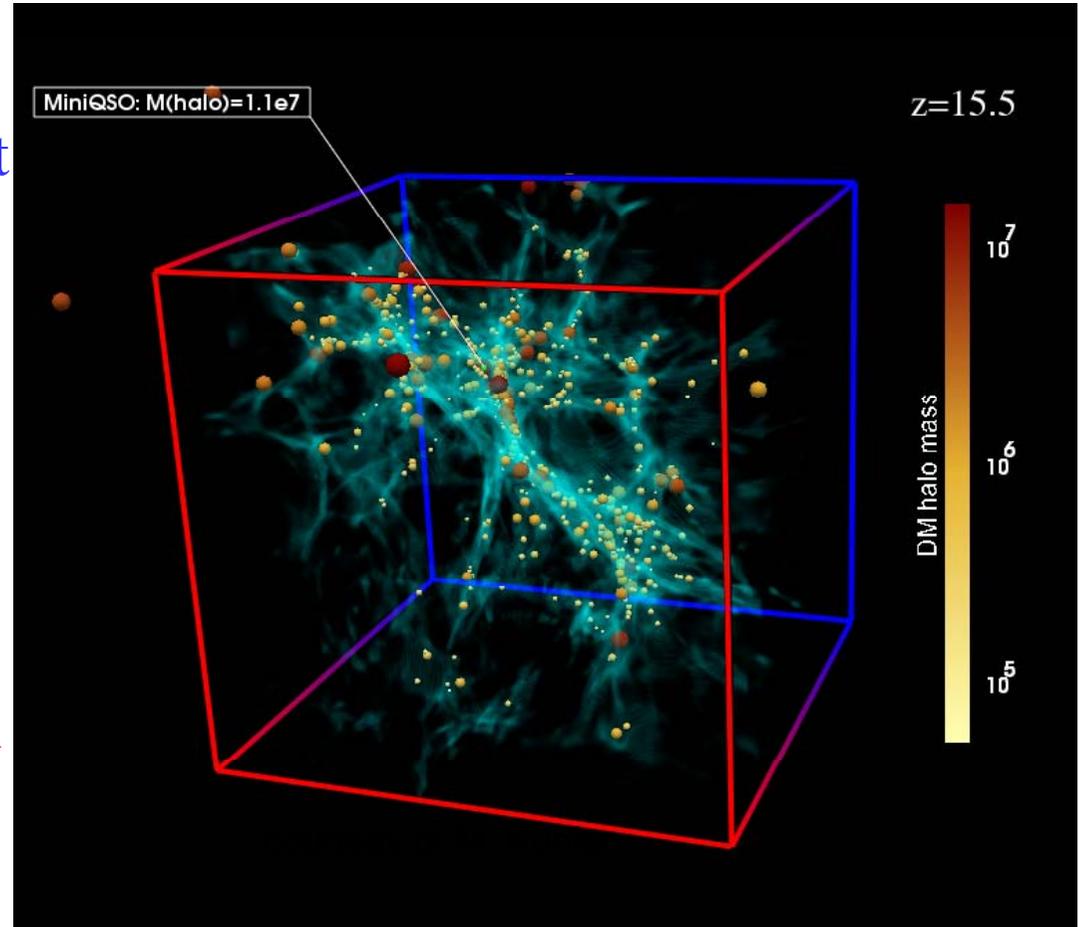
Age de l'univers à  $z=6$   
 $\sim 900 \text{ Myrs}$

# Première 'graine' de trou noir?

Formation hiérarchique des galaxies:

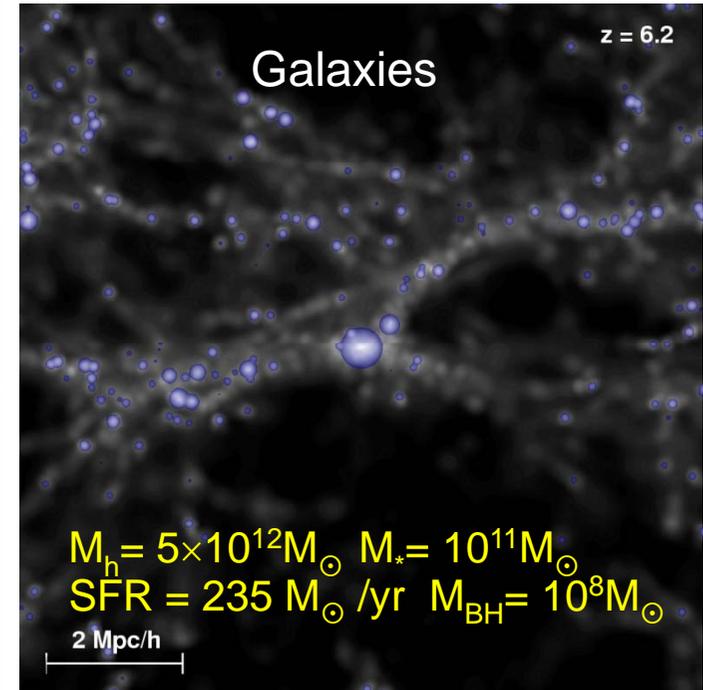
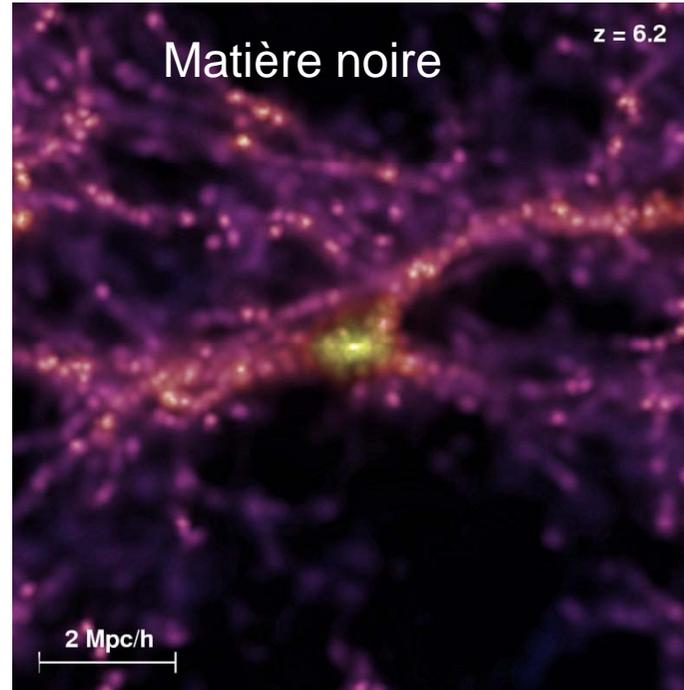
Les petites échelles s'effondrent en premier, puis fusionnent pour former des systèmes plus massifs

Baryons doivent se refroidir  
La première 'action' survient dans le plus petit halo avec un puits de potentiel assez profond (à  $z \sim 20-30$ )



## Hôte de Quasar

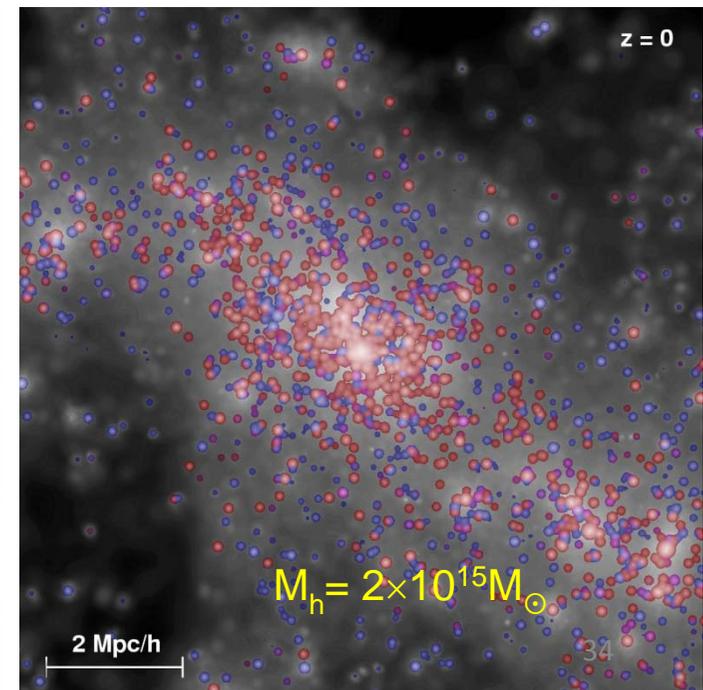
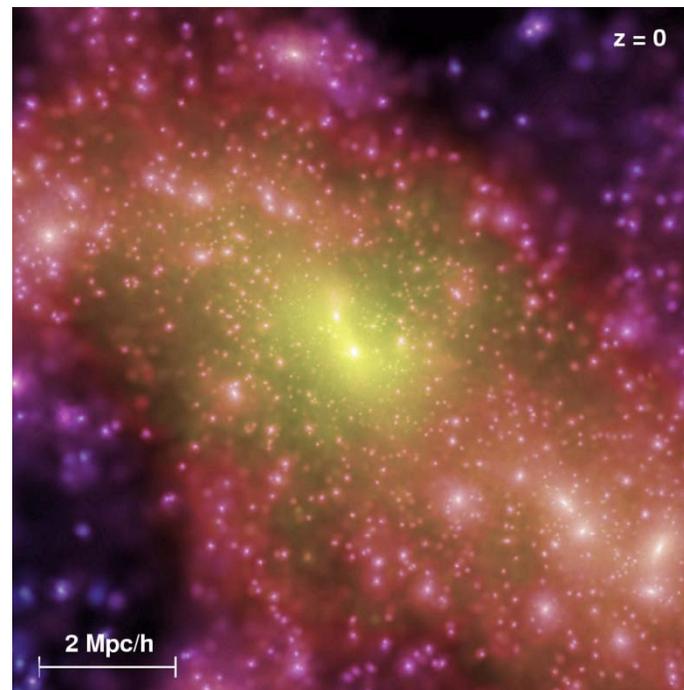
$$M_h = 5 \times 10^{12} M_\odot$$



## Descendant

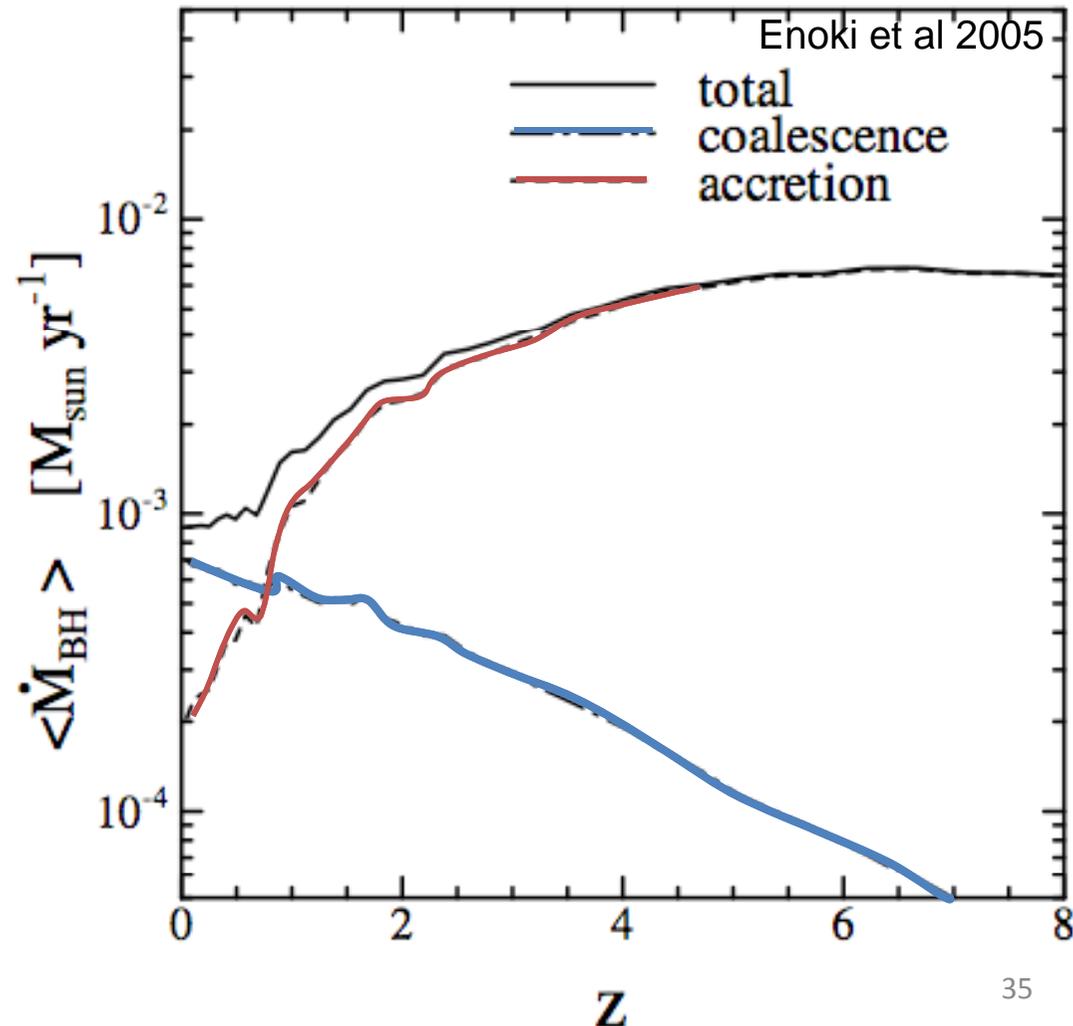
$$M_h = 2 \times 10^{15} M_\odot$$

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



# Croissance des trous noirs massifs

- 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  $z$



# 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

Amas  
globulaires?



Peut-être

??

# IMBH: est-ce qu'ils existent?

IMBH= Trous noirs de masse intermédiaire  $10^2$ - $10^6 M_{\odot}$

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

Mais on ne peut pas extrapoler la relation  $M$ - $\sigma$

Les IMBH 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 & Ho 2003, Merritt 2013*)

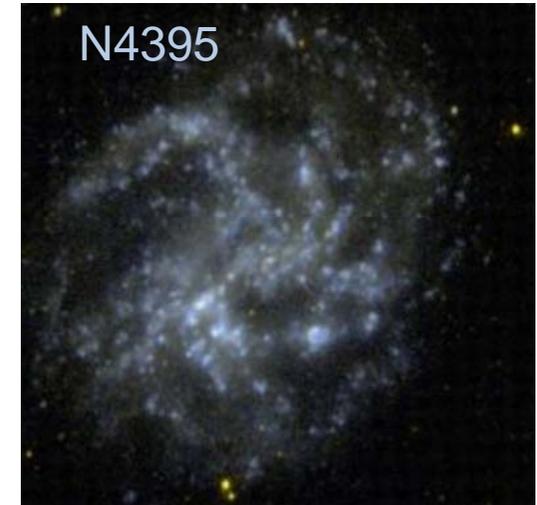
$M_{\text{BH}} \sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$  (Seyf 1, pas de bulbe)

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

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

possible de séparer dans le Groupe Local uniquement

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



# ULX Sources X Ultra-lumineuses

Depuis les années 1980, on détecte des sources de rayons X de luminosité exceptionnelle  $L > 10^{39}$  erg/s

Supérieure à la luminosité d'Eddington d'une étoile à neutron ou un trou noir de masse stellaire

**Serait-ce une masse de trou noir  $\gg 10 M_{\odot}$  ?**

Il en existe en moyenne une par galaxie (quoique il n'y en ait pas dans la Voie Lactée)

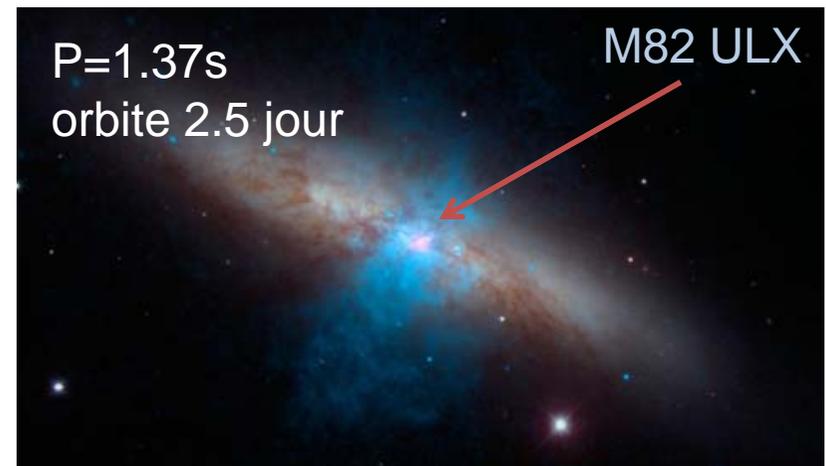
**Autres solutions:** --une binaire X de masse stellaire, avec un émission concentrée dans un faisceau vers l'obs  
Luminosité bien moindre

*Bachetti et al 2014: pulsar dans M82*

--Luminosité supérieure à Ledd

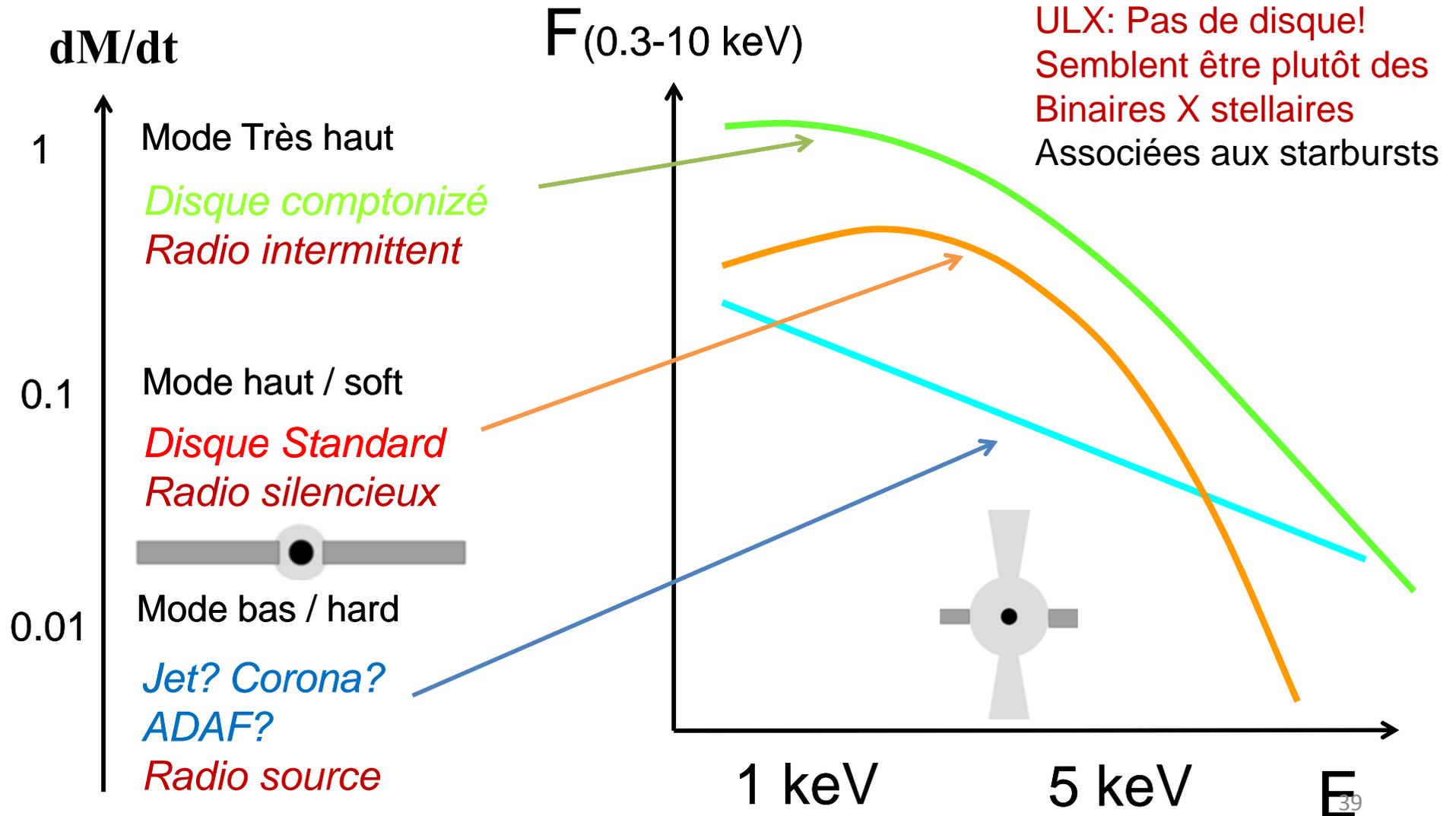
Par forçage transitoire (accrétion

De l'enveloppe d'étoile O binaire)

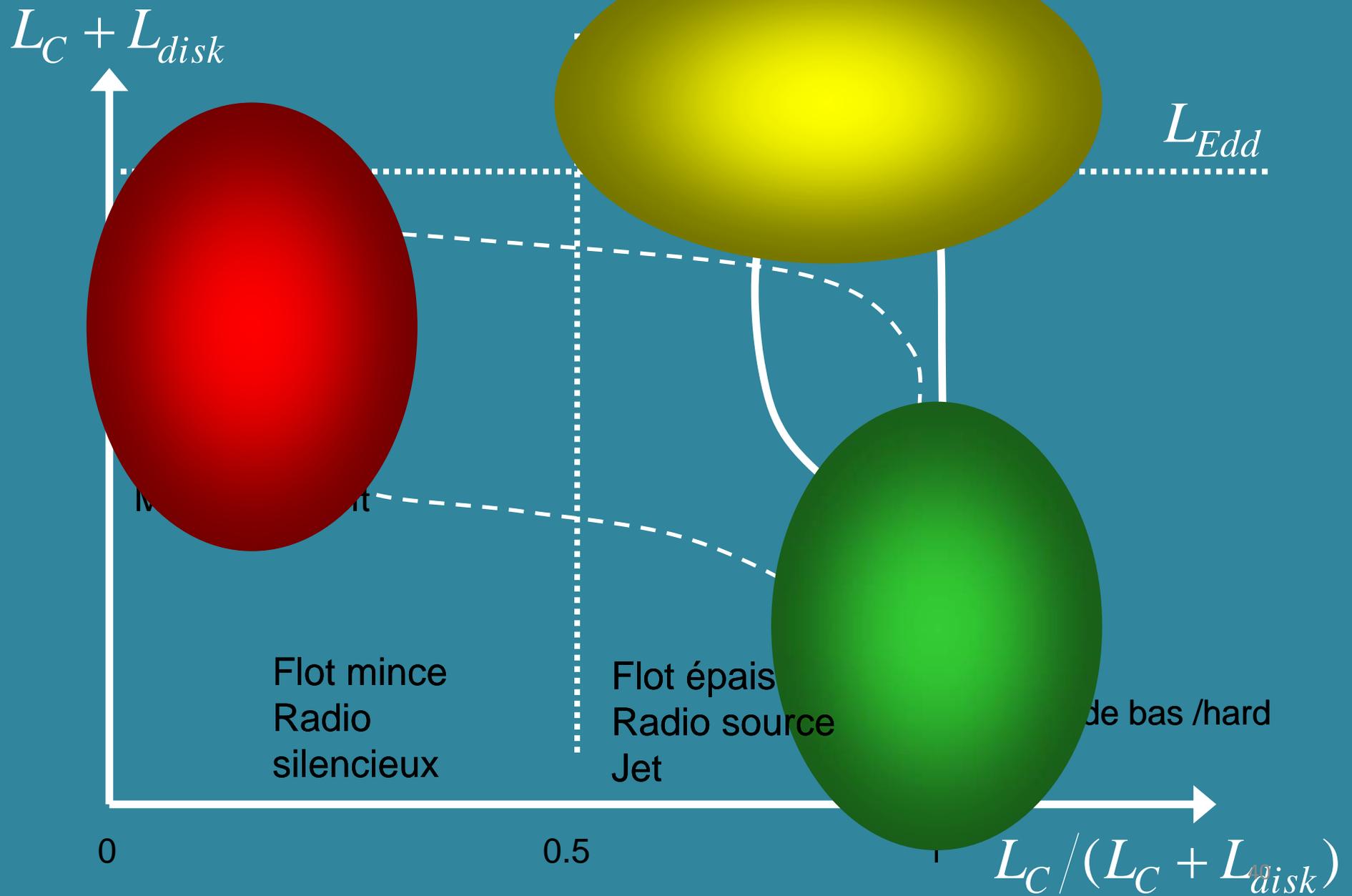


# Trois taux d'accrétion des trous noirs

AGN et micro-quasars, *Fender 1999*



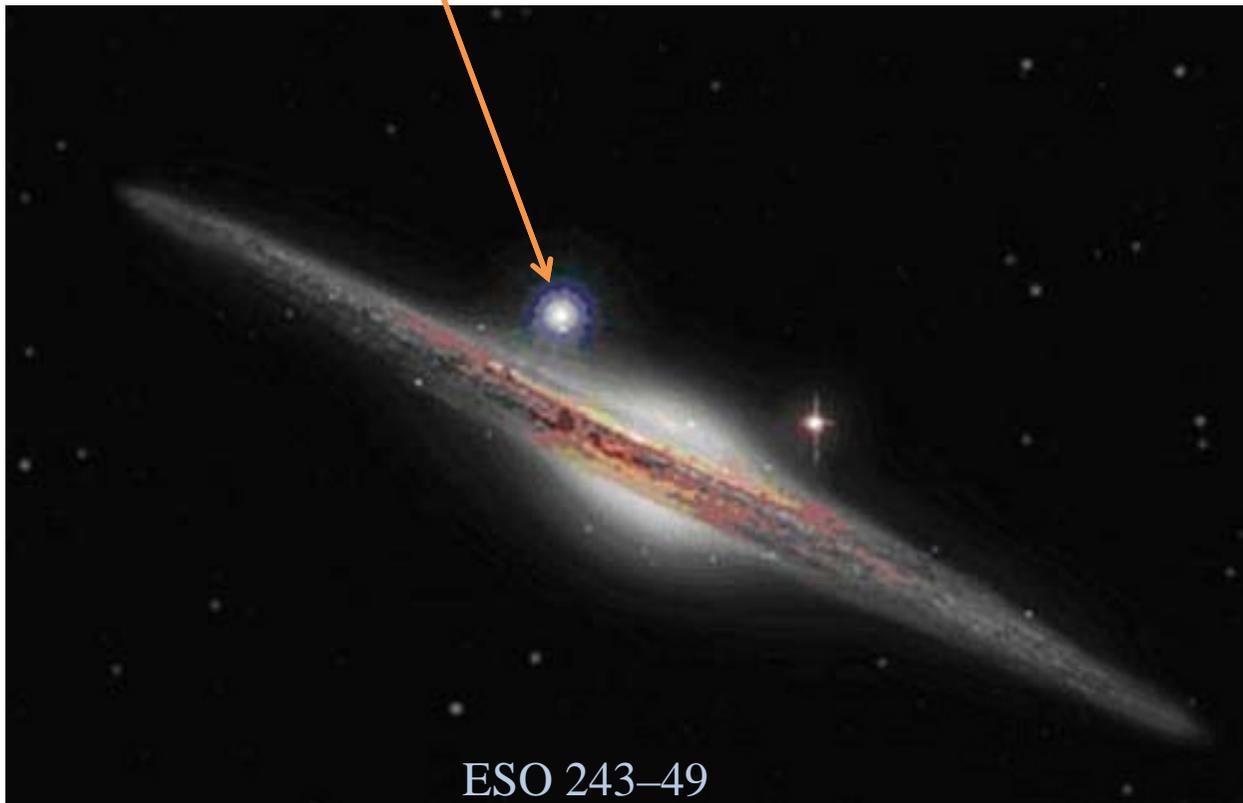
# Les ULXs ont toujours une corona C



# HLX-1: le premier IMBH?

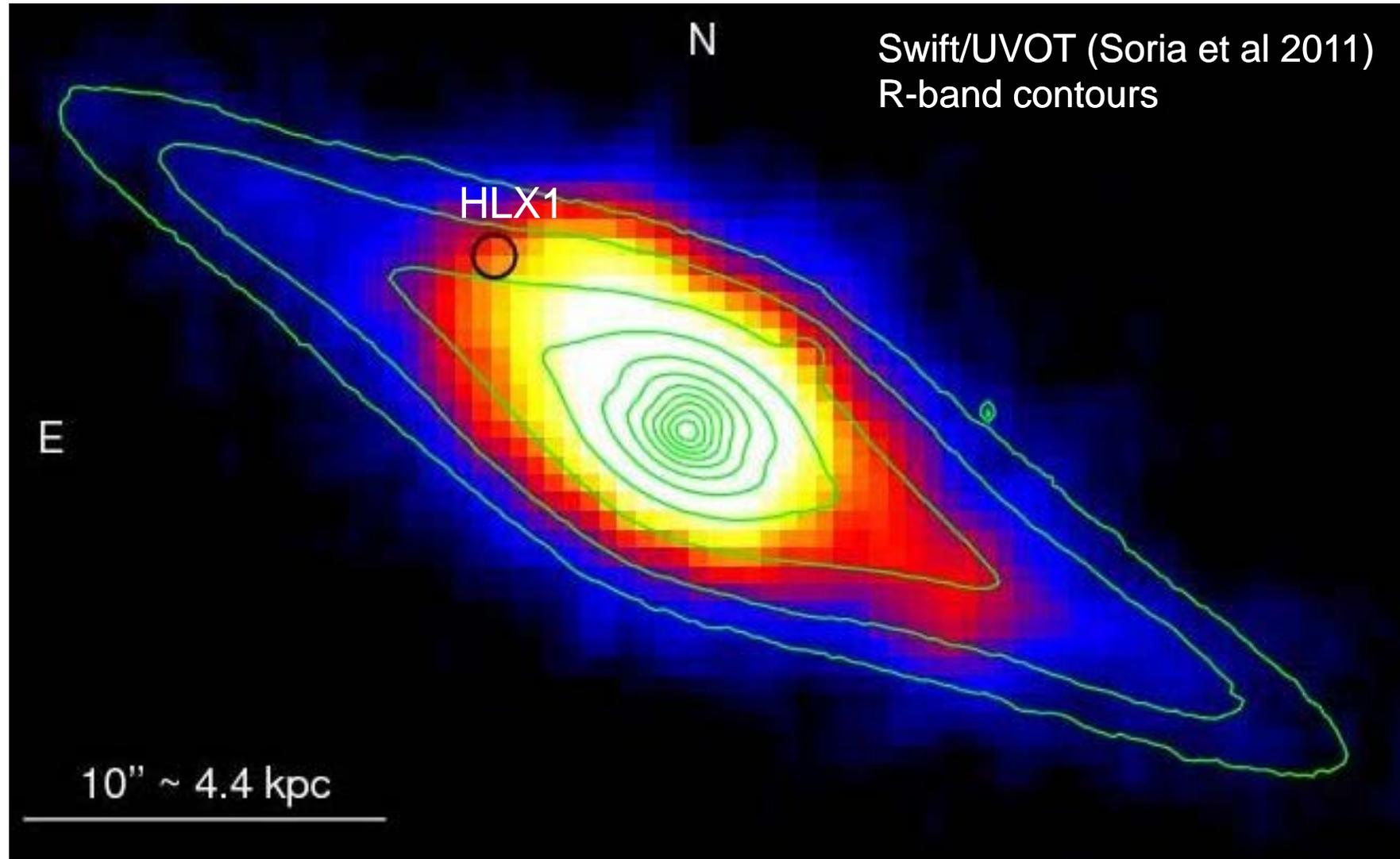
ULX dans ESO 243–49,  $D=95$  Mpc,  $10^{42}$  ergs/s,  $10^2$ - $10^5 M_{\odot}$  BH  
*Farell et al 2009, Webb et al 2010, Godet et al 2009*

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



Sursauts X  
Peut-être dûs à  
une étoile en orbite  
autour de l'IMBH  
*Godet et al 2014*

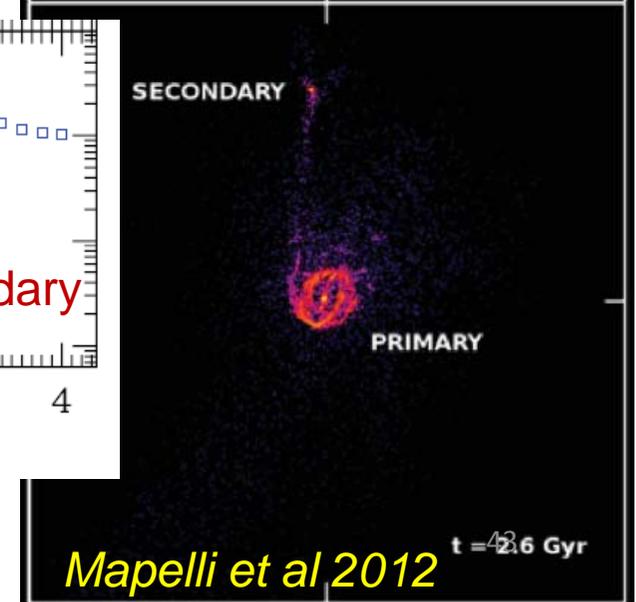
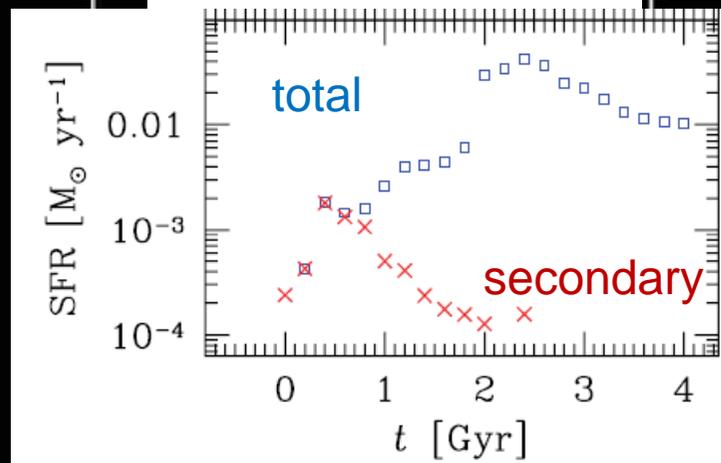
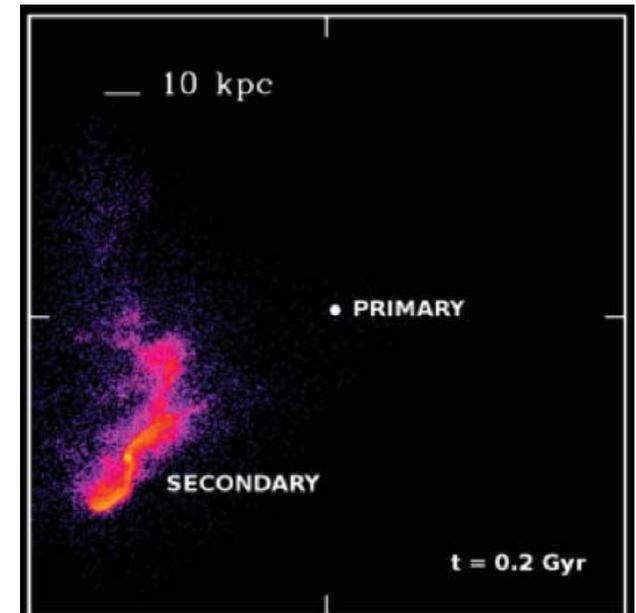
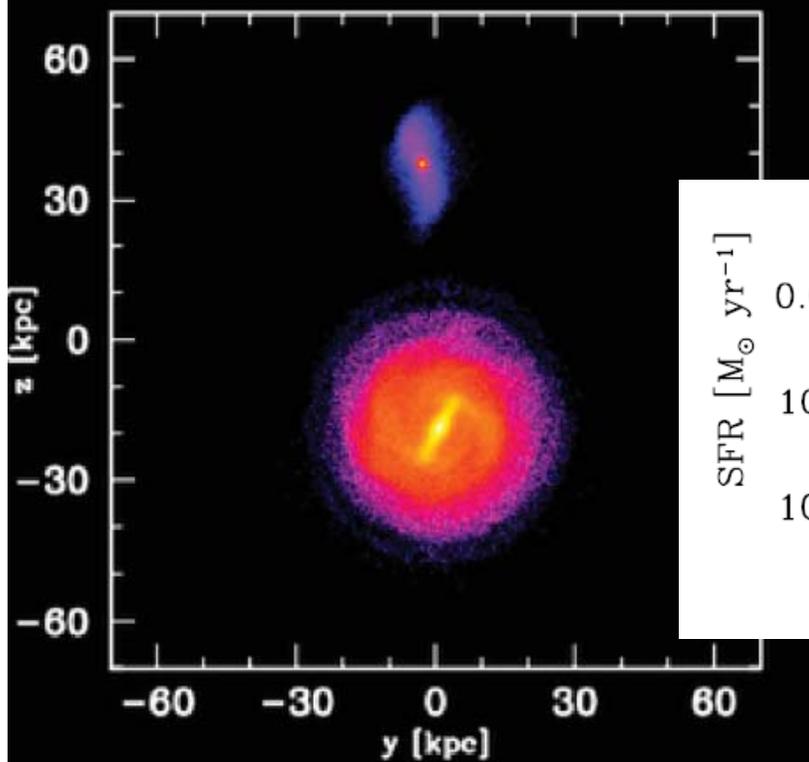
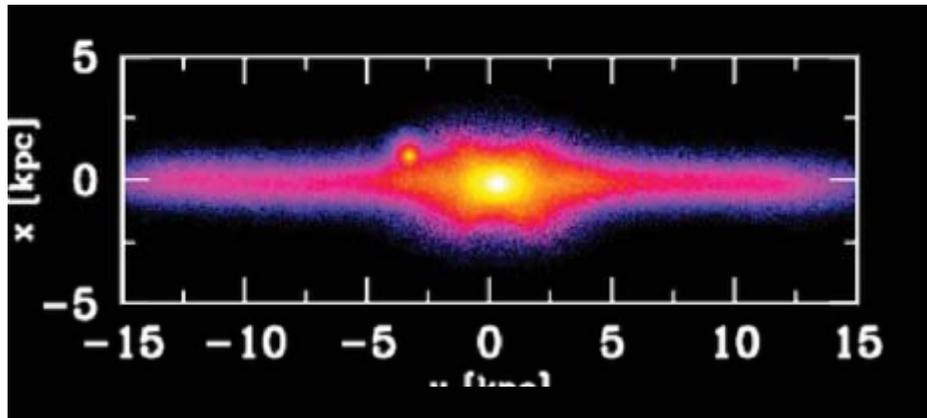
## Formation d'étoiles dans ESO243-49 (UV à 2000 Ang, asymétrique)



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

# Interaction avec une galaxie naine?

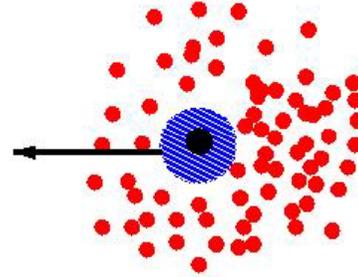
Dans ce scénario, nbre de HLX1  $10^{-6} / \text{Mpc}^3$



# Etapes de fusion pour les trous noirs binaires

## 1. Friction dynamique

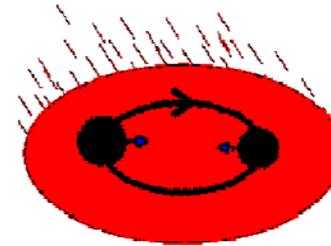
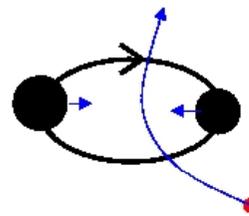
$$t \propto a$$



## 2. La binaire se resserre par éjection d'étoiles

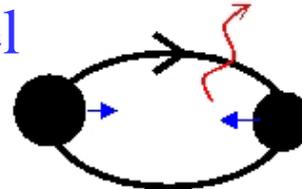
ou

accrétion de gaz

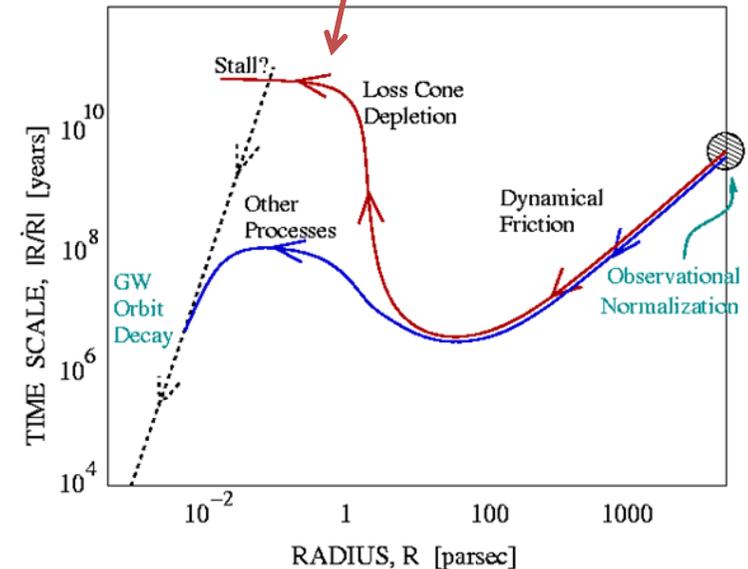


## 3. Rayonnement gravitationnel

$$t \propto a^4$$

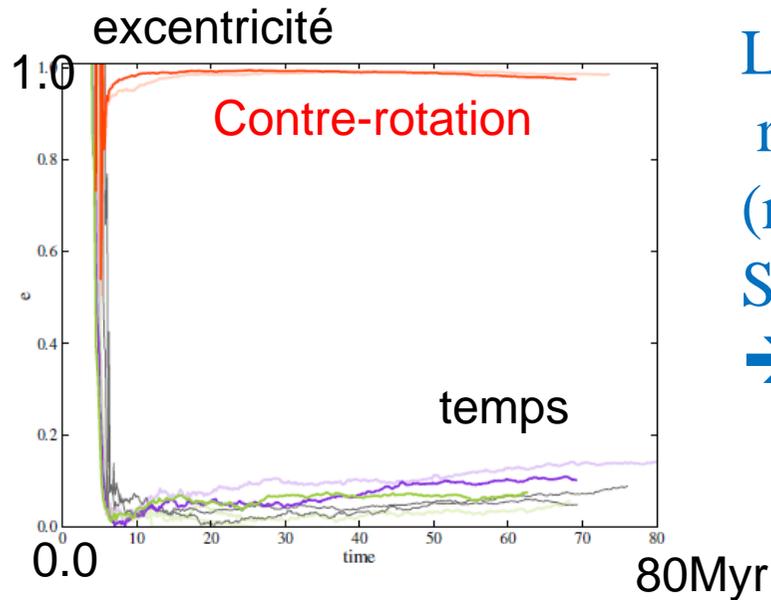


Phase dangereuse

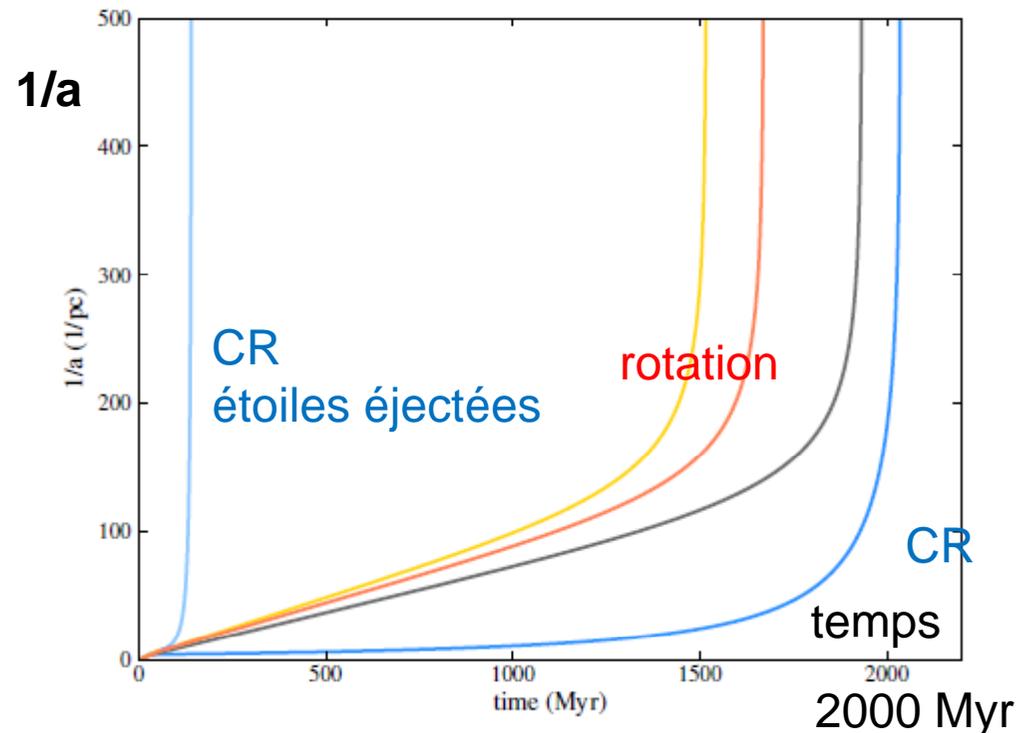
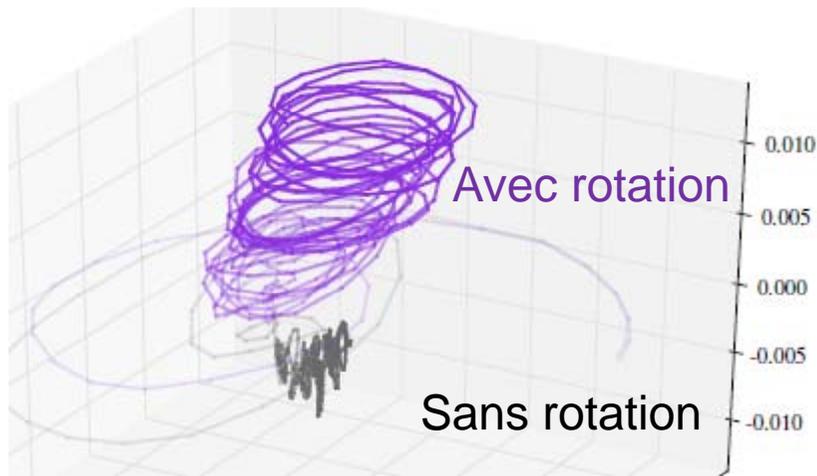


**Recul des TN?**

# Influence de la rotation des étoiles



La binaire de TN peut se resserrer plus rapidement avec des étoiles en rotation (résonance)  
Si contre-rotation: excentricité très grande  
→ Plus d'étoiles à éjecter



# Coalescence de trous noirs binaires

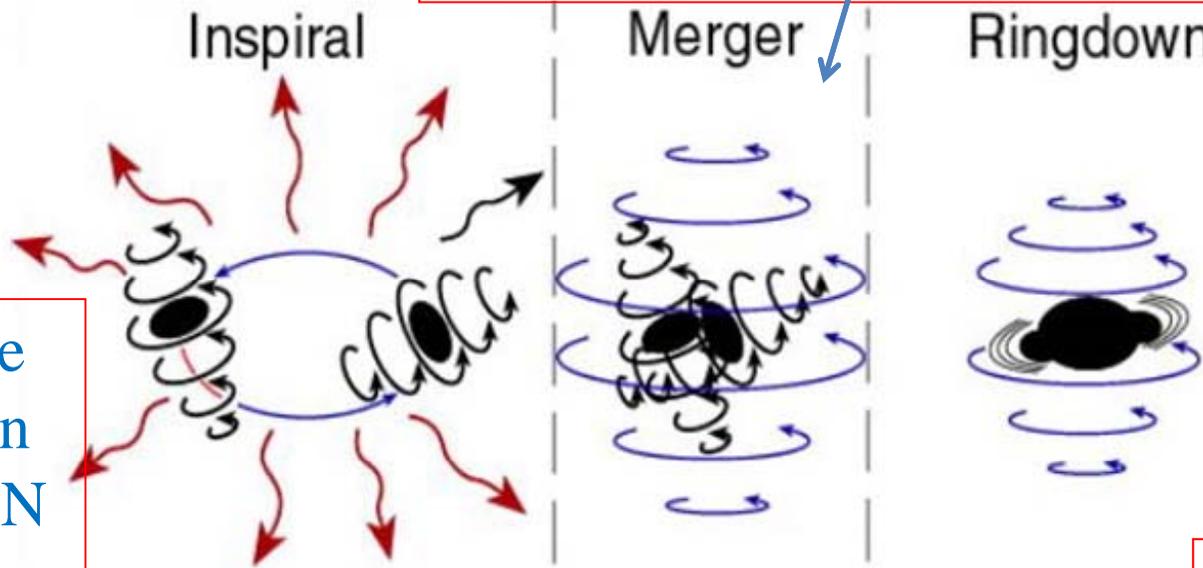
**Fusion si  $\ll 1\text{pc}$   
par émission ondes  
gravitationnelles**

Dynamique de l'espace-temps en  
champ fort. Retournement de spin  
et couplages

Masse  
et spin  
des TN  
binaires

Mode normaux de  
l'amortissement  
(« ringdown »)  
et dérivation de  
l'état final du TN  
de Kerr

Forme et amplitude  
des ondes  $\propto$   
M et spin des TN



Centrella

Kip Thorne

# La fusée gravitationnelle

Recul du centre de masse de la binaire durant la coalescence  
due à l'émission asymétrique d'ondes gravitationnelles

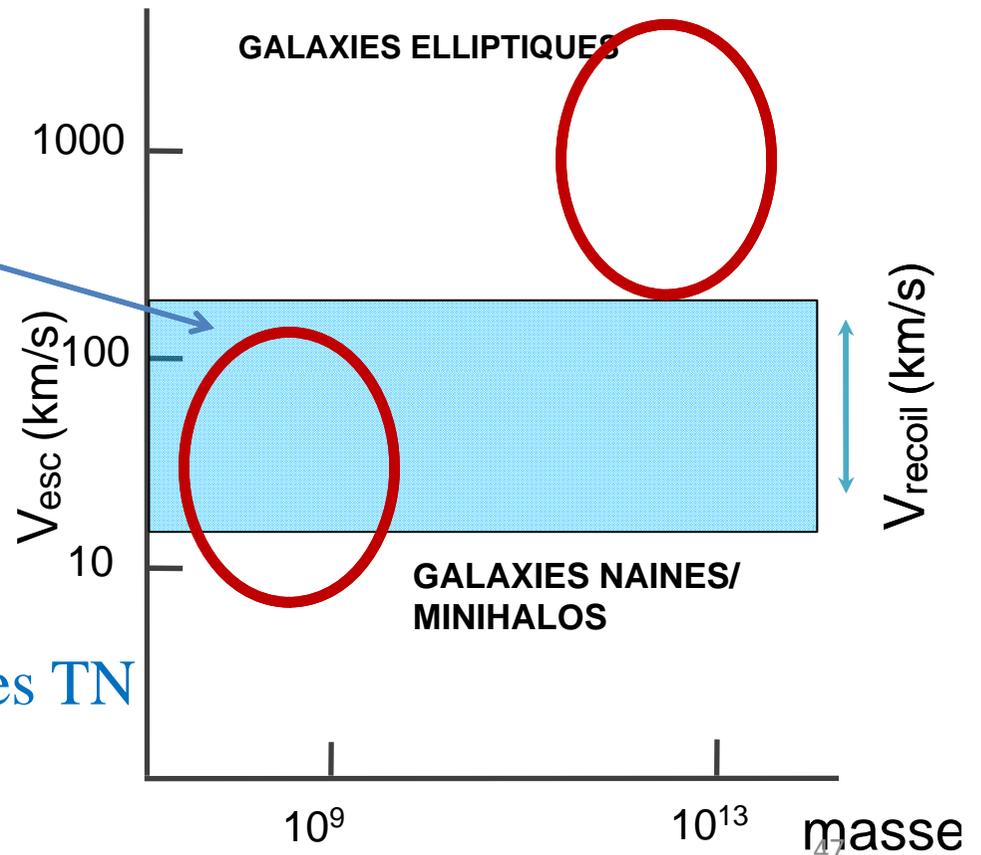
(e.g. Fitchett 1983, Favata et al 2004, Blanchet et al 2005, Baker et al 2006)

Simulations ondes gravitationnelles  
Calculs de Relativité numérique

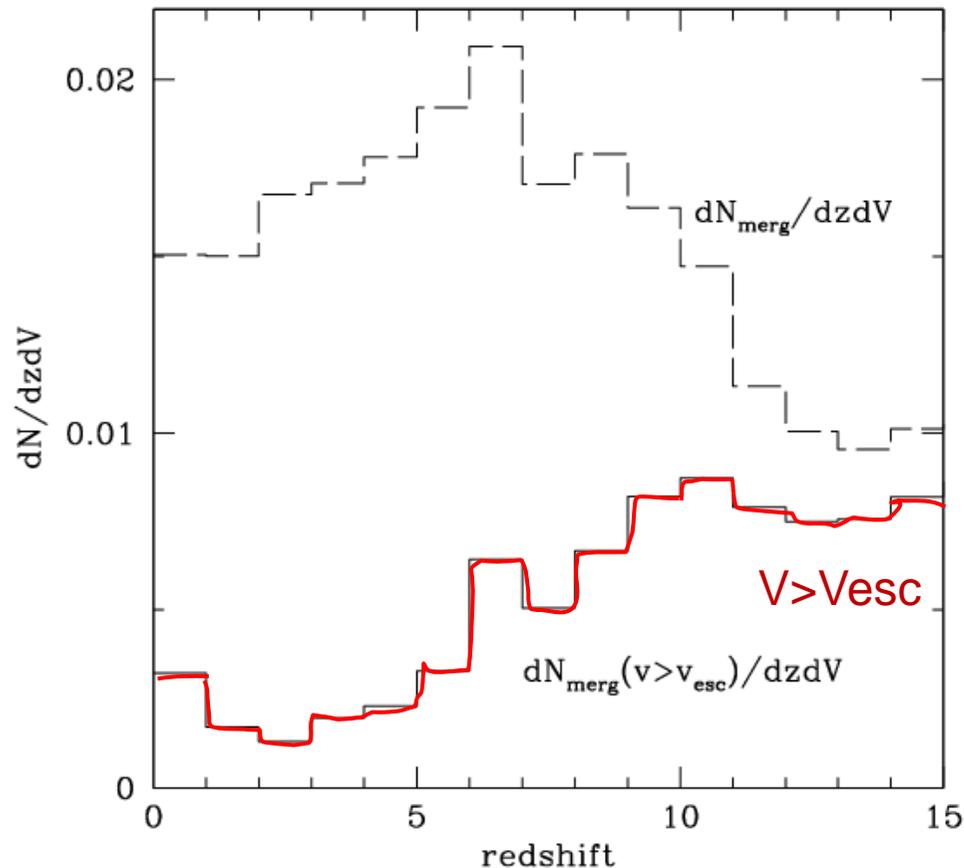
→  $v_{\text{recoil}} \leq 250$  km/s en moyenne  
si pas de spin

«  $v_{\text{esc}}$  pour des galaxies à  $z=0$   
 $\approx v_{\text{esc}}$  pour des galaxies à grand  $z$

Impact surtout sur la fabrication des TN  
à grand  $z$ , et sur les IMBH!



# Si la fusion commence assez tôt, il y a des trous super-massifs perdus à $z=0$

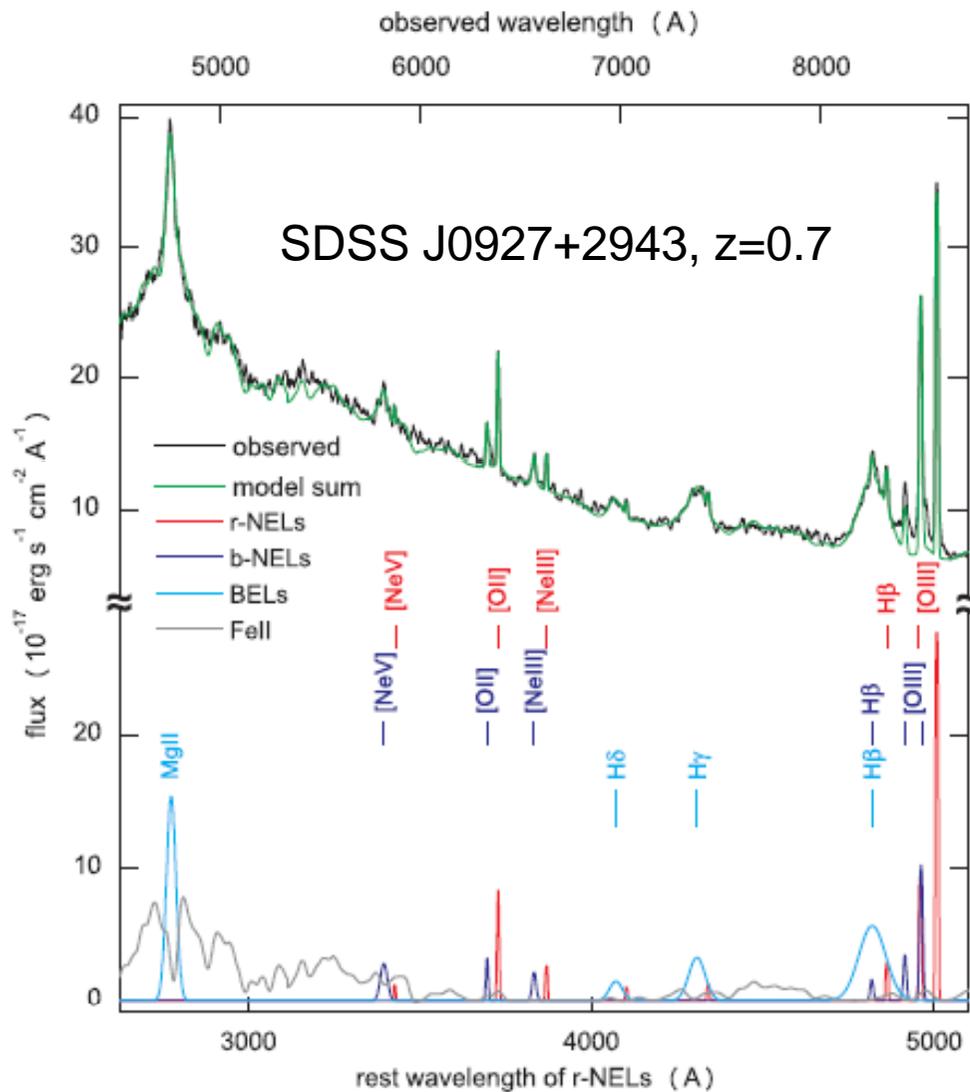


à  $z > 10$  plus de 80% des trous noirs en fusion peuvent être éjectés de leur halo

(Volonteri & Rees 2006)

L'effet de fusée gravitationnelle est une menace à grand  $z$ , quand les halos sont petits, avec de faibles puits de potentiel

# Evidence du recul? (TN avec spin)



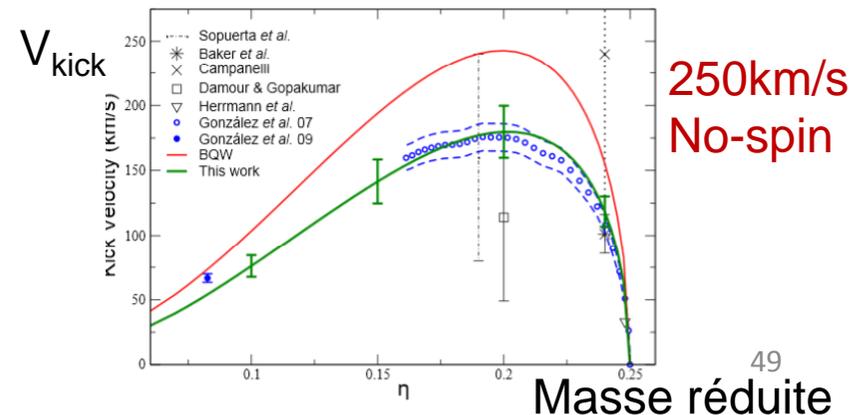
Région BLR entraînée avec le trou noir massif (BEL)

2650 km/s de différence avec la Région NLR (r-NEL)

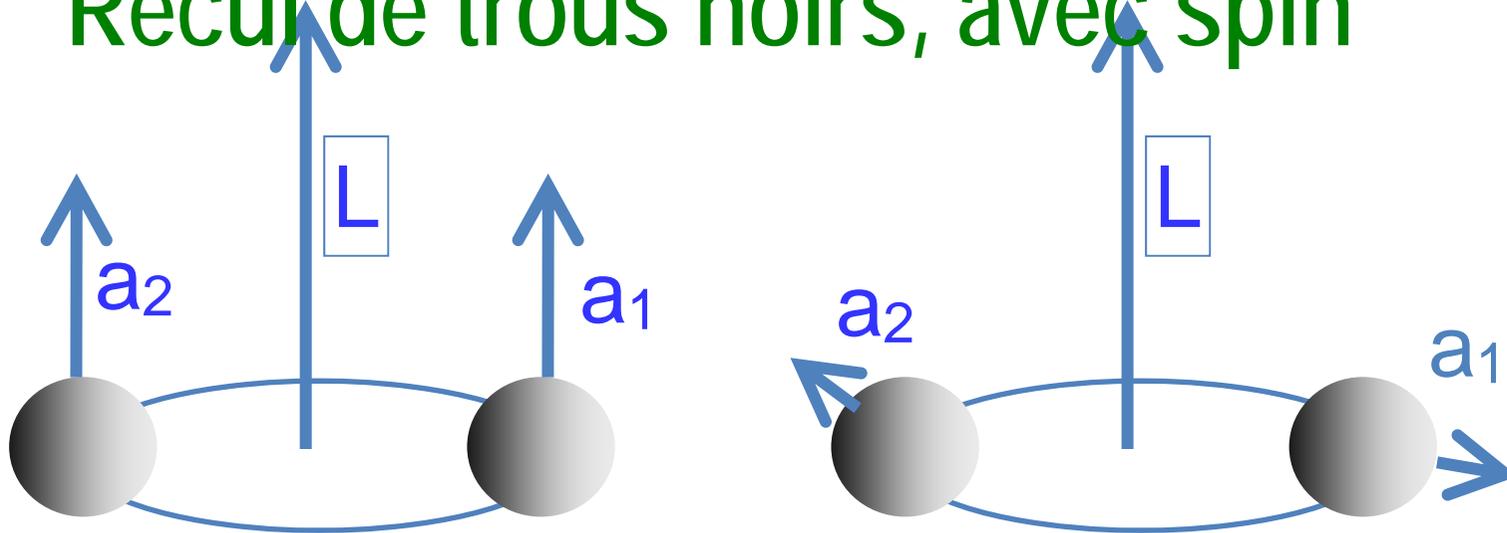
*Komossa et al 2008*

Le rayonnement d'amortissement produit un anti-kick (ringdown)

*Le Tiec et al 2010*



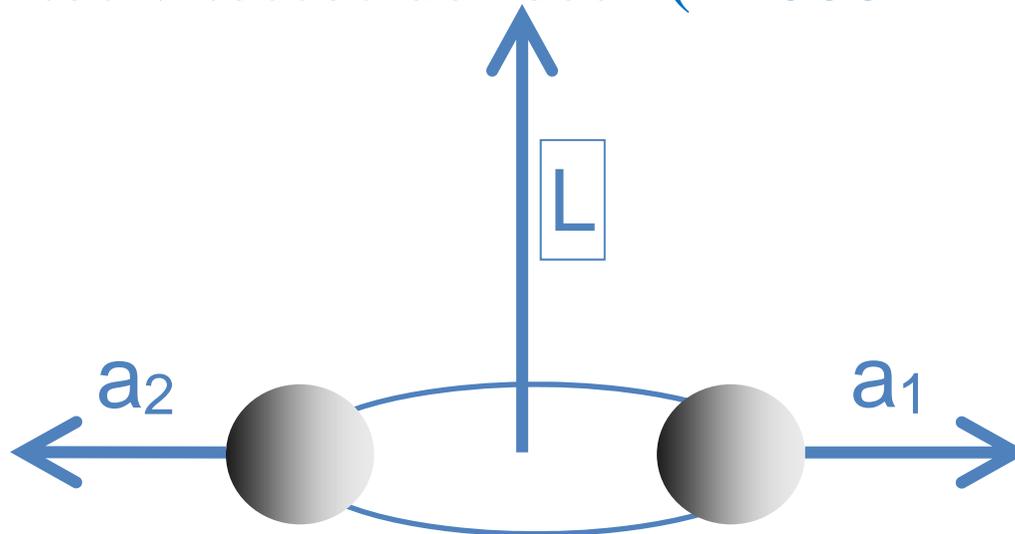
# Recul de trous noirs, avec spin



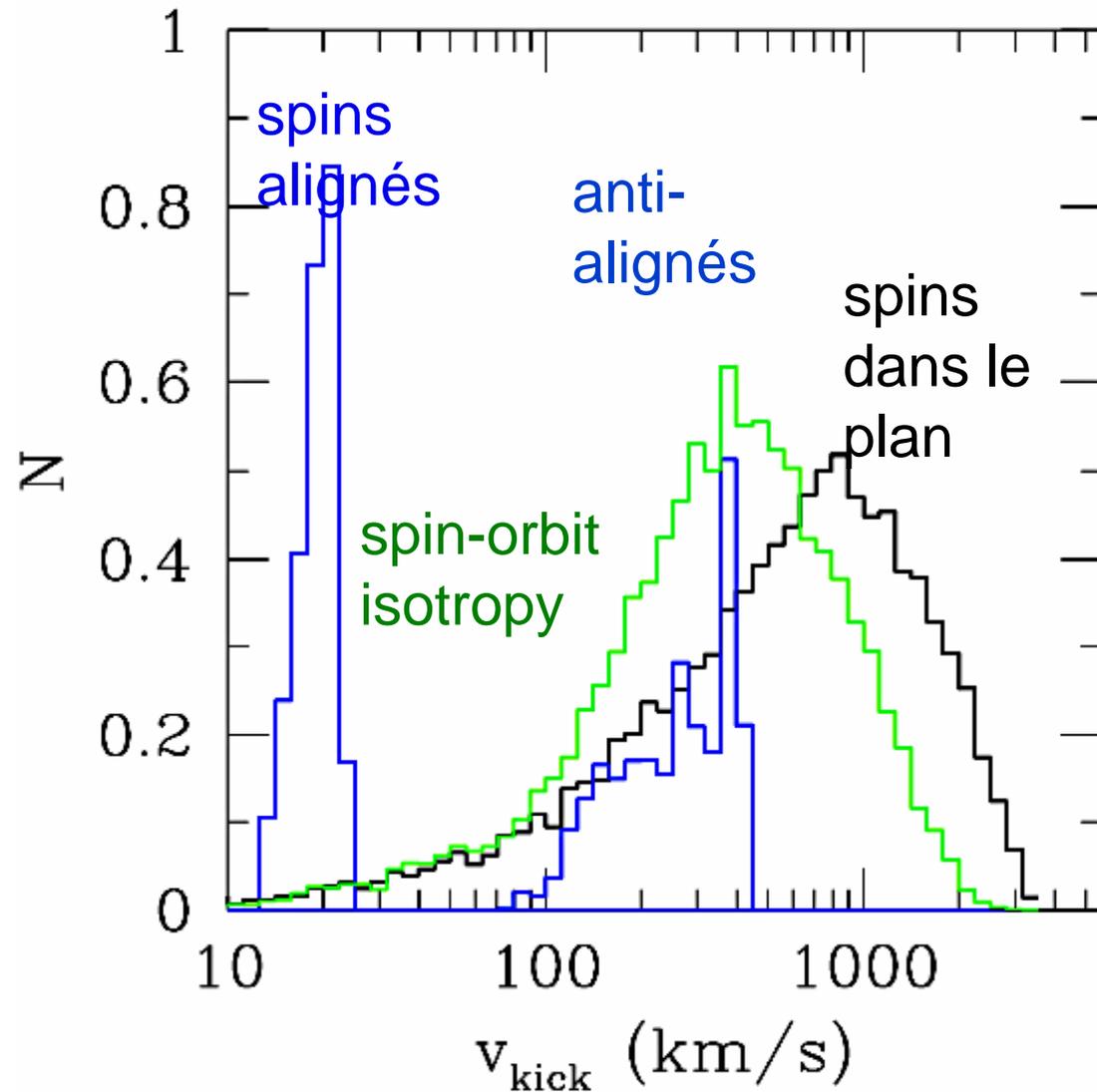
Faibles vitesses de recul ( $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ )

---

Fortes vitesses de recul ( $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ )



# Trous noirs en Recul



Distribution aléatoire de l'amplitude du spin

Spins alignés ou anti-alignés

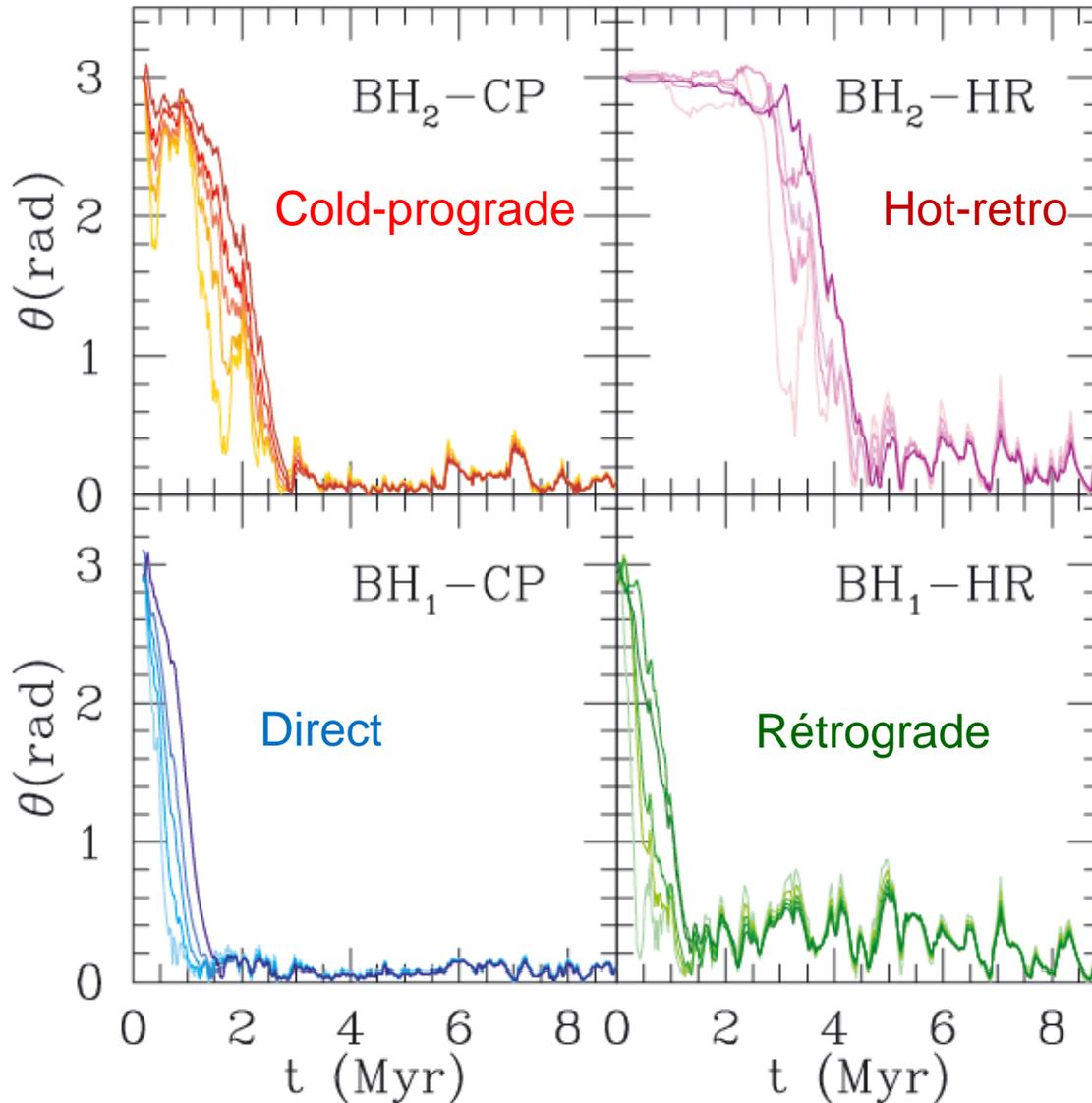
isotropie spin-orbit

Si les TN ont le temps d'interagir avec le disque dans le merger, ils ne seront pas éjectés

*Volonteri et al 2010*

# Alignement rapide spin des TN et $L_{orb}$ de la paire

➔ Possibilité de retournement



*Dotti et al 2010*

Alignement en 2 Myr!

$M_1$  au centre  $>$   $M_2$

Les TN perdent mémoire de leur spin

Couples gravito-magnétique

Alignement avec le disque

d'accrétion, et

le moment angulaire

orbital de la paire

➔ Faible recul

# Effet Bardeen-Petterson

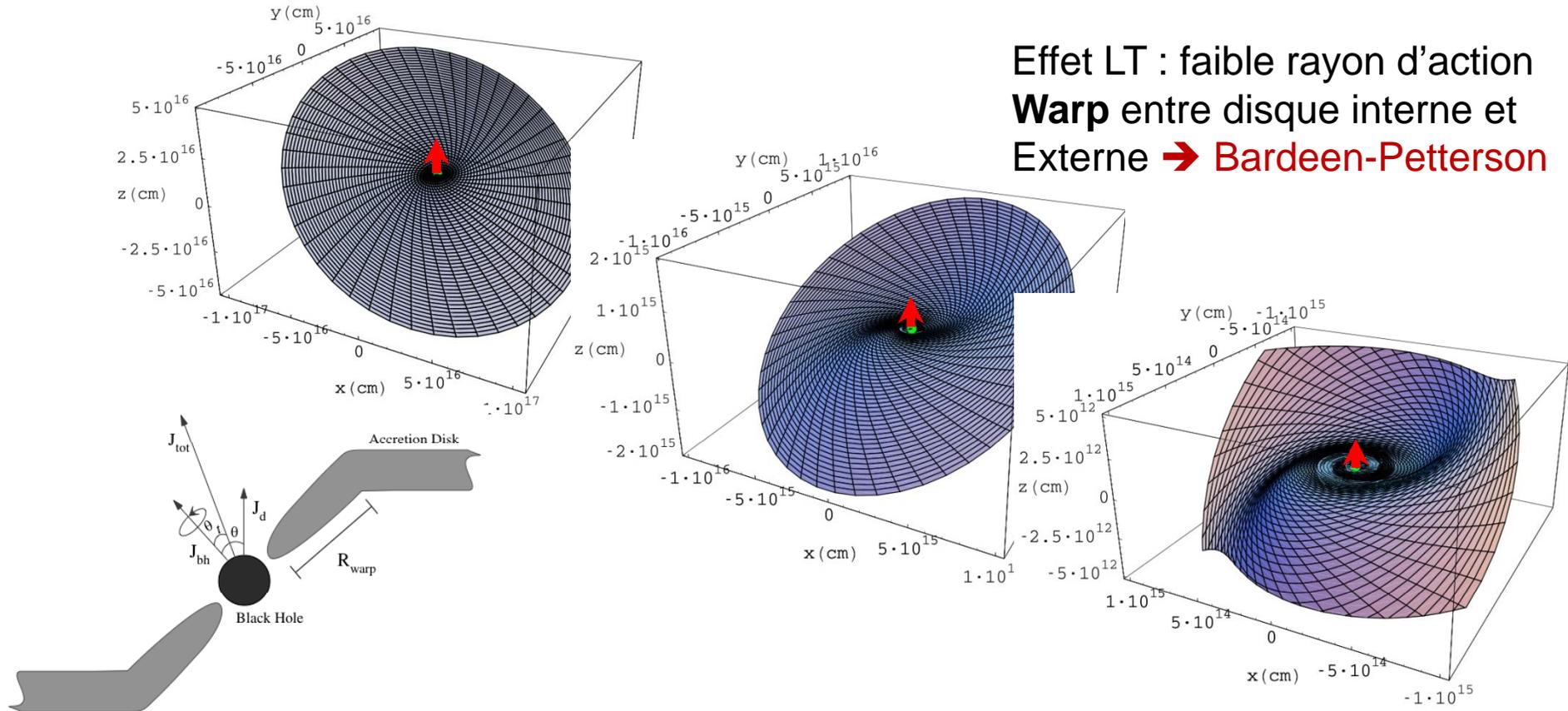
Effet Lense-Thirring autour d'un trou noir de Kerr (en rotation)

Une particule avec L non aligné va précesser avec

$$\Omega_{LT}(r) = \frac{2GJ_{BH}}{c^2 r^3}$$

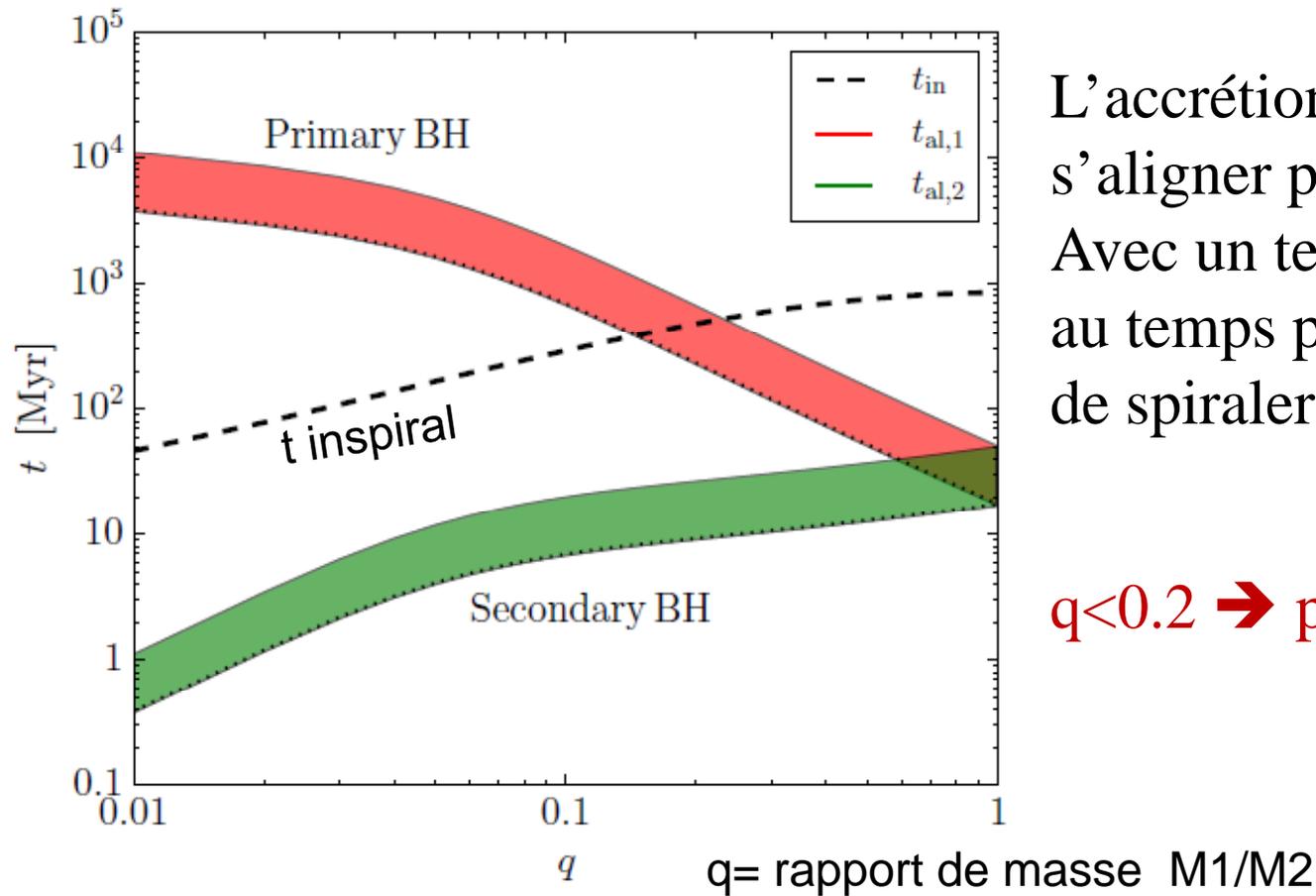
+ viscosité du disque → alignement au centre

Effet LT : faible rayon d'action  
**Warp** entre disque interne et Externe → **Bardeen-Petterson**



# Influence des masses M1 et M2

M1 est au centre du disque d'accrétion  
M2 au bord → accrète plus



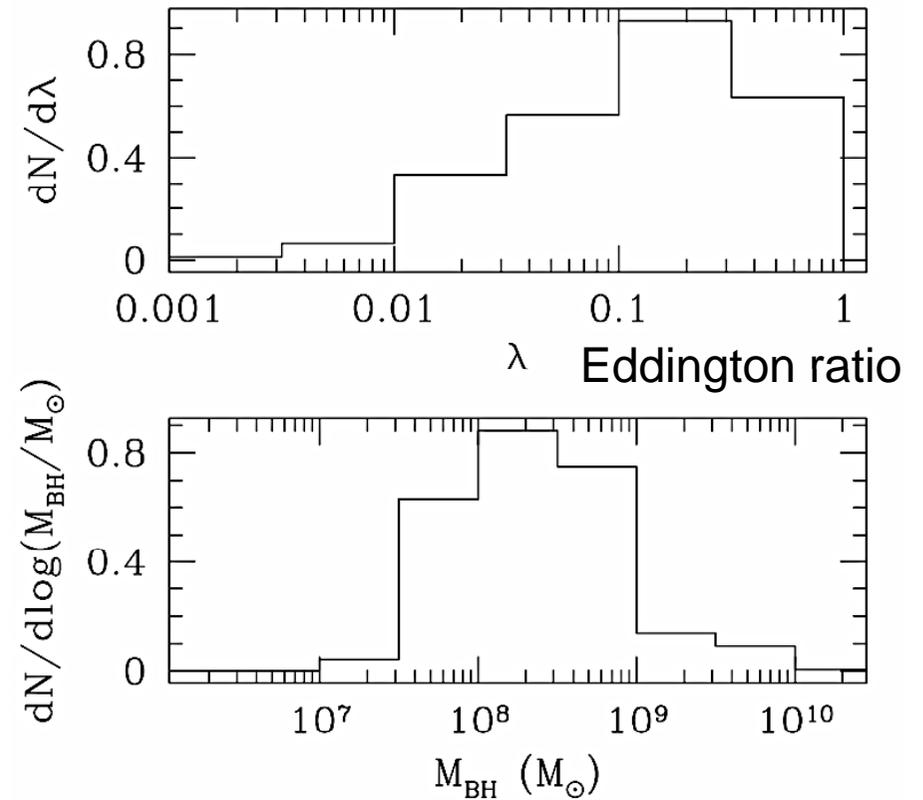
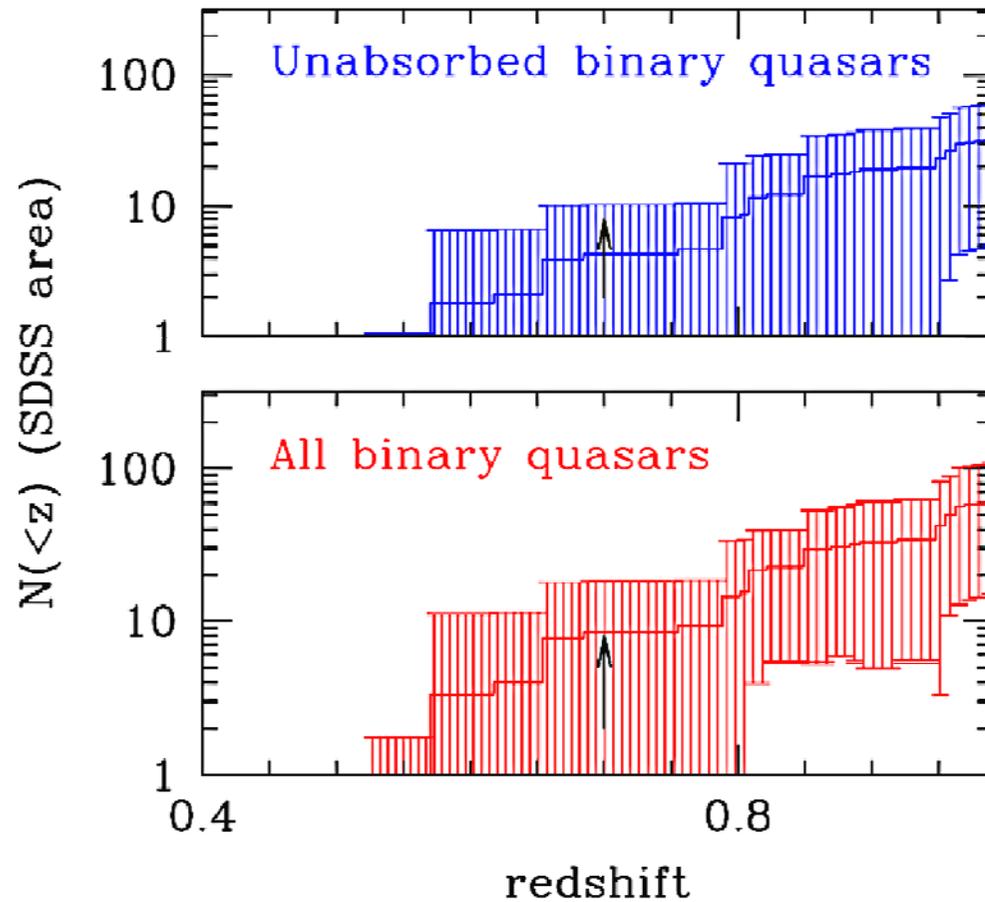
L'accrétion permet à M2 de s'aligner plus vite  
Avec un temps toujours inférieur au temps pour la binaire de spiraler et fusionner  $t_{inspiral}$

$q < 0.2 \rightarrow$  possible recul

# Nombre prédit de quasars binaires

Aujourd'hui 2 binaires  
sur 17500 quasars détectés

Non détectés dans le SDSS  
grand  $z$ , faible  $M$ , et faible  $L$

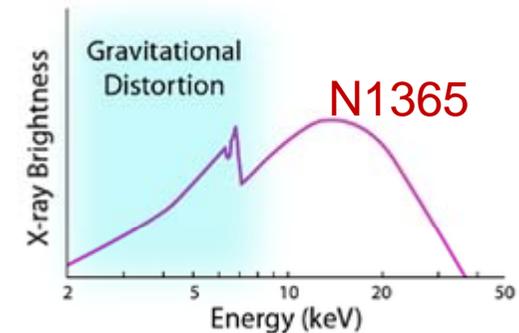


# Spin des trous noirs et morphologie

Certains trous noirs sont en rotation rapide (N1365)

Les jets radio sont observés préférentiellement dans les galaxies elliptiques → A cause du spin?

Extraction de l'énergie du jet à partir du spin

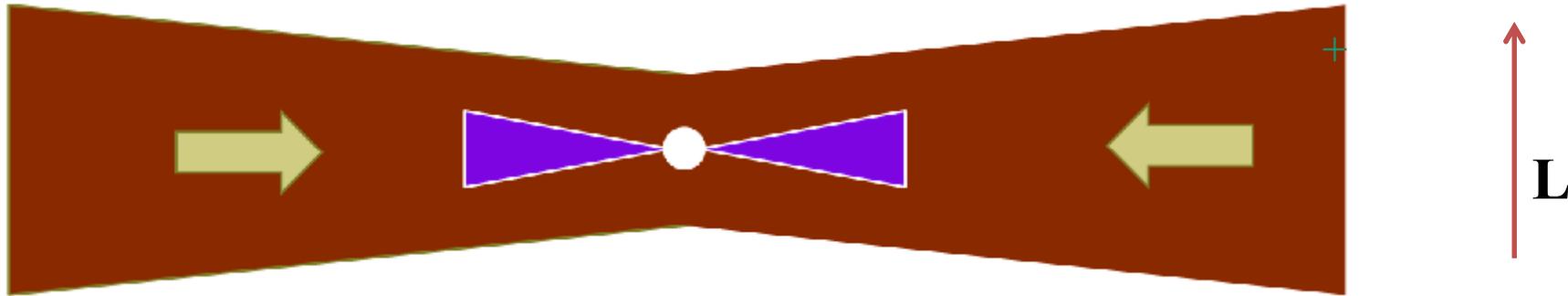


**Le spin est modifié par les fusions de trous noirs et le couplage avec les disques d'accrétion**

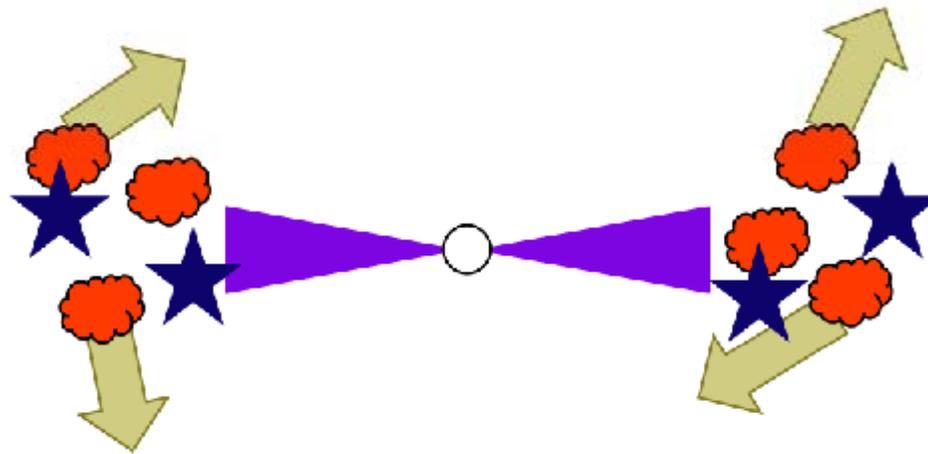
les fusions peuvent augmenter ou réduire le spin des trous noirs → l'alignement avec le disque augmente le spin

→ Dans les galaxies spirales, l'accrétion est plus aléatoire: destruction de marée des étoiles, accrétion de gaz moléculaire..

# Accrétion cohérente ou chaotique

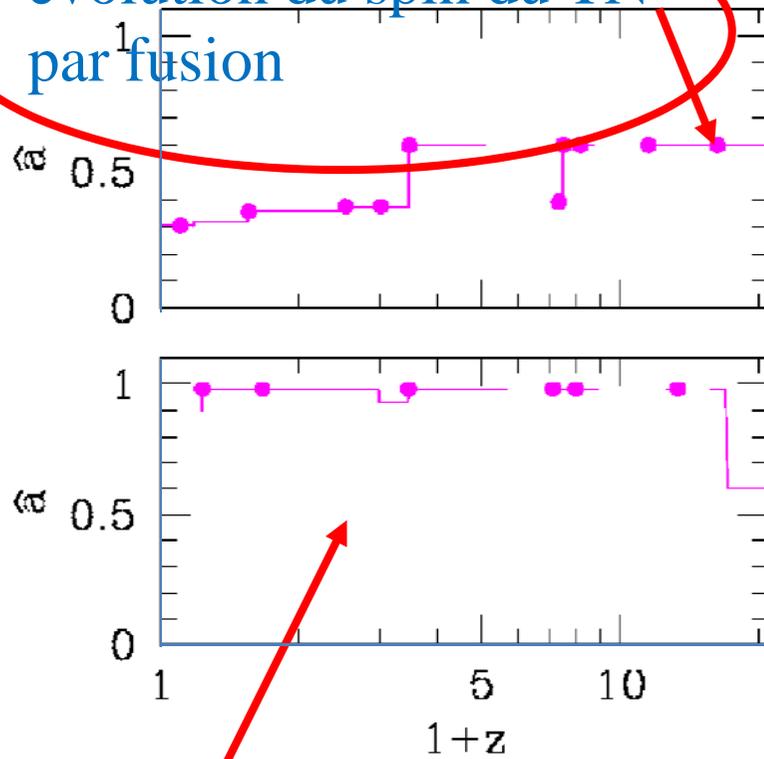


Accrétion de matière régulière avec un moment angulaire  $L$  orienté dans la même direction → spin maximum  $a \sim 1$



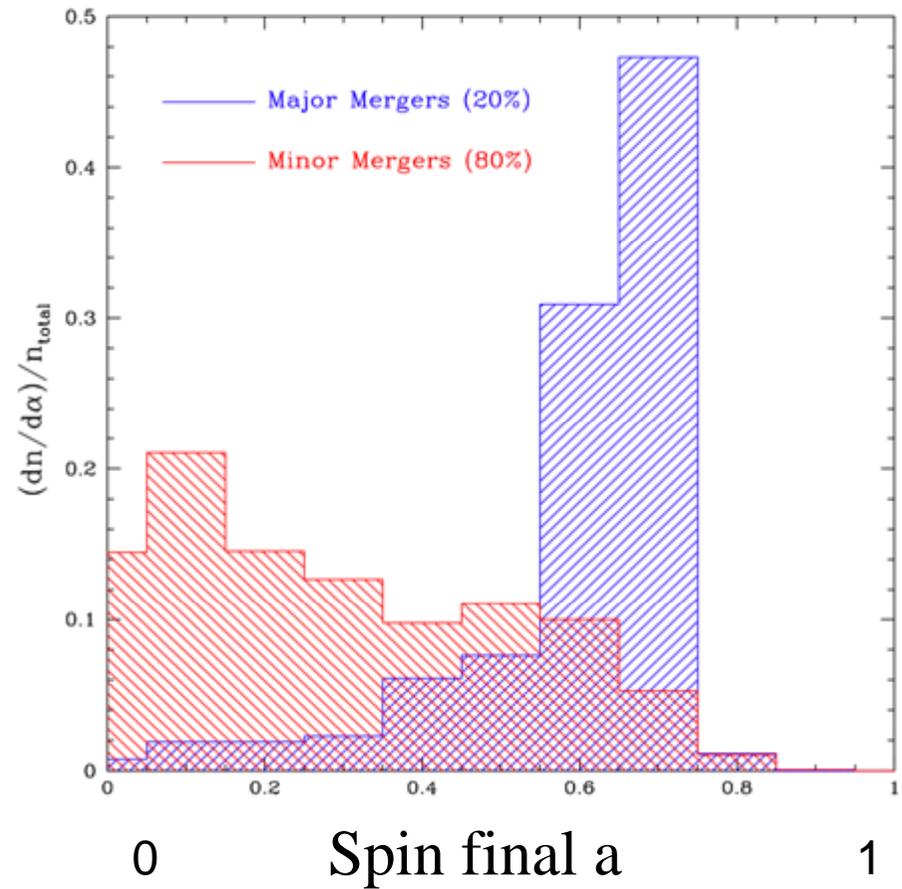
Accrétion de matière en plusieurs épisodes avec un moment angulaire de direction aléatoire →  $a \sim 0.1-0.3$  King & Pringle 2006

évolution du spin du TN  
par fusion

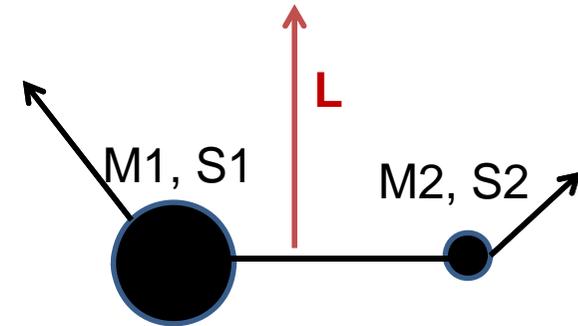
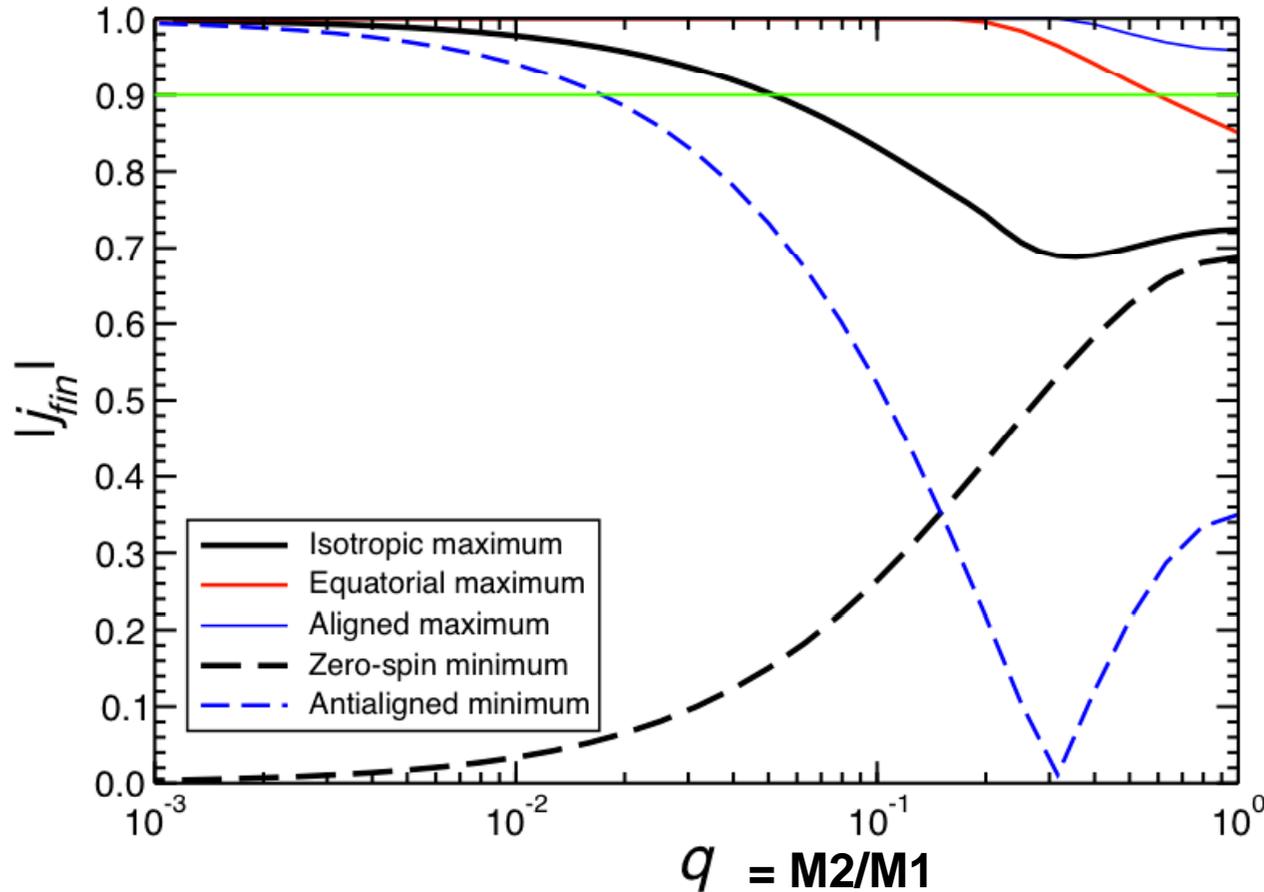


évolution du spin du TN  
par fusion et accrétion

Fusions majeures  $M1/M2 < 3$   
Fusions mineures  $M1/M2 > 3$



# Statistique sur l'alignement des spins



La fusion de 2 TN sans spin donne  $a=0.69$

Si  $q=1$ , spins alignés

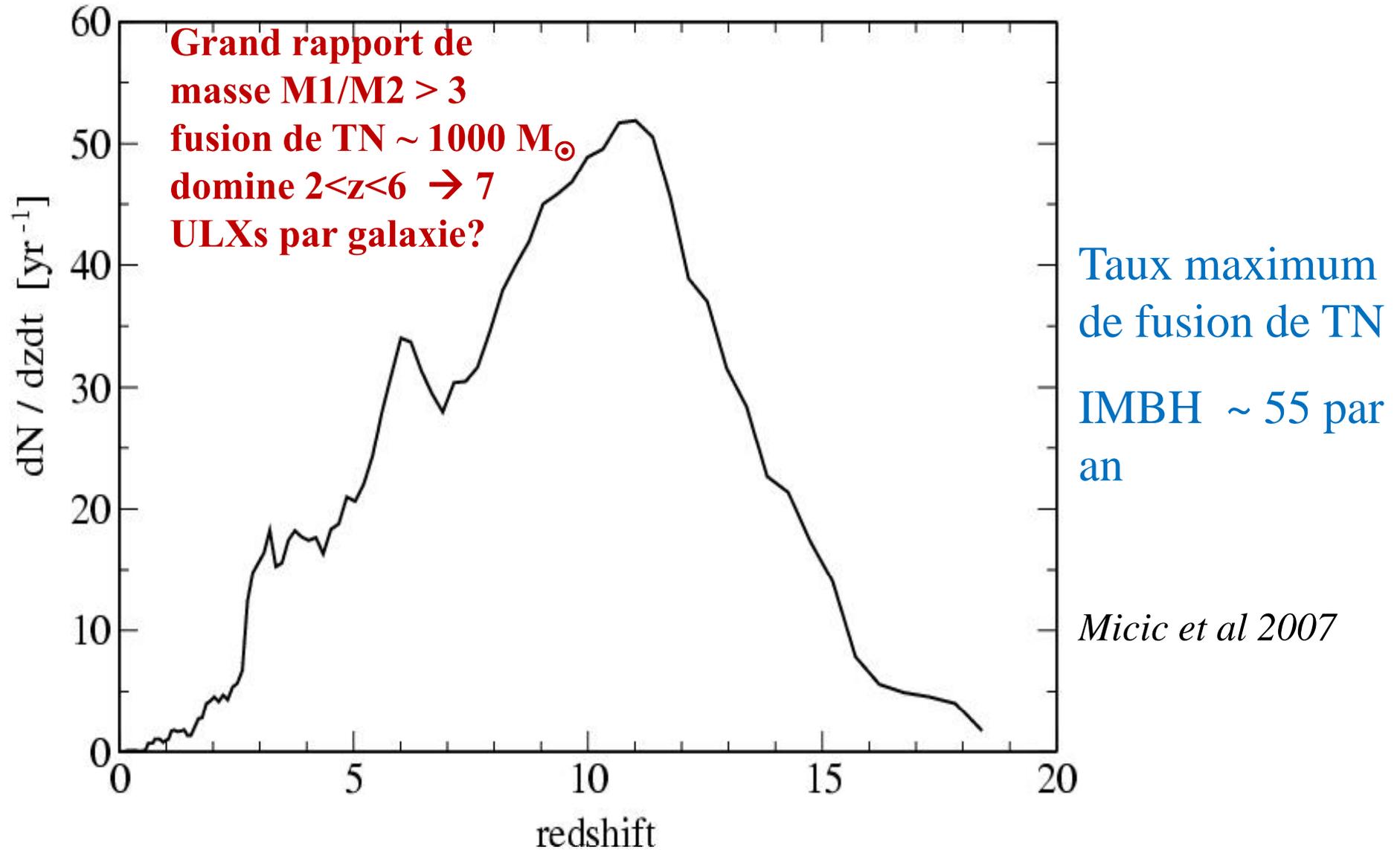
→  $a \sim 1$

→ Si  $q \ll 1$  isotrope

Alors  $a$  faible

→ En général, le résultat final a un fort spin

# Simulations cosmologiques de fusions de TN



Faible rapport de masse  $M1/M2 < 3 \rightarrow$  fusion de TN de  $1000 M_{\odot}$  très fréquents

# Conclusions

## Coalescence de trous noirs

- à chaque fusion de galaxies
- 3 étapes: friction dynamique sur les étoiles
- ejection des étoiles (3-corps) + intervention du gaz
- rayonnement gravitationnel

## Recensement de trous noirs binaires

→ Rares, la fusion doit être rapide?

Eviter l'effet de fronde, recul et fusée gravitationnelle

## Comment évolue le spin des trous noirs super-massifs?

- par fusion de trous noirs
- par accréation de gaz

Comment détecter les ondes gravitationnelles?