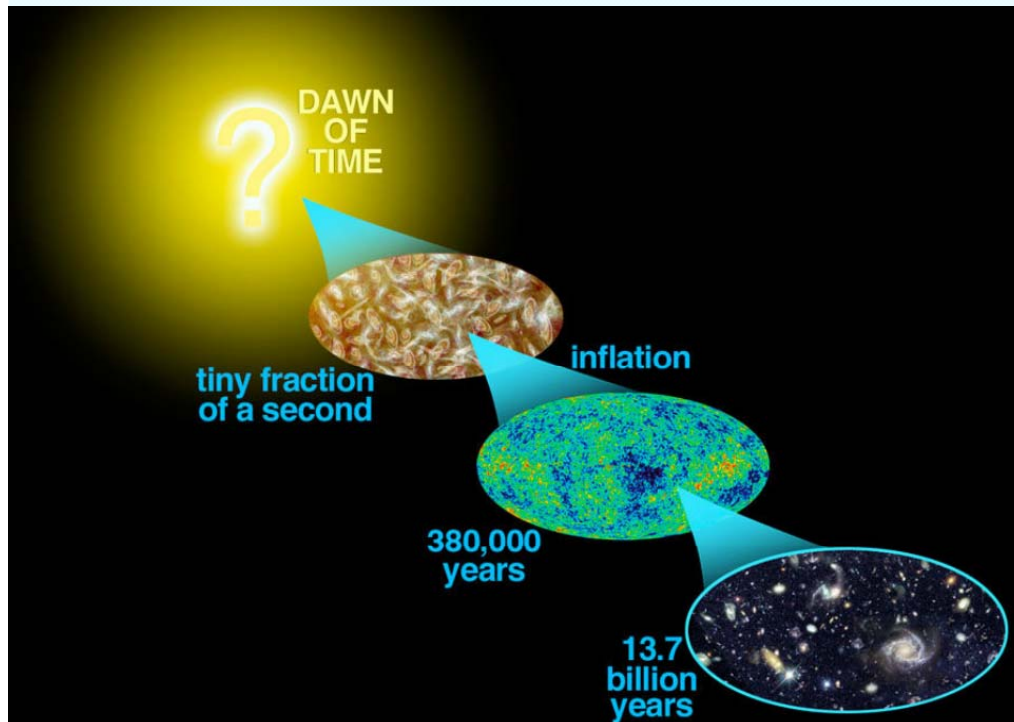




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Les grands problèmes du modèle standard CDM



Françoise Combes



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

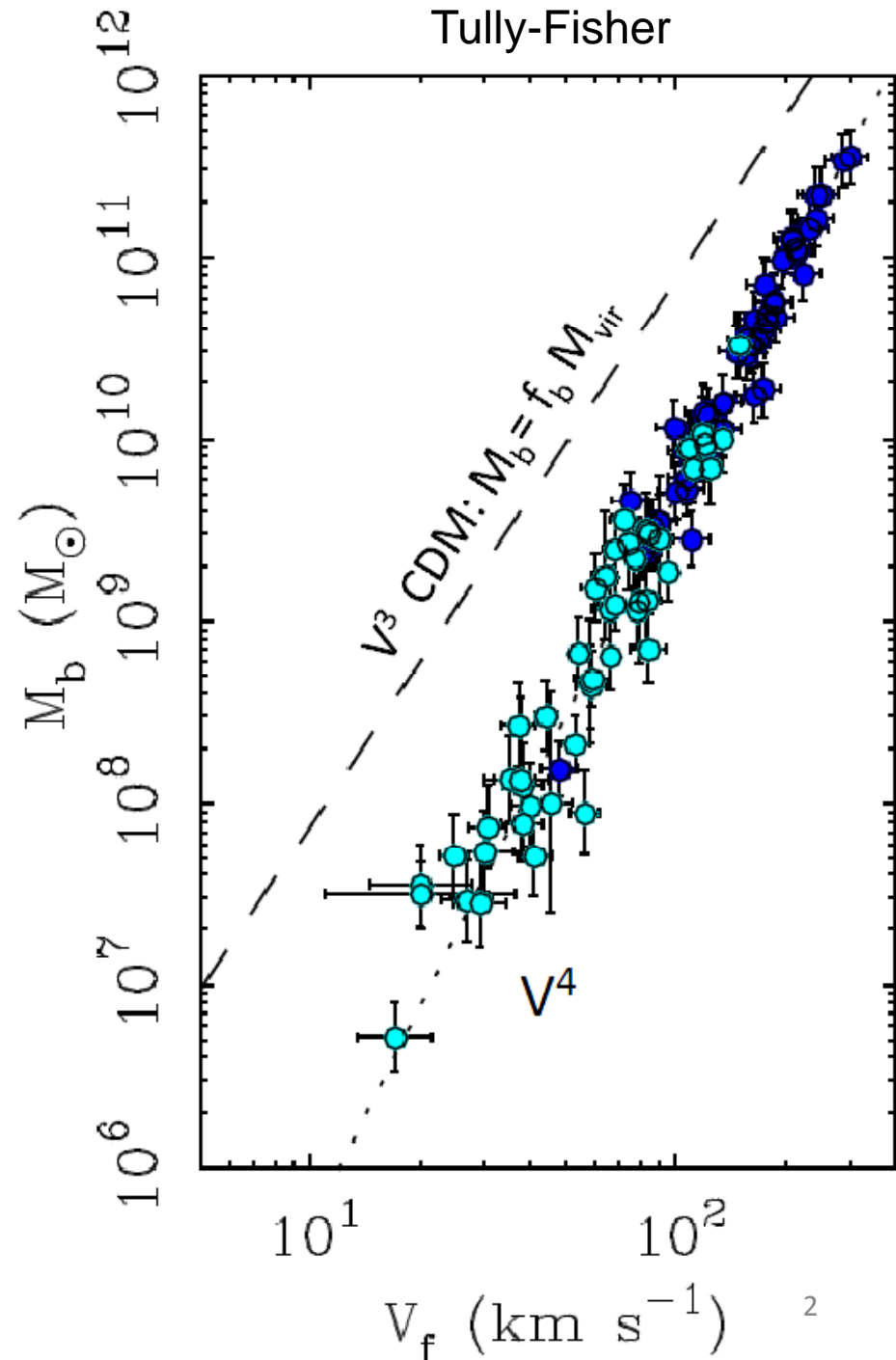
Peu de baryons dans les galaxies

Selon le modèle d'effondrement simplifié $f_b=17\%$ de baryons dans les galaxies

Comment les supprimer?
Surtout pour les faibles masses d'un facteur 10-100

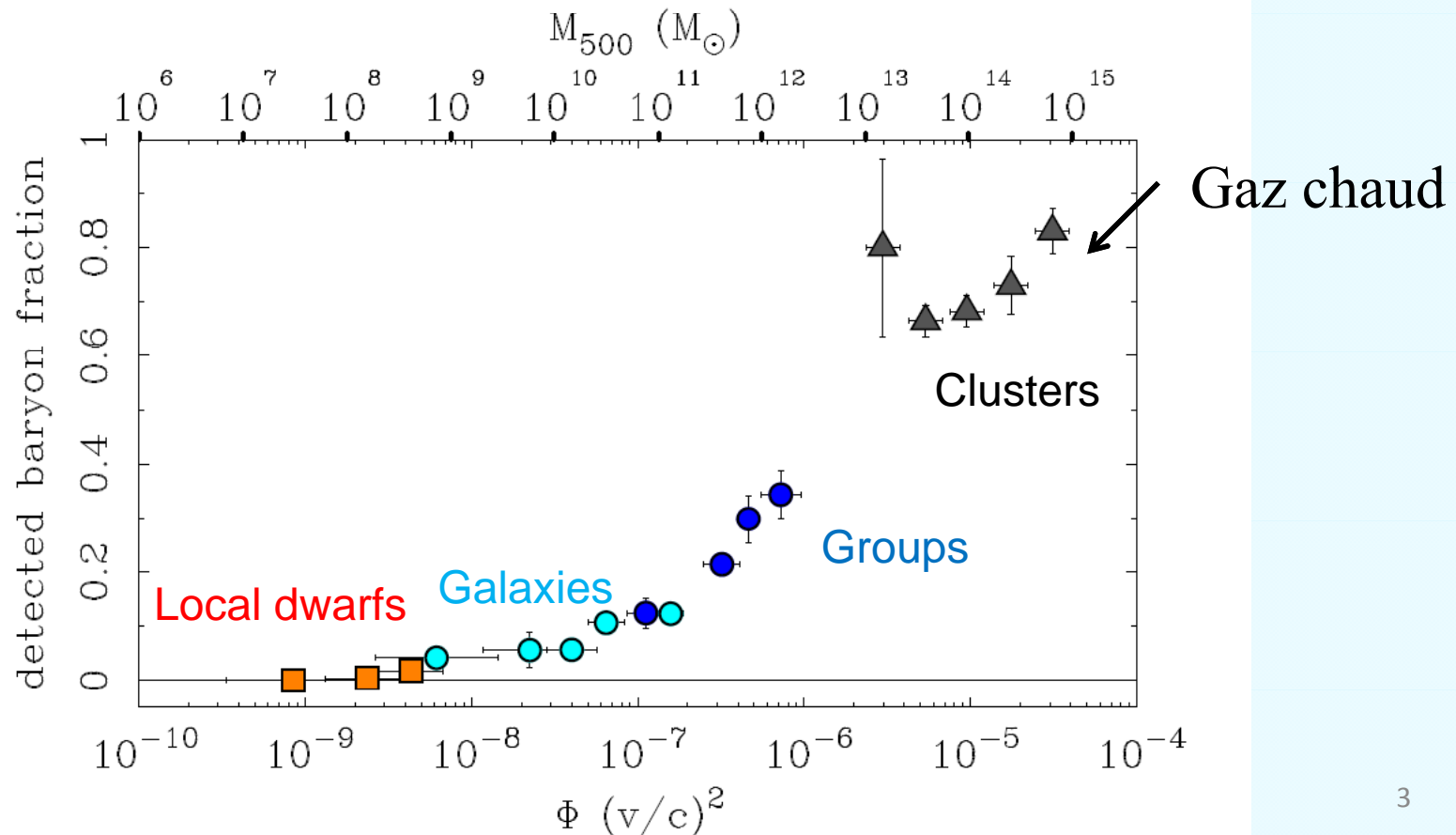
La prédiction du modèle Standard CDM a une pente $M_b \sim V_c^3$

Famaey & McGaugh 2012



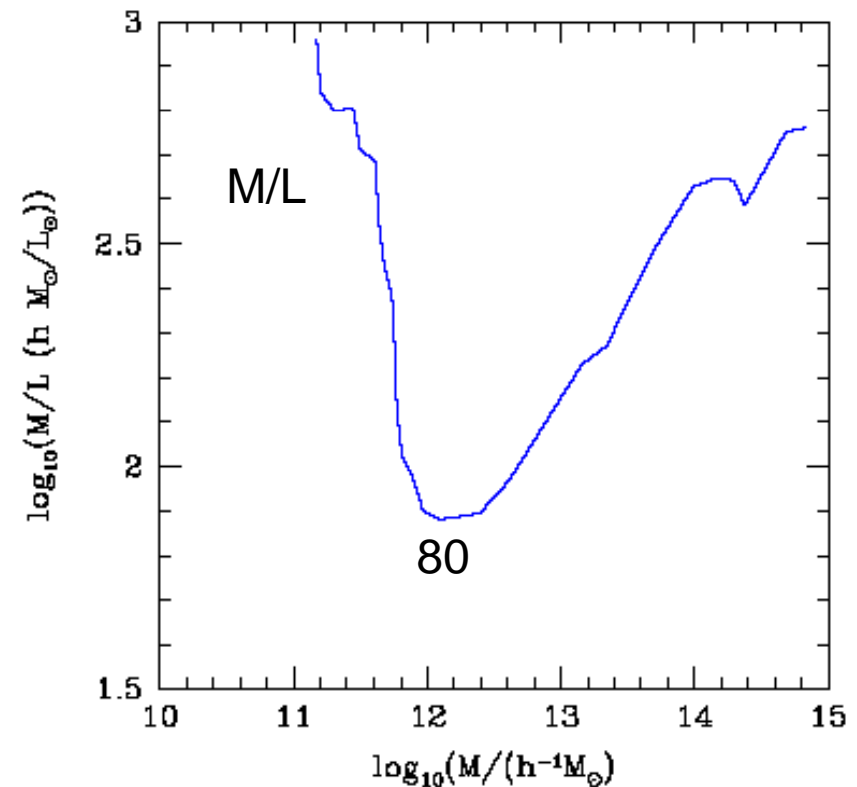
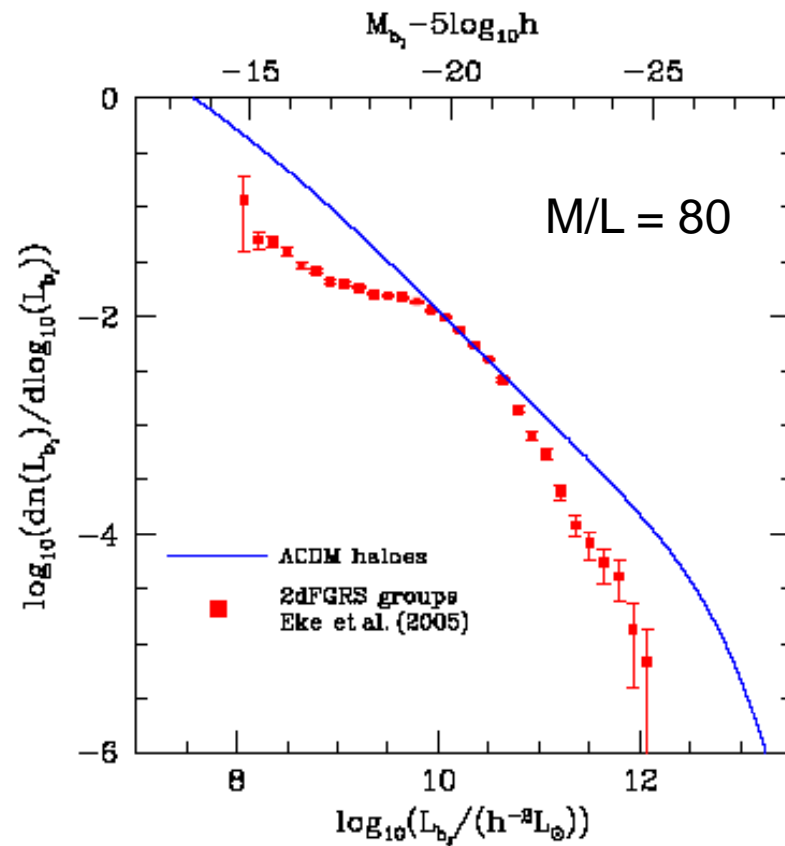
Fraction de baryons détectés

Fraction = $M_b / (0.17 M_{500})$ M_{500} masse dynamique dans R500
R500 rayon où la densité est 500 fois la densité cosmique moyenne



Fonctions de distribution M et L

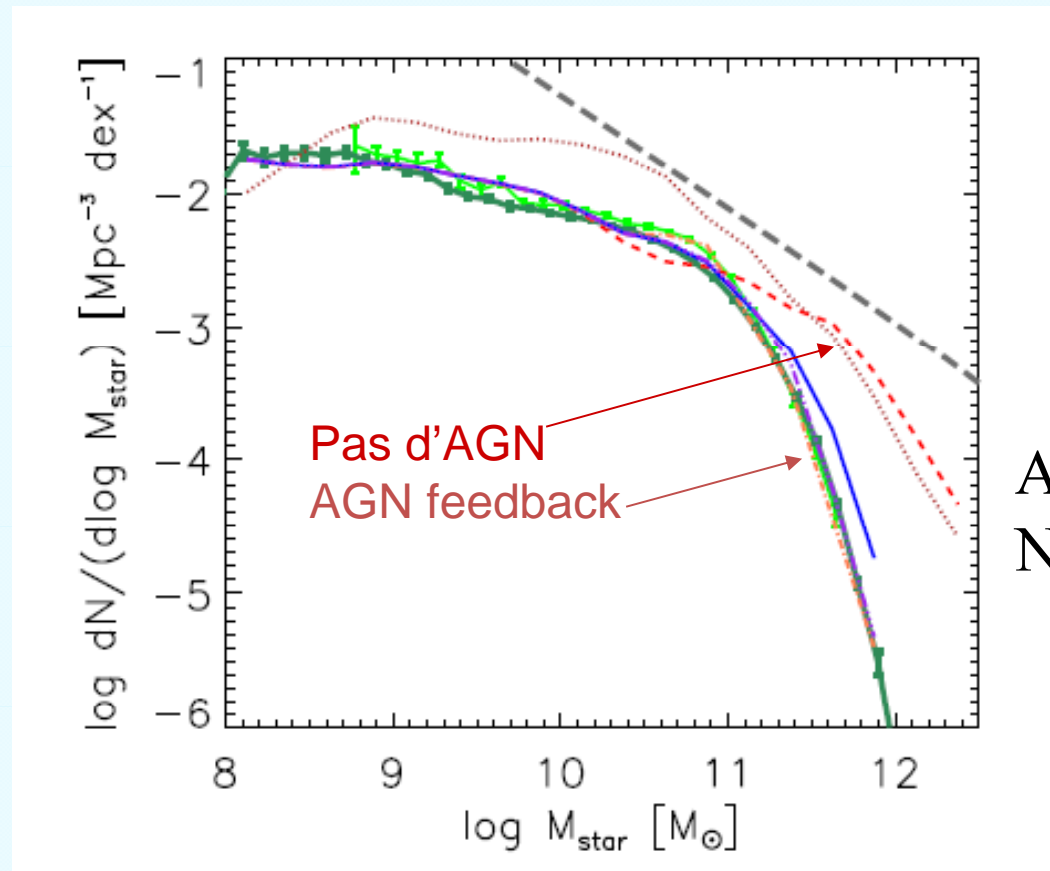
ΛCDM: trop de galaxies de faible et de forte masses



Baugh 2006, Eke et al 2006, Jenkins et al 2001

Rétro-action (feedback) des supernovae

L'énergie de la formation d'étoiles (vents stellaires, supernovae) est capable d'éjecter la gaz des naines, et de stopper la formation d'étoiles

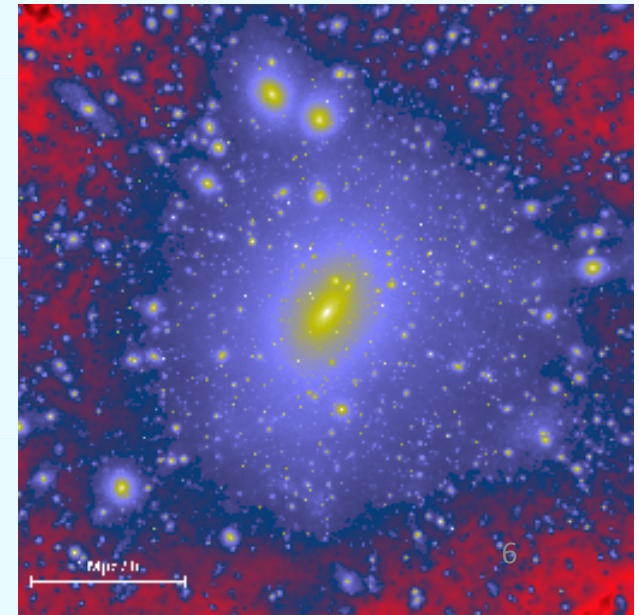


→ AGN feedback pour les galaxies massives

3 Problèmes du modèle standard Λ -CDM

- Prédiction de "cuspides" au centre des galaxies, en particulier absentes dans les naines Irr, dominées par la matière noire
- Faible moment angulaire des baryons, et en conséquence formation de disques de galaxies 10 fois trop petits
- Prédiction d'un grand nombre de petits halos non observés

La solution à ces problèmes viendrait-elle du manque de réalisme des processus physiques (SF, AGN feedback?), du manque de résolution des simulations, ou de la nature de la matière noire?



Profils de densité: historique

Profils matière visible:

1930: Hubble $I = I_0 / (1+r/a)^2 \rightarrow \rho \sim 1/r^3$

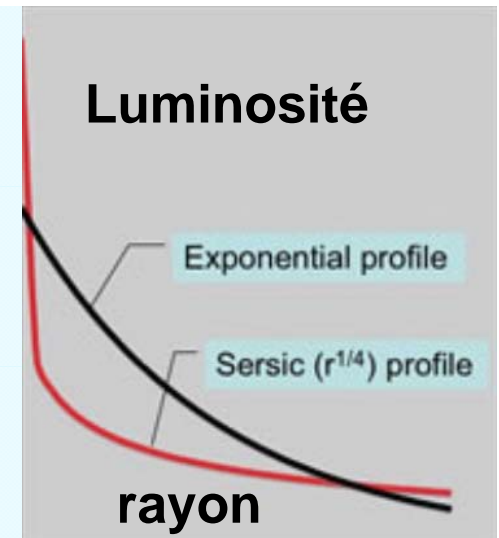
1964: de Vaucouleurs $I = I_0 / \exp(r/r_0)^{1/4}$ modèle physique de **King** (1966)

1970: Freeman disques exponentiels

1970: Peebles Simulation N-corps (N=300) de l'amas de Coma, isotherme en $1/r^2$ Curieusement, il pense que la masse totale de Coma correspond à la masse visible

1972: Gunn & Gott – traitement analytique de l'effondrement sans dissipation d'une perturbation sphérique dans l'univers en expansion, application à l'amas de Coma

1977: Gott - modèle effondrement secondaire $\rho \propto r^{-9/4}$



Profils de densité (MN): histoire

Profils matière noire

1984 Fillmore & Goldreich: solutions self-similaires
effondrement 1D, 2D, 3D

1985: Hoffman & Shaham - Univers ouvert, Halos d'amas plus
pentus que les halos de galaxies, $\rho \propto r^{-3(n+3)/(n+4)}$ si $n=-1$, $\rho \propto r^{-2}$

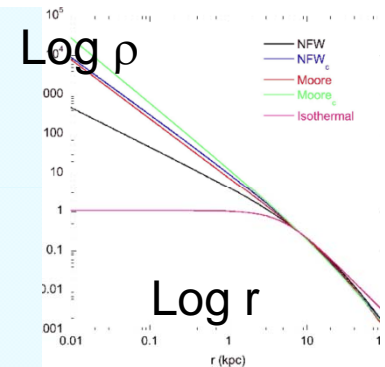
1986: Quinn, Salmon & Zurek - Simul N-corps ($N \sim 10\,000$),
confirment $\rho \propto r^{-3(n+3)/(n+4)}$

1988: Frenk, White, Davis & Efstathiou - Simulations $N=32\,000$
- CDM courbes de rotation plates $\rightarrow 100\text{kpc}$

1990: Hernquist - Modèle analytique avec un cusp pour les
galaxies elliptiques - $\rho \propto r^{-1}(r + r_s)^{-3}$

1997: Navarro, Frenk & White (NFW) $\rho \propto r^{-1}(r + r_s)^{-2}$

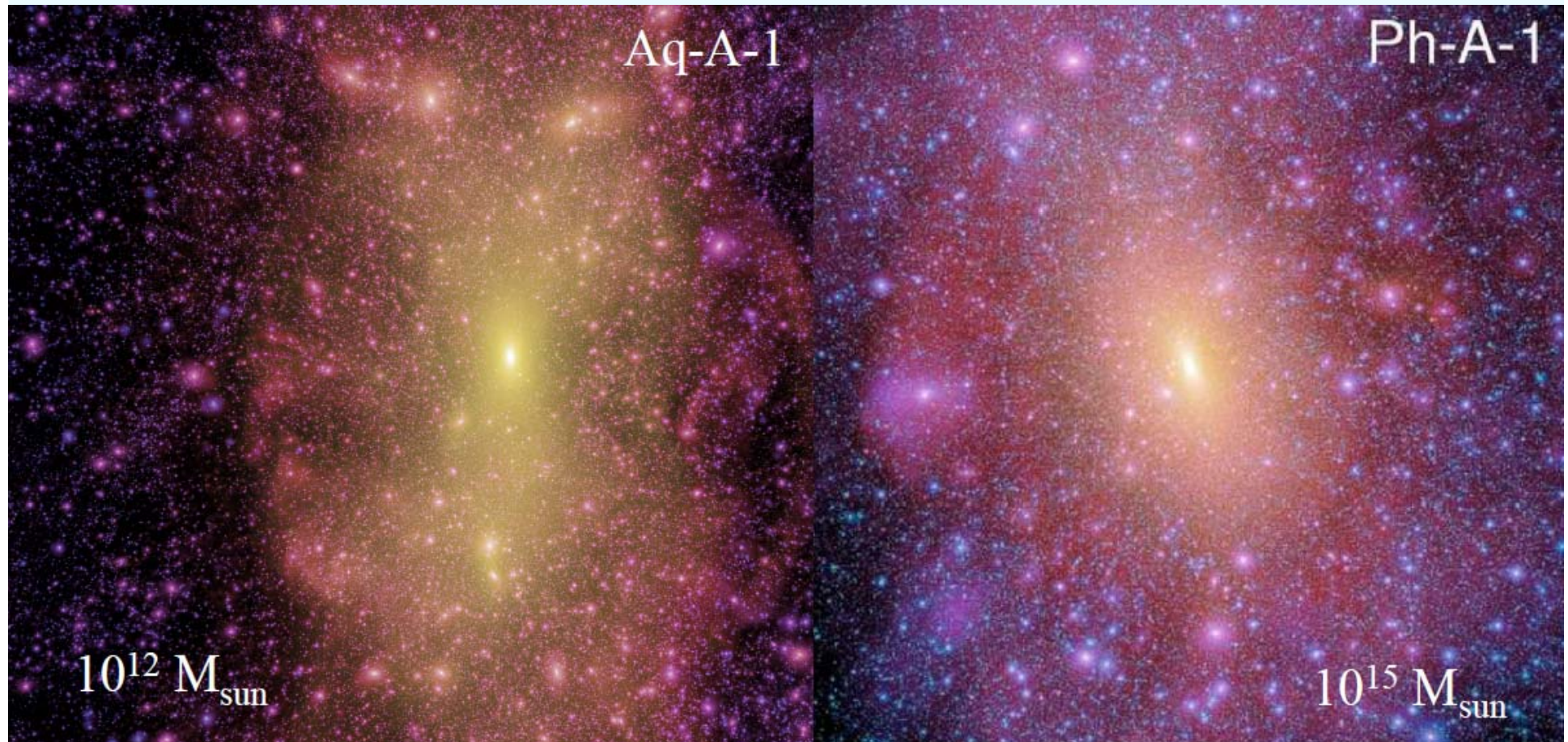
> 2000: Jing & Suto 2000, Klypin et al. 2001, Bullock et al. 2001,
Power et al. 2003; El Zant et al 2004, Navarro et al. 2004, 2010,
Stadel et al 2008, Tortora et al 2014, Mollitor et al 2015



Profils universels

Indépendance d'échelle: Halos de galaxies ou halos d'amas

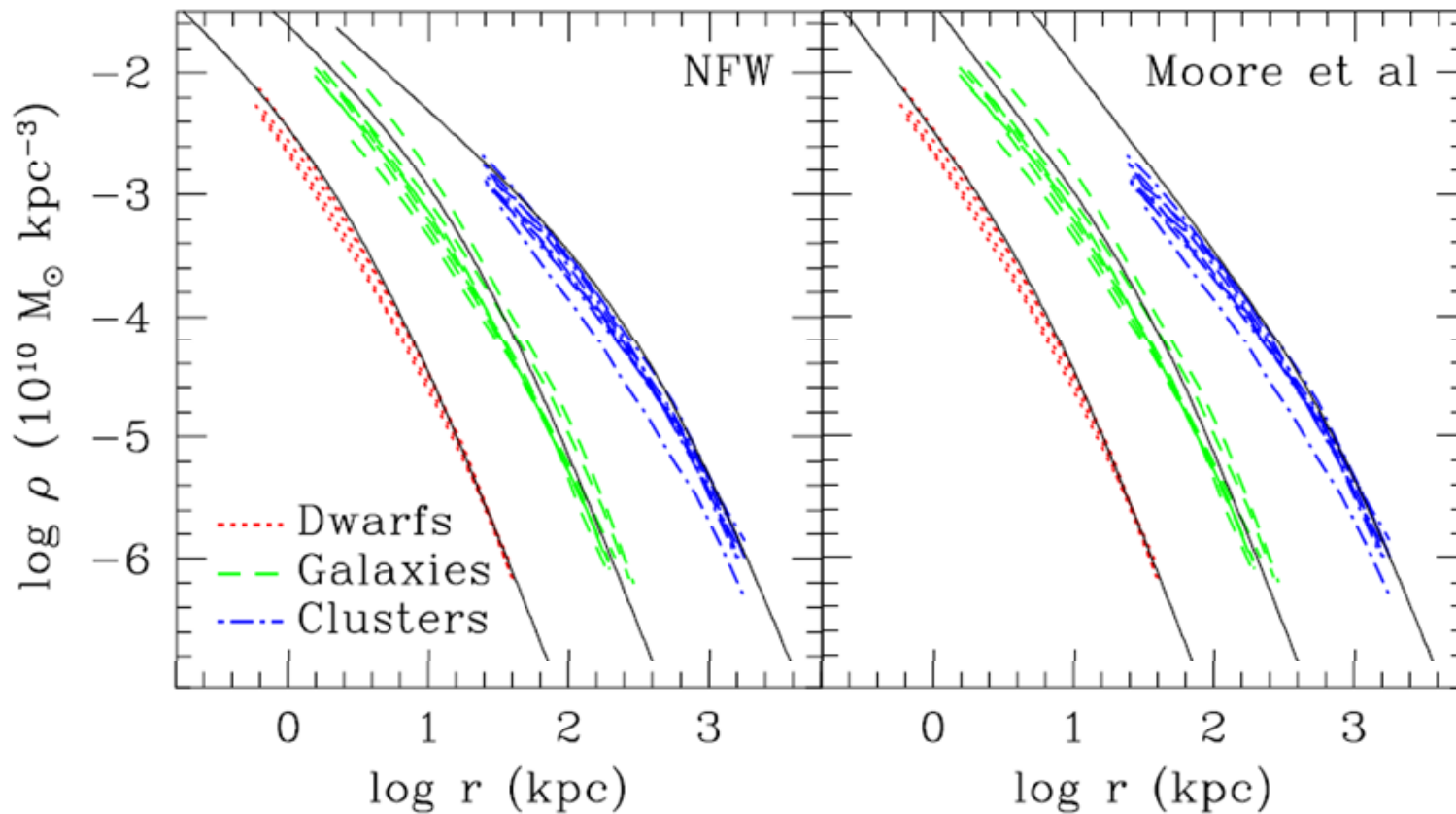
→ Même structure



Prédictions des profils selon la masse

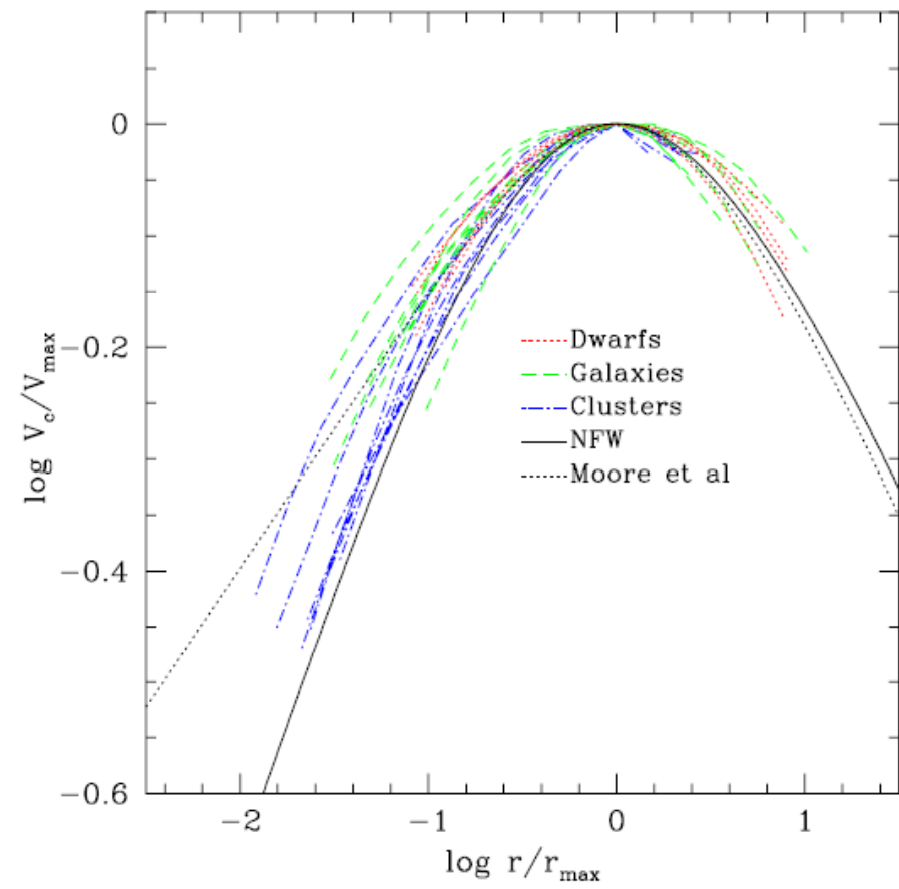
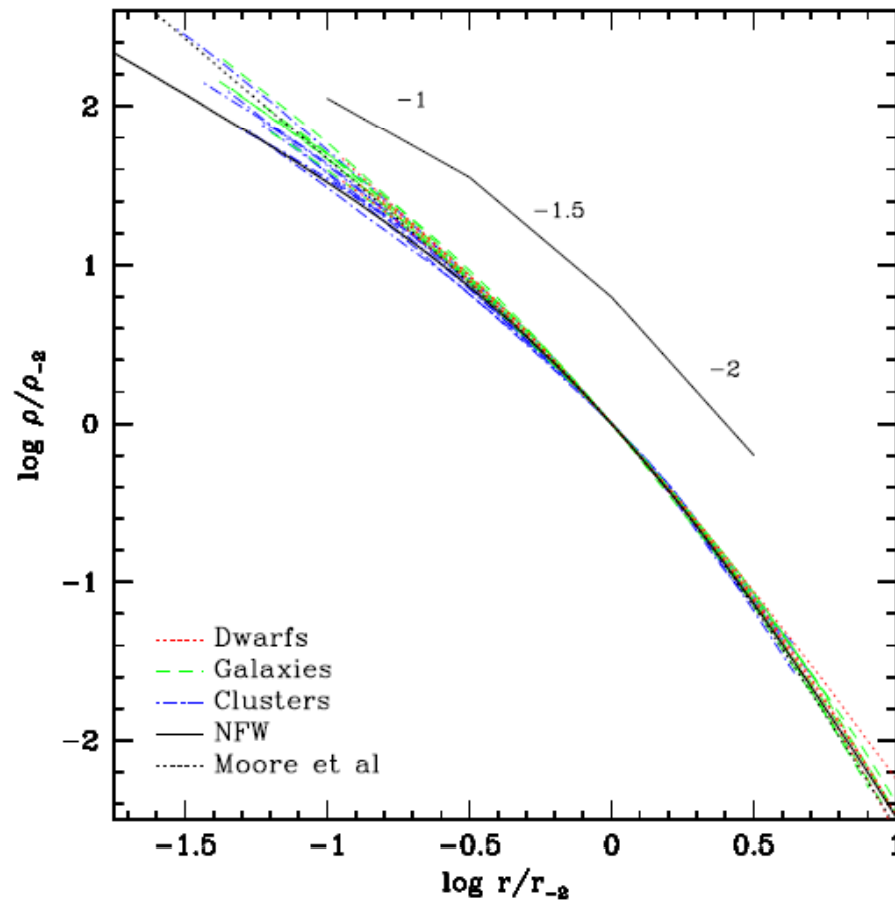
$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_s}\right)\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

Navarro et al 2004



Courbe de rotation correspondante

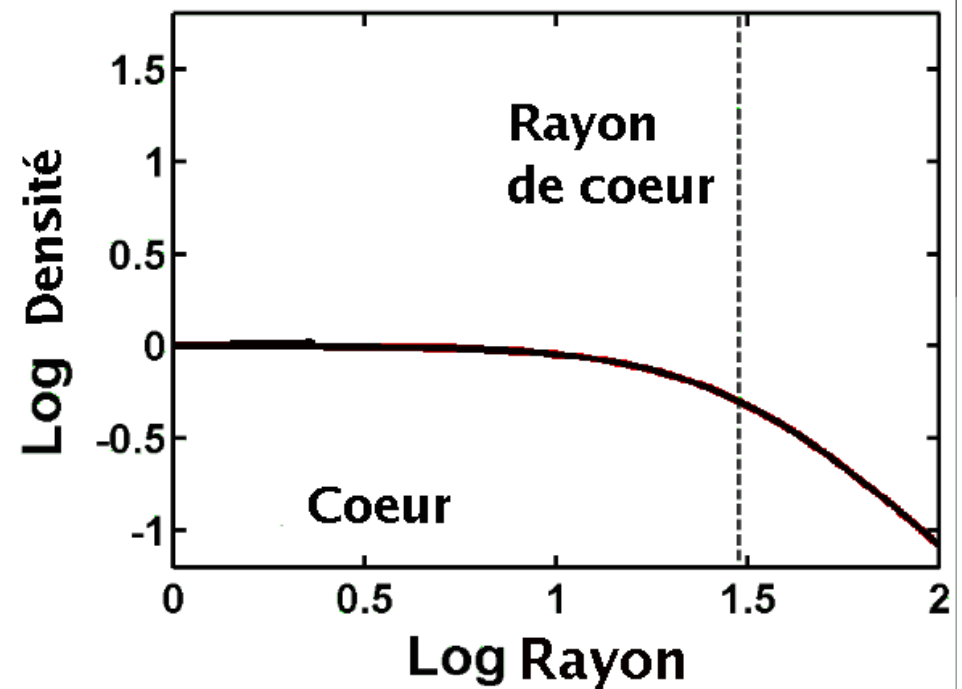
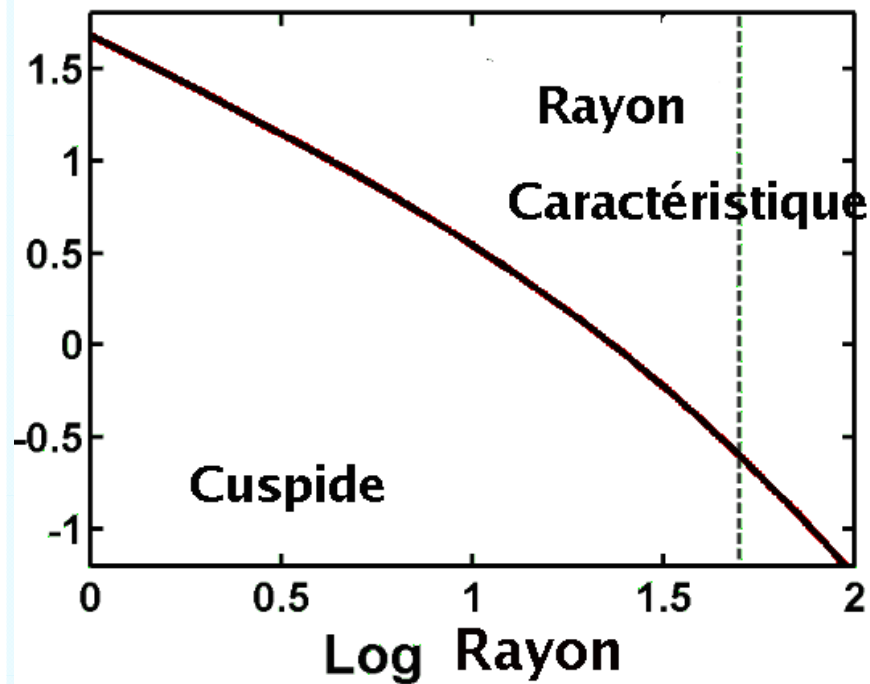
$$\ln(\rho_\alpha/\rho_{-2}) = (-2/\alpha)[(r/r_{-2})^\alpha - 1]$$



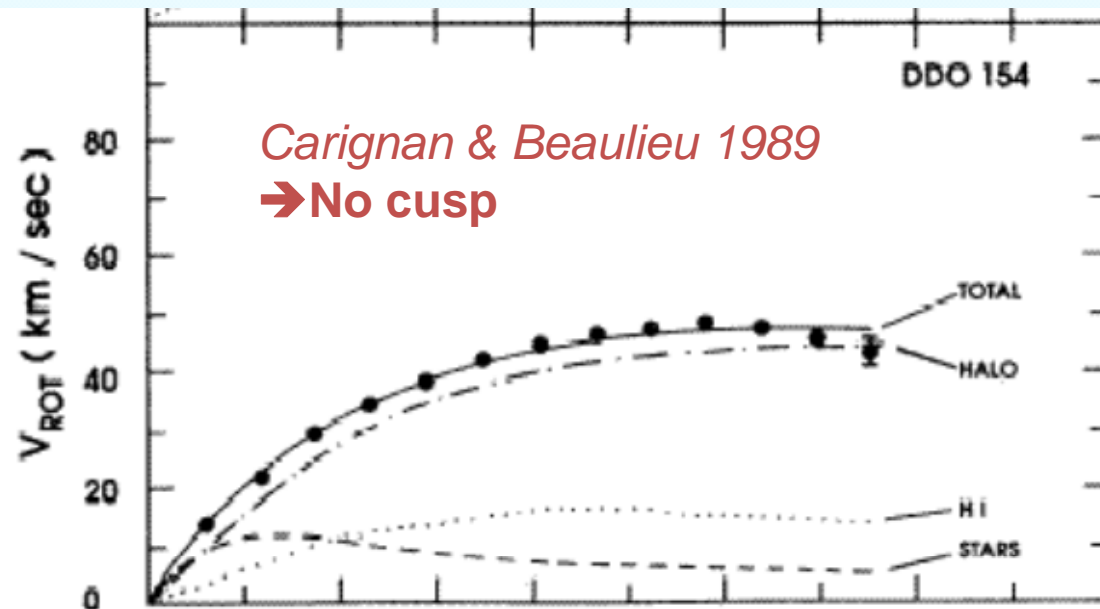
LCDM: 'cuspidé' -- Observations: 'cœur'

Distribution radiale de la densité de matière noire prédite=
loi de puissance de la densité $\alpha \sim -1$ - -1.5

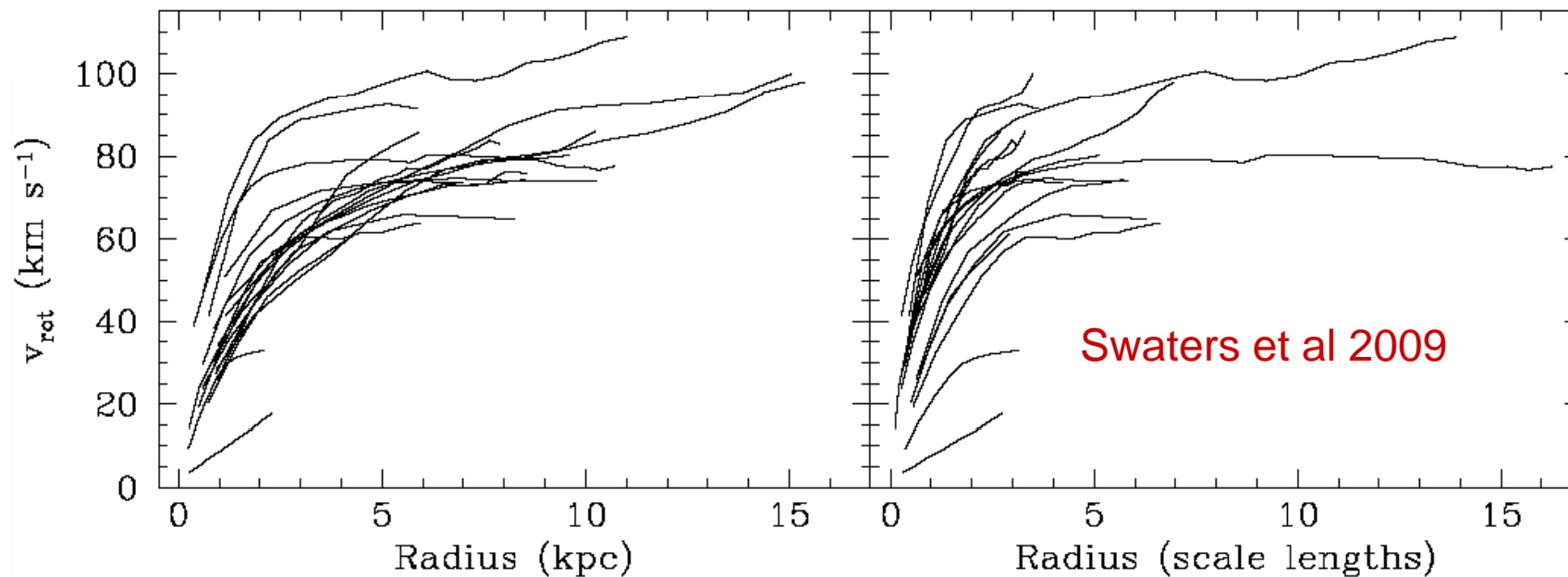
Observations $\alpha \sim 0$



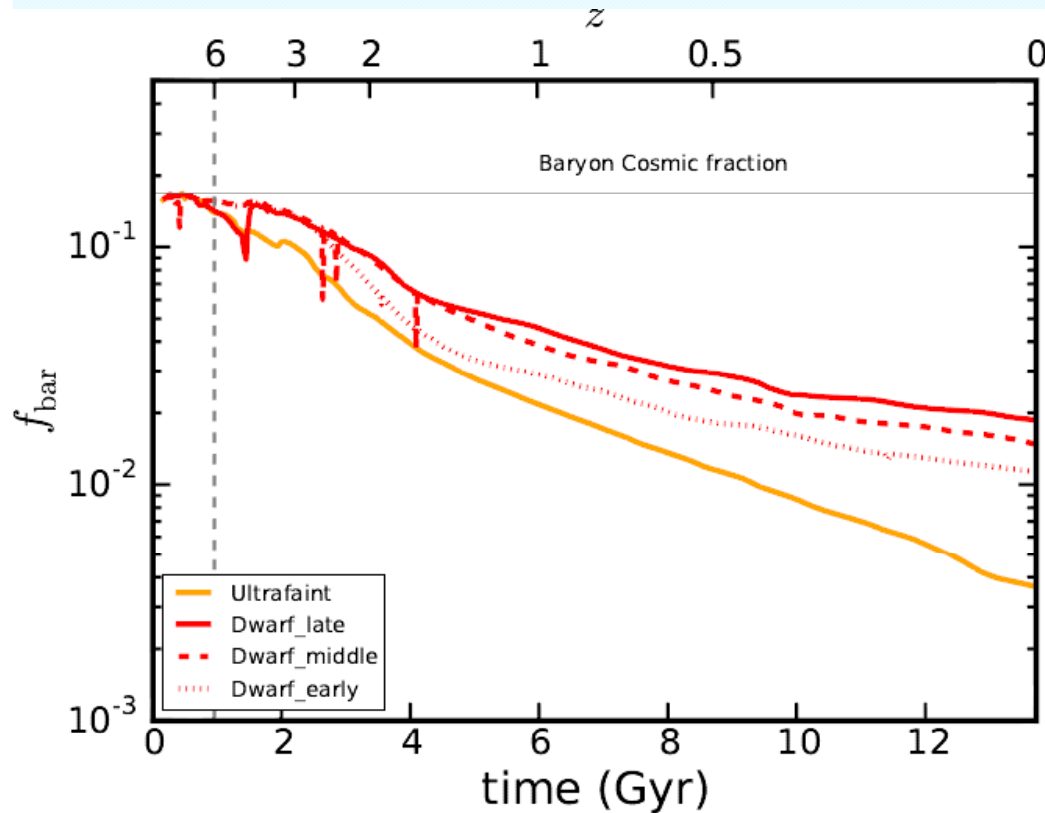
Naines Irr : DDO154 le prototype



Les galaxies à faible
brillance de surface sont
dominées par la
Matière noire



Ejection du gaz par supernovae



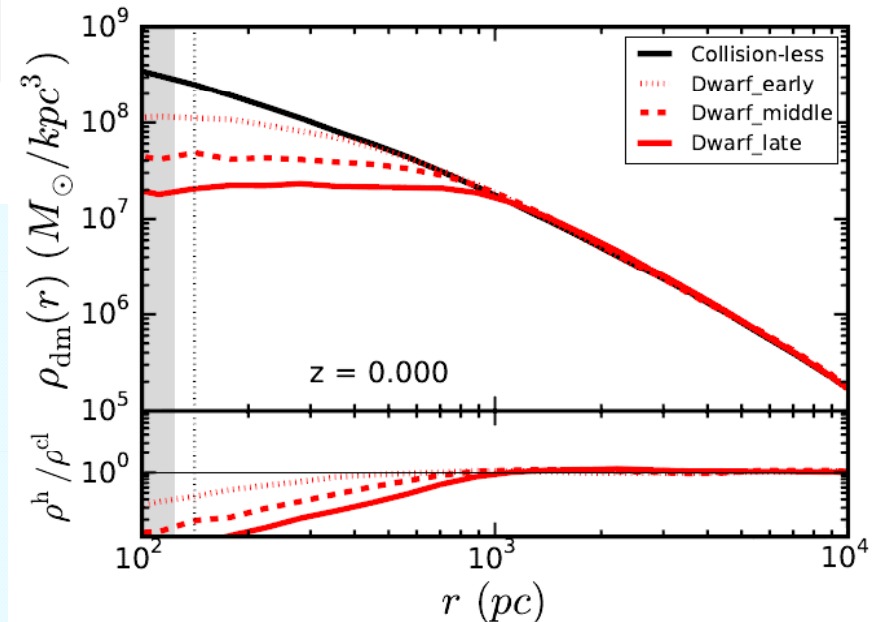
Plus la formation d'étoiles est active au début, plus le phénomène est efficace

Simulations zoom de galaxies isolées

Onorbe et al 2015

Le cusp s'aplatit dans l'éjection, si la formation d'étoiles est tardive (mais: étoiles vieilles)

Le cusp se reforme dans les interactions



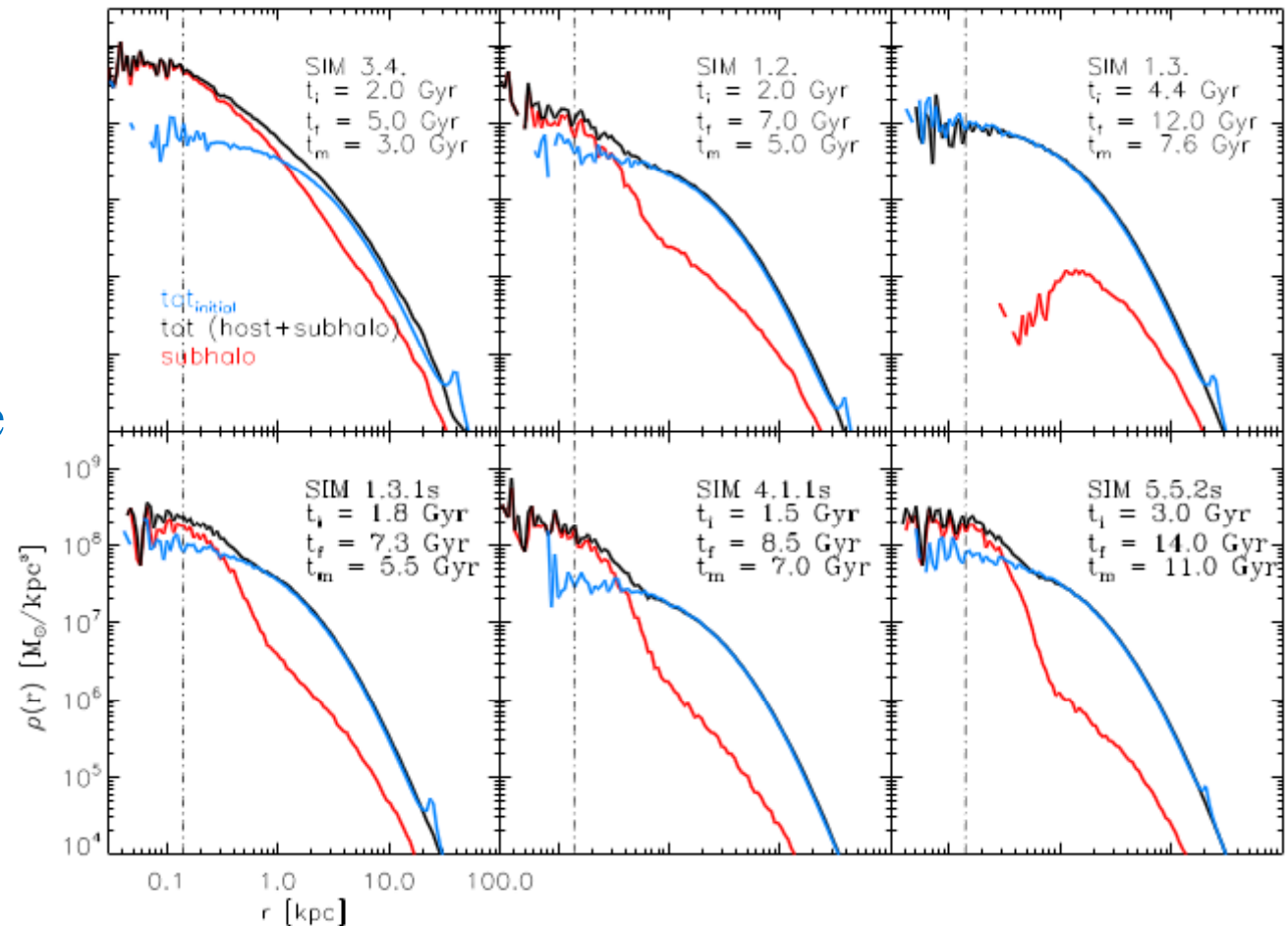
Cuspide récalcitrant

Les petits halos satellites ont une densité très élevée

On suppose un
Cœur initial

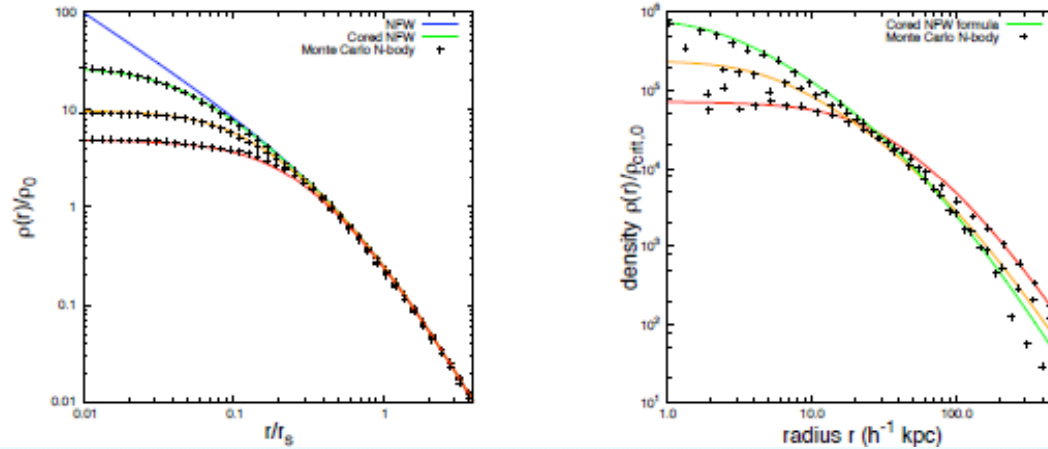
Plusieurs satellites
retombent au centre
très tard ($z \sim 0$)

Reconstruisent
le cuspide



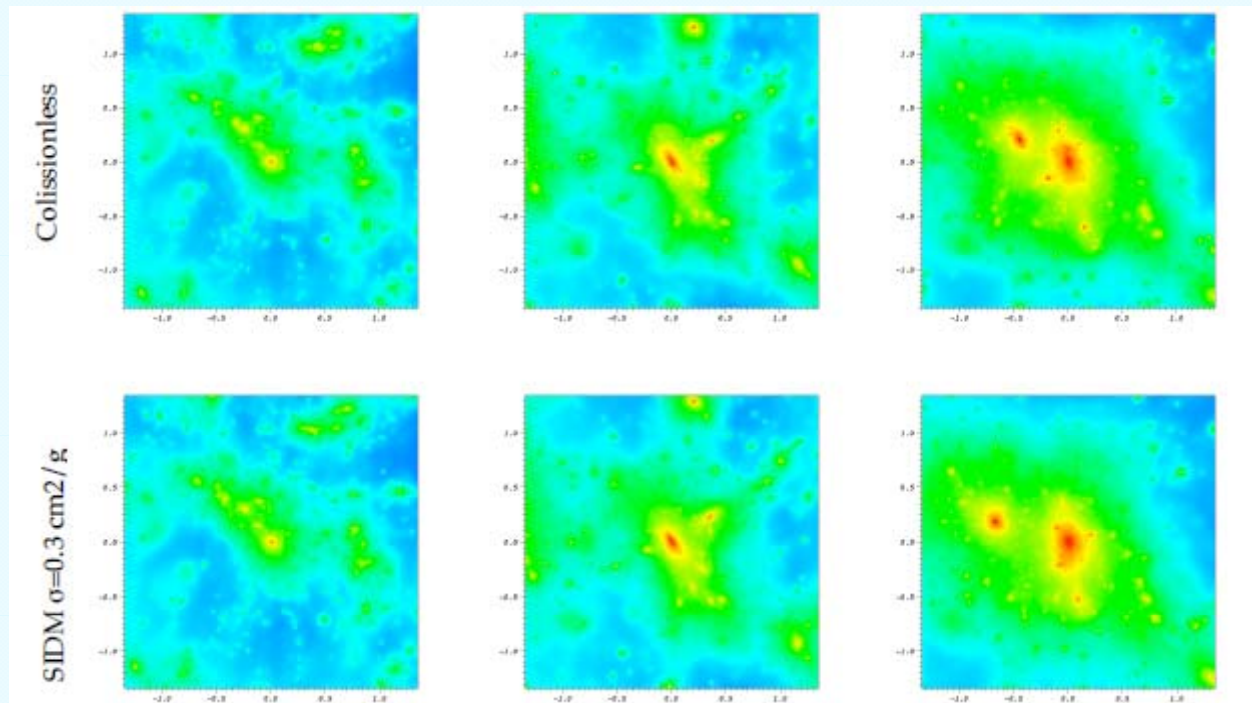
SIDM

Self-interacting DM



La taille des cuspides dépend de la galaxie. Naines $r_c \sim 10$ kpc

SIDM section efficace OK pour les galaxies, trop forte pour les amas



$$M_{200} = 1.7 \times 10^{14} M_{\odot}$$

Sans collision

Simulations SIDM
Koda et al 2011

Les amas sont
observés avec cusp

Des sections efficaces
dépendant de la vitesse? **en $v^{-\alpha}$**

Ou bien un potentiel de Yukawa
(Loeb & Weiner 2011)

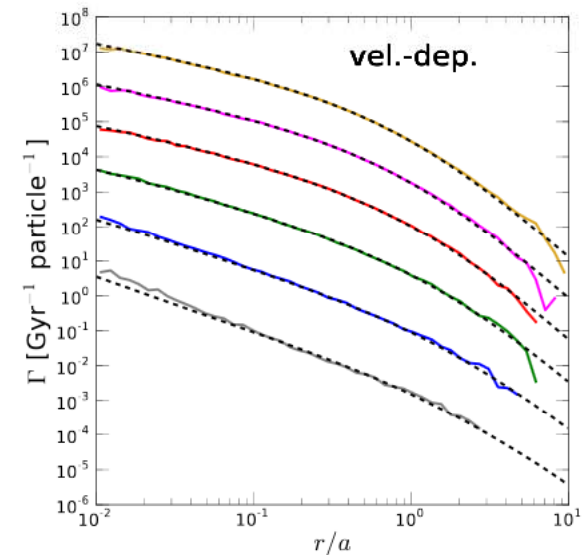
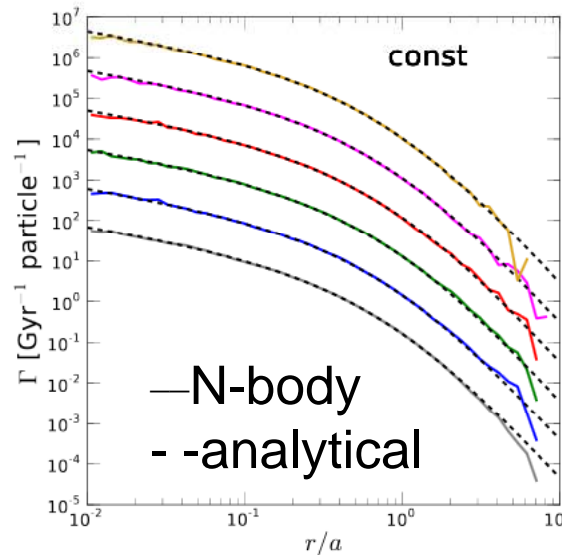
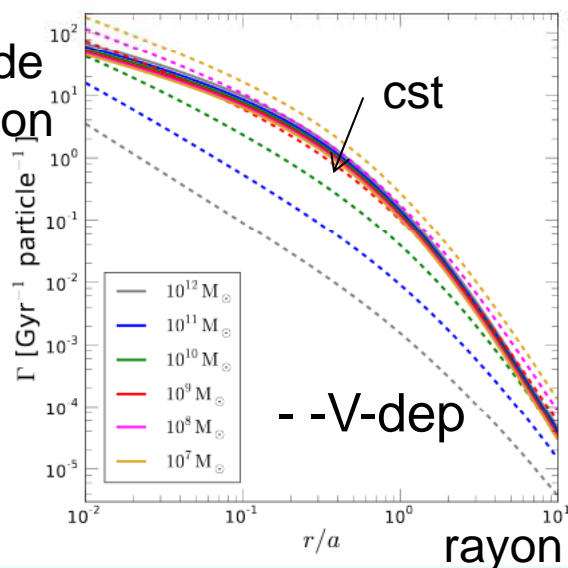
Force noire \rightarrow Diffusion dépendant de V

Self-interacting Dark matter, dépendant de v vdSIDM

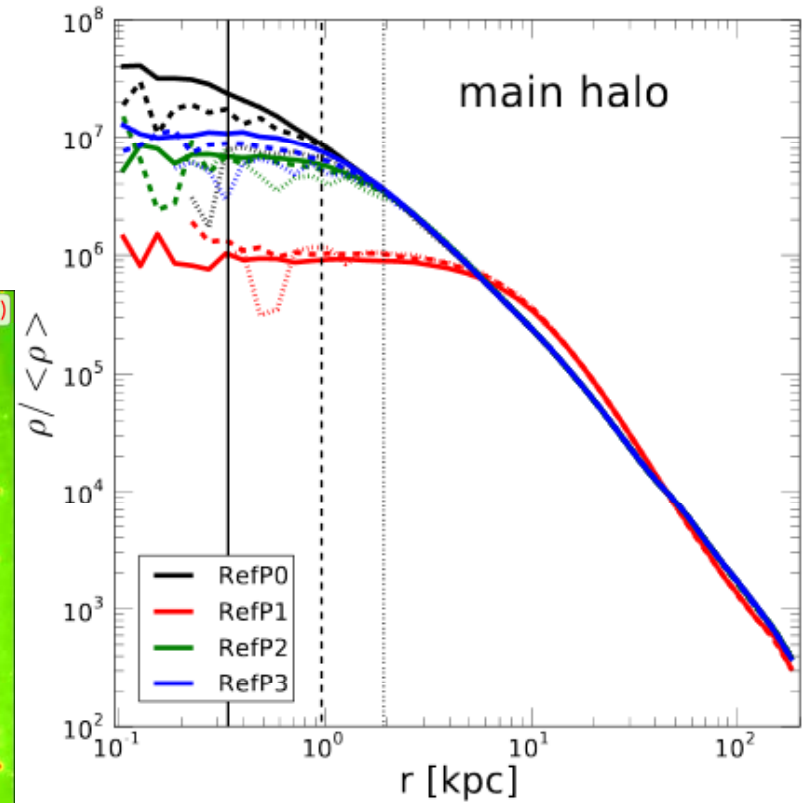
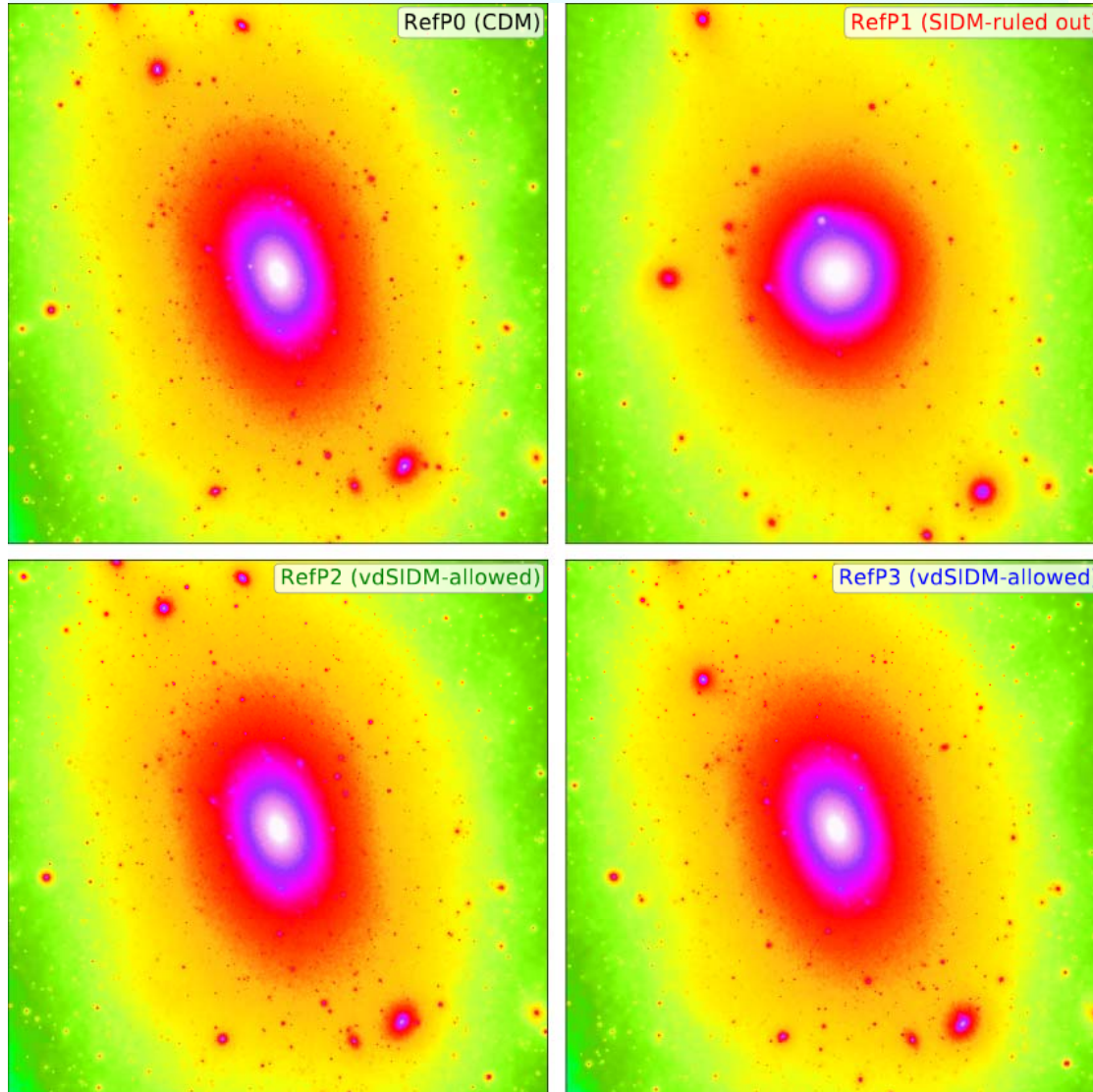
Simulations vdSIDM, avec un champ de Yukawa, boson de jauge m_ϕ
(//diffusion dans un plasma écrané de charge)

Vogelsberger et al 2012

Taux de diffusion



Section efficace dépendant de la vitesse: vdSIDM

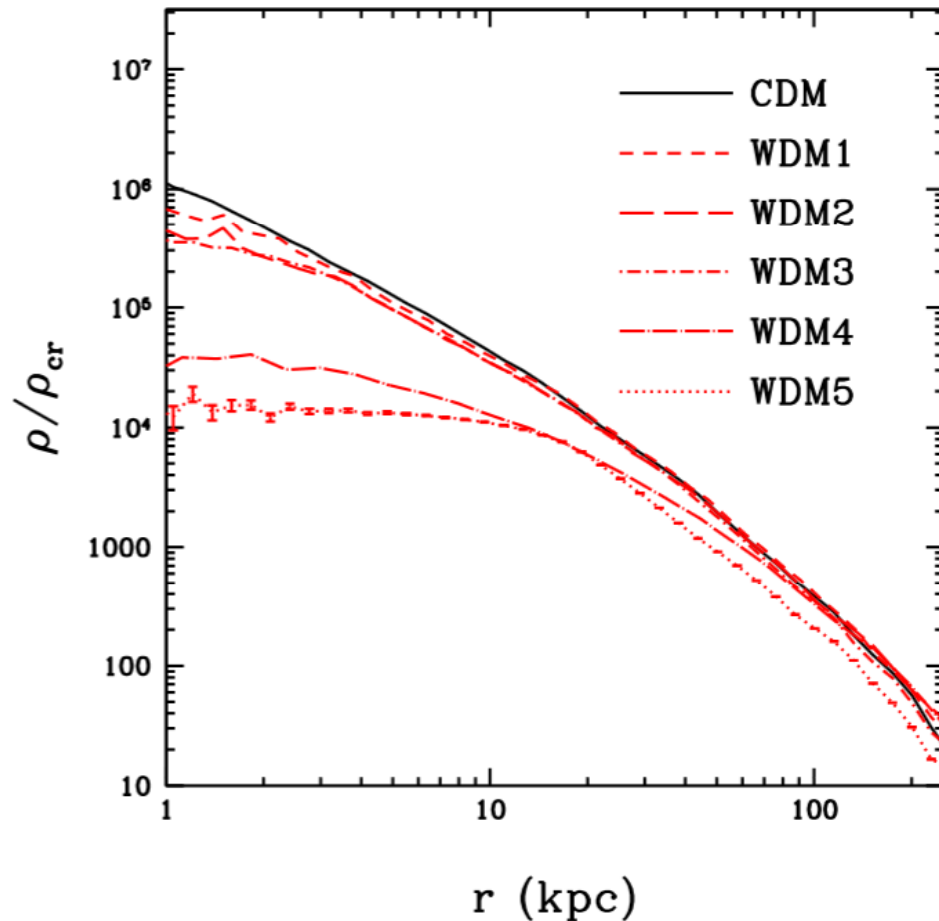


En $v^{-\alpha}$

Ou un potentiel de Yukawa
(Loeb & Weiner 2011,
Vogelsberger et al 2012)

Anisotropies des vitesses

Autre solution: la matière noire tiède?



Ce serait possible de former des cœurs de 1kpc si la masse $m_{\text{WDM}} < 0.1$ keV

Théorème de Liouville
Conservation de $Q = \rho/\sigma^3$

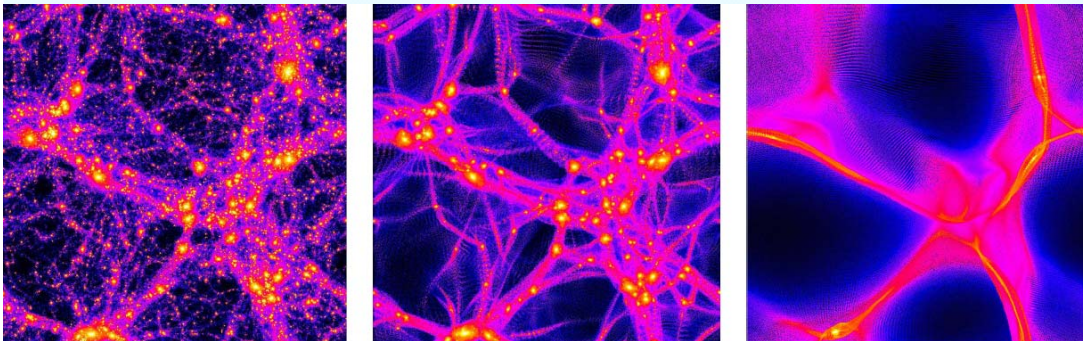
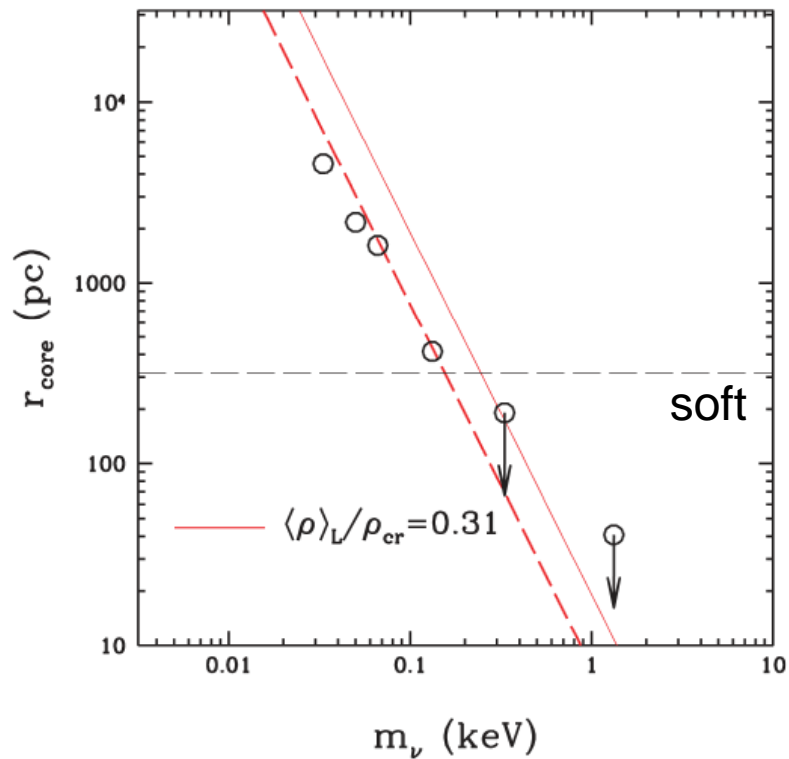
C'est en particulier la taille observée dans les galaxies naines dominées par la matière noire

Problèmes de la matière noire tiède

Pour rendre compte des cœurs de 1kpc,
 $m < 0.1 \text{ keV}$

Mais aux grandes échelles $m > 3 \text{ keV}$
est requis (surveys Lyman- α)

➔ Avec $m = 0.1 \text{ keV}$ on ne forme pas les
galaxies naines



Maccio et al 2012, 13

Cuspides et WDM

Le profil de densité est **universel**: NFW, pour HDM, WDM et CDM
(*Wang & White 2009*)

→ L'universalité n'est pas due aux fusions

Pendant le **collapse monolithique**,
Même forme de halos, profils, cusps
Spins des halos, cinématique

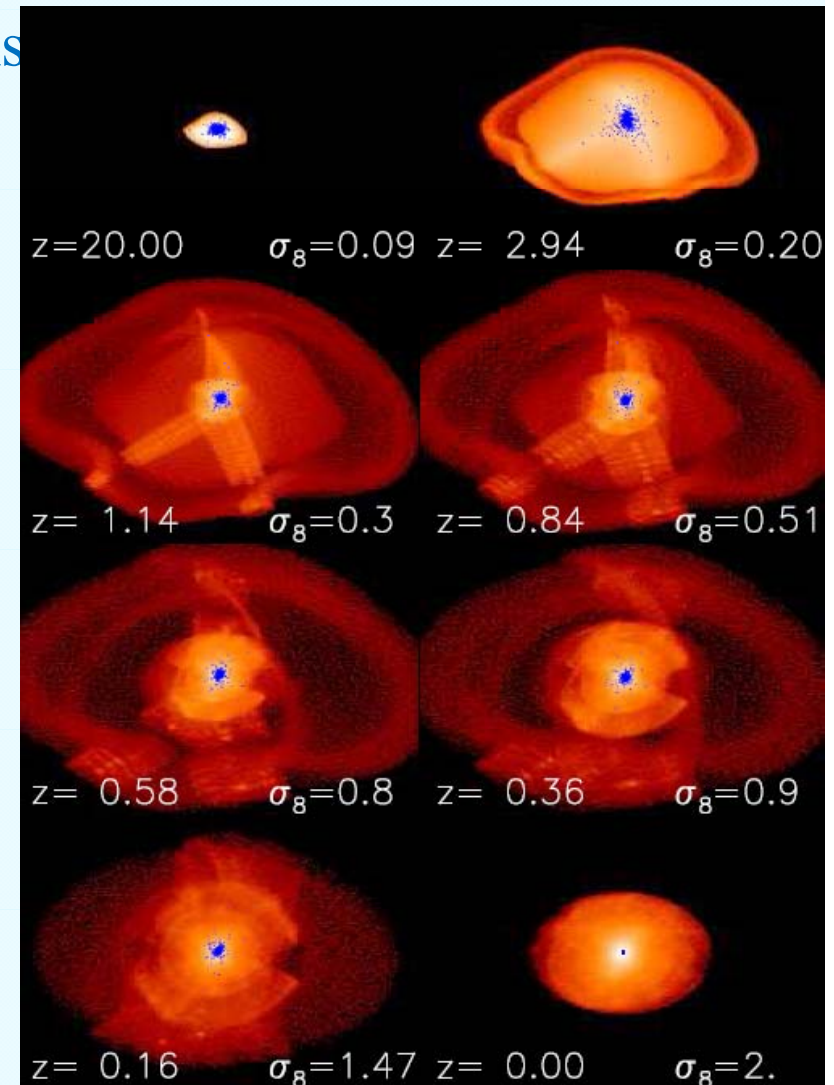
Seule différence: le **spectre de puissance**

→ Peut limiter les petits halos

On pourrait avoir $r_c/r_{200} < 0.1\%$

Coeurs des galaxies $r_c/r_{200} = 5\%$

Villaescusa-Navarro, Dalal (2011)

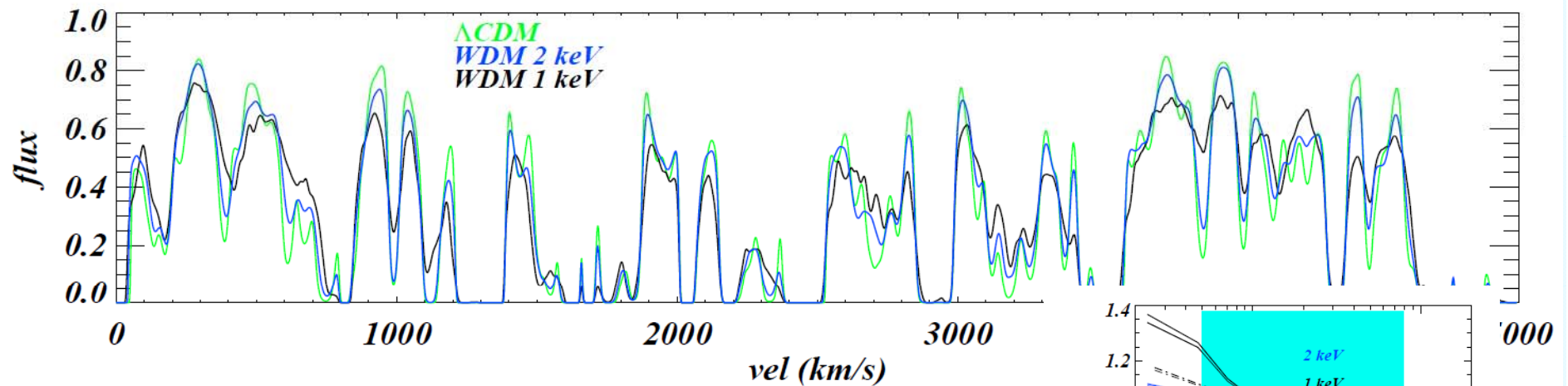


Ly- α : contraintes sur WDM

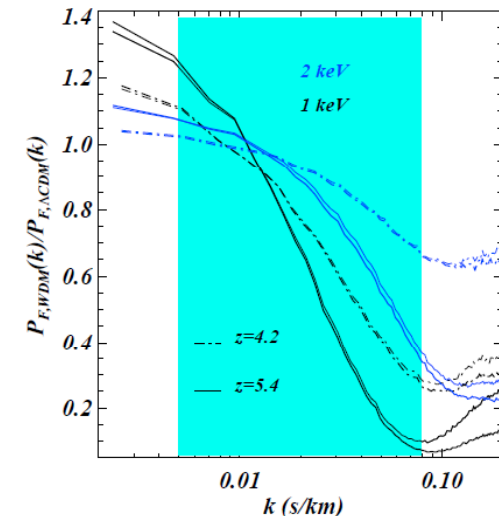
25 quasars $z > 4$: spectres HIRES sur le Keck, *Viel et al 2013*
+ MIKE (Magellan)

Forêt Lyman- α , comparaison avec les simulations

$m_{\text{WDM}} > 3.3 \text{ keV}$ (2σ)

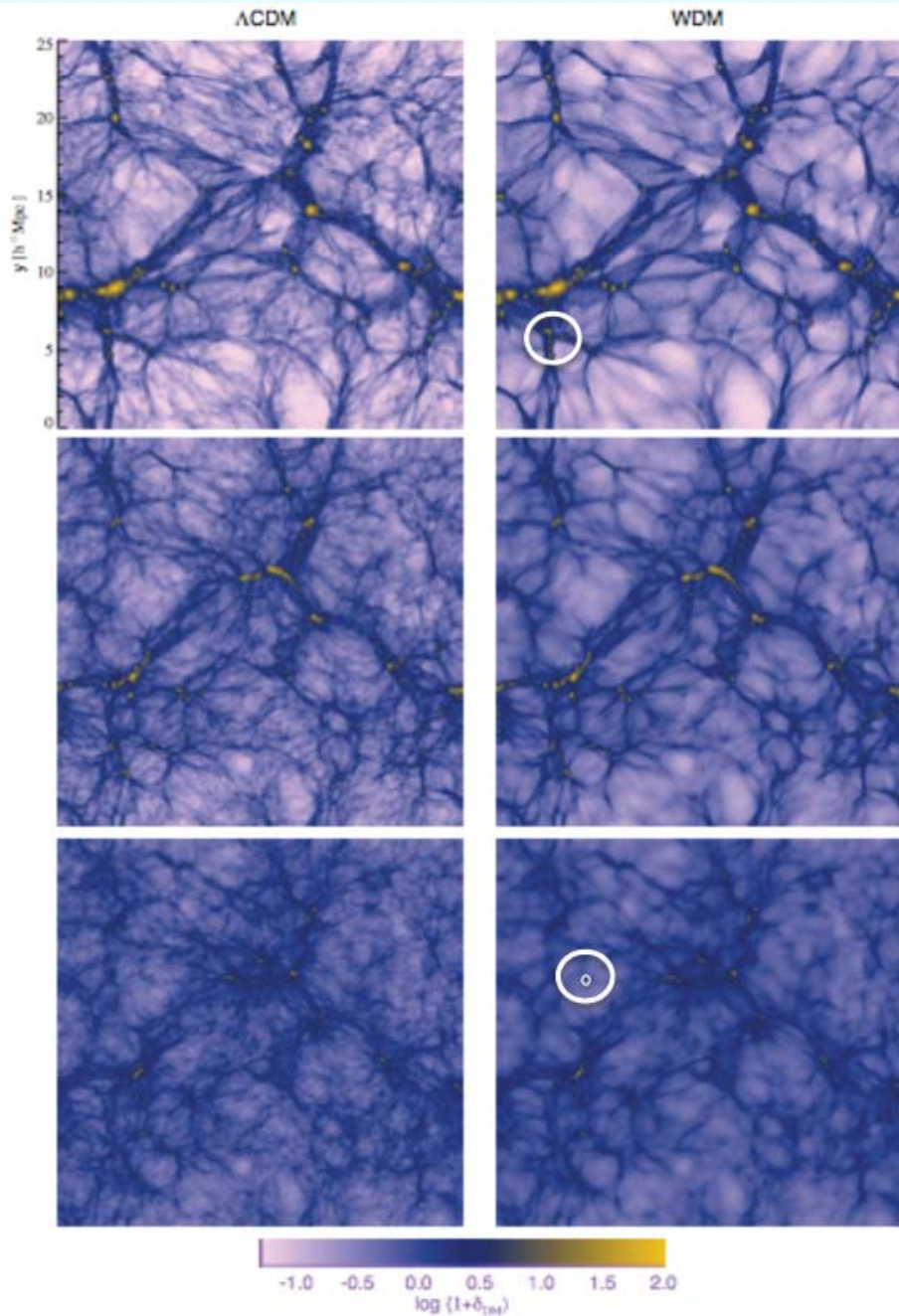


Spectre de puissance 1D
Prédit par les modèles



CDM

WDM



Coupure linéaire

Pourquoi Ly-a?

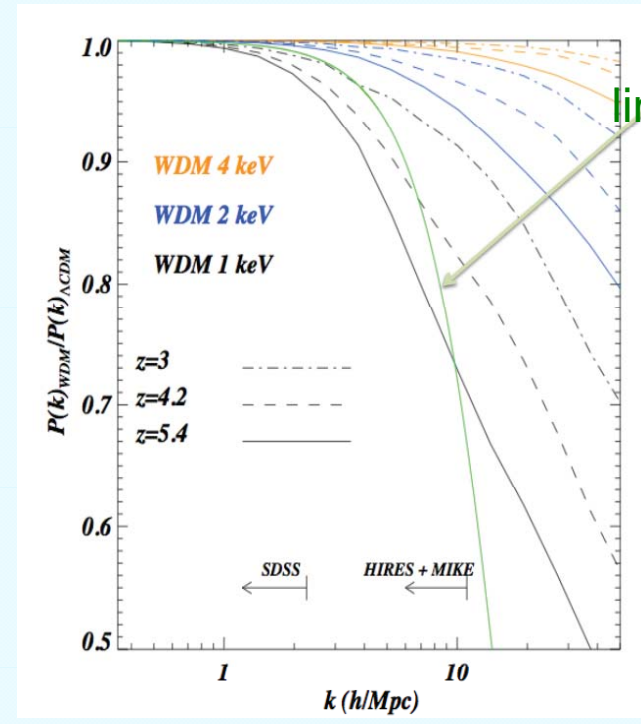
→ Intégration à 1D

→ Grand z=4, linéaire

z=0

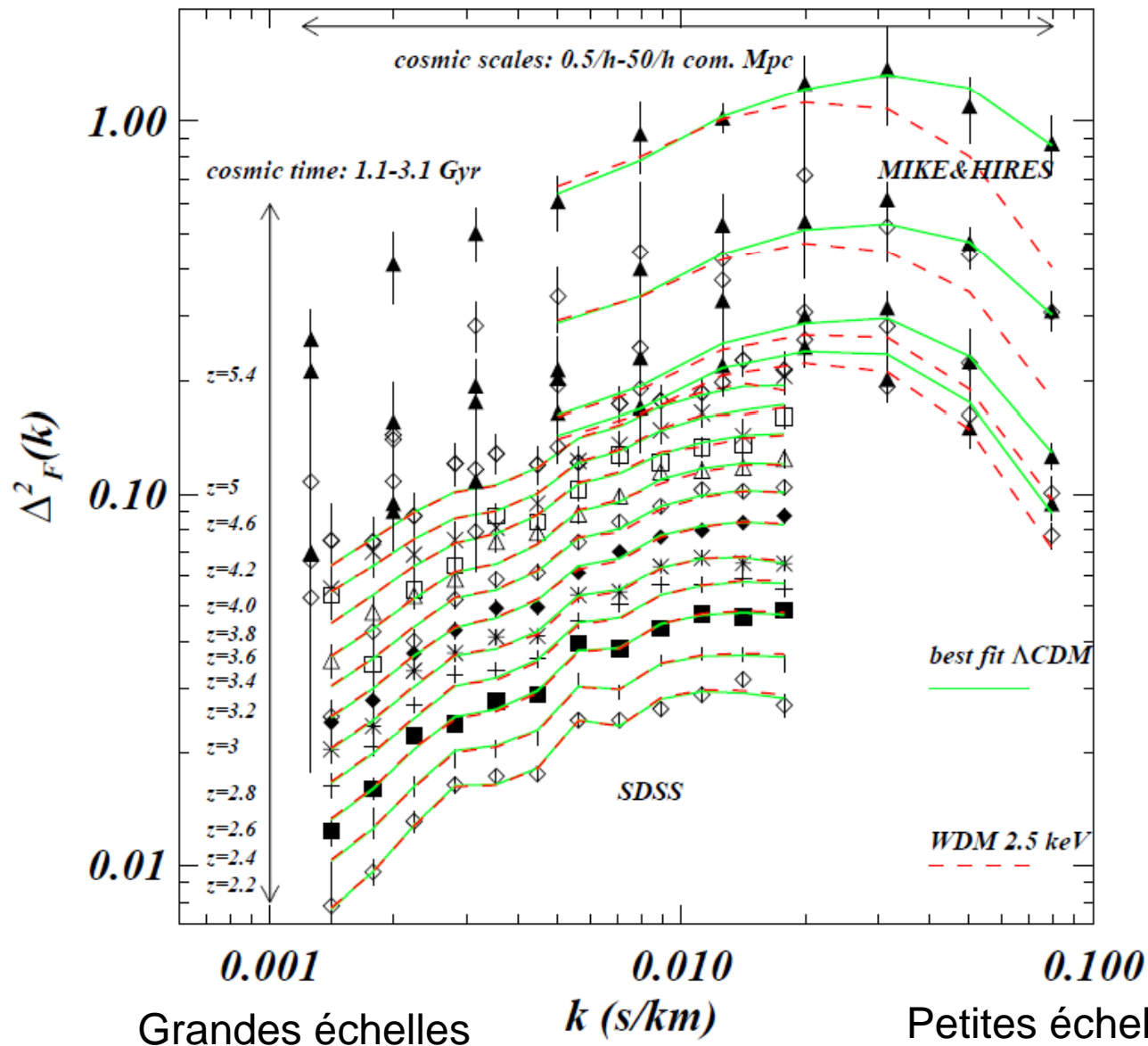
z=2

z=5



linéaire

Meilleur fit CDM/WDM



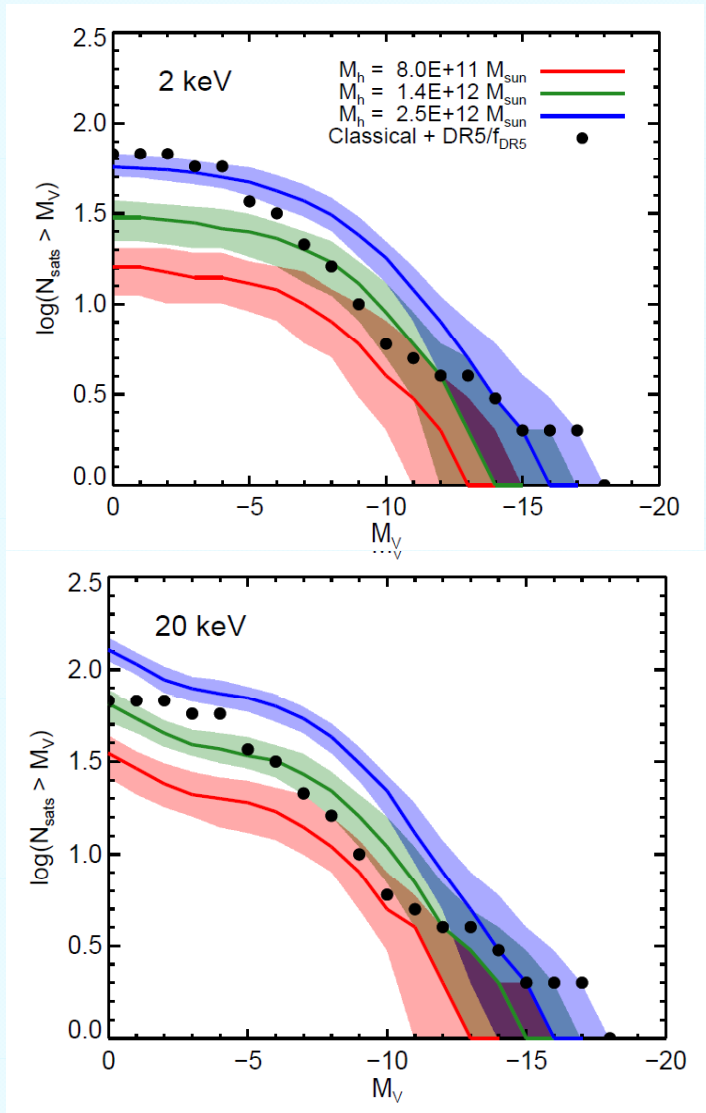
Viel et al 2013

MIKE (Magellan)+
HIRES (Keck)+
SDSS
Spectre de puissance
Unités sans dimension

Comparaison avec
les modèles

Contraintes sur la masse(WDM)

N(satellites)



Deux buts contradictoires

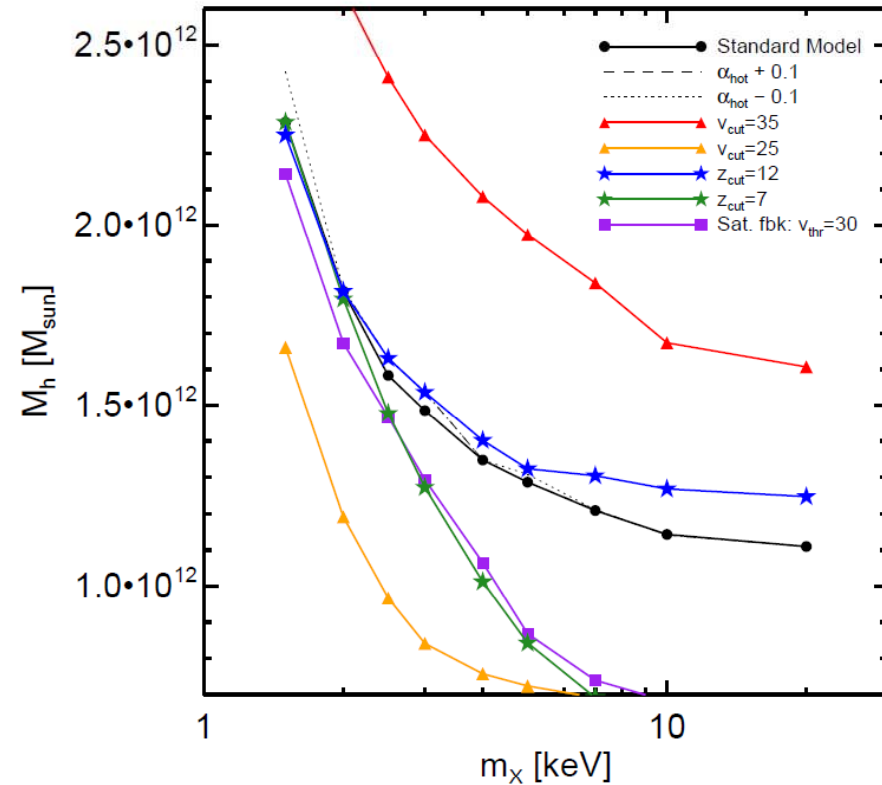
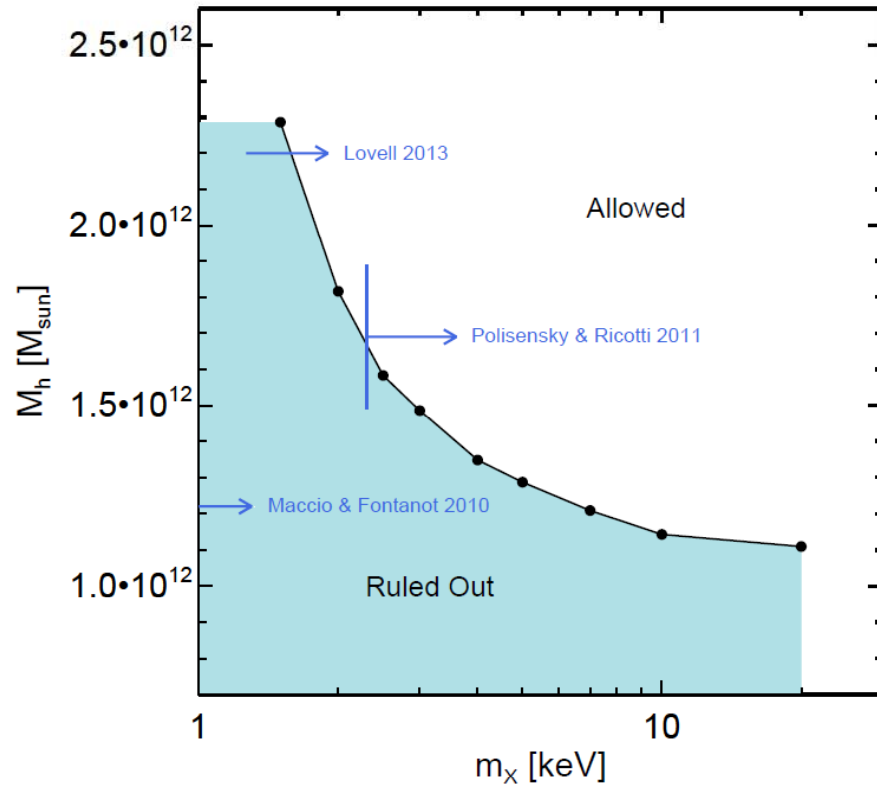
1- Faible mWDM pour reduire la concentration (cuspidé)

Formation des structures plus tard, quand la densite de l'Univers a faibli

2- mWDM assez élevée pour avoir assez de galaxies naines

Ajuster la masse de la Voie Lactée?

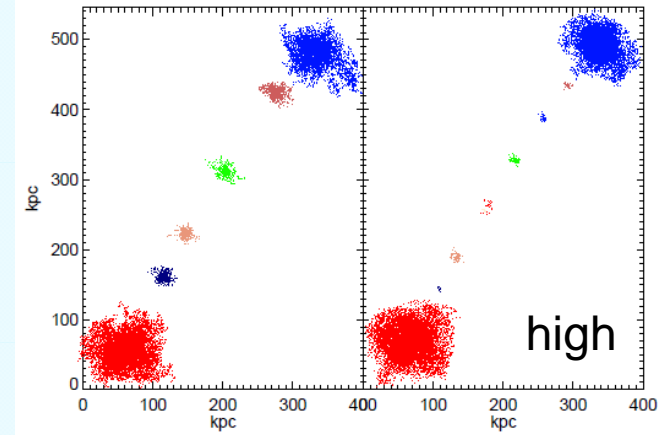
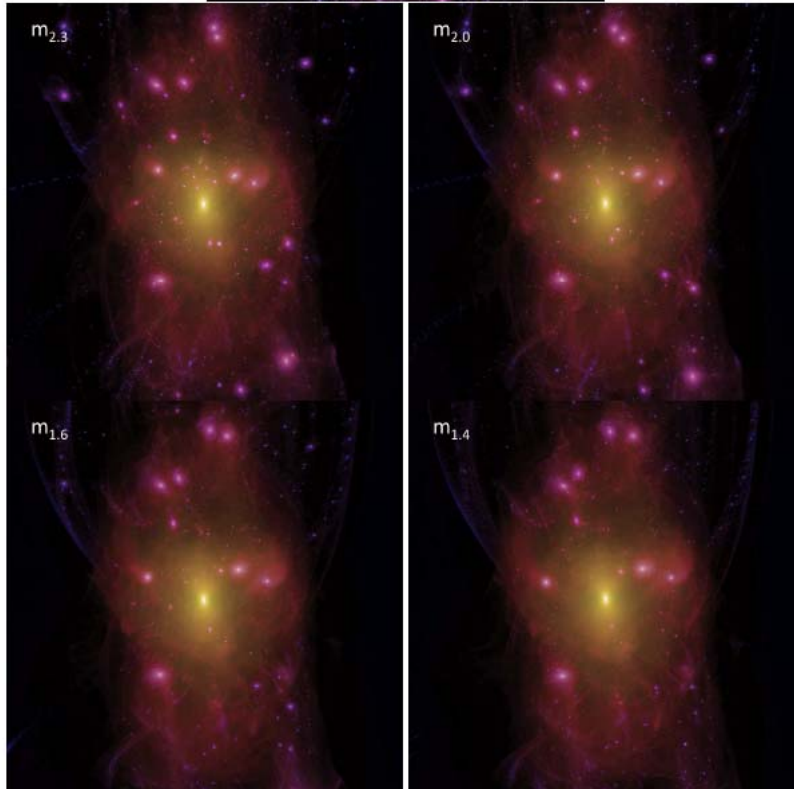
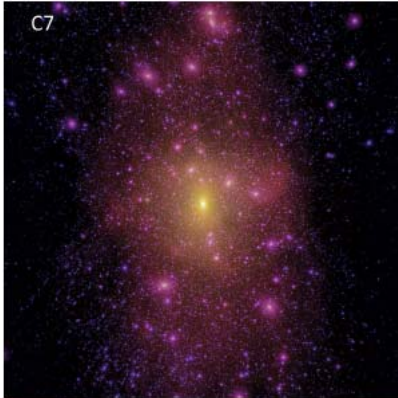
Dépend de la masse de la Voie lactée



Avec $m_{\text{WDM}}=3.3\text{keV}$,
 Si la masse $M_W < 1.2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$, WDM est impossible

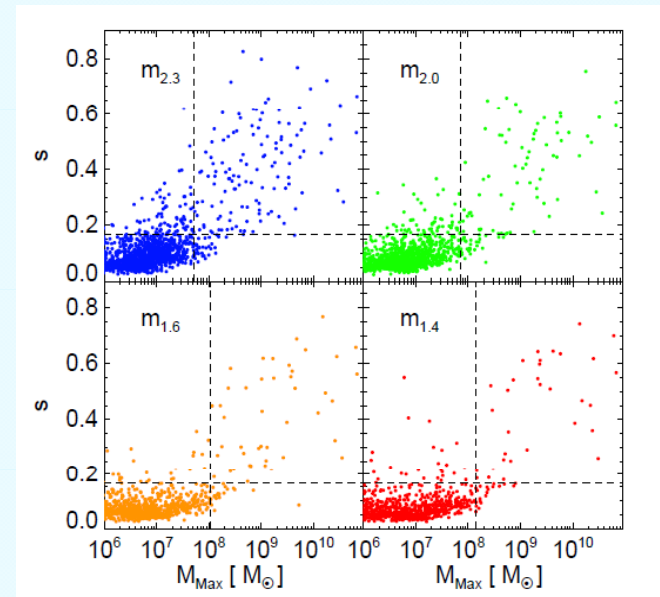
Kennedy, Frenk, Cole et al 2014

Formation de structures WDM



Haute résolution angulaire requise
Fragmentation artificielle
En dessous de la résolution

Lovell, Frenk, Eke et al 2013



2- Le problème du moment angulaire

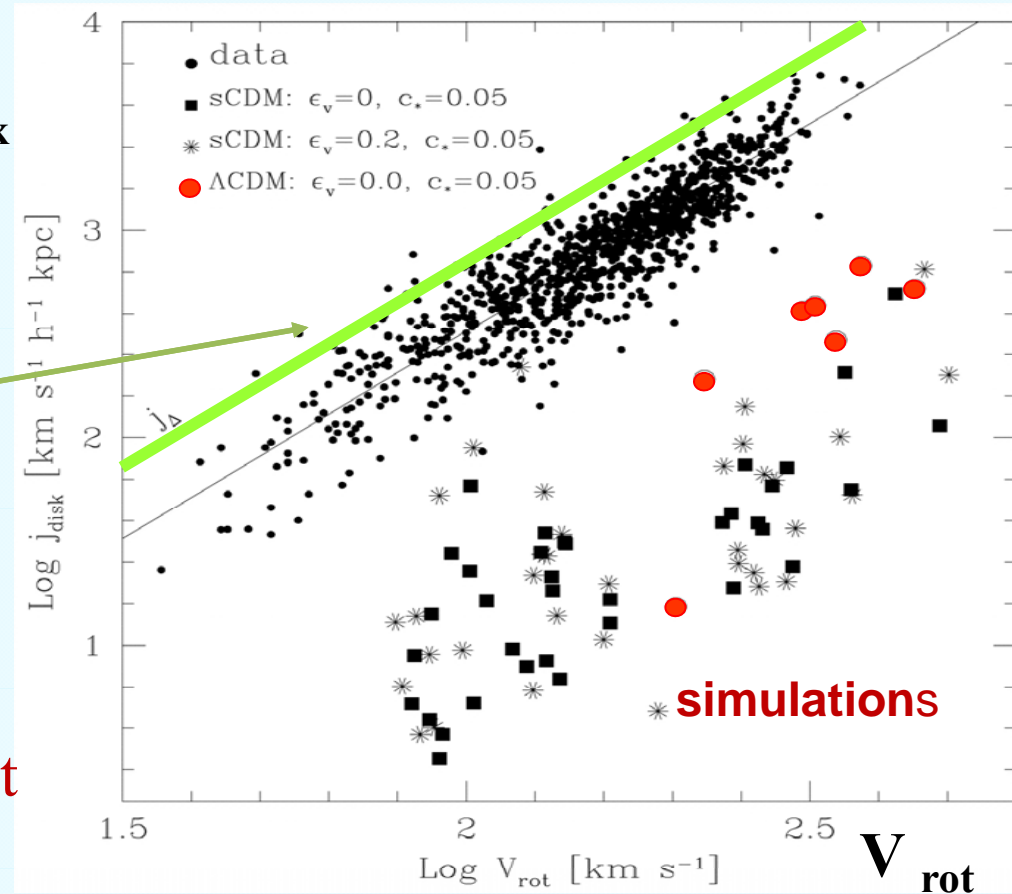
Moment $J = r V$

J_{disk}

Prédiction du modèle simple

→ Les disques ne gardent que la moitié du moment angulaire initial

Lien avec le sur-refroidissement

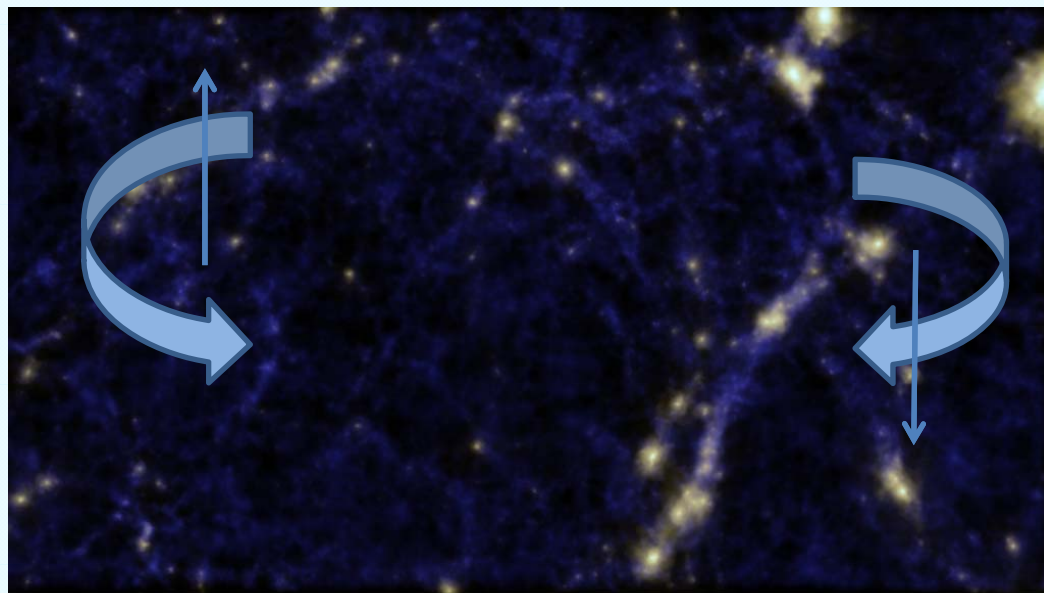


(Navarro et al. 2000)

Les galaxies à disque simulées ont des tailles **10 fois inférieures** à celles qui sont observées → **ressemblent à des bulbes**

Pourquoi les galaxies tournent?

Juste au moment de l'effondrement, avant de se découpler de l'expansion, les couples de torsion créent le moment angulaire



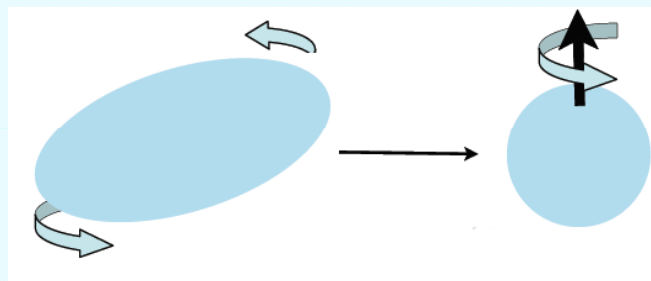
→ Paramètre de spin

$$\lambda \equiv J|E|^{1/2}G^{-1}M^{-5/2}$$

Valeur moyenne

$$\langle \lambda \rangle = \mathbf{0.05}$$

Fall & Efstathiou 1980



Evolution du moment angulaire

Modèle semi-analytique de formation des disques

Initialement les baryons ont le même moment que la MN $\langle \lambda \rangle \sim 0.05$

-- Conservation du moment angulaire

lorsque les baryons tombent dans les potentiels de matière noire

-- Contraction adiabatique (Barnes and White 1984, Blumenthal et al 1986)

-- Formation des bulbes par instabilité des disques (Dalcanton et al 1996, Mo et al 1997, van der Bosch 1998)

-- Feedback des Supernovae (van der Bosch et al 2000, 2002)

Simulations dans le modèle standard

La catastrophe du moment angulaire

Les simulations cosmologiques montrent que le moment angulaire des baryons n'est pas conservé durant l'effondrement

(Navarro and Benz 1991, Steinmetz and Navarro 1998, 2000; Sommer-Larson et al 2000) Echange baryons \rightarrow Matière noire

La distribution des moments

La distribution de J spécifique dans les simulations ne correspond pas aux observations

(Bullock et al 1999, van der Bosch et al 2000)

Autres problèmes:

Taille des disques pas uniquement déterminées par λ

(Lacey and de Jong 2000)

Les fusions majeures $\rightarrow \lambda$ le plus grand (pour les sphéroïdes)

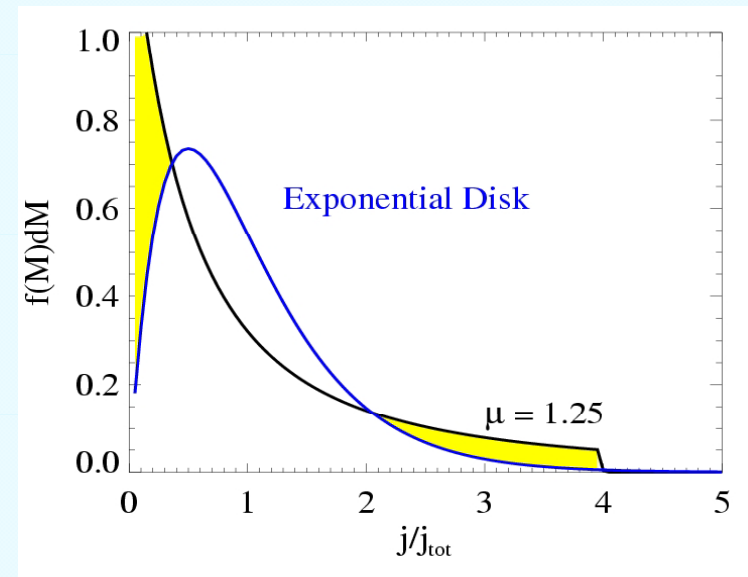
Le problème est peut-être lié aux fusions de galaxies trop nombreuses qui annulent le moment angulaire

Mais la distribution du moment J n'est pas correcte non plus

Ce sont les fusions majeures qui gardent le plus grand λ

Distribution du moment J

$$\frac{M(< j)}{M_{\text{vir}}} = \frac{\mu j/j_{\text{max}}}{\mu - 1 + j/j_{\text{max}}}, \quad \mu > 1$$



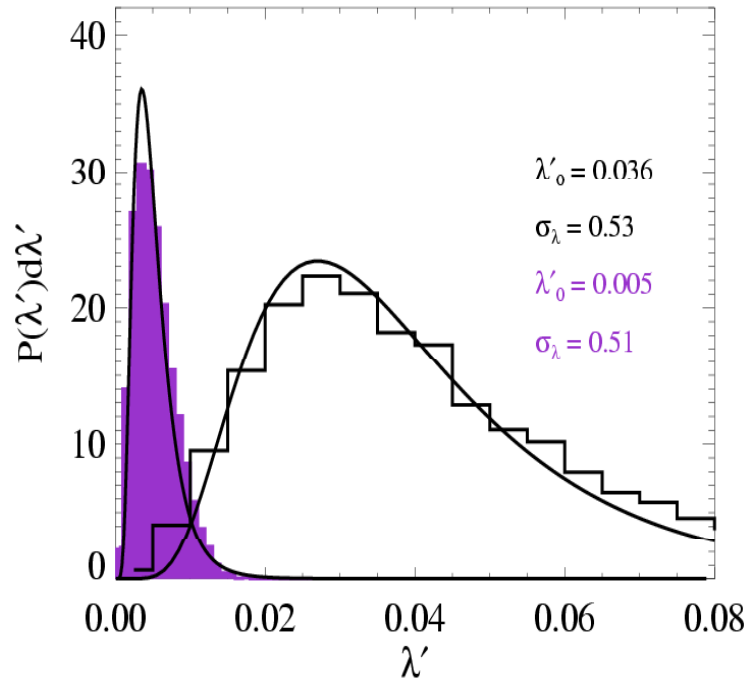
distribution log-normale

Excès de matière à bas et haut moment, en comparaison à un disque exponentiel

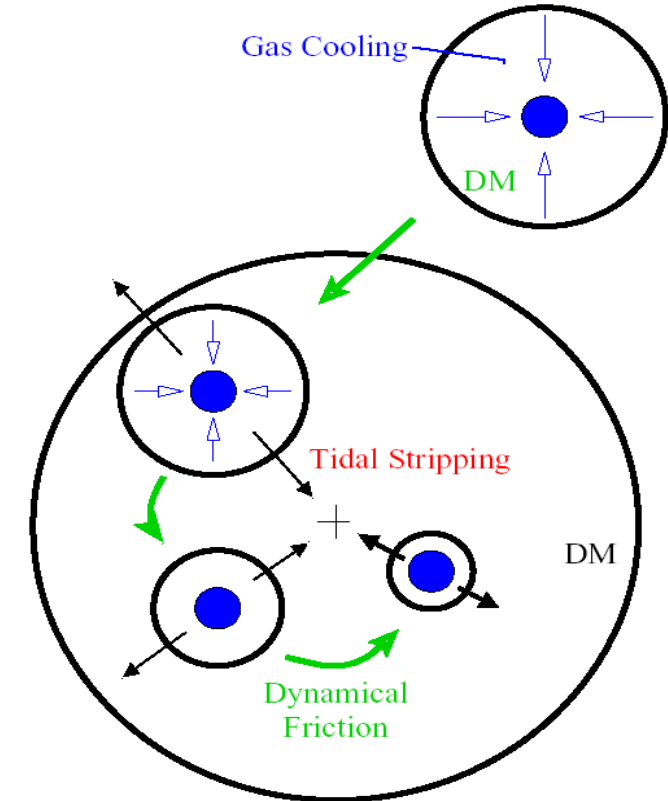
Le problème du moment angulaire provient de la contraction des baryons

Le centre est à l'abri des forces de marée pendant que les bords (MN) sont dilués

→ Les parties diluées ne sont pas soumises à la friction dynamique



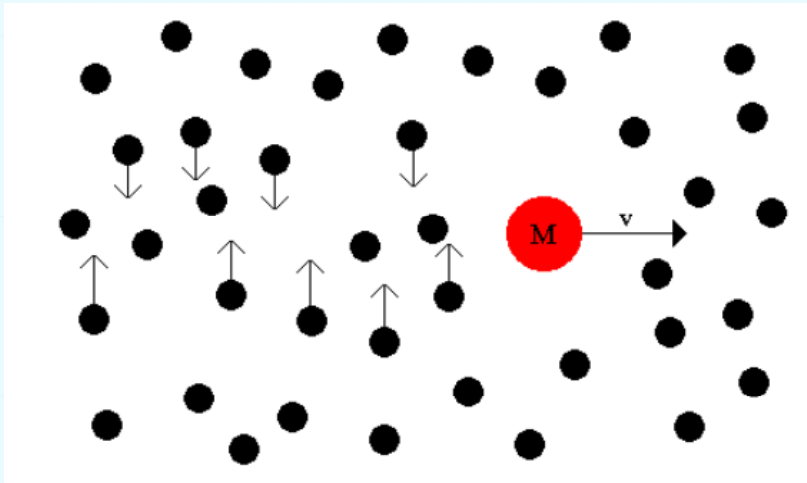
Over-Cooling → Spin Crisis



Solution: empêcher les baryons de tomber
Ou bien supernovae, AGN pour les éjecter

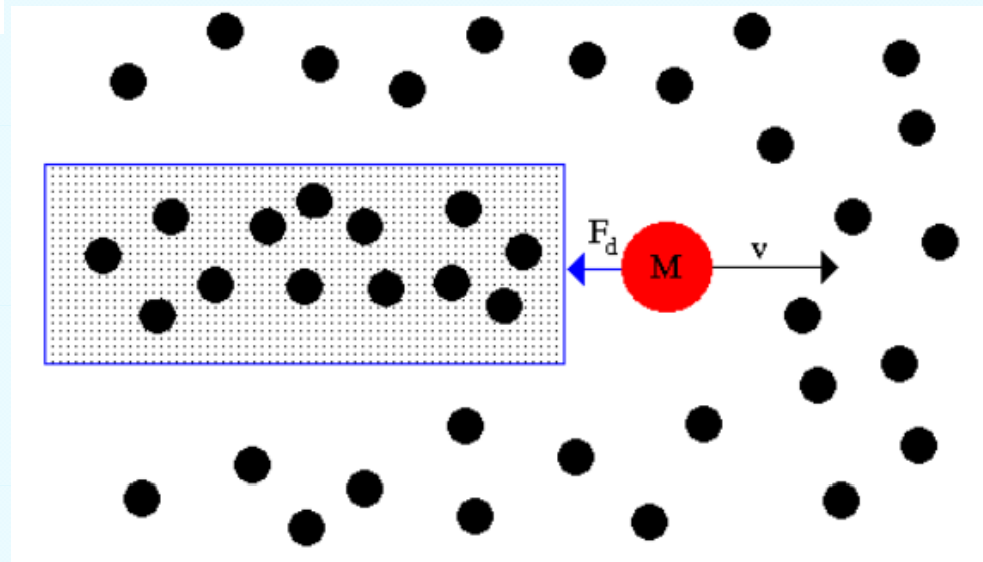
La friction dynamique

Force freinant une masse concentrée, dans un bain de particules

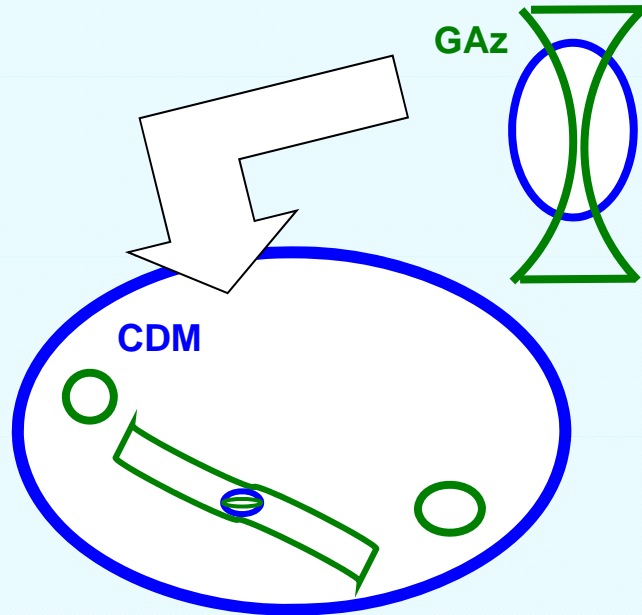


Masse M , en déplacement

Les particules se regroupent derrière en un sillage qui freine la masse M



Eviter la friction dynamique



Si le gaz est accrété lentement en phase froide sur les galaxies, les fusions hiérarchiques perdront **moins de moment angulaire par friction dynamique**

Accrétion tardive dans l'univers

Le gaz, balayé et dilué, ne subit plus de friction dynamique

Même processus que le feedback, mais peut-être plus efficace
(Gnedin & Zhao 2002)

Fréquence des galaxies sans bulbe

Localement, environ 2/3 des spirales ont peu ou pas de bulbe

Kormendy & Fisher 2008, Weinzirl et al 2008

Quelques autres ont un petit bulbe classique avec un pseudo-bulbe
Avec en plus des amas d'étoiles nucleaires (*Böker et al 2002*)

Frequence des galaxies extra-fines (*Kautsch et al 2006*)

1/3 des galaxies sont des disques purs et fins

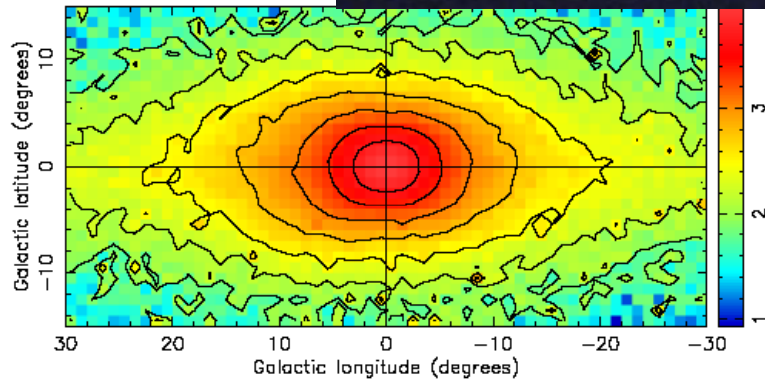
Echantillon SDSS : 20% des spirales sans bulbe jusqu'à $z=0.03$
(Barazza et al 2008)

Les galaxies sans bulbe sont plus barrées qu'avec bulbe

Comment se réconcilier avec le scénario hiérarchique?

Exemple de la Voie Lactée: pseudo-bulbe

le bulbe
De la Voie
lactée est
Compatible
avec
**Pseudo-
bulbe**



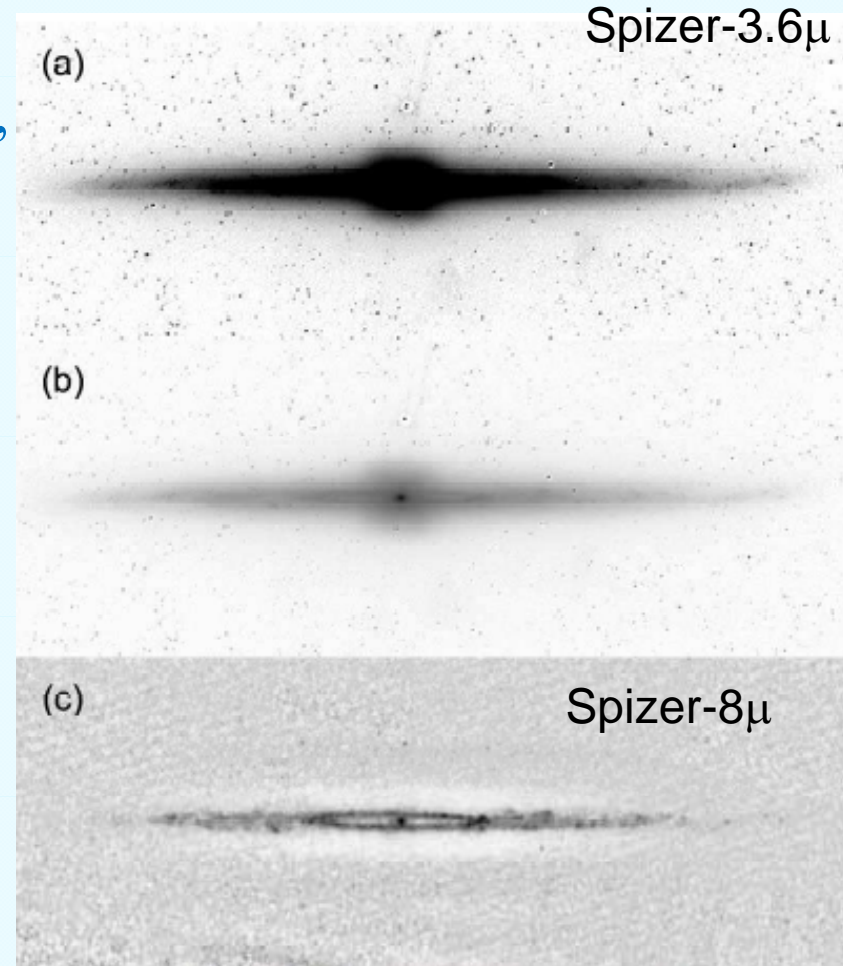
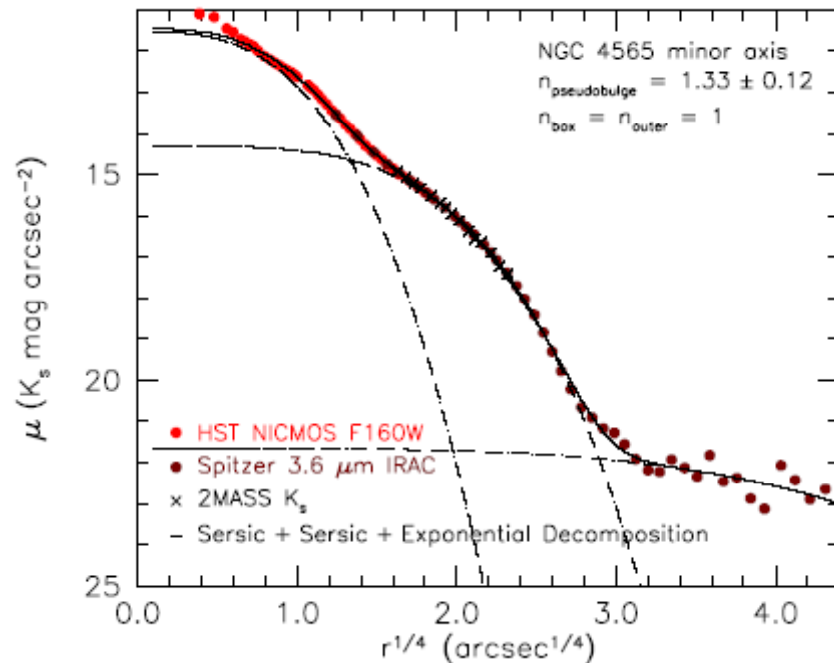
Shen et al 2010

NGC 4565: SBb, Pas de bulbe classique

En plus de la barre, un pseudo-bulbe de 6% de masse

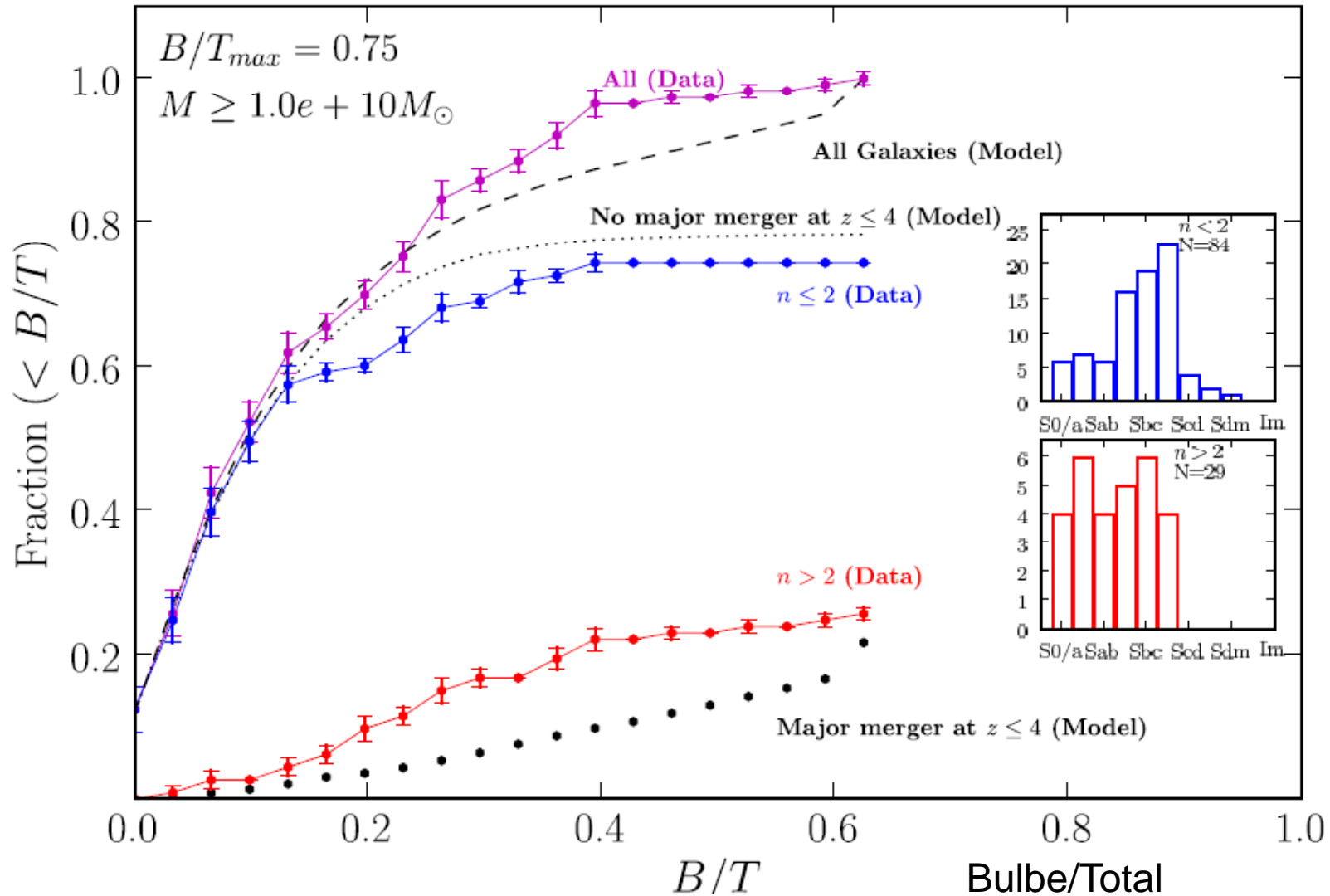
« Pseudo », car aplati, en rotation,
de profil $\log I \sim r^n$
avec $n = 1.3-1.5$

HST 1.6 μ m



Peu ou pas de bulbe dans les galaxies spirales

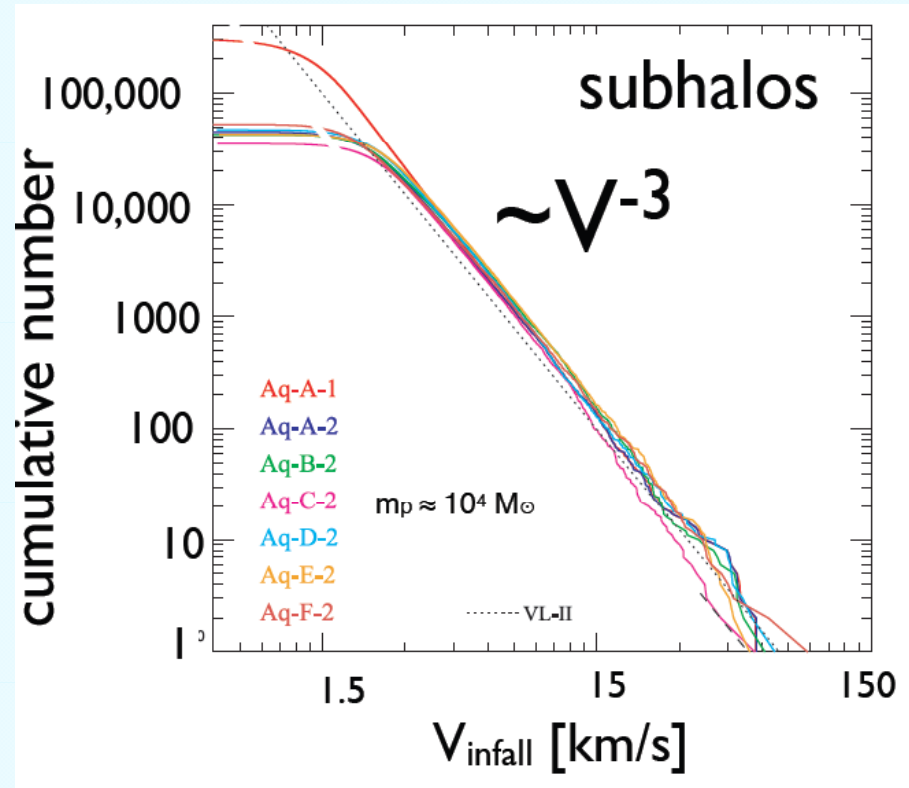
Il faudrait moins de 10% de fusions



3- Satellites manquants

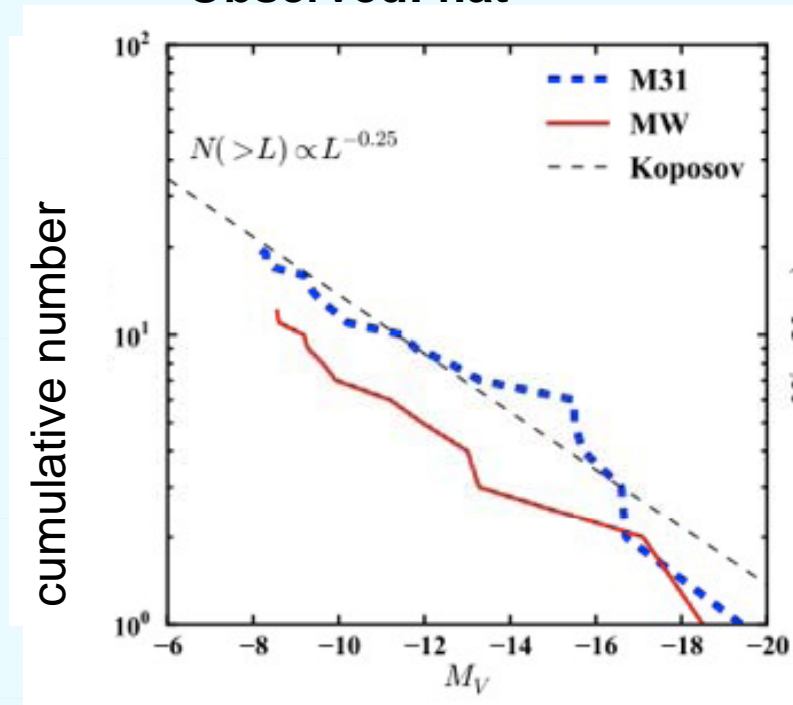
Aquarius: simulations de la Voie Lactée

Predicted: Steep



Springel et al. 2008

Observed: flat



Boylan-Kolchin et al. 2011

Galaxies naines Sphéroidales

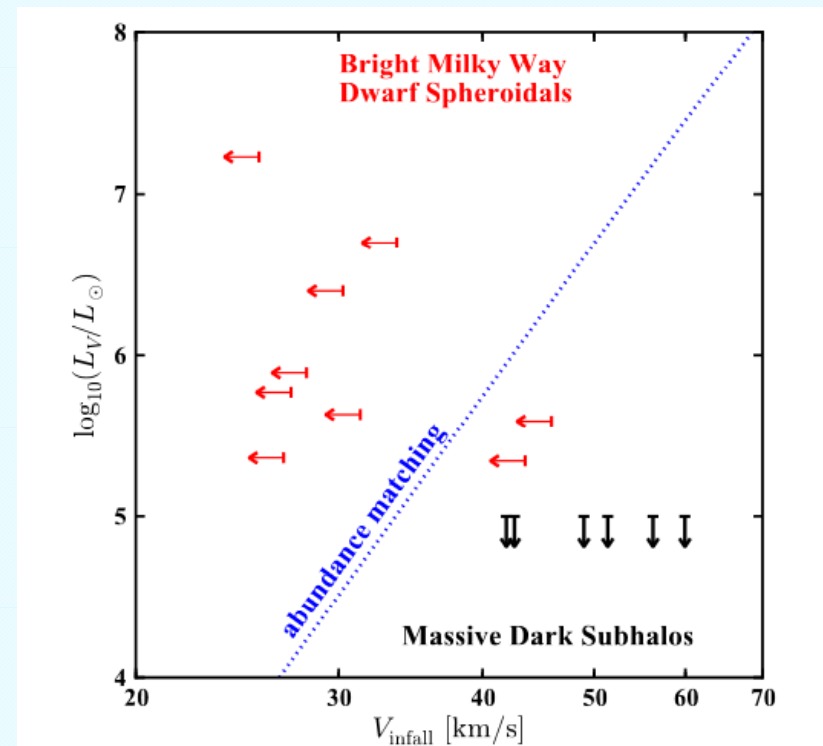
Fornax, Leo I, Sculptor, Leo II, Sextans, Carina, Ursa Minor, Canes Venatici I, Draco



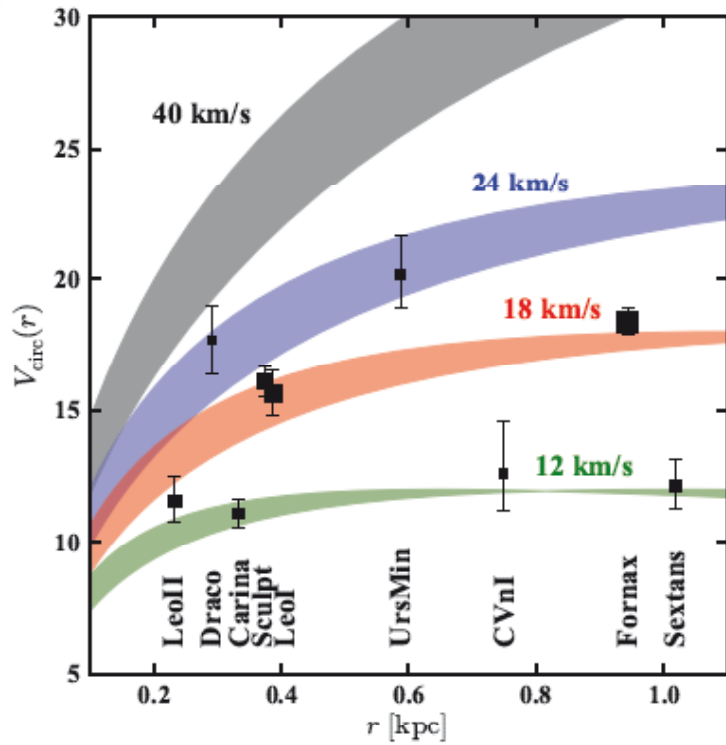
$L_V > 10^5 L_\odot$
Pas assez d'étoiles pour invoquer
la rétro-action des supernovae

Faible brillance de surface
dominées par la matière noire

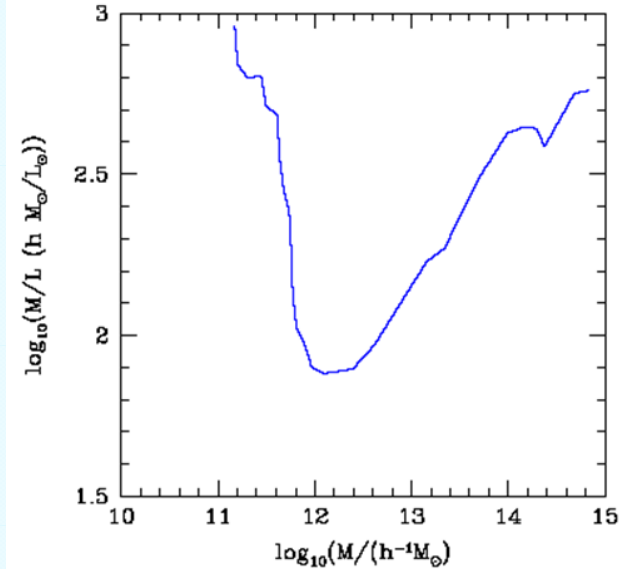
Ces dSph ne sont pas formées
dans les simulations CDM



Misfits de satellites



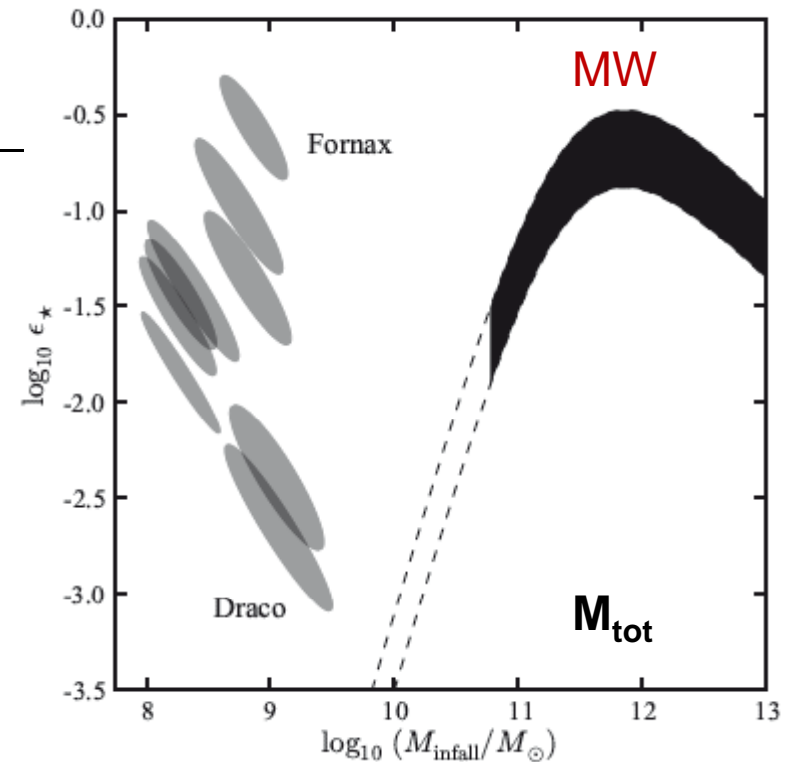
9-10 satellites
avec $L_V > 10^5 L_\odot$



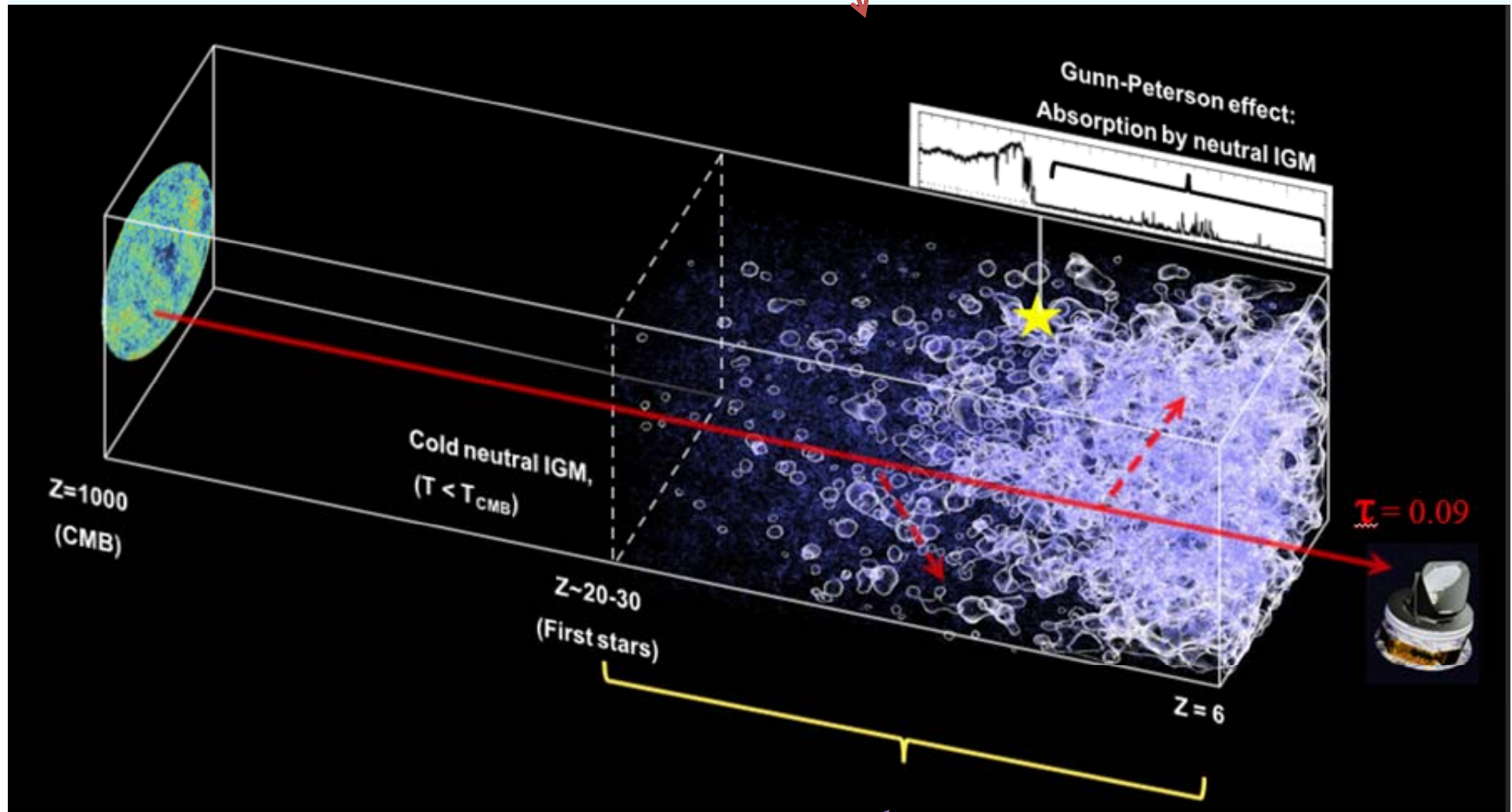
$$\frac{M_*}{f_b M_{DM}}$$

Boylan-Kolchin et al 2012

Le fit d'abondance des halos,
donne l'efficacité de former des étoiles,
→ max à 20% des baryons en étoiles
à $M_{tot} \sim 10^{12} M_\odot$ (galaxies comme MW)



Age sombre et ré-ionisation de l'univers



Premiers rayons ionisants, chauffage

Quelle période?

Effet sur le CMB, Rayonnement micro-onde fossile

$$\tau = \int dt c \sigma_T n_e = \int \frac{dz}{H(z)(1+z)} c \sigma_T n_e(z)$$

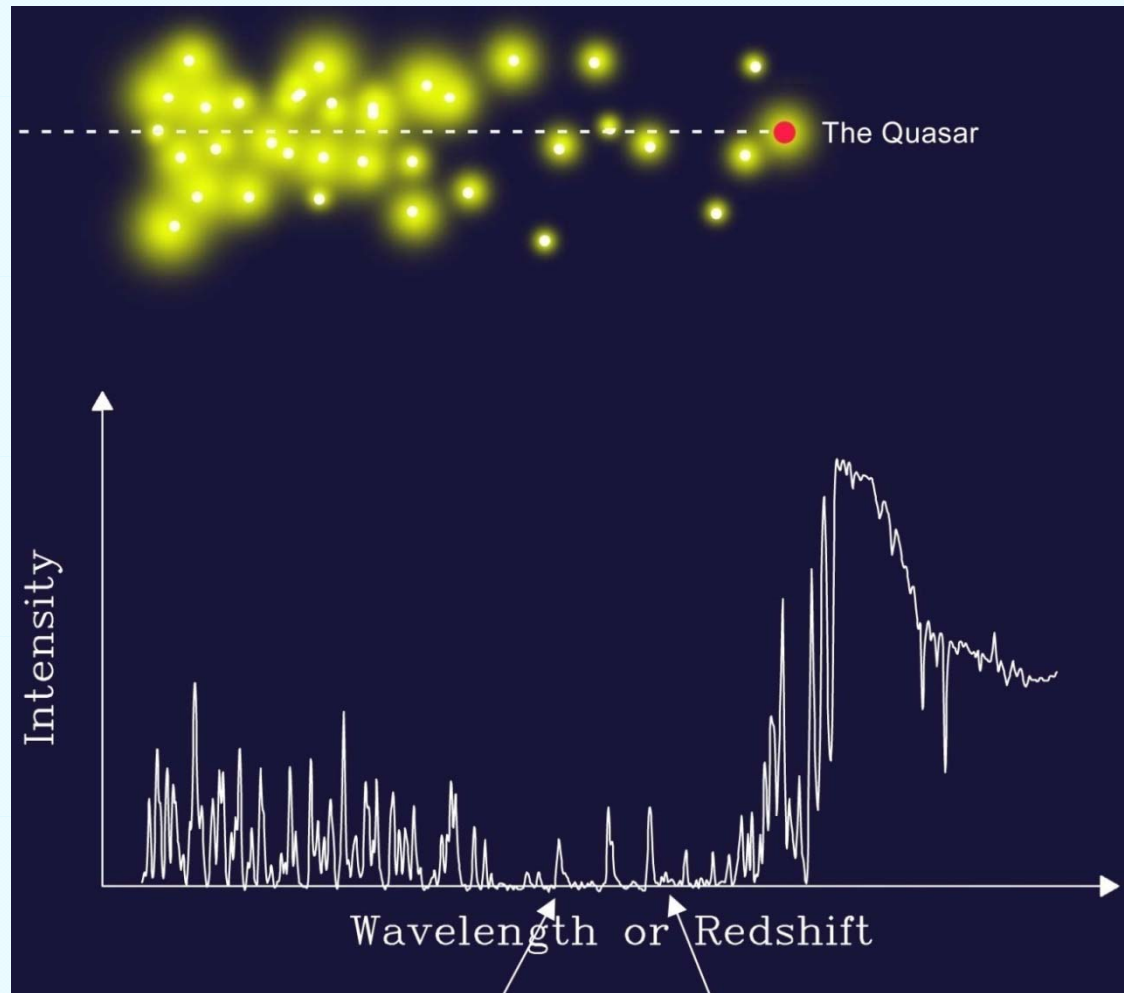
$$6 < z < 15 \quad \text{--} \quad \tau = 0.09$$

$$6 < z < 10 \quad \text{si} \quad \tau = 0.07$$

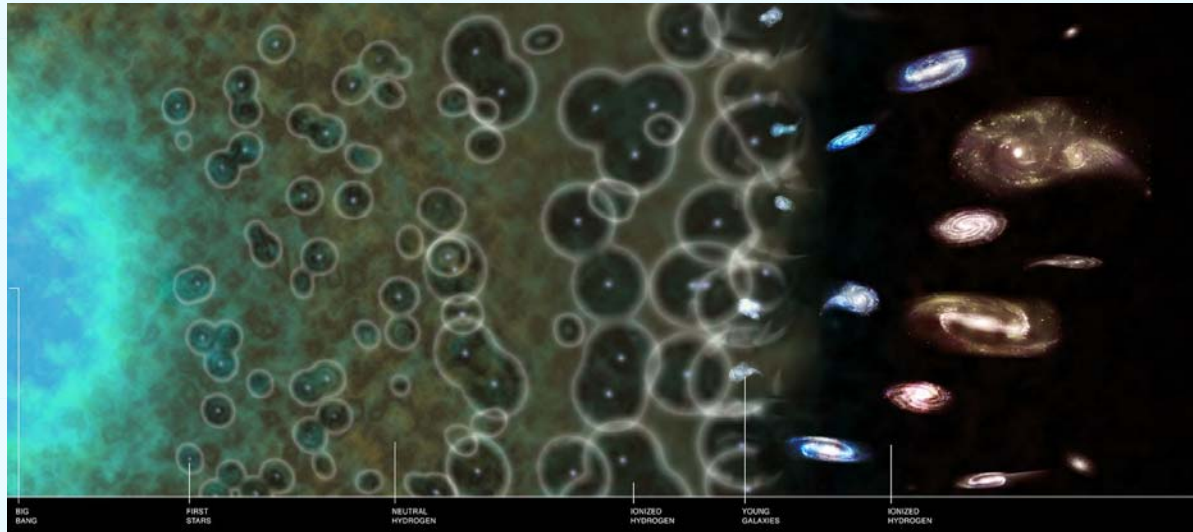
**Ligne de visée
devant un quasar**

Spectre en absorption
Forêt Lyman-alpha

ou absorption
continue totale



Réionisation



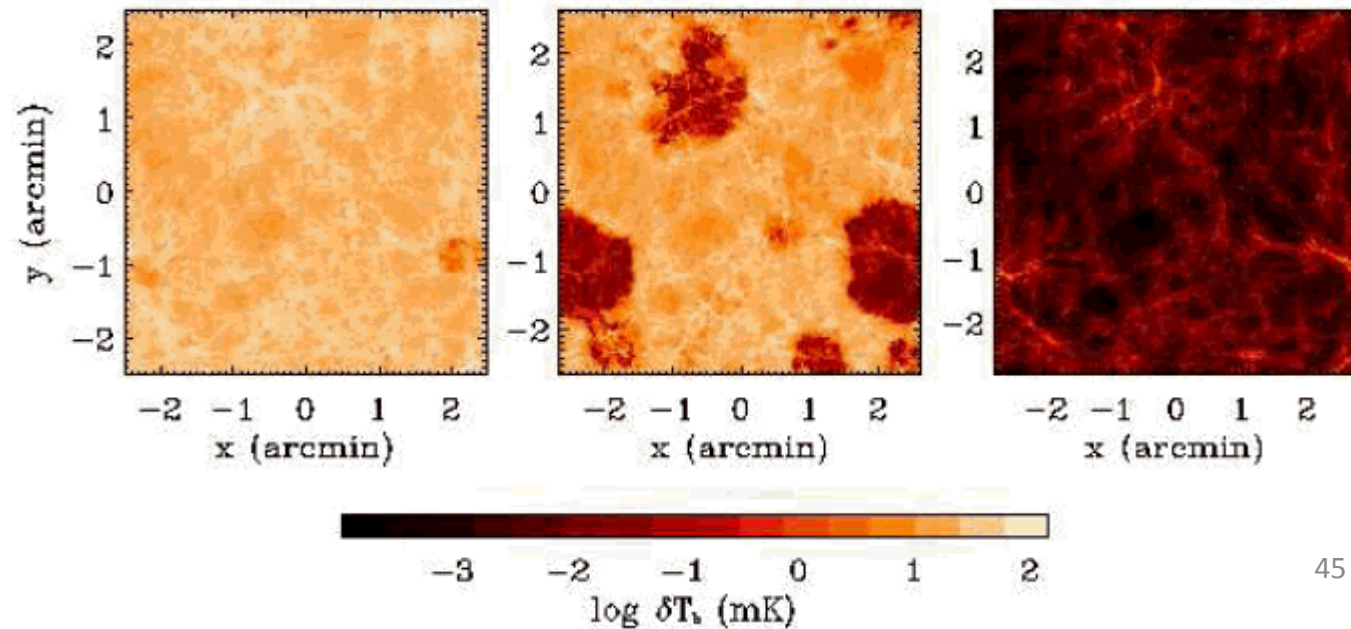
La masse des galaxies ayant provoqué la ré-ionisation est $M \sim 10^8 M_{\odot}$

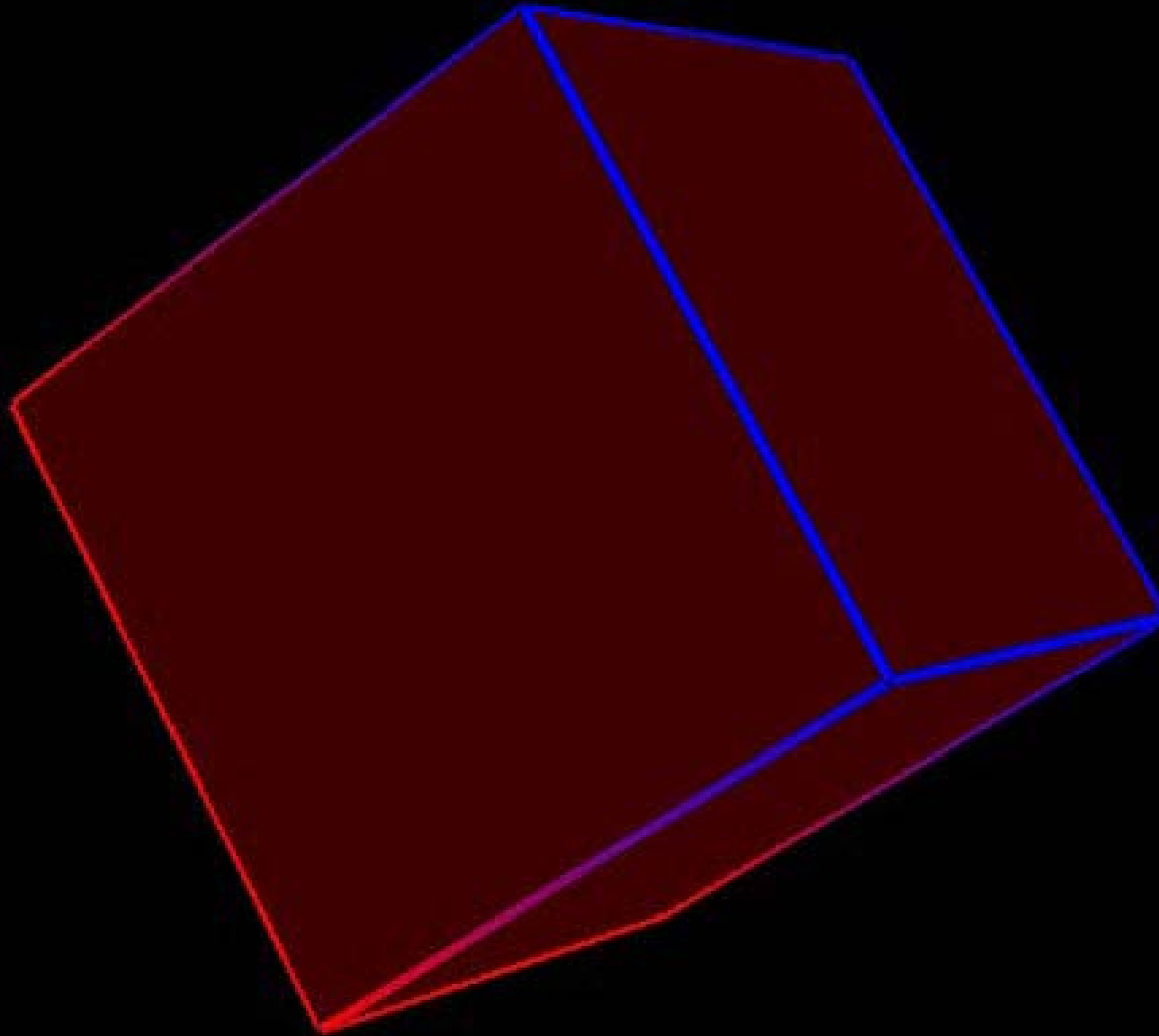
Ensuite, les masses $< 10^{10} M_{\odot}$ sont empêchées de former des étoiles

Incertitudes
Obscuration
Par la poussière

Fraction de photons UV qui échappent

Percolation progressive des zones ionisées





Masse minimum pour formation d'étoiles

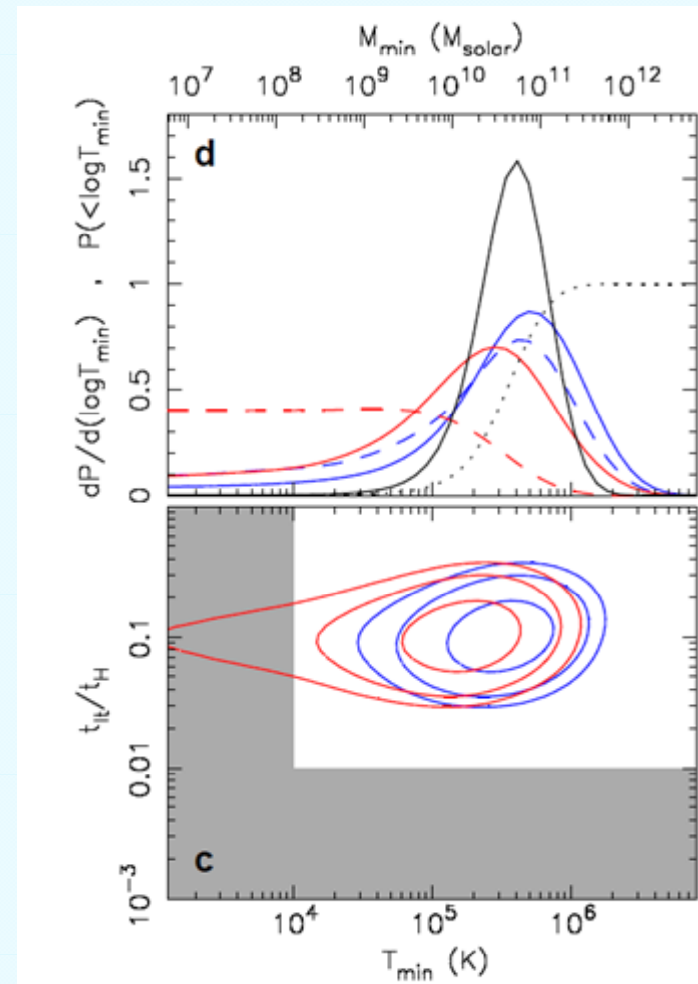
$T_{\text{vir}} \sim 10^4 \text{K} \rightarrow$ masse halo $10^8 M_{\odot}$

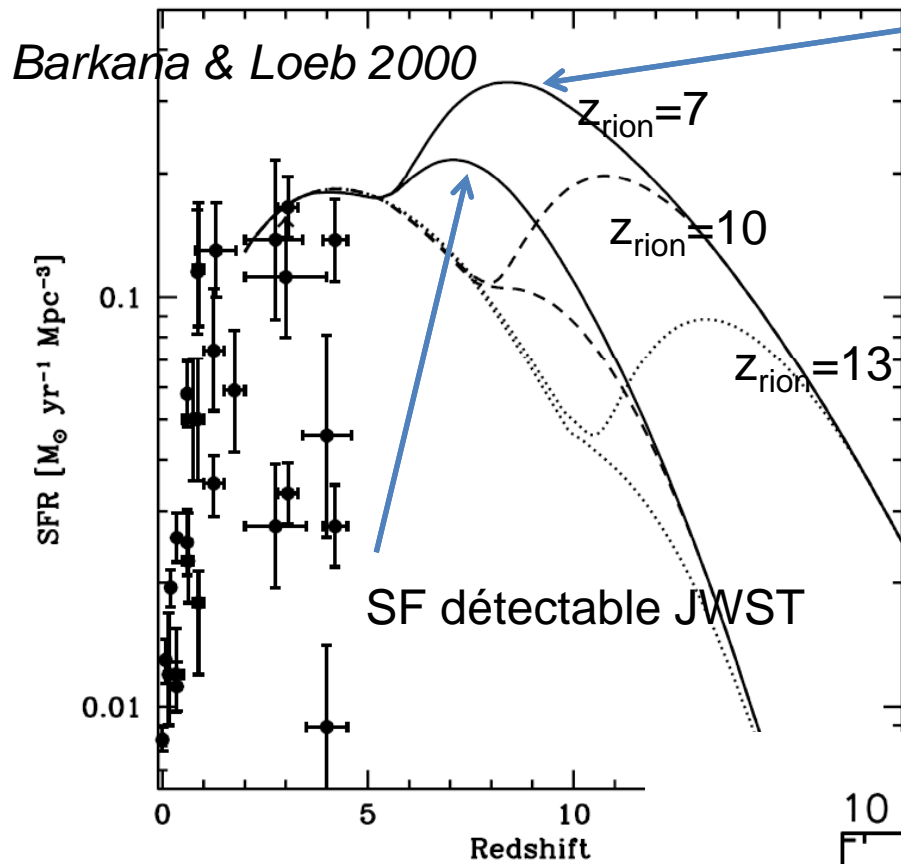
$T_{\text{vir}} \sim 10^5 \text{K} \rightarrow$ masse halo $10^{10} M_{\odot}$

Probabilité pour la formation de galaxies
Avec T_{min} de température viriel à
 $z=5.5-6$

Cycle d'étoiles $t_{\text{lt}}/t_{\text{H}}$
Temps lumineux ~ 0.1 Thubble

Émetteurs $\text{Ly}\alpha$ avec l'aide du lensing





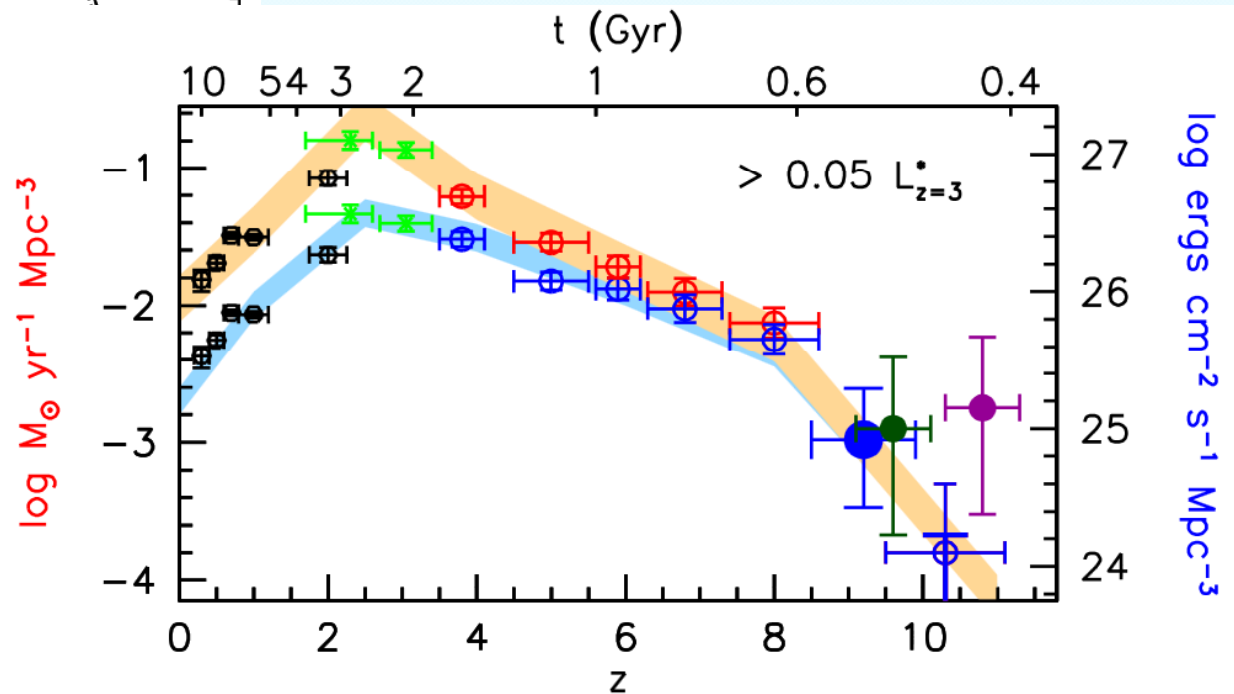
SF total

Signature dans la
densité cosmique
de formation
d'étoiles

Bouwens et al (2013)

Rouge : corrigé de
l'atténuation de la poussière

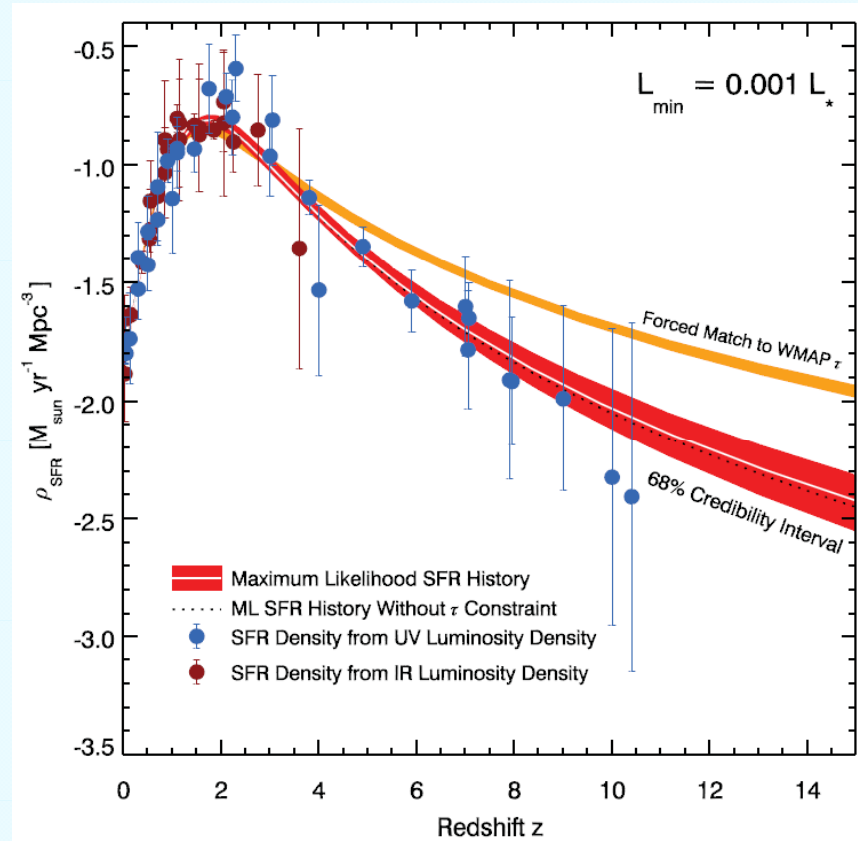
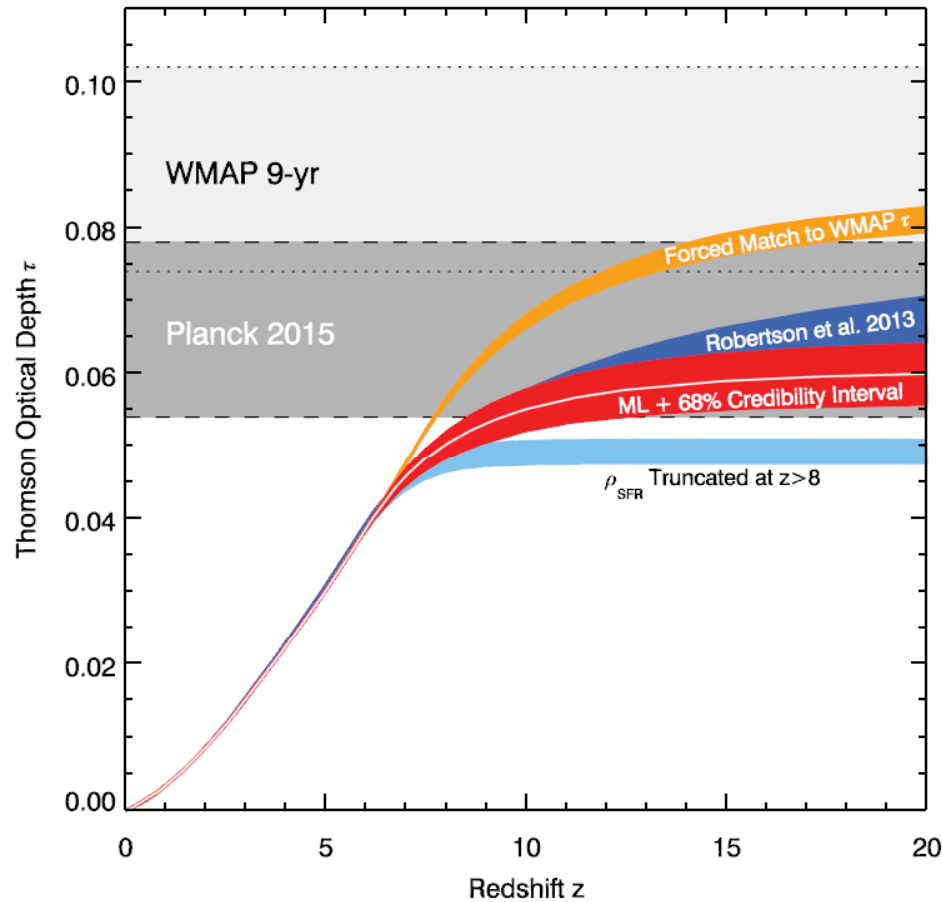
Correction à partir de la pente
UV à grand-z



Planck 2015: nouvelle opacité τ

$$\tau = 0.066_{-0.012}^{+0.012}$$

Requiert moins de galaxies à $z > 8$

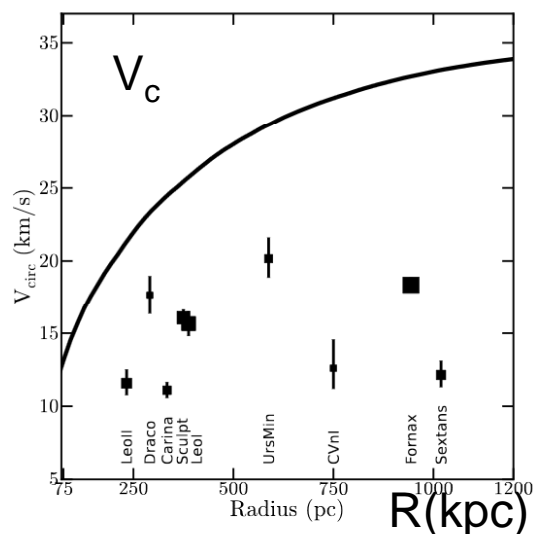


Robertson et al 2015

Galaxies « Too Big To Fail » (TBTF)

Naines Sphéroidales du Groupe Local, $M_* \sim 10^6 M_\odot$, V_{cir} vs R

Les simulations prédisent des cuspidés denses, qui ne correspondent à aucune des dSph observées (*Boylan-Kolchin et al 2012*)



Des épisodes répétés d'éjection par supernovae ont été simulés, pour détruire les halos

Une éjection unique de la même masse totale est plus efficace

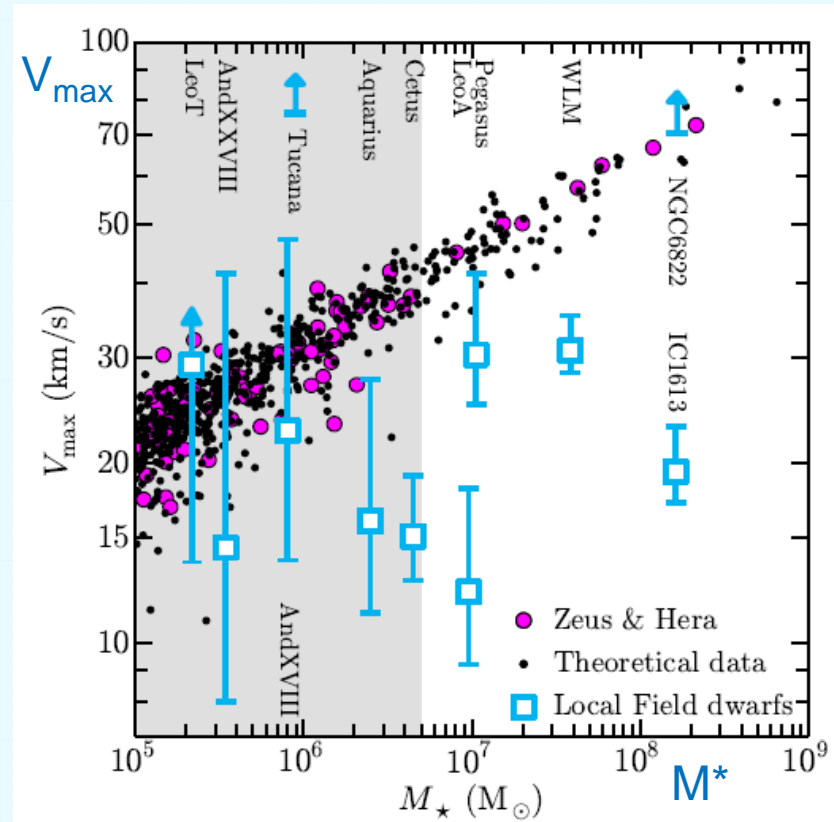
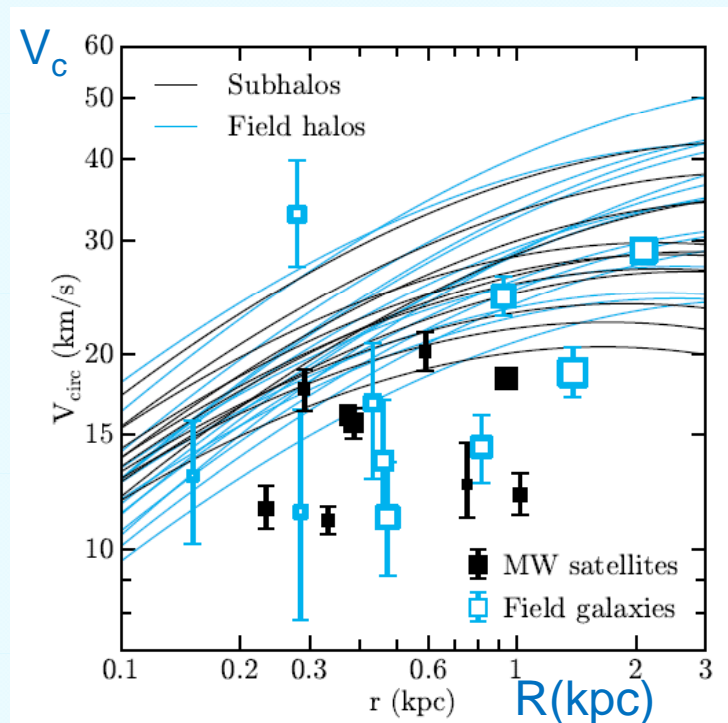
40 000 SN sont requises avec 100% efficacité

→ SN feedback ne peut pas résoudre le problème

Garrison-Kimmel et al 2013

Comparaison avec simulations

ELVIS: série de 48 simulations représentant la Voie Lactée et ses satellites dans 300kpc, au moins 25 satellites TBTF $V > 25\text{km/s}$, où la formation d'étoiles ne peut être évitée par la réionisation $M^* > 10^6 M_\odot$
 V_{max} non reliée à M^* → pas d'effets de marée, ou pression dynamique

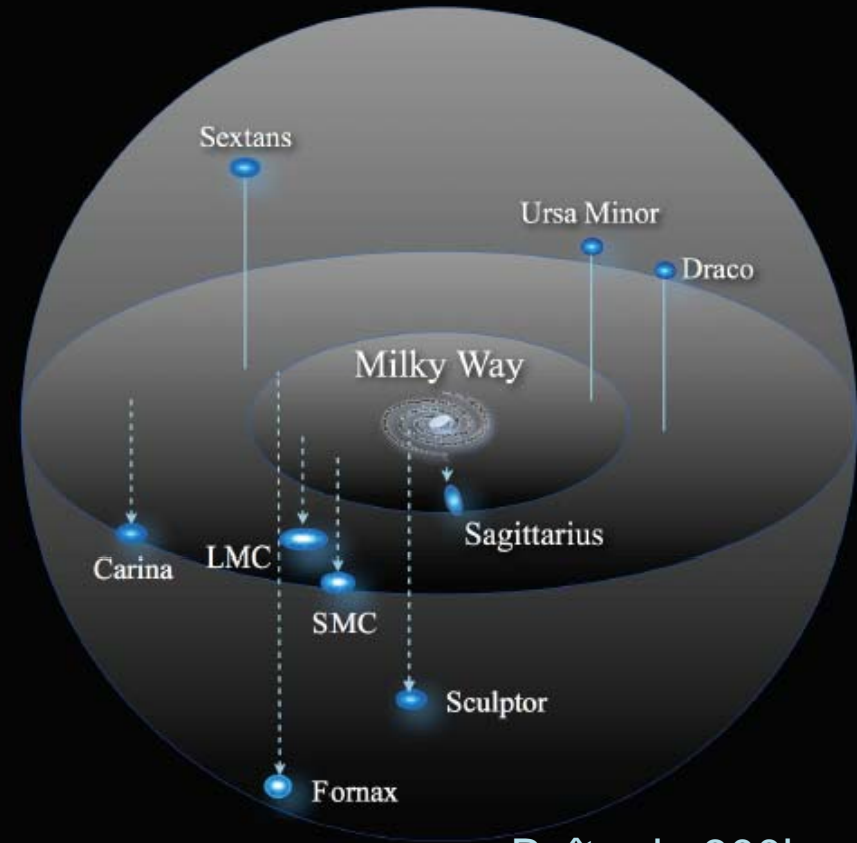
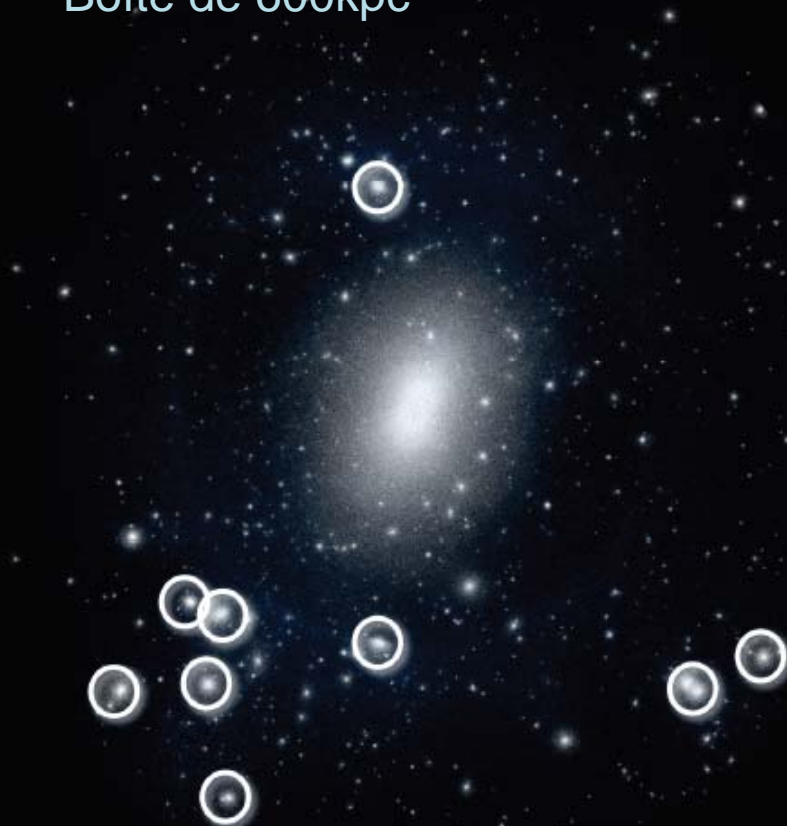


Les satellites de la Voie lactée

Nombre de satellites, concentration et dispersion de vitesses
Profil de MN – Satellites trop proches (MW, Andromède, etc..)

Weinberg et al 2013

Boîte de 600kpc



Boîte de 300kpc

Alternatives au modèle CDM

WDM: MN tiède, dispersion de vitesse 100 m/s à $z=0$; réduit les petites échelles, résoud le pb des satellites manquants, mais ne résoud pas le pb cuspidé/coeur

SIDM: (Self-Interacting) interaction quantique mais pas EM; Interaction comparable à celle neutron-neutron; les diffusions entre particules réduisent le cuspidé; ce qui a pour effet de rendre les halos plus sensibles aux forces de marée

→ Pourrait donc aussi réduire un peu le nombre de satellites.

Problème: les collisions rendent les halos sphériques contrairement aux observations, ou alors V -dépendant?

RDM: (Répulsive): DM consiste en un condensé de bosons, avec une force répulsive à courte portée. Les parties internes des halos noirs se comporteraient comme un superfluide

→ Moins de cuspidé

Alternatives au modèle CDM (2)

FDM: (Fuzzy): des particules ultra-légères dont la longueur d'onde Compton (ou taille effective $\lambda = h/p$) est la taille d'un coeur de galaxie. MN ne peut pas se concentrer, donc pas de cuspide; coeurs de galaxies fragiles par effet de marée

→ Destruction des petites échelles

SADM: (Self-Annihilating): Les particules de MN dans les régions denses s'annihilent (en n^2), libérant de l'énergie. Cela supprime les cuspidés, d'abord en supprimant les particules, puis l'énergie entraîne l'expansion des couches voisines, empêchant la concentration

DDM: (Decaying): les halos qui se forment trop denses, se décomposent en particules relativistes plus légères. Les halos restants sont aussi plus légers, de même que leurs cuspidés, sans réduire significativement les grandes échelles

Modèles mixtes

Le panachage est permis!

Matière CDM+ , axions ultra-légers, dérivant de la théorie des cordes

$$10^{-24} \text{ eV} < m_a < 10^{-20} \text{ eV}$$

Par exemple 85% de MN sous forme de $m_a = 10^{-21} \text{ eV}$

Pourrait créer des coeurs au centre des halos de **taille ~1kpc**

Sans interdire la formation de galaxies de petites tailles, comme les modèles de WDM plus classiques

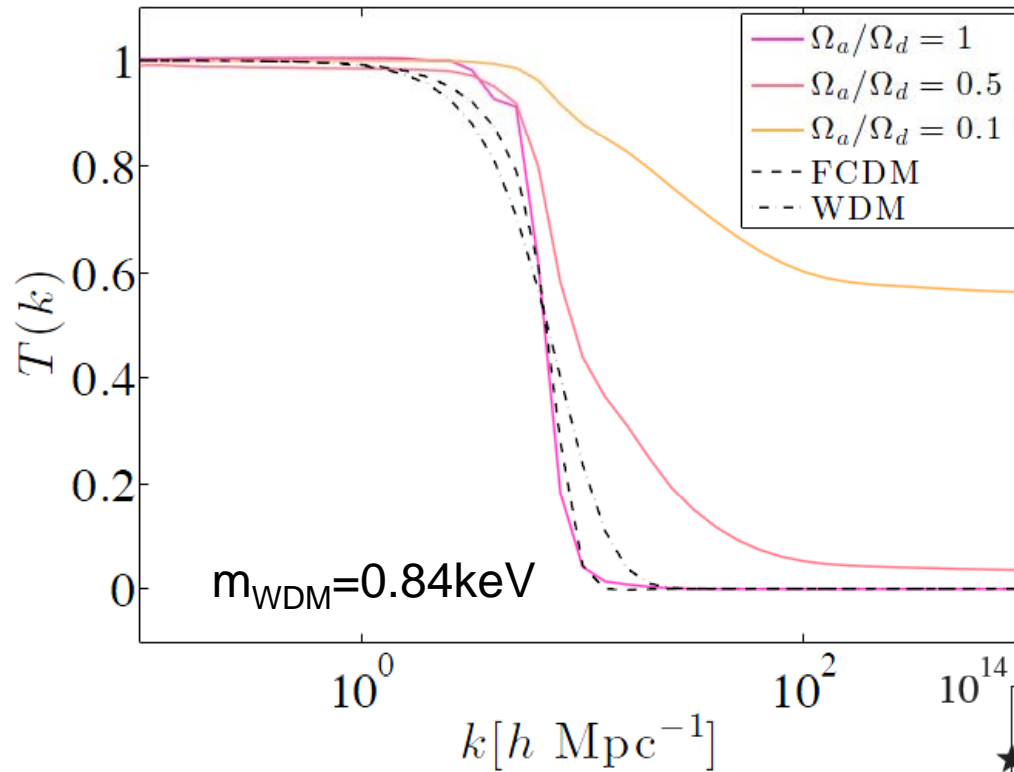
WDM particule “thermique” rapide au découplage, libre parcours

Axion: non-thermique, oscillations cohérentes du champ scalaire

Bien que MN froide, l’axion empêche l’effondrement à petite échelle

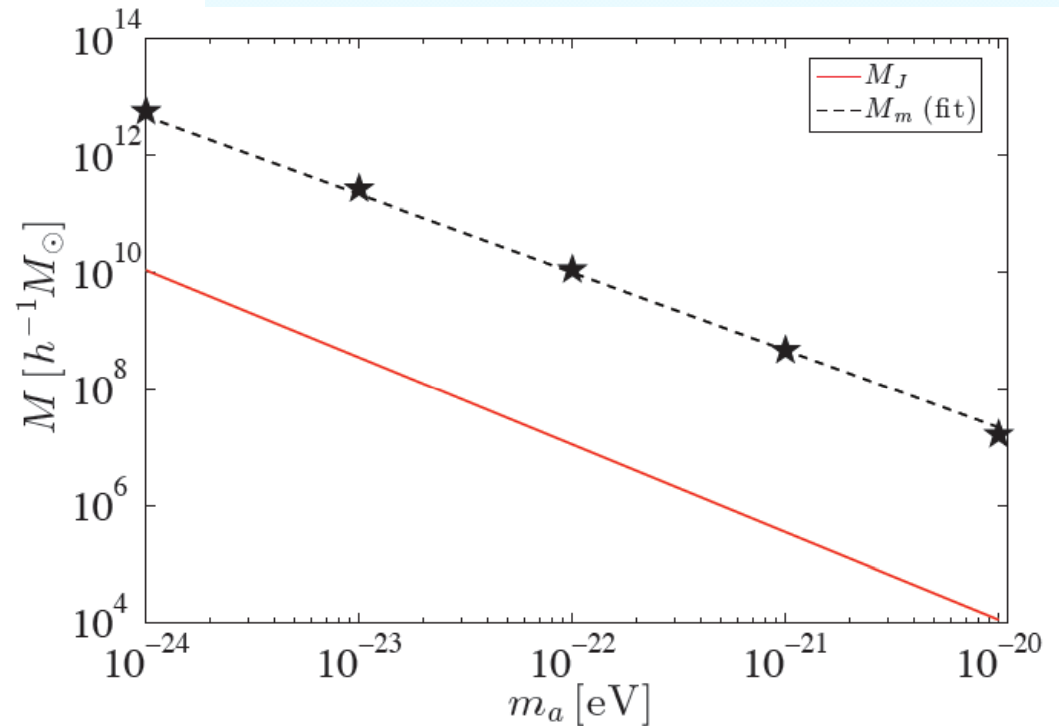
Axions + CDM

Coupure des petites échelles
(suppression des satellites)



La masse de coupure M_m
varie comme $m_a^{-1.35}$

Marsh & Silk 2014



CONCLUSIONS

- Λ CDM comme modèle de matière noire: très bon accord à grande échelle – Univers primordial – Amas de galaxies
Mais problèmes à petite échelle, celle des galaxies: fonction de masse, loi de Tully-Fisher

➔ **Profil radial universel des halos de matière noire**

Cuspide (au lieu de coeur)

➔ **Moment angulaire des galaxies insuffisant**

➔ **Grand nombre de satellites prédit**

- **Solutions envisagées: SIDM, WDM...**
 - **Rétro-action des supernovae, et des noyaux actifs**
 - **Moins de formation hiérarchique, plus d'accrétion froide**
 - **Existence de satellites noirs, invisibles**