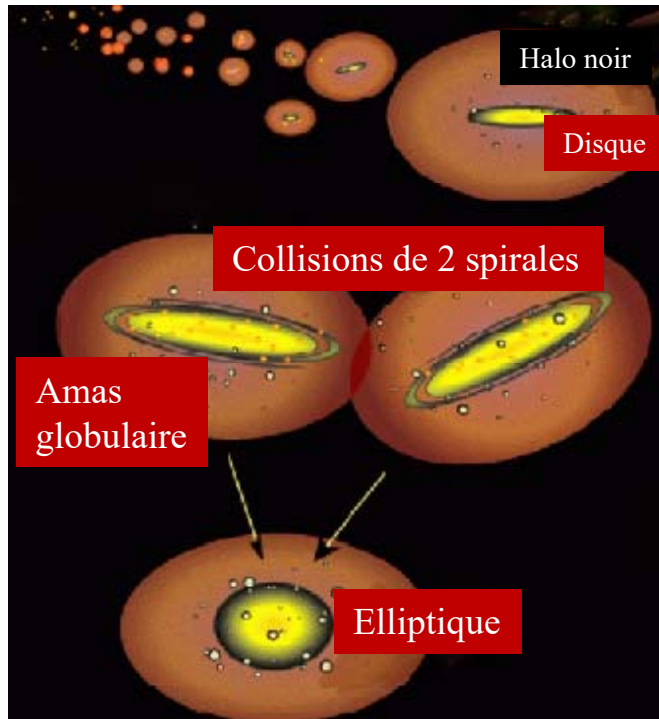




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Friction dynamique et Formation hiérarchique



Françoise Combes



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

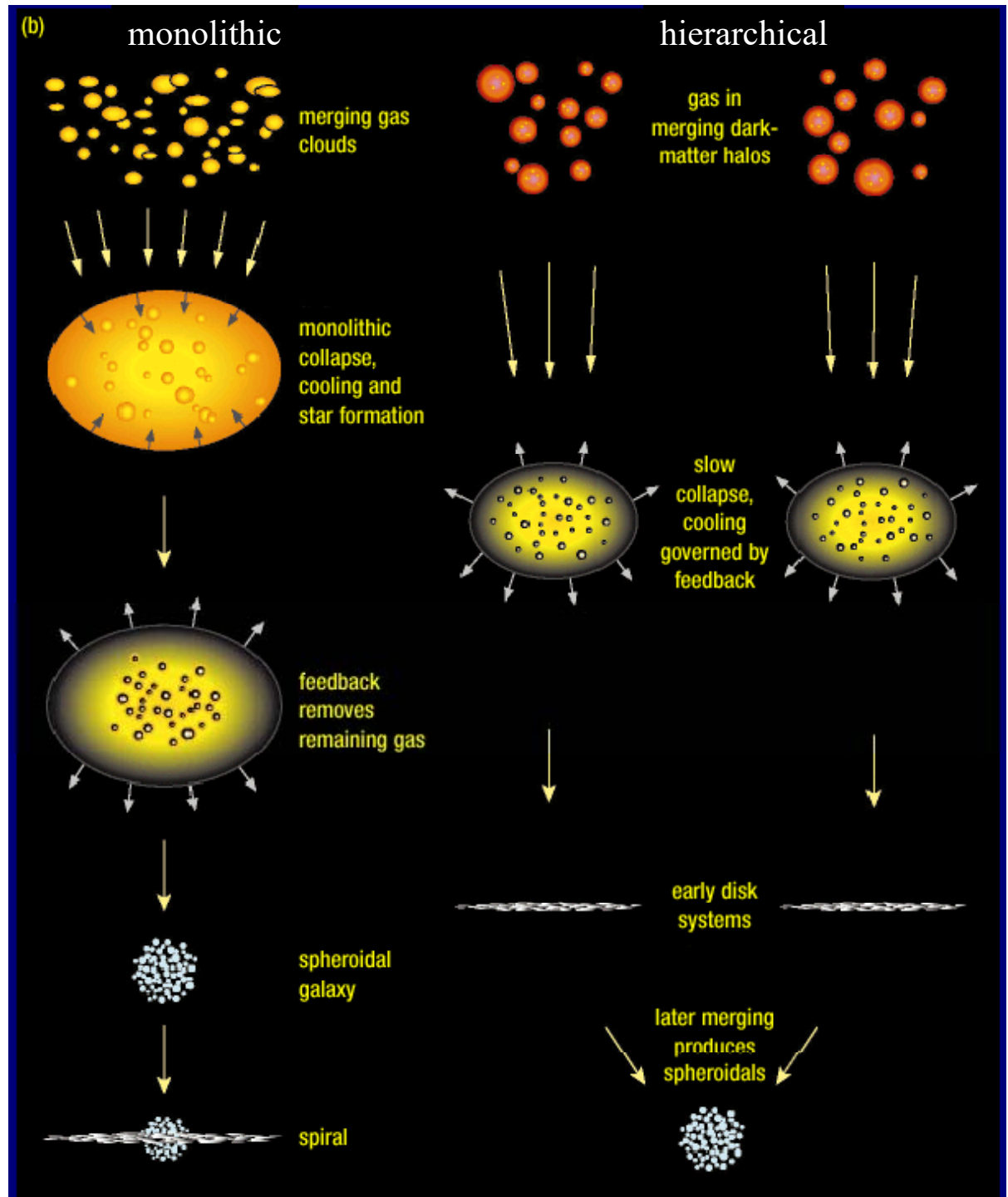
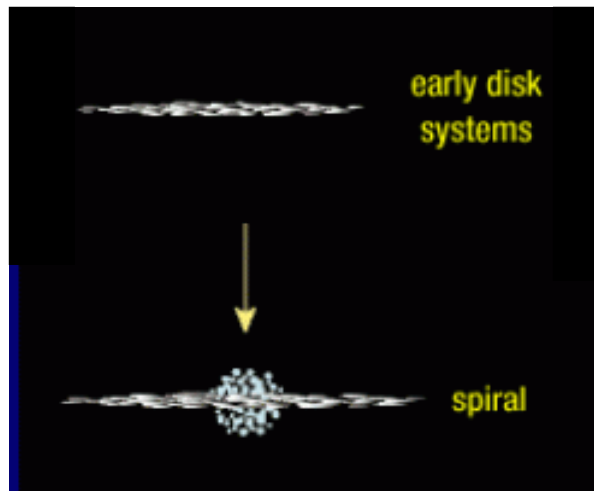
Monolithique

Effondrement → sphéroïde
Disques se forment après
par accrétion de gaz

Hiérarchique

Ell-gal se forment après
par fusion de spirales

Evolution séculaire



Pourquoi monolithique ?

Historiquement, pour la Voie lactée:

Eggen, Lynden-Bell, Sandage (1962)

Corrélation $[Fe/H]$ vs excentricité e ,
cinématique (E_z , L_z)

→ Favorise la formation du halo pauvre en métaux dans une phase
d'effondrement du gaz en disque mince, enrichi par la SF

Potentiel variant lentement (e , L_z invariants)

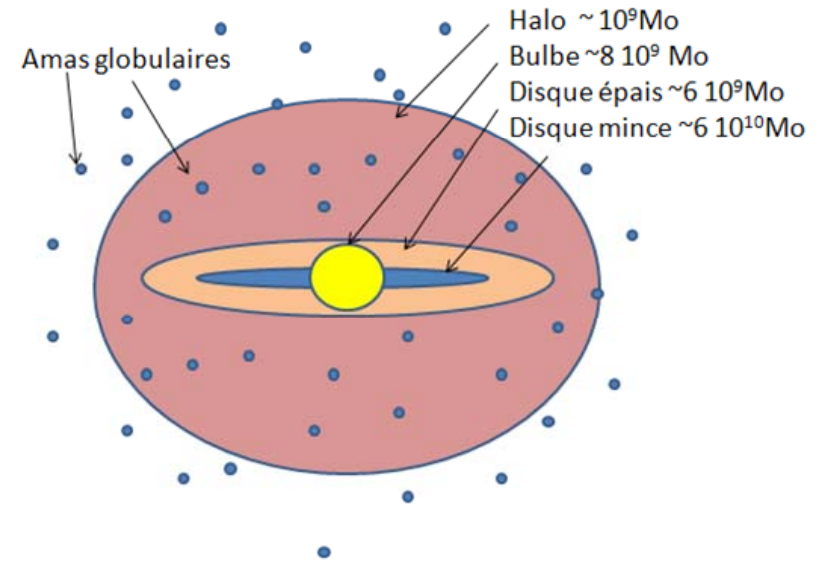
Searle & Zinn (1977)

Les amas globulaires du halo: grands écarts de métallicité,
non-corrélés avec la distance

→ Favorise la fusion de petites protogalaxies

Potentiel gravitationnel variant rapidement

+ beaucoup de gaz accrété plus tard

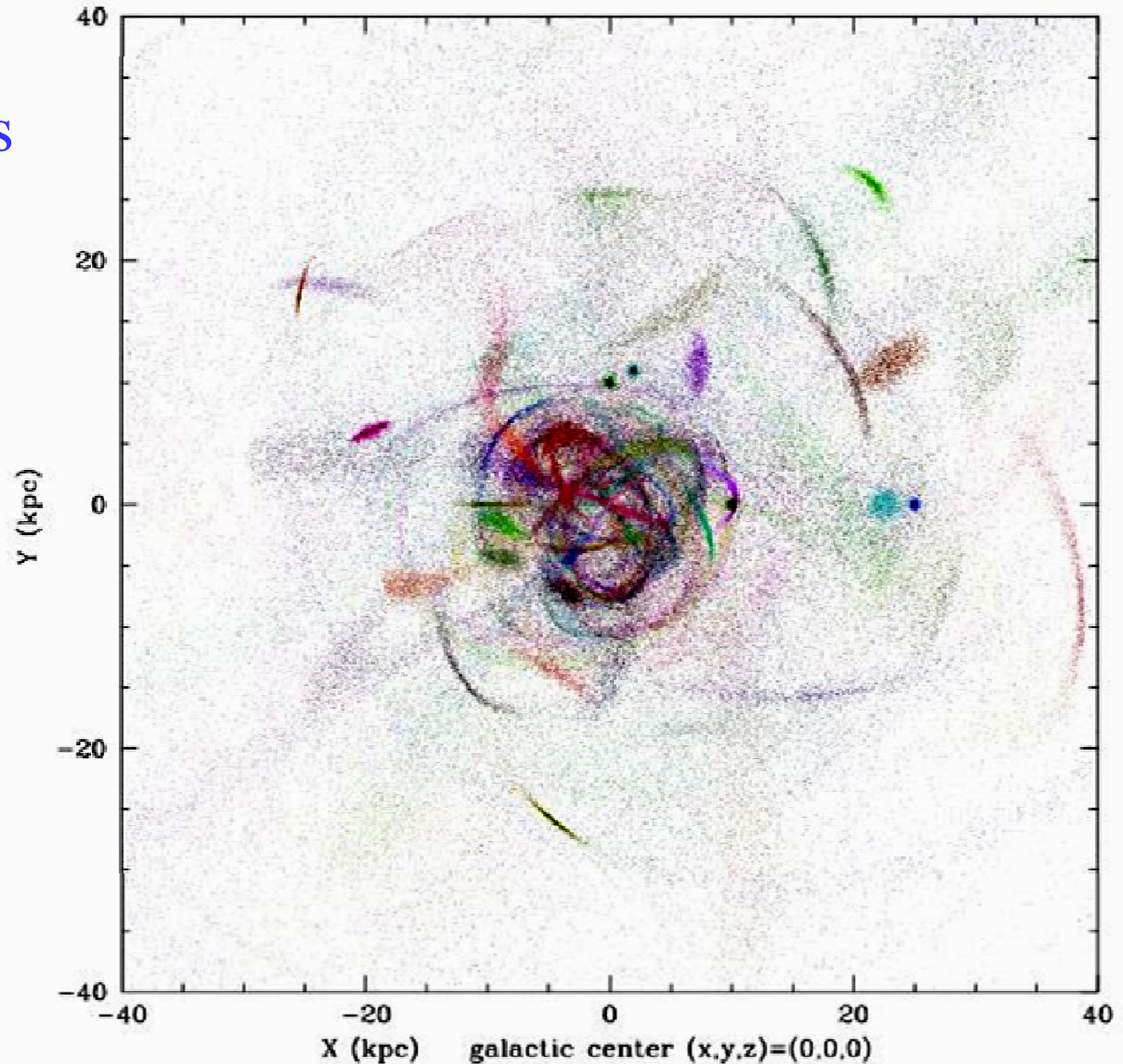


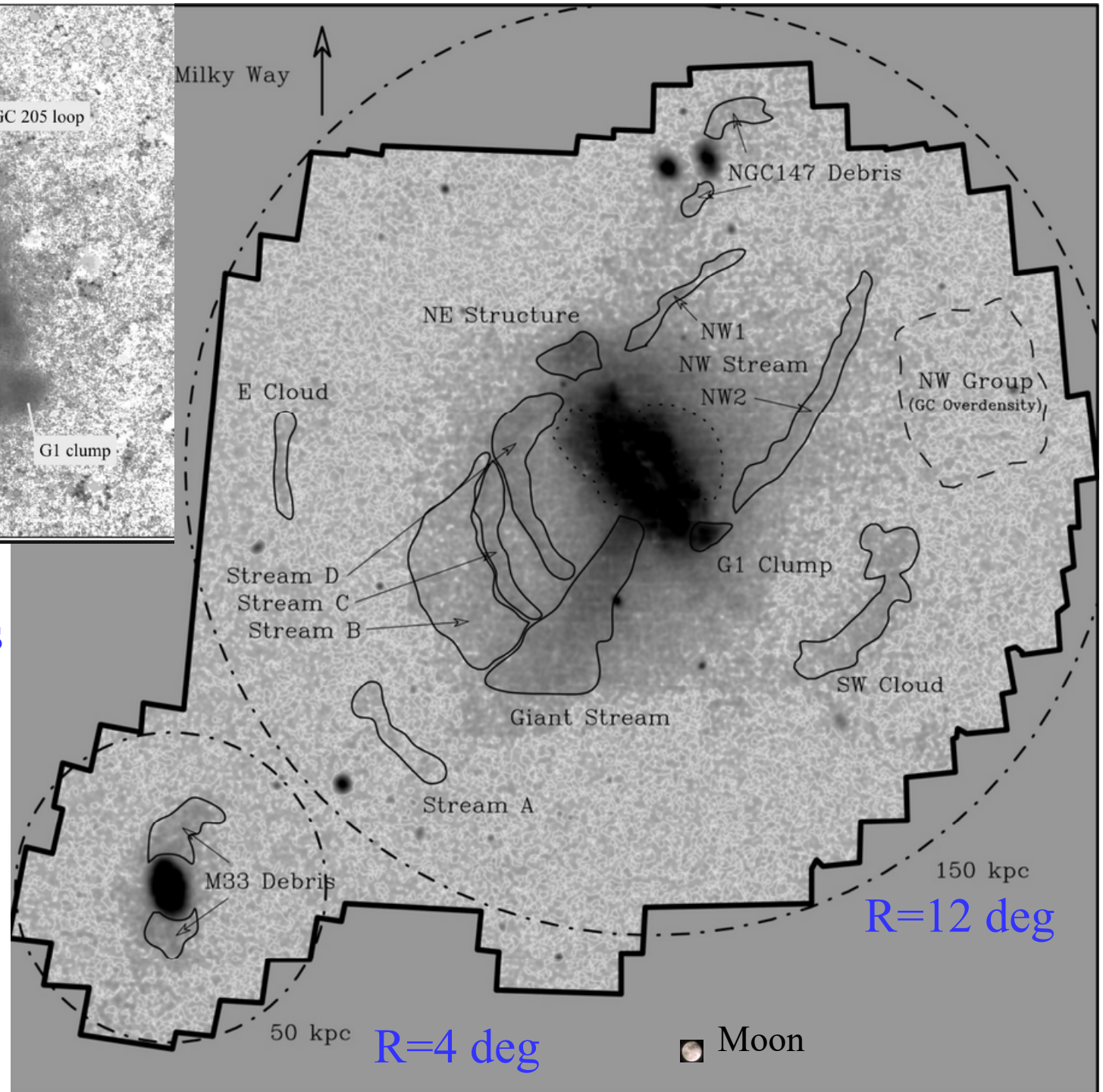
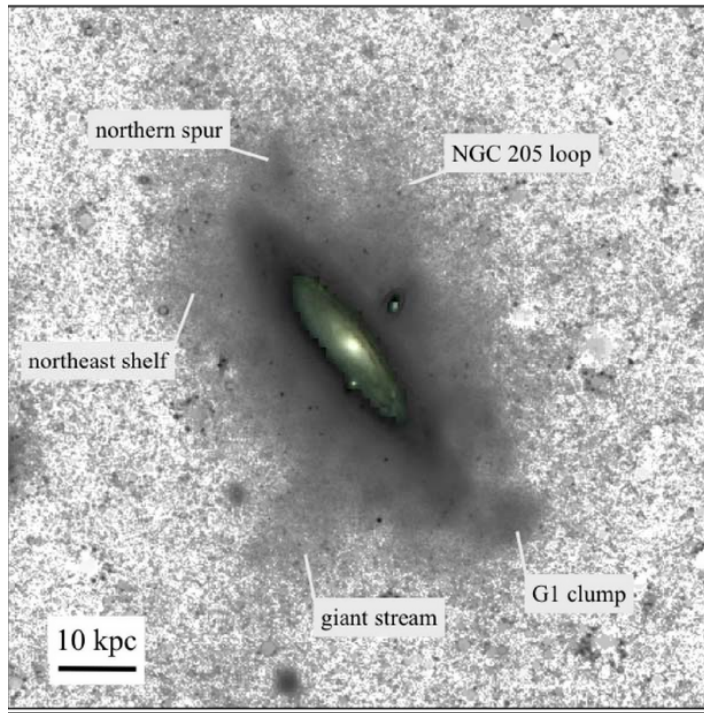
Formation par accrétion

Fusions mineures

- Les halos stellaires de la Voie lactée et d'Andromède montrent des preuves de leur formation par accrétion et destruction de galaxies satellites naines et des amas globulaires

→ arcs, courants de marée



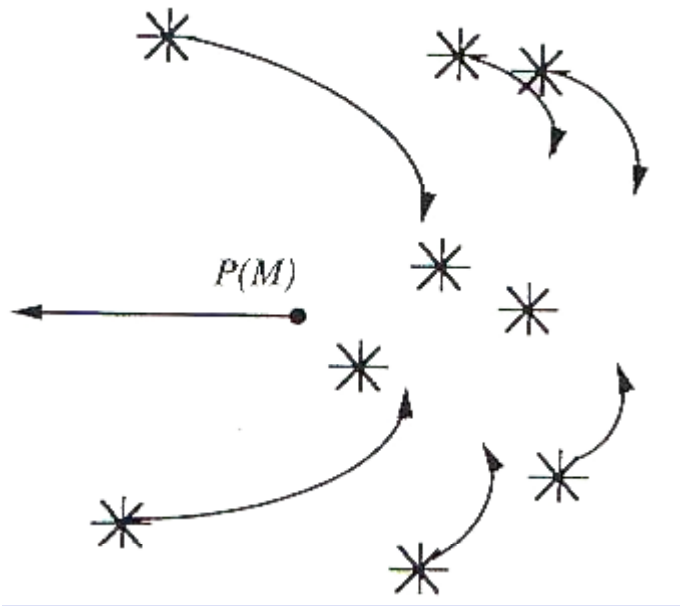


Vestiges stellaires
de
l'interaction avec
M33+ nombreux
Satellites

McConnachie
PANDAS

La friction dynamique

Toute masse $M \gg m$ dans une mer d'étoiles est sujette à la friction

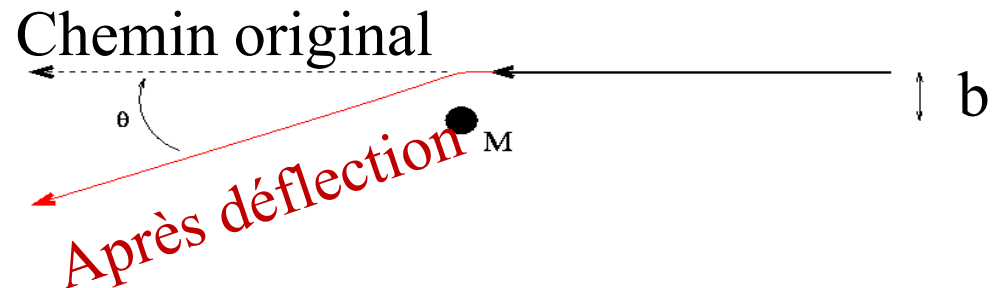


Chandrasekhar (1943)

La décélération est proportionnelle à

$$\rho(<v) \approx M/v^2 \ln(\Lambda)$$

avec $\Lambda = b_{\max}/b_{\min}$

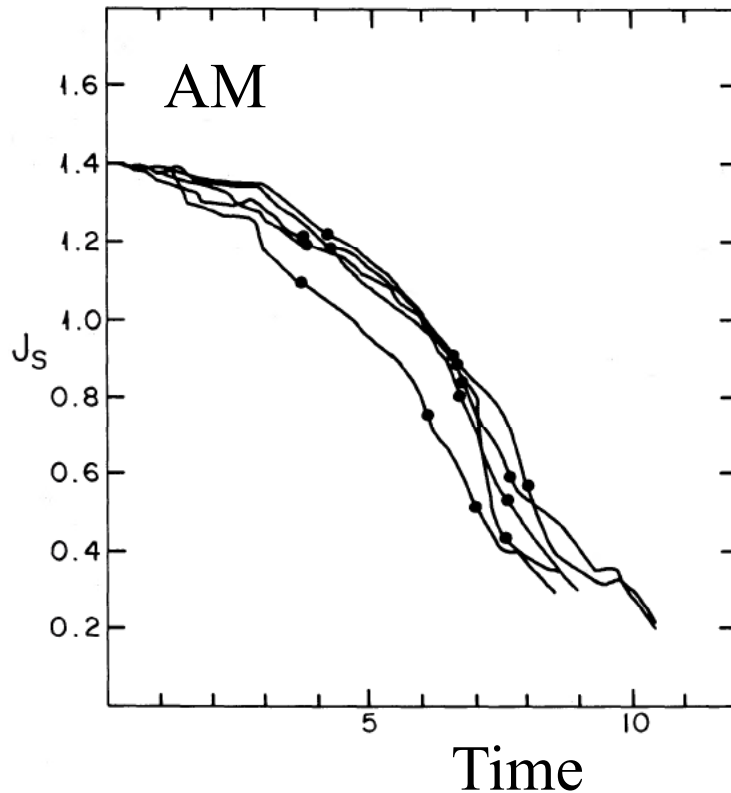


$$dv/dt = -v \frac{16\pi^2}{3} (\ln \Lambda) G^2 m M f(0)$$

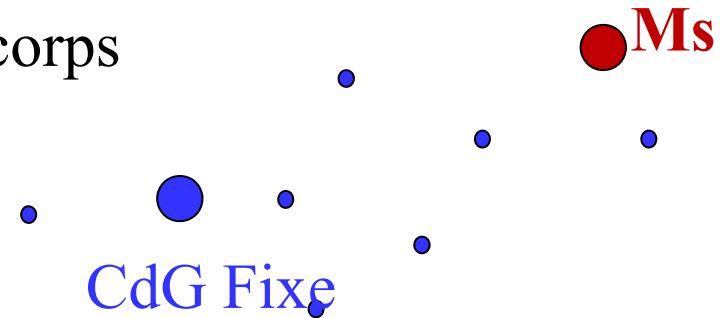
$$\rho = m f(0)$$

Approximation: N-corps restreint

Lin & Tremaine (1983) simulations à 3-corps



Les points correspondent aux péricentres



Curieusement, le résultat est proche de la formule de Chandrasekhar pour $\ln \Lambda = 3.3$

Beaucoup trop de friction par rapport aux simulations N-corps

Pourtant la self-gravité est ignorée

Les paramètres physiques

Approximations de Chandrasekhar

- 1- Milieu continu $\rho = \text{cste}$
- 2- Forces locales, à courte distance

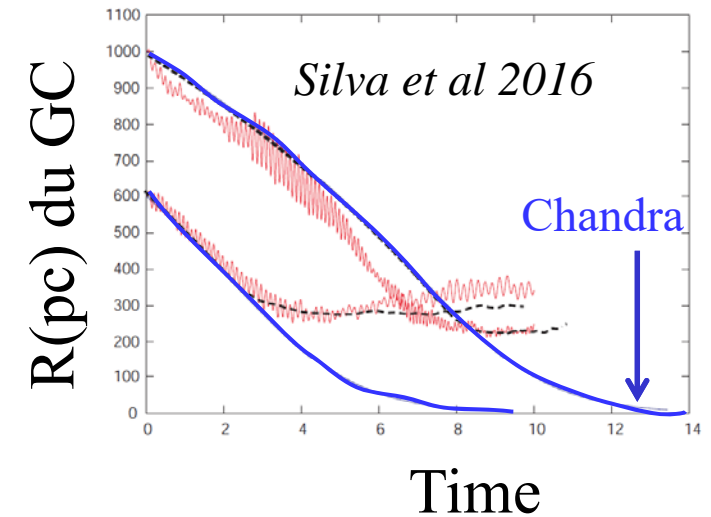
En fait dans l'interaction entre galaxies, c'est la friction à distance qui importe surtout

- 3- Aucun effet sur les étoiles dans leur ensemble
→ Qui accepte le moment angulaire perdu?

En fait les étoiles déviées gagnent le moment, il y a égalité entre action-réaction

- 4- Pas de self-gravité de la réponse

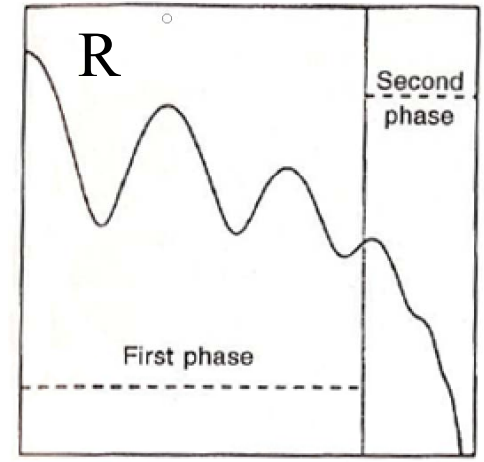
→ Prise en compte du mouvement du centre de gravité



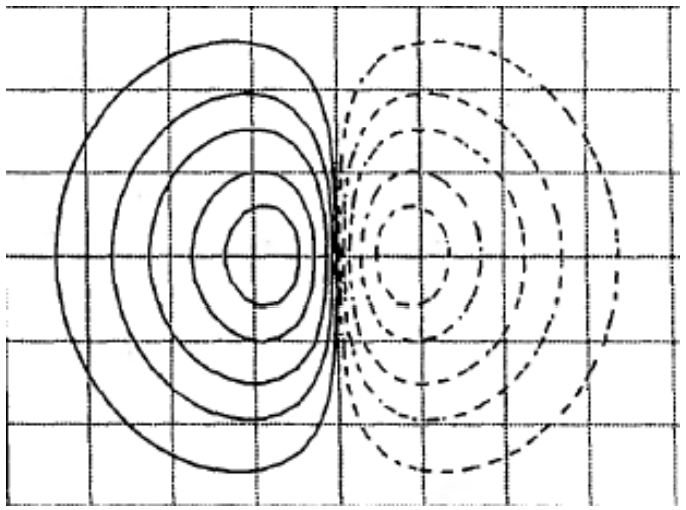
Simulation N-corps

Fixer le centre de gravité de la galaxie-cible rend artificiellement la déformation di-polaire, alors qu'elle est quadripolaire

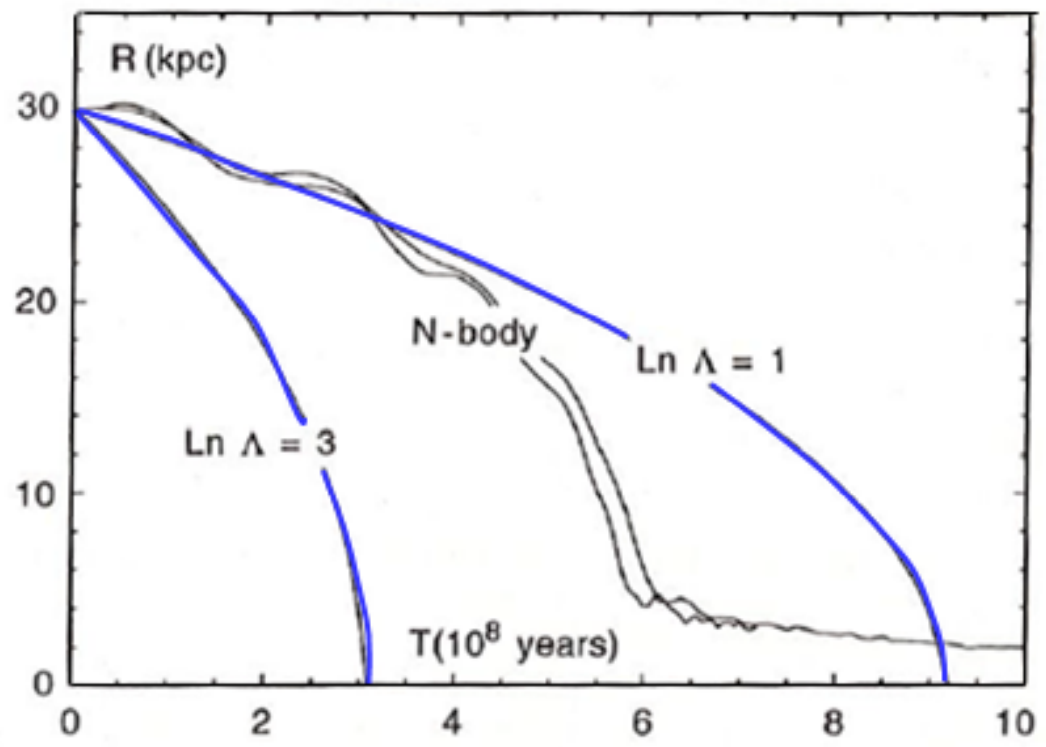
Weinberg (1989) conclut que la prise en compte de la self-gravité réduit l'effet de friction



Time



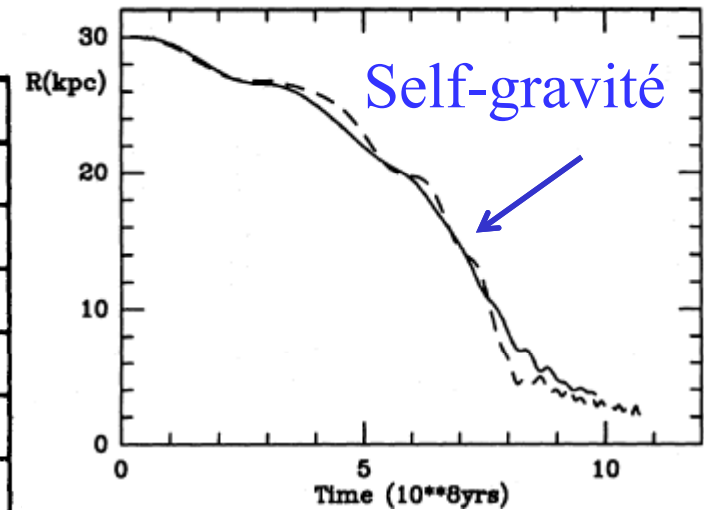
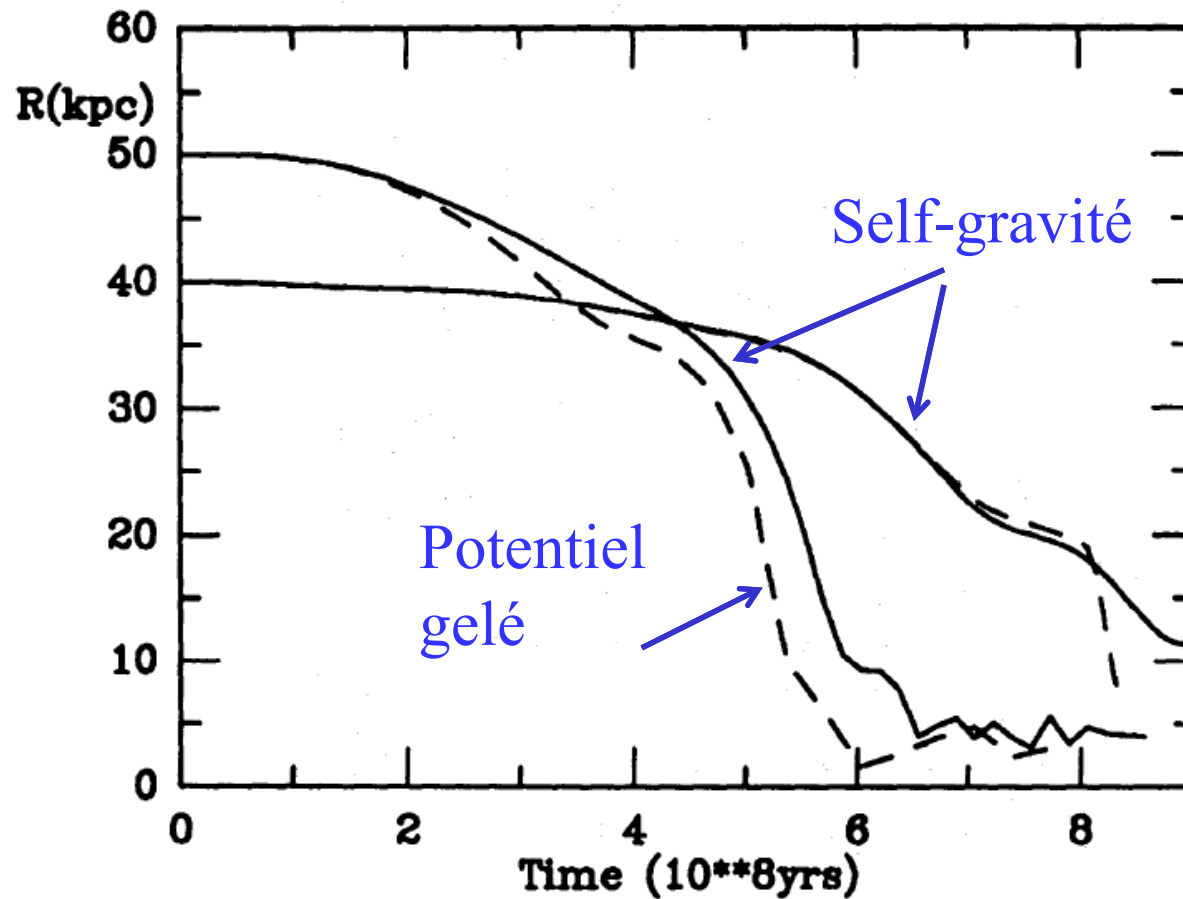
Déformation dipolaire sans self-gravité (Centre fixe)



Prugniel & Combes 1992

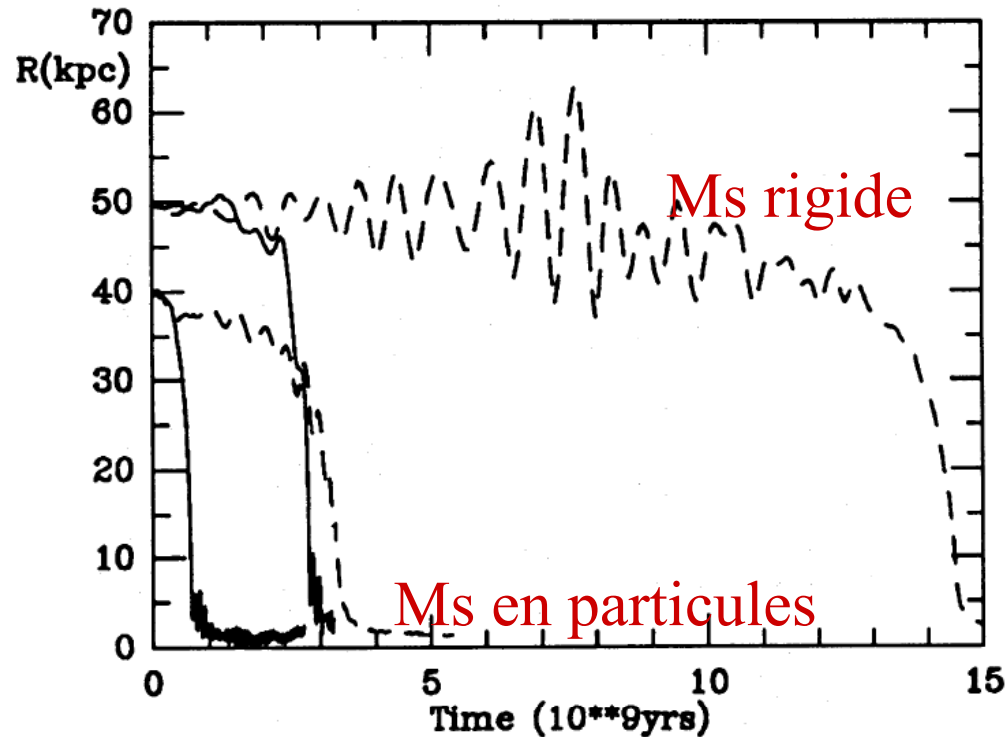
Influence de la self-gravité

Une fois le déplacement du centre de gravité pris en compte, la self-gravité est négligeable

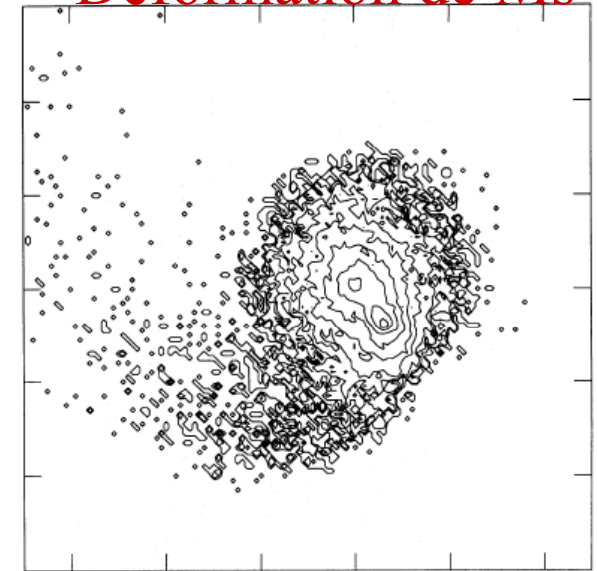


Uniquement des effets secondaires, perdus dans le bruit

Rigidité du satellite

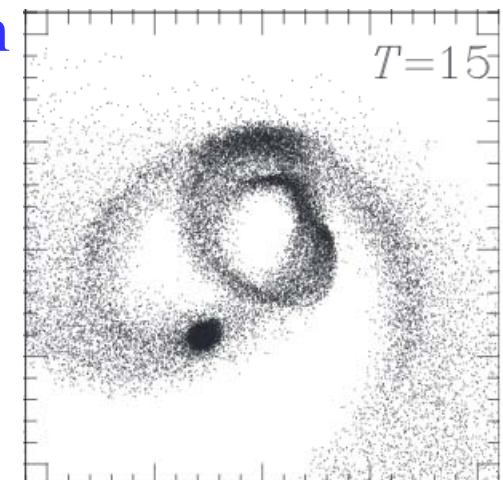


Déformation de Ms

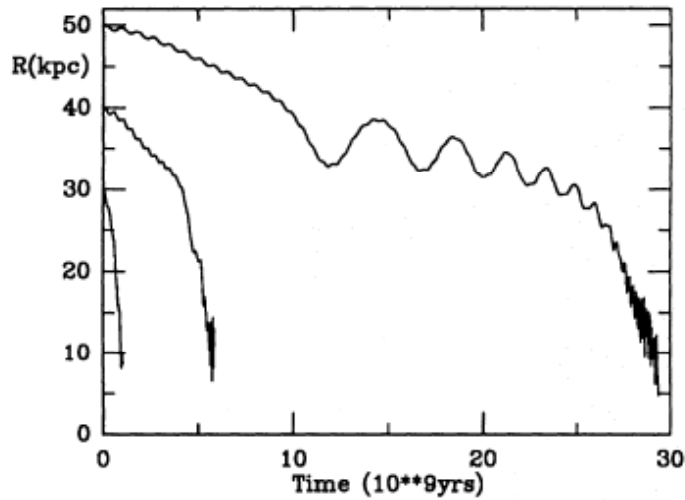


L'énergie orbitale est perdue en déformations: non seulement la galaxie-cible, mais aussi le satellite
→ plus de friction *Fujii et al 2006*

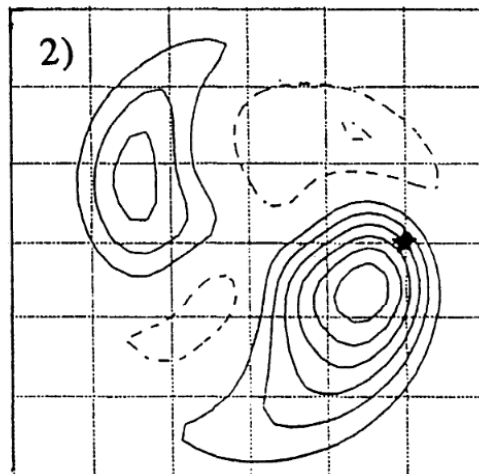
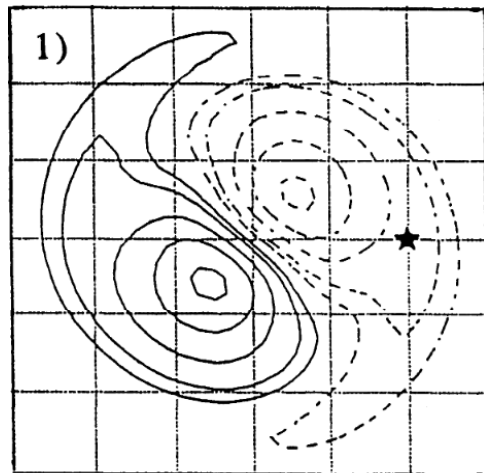
D'autre part, perte de masse du satellite
→ moins de friction *Boylan-Kolchin et al 2007*



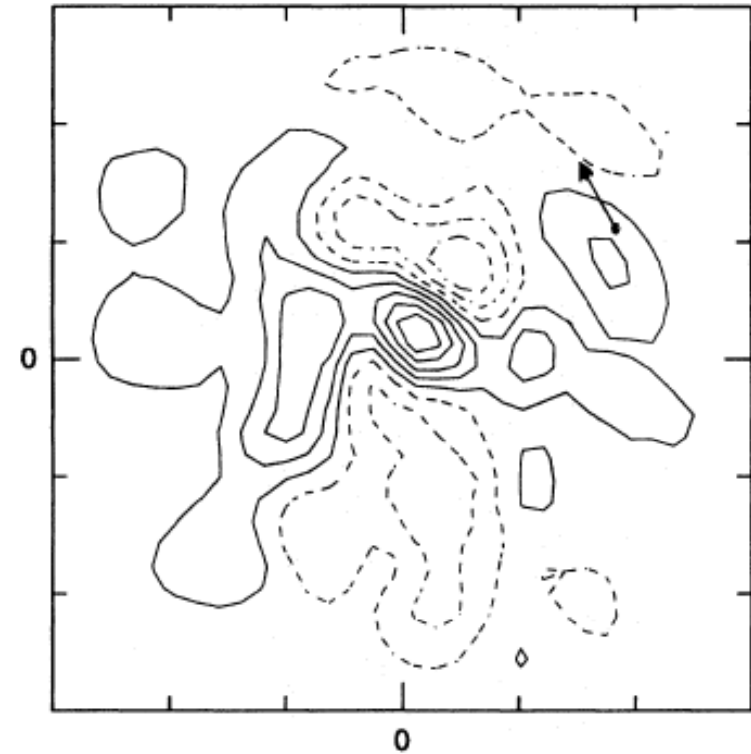
Modélisation en multipoles



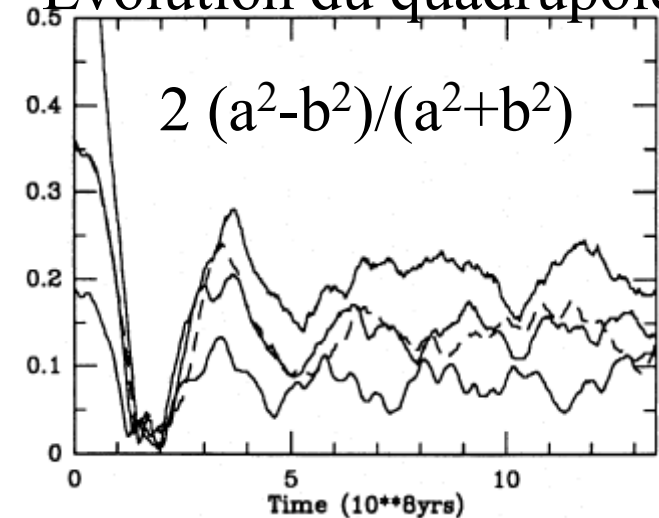
Il est possible de retrouver les courbes du déclin du satellite par un développement multi-polaire

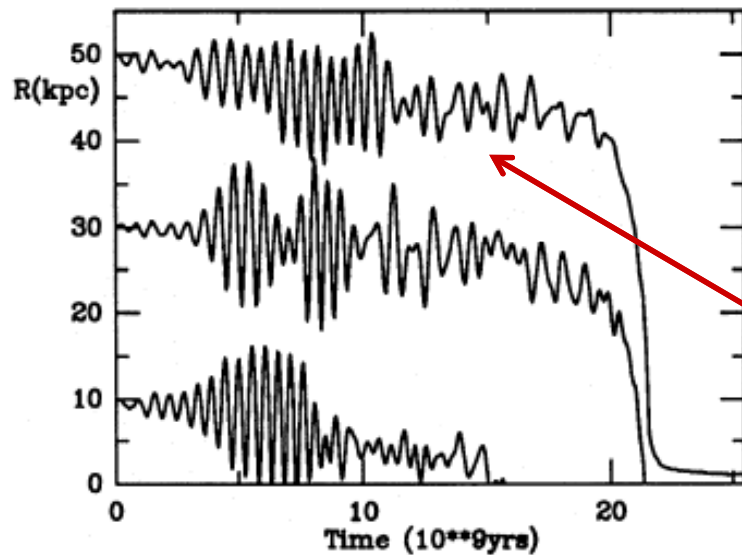
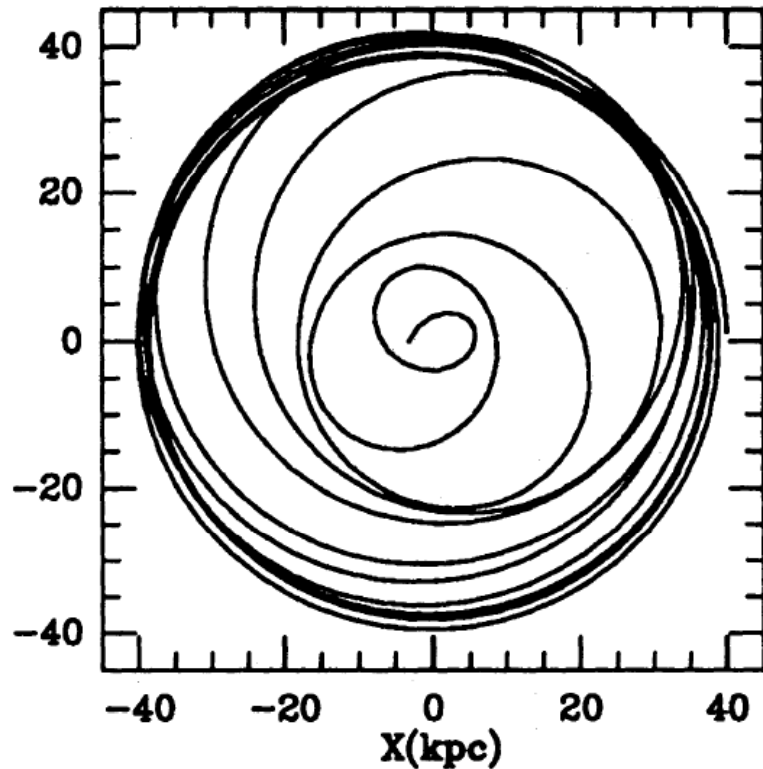


Déformation quadrupolaire



Evolution du quadrupole





La formule de Chandrasekhar
comporte donc de nombreuses
approximations

→ Force **locale**, non globale
Force à distance?

→ Self-gravité?
Réservoir de moment (galaxie fixe)

→ Déformation du compagnon?

→ Seules les simulations donnent
le bon ordre de grandeur

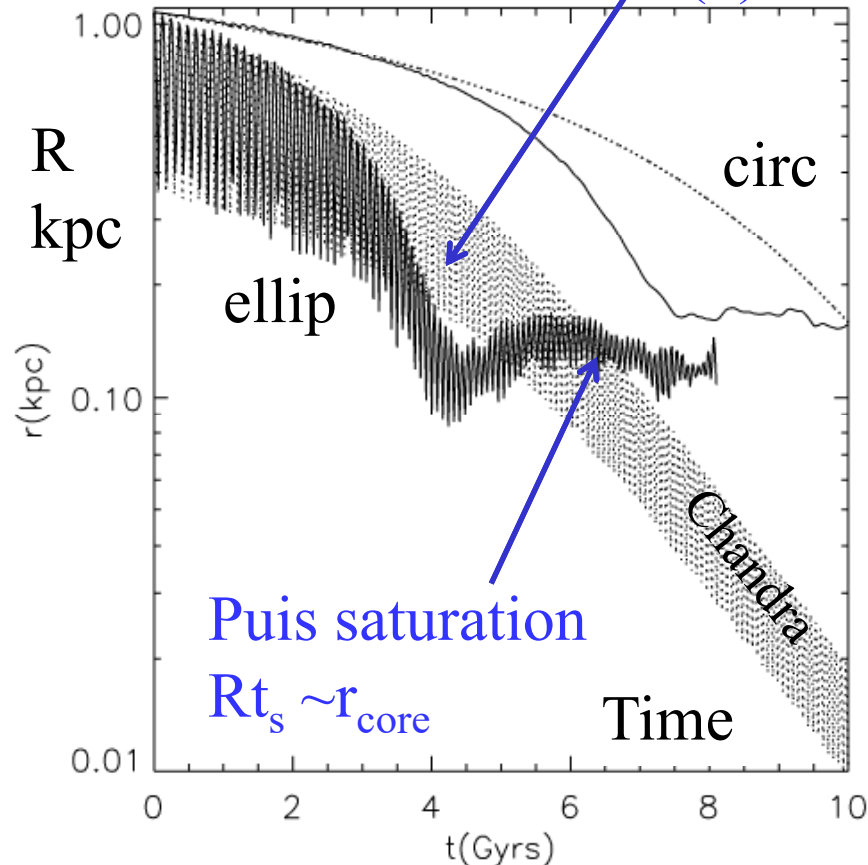
Faible friction à distance

→ chaotique

Validité des calculs de friction

Les codes semi-analytiques utilisent des formules approchées, mais encore très loin de représenter le phénomène

Super-Chandrasekhar dans le cœur,
dû à des résonances? Ou $f(v)$



Friction plus forte dans les
galaxies à **cuspid**
Moins forte s'il y a un trou noir

Destruction du satellite
dépendant de sa densité centrale

Temps de déclin $\propto M^{-0.67}$

et non pas $1/M$

Arca-Sedda et al 2014

$f(v)$ distribution non-maxwellienne
des vitesses \rightarrow moins de friction

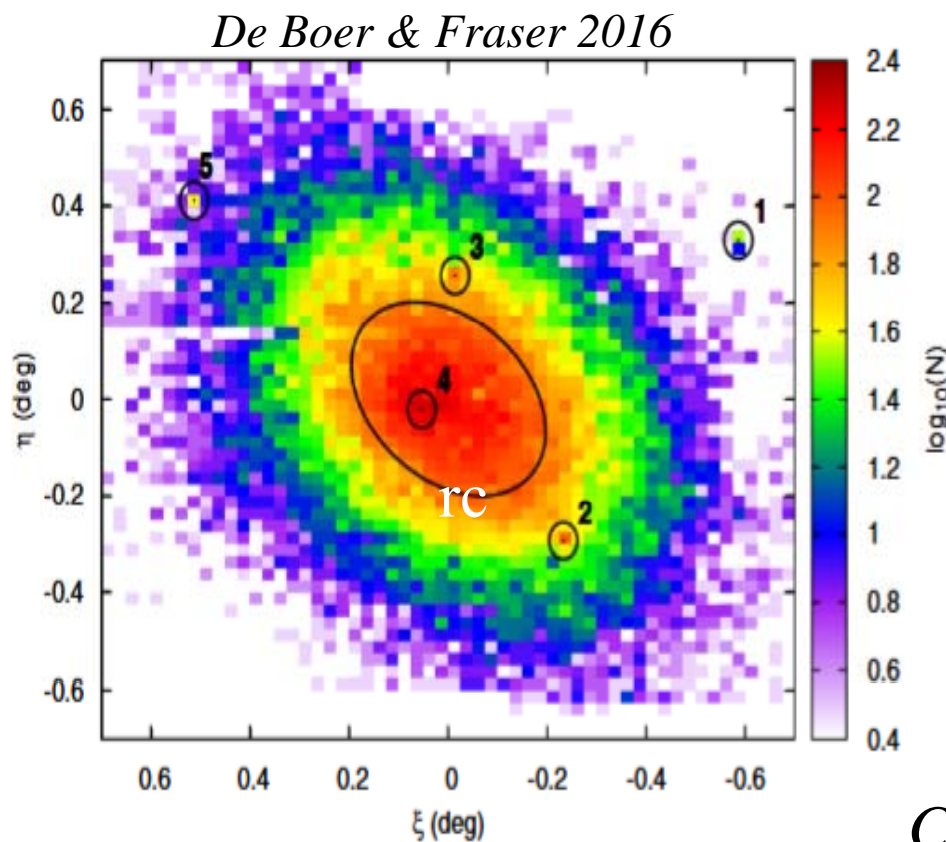
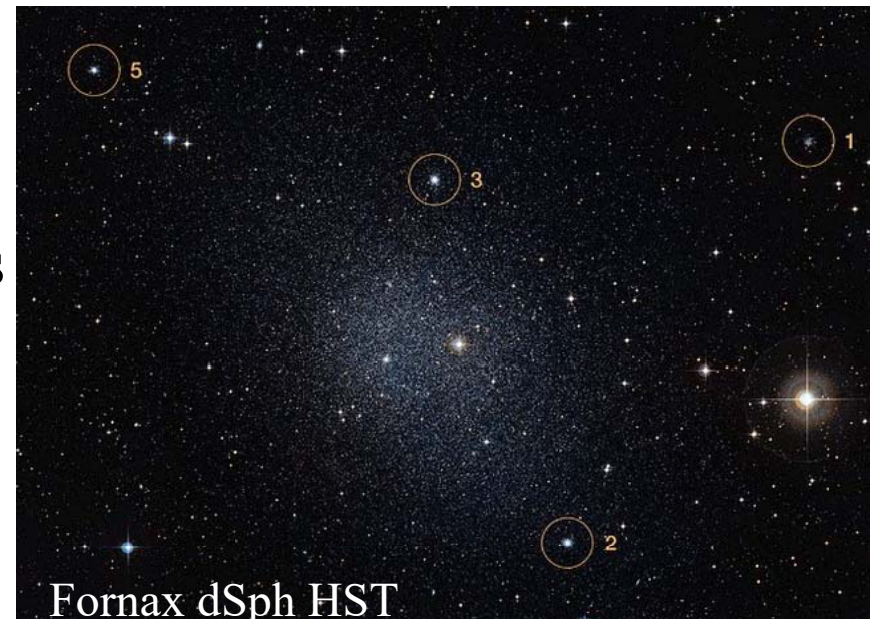
Silva et al 2016

Read et al 2006, Zelnikov et al 2015, Petts et al 2016

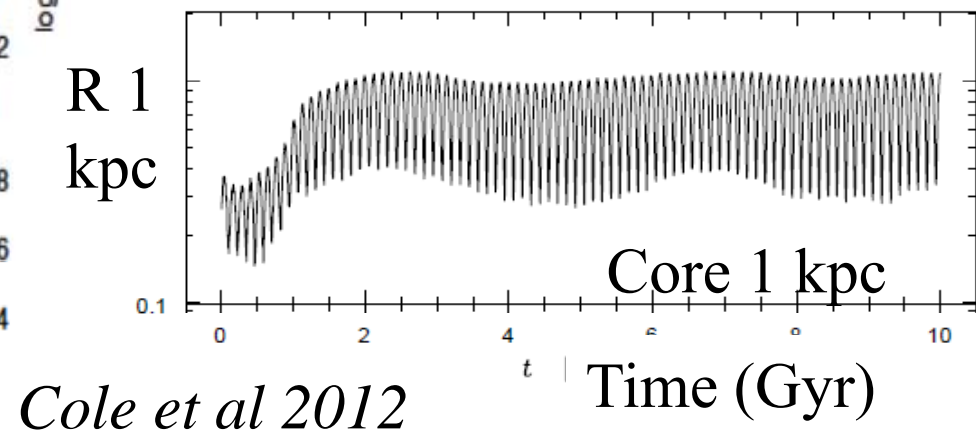
M peut même être soulevé (poussée d'Archimède)

La galaxie dSph Fornax: possède 6 amas globulaires (GC) = **3-20% de la masse**
Unique en son genre!

$D_{MW} = 140 \text{ kpc}$ (pericenter $\sim 120 \text{ kpc}$)



Avec une cuspside, les GC auraient dû arriver au centre en 1-2 Gyr
 → cœur, plus tard mais < 10 Gyr
Aucune dSph n'a de noyau brillant



Conséquences du rôle de la friction

L'efficacité de la friction pourrait distinguer entre les modèles de matière noire

→ Formation des bulbes et sphéroïdes
Vitesse des barres

→ Taux de fusions de galaxies
Formation hiérarchique ou accrétion?

→ Asymétries ($m=1$) et compagnons

→ Les groupes compacts de Hickson



Formation des bulbes



Fusions majeures ou un grand nombre de fusions mineures forment un sphéroïde massif → bulbe classique



Evolution séculaire :

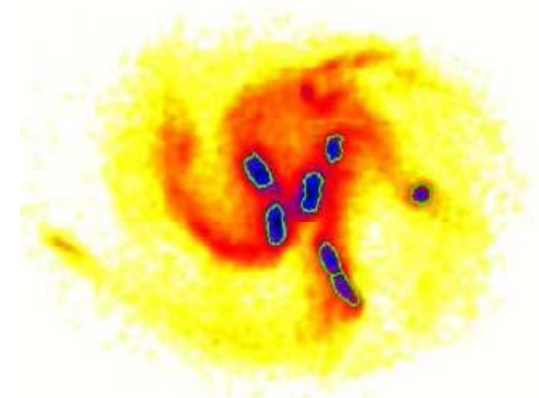
barre et résonance verticale élèvent les étoiles au centre

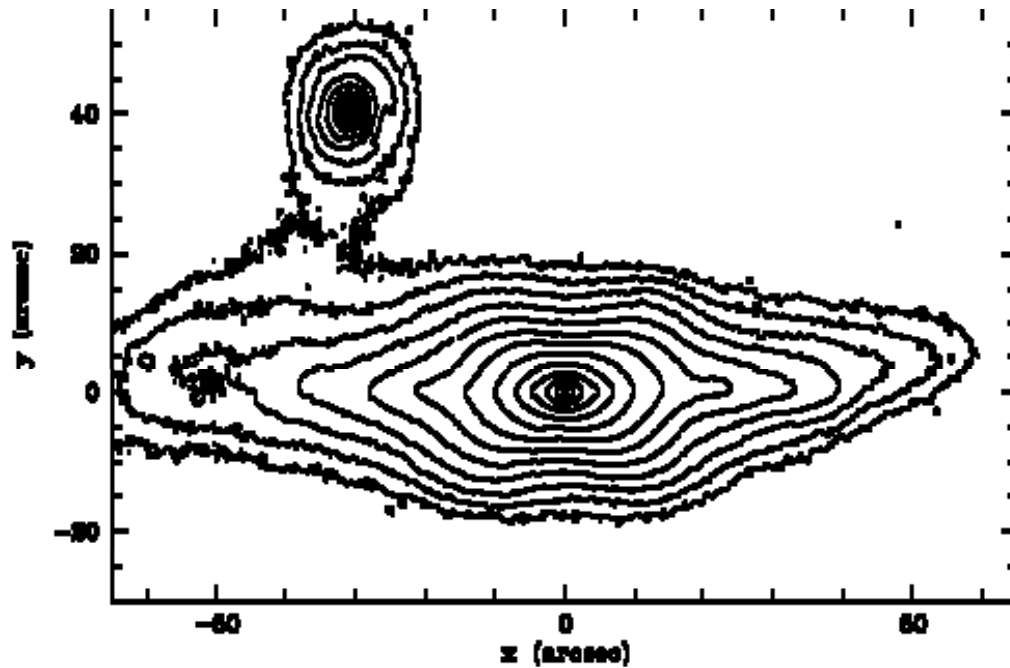
→ **pseudo-bulbe:** intermédiaire entre sphéroïde et disque

Plus fréquent pour les galaxies de type « late »

Les galaxies clumpy à grand z peuvent aussi former un bulbe, **par friction dynamique**

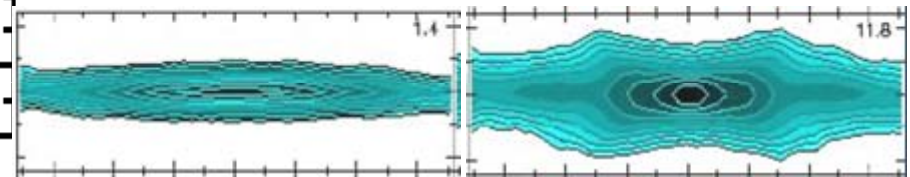
→ Solution : les clumps doivent être détruits avant d'atteindre le centre?





Bulbe en boîte/ cacahuète

Résonance verticale avec barre
 $\Omega - v_z/2 = \Omega_b$



Plusieurs résonances/cacahuètes
 selon la vitesse Ω_b (*Valpuesta et al*)

→ Index de Sersic $\mu \sim r^{1/n}$,
 $n = 1-2$ (disques: $n=1$, E: $n > 4$)



→ Aplatissement, forme cacahuète,
 couleur bleue

→ Cinématique: plus de rotation
 que les bulbes classiques

Fréquence des galaxies sans bulbe

Localement, 2/3 des spirales brillantes n'ont pas ou peu de bulbe

Kormendy & Fisher 2008, Weinzirl et al 2009, Karachentseva 2016

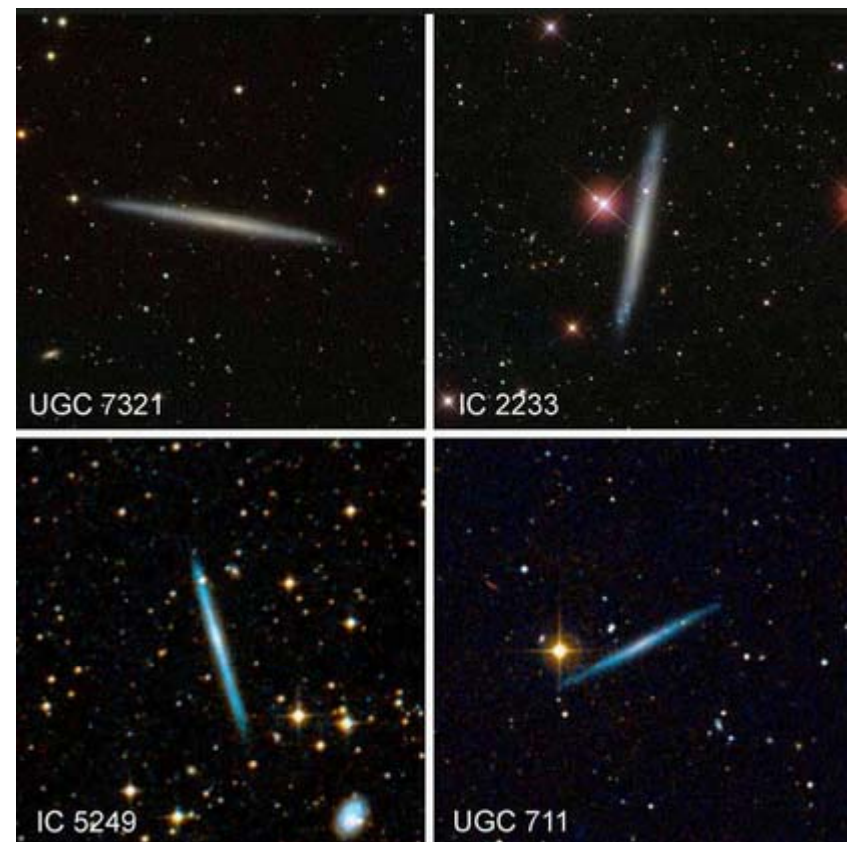
Les autres ont un mélange de bulbe classique et pseudo-bulbe

Fréquence des galaxies très minces,
vues par la tranche (*Kautsch et al 2006*)

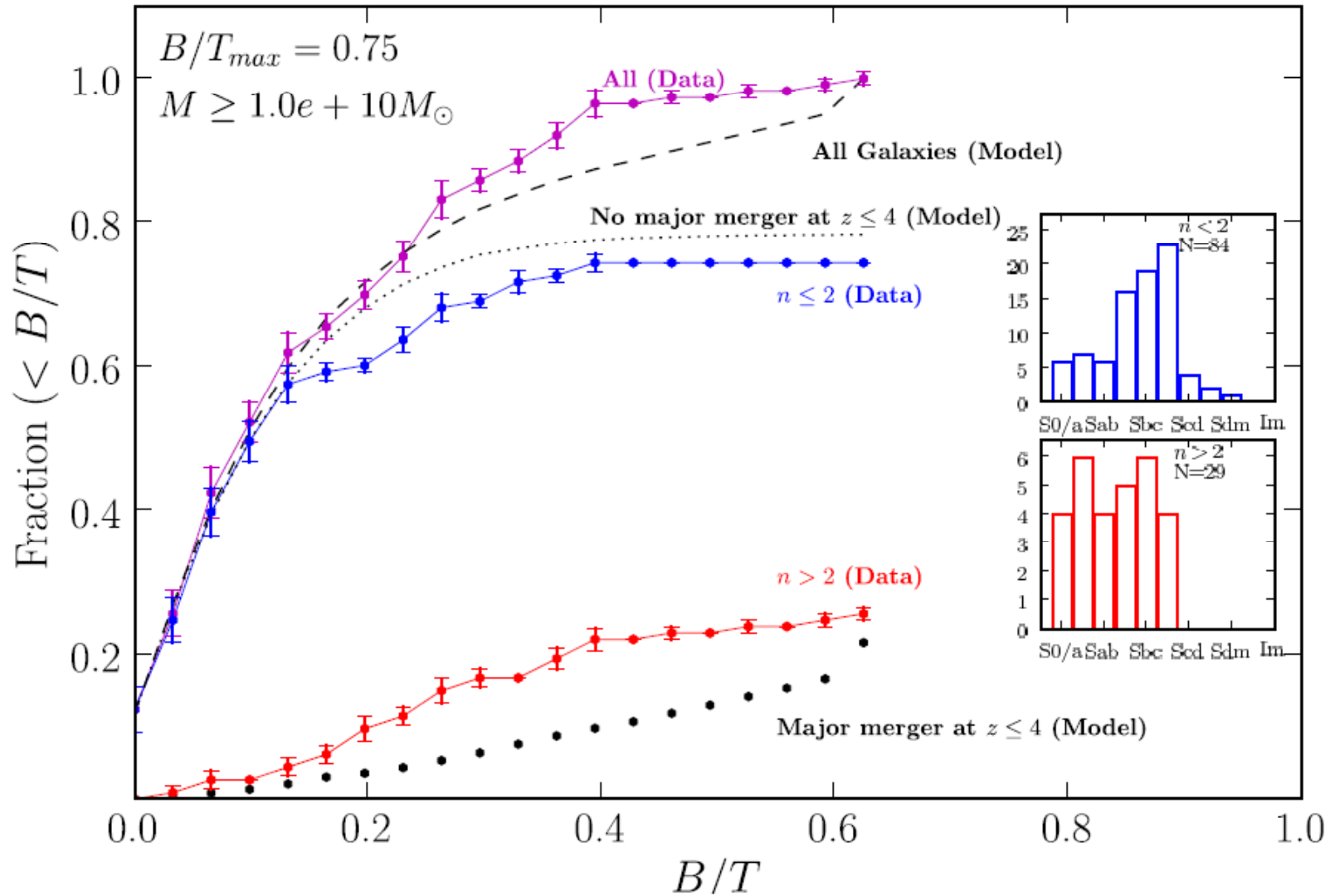
1/3 des galaxies n'ont aucun bulbe

SDSS : 20% des spirales brillantes sans bulbe jusqu'à $z=0.03$ (*Barazza et al 2008*)

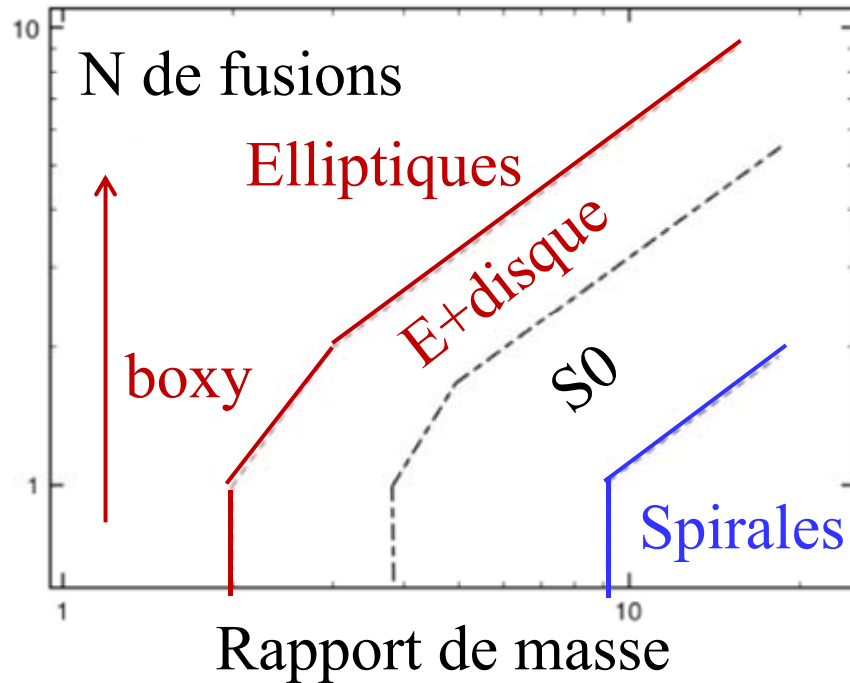
Est-ce compatible avec le scénario hiérarchique?



Fusions de galaxies et bulbes



Weinzirl et al 2009



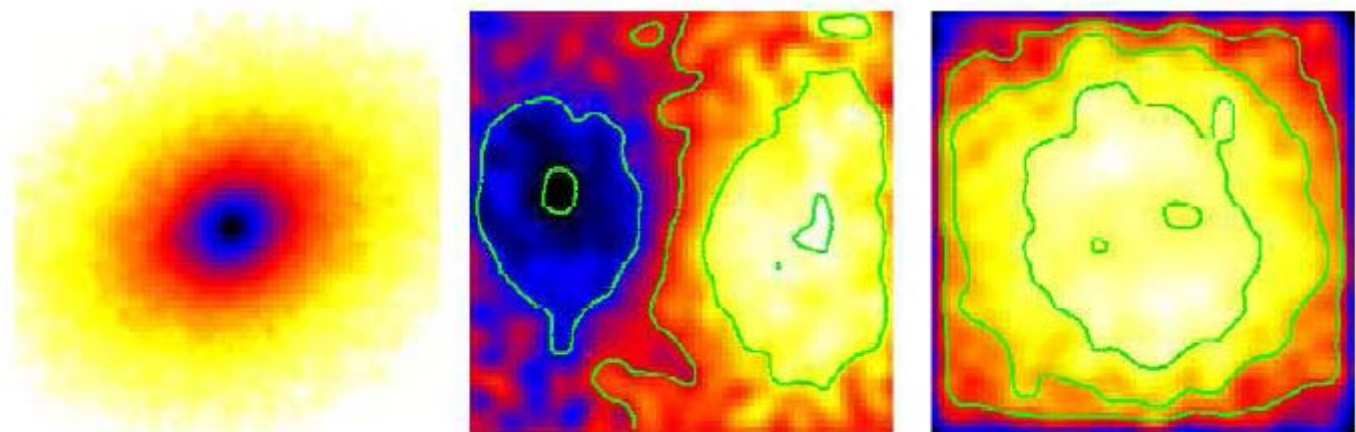
Multiple fusions mineures

L'essentiel n'est pas le rapport de masse, mais la masse totale accrétée

Si 30-40% de la masse initiale
 → Formation d'une elliptique

50 fusions
 de rapport 50:1

Plus fréquentes
 que 1:1



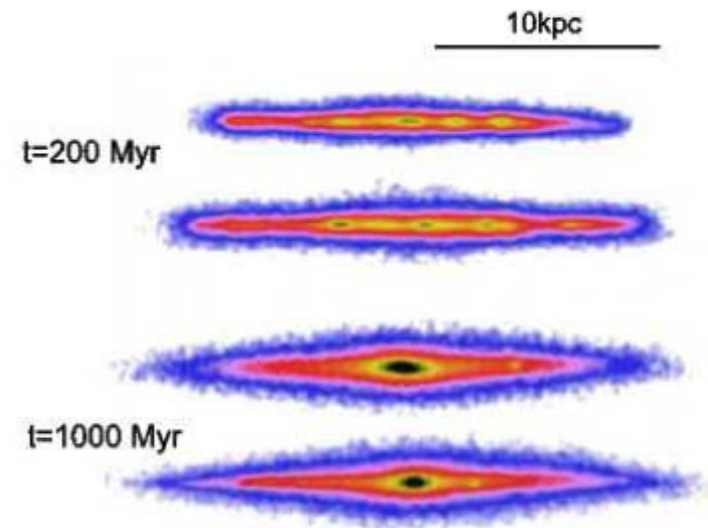
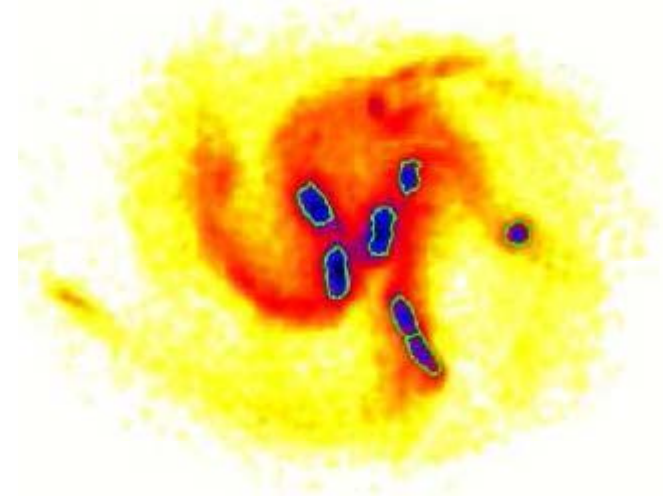
Formation dans les galaxies à grumeaux (clumpy)



Formation rapide d'un disque exponentiel
et bulbe, par friction dynamique
Noguchi 1999, Bournaud et al 2007

Galaxies « chaîne », par la tranche

Evolution plus rapide qu'avec
spiraux/barres?



Formation avec MOND (moins de friction)

Les fusions sont moins fréquentes

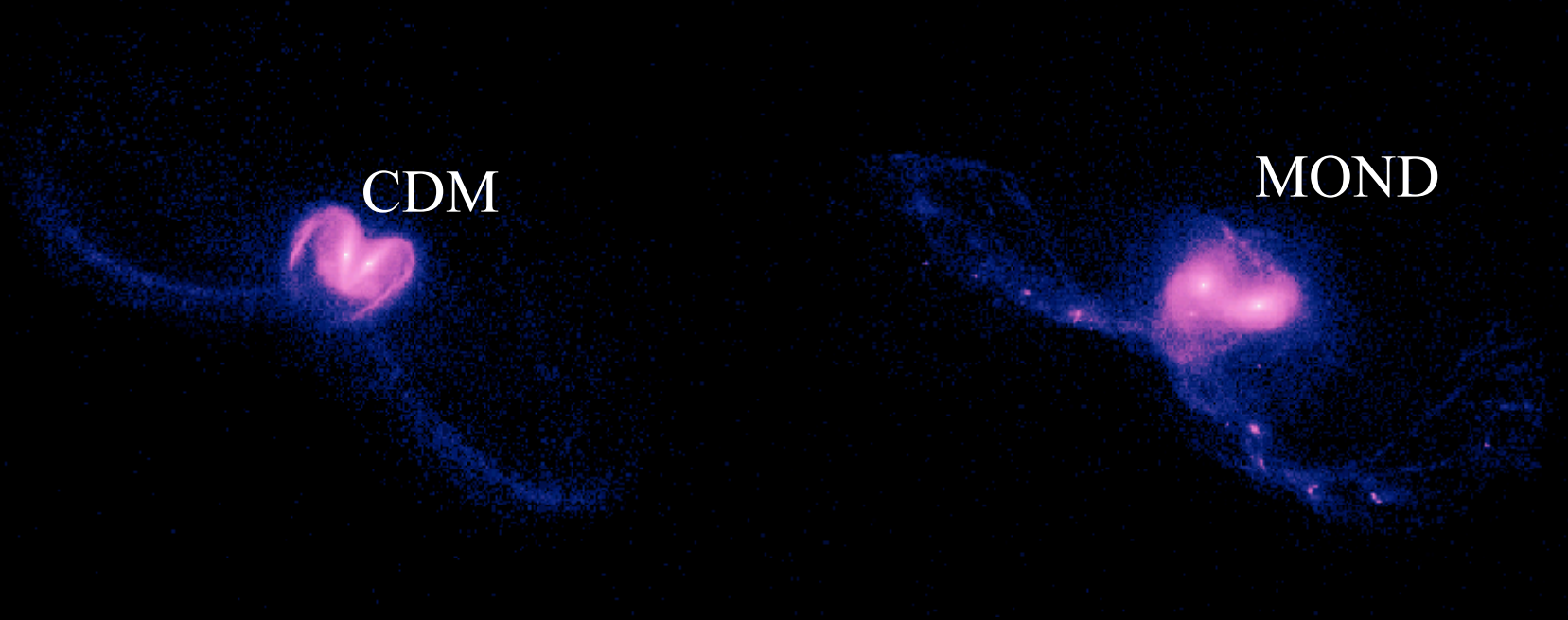
La friction dynamique est moins efficace en l'absence de halo noir

Deux galaxies liées orbitent durant des Gyrs, avant de perdre leur énergie orbitale et de fusionner



Interactions de galaxies: Les Antennes

La friction dynamique est bien plus faible avec MOND: les fusions de galaxies durent plus longtemps



Même résultat pour les galaxies elliptiques ne contenant que des étoiles (*Nipoti et al 2007*)

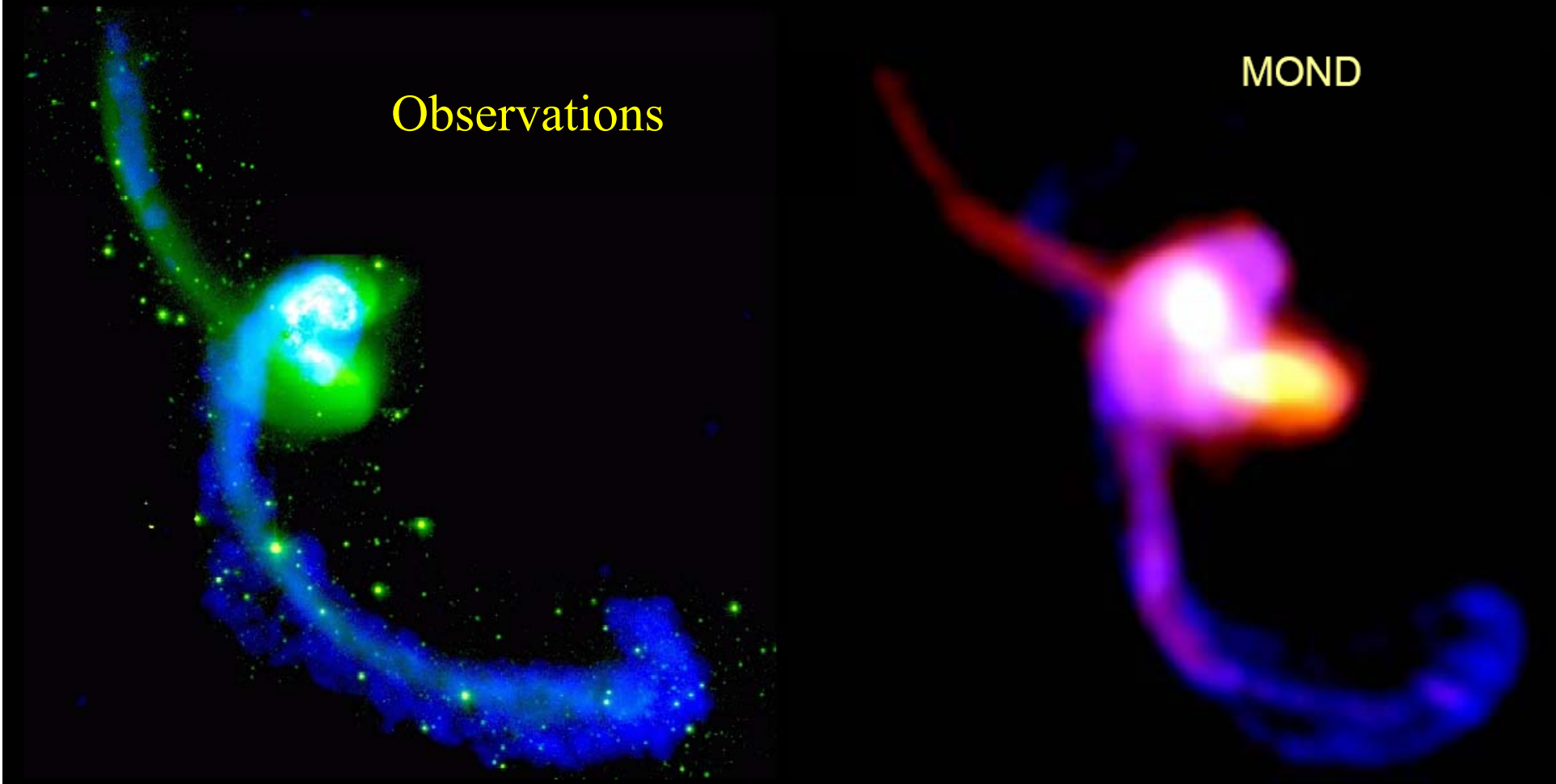
Simulations des Antennae

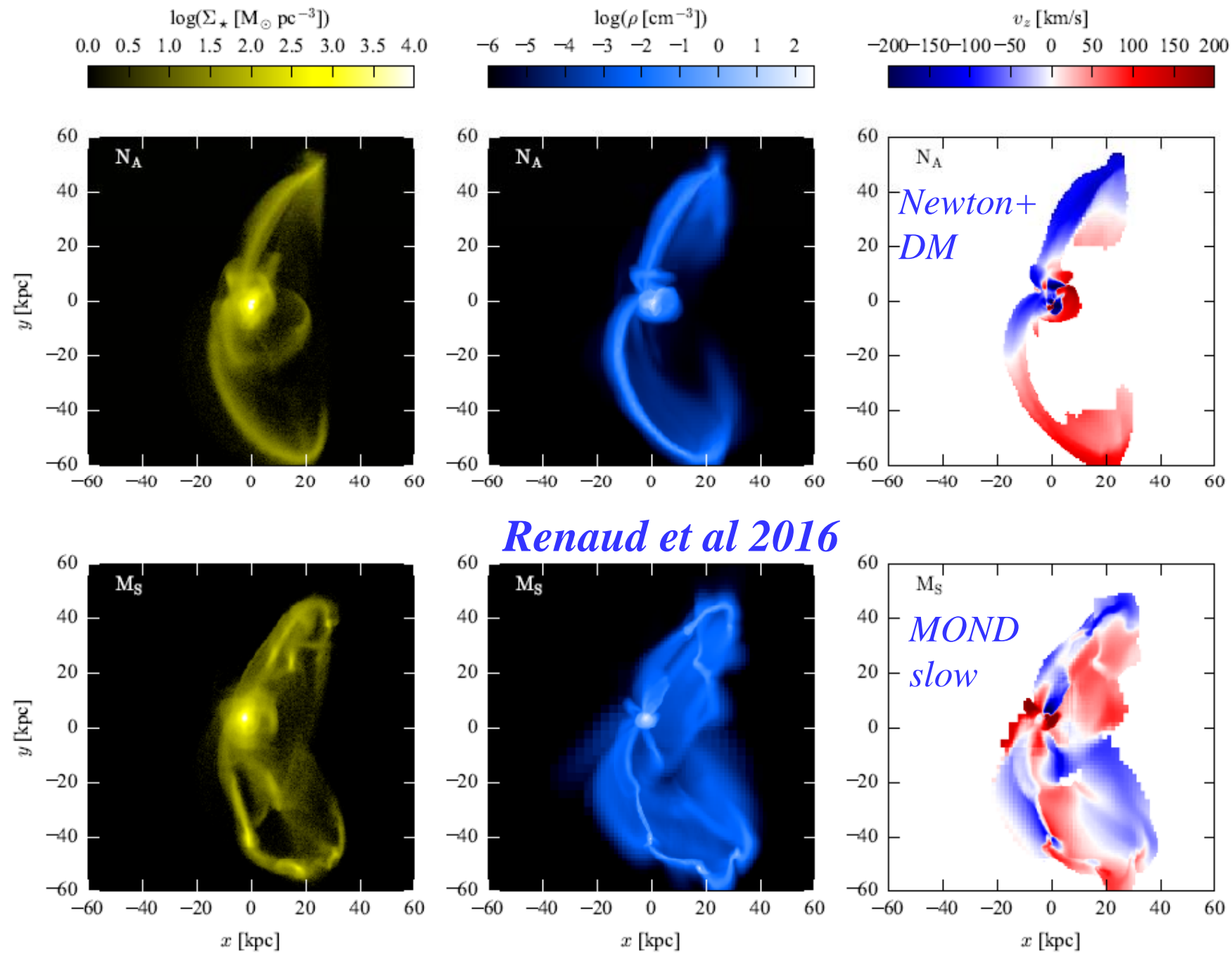
Dégénérescence: starburst au péricentre

Observations

MOND

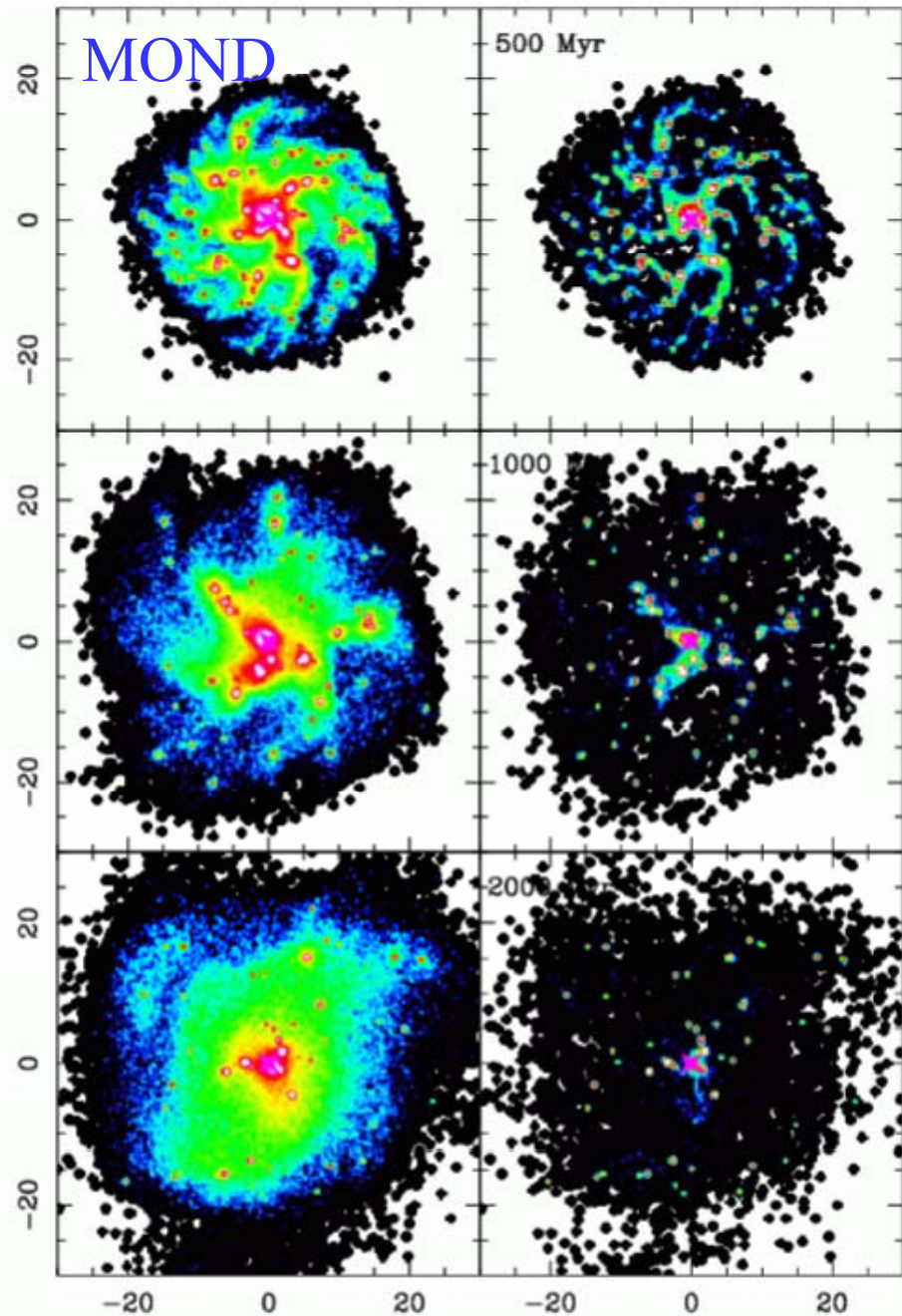
Les queues de marée sont plus longues au dernier passage





All baryons

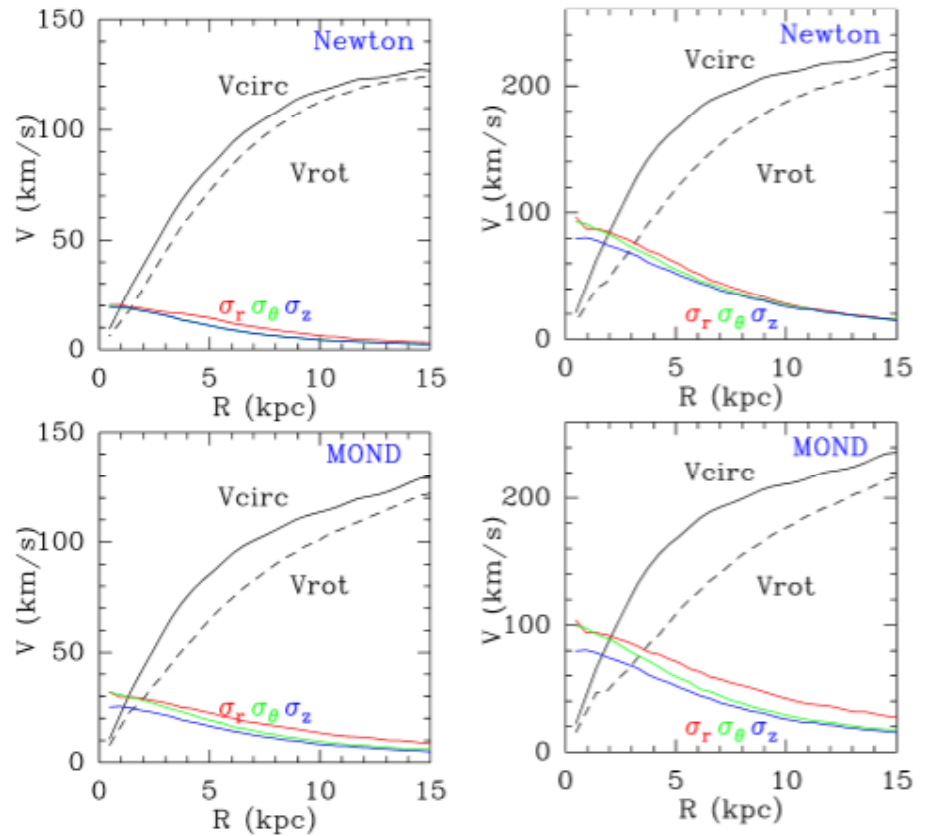
gas only



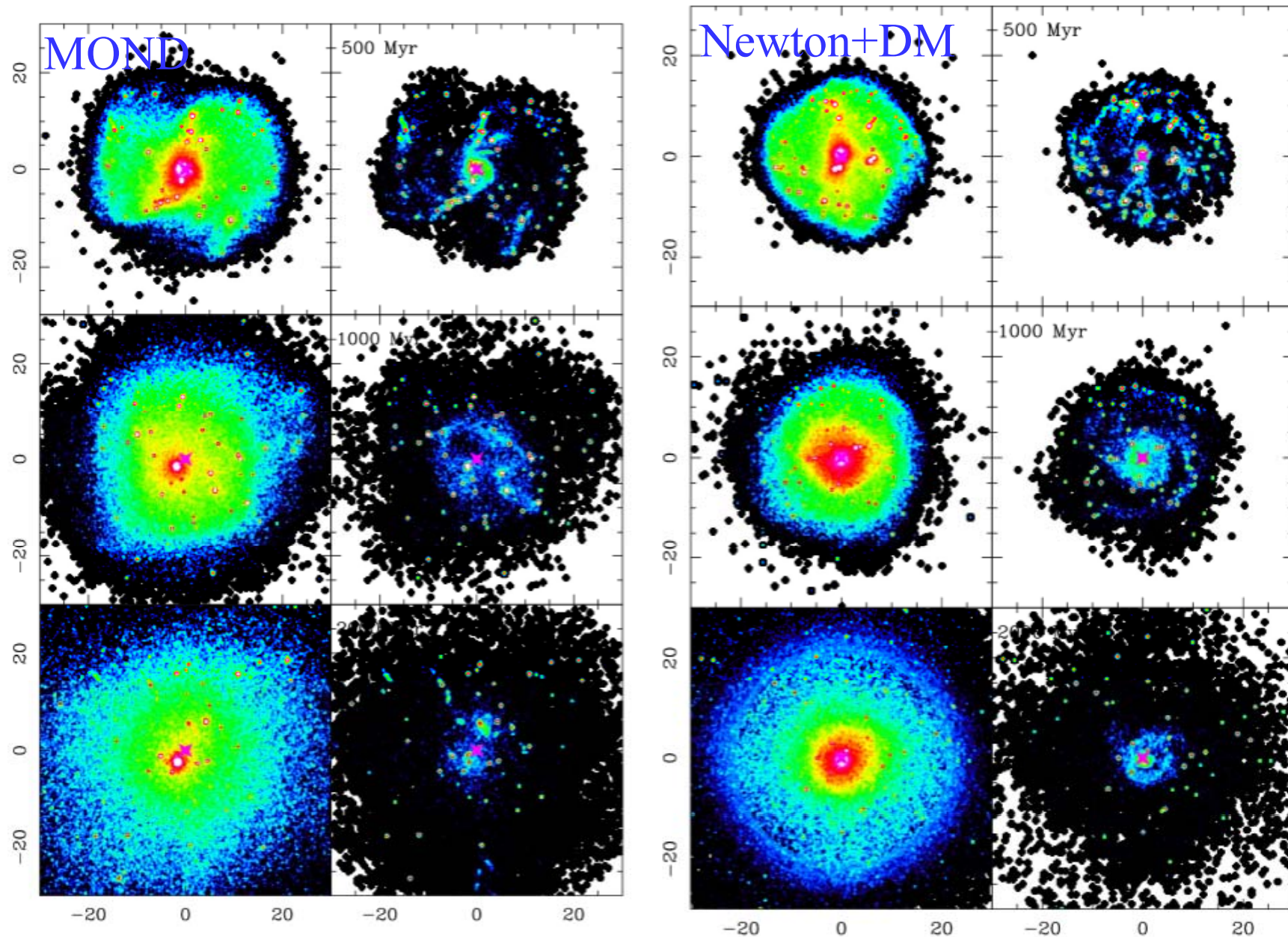
Galaxies clumpy naines dans MOND

Giant

Dwarf

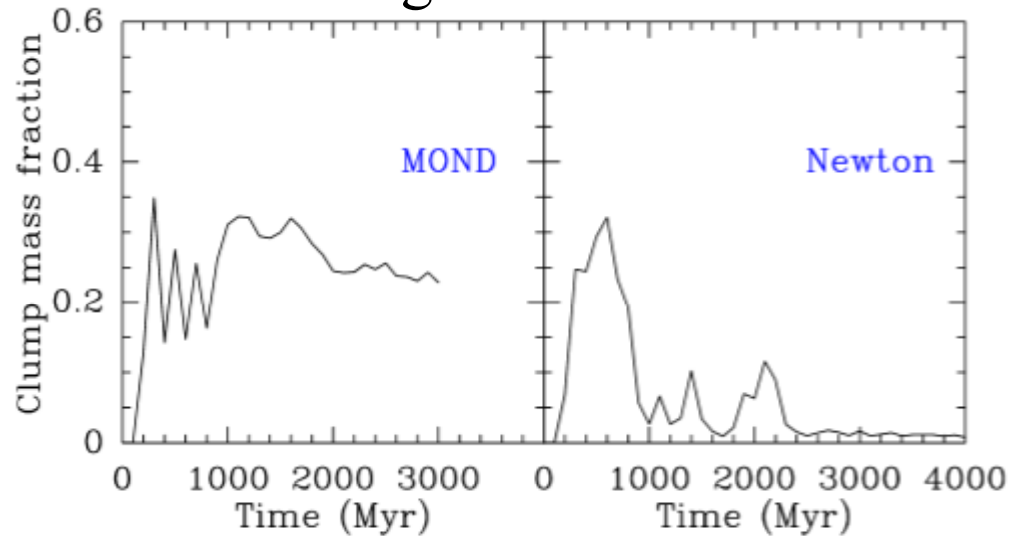


Galaxie géante avec MOND et Newton+DM



Fraction de masse dans les clumps

Galaxie géante

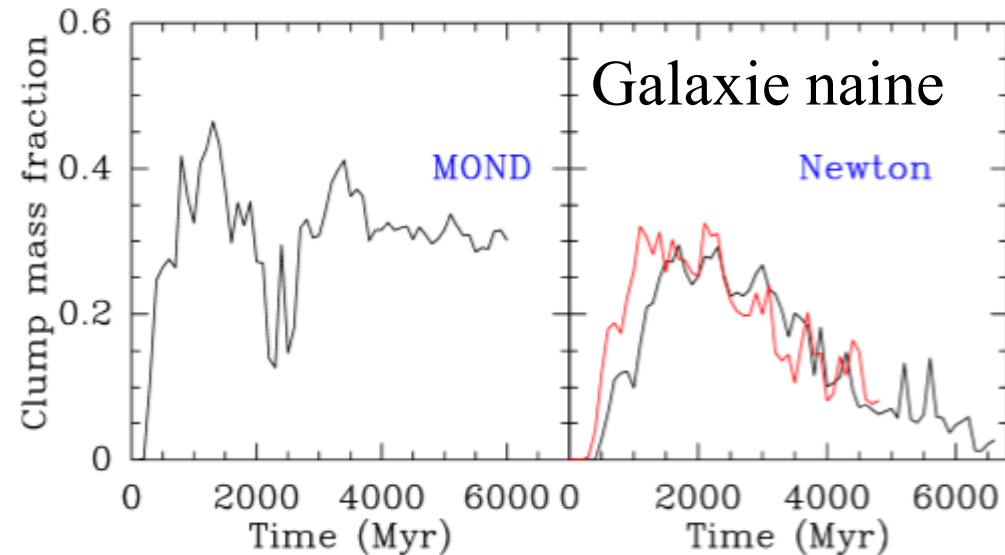


Newton+DM

Les clumps tombent au centre et forment le bulbe par friction dynamique

MOND: les clumps ne vont pas au centre: ils sont détruits par SF feedback et le cisaillement

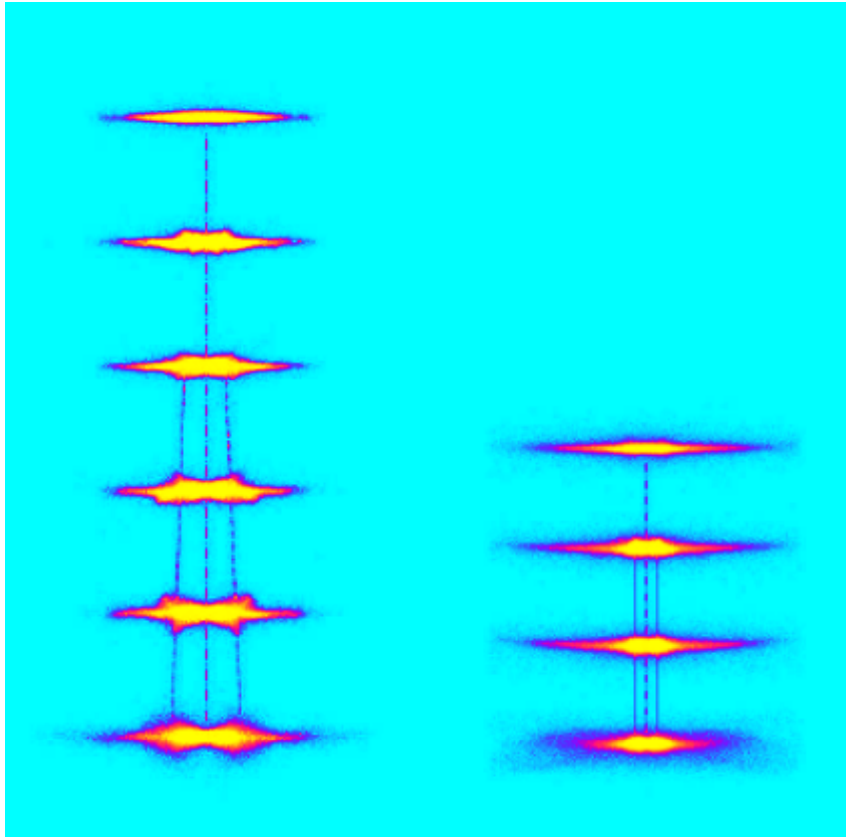
En rouge, 513^3 , avec 8 fois le nombre de particules



Friction et vitesse Ω_b de la barre

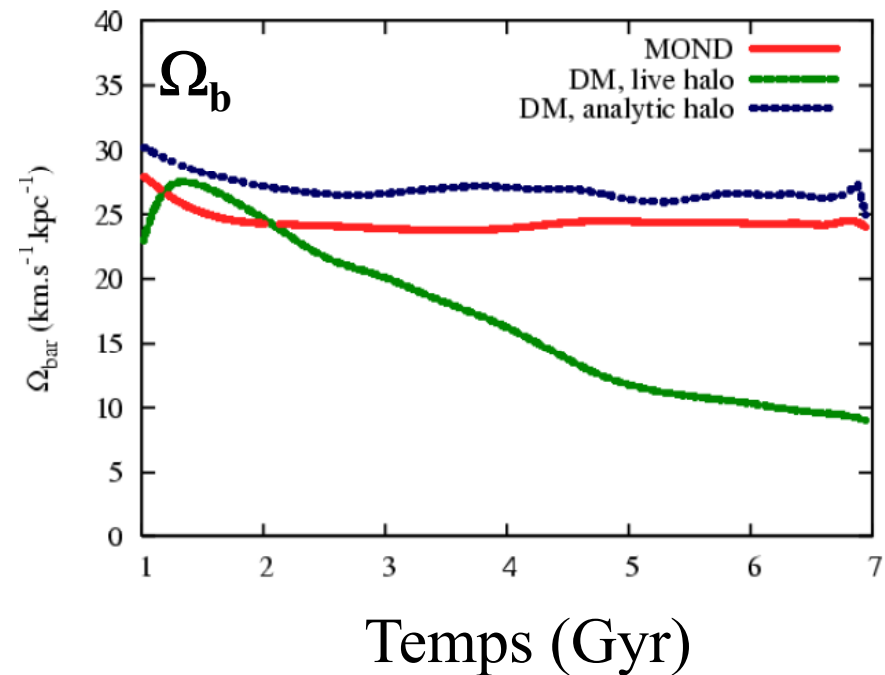
Avec DM

MOND

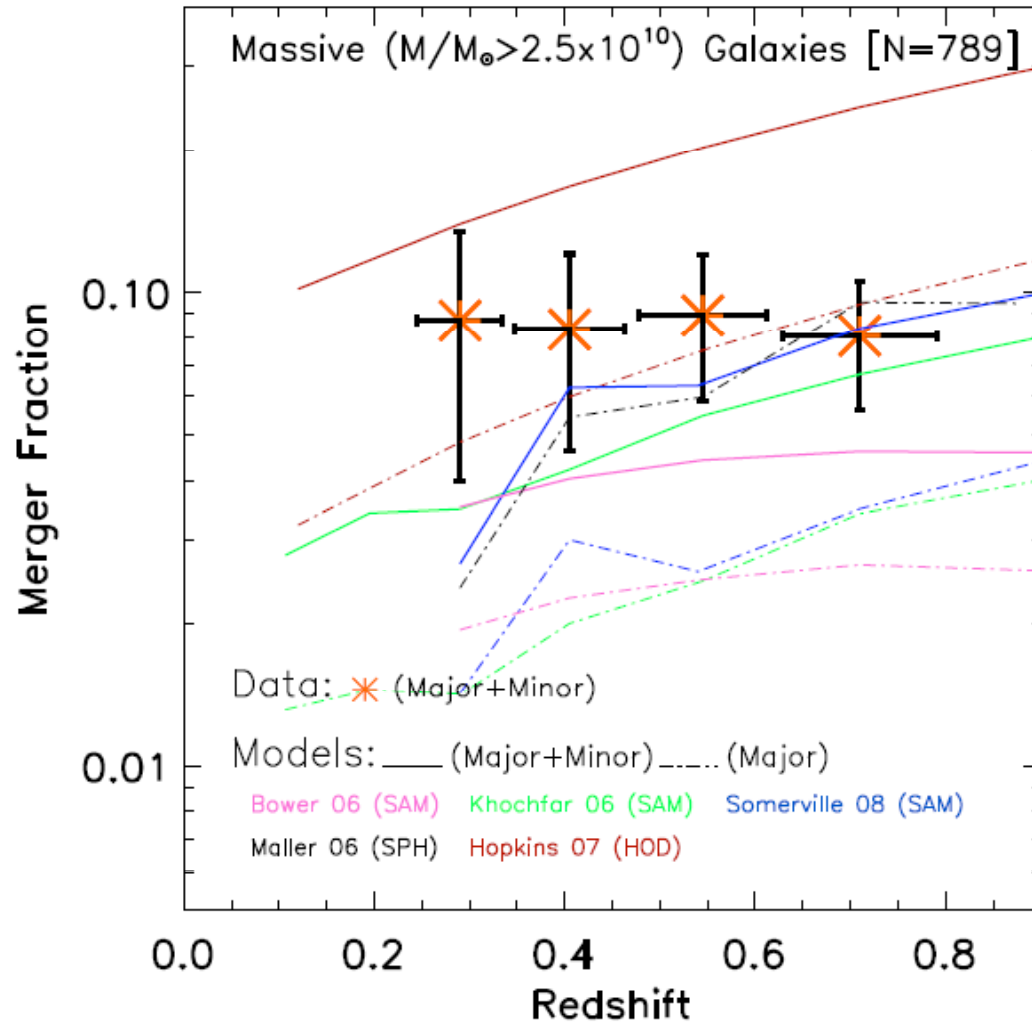


La friction dynamique des halos noirs freine la barre qui tourne comme un corps solide

→ résonances verticales différentes



Taux de fusions de galaxies: GEMS



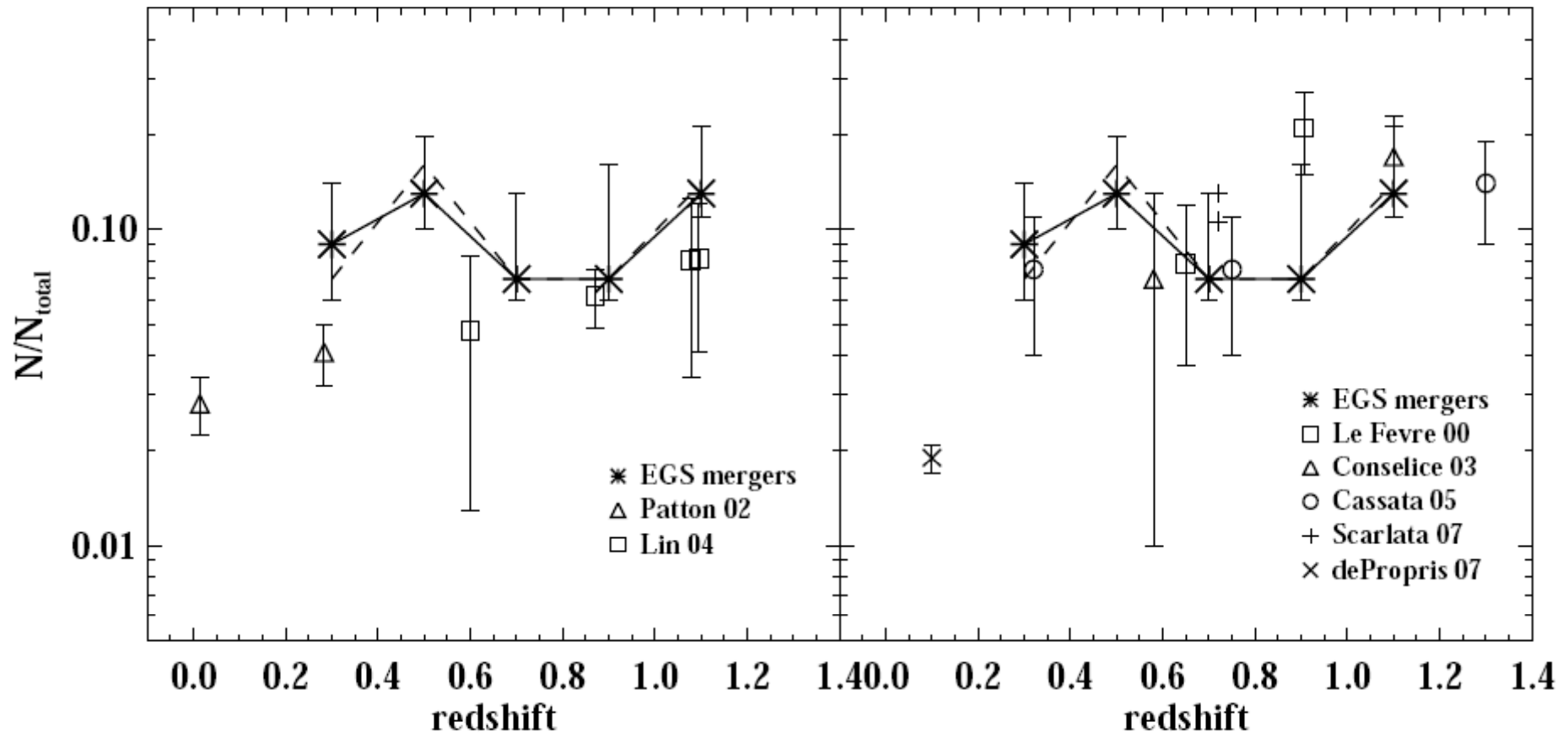
Moins de 10% de la SF
dans les galaxies à $z=0.6$
est dûe aux interactions
(Robaina et al 2009)

Les starbursts à $z=2$
~ 10% de la SF
Rodighiero et al 2011
Herschel-GOODS

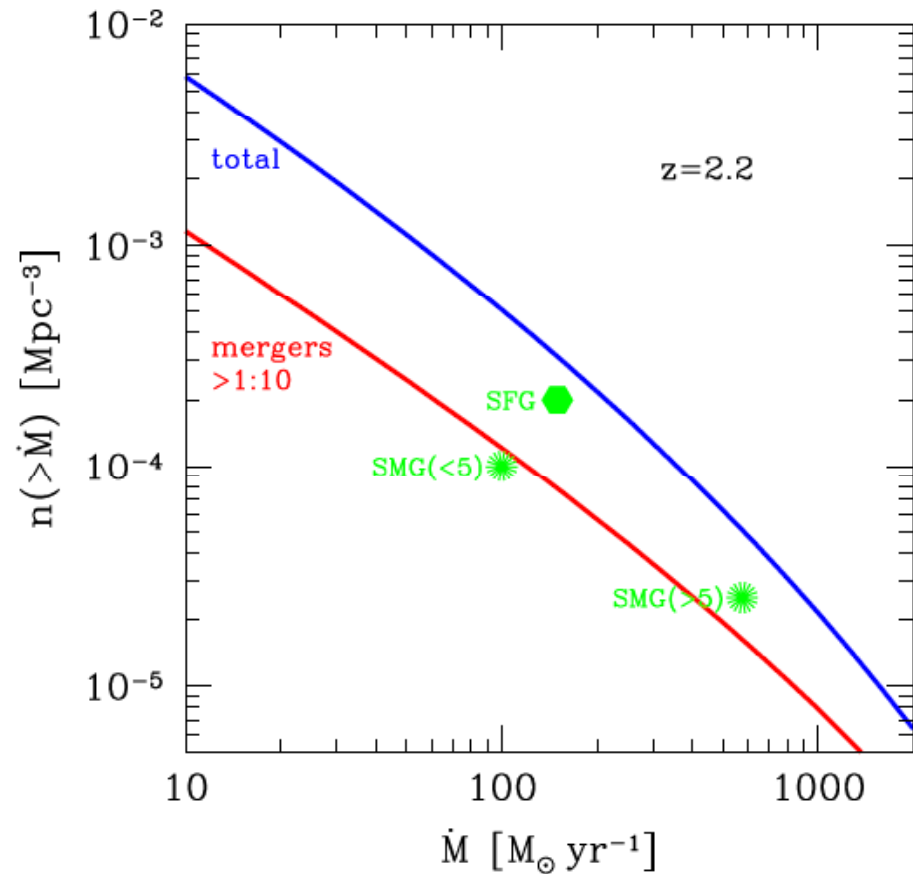
Jogee et al 2009

Taux de fusions de galaxies : EGS

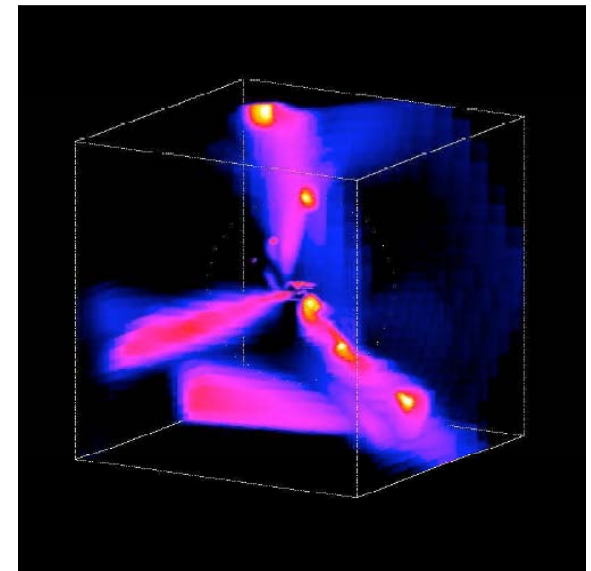
Le taux de SF décroît d'un facteur 10 entre $z=1$ et 0
mais cela vient de la fraction de gaz, pas de la chute du nombre
de fusions *Lotz et al 2008*



Assemblage de la masse: accrétion ou fusions



Simulations cosmologiques:
La majorité de la formation
d'étoiles est due à l'accrétion
de gaz *Dekel et al 2009*

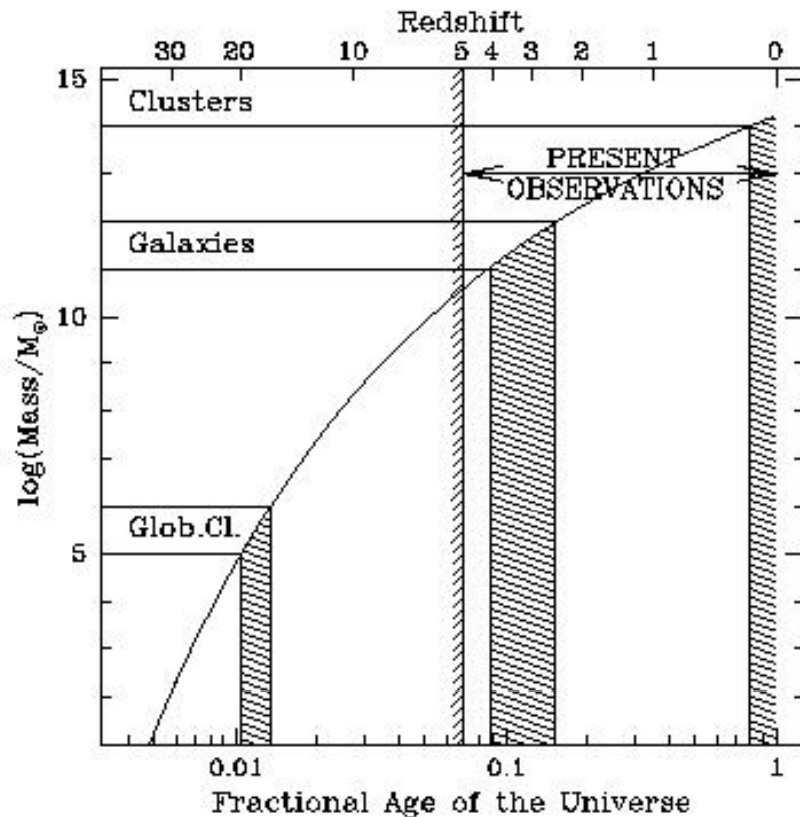


La fraction de masse acquise par accrétion = 77% (fusions = 23%)
Jusqu'à $z=0$ (*Lhuillier et al 2011*)

Formation hiérarchique: matière noire

Dans le modèle le plus adapté aujourd'hui aux observations

CDM (cold dark matter), les premières structures à se former sont les plus petites, puis par fusion se forment les plus grandes (bottom-up)



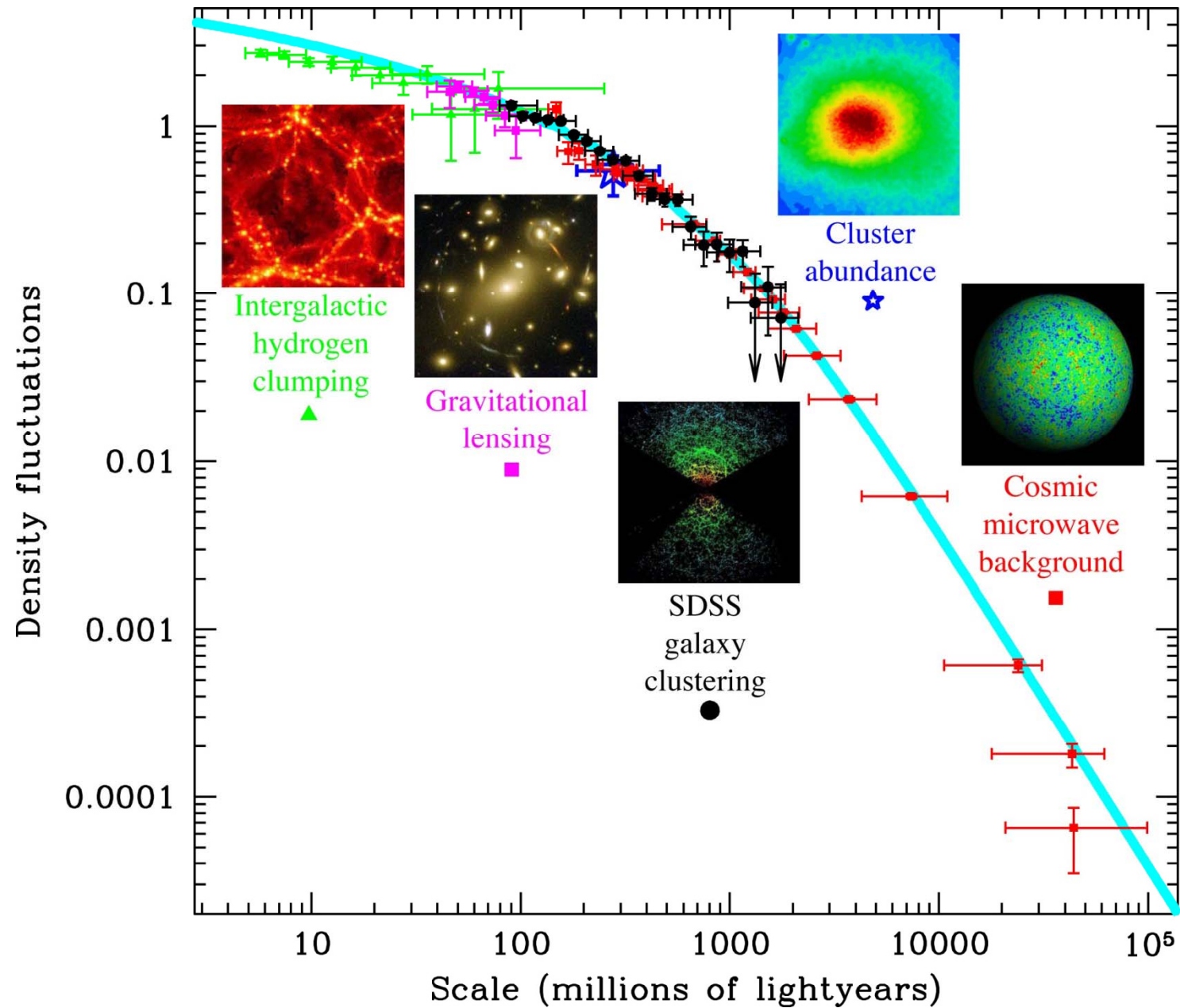
$|\delta k|^2 = P(k) \sim k^n$, avec $n=0.91$
aux grandes échelles
 k^{-3} aux petites échelles
tilt quand $\rho_r \sim \rho_m$
à l'échelle de l'horizon

$$\delta M/M \sim M^{-1/2 - n/6}$$

quand $n > -3$, formation
hiérarchique ($\delta M/M \downarrow$)

Abel & Haiman 2000

Fluctuations de densité



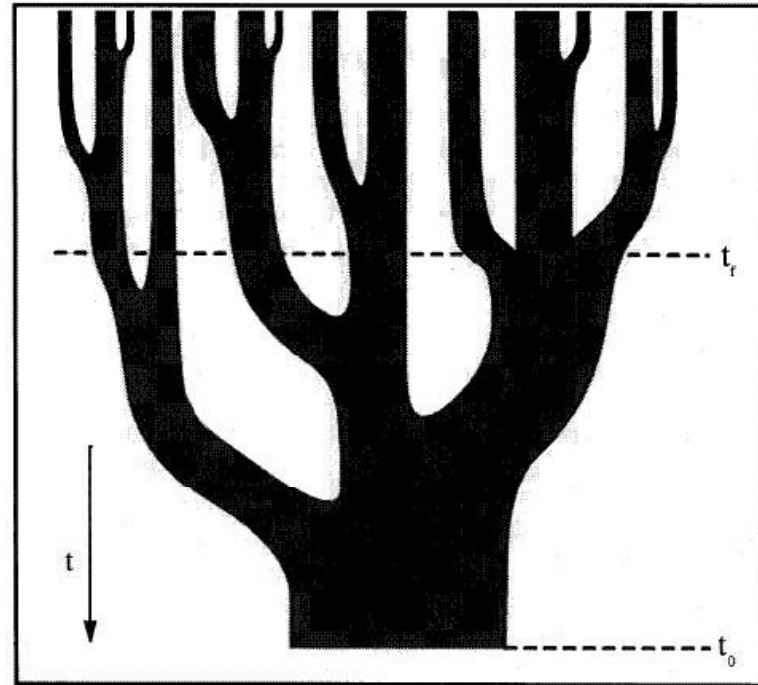
Tegmark
et al 2004

Formation hiérarchique des galaxies

Les plus petites structures se forment en premier, de la taille de galaxies naines ou amas globulaires

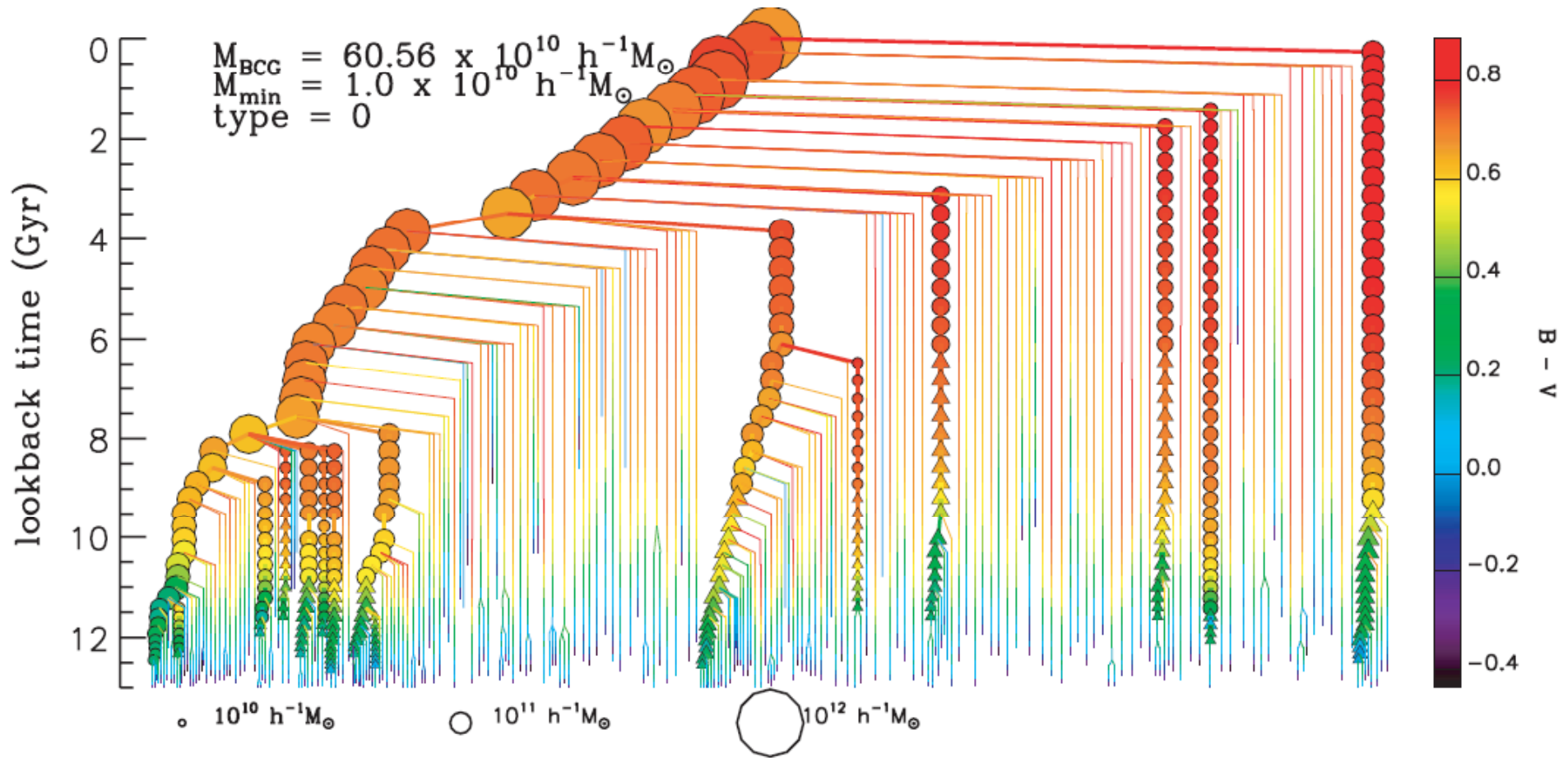
Par **fusion successive et accrétion** les systèmes de plus en plus massifs se forment

Ils sont de moins en moins denses
 $M \propto R^2$ et $\rho \propto 1/R$



Cet arbre de fusion concerne surtout les halos de matière noire!

Formation de galaxies centrales d'amas



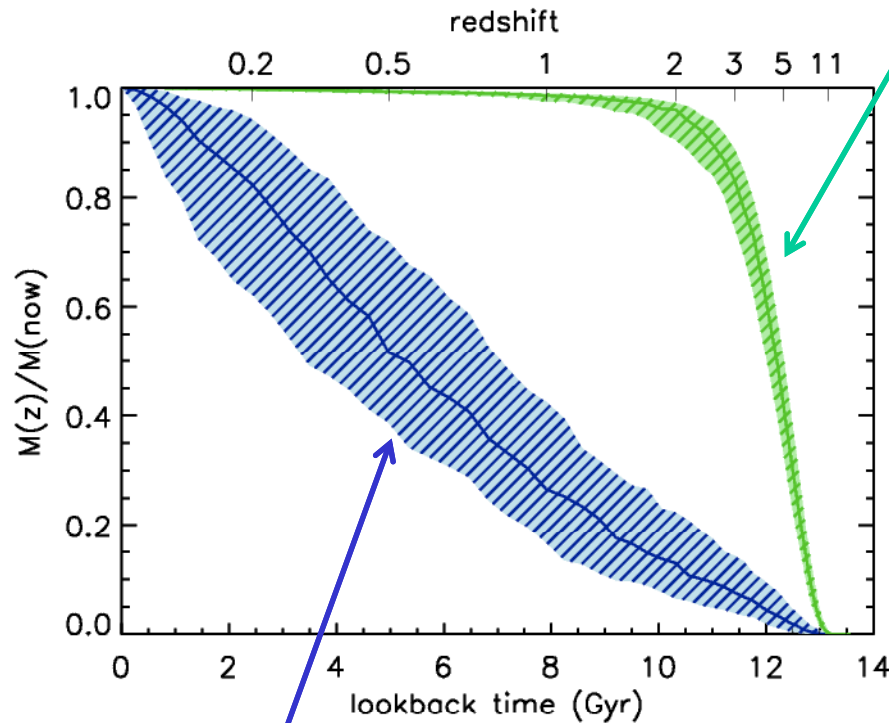
De Lucia & Blaizot 2007

Croissance de la masse et SF

L'hypothèse monolithique est fautive en général: les étoiles sont vieilles et se forment très vite, mais pas la galaxie

Difficile de connaître les ancêtres d'une galaxie

Formation des étoiles



Assemblée de la masse

Remonter dans le catalogue:
arbre de fusion pour trouver
les liens hiérarchiques
entre les possibles
précurseurs

Asymétries et décentrement

Asymétries excentriques observées dans la distribution de lumière, et le gaz HI à 21cm
→ Plus de la moitié des galaxies

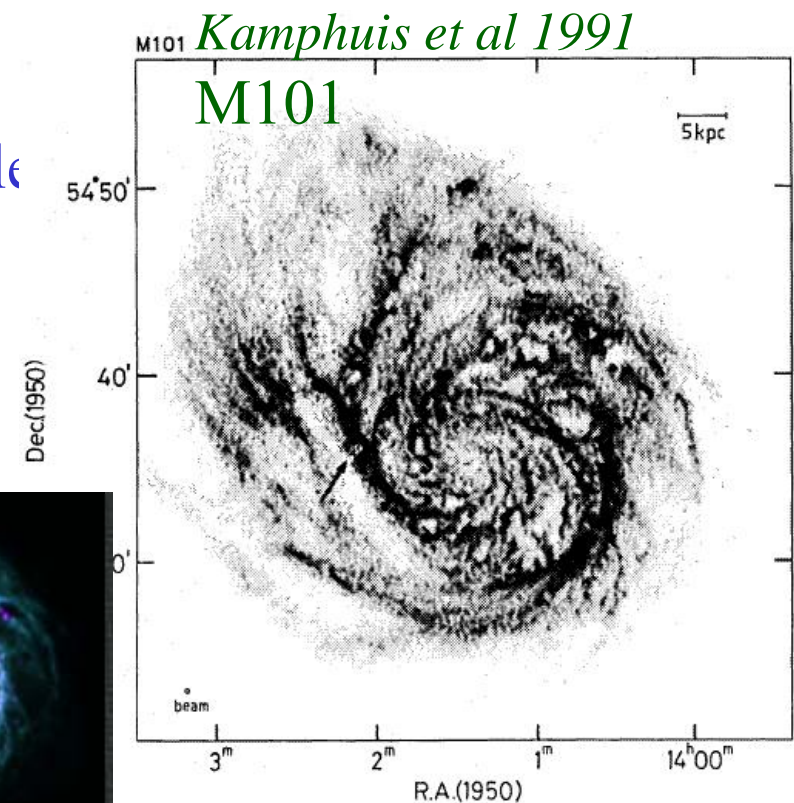
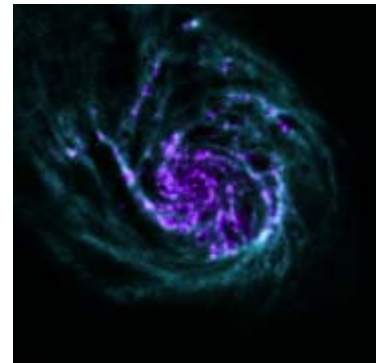
Richter & Sancisi (1994)

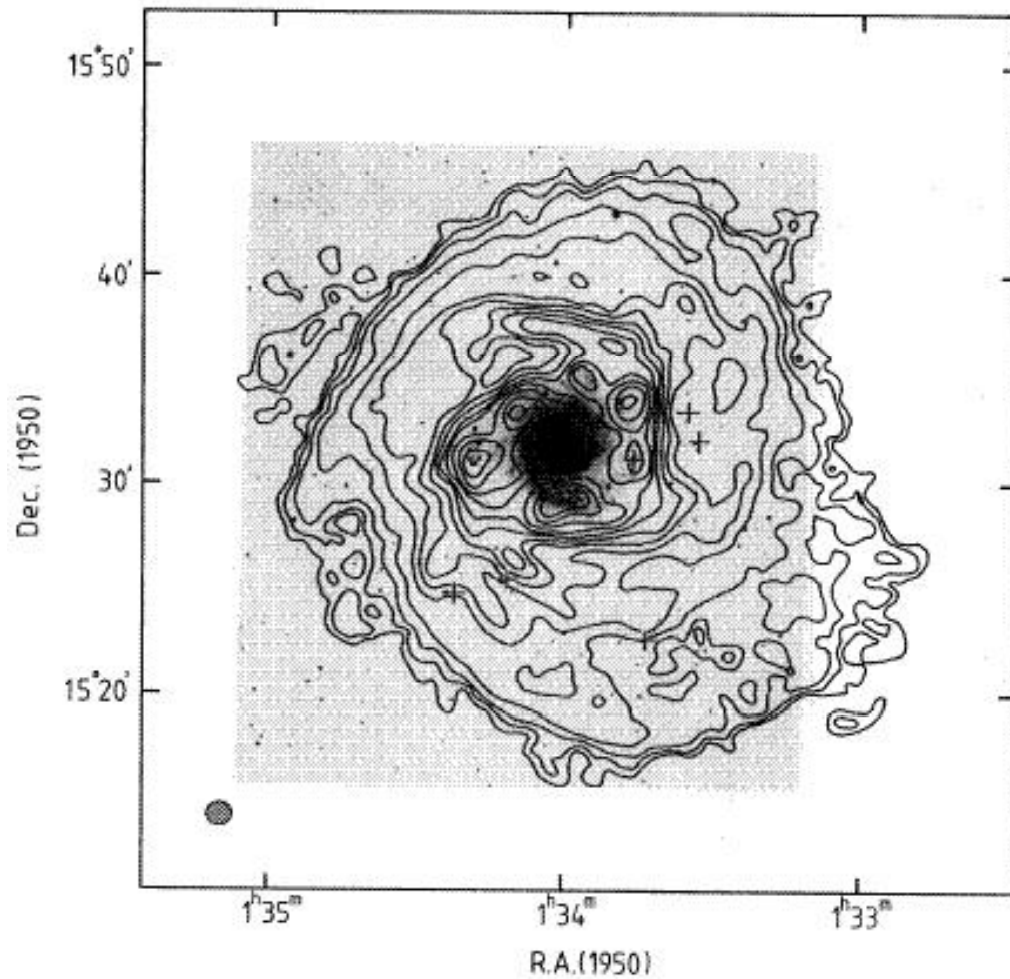


Exemples de M101, NGC 628.. Parfois un compagnon, la plupart du temps non visible

les orbites rétrogrades favorisent $m=1$
(Zhang & Hohl 1978, Palmer & Papaloizou 1990)

Ces instabilités loin du centre renseignent **sur la matière noire**



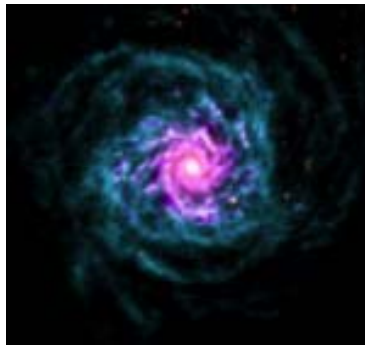


NGC 628
(Kamphuis et al 1992)

Contours = HI à 21cm

Grande extension de gaz
 autour de la galaxie
 optique

Spirales et fragmentation
 loin de la zone optique
 Asymétrie, onde $m=1$



Mécanismes possibles

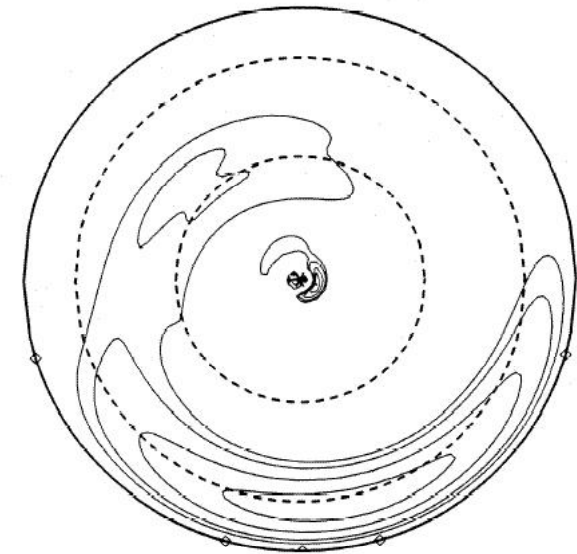
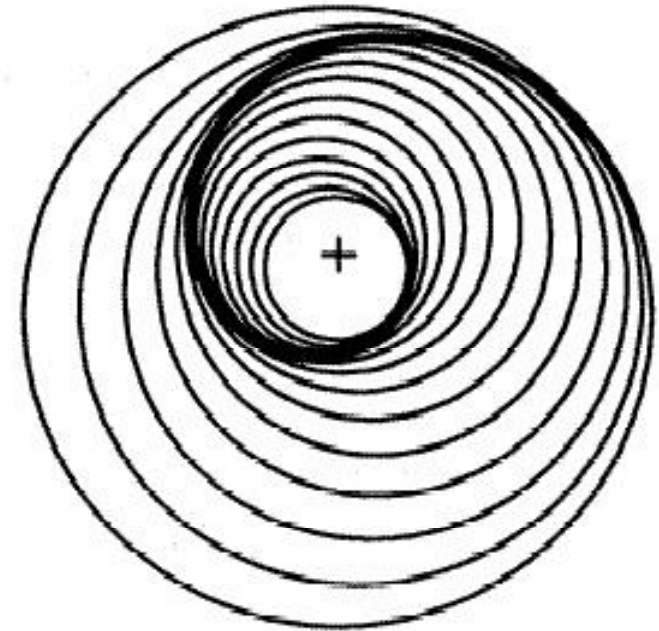
Principale difficulté: Le taux de précession différentielle très rapide $\Omega - \kappa$

Excepté pour un disque purement **Képlérien**, potentiel en $1/R$, où $\Omega = \kappa$
Adams, Ruden & Shu 1989

$m=1$ mode propre, mais il faut que la self-gravité soit importante

Nature physique de l'instabilité

Simple description WKB (*Lin & Shu 64, Toomre 77*), amplification à CR, swing



Equidensity Contours

Pour $m=1$, il existe un **autre amplificateur**:

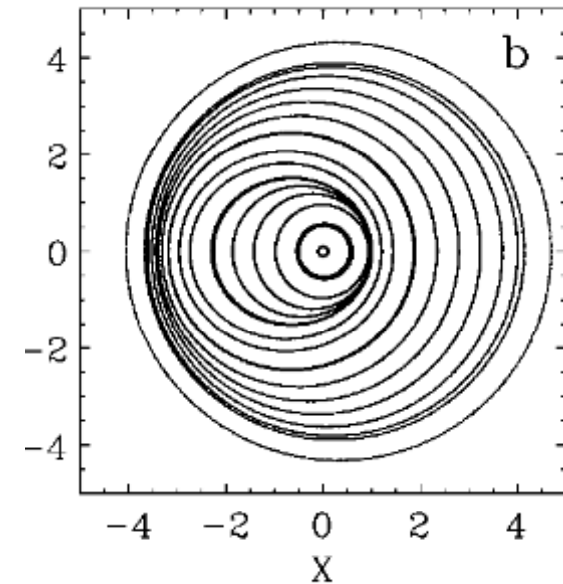
Le potentiel indirect, qui est dû au décentrement de la masse centrale

$$\Phi (r, \theta, t) = \alpha \omega^2 r \cos (\omega t - \theta)$$

Force à longue portée

Le disque se conduit comme une cavité résonante avec le décentrement stimulant constamment de nouvelles ondes trailing

La masse centrale gagne du moment angulaire, de même que le disque en dehors de la CR



Salow & Statler 2001

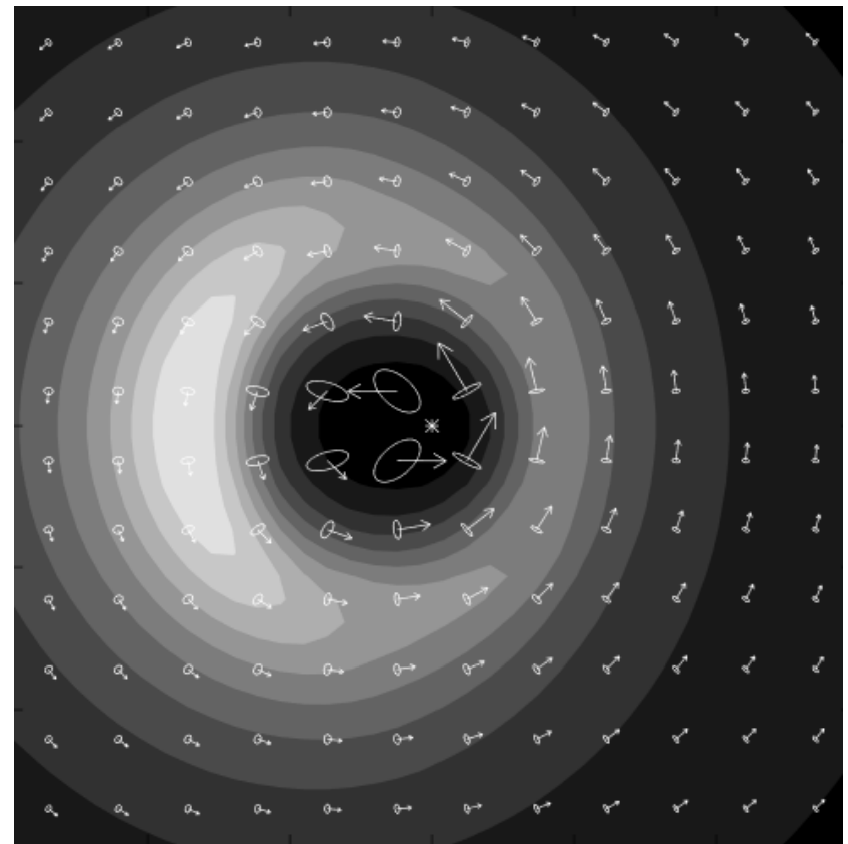
Temps caractéristique assez lent $t \ll 2\pi/\Omega$

Ce mode permet au disque interne de
perdre du moment angulaire,
et au gaz de tomber sur le trou noir central

Applications aux oscillations du disque
nucléaire, autour d'un trou
noir central (cf M31, NGC 3504..)

La plupart des galaxies à bulbe massif
possèdent un **trou noir super-massif**
 $M_{\text{BH}} = 0.2\% M_{\text{bulbe}}$

Salow & Statler 2004

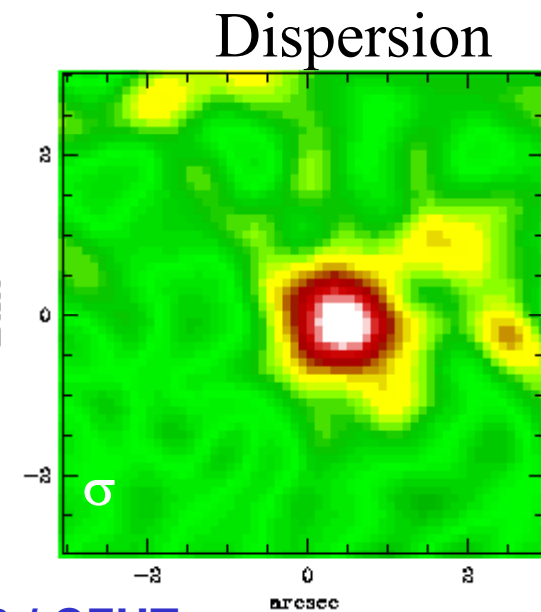
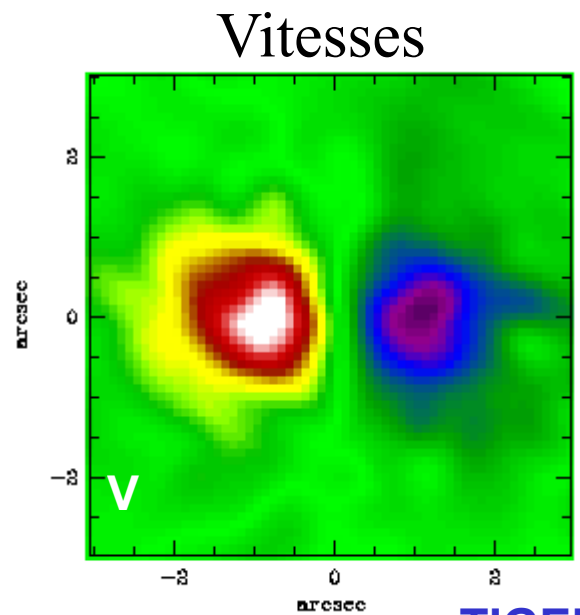
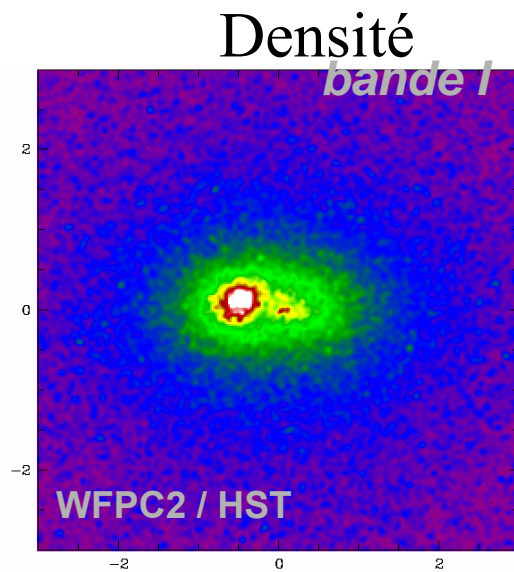


Observations et simulations

Ondes de densité ?

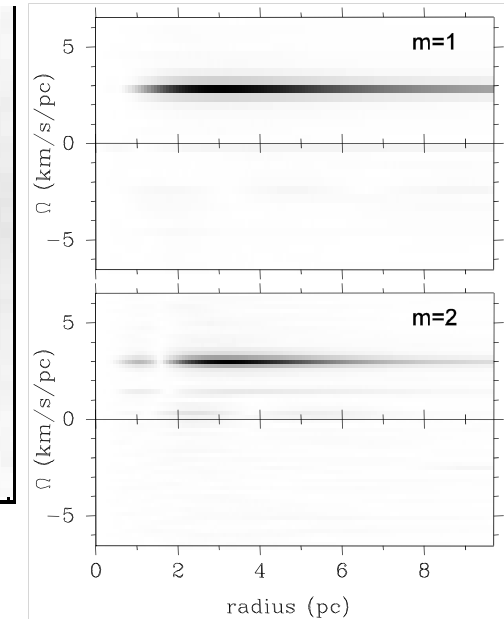
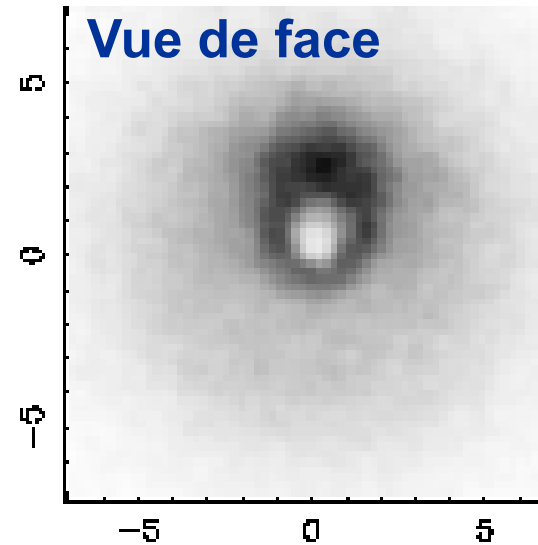
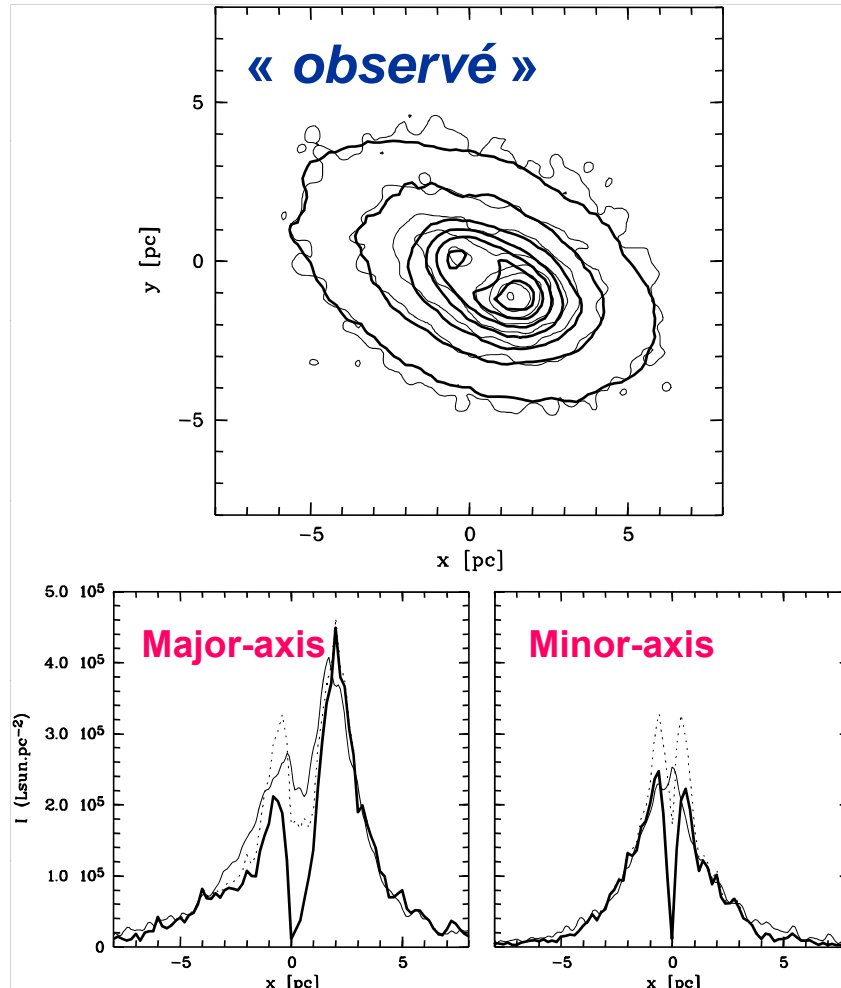
M 31: Andromède

10pc centraux:
Décentrement



Un mode $m=1$ képlérien?

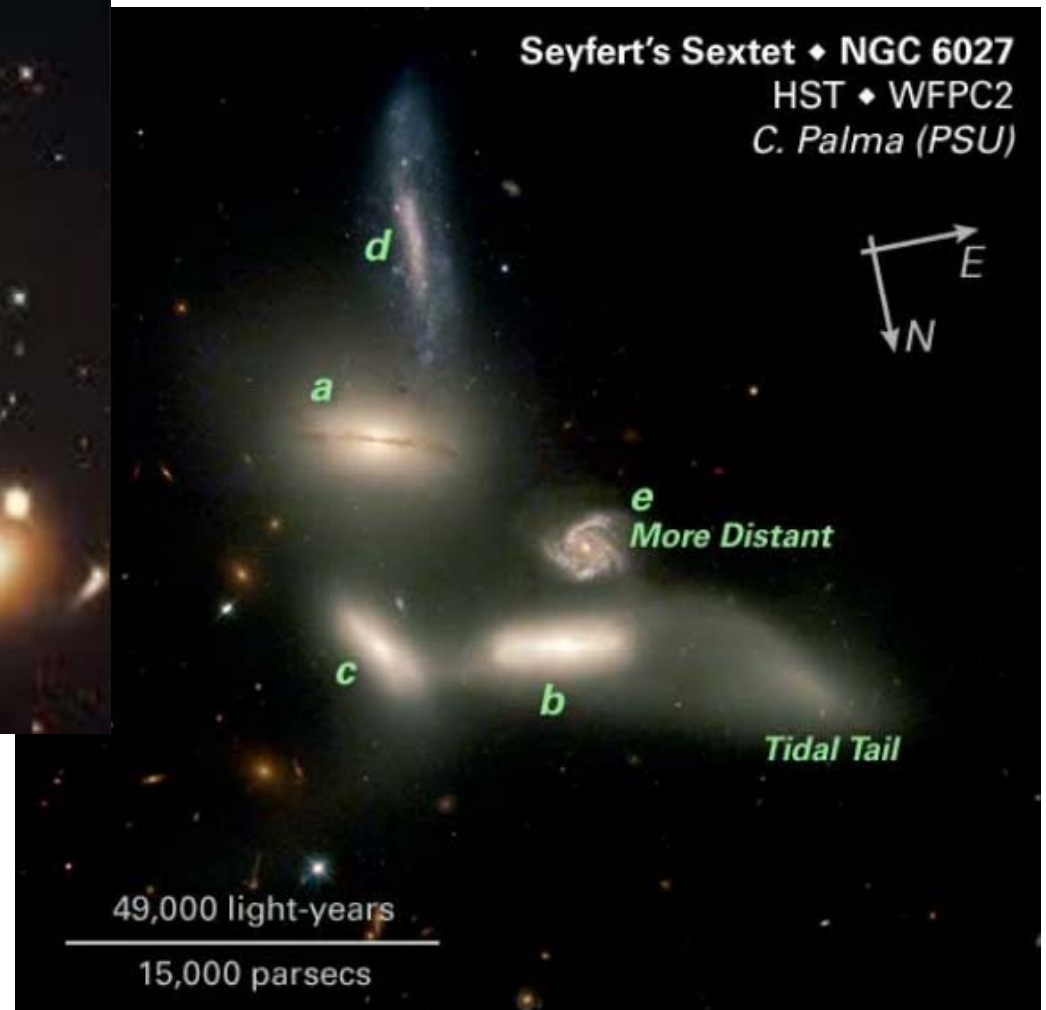
Pattern speed



coupes

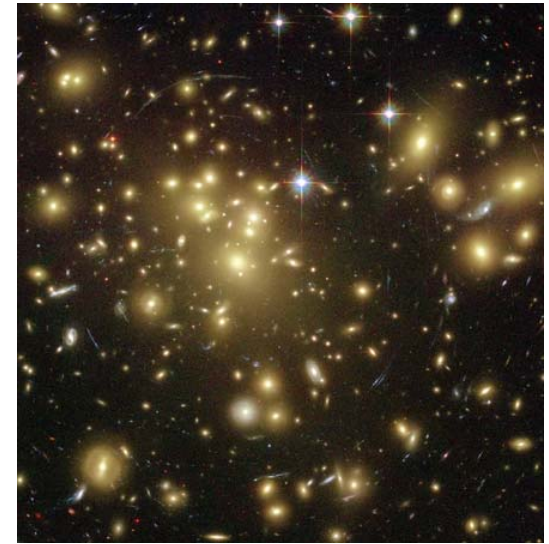
- ✓ BH: $7 \cdot 10^7 M_{\odot}$
- ✓ Disque: 20-40% de la masse totale
- ✓ *Pattern speed:* 3 km/s/pc
(fréquence orbitale: 250 km/s/pc)
- ✓ *Temps de vie:* > 3000 rotations
 $\sim 4 \cdot 10^8$ ans

Friction dans les groupes de galaxies



Les différents environnements

- **Amas de galaxies:** individus qui aiment la foule
- **Groupes:** des papillons qui vivent en société
- **Le champ:** des ermites qui préfèrent la solitude



La plupart des galaxies sont dans des groupes (ou dans le champ)

Les fusions ne se produisent plus dans les amas

	Groupe	Compact	Amas
Nombre de galaxies	~20	~5	100-1000
Contraste de densité	20	10^6	10^6
Dispersion de vitesses	~150	~150	700-1000
Temp. du gaz X	<1keV	<1keV	1-10keV

Les fusions: où et quand?

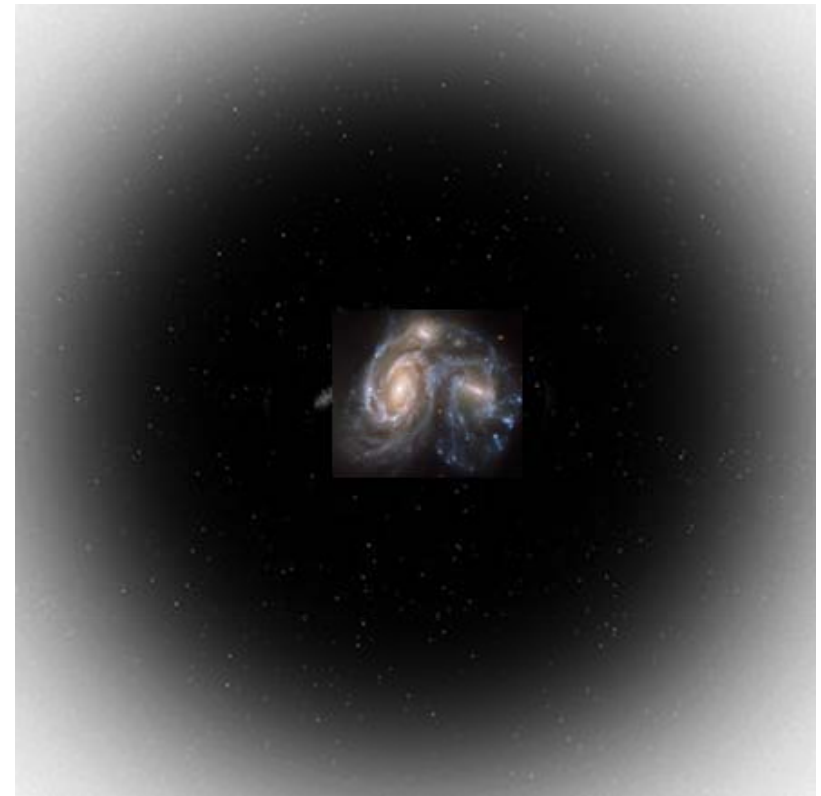
Dans les amas, la dispersion de vitesse est trop grande par rapport aux vitesses internes des galaxies. **Approximation impulsive:** les étoiles ne bougent pas au passage du bolide

Uniquement si $V_{\text{orbital}} \sim V_{\text{interne}}$, il peut y avoir résonance

La friction dynamique, surtout sur la matière noire, peut agir efficacement **dans les petits groupes**

Temps de fusion ~ 1 Gyr pour les galaxies comme la Voie lactée

$T \propto 1/(M \rho)$ (Chandrasekhar)



Groupes compacts de Hickson (HCG)

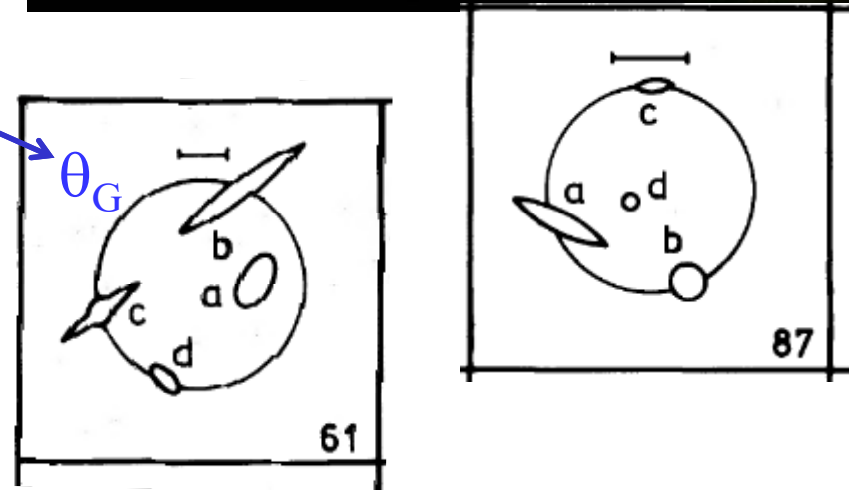
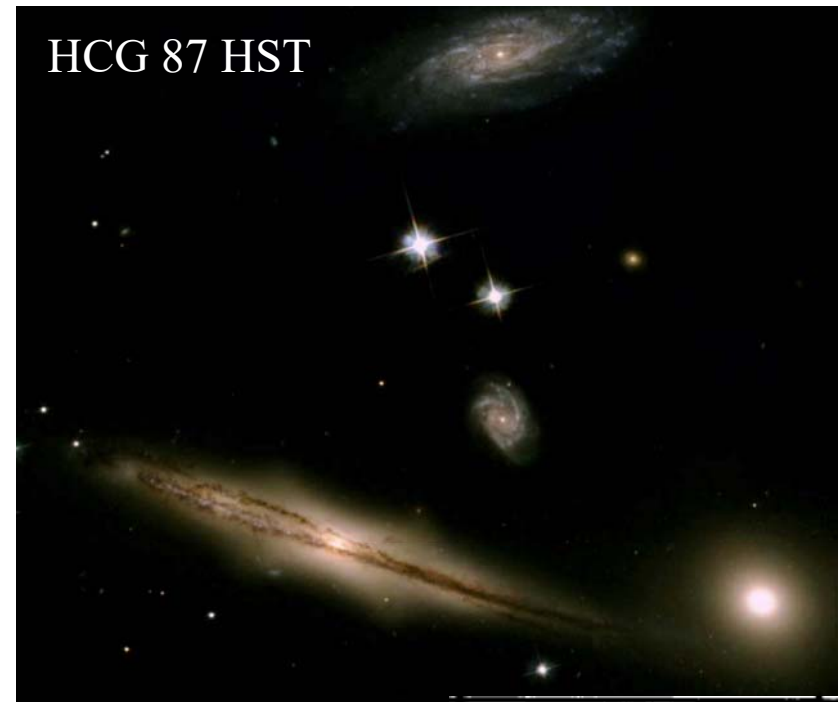
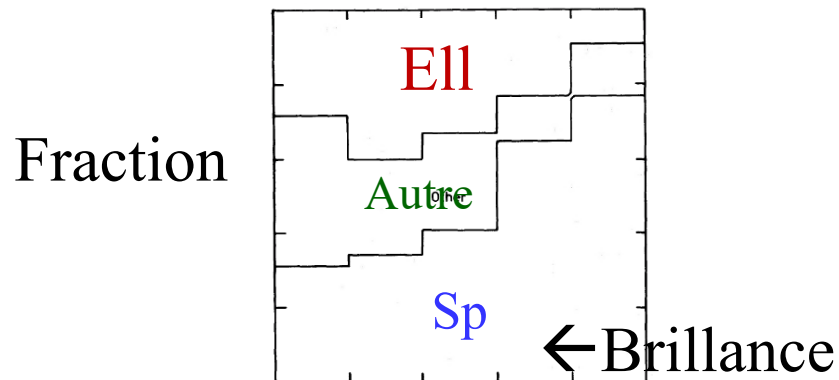
Selection optique basée sur la densité

Nombre: ≥ 4 galaxies dans les 3 magnitudes de la plus brillante

Isolation: pas de galaxies dans les 3 rayons du groupe $\theta_n \geq 3 \theta_G$

Compact: brillance de surface $\mu < 26$ mag/arcsec²

→ 100 HCGs ($\geq 90\%$ sont réels).



Paul Hickson 1982

Les groupes compacts ne devraient pas exister

Ils devraient fusionner en une seule galaxie en un temps ~ 1 Gyr

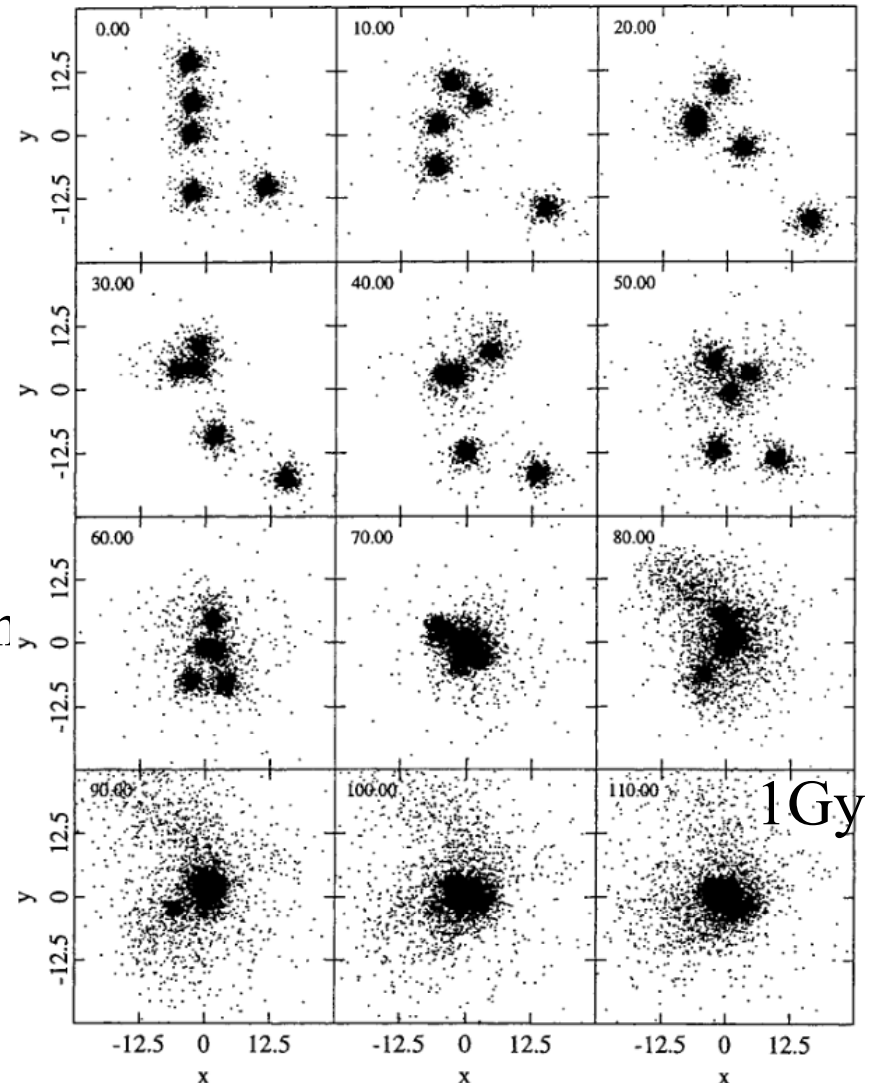
→ A $z=0$, tous les HCG devraient avoir disparu

Solutions: → les HCG ne sont pas réels (effets de projection)

→ Les halos noirs ont fusionné depuis longtemps, et le halo est commun (fusion en $\sim 2-3$ Gyr, selon concentration)

→ Les groupes diffus s'effondrent en groupes compacts, et repeuplent les HCG

Athanassoula et al 1997



Les groupes ont aussi du gaz chaud

Mais leur quantité de gaz est plus faible, par unité de masse (ou luminosité optique)

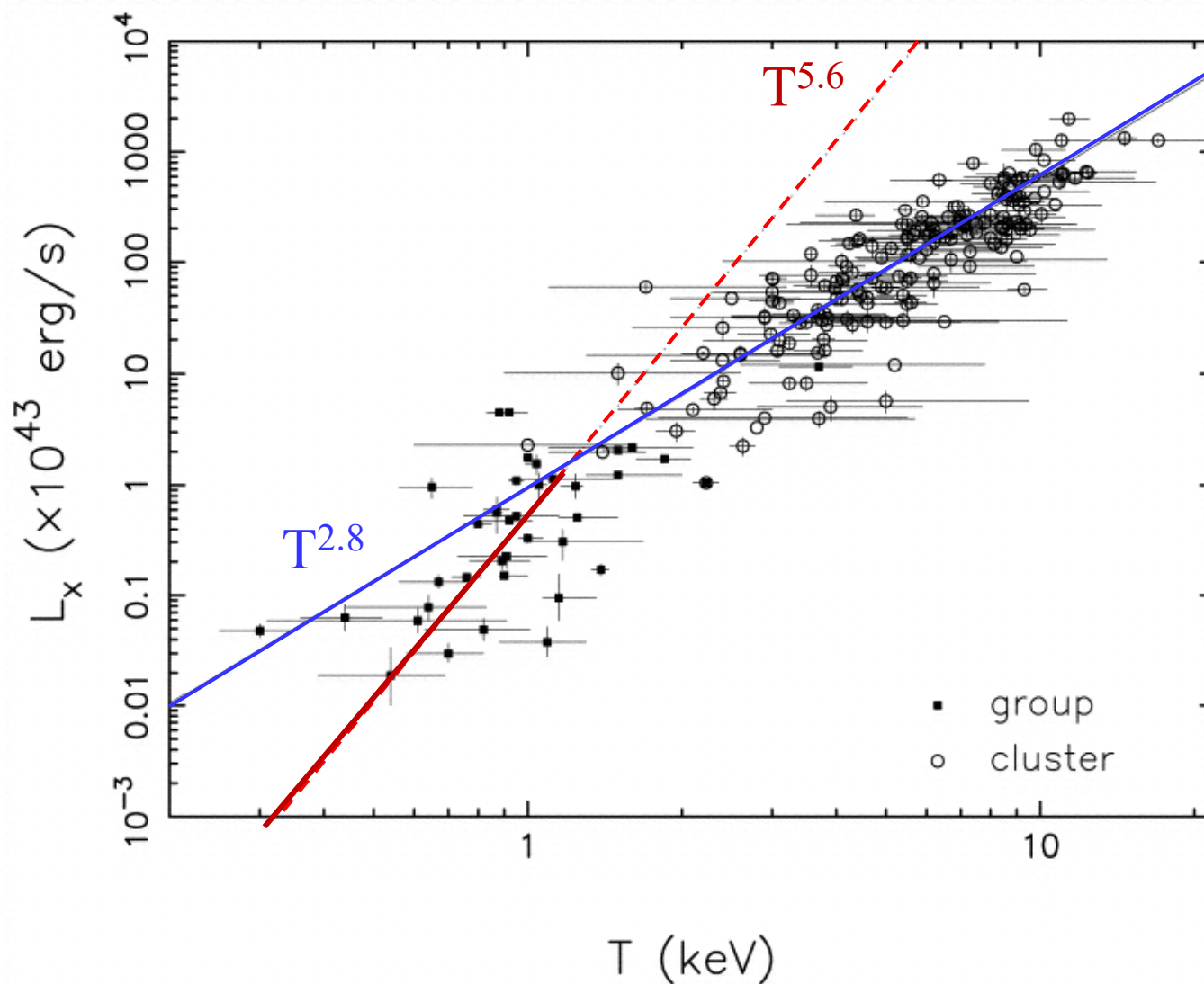
Le gaz a une température de $\sim 10^6$ K ou 1keV

On s'attendrait à $L_x \propto T^2$ (potentiel $\sim v^2 \propto T$), mais la pente est bien plus forte: le gaz a été préchauffé par des **processus non-gravitationnels** (AGN, SF..)

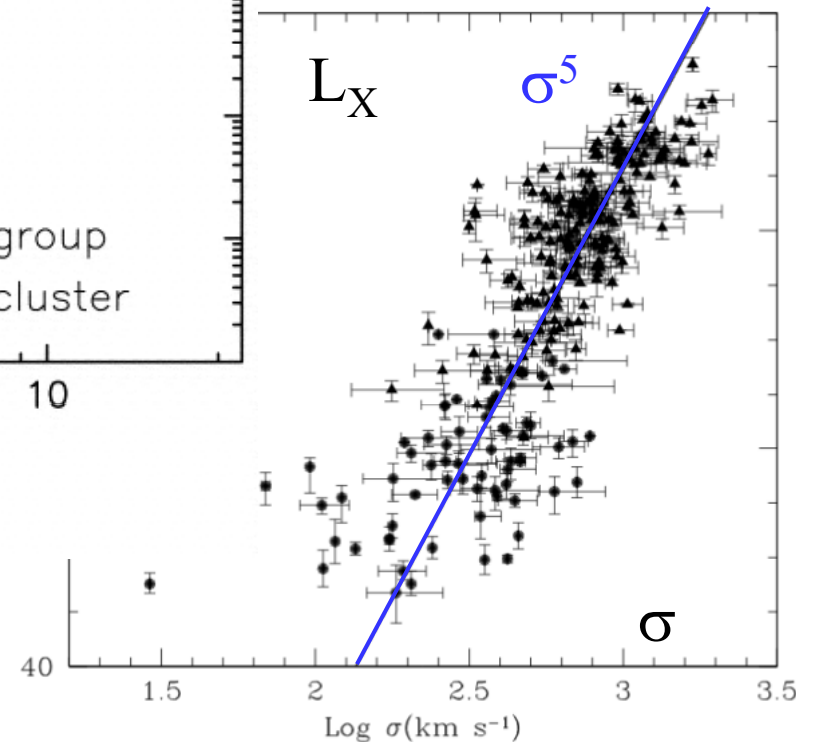
Les groupes, compacts ou non, ont des propriétés X comparables



Relation LX vs Température, σ



Moins de gaz chaud
par luminosité bleue
 L_X/L_B
Moins de Fe aussi
 Fe/L_B

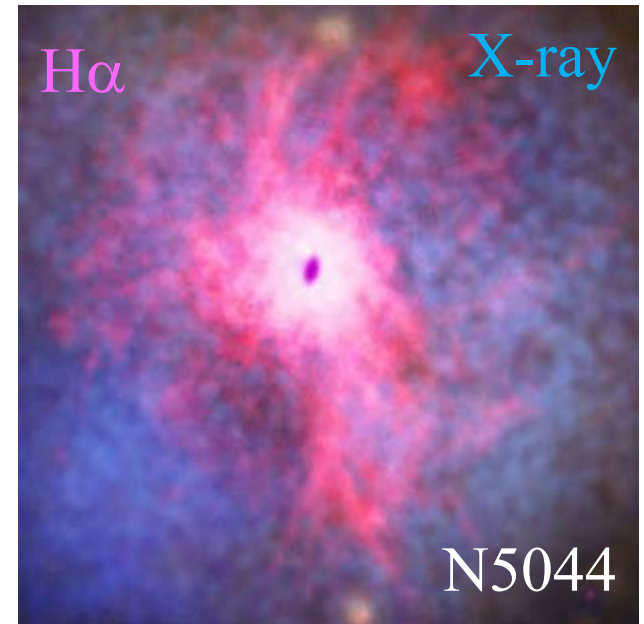


Les groupes prolongent les relations
des amas, mais avec une plus forte pente

Avec des flots de refroidissement



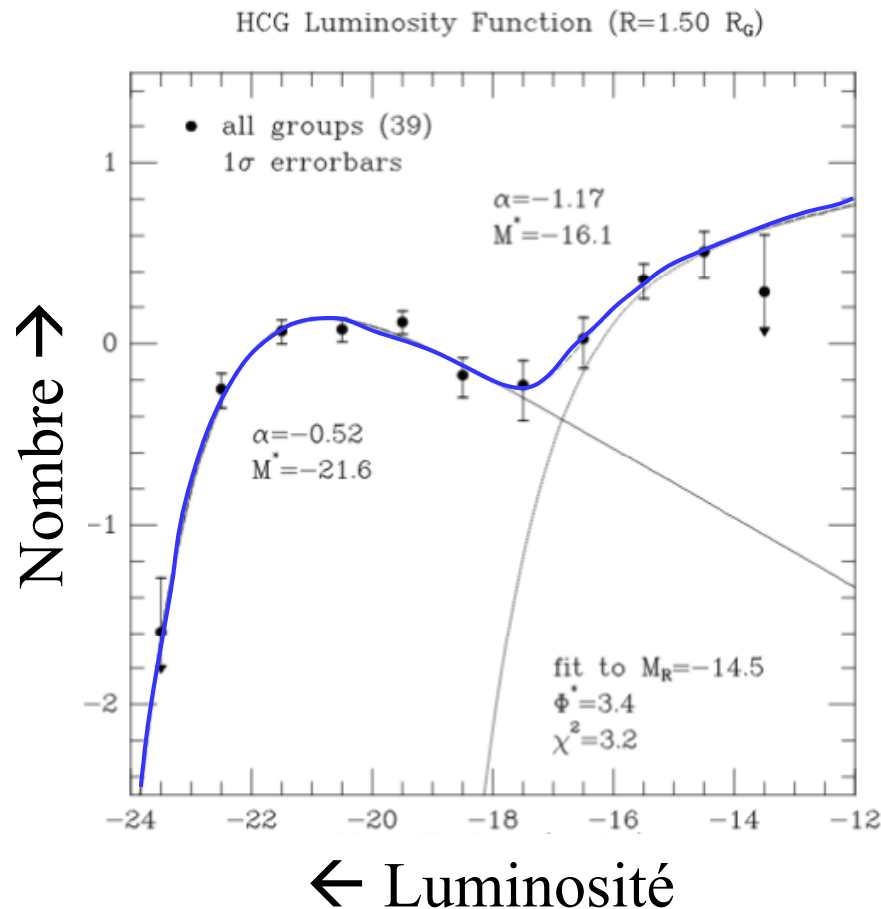
Certains groupes tombent dans les amas



Le gaz chaud montre l'existence réelle des groupes, et leur relaxation
Le refroidissement demande l'équilibre, modéré par les AGN

Les différentes cavités montrent les explosions passées
Chandra web site

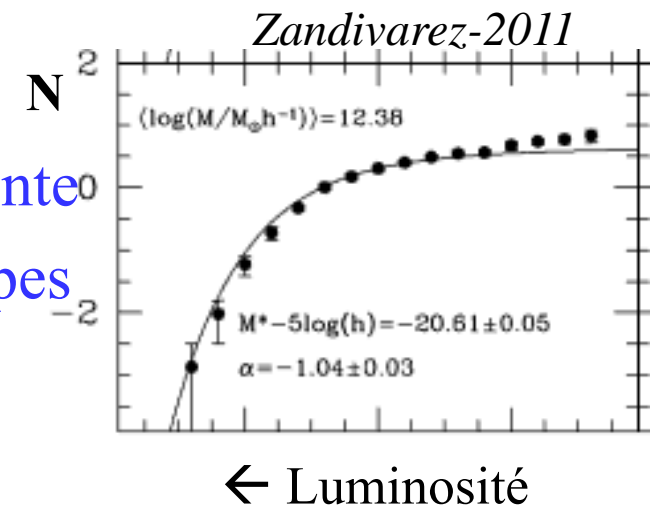
Fonction de luminosité dans les HCG



2 composantes dans la fonction de luminosité (LF): **il manque des galaxies de Lum intermédiaire**

La forme de la LF dépend de la luminosité en X

LF très différente dans les groupes ordinaires

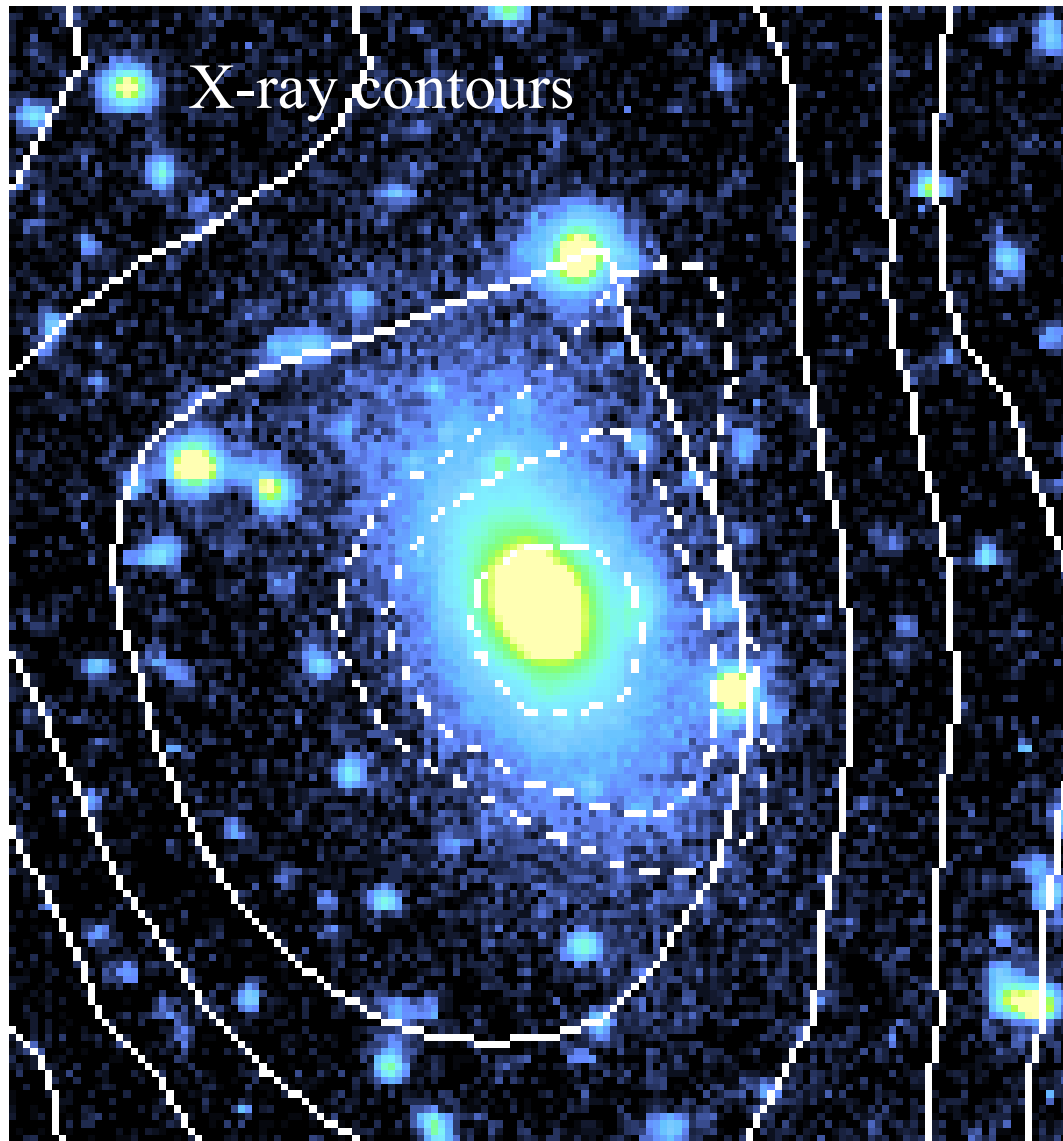


\rightarrow Fusion de galaxies pour donner la plus brillante

\rightarrow Formation de naines de marée

Hunsberger et al 1998

Groupes fossiles



Un fossile: une galaxie elliptique isolée avec un halo de gaz X semblable à celui d'un groupe

Tout ce qui reste après la fusion d'un HCG

Recherche et découverte par Ponman et al 1994

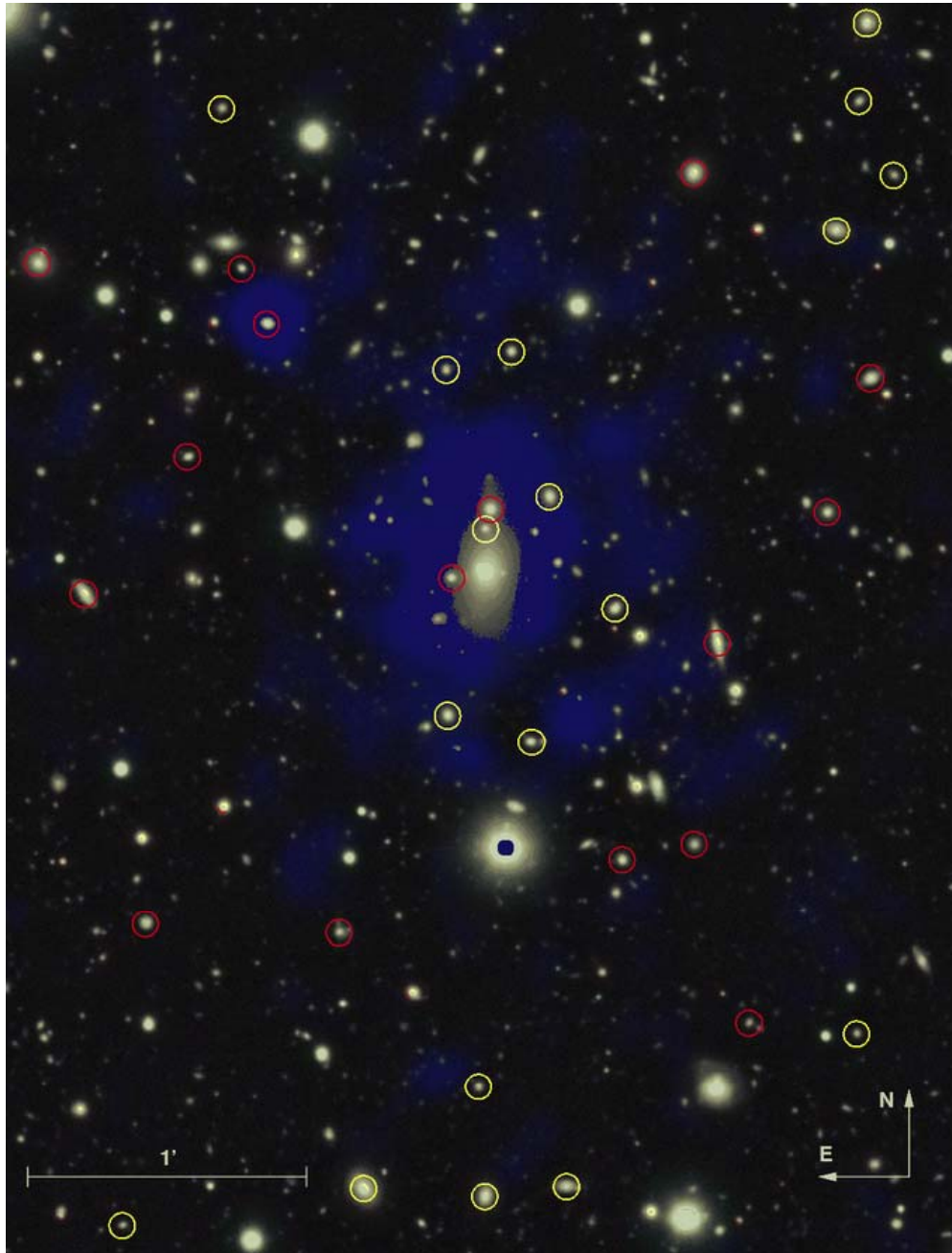
$\Delta m_{12} = 2.5 \text{ mag (x10)}$

autres galaxies du groupe $z=0.171$

RXJ1340.6 +4018

Jones, Ponman & Forbes 2000

Un autre groupe fossile



Subaru/Suprime-Cam
image du centre de J0454

Bleu: émission X diffuse
Schirmer et al 2010

J0454 est un groupe à $z=0.26$
Galaxy 10x plus brillante que la
suivante

Lentille forte d'une galaxie
à $z=2.1$: BGG offset du halo noir
par 100kpc

Le groupe fossile tombe sur un
amas + filaments

Caractéristiques des fossiles

15 fossiles confirmés (Dariush et al 2010)

Même relation L_X -T (certains sont au-dessus), ou L_X - L_{opt}

La L_{BGG} dépend du gap Δm_{12}

La centrale prend plus de lumière dans les groupes fossiles

Mais impossible de relier le fossile à un état plus évolué

Les autres groupes ont le même âge

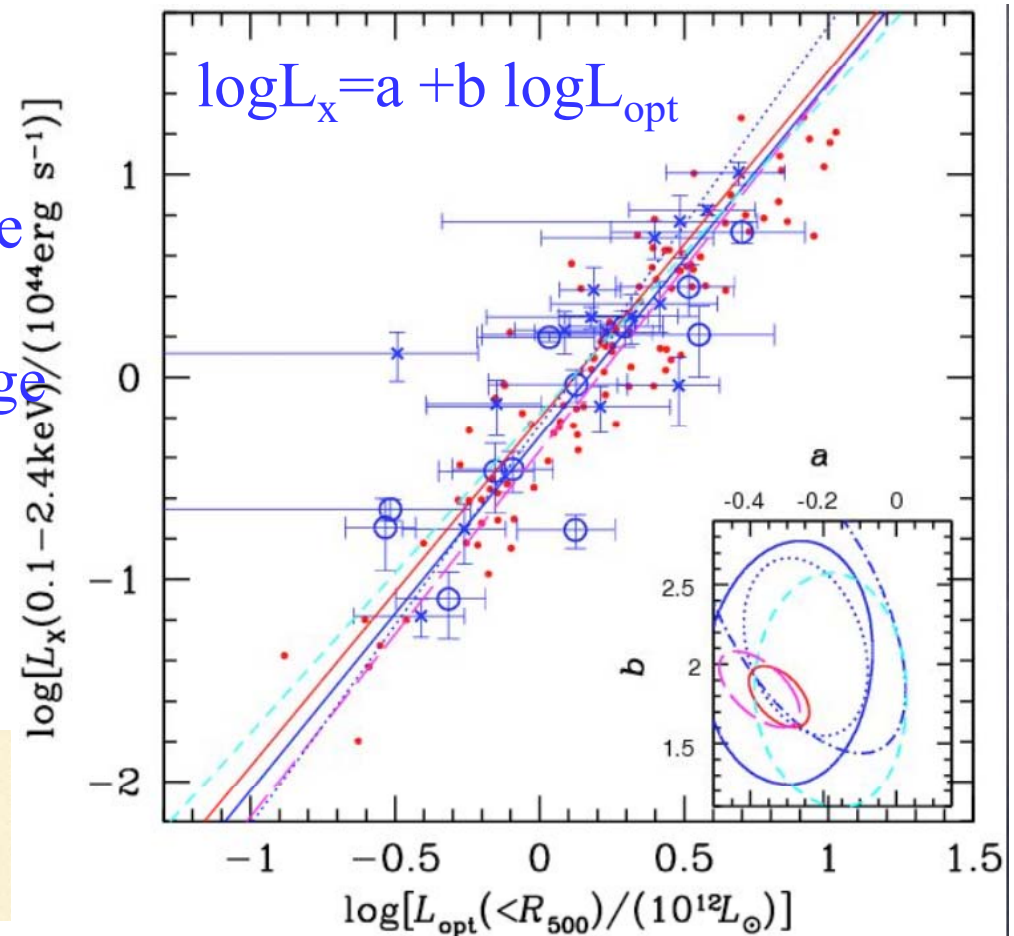
Même état dynamique

Pas de caractéristiques spéciales

Ne correspond pas aux modèles



Girardi et al 2014



Conclusions

La friction dynamique est **fondamentale** pour la formation des galaxies

Contrôle l'interaction entre les galaxies, le temps de fusion, la vitesse des barres, la formation des bulbes

Pourrait distinguer entre plusieurs modèles de gravité/matière noire

Formation de galaxies dans le **scénario hiérarchique**

Rôle relatif de l'**accrétion de gaz**

Les groupes compacts de Hickson ne devraient pas exister!

