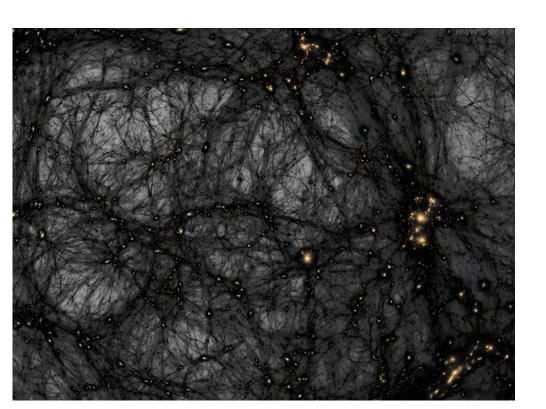
Chaire Galaxies et Cosmologie

Histoire de la matière noire



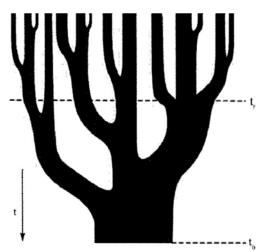
Françoise Combes

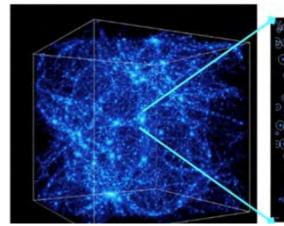


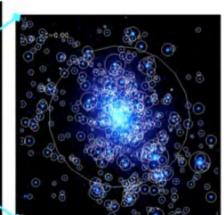
Les grandes lignes

- La matière noire forme les halos pendant que les baryons dansent avec les photons
- → Le composant le plus hiérarchique: formation en deux phases, accrétion de masse rapide, puis lente Spectre de masse, jusqu'à des masses terrestres
- →Influence des baryons: cuspides, concentration, forme à 3 dimensions
- → Amas de galaxies, et halos massifs, connection avec les galaxies









La matière noire domine pour 30 kyr < t < 10 Gyr

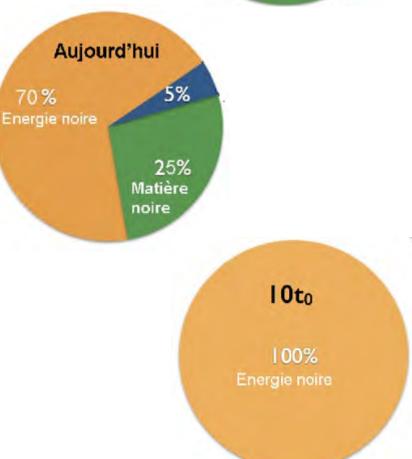
$$H(t)^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho$$
 Avec Ω compté à t=0 (a=1)

$$rac{H(t)}{H_0} = \left[rac{\Omega_m}{a^3} + \Omega_\Lambda + rac{\Omega_r}{a^4}
ight]^{1/2}$$

Aujourd'hui, l'énergie noire domine, et dans le futur

 \rightarrow H(t)= constante, $\mathbf{a}(\mathbf{t}) \propto \exp(\mathbf{H}\mathbf{t})$

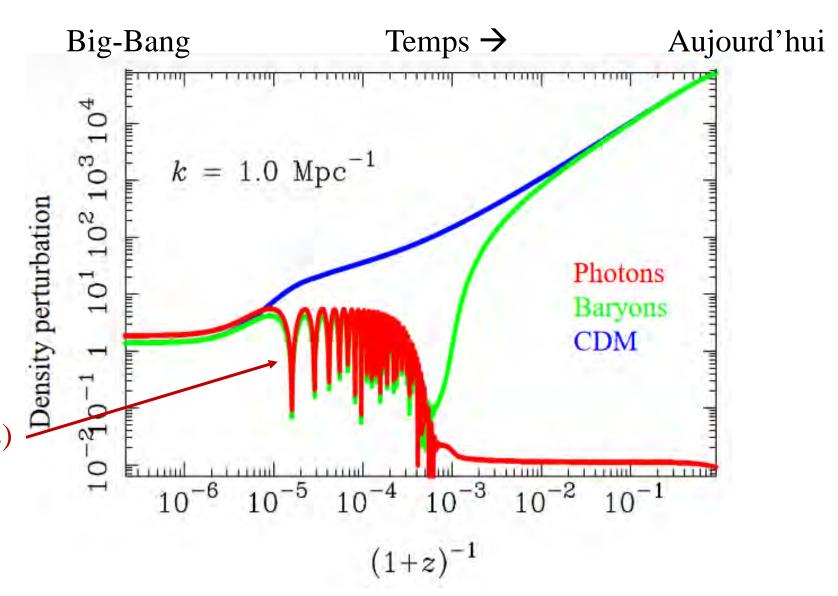
Période radiative $\mathbf{a}(\mathbf{t}) \propto \mathbf{t}^{1/2}$ Matière $\mathbf{a}(\mathbf{t}) \propto \mathbf{t}^{2/3}$



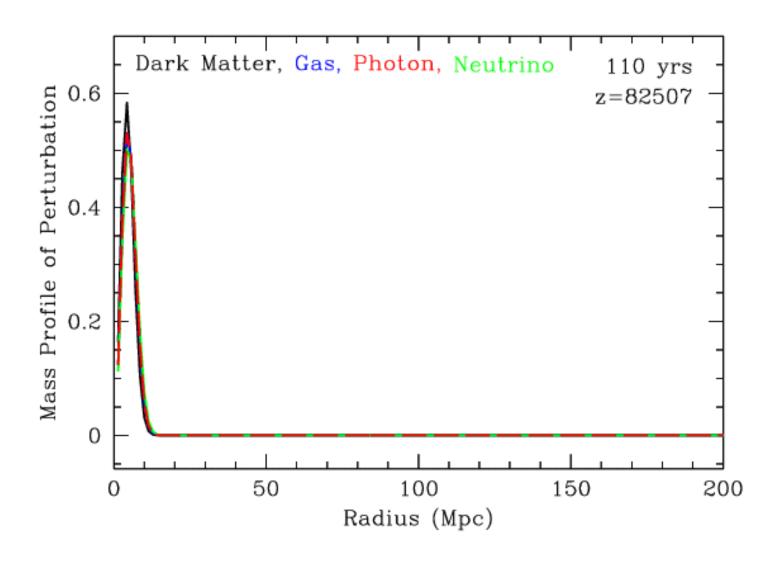
La matière noire forme les halos

La matière noire (CDM) commence à s'effondrer à la fin de la période radiative

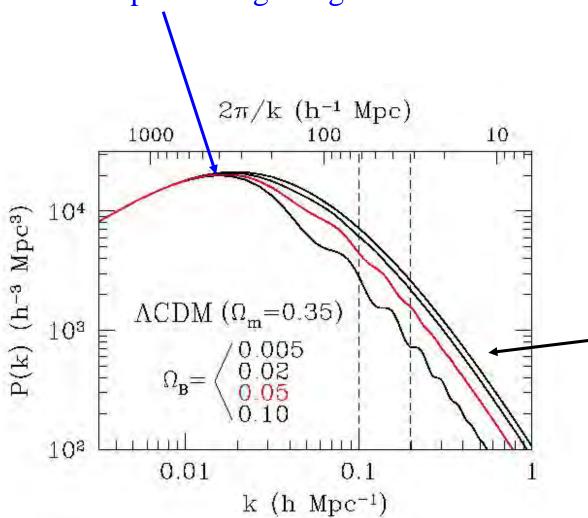
Les fluctuations croissent pendant que les photons et les baryons sont en équilibre de pression (ondes acoustiques)



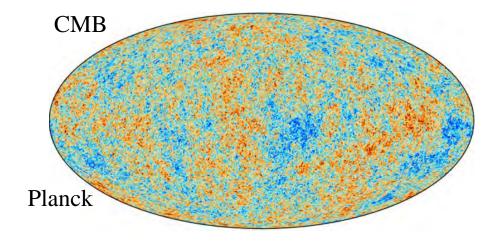
Evolution relative DM, baryons photons, v



Echelle du retournement: taille de l'horizon à l'époque d'équivalence matière-rayonnement 30 000 ans après le Big Bang

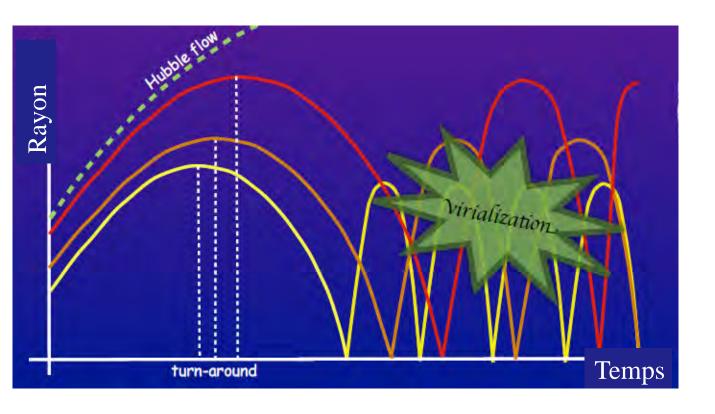


Spectre initial $P(k) \propto k$



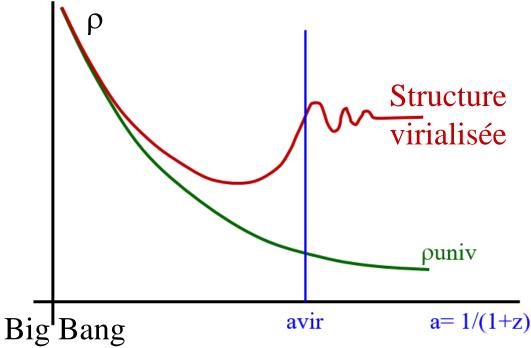
Les petites échelles sont empêchées par le rayonnement

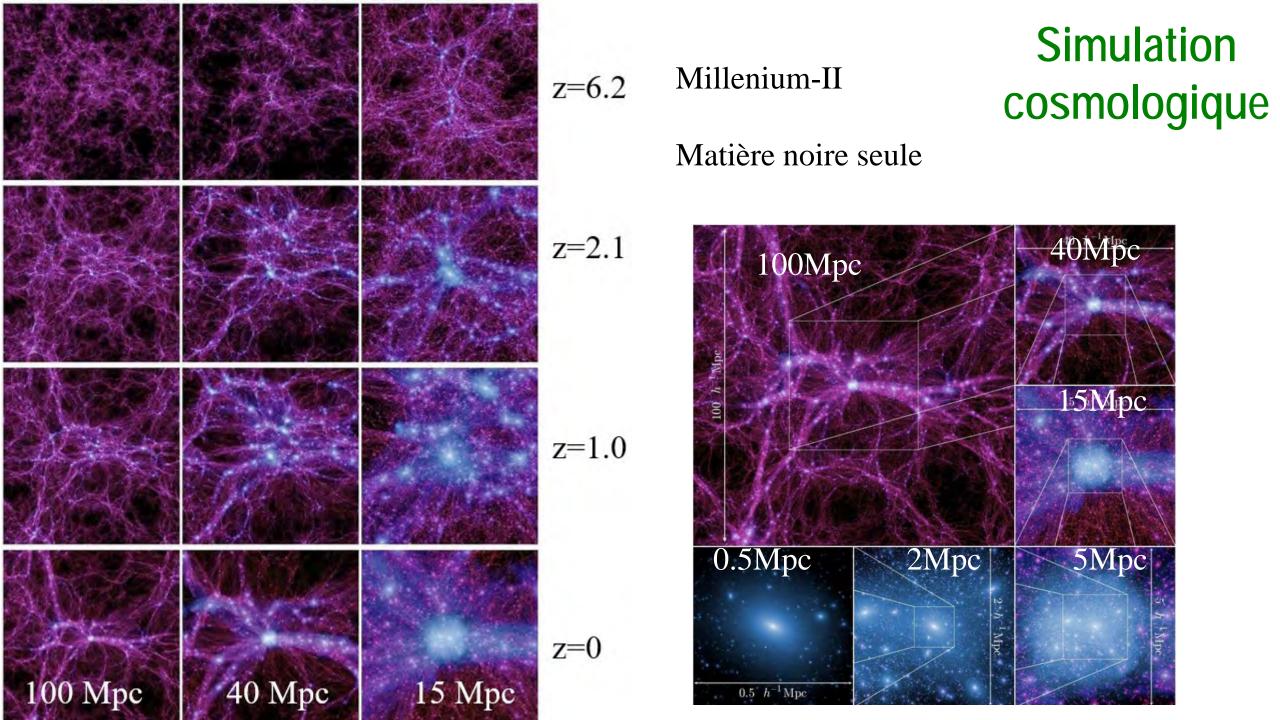
Effondrement non-linéaire



Densité des structures une fois virialisées $\rho = \Delta vir \rho_{univ}$

 $\Delta vir = 180$ pour un univers Einstein-de-Sitter $\Delta vir = 340$ pour ΛCDM





Profil de matière noire NFW

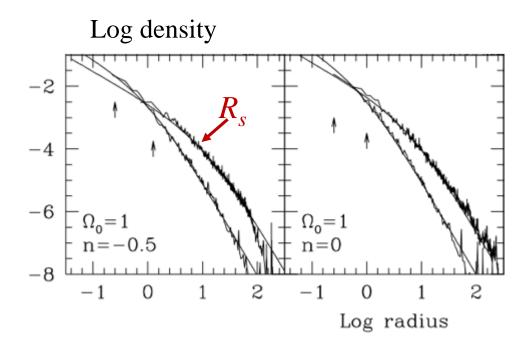
Les résultats des simulations ∧CDM montrent une loi de densité universelle pour les halos de matière noire →Profils NFW (Navarro, Frenk & White 1997)

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_s}{(r/R_s)(1 + r/R_s)^2}$$

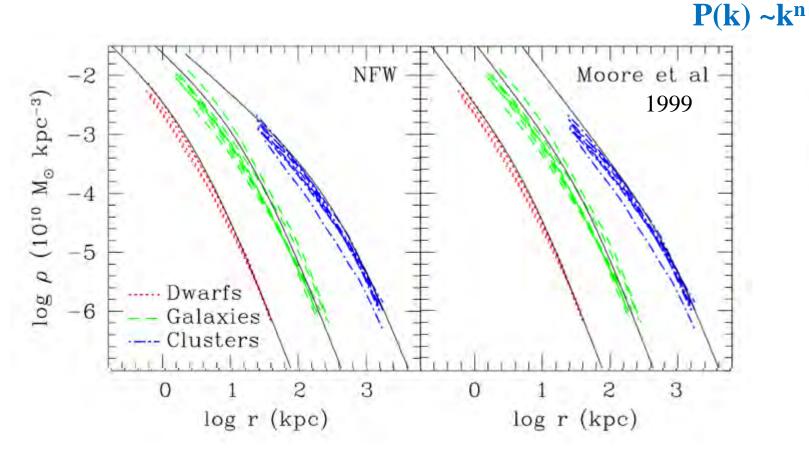
Deux lois de puissance $\rho \sim r^{-1}$ au centre, puis $\rho \sim r^{-3}$ au bord

Les halos de **petite masse sont plus denses au centre** Ceci est dû à leur formation plus tôt dans l'univers

La densité moyenne d'un halo est proportionnelle à la densité moyenne de l'univers à sa formation



Profil universel des structures de matière noire



Moore et al 1999
$$\rho(r) = \frac{\rho_{\text{M}}}{(r/r_{\text{M}})^{1.5} \left[1 + (r/r_{\text{M}})^{1.5}\right]}$$

2 paramètres M_{vir} Concentration $c = r_{vir}/r_s$

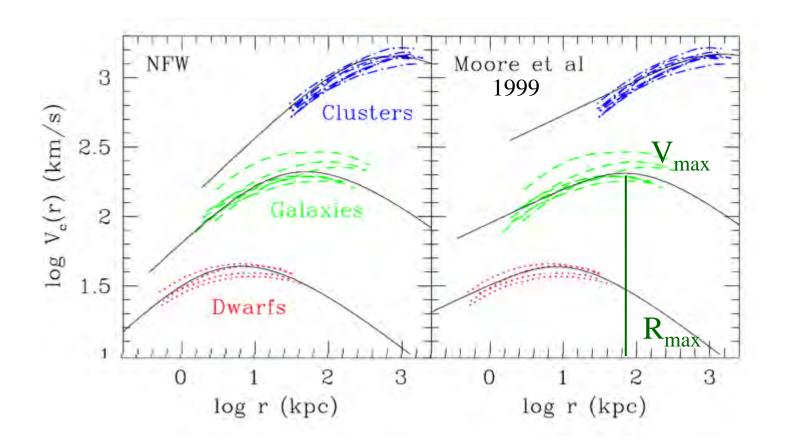
$$\frac{\rho(r)}{\rho_{\rm crit}} = \frac{\delta_c}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

Comparaison halos légers et massifs: naines, galaxies, amas

Les petits halos se forment plus tôt (plus denses)

Navarro et al (1997, 2004)

Vitesse de rotation du halo universel



 $\rho(r) \propto 1/r$, puis $1/r^3$

$$V_c(r) = V_{vir} \sqrt{\frac{f(cx)}{xf(c)}}$$

$$f(x) = \ln(1+x) + x/(1+x)$$

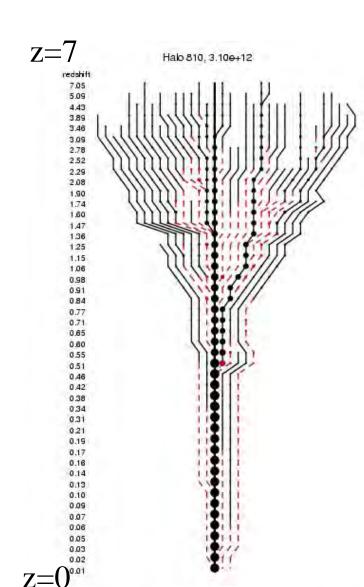
 V_c = vitesse circulaire

A combiner avec les baryons, dominant au centre

$$R_{\text{max}} = 2.163 r_{\text{s}}$$

c=10, $V_{\text{max}} = 1.2 V_{\text{vir}}$

Approche semi-analytique



Arbre de fusion, calculé sur une simulation Cosmologique:

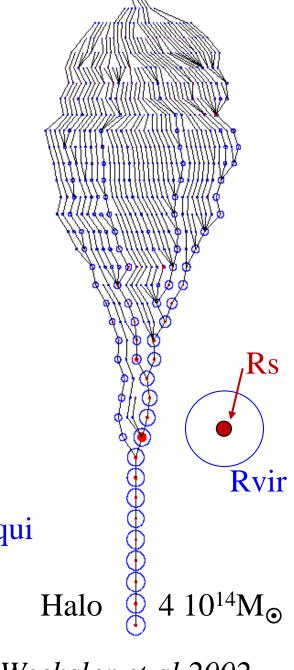
A partir d'un halo à z=0, recherche de tous les progéniteurs, et calcul de la concentration c=Rvir/Rs

Les petits halos se forment les premiers et sont plus denses $\rho s \propto \rho_{univ} \propto (1+z)^3$

$$\rightarrow$$
 cvir $\propto (1+zf)$

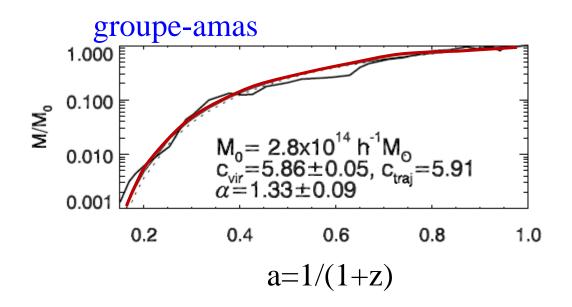
Mais il existe une dispersion dans les masses qui se forment à un redshift donné

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_s}{(r/R_s)(1 + r/R_s)^2}$$



Wechsler et al 2002

Croissance des halos



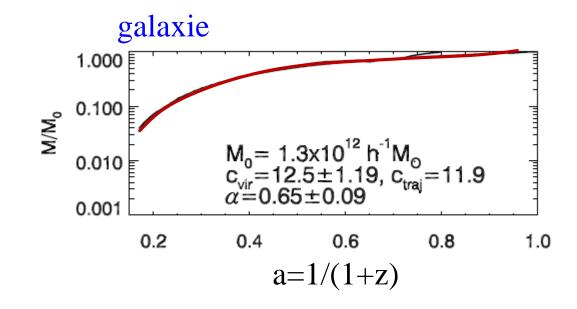
Lorsque la croissance sature, quand dlogM/dloga < S

L'époque de formation est $af = \alpha/S$

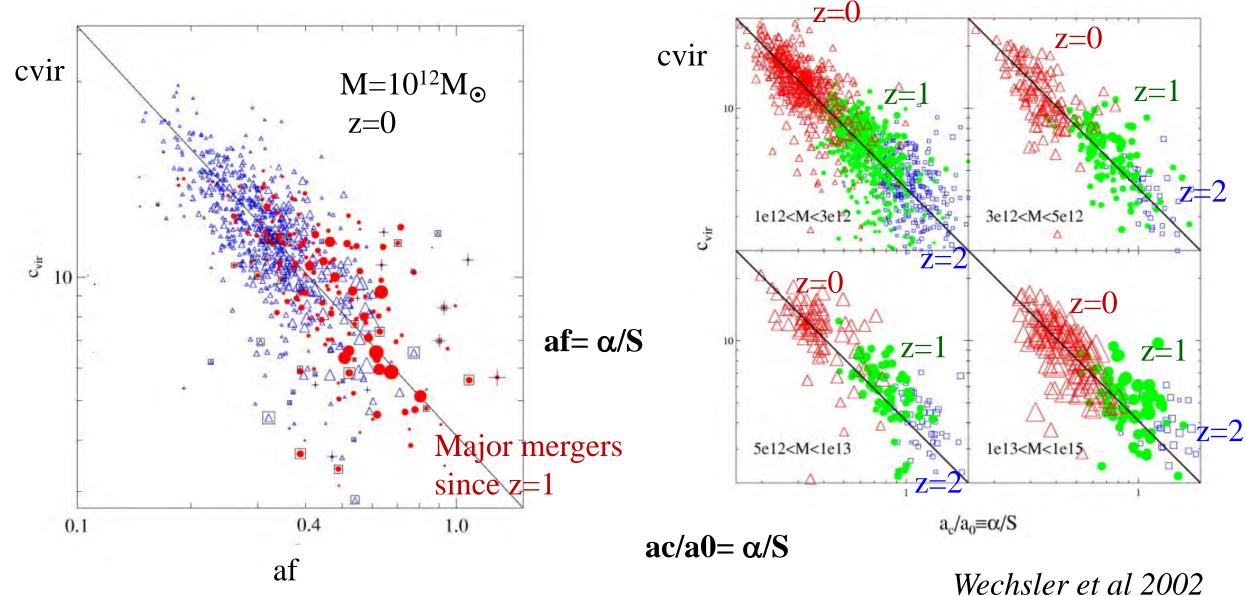
 \rightarrow cvir = c0/af=c0 (1+zf), c0 concentration des halos formant aujourd'hui c0 = 4

$$M(a) = M_0 \exp(-\alpha z)$$

Plus le halo est massif, plus il accrète des sous-halos, qui décroissent cvir



Concentration versus époque de formation ac et d'observation z



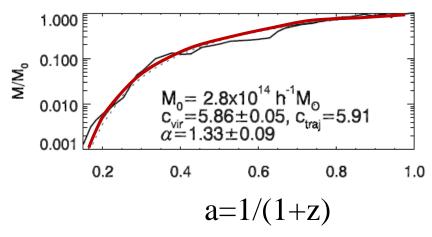
Taux d'accrétion de masse et Histoire de l'accrétion

A quel taux les halos accrètent de la masse? Evolution dans le temps?

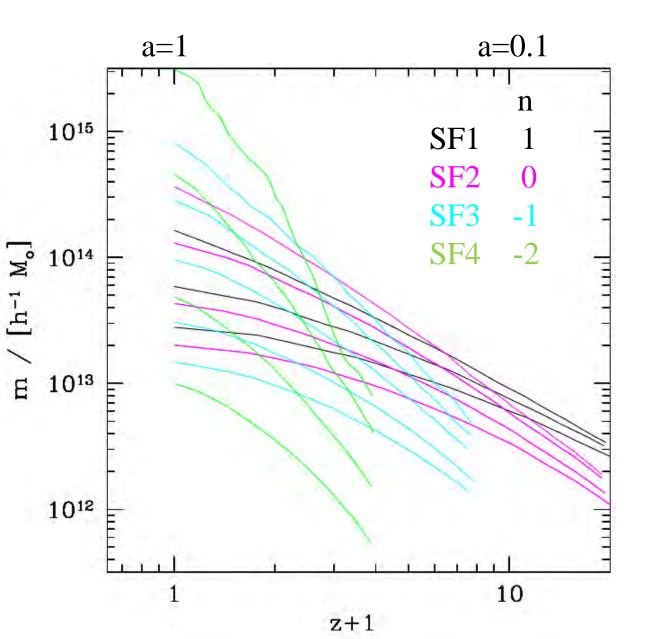
La densité centrale d'un halo croît vite lorsque l'accrétion de masse est forte Dans une **deuxième étape**, le taux d'accrétion diminue, et ce flux de masse ne fait que faire croître Rvir sans accroître la masse au centre, la concentration baisse

Finalement la concentration est optimum pour ce redshift de transition

Pour les halos de formation tardive, tout le processus est ralenti, La concentration c est plus faible



Influence des modèles, des conditions initiales

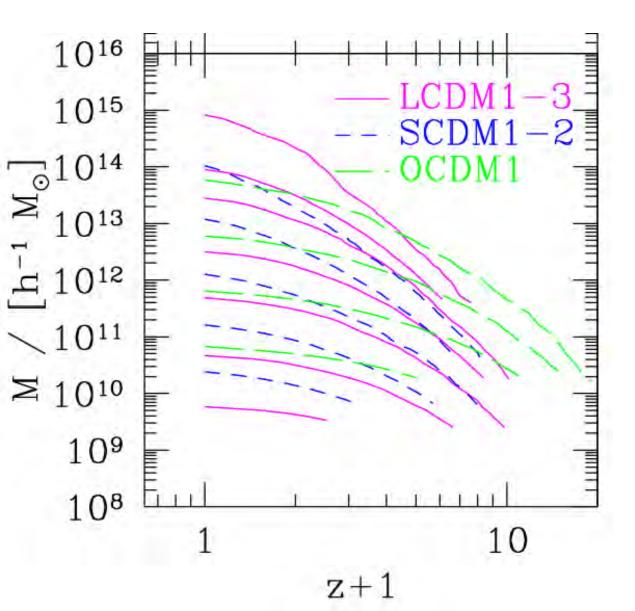


Modèles indépendants d'echelle SF Scale-Free (loi de puissance) $\Omega m=1.0$ $\Omega \Lambda=0$

Le taux d'accrétion dépend de la puissance n des fluctuations initiales de densité Spectre de puissance n=1, 0, -1, -2 $P(k) \propto k^n$

Le taux d'accrétion dépend de la masse m du halo (ou amplitude de fluctuation)

Modèles LCDM ou OCDM

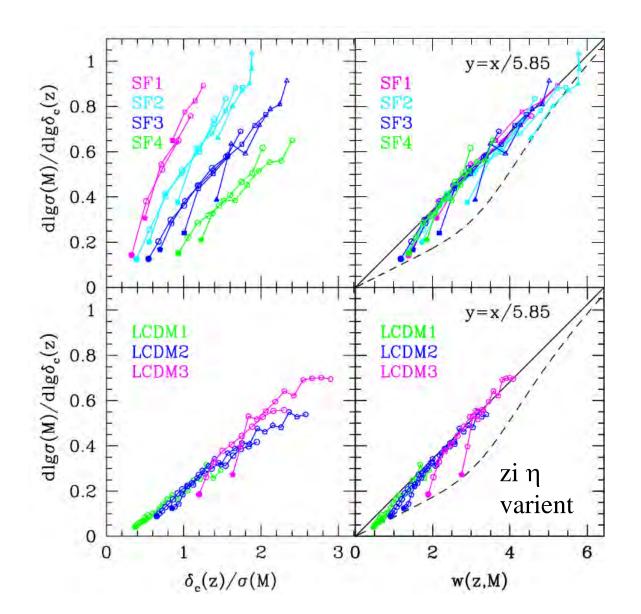


Le taux d'accrétion dépend de la cosmologie, qui quantifie les forces de gravité

LCDM
$$\Omega$$
m=0.3 $\Omega \Lambda$ = 0.7 SCDM Ω m=1.0 $\Omega \Lambda$ = 0 OCDM Ω m=0.3 $\Omega \Lambda$ = 0

Le taux d'accrétion dépend du redshift

Renormalisation



Différents taux d'accrétion renormalisés

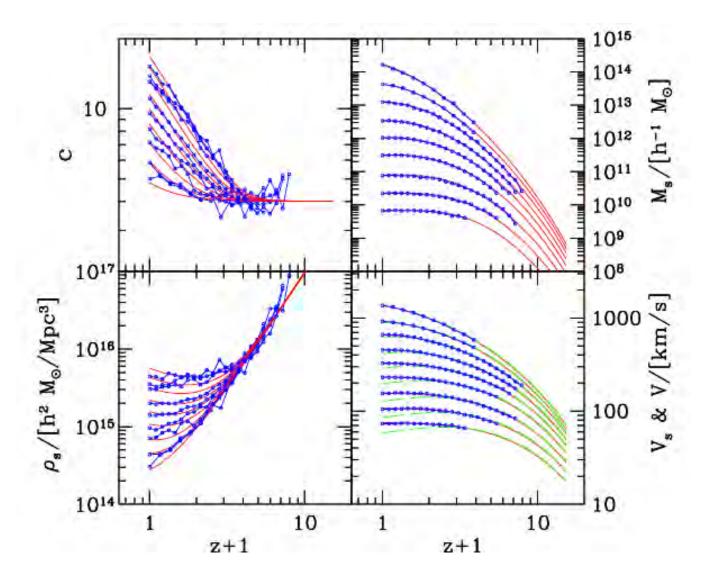
 $\Omega m \Omega \Lambda P(k), M z \sigma \delta c$

Deux phases d'accrétion Rapide au début Lente à la fin Caractérisent tous les modèles

La densité décroit avec le temps et l'index croît

→ Ralentissement de la croissance des halos

Universalisation



La distribution radiale de masse (profil universel NFW) Est liée à l'évolution de l'accrétion

La concentration d'un halo est liée à la densité de l'univers quand le halo avait 4% de sa masse

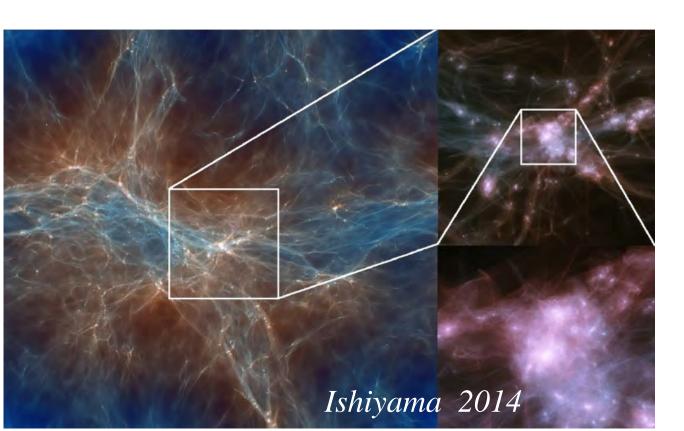
Courbes= prédictions Points= simulations

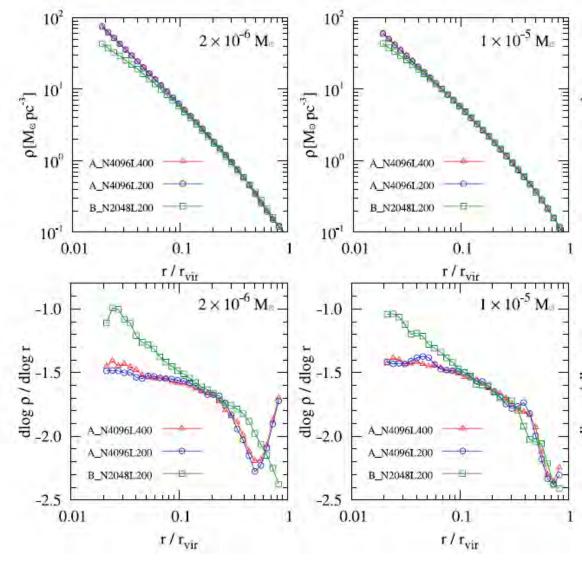
Cuspide et masse des halos

Dans les simulations N-corps de matière noire seule

La pente de densité est plus forte pour les petites masses $\rho \propto r^{-1.5}$

A: m_{DM}=100GeV B: pas de limite





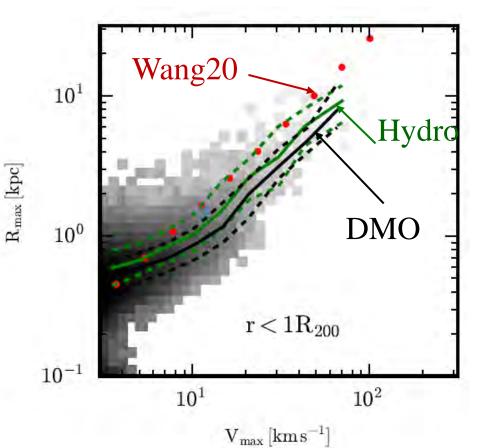
Les plus petites masses, celles limitées par le « free streaming » De l'ordre de 2 10^{-6} M_{\odot} (~Terre) Λ CDM

Halos très peu massifs et annihilation

Si la matière noire est granuleuse, distribuée en mini-halos de masse 2 10⁻⁶ M_☉

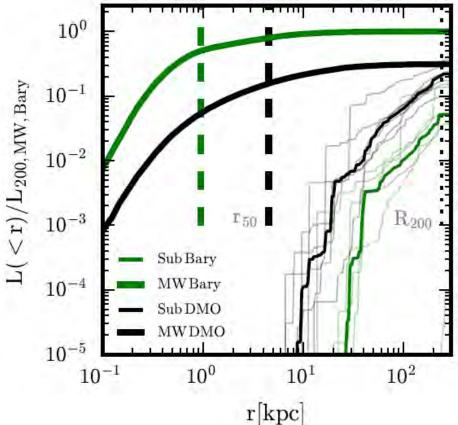
 \rightarrow Plus d'annihilation (\propto n²)

Contrairement aux précédentes estimations, l'annihilation est dominée par le centre galactique



Nbre de sous-halos dans la Voie lactée

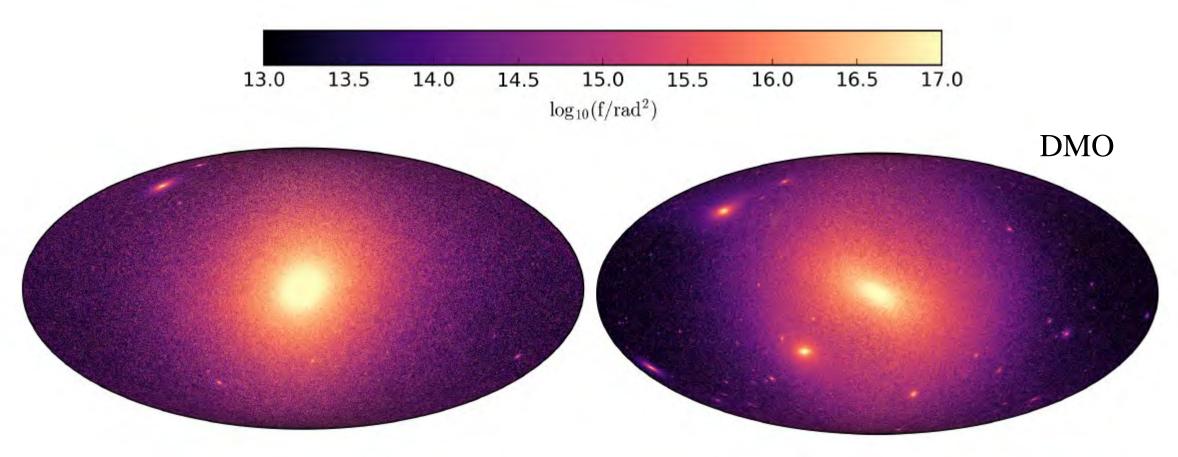
Les mini-halos sont détruits par les marées



Grand & White 202

Carte de l'annihilation

Flux de gamma tel que vu du Soleil, 3 fois plus fort vers le centre

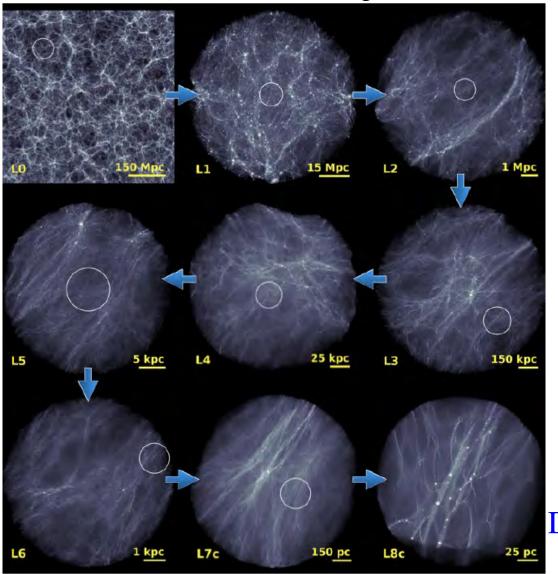


Simulation hydro avec toute la physique des baryons

Grand & White 2021

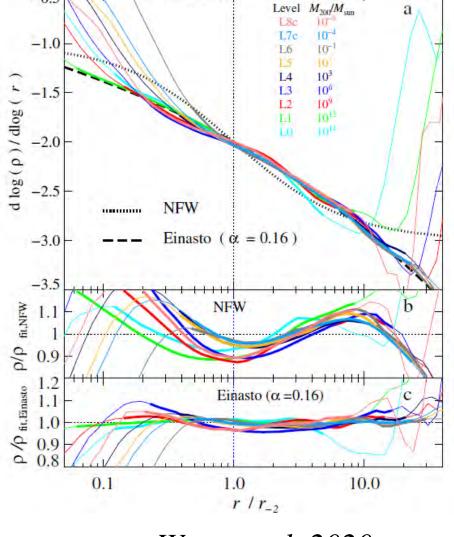
Simulations jusqu'à M_{Terre} (3 10⁻⁶ M_☉)

Grande région de 10¹⁹ M_☉ -- 30 ordres de grandeur -- DMO



Masse et concentration des halos dépendent de la m_{DM}

$$m_{DM} = 100 GeV$$

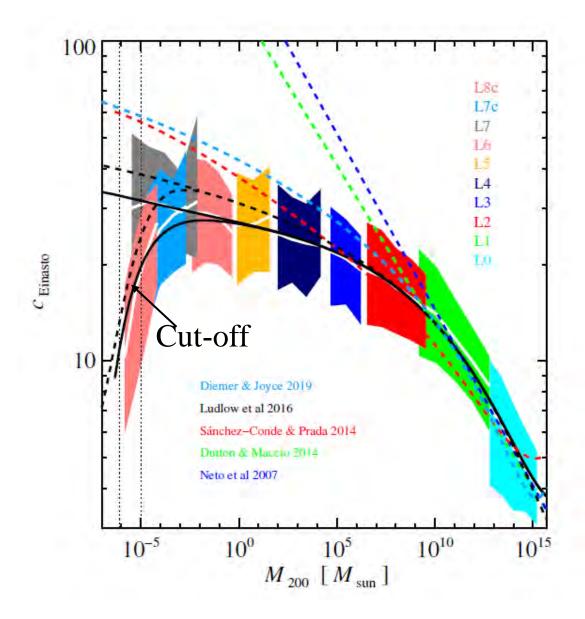


De 150 Mpc à 25pc

Wang et al 2020

Concentration et Masse

Contribution à l'annihilation mieux répartie selon les masses



Forme universelle des halos sur 20 ordres de grandeur

Concentration = r_{200}/r_{-2} Profil Einasto

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

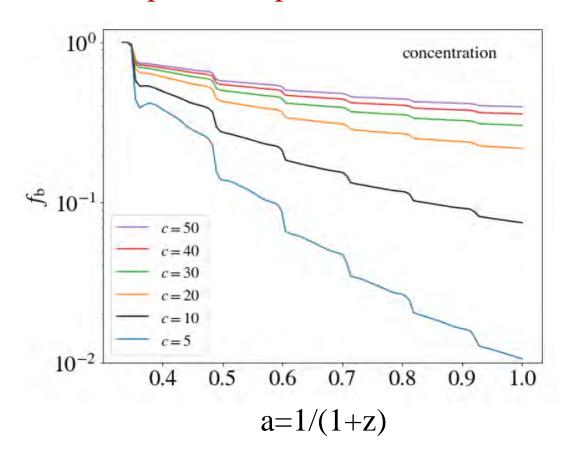
5-modèles en pointillés 2 lignes solides: avec ou sans free-streaming cut-off

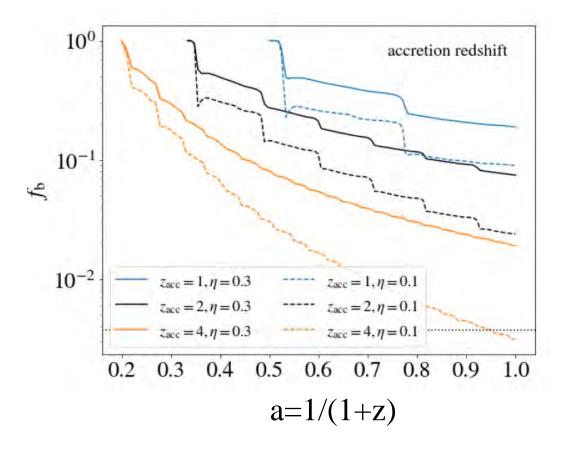
Sous-structures des halos

fb: Fraction de masse qui reste liée gravitationnellement, après interaction avec le halo principal, la Voie lactée

DASH GPU N-body Tree-code

Le petit halo perd de la masse à chaque péricentre





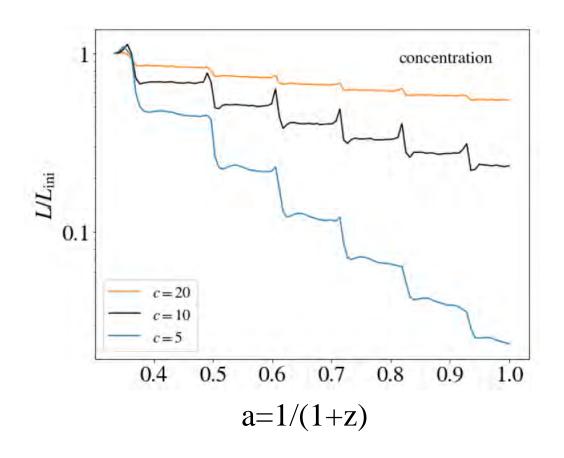
Aguirre-Santaella et al 2023

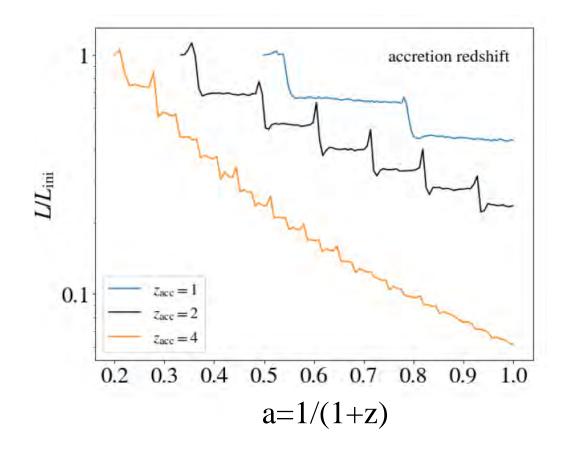
Luminosités des halos

Luminosité est proportionnelle à la densité au carré

→ Pic à chaque péricentre

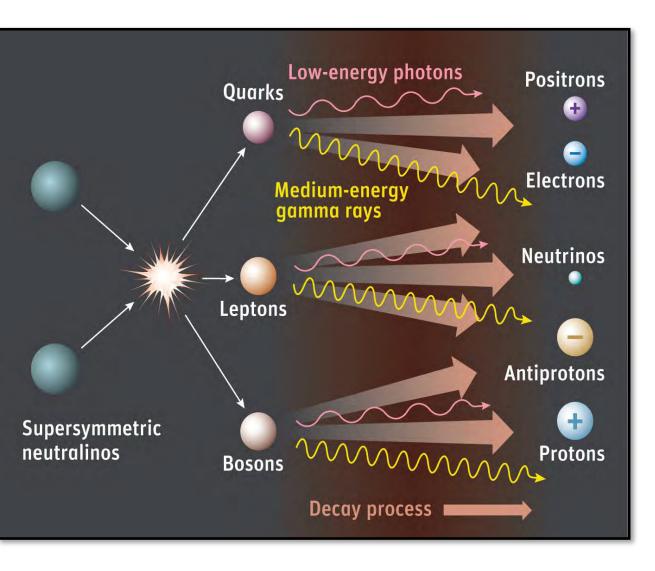
Un grand nombre de sous-halos gardent une grande fraction de leur masse à z=0 → détection boostée





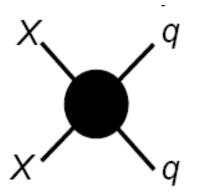
Aguirre-Santaella et al 2023

Expériences de détection indirecte



Les particules de matière noire s'annihilent pour former

- Photons
- Neutrinos
- Positrons
- Antiprotons
- Antideuterons



La densité relique nous indique une section efficace d'annihilation

$$\langle \sigma_A v \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$

Photons Gamma: encore négatif

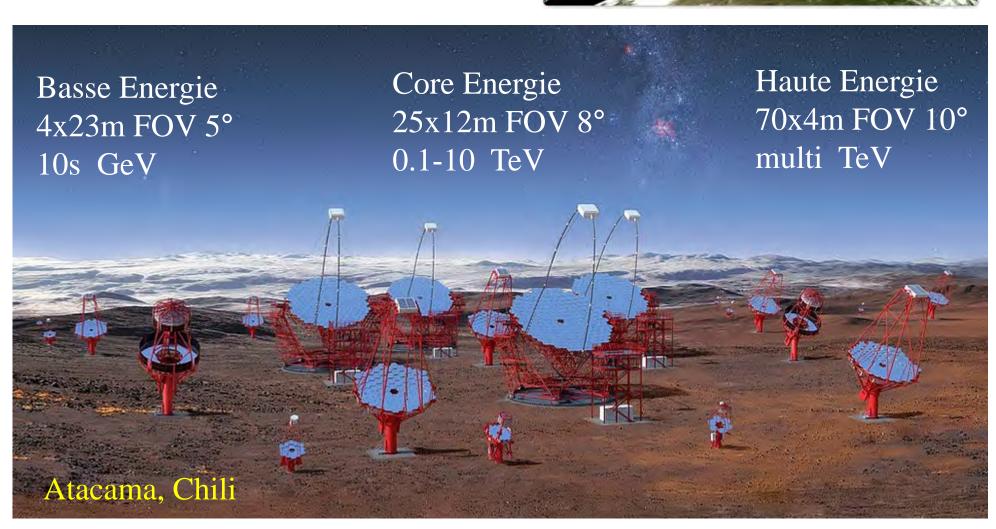
Fermi-LAT, HAWC, CTA Cerenkov Telescope Array



Fermi exclut des neutralinos de 100GeV

CTA pourra étendre vers les 10 TeV

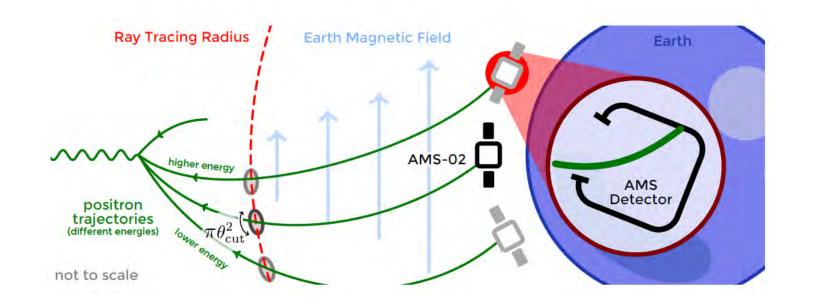
Et au-delà, grâce aux Tel-4m

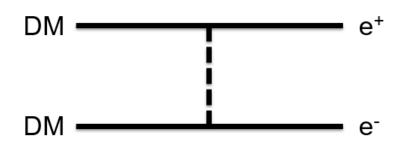


Prototype de 4m à l'Obs de Paris- Meudon

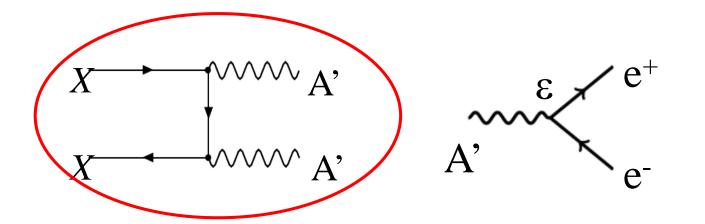


Détection indirecte par les positrons?





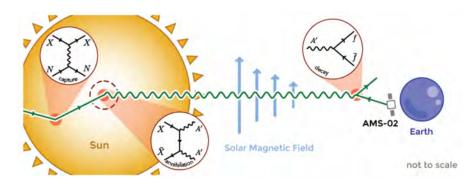
Trajectoire des positrons dans le champ magnétique terrestre



Détecteur AMS, sur l'ISS « Alpha Magnetic Spectrometer » Sur la station spatiale internationale

A' se forment dans le Soleil

Possible interaction entre particules noires

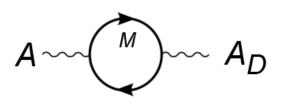


La matière noire fait partie d'un secteur noir, qui aurait ses propres particules et forces

Par exemple une interaction de jauge U(1), appelée "electromagnétisme noir" avec un intermédiaire appelé **photon noir** (pourrait avoir une masse)

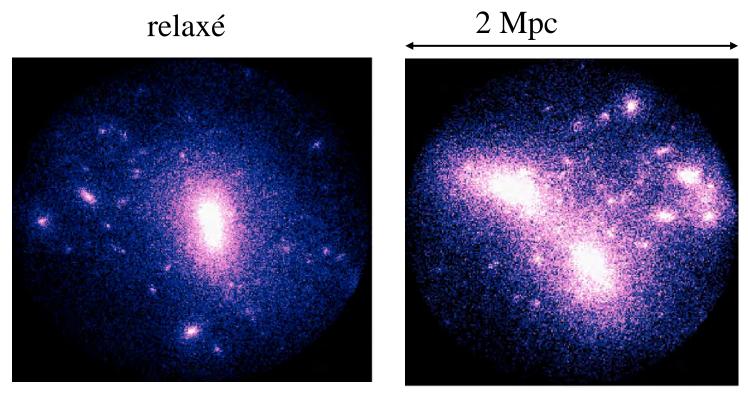
Mais il y aurait possible interaction entre notre boson A de U(1) (i.e. le photon) et le boson « noir » A_D de U(1)

Modèle standard U(1)



Secteur Noir U(1)

Age des halos: relaxés ou non



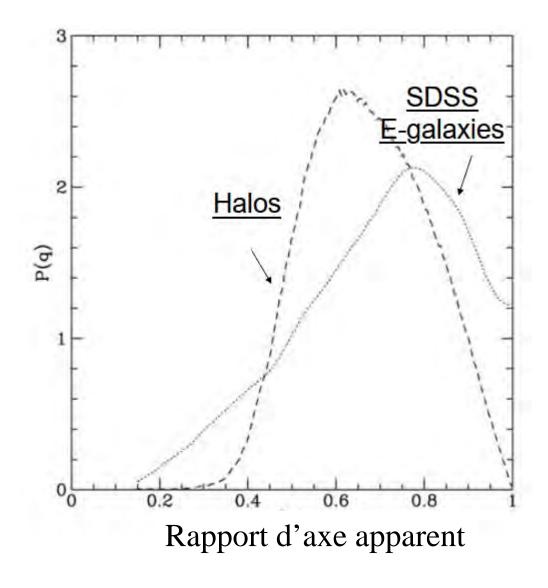
Une des principales caractéristiques des halos: âge dynamique

En dépend toute la morphologie des baryons et des galaxies

Simulations matière noire seule à z=0

Squelette pour toutes les structures, propriétés?

Forme à 3D des halos: DM only (DMO)

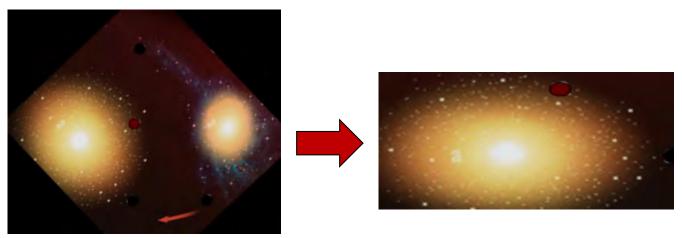


Pour des halos de matière noire seule,

 \rightarrow Formes triaxiales plutôt prolate a > b, c

Encore plus aplatis que les galaxies elliptiques

Formes plutôt prolate, dûe aux fusions



Dubinski 1994

Forme à 3D des halos: avec baryons (MHD)

Dès que les baryons sont introduits → tombent au centre Produit une concentration Leur rotation symétrise le plan équatorial

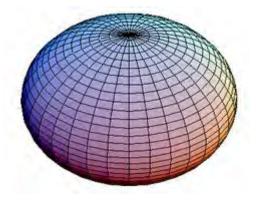
→ Forme oblate, plus ronde en général

Sphéroïdes de révolution

Grands axes

a=b>c

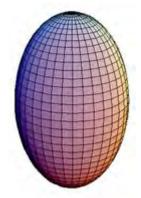
Oblate



Petits axes

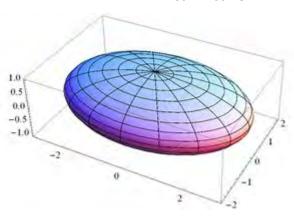
a > b = c

Prolate



Triaxes a,b,c différents

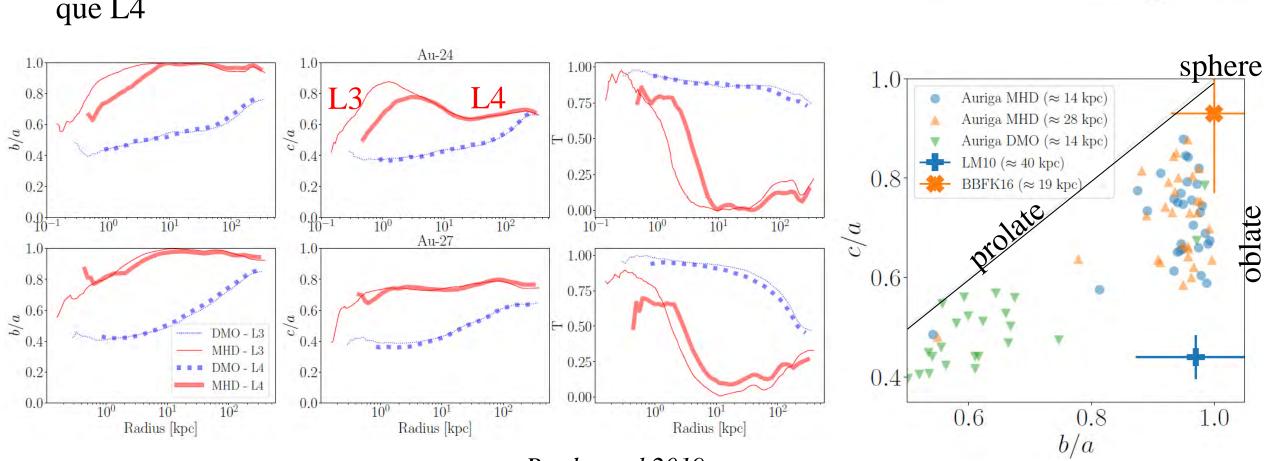
Triaxiale



Forme des halos: DMO et MHD

Triaxialité
$$T = \frac{a^2 - b^2}{a^2 - c^2}$$

L3 plus haute résolution que L4

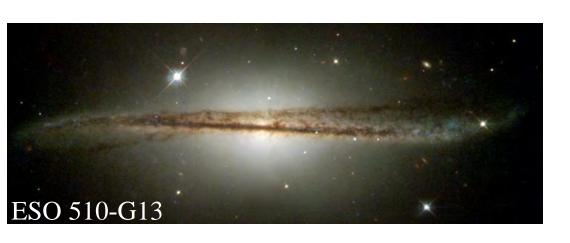


DMO

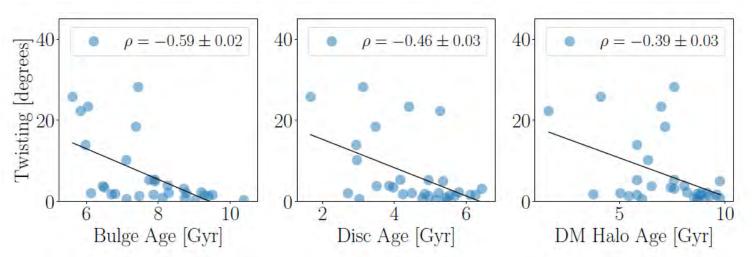
MHD

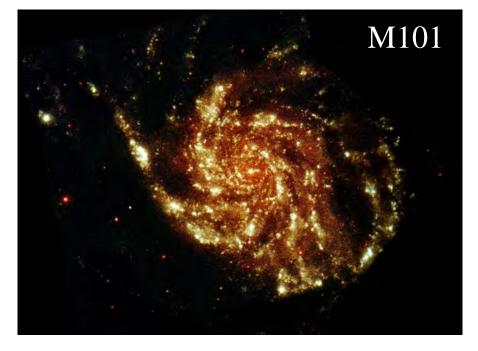
Prada et al 2019

Alignement des halos avec les disques



Les non alignements sont sources d'instabilité Gauchissements (warps)





Décentrement

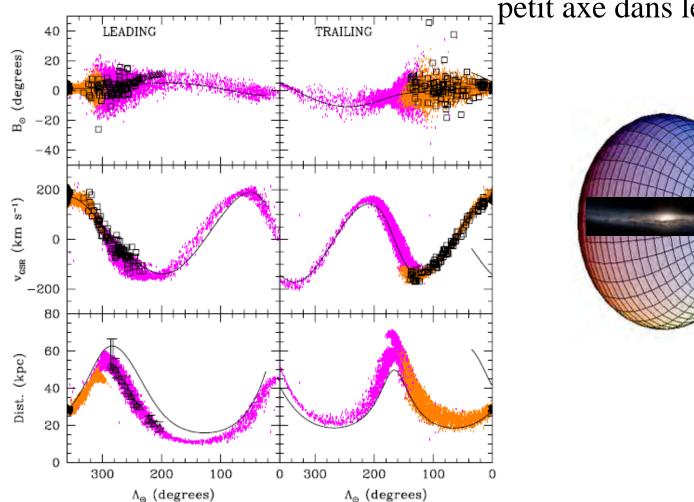
Changement de moment angulaire tous les 7 Gyr

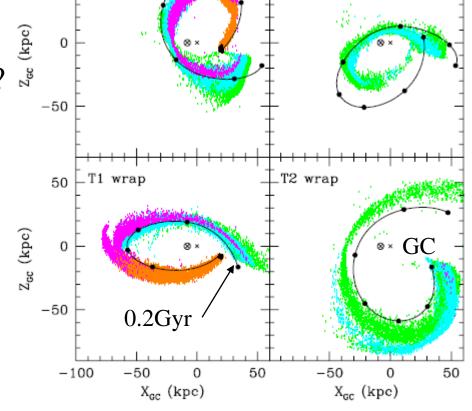
Prada et al 2019

Contraintes de la naine du Sgr

Le potentiel de la Voie lactée est oblate, avec un

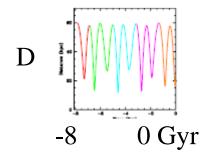
petit axe dans le plan?





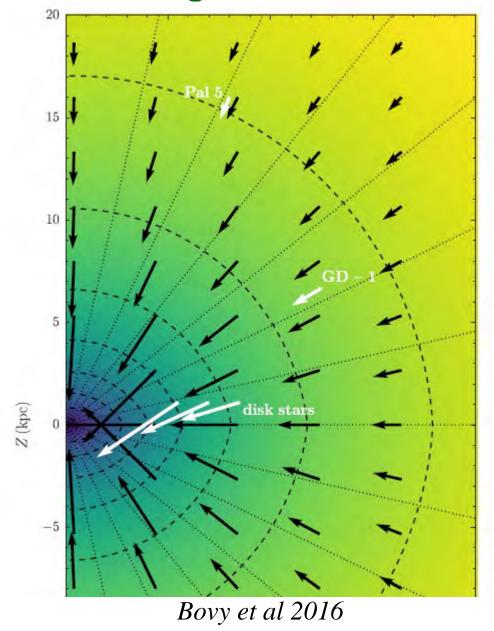
.L2 wrap

L1, T1 primary Leading Trailing arms L2, T2 secondary tidal streams

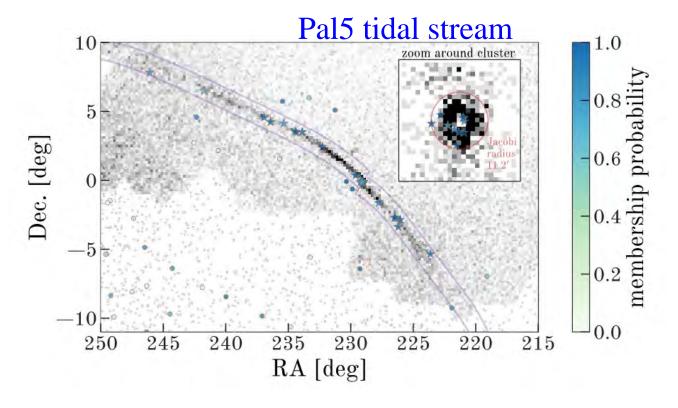


Law & Majewski 2010

Amas globulaires et GAIA



GAIA: milliard d'étoiles, distances et aussi vitesses propres

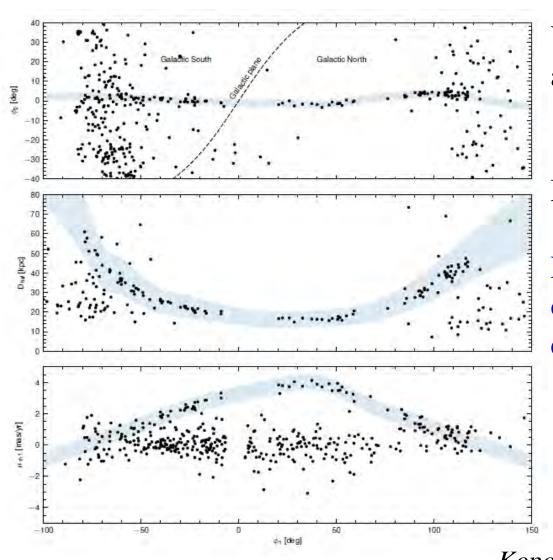


RRLyrae, variables
→ distances

Price-Whelan et al 2019

Le courant de marée ORPHAN

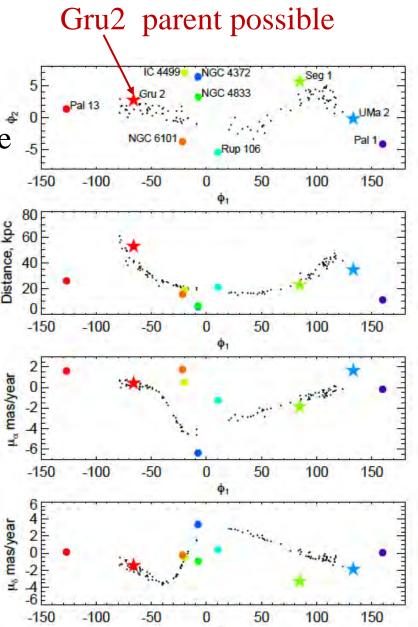
Incompatible avec un potentiel statique



Vitesse perpendiculaire au courant de marée

→ Des perturbateurs Massifs

En plus avec des oscillations du plan des instabilités



Koposov et al 2019

Distribution de masse noire dans les amas de galaxies

Lentilles gravitationnelles

Equilibre hydrostatique du gaz X

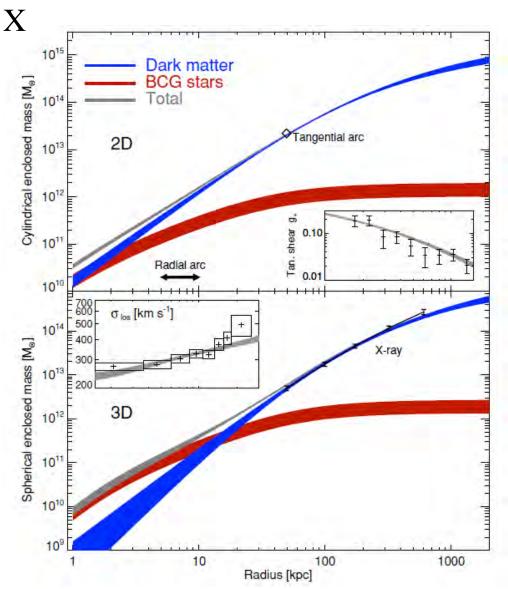
Vitesses des galaxies

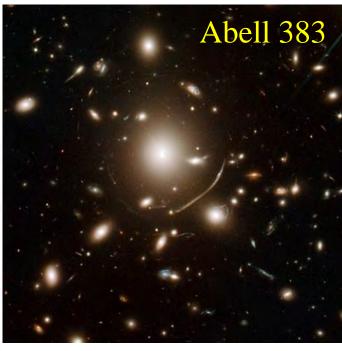
La pente de la densité $\rho \propto r^{-\beta}$ est faible $\beta < 0.7$

Plus faible que les prédictions des simulations DMO β = 1-1.5

Et les baryons produisent une contraction adiabatique

 $\rightarrow \beta = 1.5-2$





Modèle de halo triaxial

Newman et al 2011

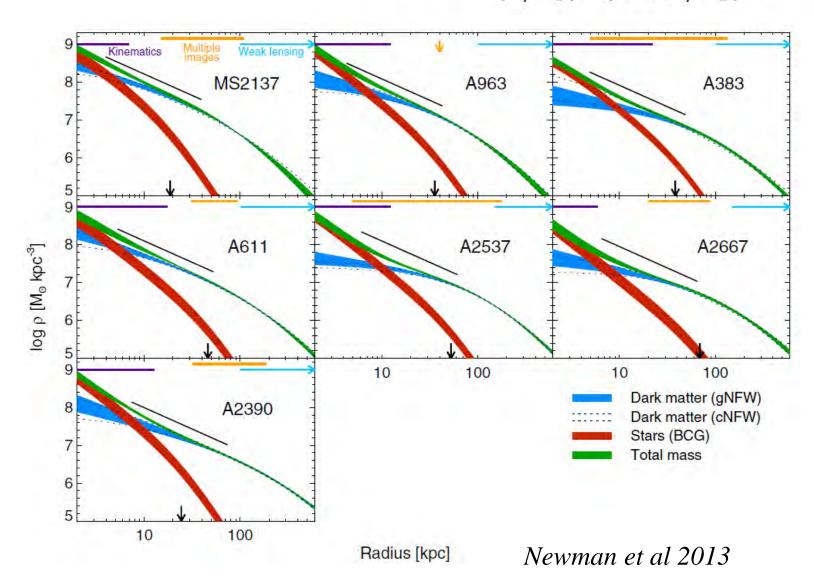
Amas de galaxies: profils de matière noire

$$\rho_{\rm DM}(r) = \frac{\rho_s}{(r/r_s)^{\beta} (1 + r/r_s)^{3-\beta}}$$

Exposant faible $\beta = 0.5$ Correspond plus à un cœur qu'une cuspide

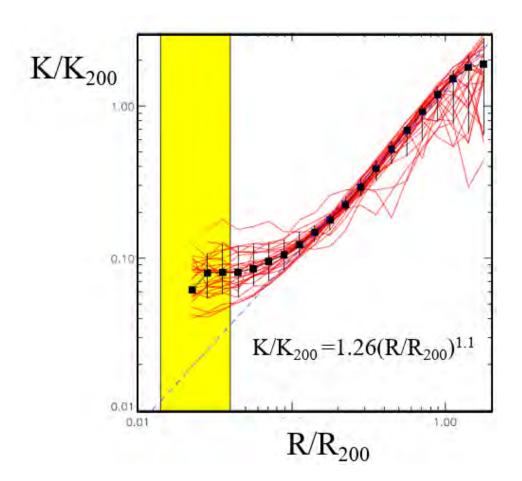
Cœurs de 15-20kpc Feedback des galaxies Insuffisant

- → Soit cooling flow, AGN?
- → Soit nature de la matière noire, neutrinos stériles, axions



Feedback exceptionnel dans les amas?

Flots de refroidissement (cooling flows) Prédit 1000 M_☉, en fait 100 M_☉





Entropie $K \propto T/n_e^{2/3}$

Accumule tous les feedbacks chauffage, dissipation, phénomènes non gravitationnels

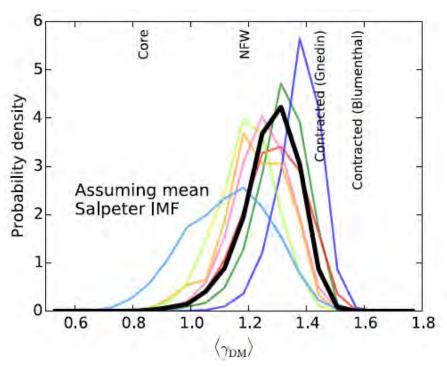
Masse dans les groupes ~ 10¹⁴ M_☉

Groupes à z~0.4, avec une Elliptique au centre Lentilles gravitationnelles

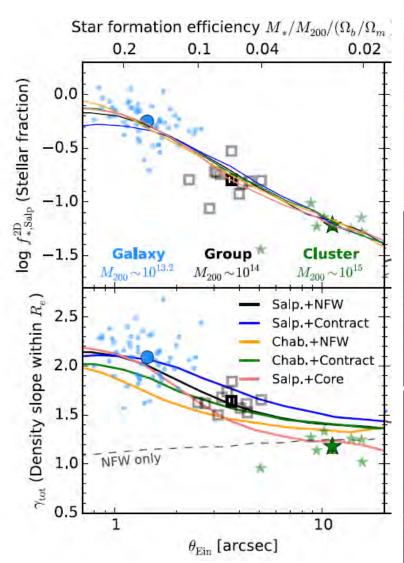
Cinématique des étoiles

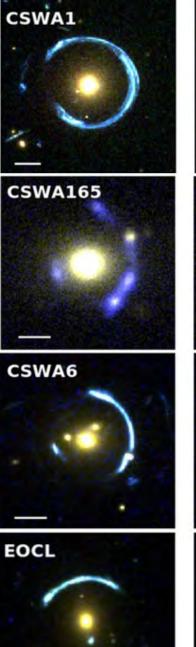
 \rightarrow Exposant élevé β = 1.3 Conforme à NFW

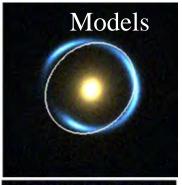
→ Effet des baryons non universel



Newman et al 2015













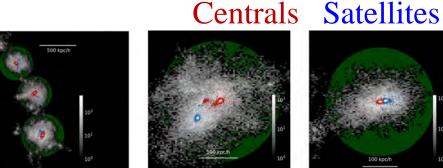
Connection Halos-Galaxies

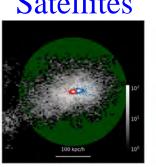
Comment déduire les propriétés de l'invisible à partir du visible?

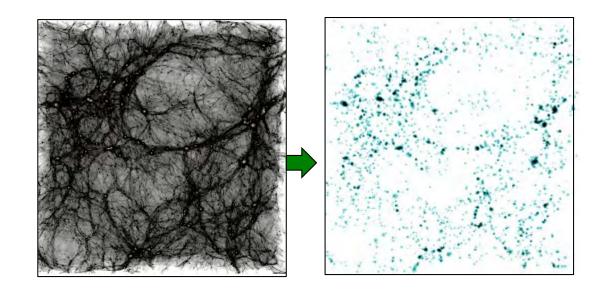
Les galaxies massives et amas \rightarrow différentes propriétés d'aggrégation que la moyenne des galaxies

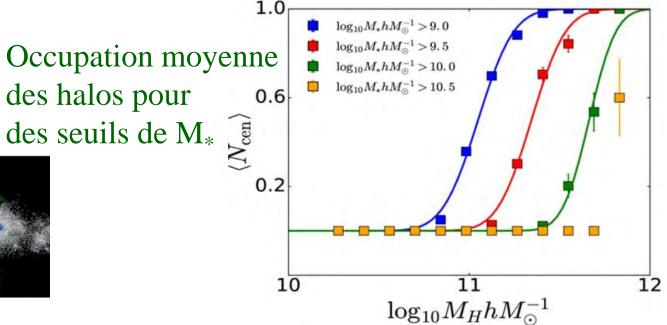
biais

Plusieurs méthodes: simulations hydro, Semi-analytiques (SAM), ou empiriques, halo occupation distribution (HOD)





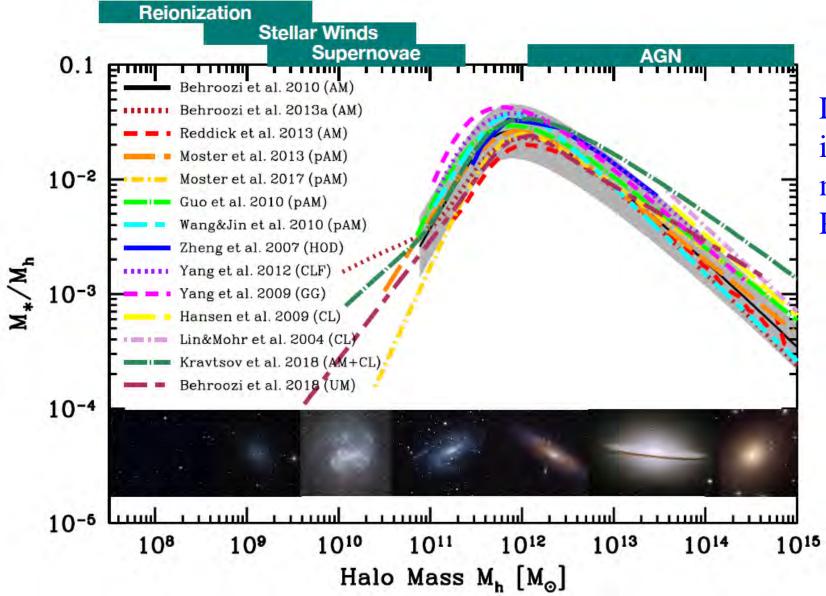




Wechsler & Tinger 2018

Bhowmick et al 2018

Halo Abundance Matching



La formation des galaxies est très inefficace: 20% des baryons max pour $Mh = 10^{12} M_{\odot}$, Plus faible sinon

Méthodes:

Abundance matching (HAM)
Halo occupation (HOD)
Obs directe groupes et amas
Universe machine

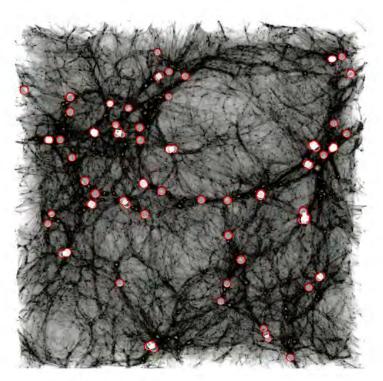
Behroozi et al 2018

Biais: amplitude d'aggrégation par rapport à la DM

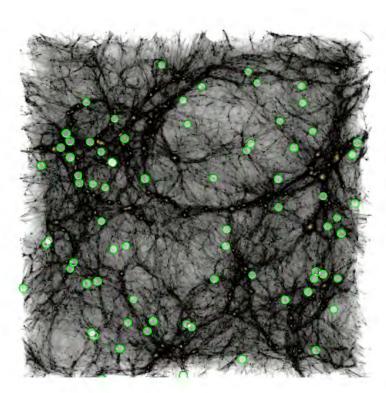
Dépend de la masse, concentration , moment angulaire λ des halos

5% des halos de 10⁸ M_o à la plus forte concentration

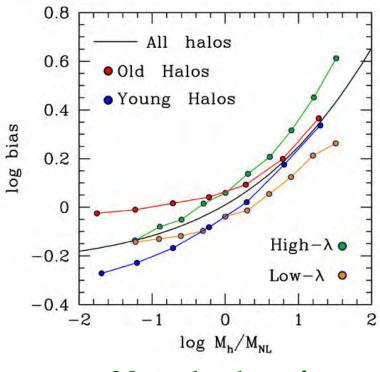
5% des halos à la plus faible concentration



90x90x30Mpc



Old= z_f 25% plus haut Young= z_f 25% plus bas



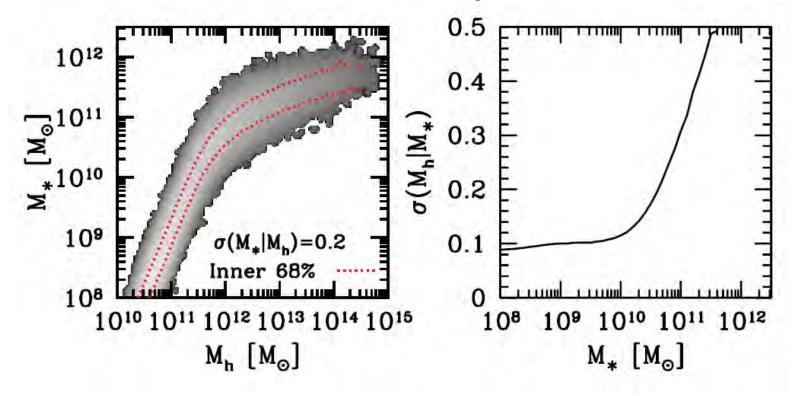
20% plus haut λ 20% plus bas λ

Wechsler & Tinger 2018 Bett et al 2007

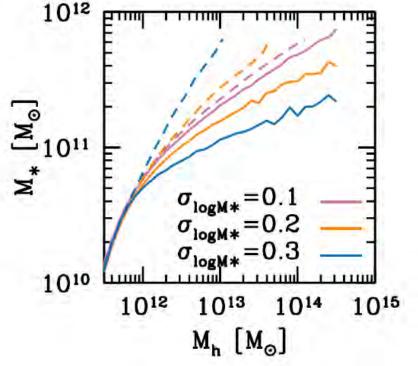
Masse d'étoiles versus masse du halo

En dessous de $10^{12} M_{\odot}$, relation $M_* \propto M_h^{2.5}$ Au dessus, evolution plus lente $M_* \propto M_h^{1/3}$

Dispersion $\sigma(M_h/M_*)$ monte, car M_* décroît fortement au-delà du pivot M_* = 2 $10^{10} M_{\odot}$



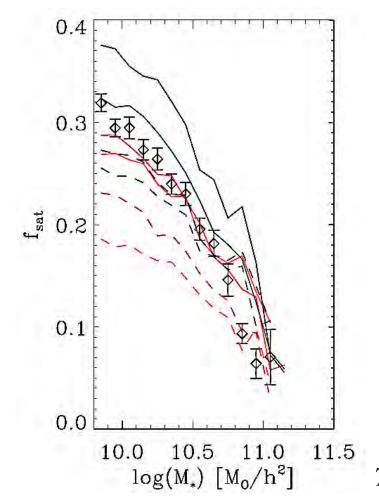
SHMR
Star-Halo mass relation
Solid in bins of Mh
Dash in bins of M_{*}



Wechsler & Tinger 2018

Nombre de galaxies satellites

La plupart des galaxies sont centrales La fraction de galaxies satellites varie beaucoup avec la masse de 30% à moins de 5% pour M grand



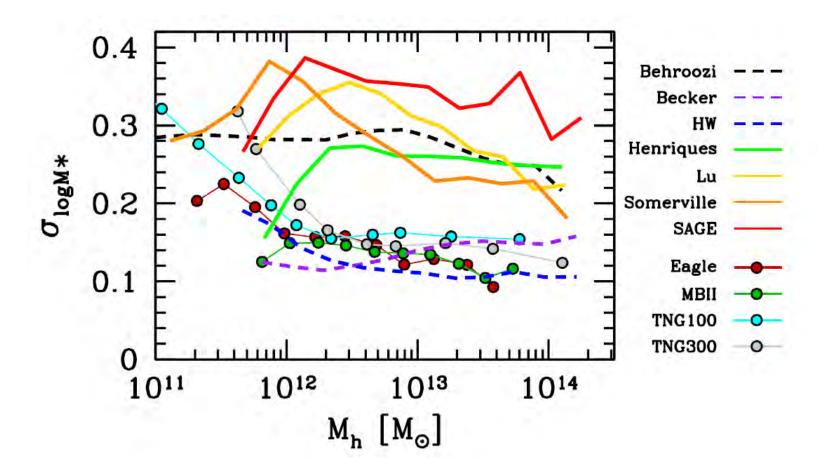
plusieurs σ8 10² total satellites 10 $\sigma_{\rm s} = 0.88$ $\sigma_8 = 0.80$ $\sigma_8 = 0.75$ 0.1 $\sigma_8 = 0.70$ $\sigma_{8} = 0.65$ 0.01 1012 1015 1013 1014 $M_{halo} [M_{\odot}/h]$

Taux d'occupation

des halos, pour

Tinger et al 2011

Dispersion des diverses méthodes



Dispersion des masses stellaires à une masse de halo donnée M_h

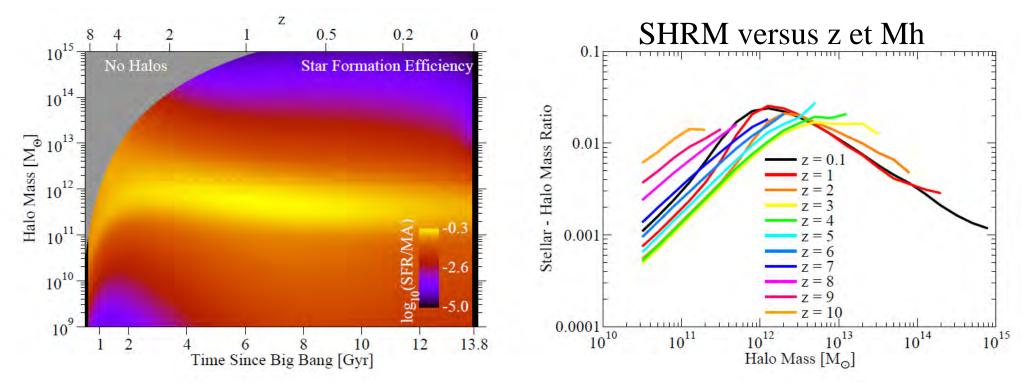
Solid: Semi-analytique (SAM) (bien supérieures) Surtout à grande M_h

Dash: Méthodes empiriques 4 simulations numériques (bien inférieures)

Efficacité de formation d'étoiles

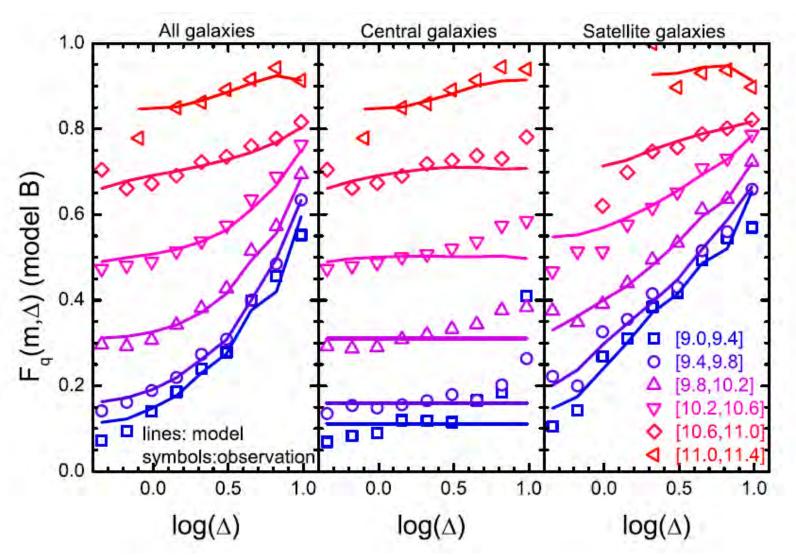
Pendant toute l'histoire de l'Univers, les étoiles se forment essentiellement dans une tranche de halos de masse autour de $10^{12} \rm M_{\odot}$

SFE définie ici comme
=SFR/MAR
MAR= Taux d'accrétion de
masse du halo



Behroozi et al 2013, 2018

Influence de l'environnement



Fq fraction de galaxies quenched en fonction de Δ densité de l'environnement dans 6 Mpc

Centrales ou satellites

Symboles: Obs SDSS

Courbes: prédiction du

modèle où le quenching est

dû à Mh et non Δ

Résumé

→ La matière noire forme les halos bien avant la recombinaison et prépare le lit des galaxies

→ Composant le plus hiérarchique: les différents Modes d'assemblage: accrétion de masse, fusions Spectre de masse, jusqu'à des masses terrestres (détection?)

→Influence des baryons: contraction adiabatique cuspides, concentration, forme à 3 dimensions, feedback

→ Amas de galaxies, et groupes, cœurs ou cuspides Connection Galaxies-Halos, Abundance Matching (HAM) Moins de 20% des baryons dans les galaxies

