



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Physique des galaxies en gravité modifiée

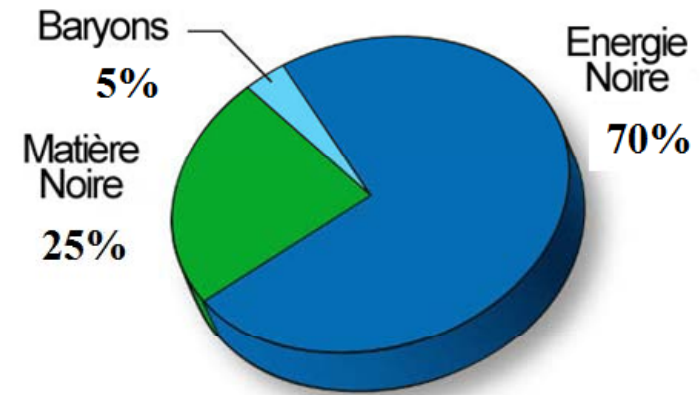


Françoise Combes



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

Un Univers noir à 95%



L'existence d'un secteur noir aussi développé suppose que le modèle standard des particules élémentaires est incomplet
→ Nouvelles particules, nouveaux champs scalaires, au niveau microscopique

- **Matière noire** non-baryonique, WIMP encore jamais observées
- **Energie noire**: vide quantique, prédit 10^{120} fois plus grand!

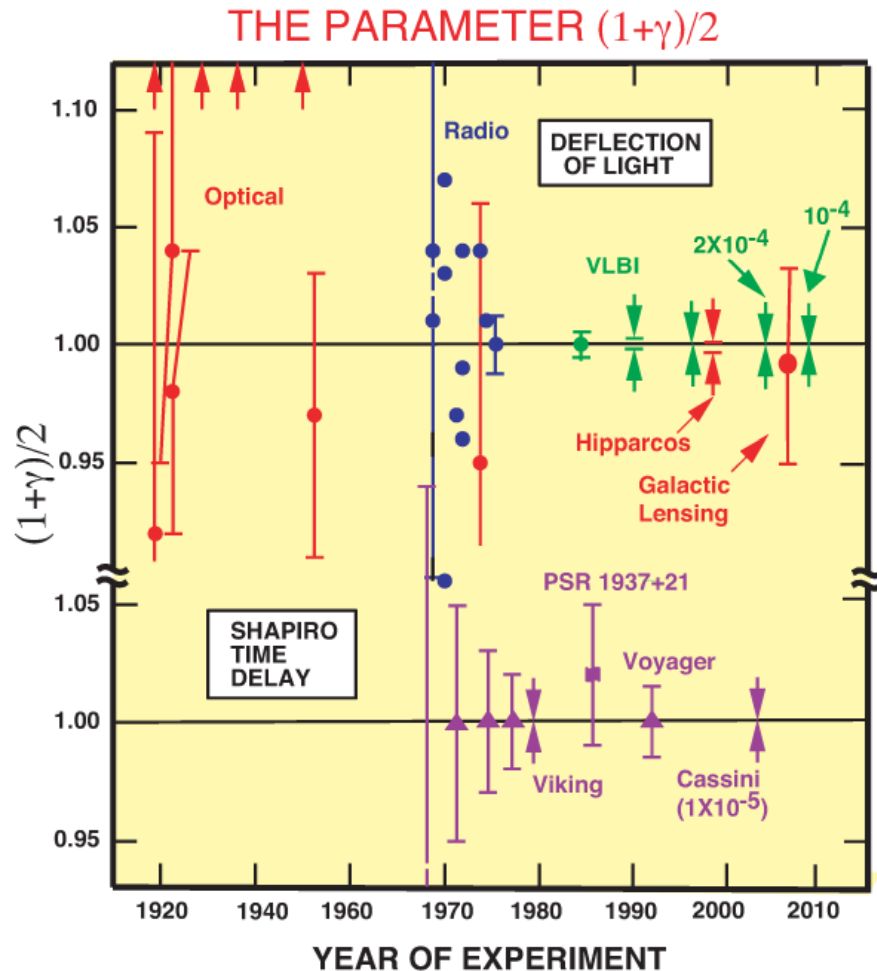
→ Et si mauvaise interprétation des équations d'Einstein (RG)?
Les termes encore sombres seraient à gauche? $R \rightarrow f(R)$

$$G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

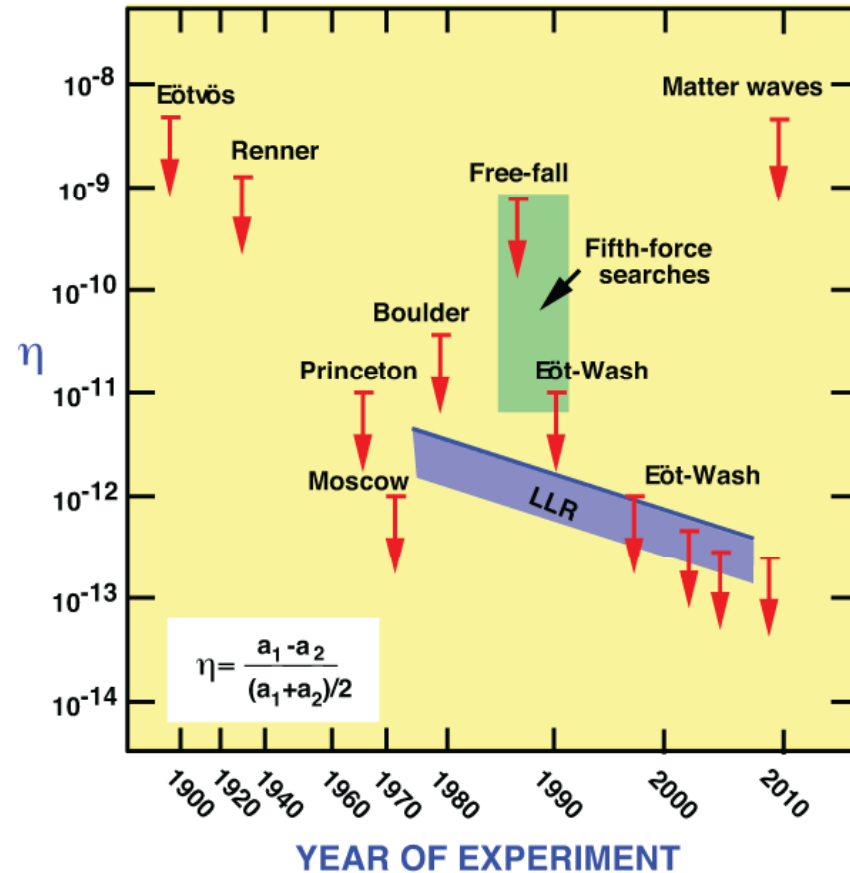
$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}$$

RG non testée aux échelles astrophysiques

RG superbement testée dans le Système solaire



TESTS OF THE WEAK EQUIVALENCE PRINCIPLE



LLR Lunar Laser Ranging

Clifford Will 2014

De nombreuses théories

Une grande floraison d'approches

- **TeV**S: version relativiste de la gravité modifiée MOND

(Milgrom, 1983, Bekenstein, 2004) + Einstein-Aether, Bimetric

- **Branes**: l'espace-temps 4D baigne dans un mode N-D

(Capozziello & Francaviglia, 2008, Ferraro & Fiorini, 2007, De Felice & Tsujikawa, 2010)

+ dimensions sup Kaluza-Klein, Randall-Sundrum

- **Théories $f(\mathbf{R})$** modifiant le Lagrangien explicitement

$f(\mathbf{R})$, $f(\mathbf{R}_{\mu\nu}\mathbf{R}^{\mu\nu})$, $f(\mathbf{GB})$, $f(\mathbf{T})$ etc

(DGP:Dvali, Gabadadze & Porrati, 2000, Deffayet, 2001, de Rham et al., 2008,

Maartens & Koyama, 2010) + Horava-Lifschitz, Galileons, Ghost condensates

- **...plein d'autres!** (Clifton, Ferreira, Padilla, Skordis, 2012)

MOND = MOdified Newtonian Dynamics

Modification à faible accélération $a < a_0$

$$\mathbf{F} = m \mathbf{a} \quad a_N = GM(r)/r^2$$

$$a = V^2/r \quad V^2 = GM/r$$

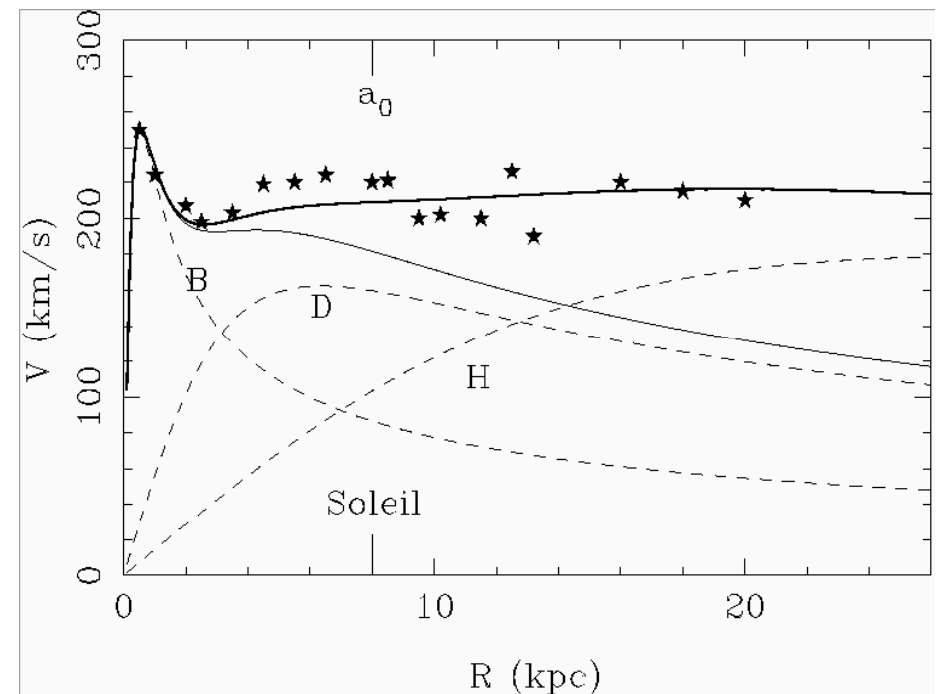
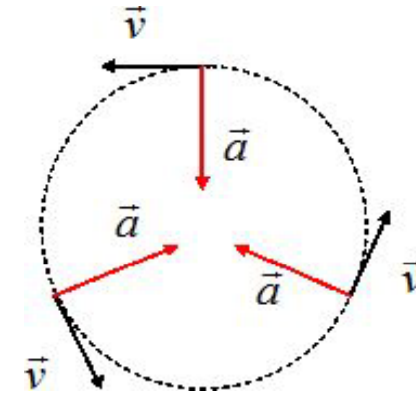
$$a = (a_0 a_N)^{1/2} \quad (\text{Milgrom 1983})$$

a_N accélération Newton

$$a_N \sim 1/r^2 \rightarrow a \sim 1/r \rightarrow V^2 = \text{cste}$$

$$\rightarrow a^2 \sim V^4/r^2 \sim GM/r^2$$

$M \sim V^4$ Relation de Tully-Fischer



Transition MOND → Newton

La transition se fait au milieu des galaxies, pour les spirales géantes comme la Voie Lactée: **Fonction $\mu(x)$**

$$a_N = a \mu(x)$$

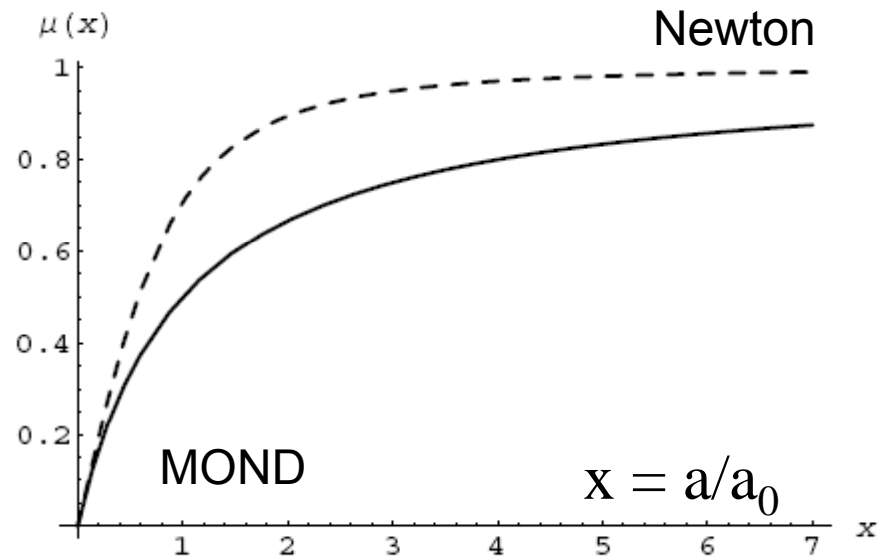
$$x = a/a_0 \quad a_0 = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$$

ou 1 Angstroms/s²

Lagrangien AQUAL: Equation de Poisson

$$\nabla \cdot [\mu(|\nabla\phi|/a_0)\nabla\phi] = 4\pi G\rho$$

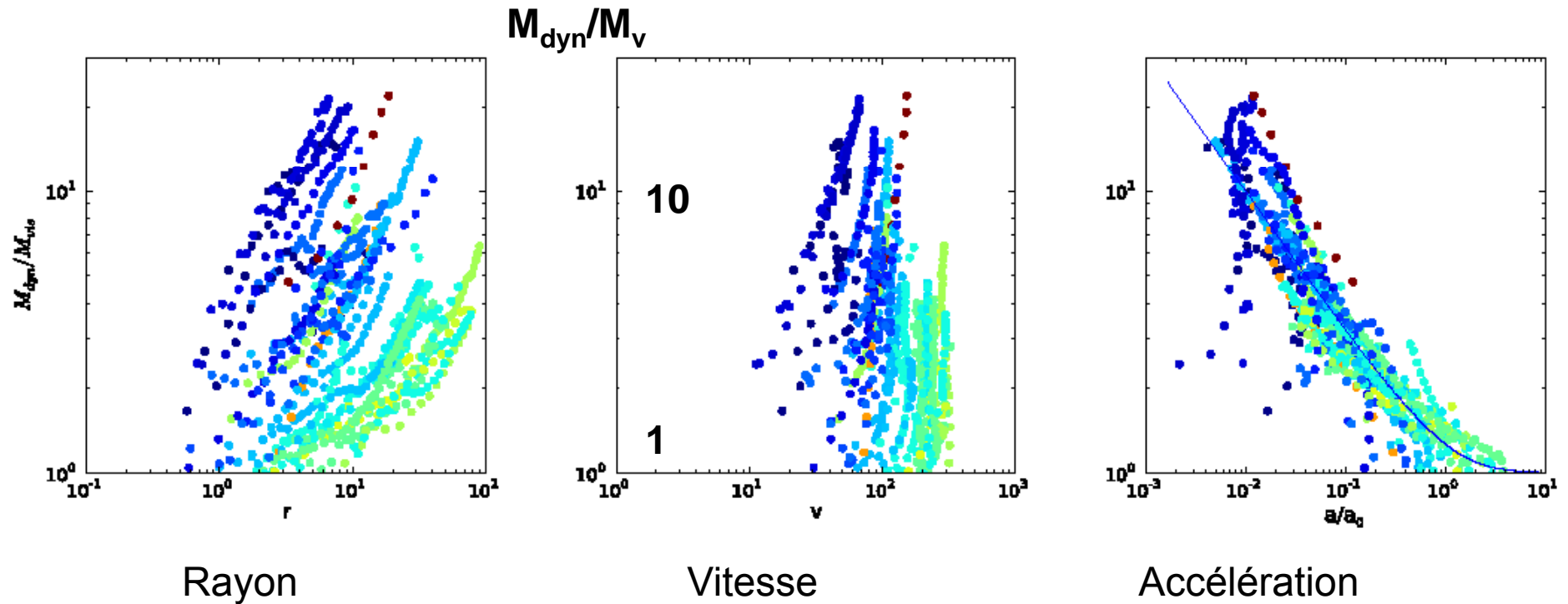
$x \ll 1$ régime Mond $\mu(x) \rightarrow x$
 $x \gg 1$ régime Newton $\mu(x) \rightarrow 1$



Masse Dynamique / Masse Visible

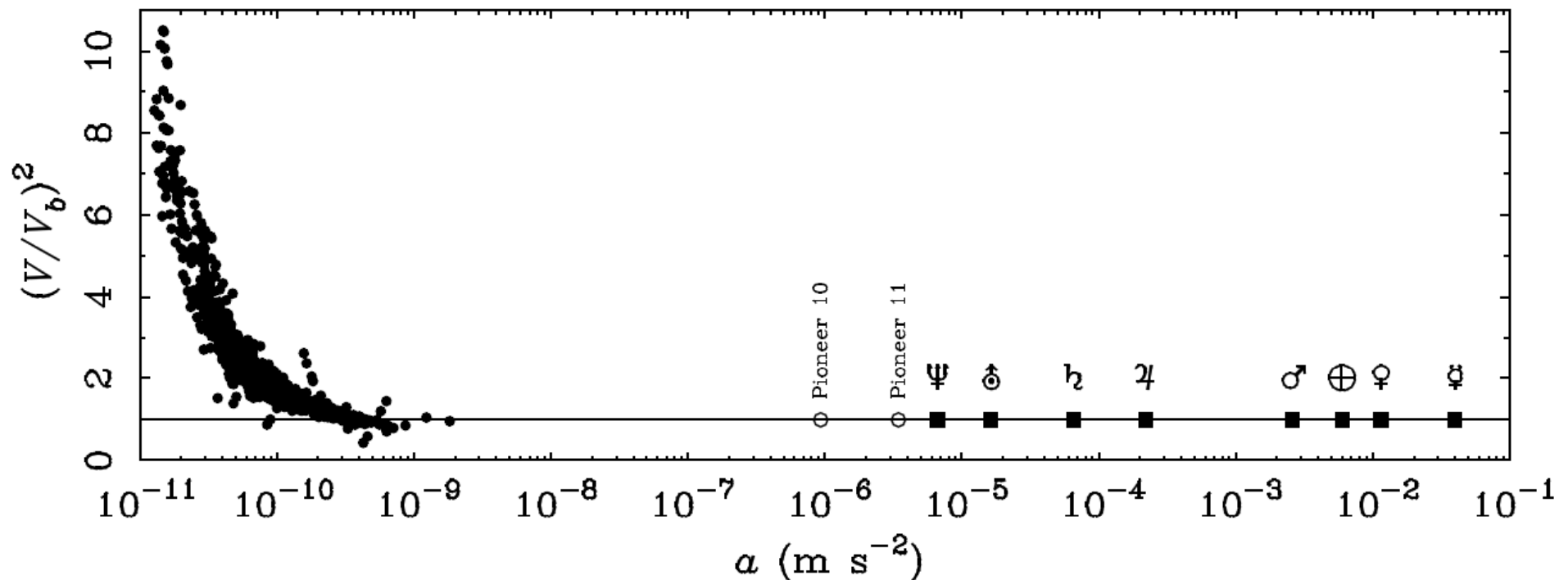
Il est remarquable que le rapport dépende de l'accélération,

→ La seule variable contrôlant la gravité, de façon universelle

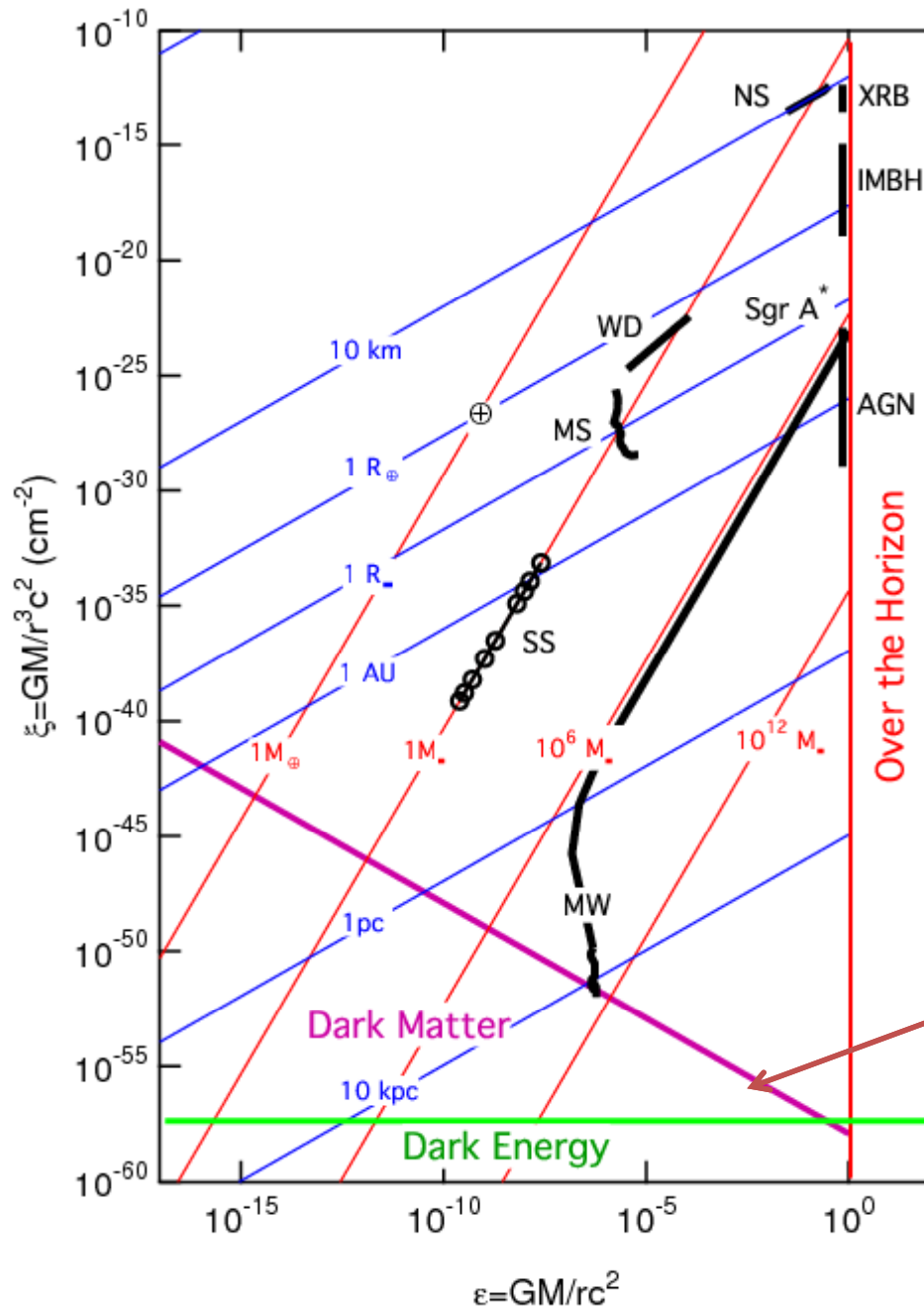


Comparaison avec le système solaire

Pour obtenir a_0 , il faut aller à 10 000 AU de distance, bien au-delà de Pluton (40 AU) et la ceinture de Kuiper,
Un peu à l'intérieur du nuage de Oort (20 000 -100 000 AU)



Faible courbure, faible accélération



$\epsilon \equiv GM/rc^2$ Potentiel (V^2/c^2)
 $\xi \equiv GM/r^3c^2$ Courbure (cm^{-2})
 du champ gravitationnel autour de la
 masse M

Avec rapports connus $M \sim R$
 → plusieurs objets sont identifiés

$a \sim a_0$

$a_0 \sim cH_0 \quad a_0^2 \sim c^2\Lambda$

Théorie covariante, relativiste

TeVes Tenseur/Vecteur/Scalaire
Bekenstein (2004)

$$\mu(y) = \frac{\sqrt{y/3}}{1 - \frac{4\pi\alpha}{k} \sqrt{y/3}}$$

Remplace la relativité générale à faible courbure

➔ Introduit une 5ème force, violation du principe d'équivalence forte (pas du principe d'équivalence faible, $m_{\text{inertie}} = m_{\text{grave}}$)

*Peut dériver naturellement de certains modèles de cordes
(Mavromatos & Sakellariadou 2007)*

Bien d'autres développements: Théories aether/Einstein (GEA),
Champ vectoriel avec couplage non-linéaire à la métrique
De l'espace-temps (Zloznik et al, 2007, Zhao, 2008, BIMOND
QUMOND, Milgrom 2010-11, Babichev et al 2011...)
Voir la revue de Famaey & McGaugh 2012

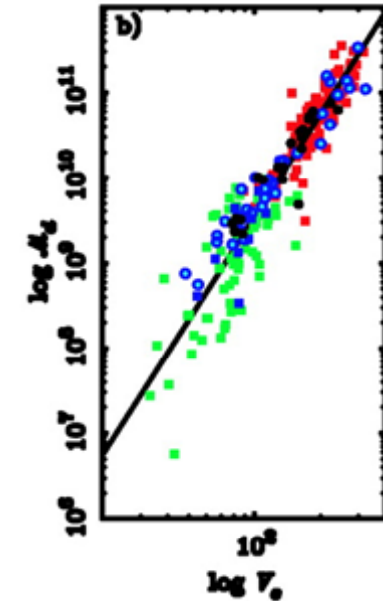
« Living Reviews in Relativity »

Relation de Tully-Fisher

$$g_M^2 = a_0 g_N = a_0 GM/r^2 = V^4/r^2$$

$$\rightarrow V^4 = a_0 GM$$

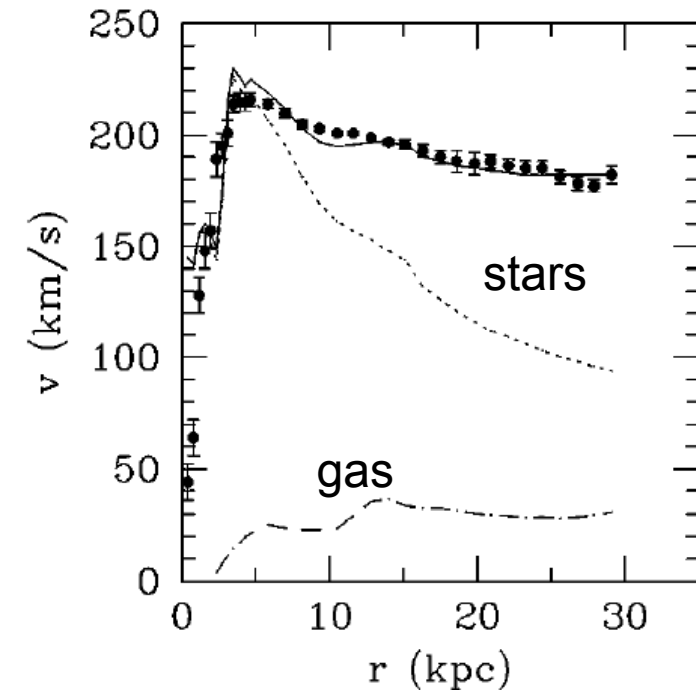
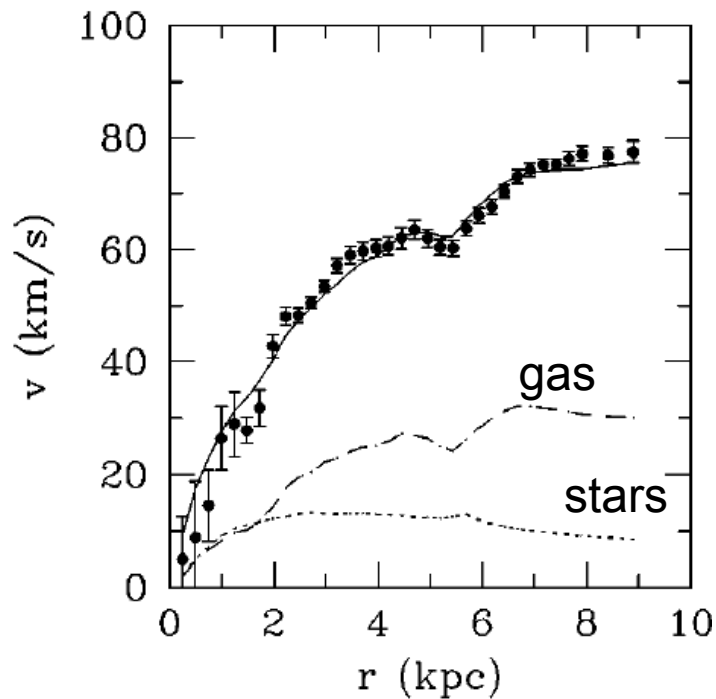
$$\Sigma_{\text{crit}} = a_0/G$$



Reproduit les courbes de rotation de tout type
(naines **LSB**, géantes **HSB**)

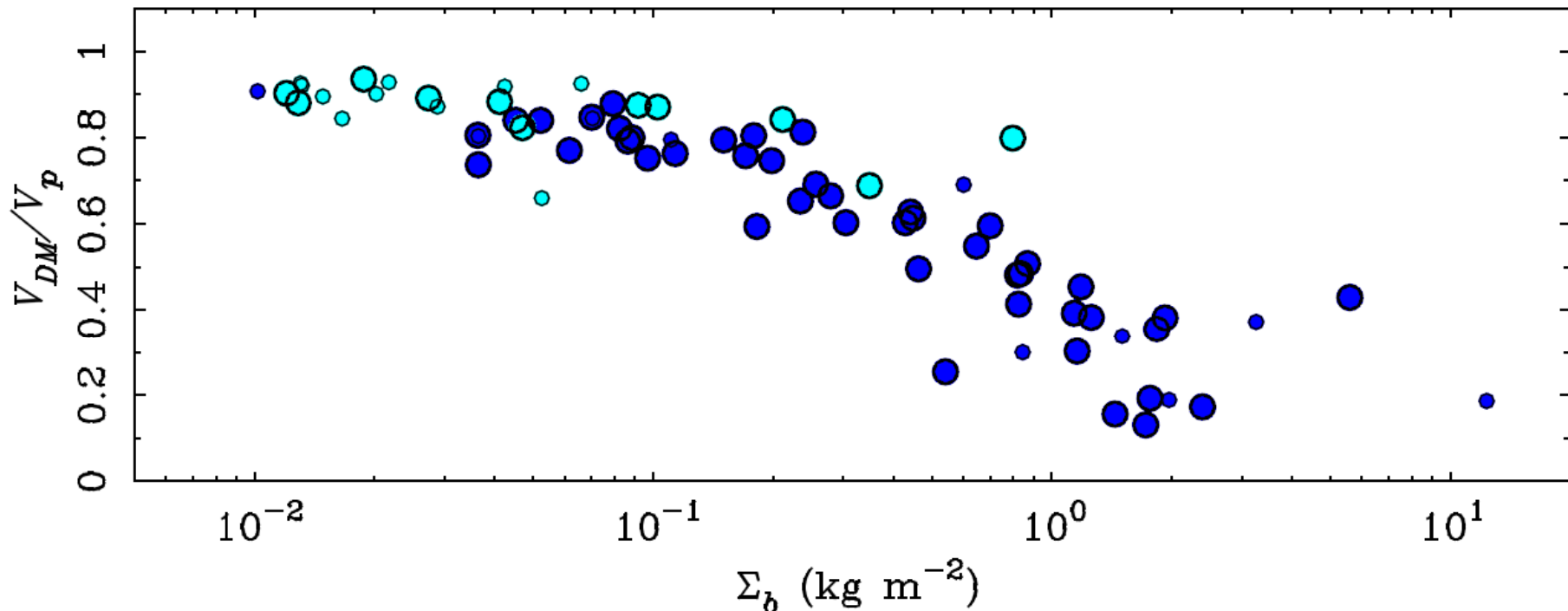
LSB N1560

HSB N2903



Densité de surface critique Σ_{crit}

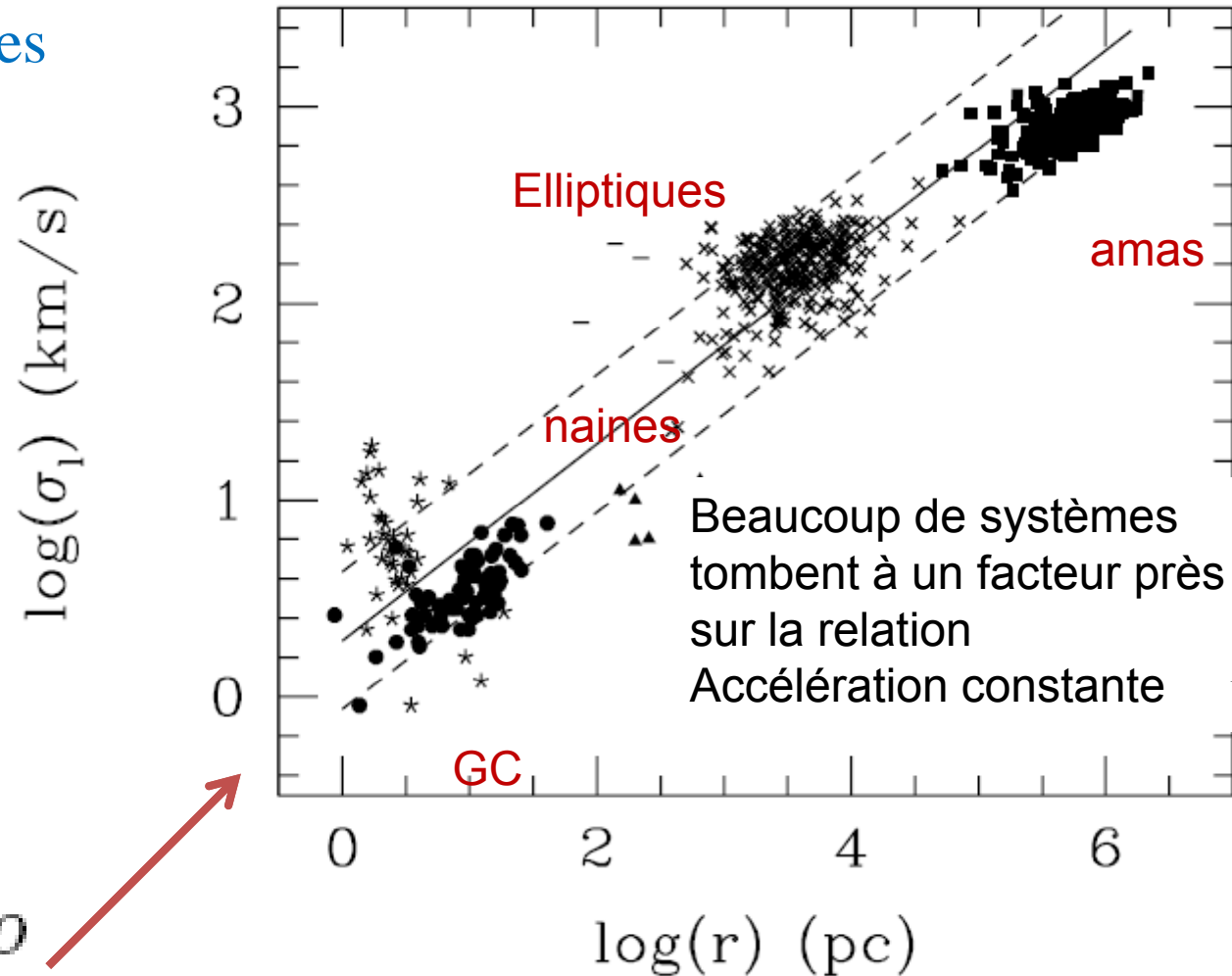
La contribution de la matière noire à la vitesse totale V_p au rayon R_p (pic de V_{rot}) tend vers zéro, pour $\Sigma > \Sigma_{\text{crit}} = a_o/G \sim \text{kg/m}^2$



Systemes supportés par pression

Sanders & McGaugh 2002

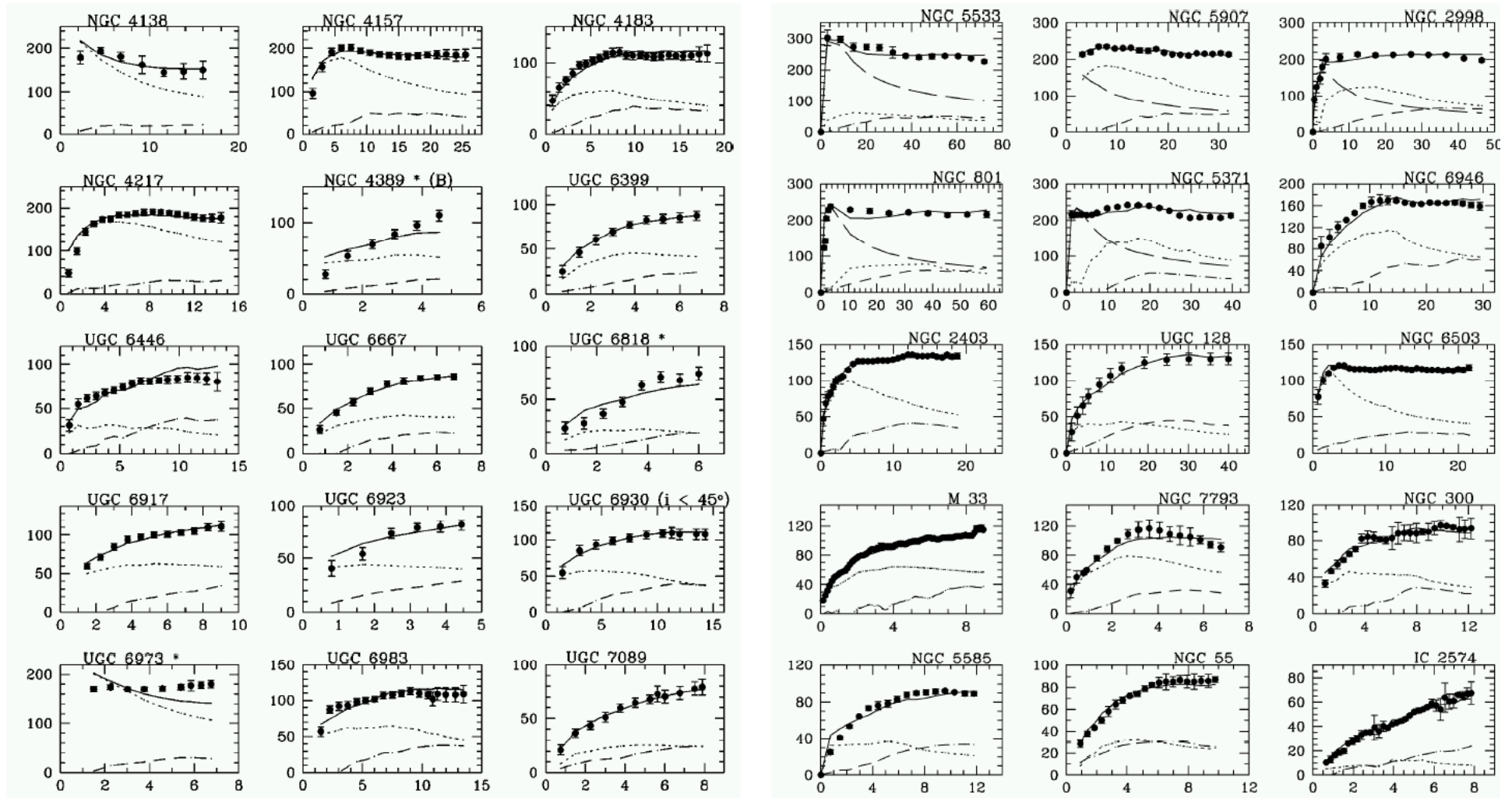
Des amas globulaires
aux galaxies
et amas de galaxies



$$\sigma_l^2 / r = a_0$$

Multiples courbes de rotation ..

Sanders & Verheijen 1998, tous types, toutes masses
--- gaz, disque stellaire, --- bulbe



Problèmes de MOND dans les amas de galaxies

A l'intérieur des amas de galaxies, il existe encore de la MN, qui ne peut pas être expliquée par MOND, car **le centre de l'amas** n'est que modérément dans le régime MOND ($0.5 a_0$)

Observations en rayons-X: gaz chaud en équilibre hydrostatique,
Et lentilles gravitationnelles faibles (shear)

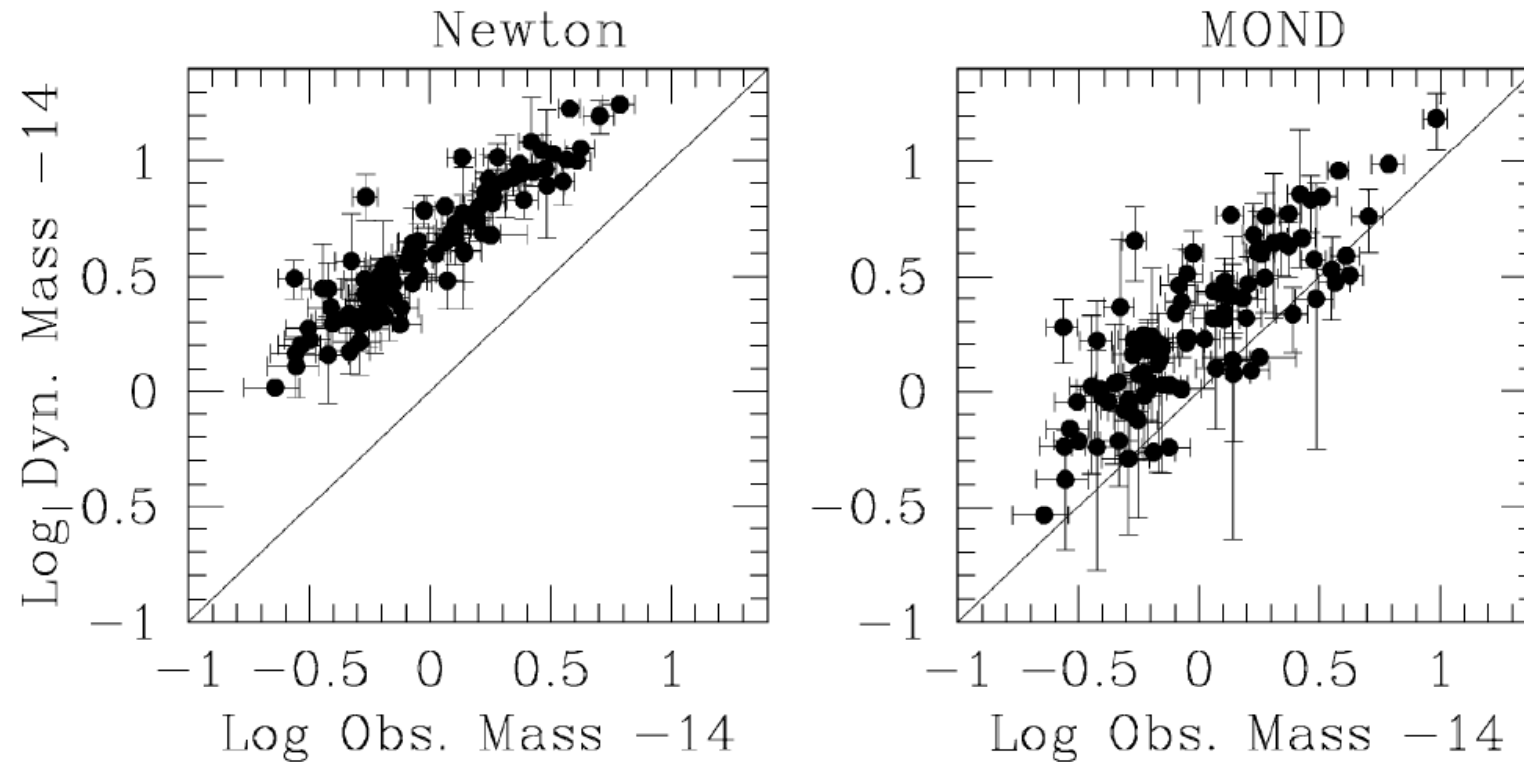
MOND réduit d'un facteur 2 la masse manquante

→ Il reste une autre composante, qui pourrait être des neutrinos....
(plus des baryons)

La fraction de baryons reste < fraction universelle dans les amas
(des baryons « noirs » existent dans le modèle CDM)

Mais si CDM n'existe pas, il n'y a plus de fraction limite

MOND et les amas de galaxies

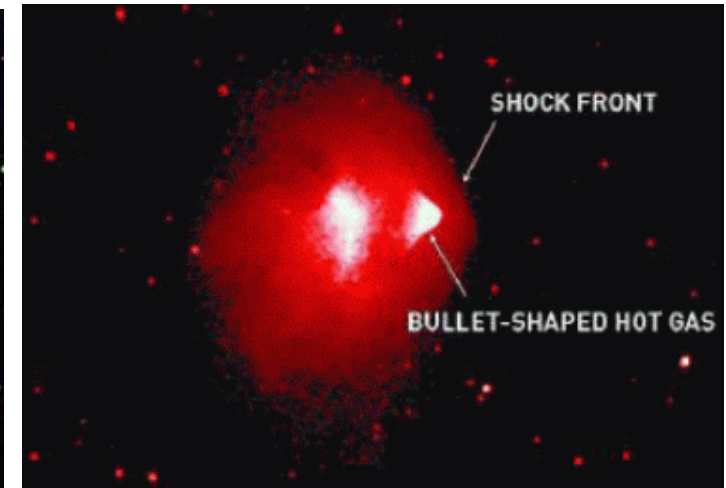
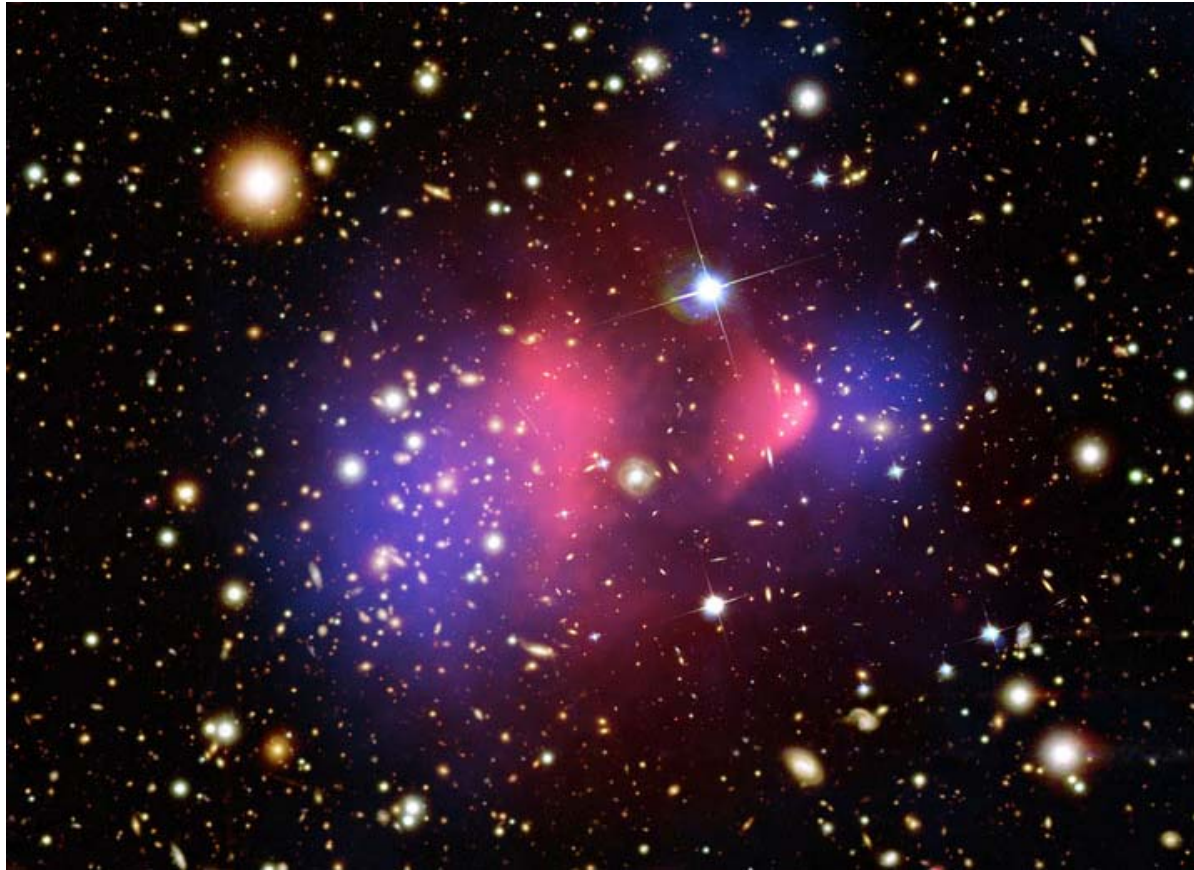


Selon la physique des baryons, du gaz froid pourrait se trouver au centre des amas (flots de refroidissement)

D'autre part, des neutrinos de 1.5eV pourraient représenter 2x plus de masse que les baryons $\Omega = \rho/\rho_c = \Sigma m(\text{neutrino})/45 \text{ eV}$

L'amas du boulet

Gaz X

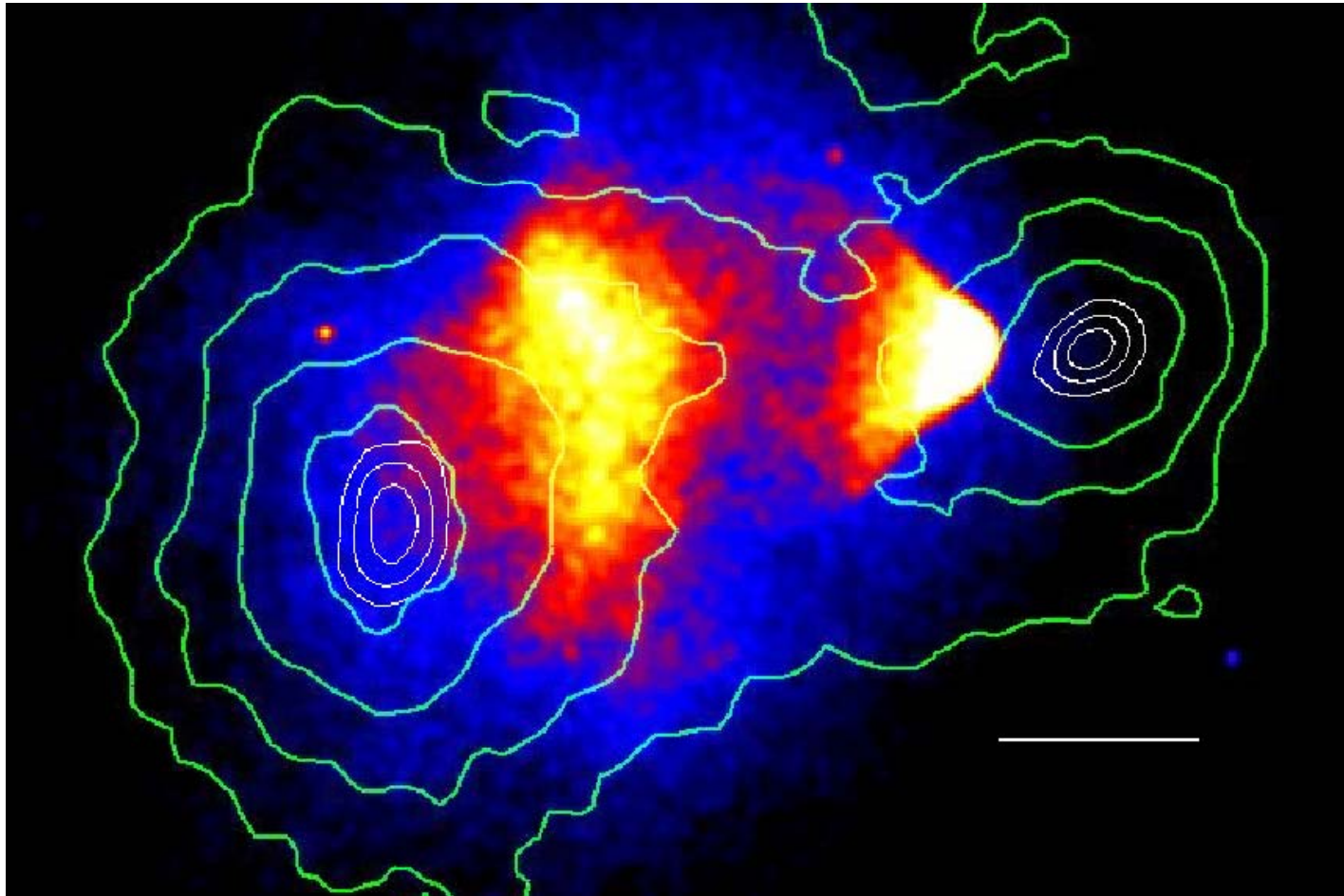


Masse totale

Est-ce la preuve de l'existence de matière non-baryonique?

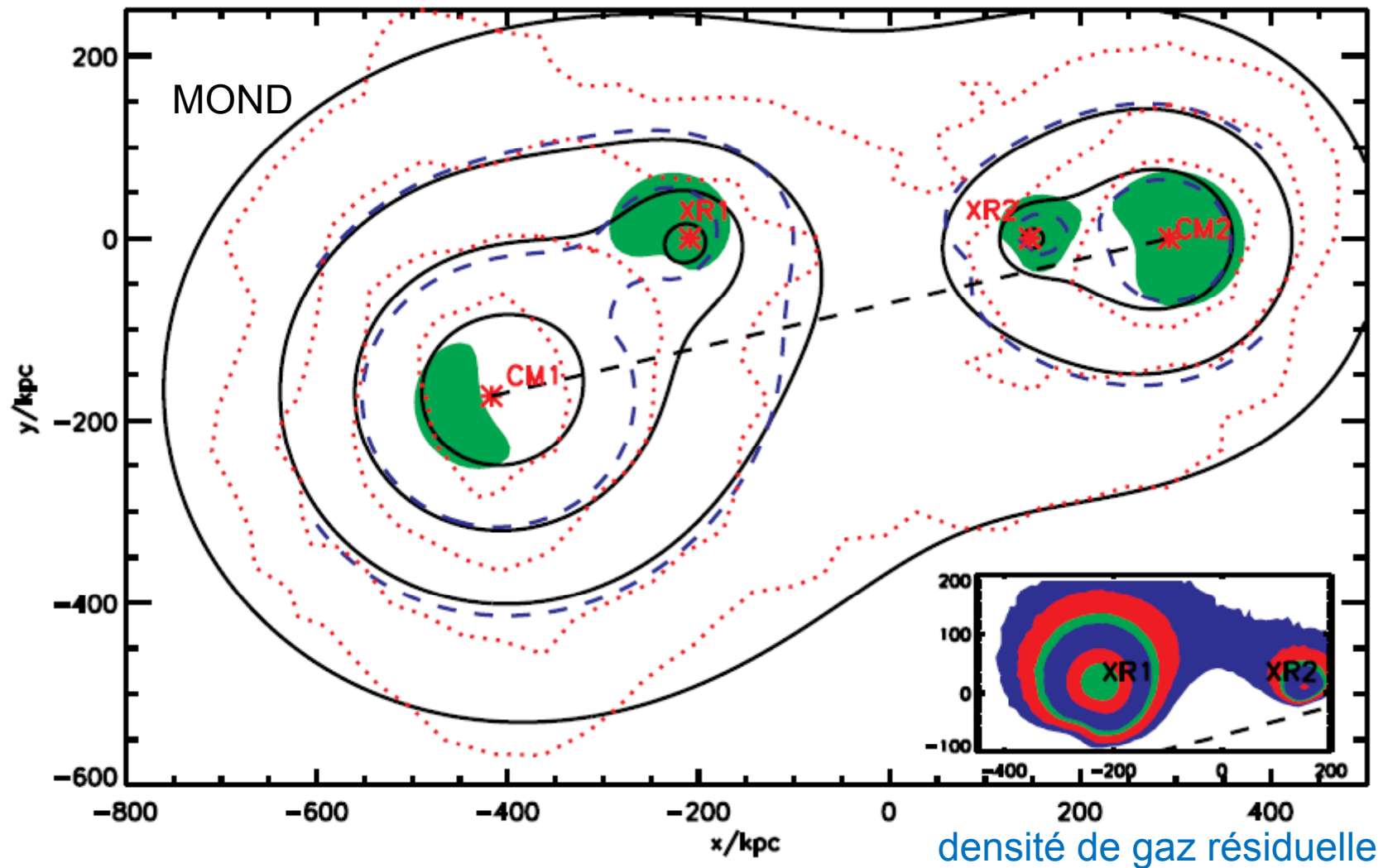
Possible d'expliquer les observations avec MOND et les neutrinos, avec le pourcentage habituel (masse 1-2 eV) Angus et al (2007)

Décalage masse totale/ gaz chaud



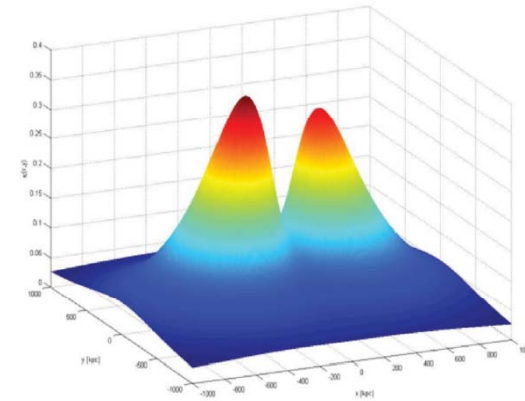
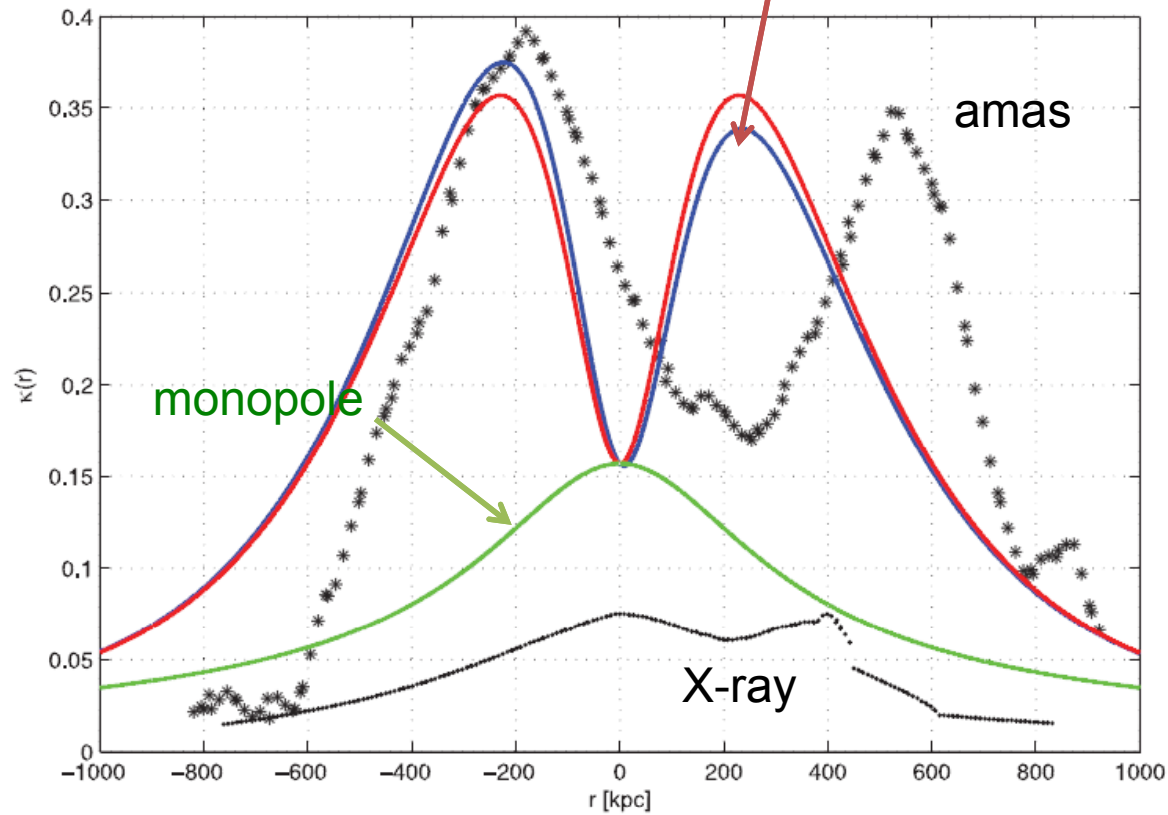
Modèle du boulet dans MOND

.....Clowe et al 2006, —Angus et al 2007 v dans les zones vertes

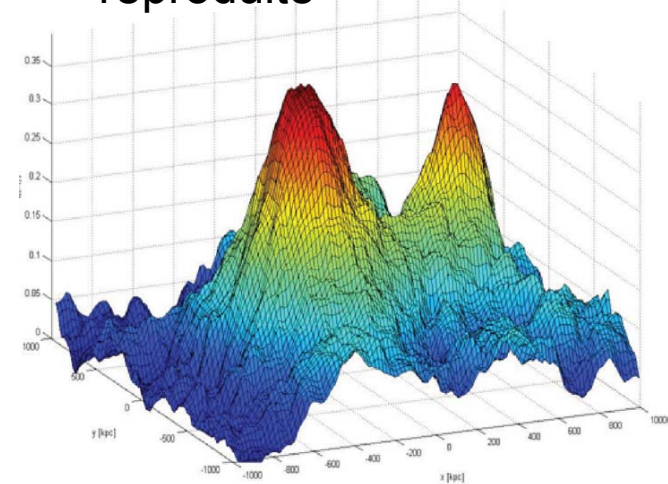


Modèle MOND + Finsler

Li et al 2013, avec anisotropie (quadrupole)



Convergence bien reproduite



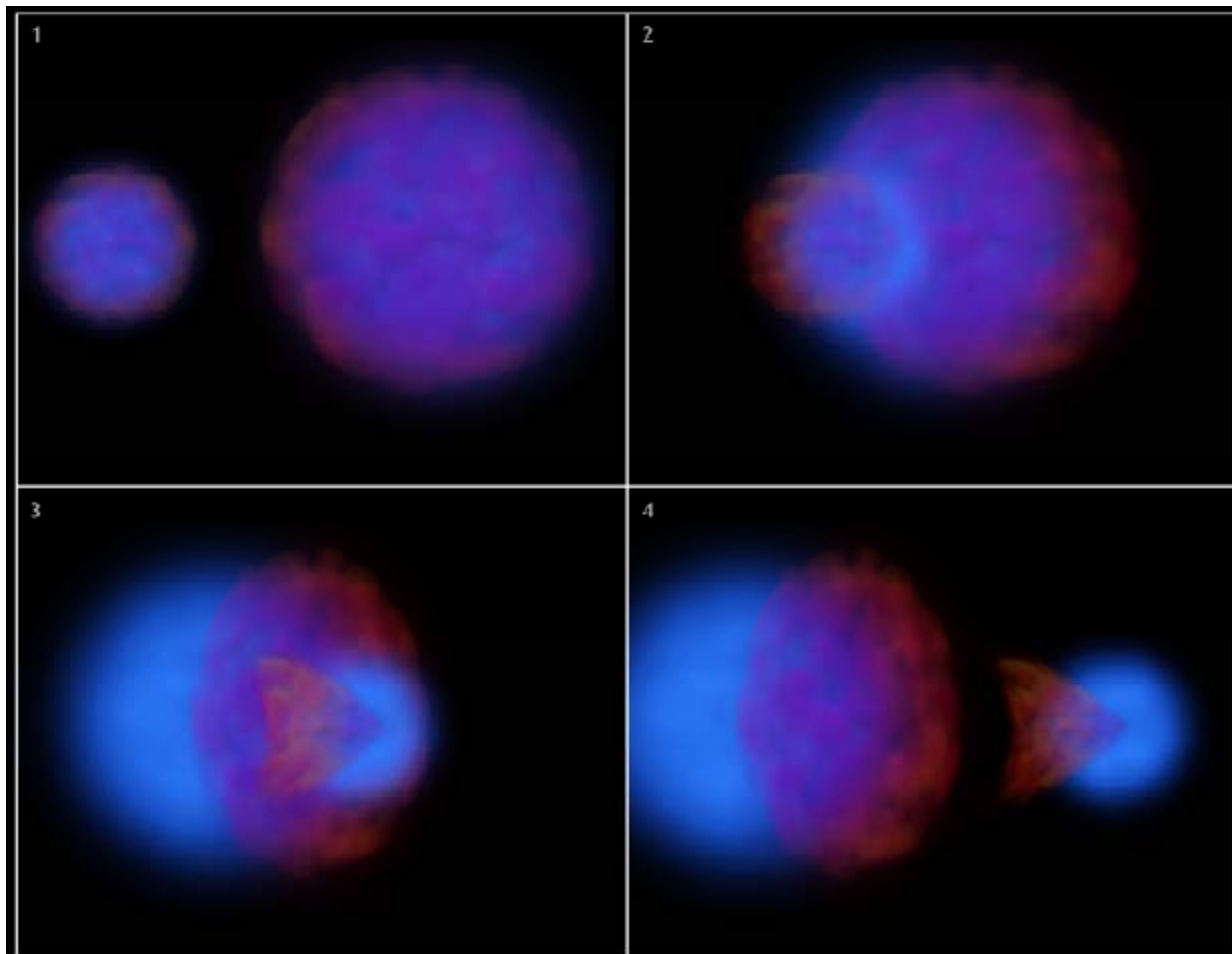
observations

Simulation CDM

La vitesse de la collision est obtenue

à partir de la forme du choc = $4700_{\pm 500}$ km/s (Mach 3)

→ difficile de réconcilier avec les modèles de Matière Noire



CDM peut seulement
 $V < 3500$ km/s
MOND > 4500 km/s

Collision à 16%
sur-estimée?

Peut-être pas
Thompson et al 2014

Abell 520

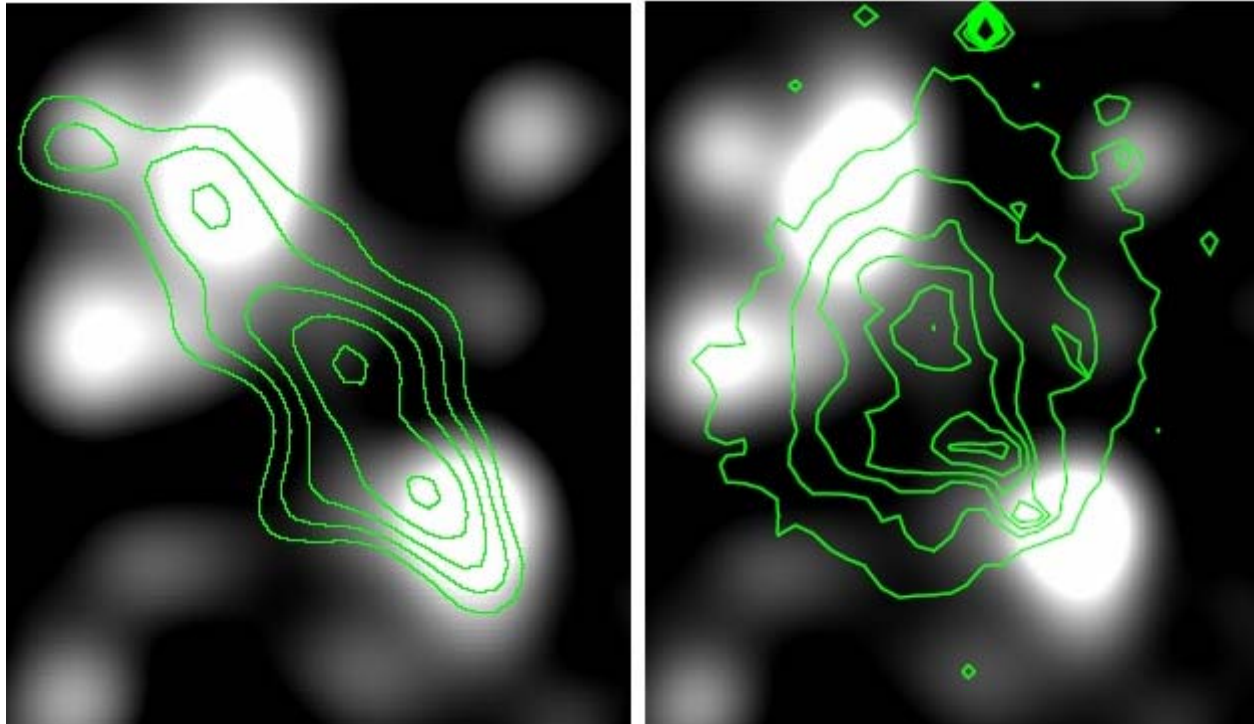
$z=0.201$

Rouge= gaz X
Contours= lentilles
→ Matière noire
coincide avec le gaz X
Mais vide de galaxies

Ce cas ne peut pas être
expliqué par le modèle
CDM standard,
Il faut un modèle
de MN **avec collisions**



Abell 520: coalescence d'amas



Contours= masse totale

Contours = gaz X

Section efficace $\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} \sim 4 \text{ cm}^2/\text{g}$, en contradiction
Avec le boulet $\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 1 \text{ cm}^2/\text{g}$

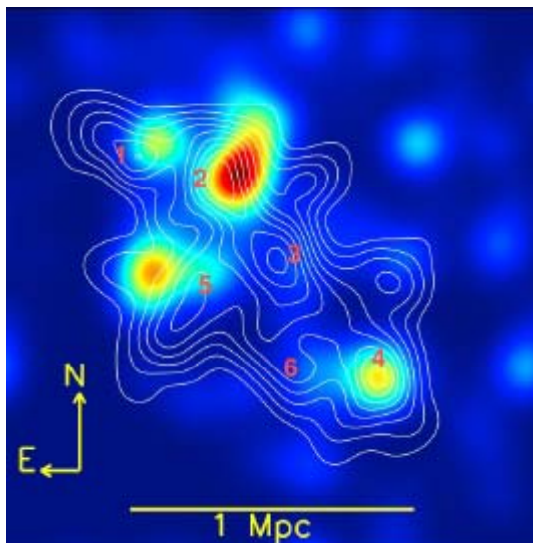
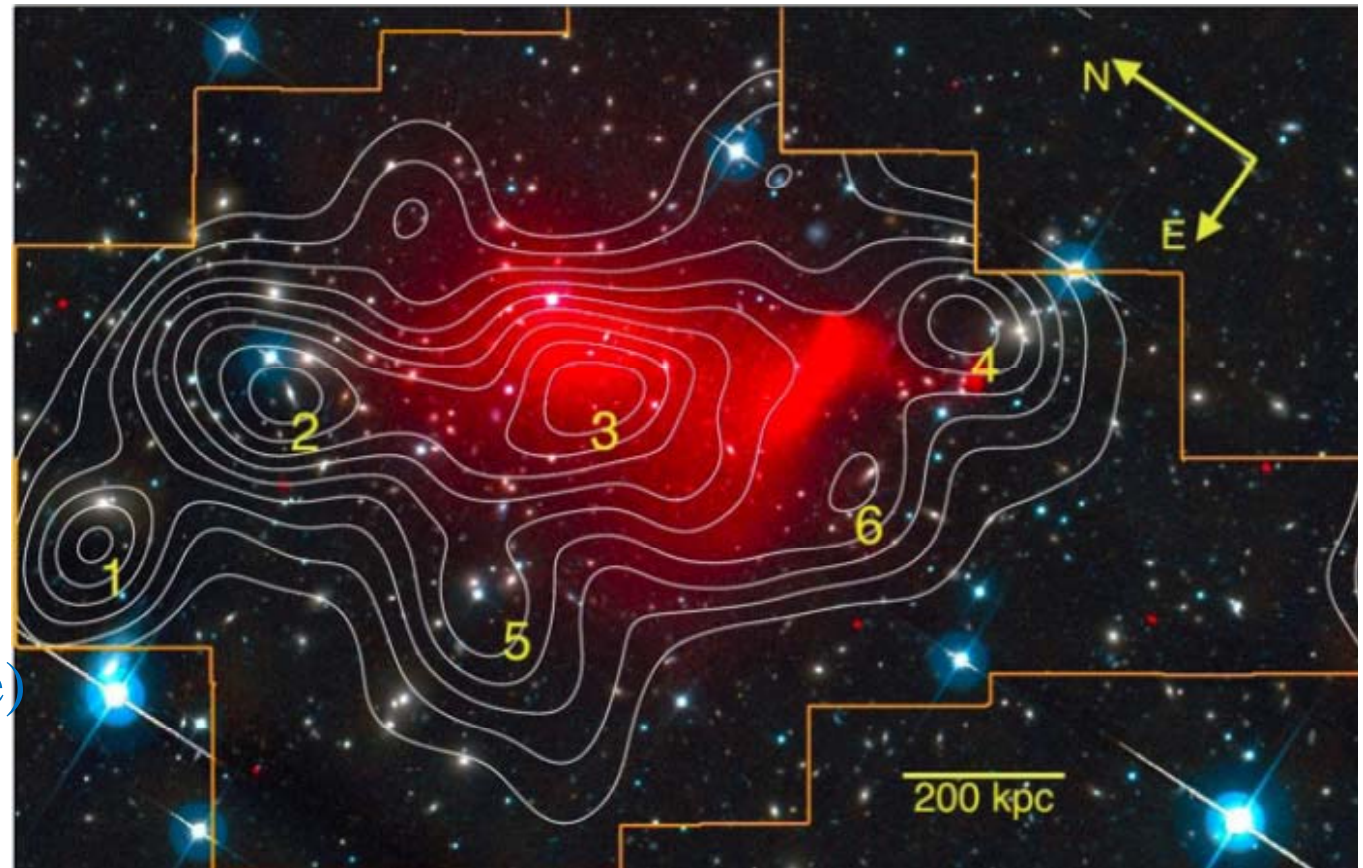
→ Controverses sur le lensing, la présence des galaxies.²³

A520: cœur sombre, associé à l'émission X

Jee et al 2012, 2014

Contours de MN
(lentilles HST)
Sur les rayons-X
(rouge)

Image B CFH (bleue)



Section efficace de collisions des particules de MN?

$$\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} \sim 3.8 \text{ cm}^2/\text{g}$$

Différent du boulet, où $\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 1 \text{ cm}^2/\text{g}$

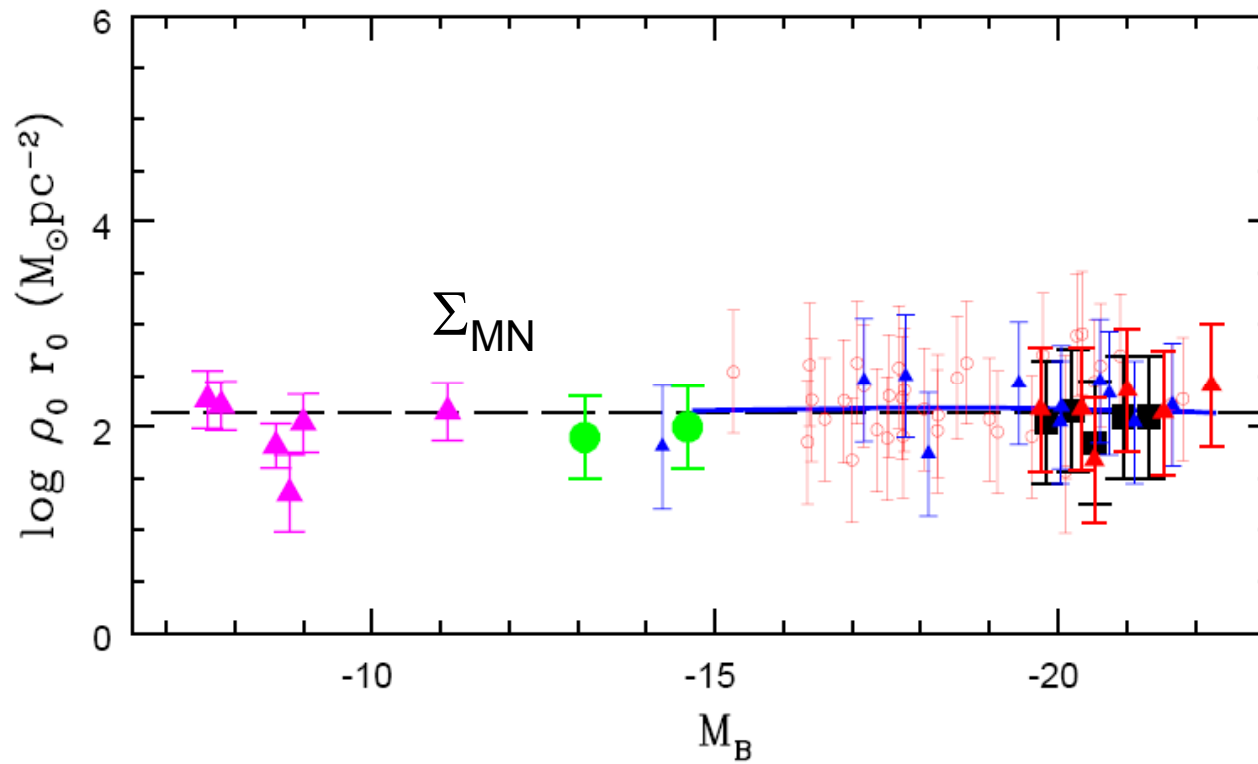
Contraintes sur MOND

dynamique des galaxies & observations

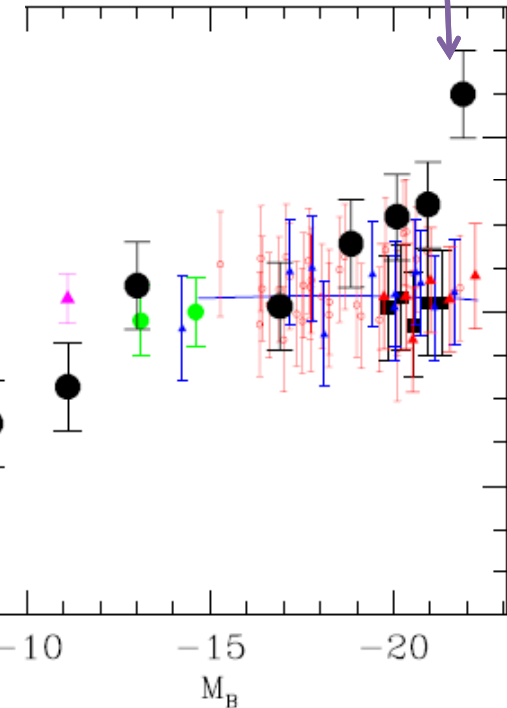
Stabilité, évolution & formation des galaxies :
tests de la théorie?

Peut-on déterminer la forme de la
fonction d'interpolation μ ?

Lois d'échelle, densité de surface de la MN



Masse stellaire



Kormendy & Freeman 2004

Gilmore et al 2007, **Donato et al 2009**

$$\Sigma_M = 142 M_\odot/\text{pc}^2$$

$$\Sigma(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_p dz = \Sigma_M [\mathcal{U}(\infty) - \mathcal{U}(0)] = \Sigma_M \int_0^{\infty} L(x) dx \equiv \lambda \Sigma_M,$$

Implications

→ $\Sigma_M = 138 (a_0/1.2 \text{ E}10\text{m/s}^2) M_\odot/\text{pc}^2$

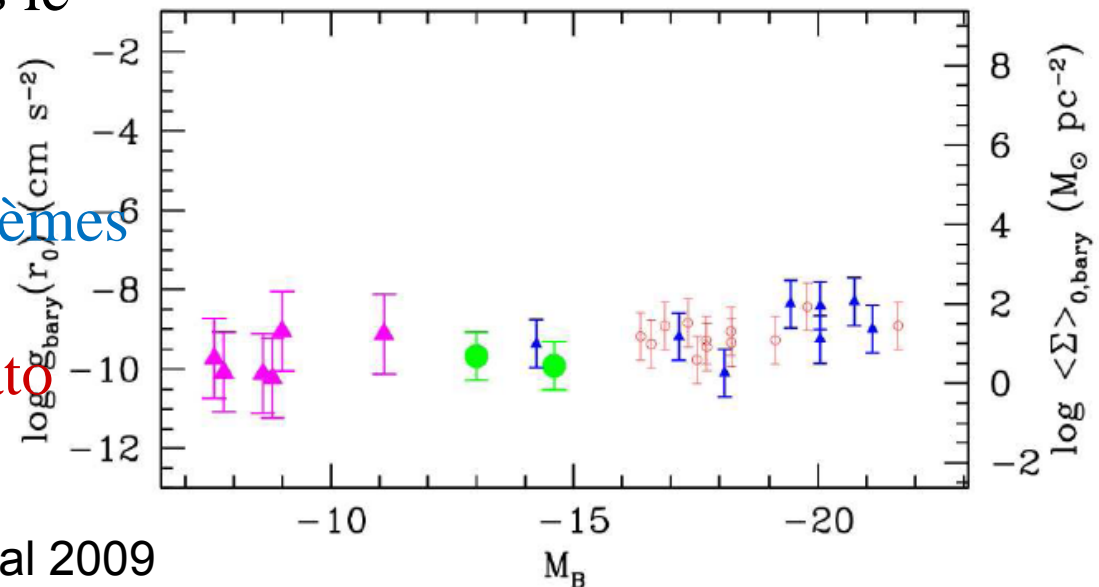
Dans MOND: la MN « phantom » que l'on ajoute, si la gravité est Newtonienne, a l'apparence d'une cste Σ , $\propto a_0$
(Milgrom 2009)

Une grande Σ_b est associée à un grand rayon de cœur de la MN

Le rayon de cœur de la MN est là où l'accélération tombe en-dessous de $6 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$

Au moins, si le centre est dans le régime Newtonien

Il est possible d'avoir des systèmes Avec des densités $< \sim 0.5 \Sigma_M$
Pas dans le catalogue de Donato



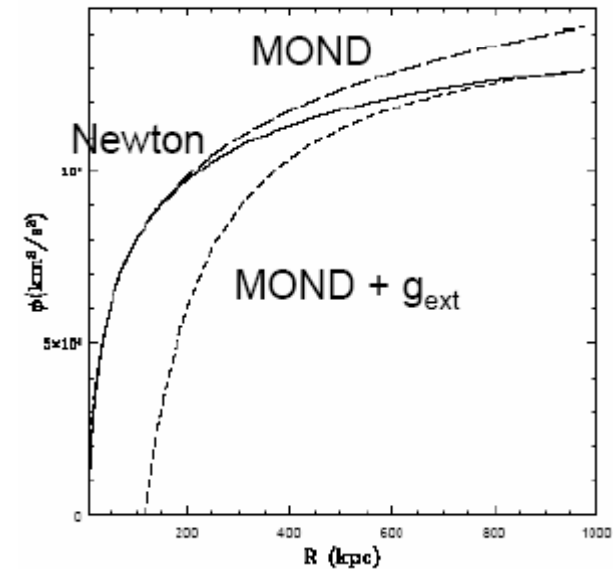
Vitesse d'échappement

Potentiel dans le régime MONDien $\Phi(r) = (GMa_0)^{1/2} \ln r$

$\frac{1}{2} V_{\text{esc}}^2 = \Phi(\infty) - \Phi(r) \rightarrow$ pas d'échappement possible!

Mais une galaxies n'est jamais totalement isolée \rightarrow External field effect (EFE)

$$-\nabla \cdot [\mu(x)\mathbf{g}] = 4\pi G\rho(X, Y, Z), \quad x \equiv \frac{|\mathbf{g}|}{a_0}.$$



EFE: « External Field Effect »

Dans un champ extérieur g_e , par exemple dans la direction X

A grande distance, équivalent à une dilatation Δ

$$\Phi_{\text{int}}^{\infty}(X, Y, Z) = - \frac{GM_{\text{int}}}{\mu_m \sqrt{(1 + \Delta)(Y^2 + Z^2) + X^2 + s^2}},$$

Définissons le potentiel interne Φ_{int}

$$\nabla^2 \Phi_{\text{int}} + \Delta \frac{\partial^2}{\partial X^2} \Phi_{\text{int}} \rightarrow 4\pi G\rho/\mu_m,$$

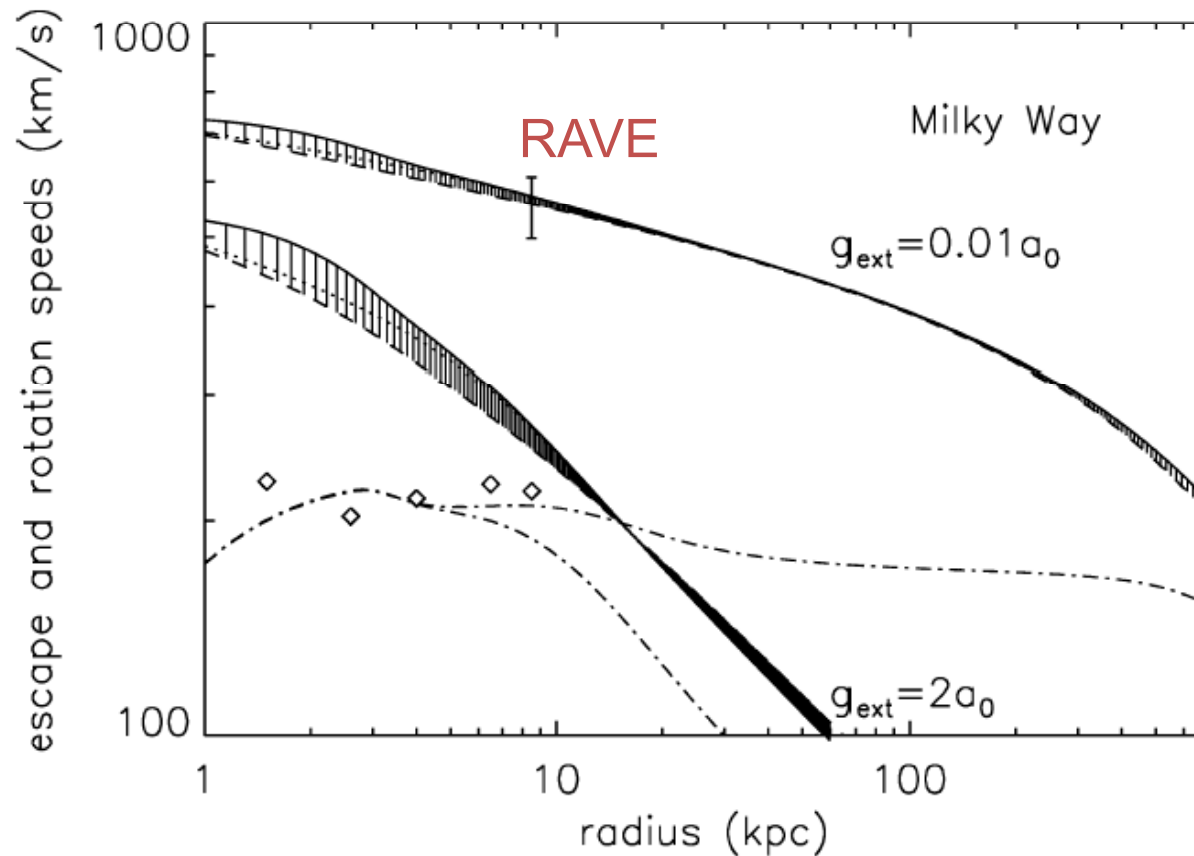
Où $g \ll g_e \ll a_0$

**On retrouve la dépendance Képlérienne,
avec la renormalisation $G \rightarrow Ga_0/g_e$**

Voie lactée: effet d'Andromède

Observations RAVE (Smith et al 2007) $\rightarrow 498 < v_{\text{esc}} < 608 \text{ km s}^{-1}$

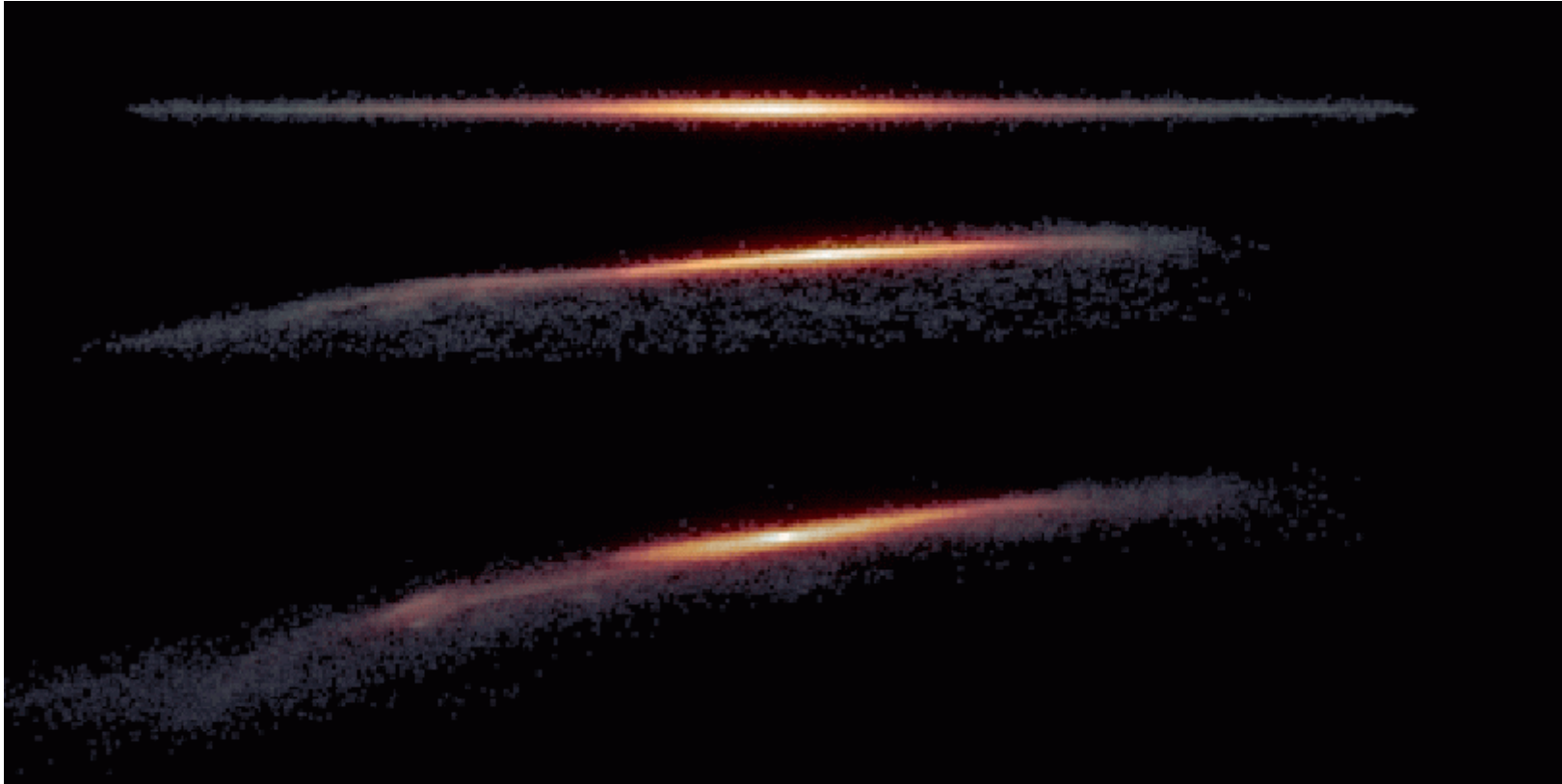
544 km/s $\rightarrow g_e = a_0/100$



Wu et al 2007
Simulations avec
le modèle de
Besançon

EFE: précession

Newton: pas d'effet



MOND: effet non-linéaire, couple gravitationnel et précession

Violation du principe d'équivalence fort

→ Origine des warps? (Brada & Milgrom 2000, LMC/MW)

Orbite du LMC (Grand Nuage de Magellan)

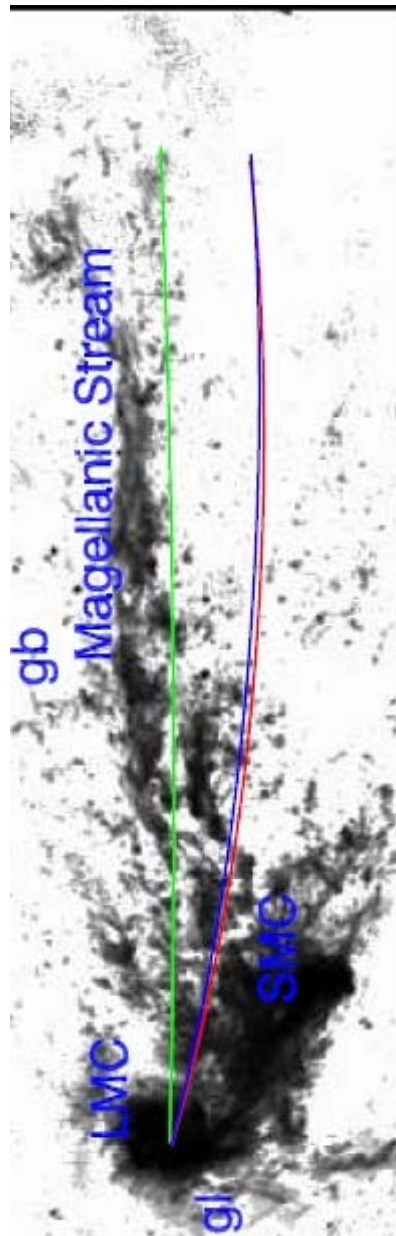
Mesures des mouvements propres avec **HST**
 Revèlent que la vitesse du LMC est 378km/s
 (SMC 302km/s)

Kallivayalil et al 2006, Piatek et al 2007

100km/s de plus qu'auparavant, proche de V_{escape}

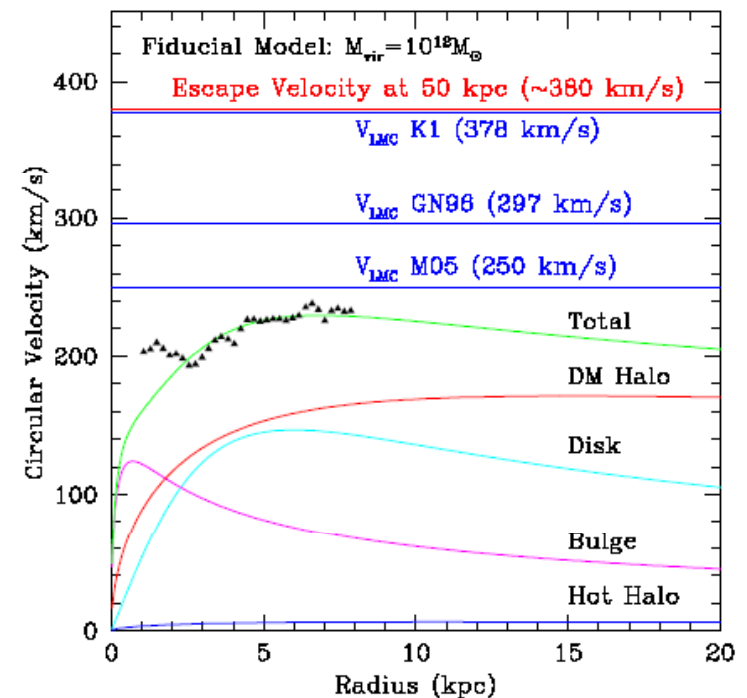
→ Premier passage de LMC+SMC

→ Origine du Courant Magellanique? *Besla et al 2007*



Forces de marée, ou
 balayage par pression
 dynamique? Efficacité?

Ruzicka et al 2008,
Mastropietro 2008



Stabilité des disques galactiques

spirales et barres sont les moteurs de l'évolution

CDM: Les halos sphéroïdes stabilisent les disques
MOND; disques entièrement auto-gravitants

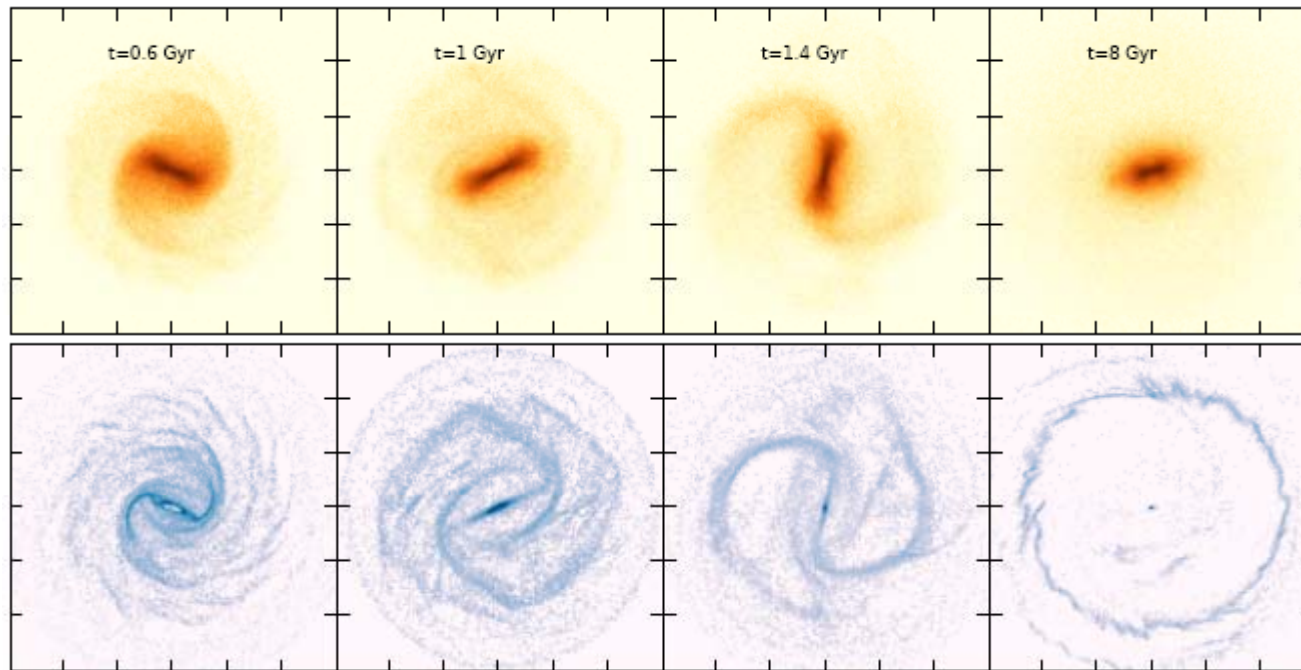
Cependant, la gravité n'est plus linéaire
mais en $M^{1/2}$ dans le régime MOND

Les barres se développent par transfert de moment
angulaire

→ vers les halos noirs sphéroïdaux

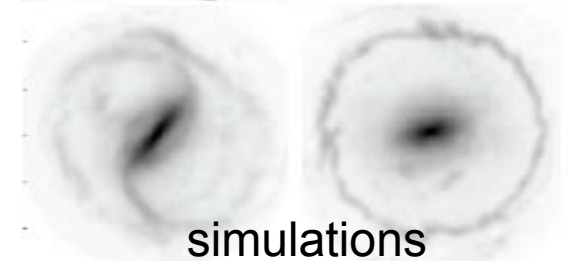
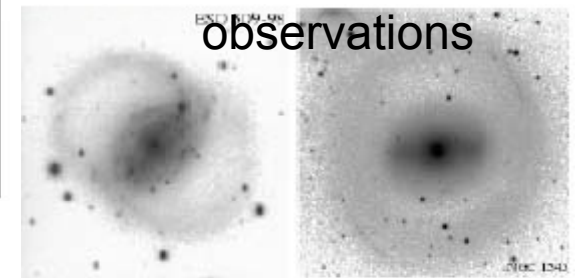
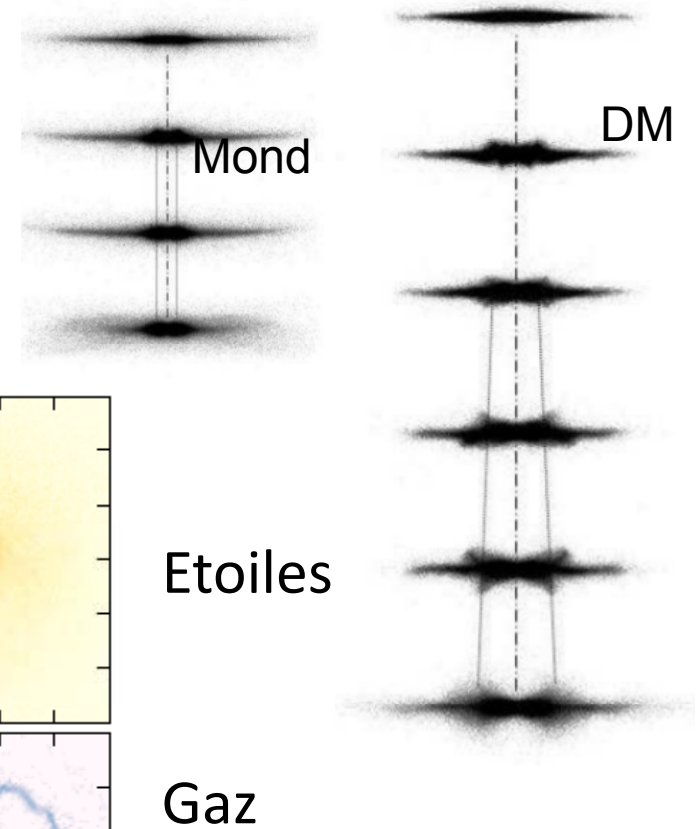
Influence du halo noir

Dynamique des galaxies,
Formation des spirales et des barres

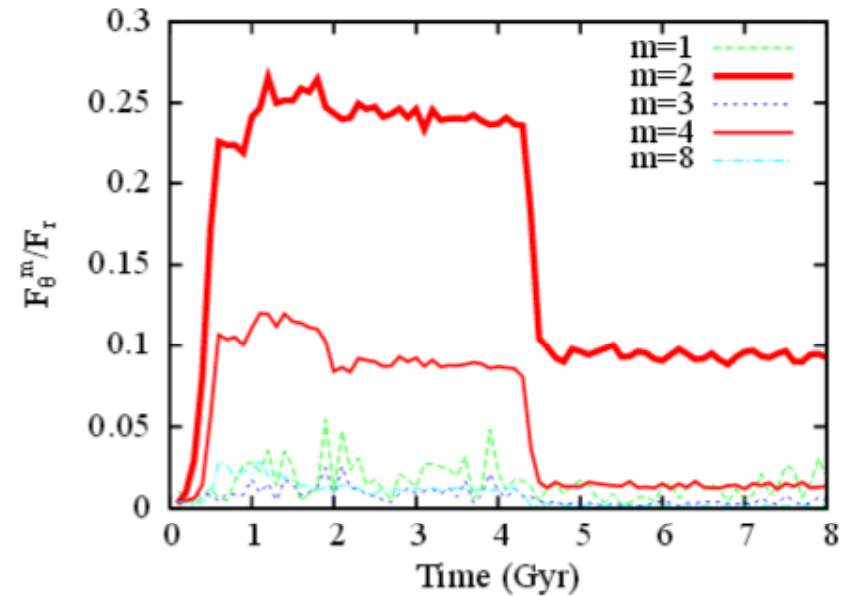
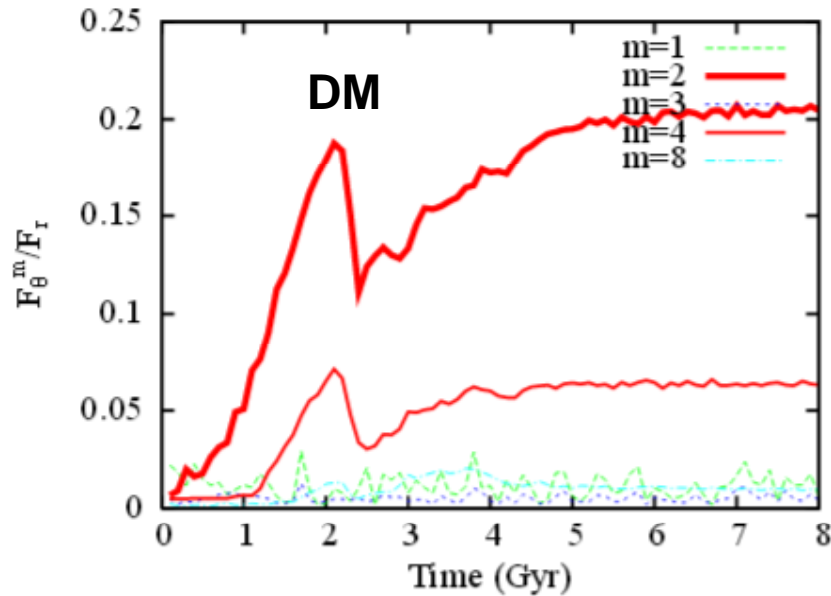


Anneaux aux résonances
→ Donnent la vitesse de la barre

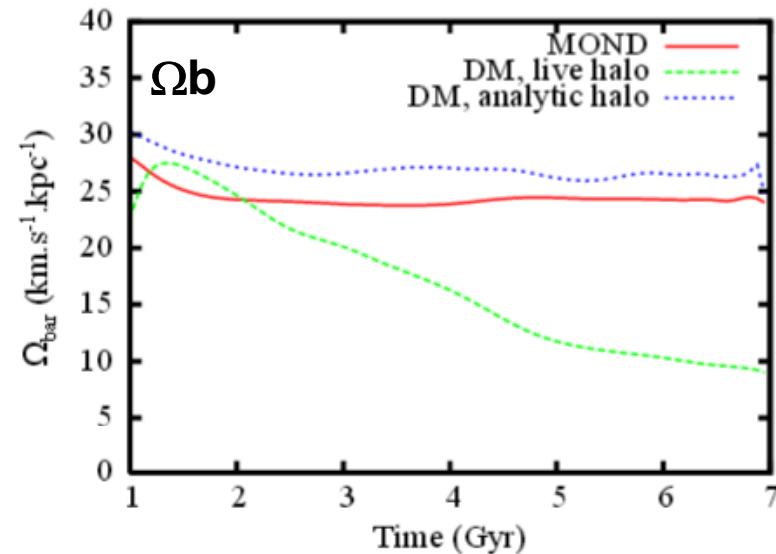
Tiret & Combes 2007



Force et vitesse de la barre avec ou sans MN



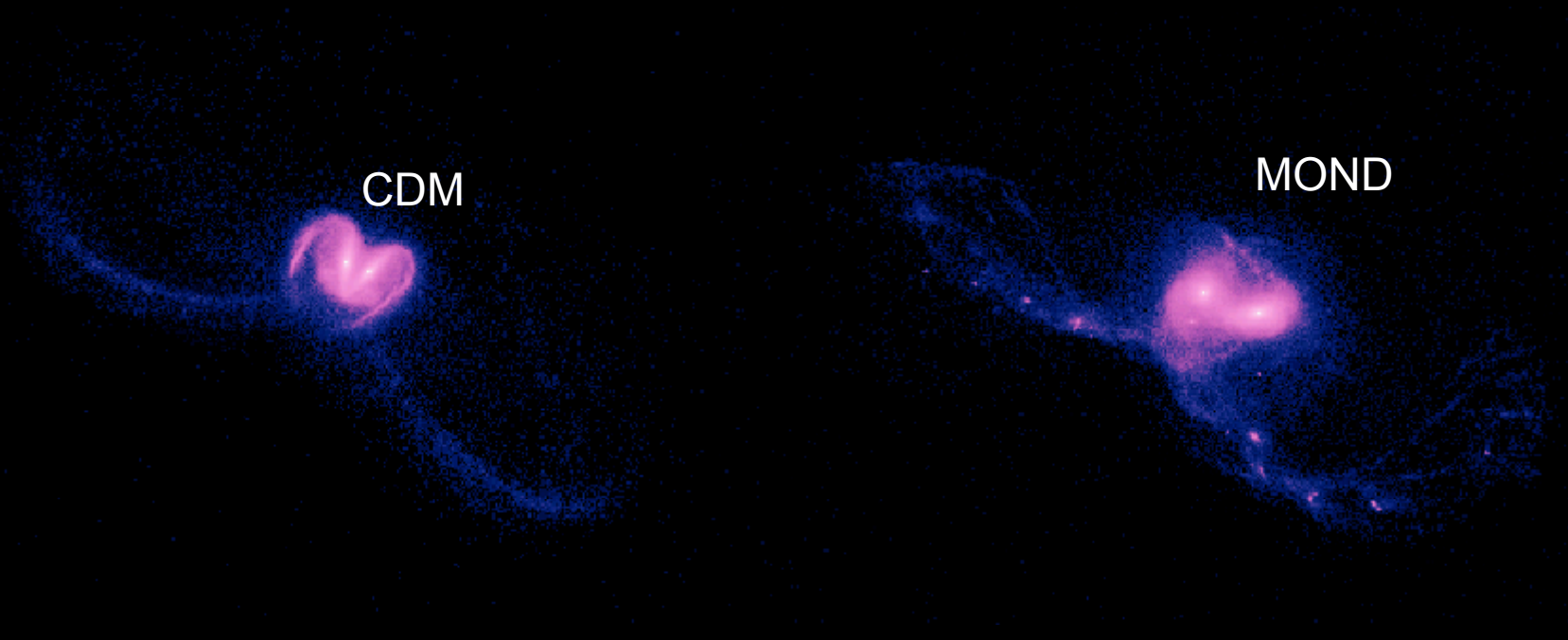
Avec MN, la barre apparaît plus tard, et peut se reformer après l'épisode peanut par échange de MA avec le halo, ➔ Mais Ω_b tombe



Interactions de galaxies: les Antennes

MOND versus CDM

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



Même résultat trouvé pour des galaxies sphériques ne contenant que des étoiles (Nipoti et al 2007)

Simulations des Antennes

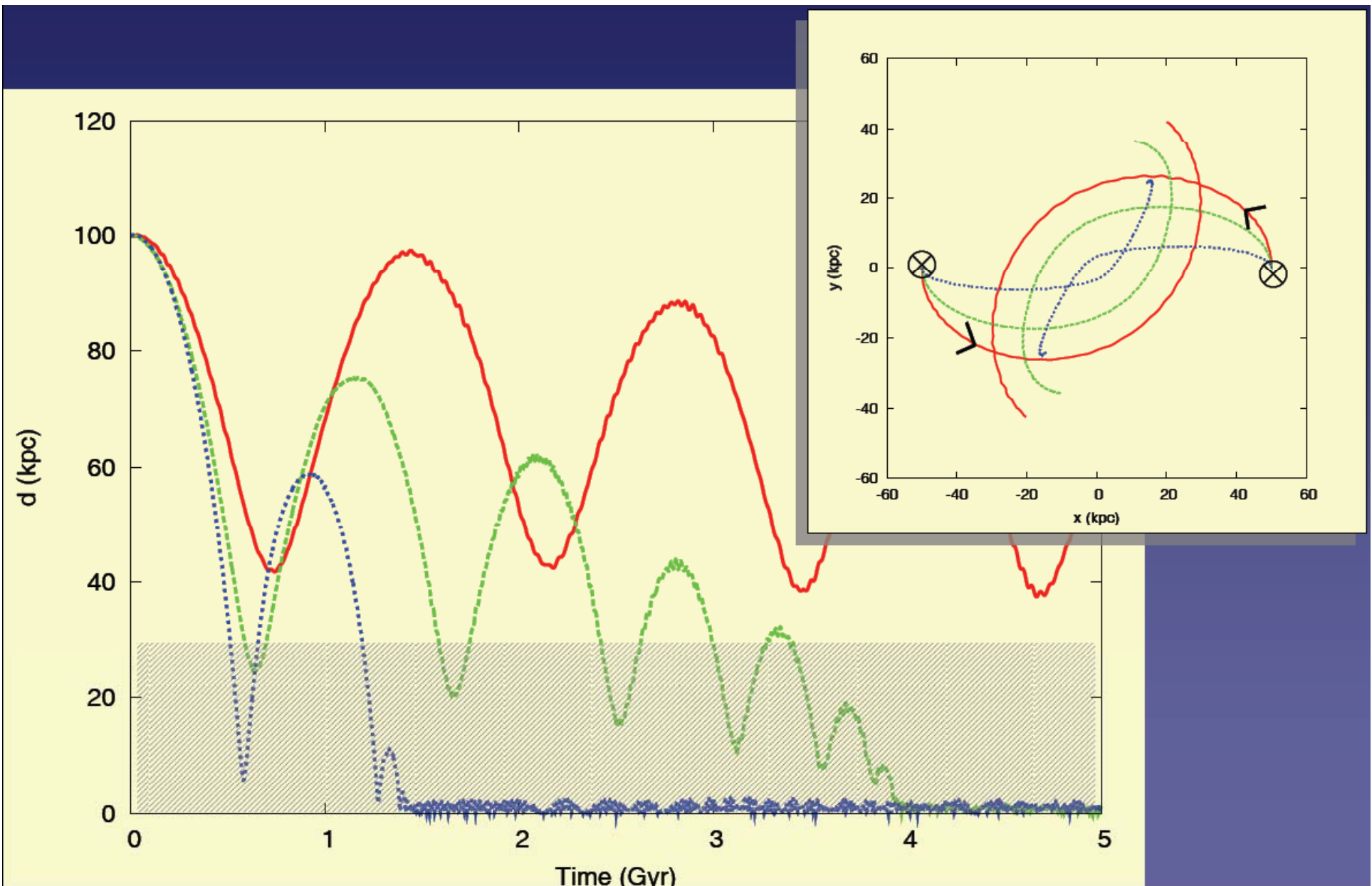
Dégénérescence: starburst à chaque pericentre?

Observations

MOND

Les queues de marée sont plus longues au dernier passage

Friction dynamique



Débat sur la friction dynamique

Analytique: la friction dynamique DF est **prédite plus forte dans MOND**
Que dans le système équivalent Newtonien avec MN

Ciotti & Binney 2004 (CB04), Nipoti et al 2008

Mais les simulations montrent clairement DF **moins efficace**

CDM, beaucoup de particules acquièrent E et MA, et le

concept même de friction dynamique est inapplicable

→MOND, un petit nombre de particules dans les parties externes

Acquièrent une grande quantité de AM (approx perturbative invalide)

Nipoti et al 2007, Tiret & Combes 2007

Nombre de fusions/temps de fusion

CDM: friction dynamique sur les particules de MN très efficace

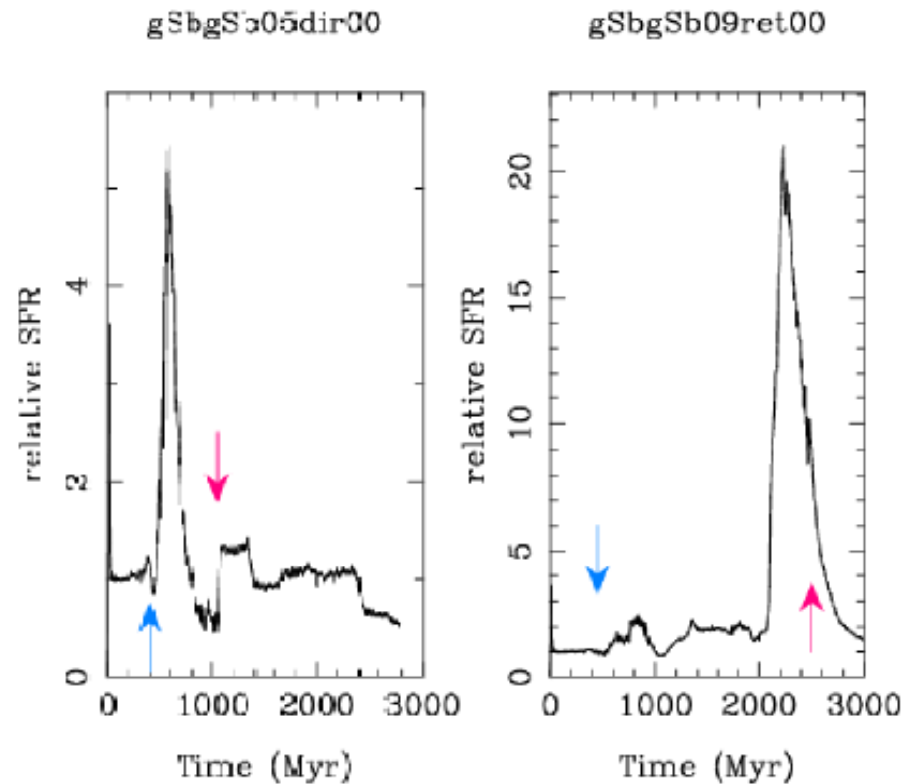
→ Fusion en un passage

MOND: avec la même V initiale
La fusion nécessite plusieurs passages

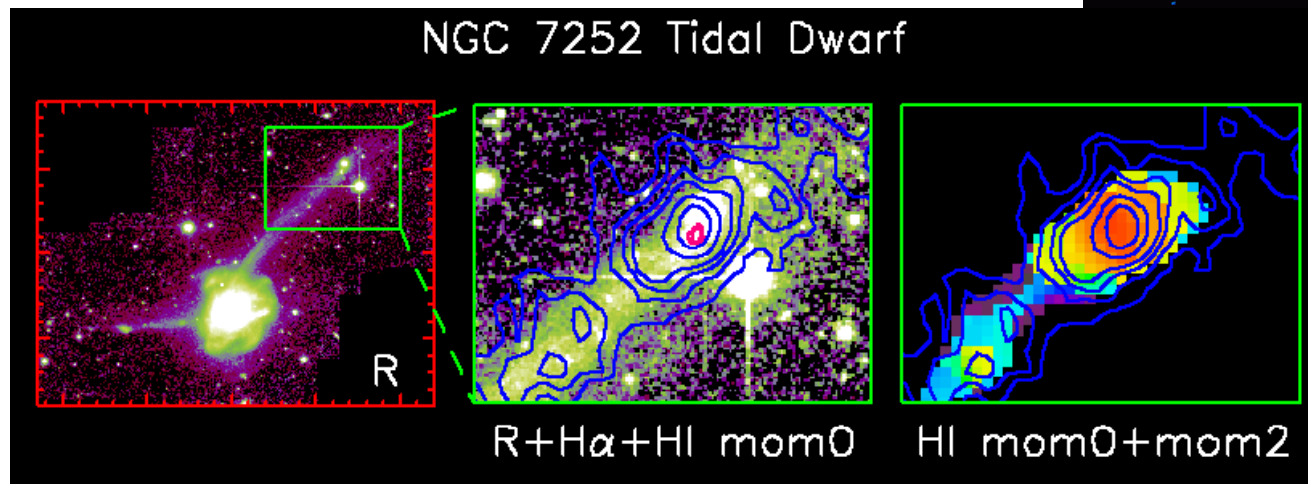
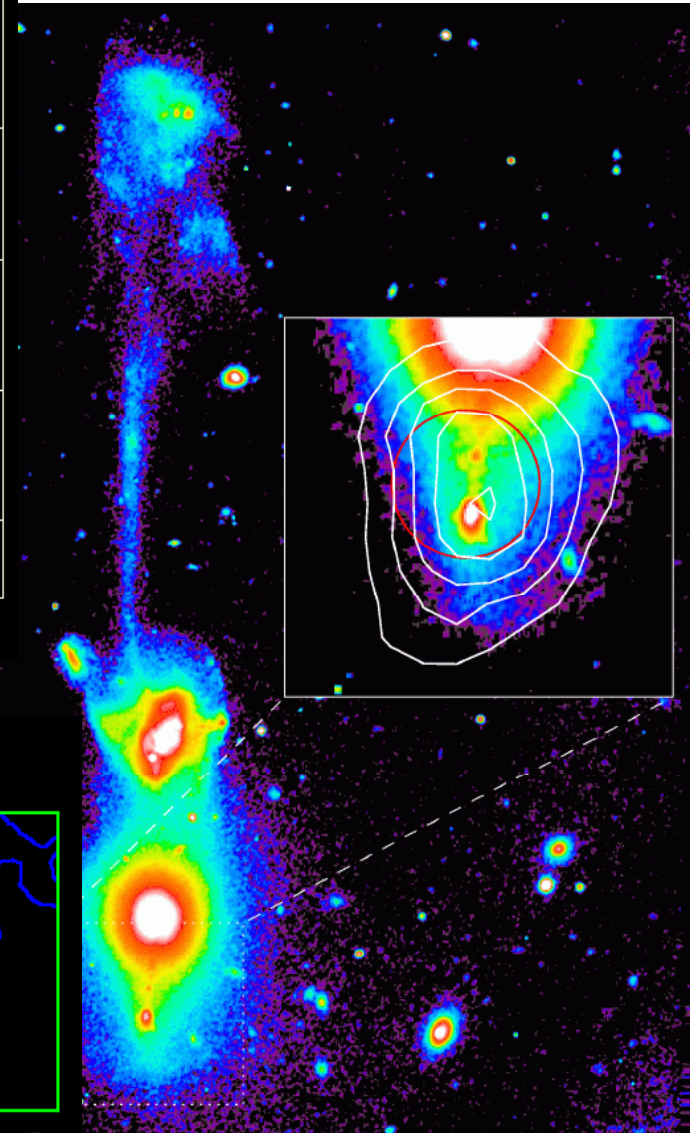
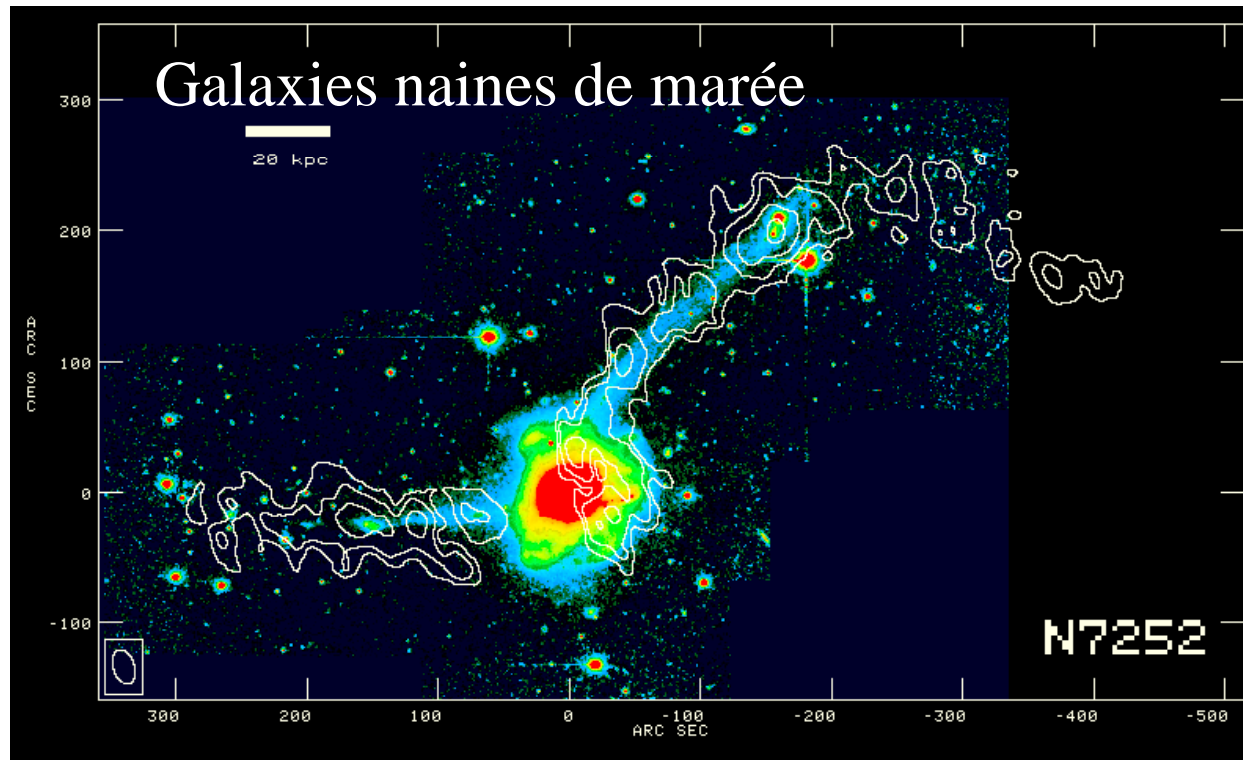
Starburst à chaque passage,
Au péricentre de l'orbite

→ Nombre de « fusion/SB » peut être expliqué de 2 façons

Fusion= Starburst?



Di Matteo et al 2007

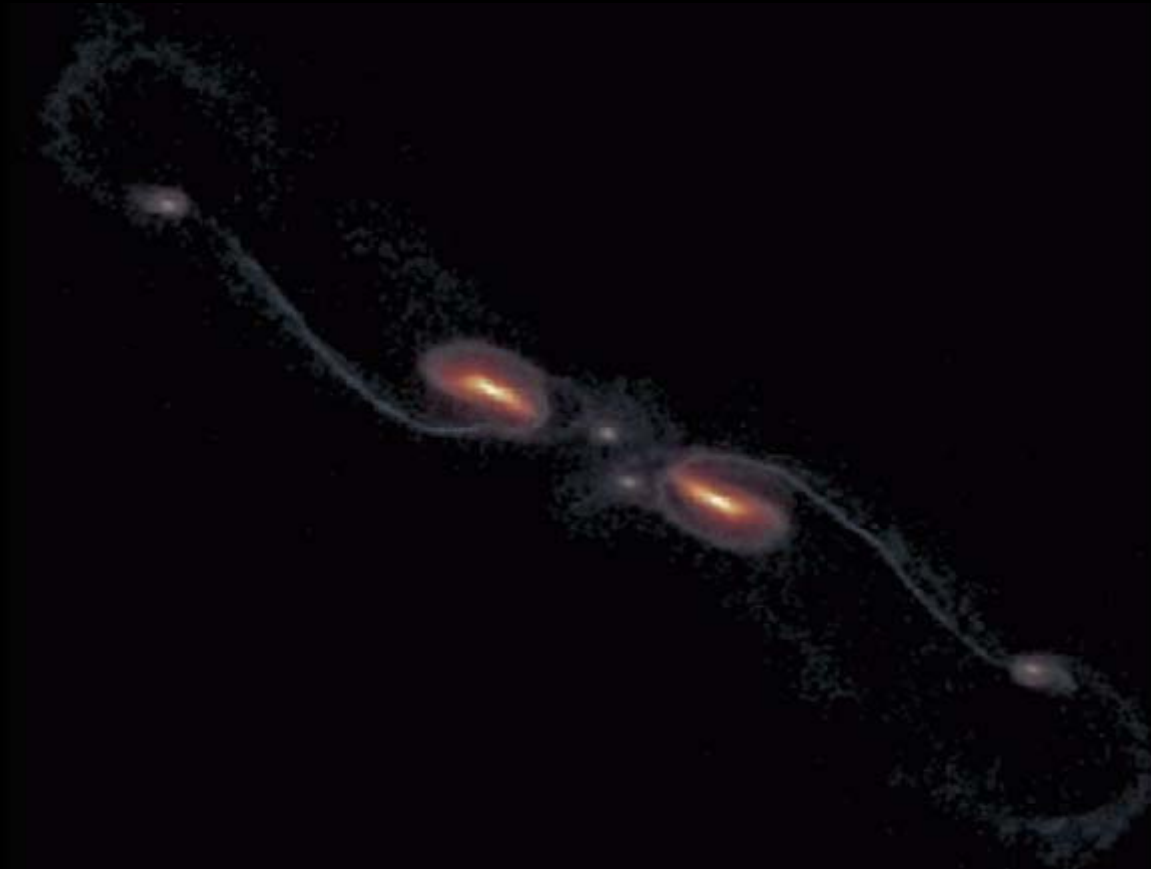


Formation de naines de marées

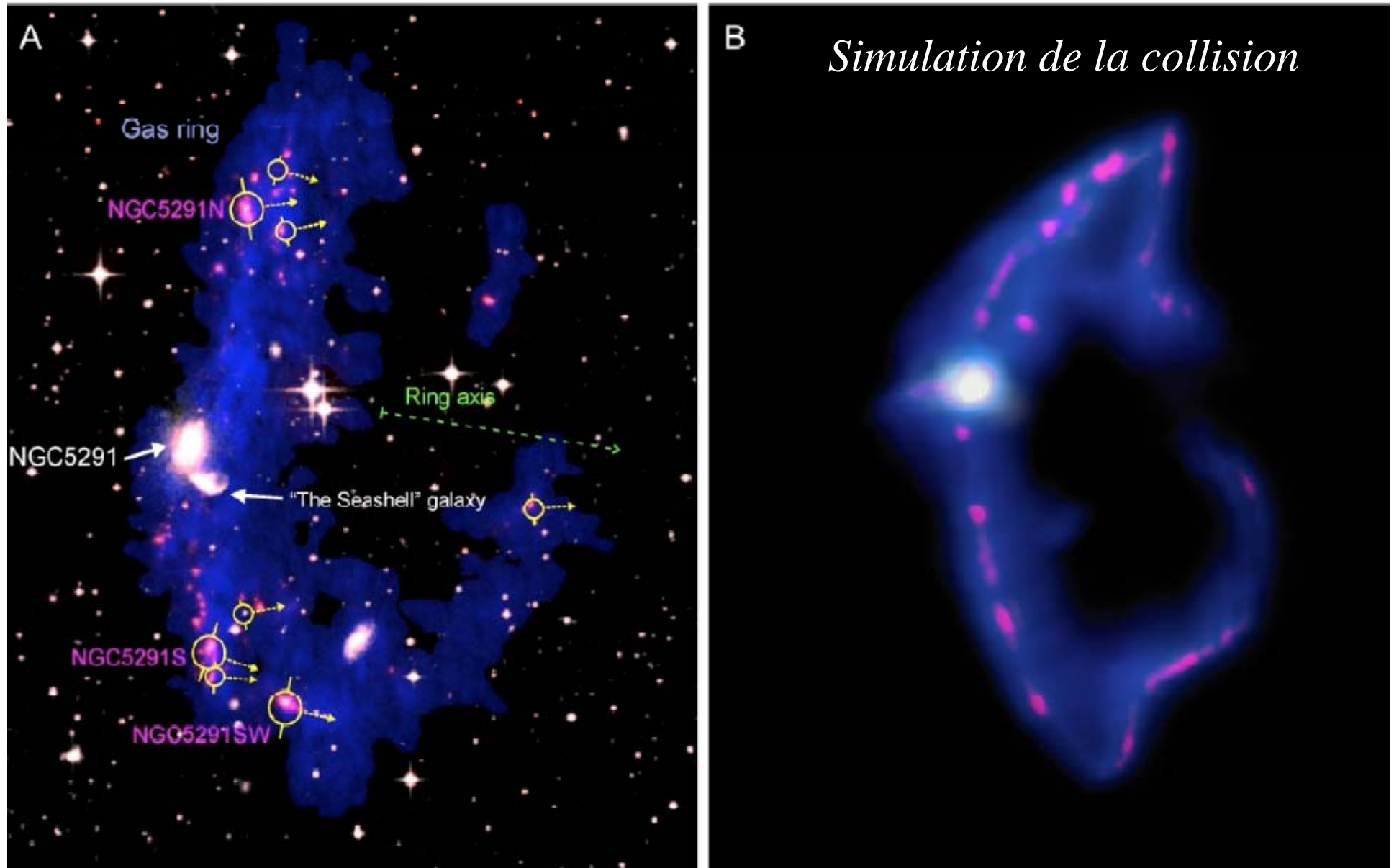
Formation des naines de marée

Echange de MA au sein du disque: → plus facile avec MOND
de former les naines de marée

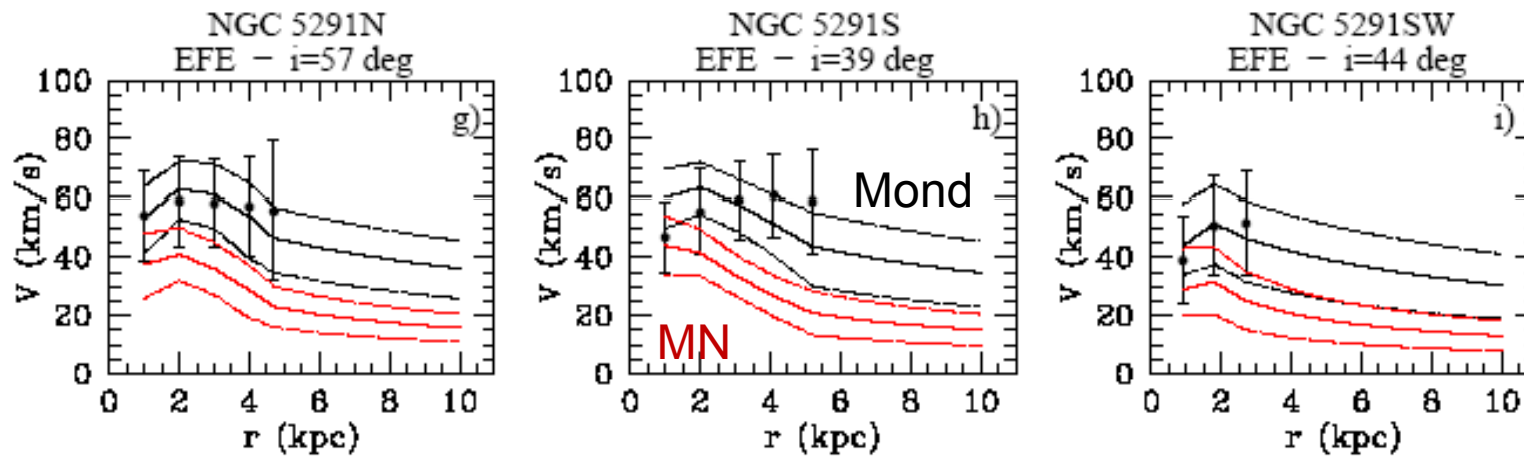
En CDM, requiert une distribution de MN très étendue (Bournaud et al 03)



Naines de marée: anneau HI de N5291



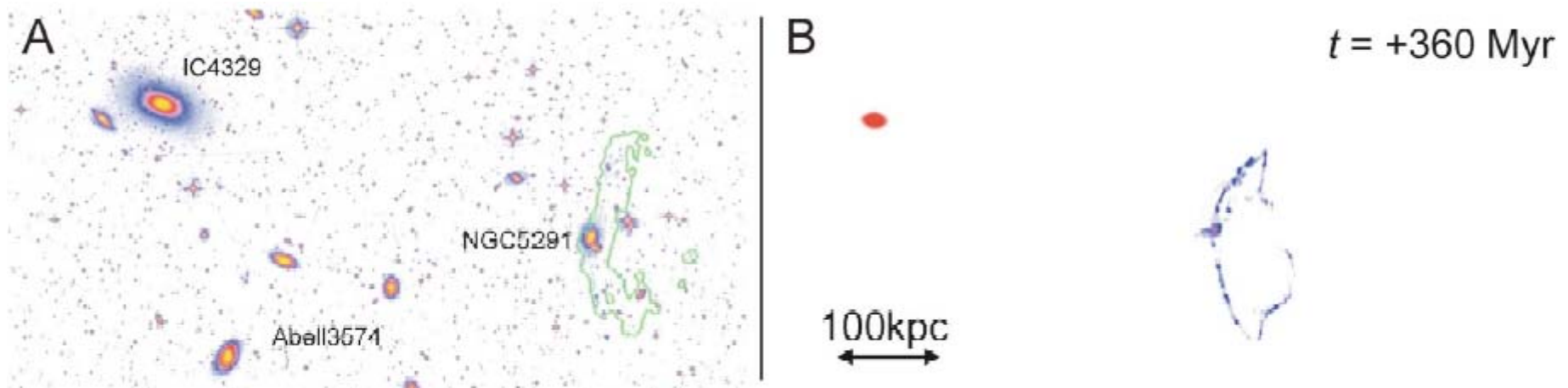
Dynamique des naines de marée



Mieux avec MOND, *Gentile et al 2007*

Le modèle MN requiert des baryons noirs: H_2 froid

Simulations $\rightarrow i=45^\circ$ (Bournaud et al 07).



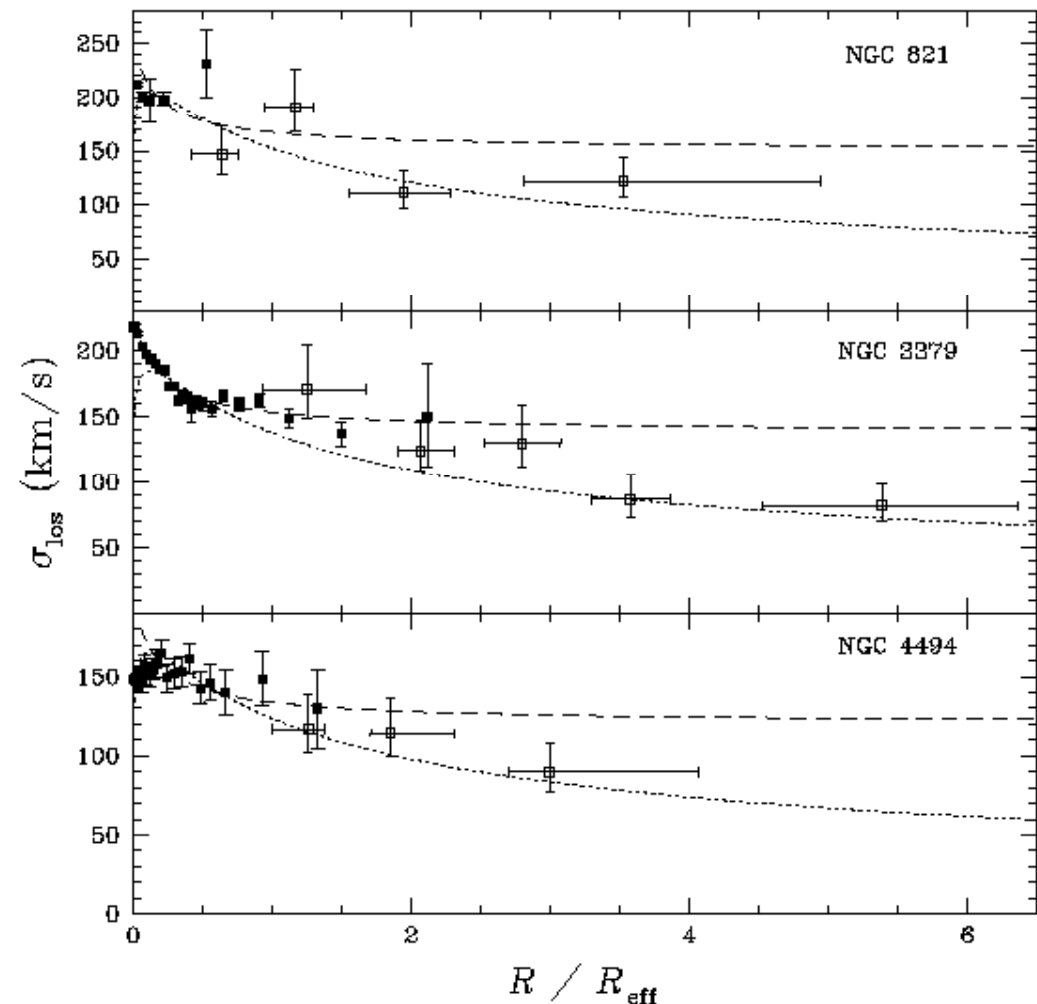
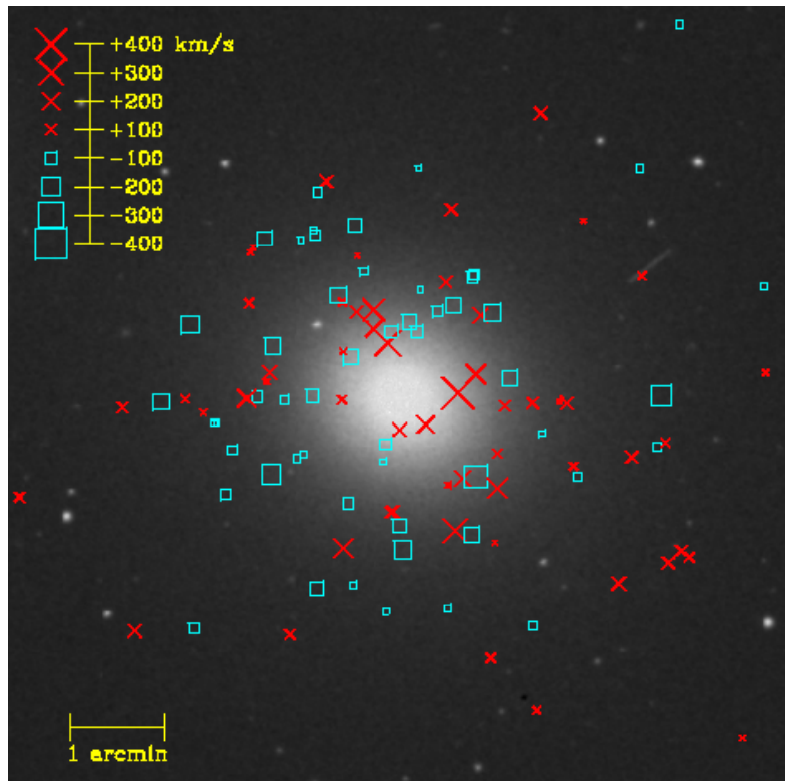
Matière noire dans les Elliptiques

Nébuleuses planétaires comme traceur: Romanowsky et al 2003

Pas d'évidence de MN?? → Anisotropie?

..... Matière visible (isotrope)

- - - isotherme (isotrope)



Profil de MN à partir des satellites

SDSS, 2500 deg², 3000 satellites Mb=-16, -18 (galaxies -14)

Suppression des effets de projection

$\sigma_v = 120 \text{ km/s}$ à 20kpc et 60km/s à 350kpc (*Prada et al 2003*)

→ Déclin en $\rho \sim r^{-3}$ comme le profil de NFW (CDM)

σ_v dans 100kpc varie comme $L^{0.3}$, proche de la relation TF

En moyenne 2 satellites par galaxie, et 0.2 faux satellite

Voir aussi McKay et al (2002) $\sigma \sim L^{0.5}$ sur 1225 SDSS satellites

M_{260} compatible avec les effets de lentilles faibles

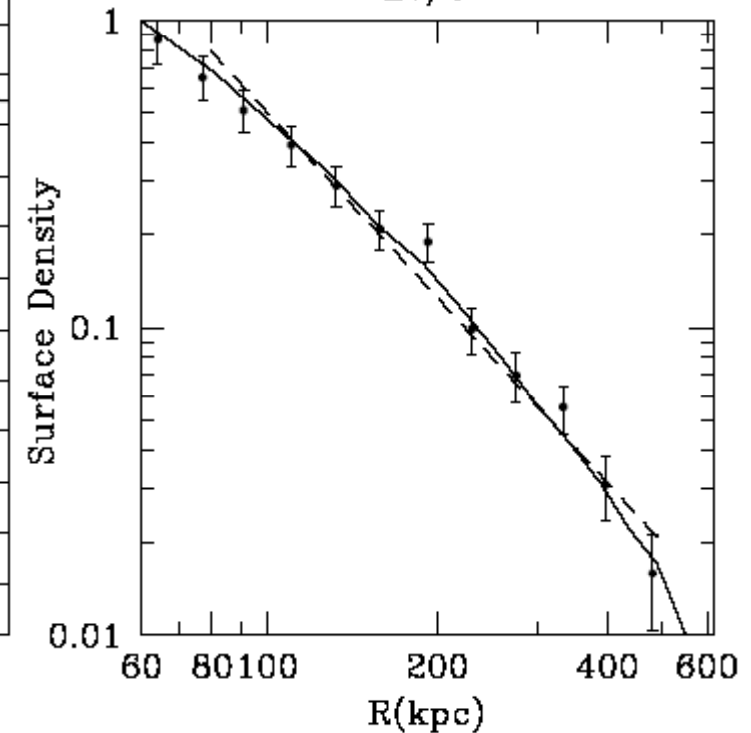
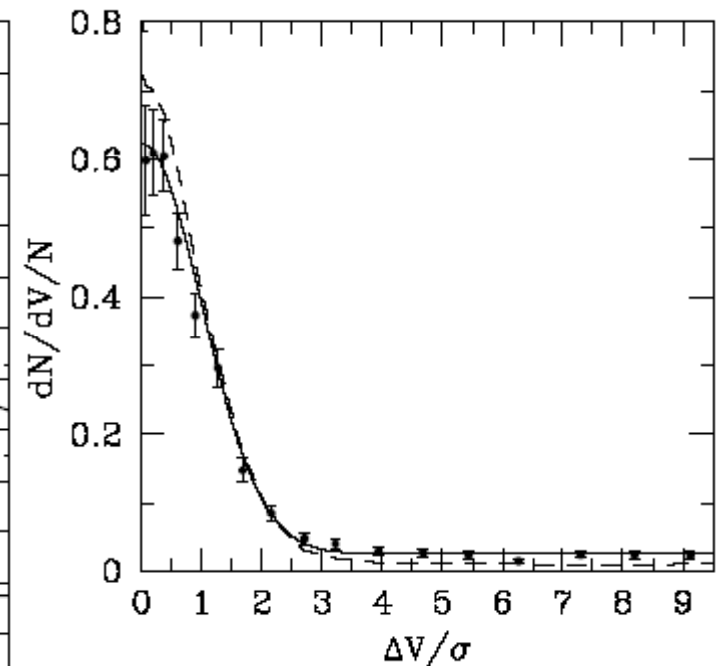
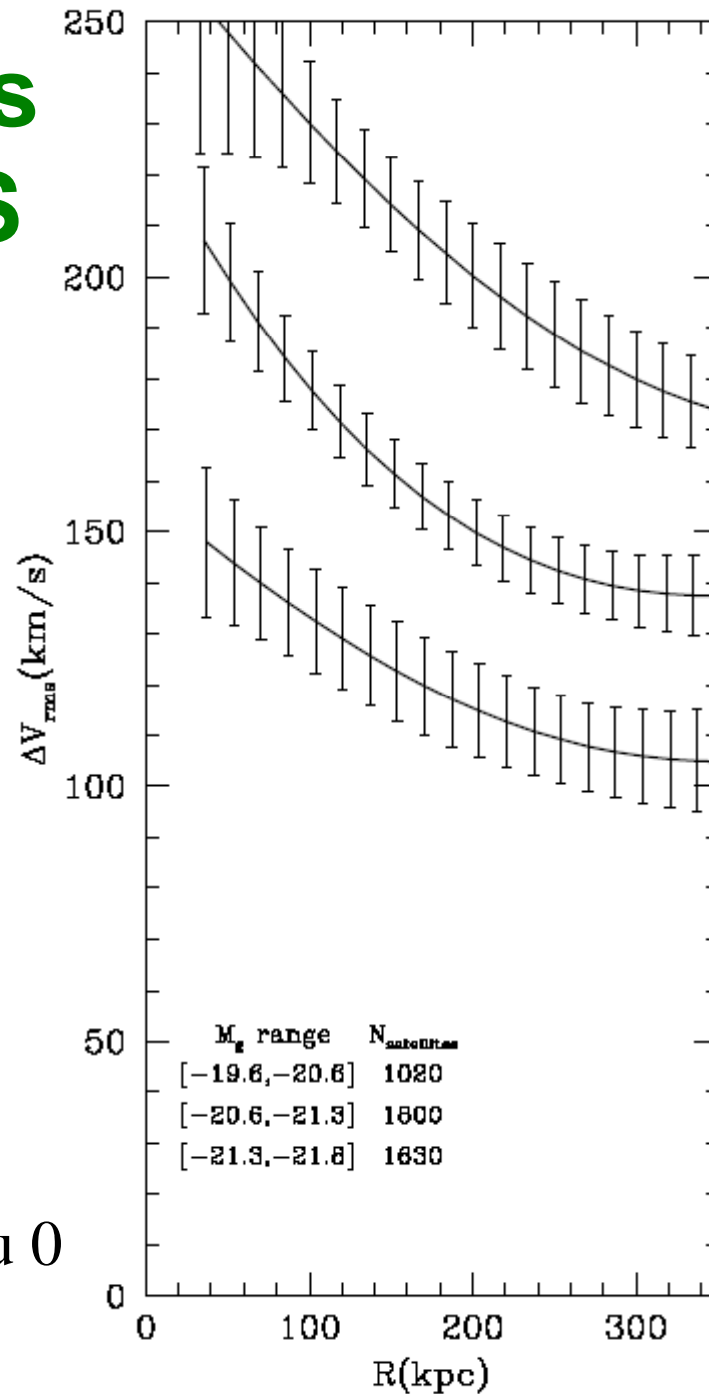
Mais dispersion de vitesse plate (comme si $\rho \sim r^{-2}$)

Satellites du SDSS

Klypin &
Prada 2009

Satellites
Statistique

Seulement 1 ou 0
Par galaxie

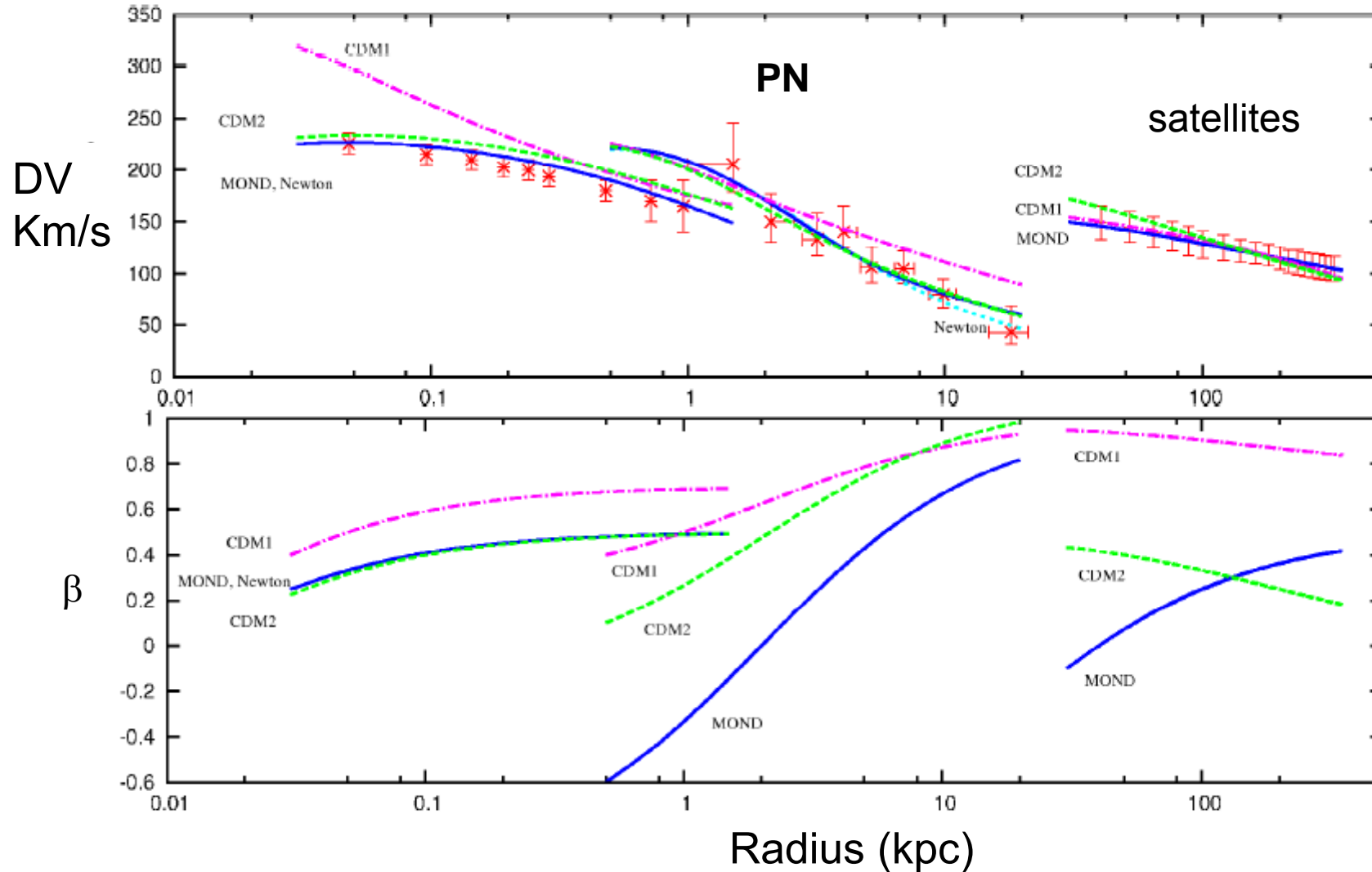


Test des satellites SDSS

2 types de CDM CDM1: NFW cusp

CDM2: cœurs, comme le veulent les courbes de rotation

Tiret et al 2007



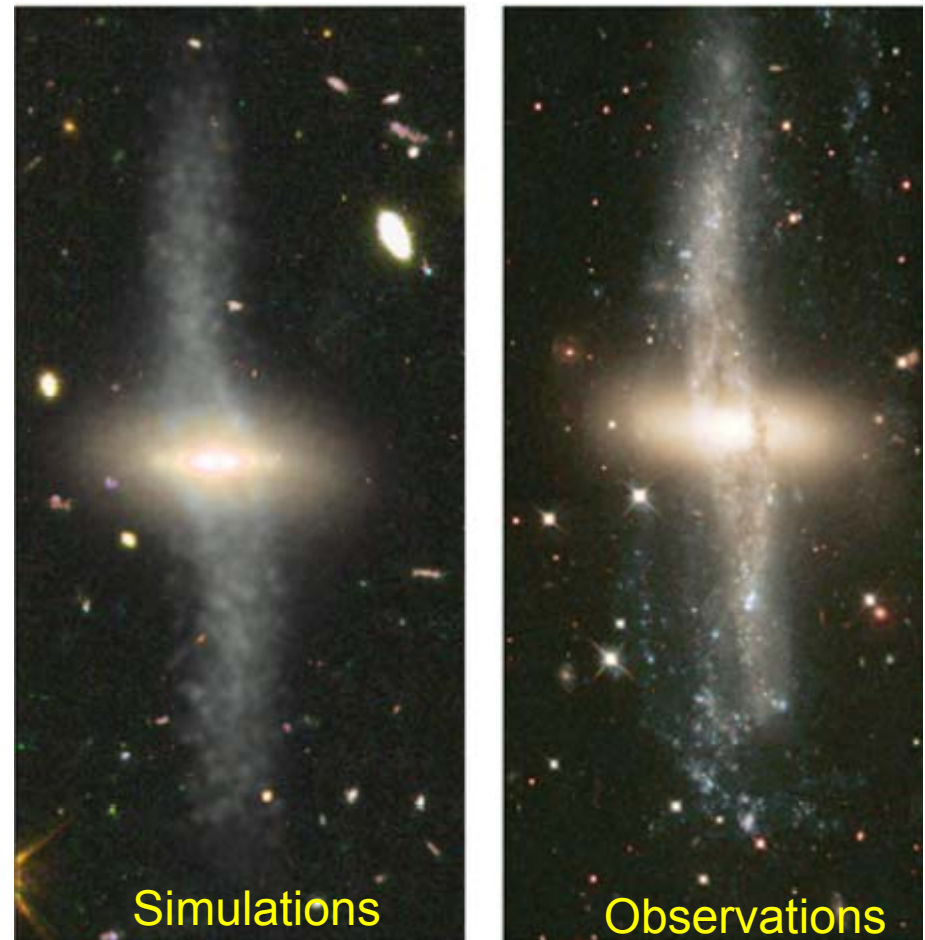
Anneaux polaires et accrétion de gaz cosmique

Aussi Snaith et al 2012

→ L'anneau polaire est une occasion de tester la distribution de matière noire à 3 dimensions

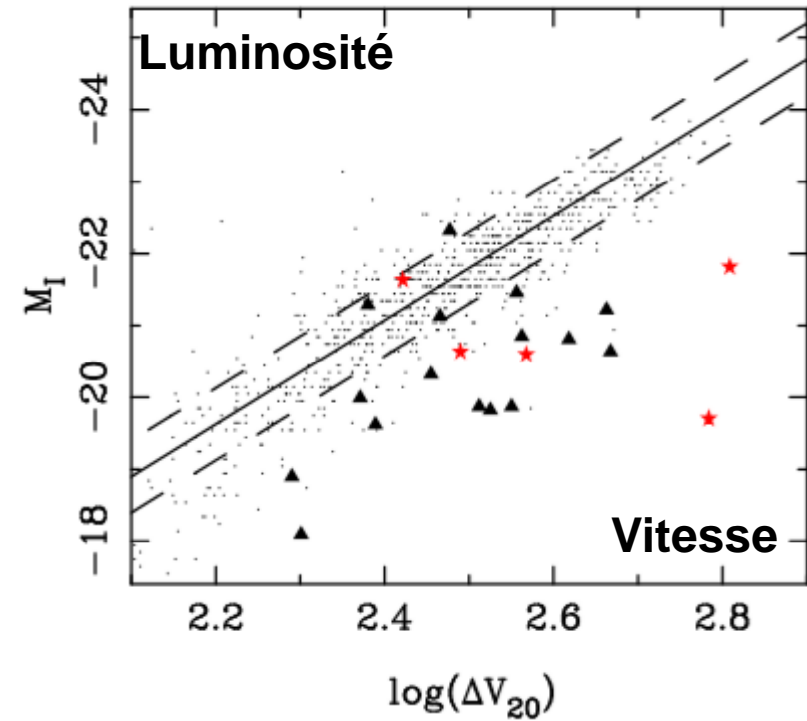
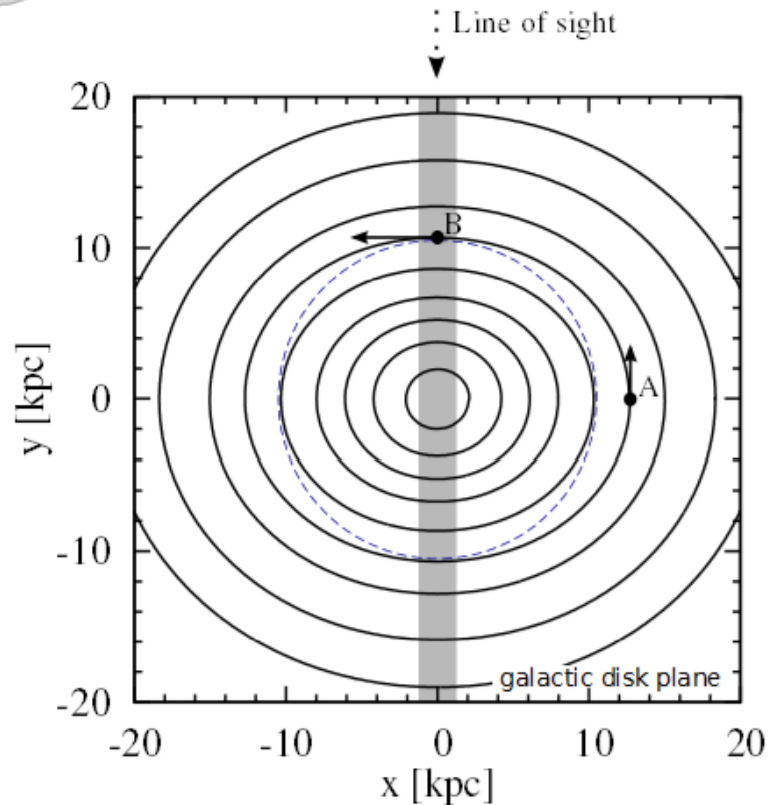
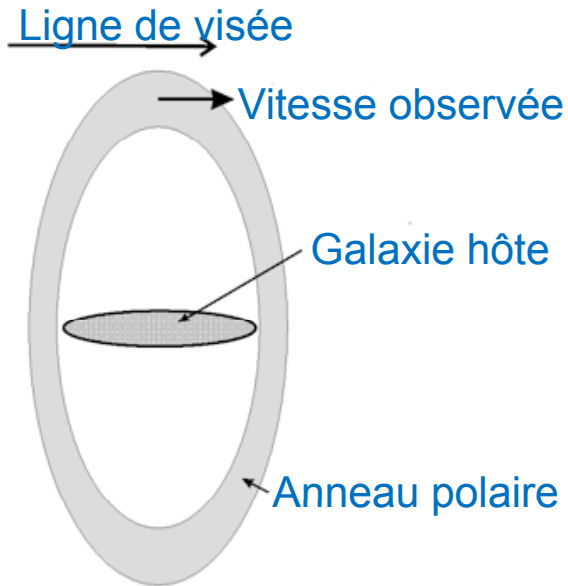
→ Comparaison de la vitesse de rotation dans le disque polaire et dans le plan équatorial

Dépend des mécanismes de Formation?
Accrétion, interactions



Brook et al 2008

La TF des galaxies à Anneaux

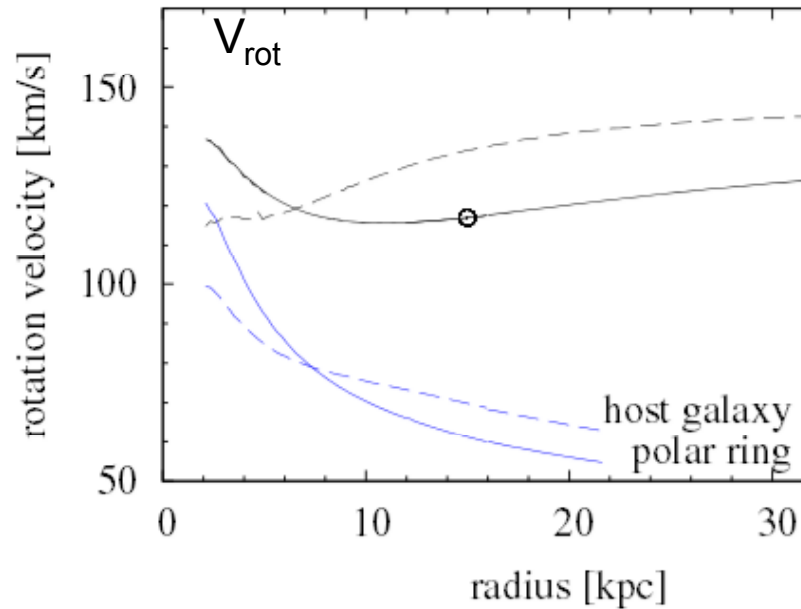


Dans le modèle standard, on s'attend à $V_{\text{polaire}} < V_{\text{équateur}}$

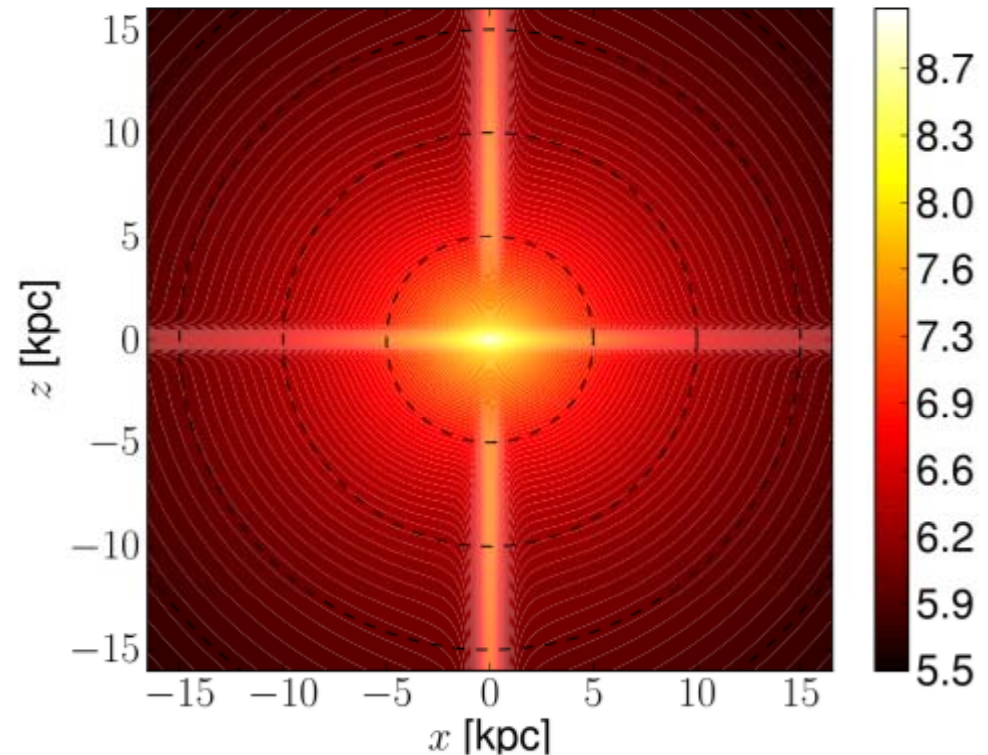
Iodice et al 2003
Combes et al 2013

Galaxies à anneau polaire avec MOND

→ Vitesse supérieure dans le plan polaire obtenue naturellement



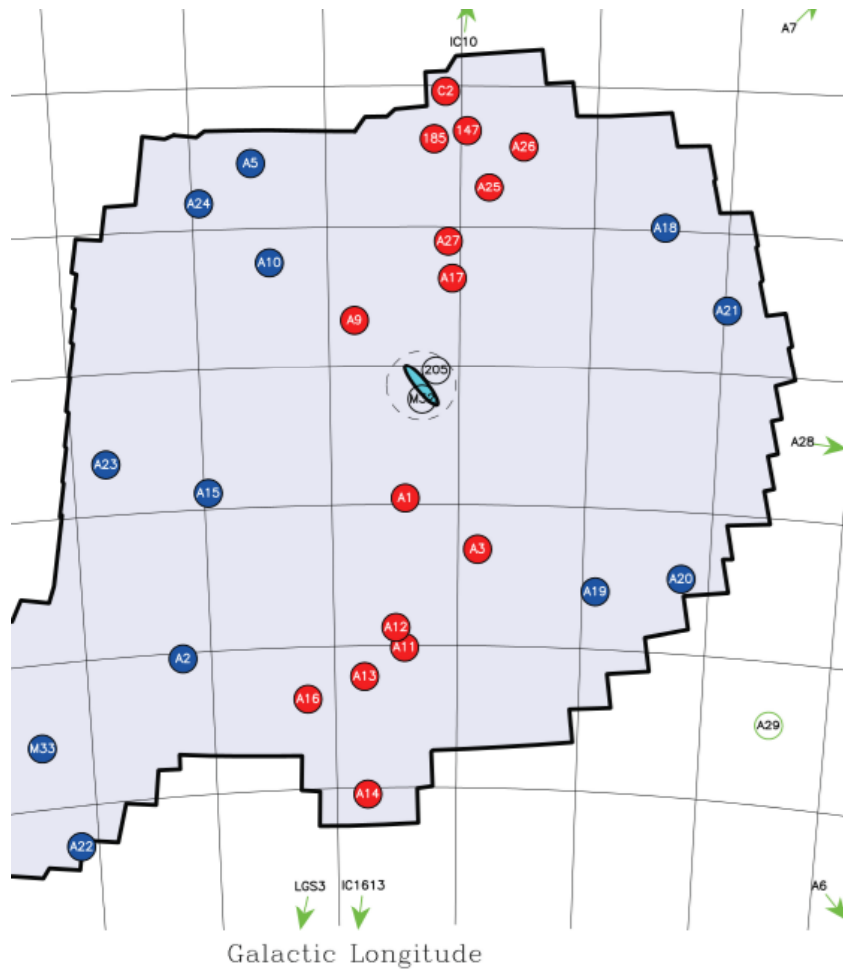
Carte de la MN « phantom »



Lüghausen et al 2013

Disques de Satellites, MW, M31

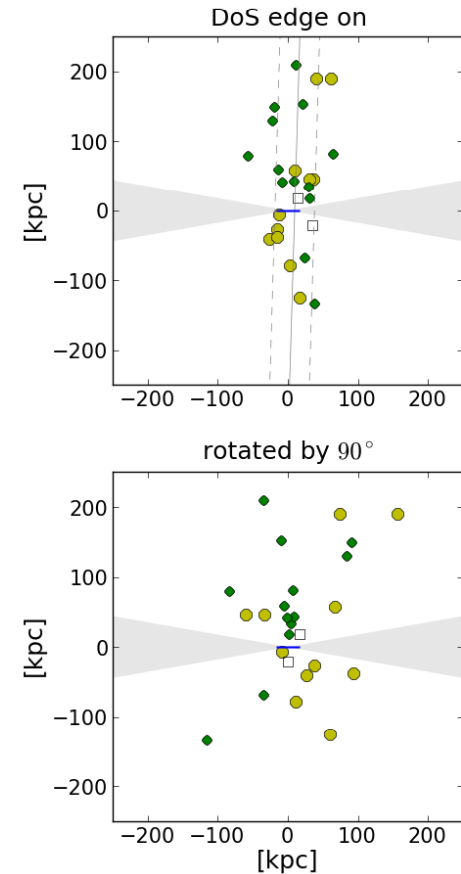
Ibata et al 2013, Nature



Plan de satellites
En rotation

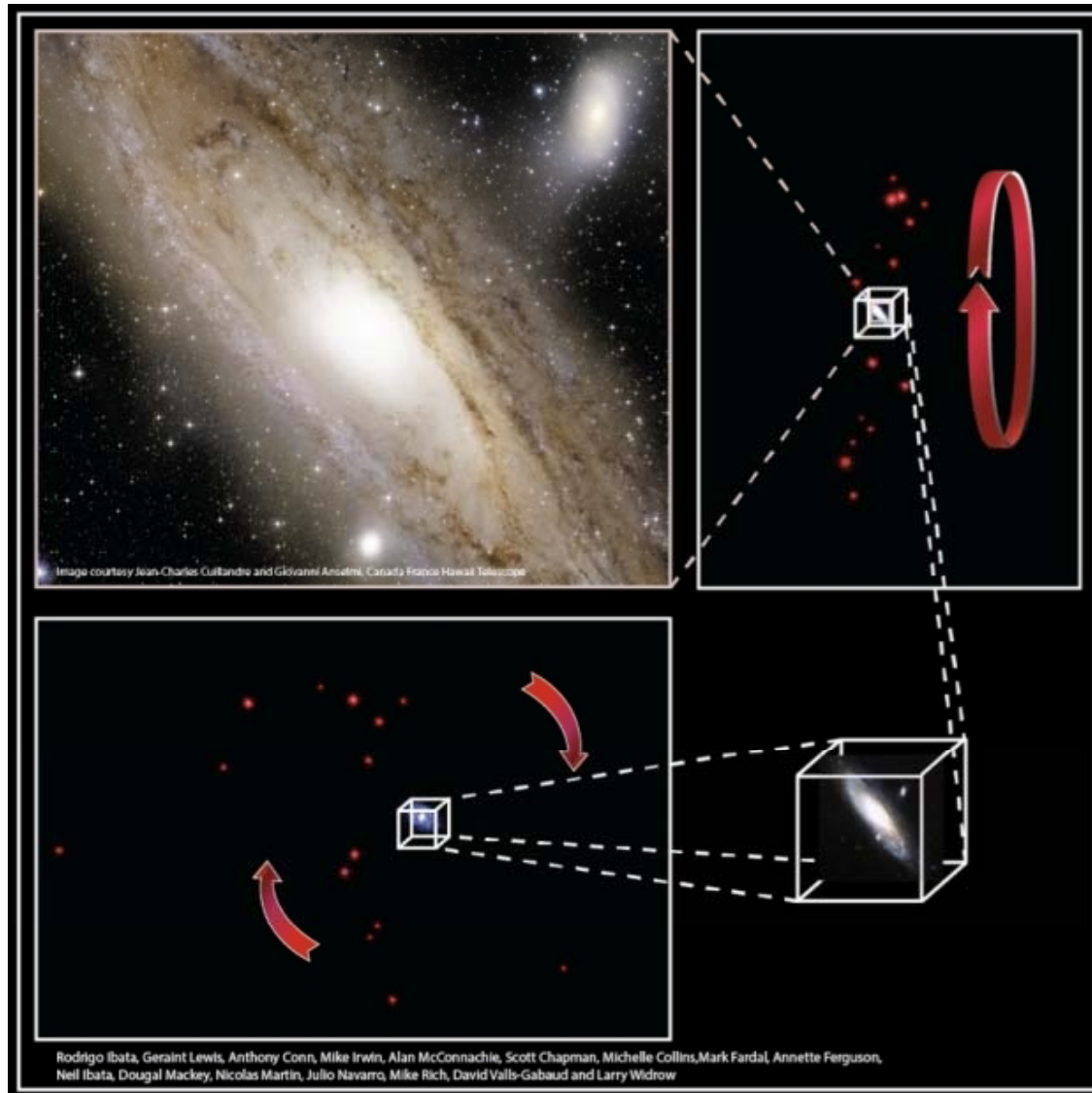
Ne peut pas être
reproduit en
simulations CDM

Pawlowski et al 2012



Metz et al 2008

Est-ce que ces satellites sont tous des naines de marée?



Quand 2 galaxies spirales fusionnent, les queues de marée suivent l'orientation du plan initial

→ Explique l'alignement

Mais les naines de marée n'ont pas de MN

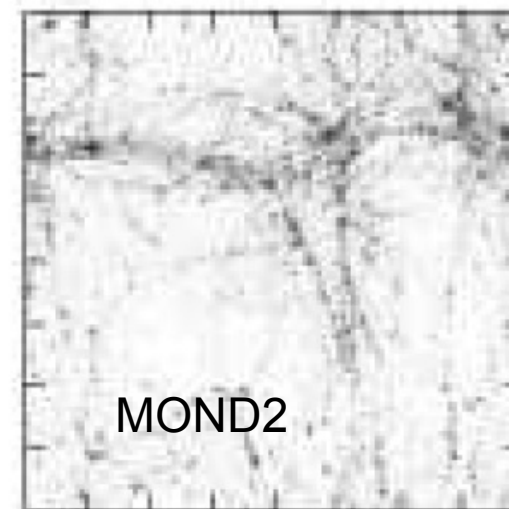
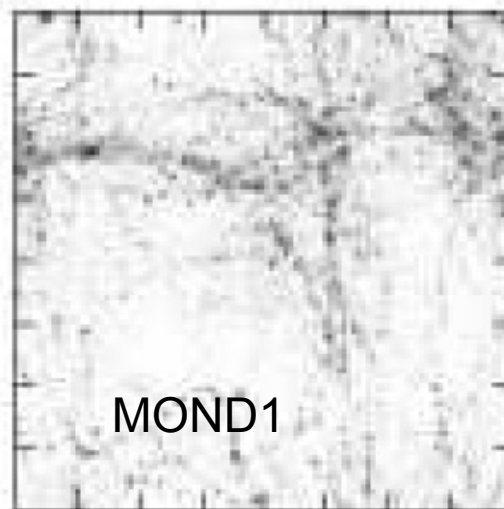
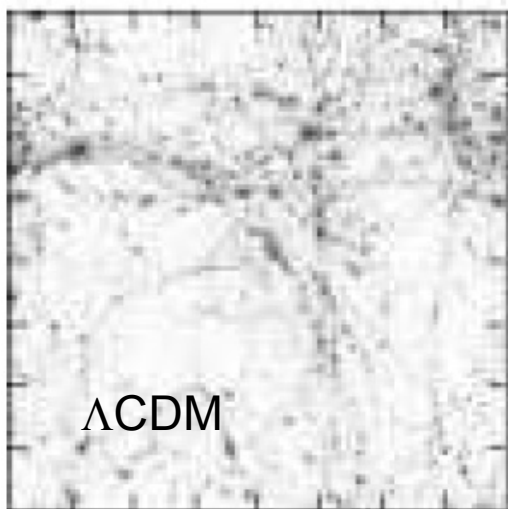
Pourtant dans les observations ces naines sont dominées par la MN

Simulations cosmologiques MOND

Depuis $z=50$, matière sans dissipation, 2 modèles Ω faible + Λ CDM

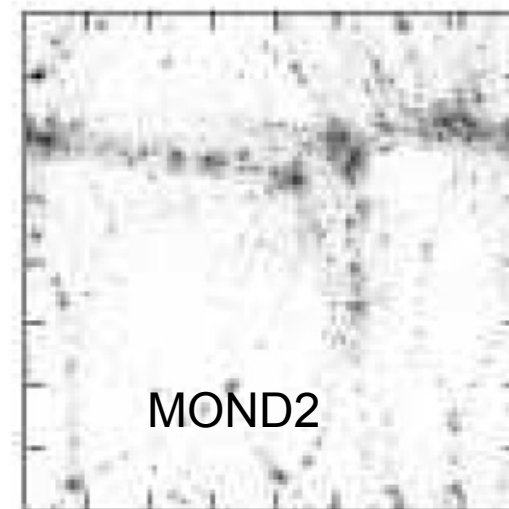
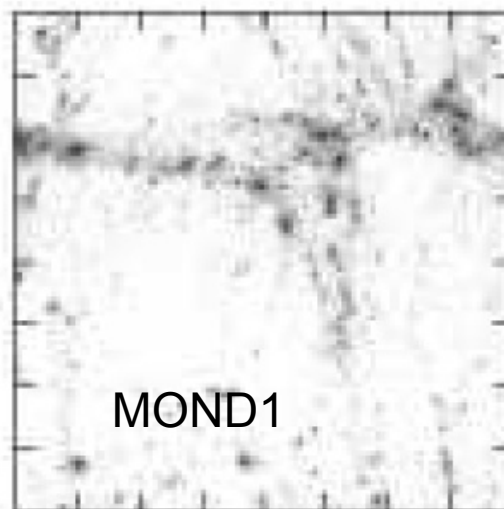
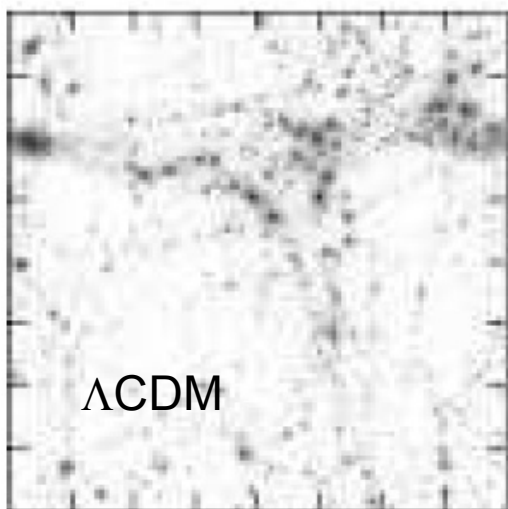
Plus facile de former tôt des structures massives

$z=2$



Llinares et al 2009

$z=5$



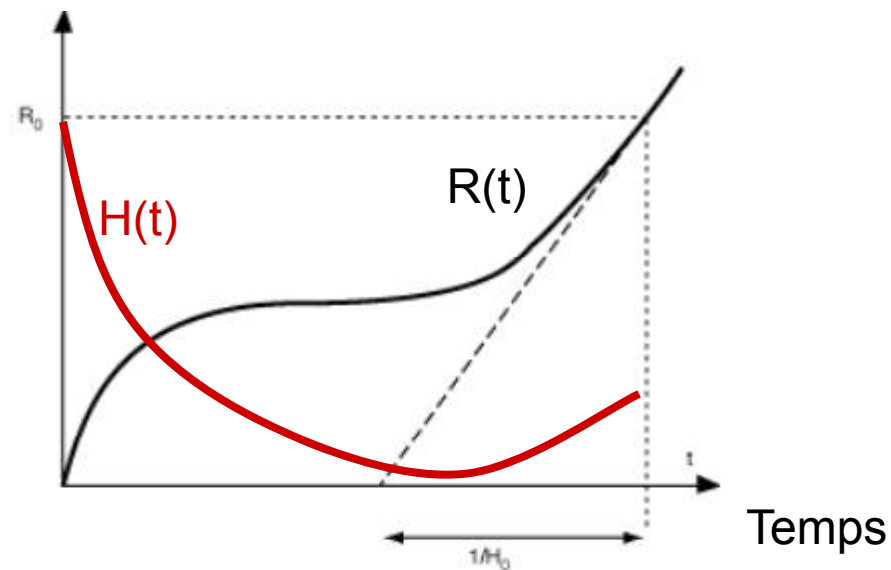
Evolution dans le temps

Est-ce que l'accélération critique a_0 varie?

$$a_0 \sim c H_0, \text{ ou bien } a_0 \sim c (\Lambda/3)^{1/2}$$

Possible d'imaginer des variations, dans l'univers primordial

Question ouverte, comme l'est encore l'évolution de Ω_Λ



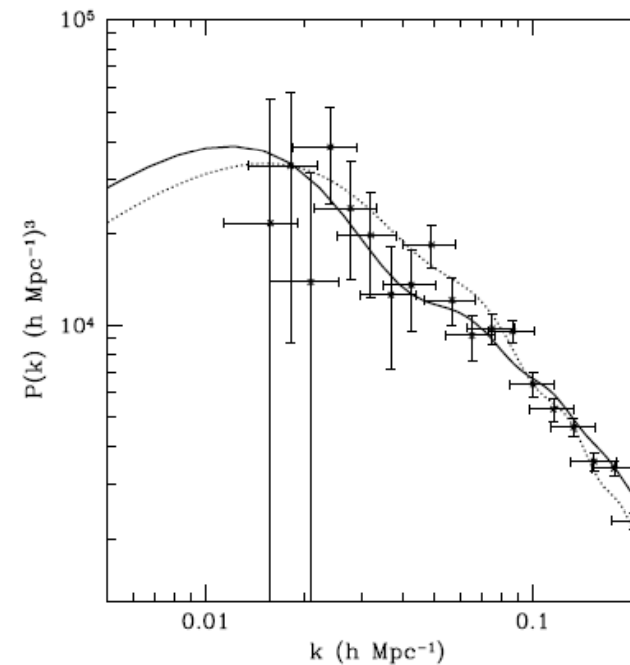
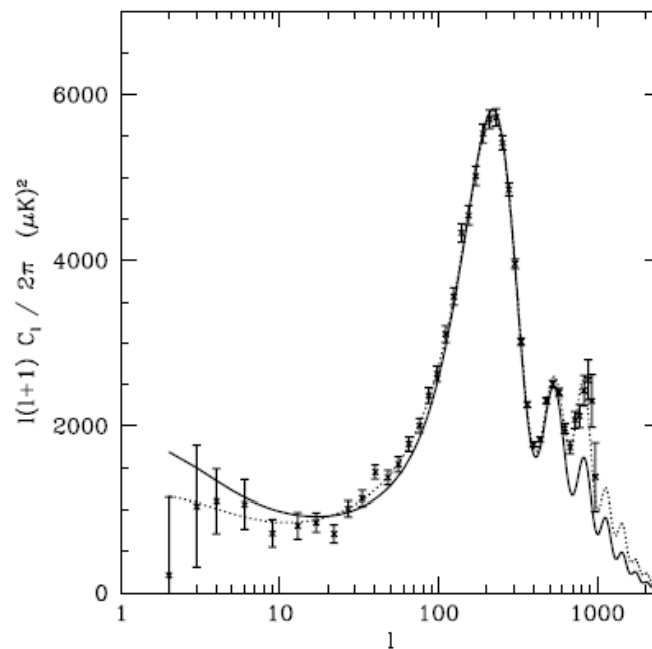
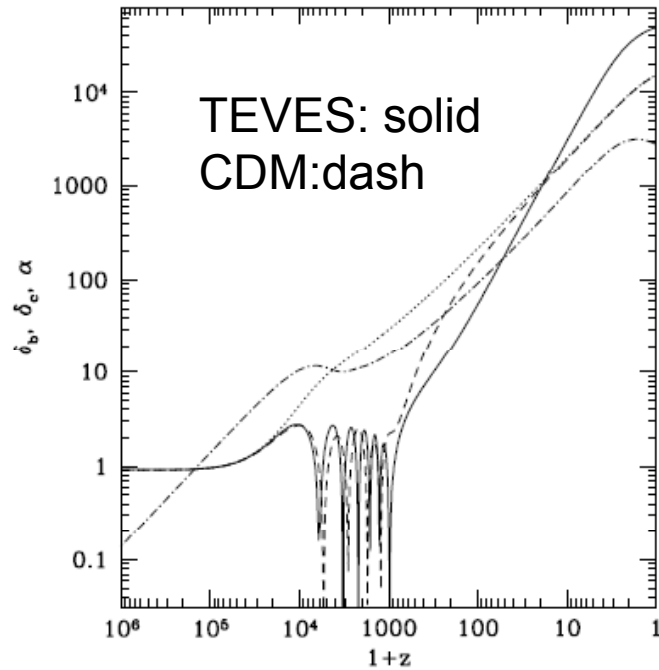
TeVS: CMB et LSS

Skordis 2009

Croissance des structures
due au champ vectoriel

Champ scalaire

→ accélération de l'expansion
(énergie noire)



Conclusion

Deux hypothèses: Matière noire ou gravité modifiée

Dégénérescence: situation encore ouverte

Modèle standard **CDM** excellent à grande échelle, problèmes aux échelles galactiques

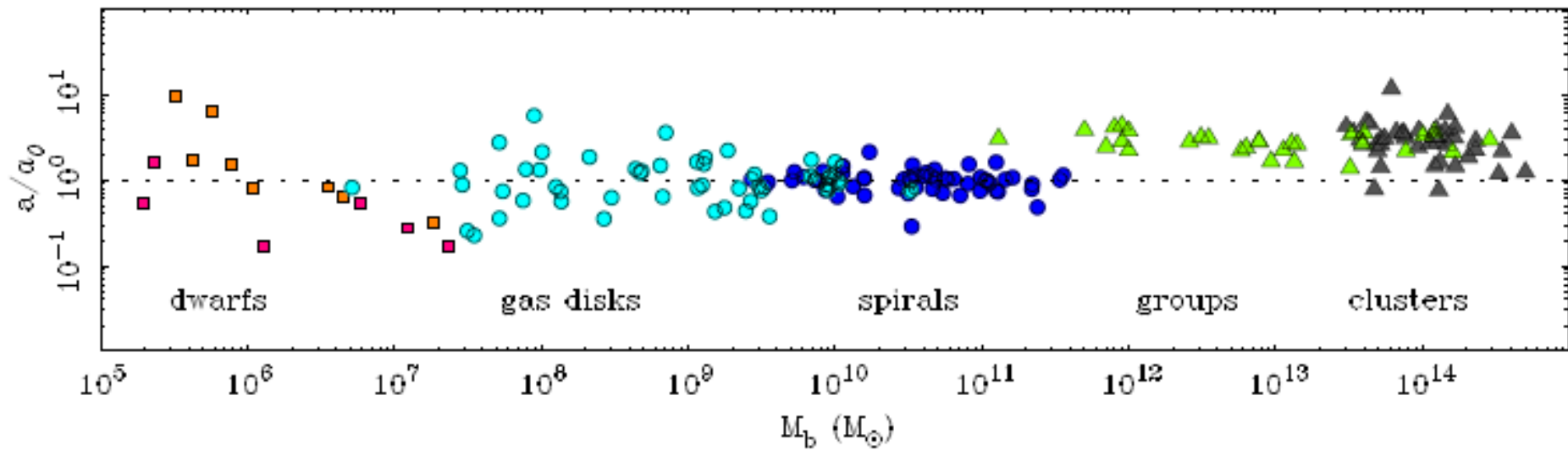
MOND résoud le problème des galaxies, mais a ses propres problèmes à l'échelle des amas de galaxies

→ Principale perspective: trouver un candidat de MN

→ Si ces particules n'interagissent que par la gravité, la théorie ne sera pas prédictive

Gravité modifiée: rajoute des champs scalaires, vectoriels, mais aussi une base de prédiction des phénomènes

Paramètre d'accélération $a \sim V_f^4/M_b$



Famaey & McGaugh 2012