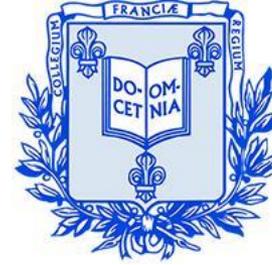


Abell 2218

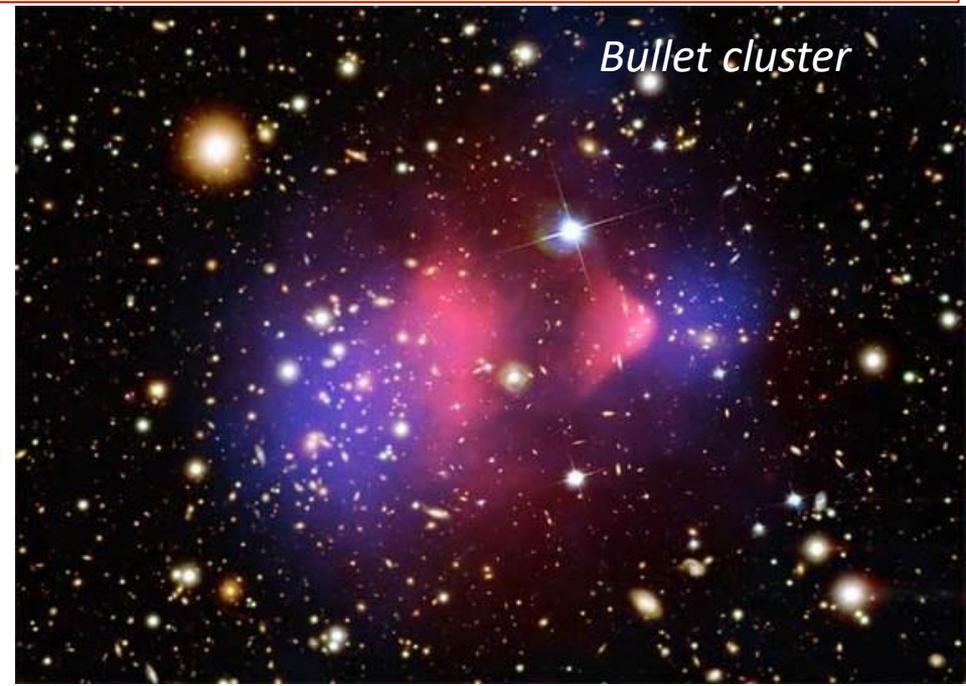


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

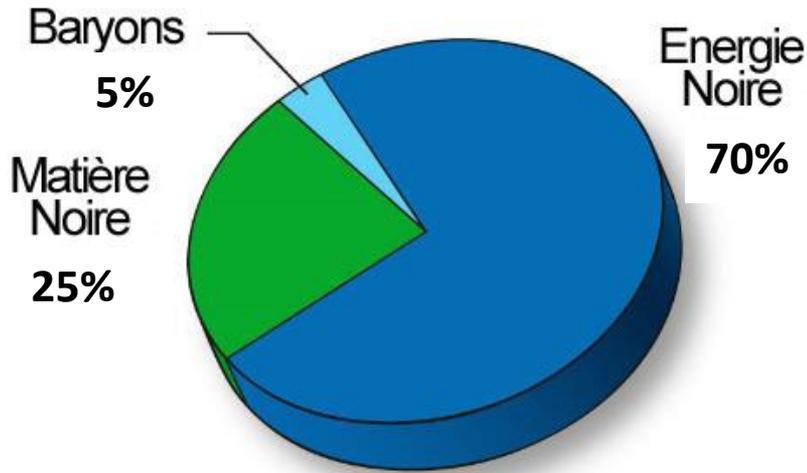
Les différents modèles pour la matière noire et leurs contraintes

Françoise Combes
2 Octobre, 2018



Bullet cluster

Le contenu de l'Univers



Densité moyenne de l'Univers

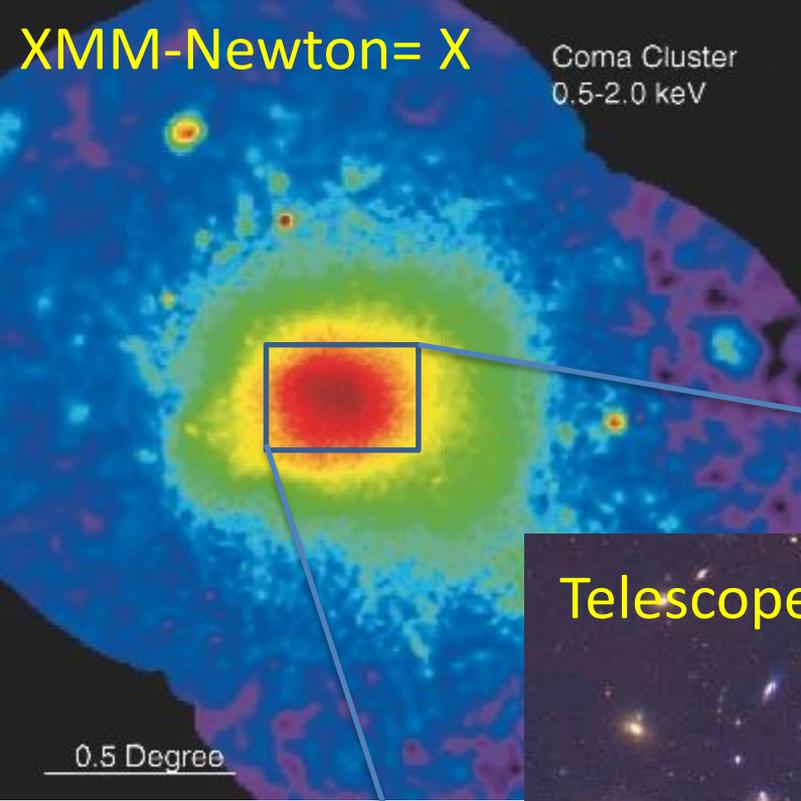
$$\rho_c \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

$$\Omega = \rho / \rho_c$$

- Baryons = protons, neutrons, matière ordinaire
- Matière noire: exotique, faite de particules inconnues
- Energie noire: force répulsive, accélère l'expansion

XMM-Newton= X

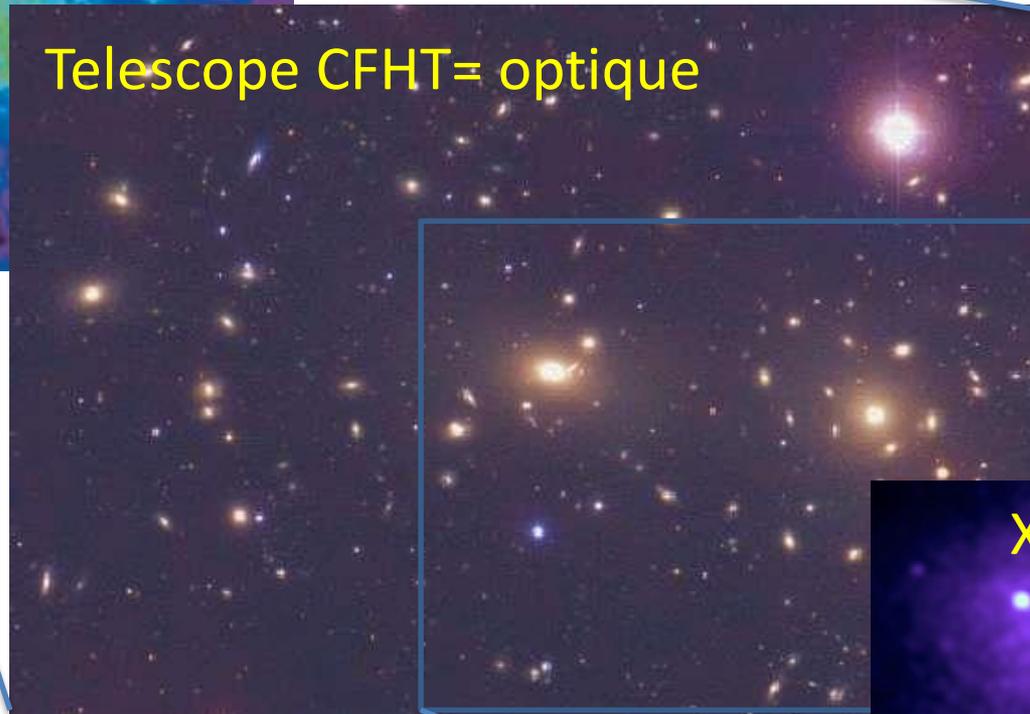
Coma Cluster
0.5-2.0 keV



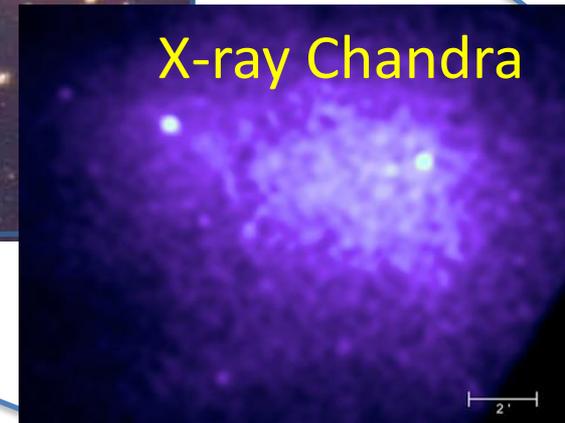
Amas de Coma rayons X, optique

$V \sim 1000 \text{ km/s}$ $M \sim 5 \cdot 10^{14} M_{\odot}$

Telescope CFHT= optique



X-ray Chandra



1937 – Fritz Zwicky calcule la masse des amas de galaxies avec leurs vitesses $M/L = 500 M_{\odot}/L_{\odot}$

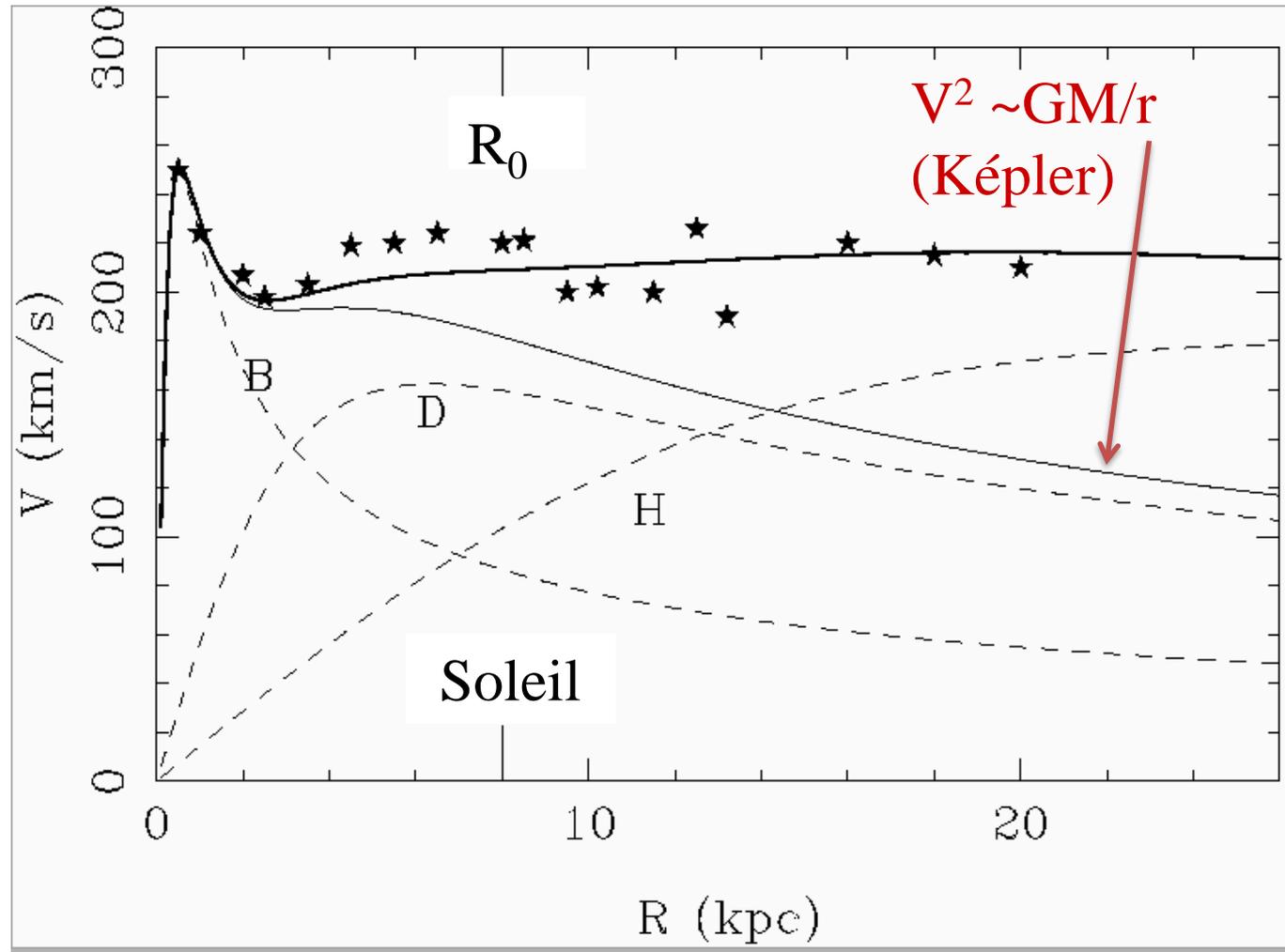
Les galaxies tournent trop vite



→ Autour des galaxies, halos de matière noire.

Entre 1960 et 1980: *Mesures difficiles, incertitudes sur le rapport M/L*

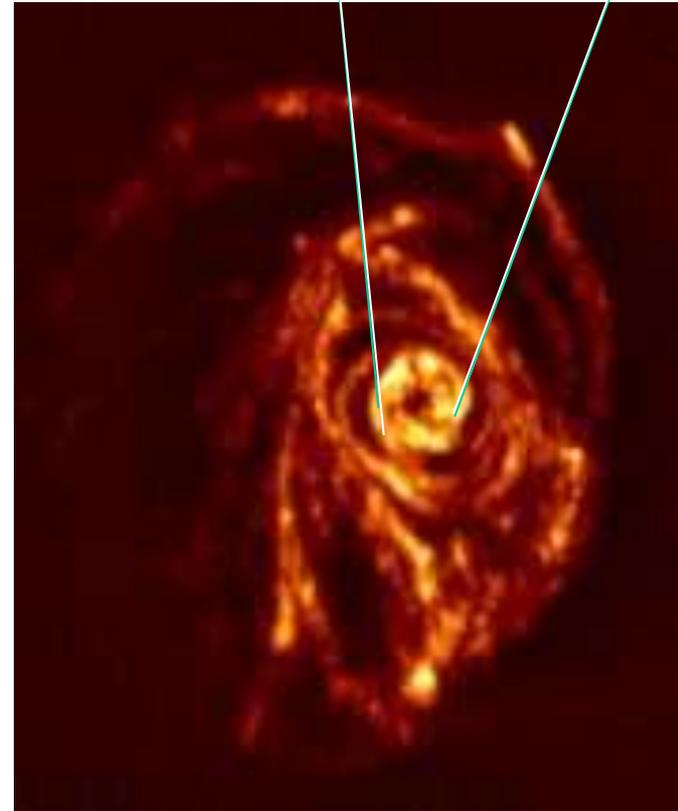
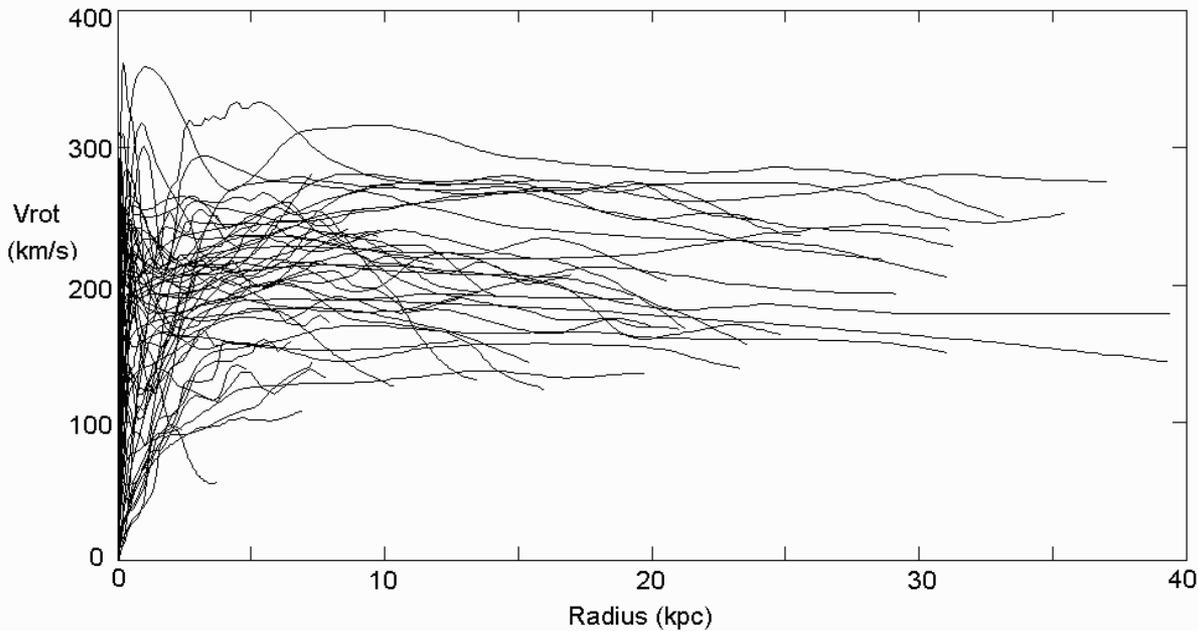
→ Courbes de rotation, par ex notre Galaxie, la Voie Lactée



Les régions externes: gaz atomique HI

HI: carte de l'hydrogène atomique
21cm de longueur d'onde

M83: optique



HI dans M83: une galaxie semblable à la Voie latcée

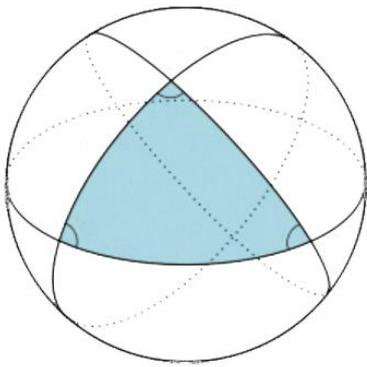
Densité de l'Univers

Années 1980-2000

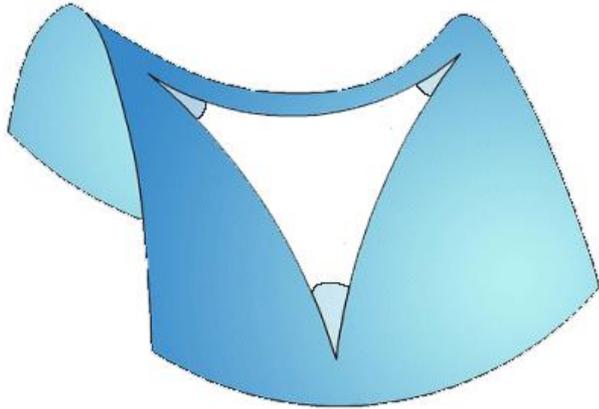
$\Omega \sim 0.1$ pas loin de Ω_b

Requis par la nucléosynthèse
primordiale (D, Li, He)

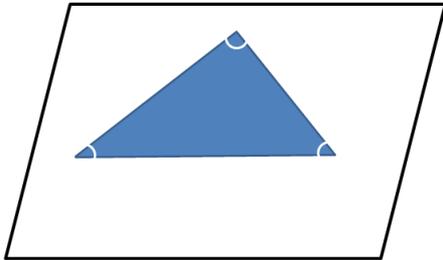
$\Omega > 1$



$\Omega < 1$



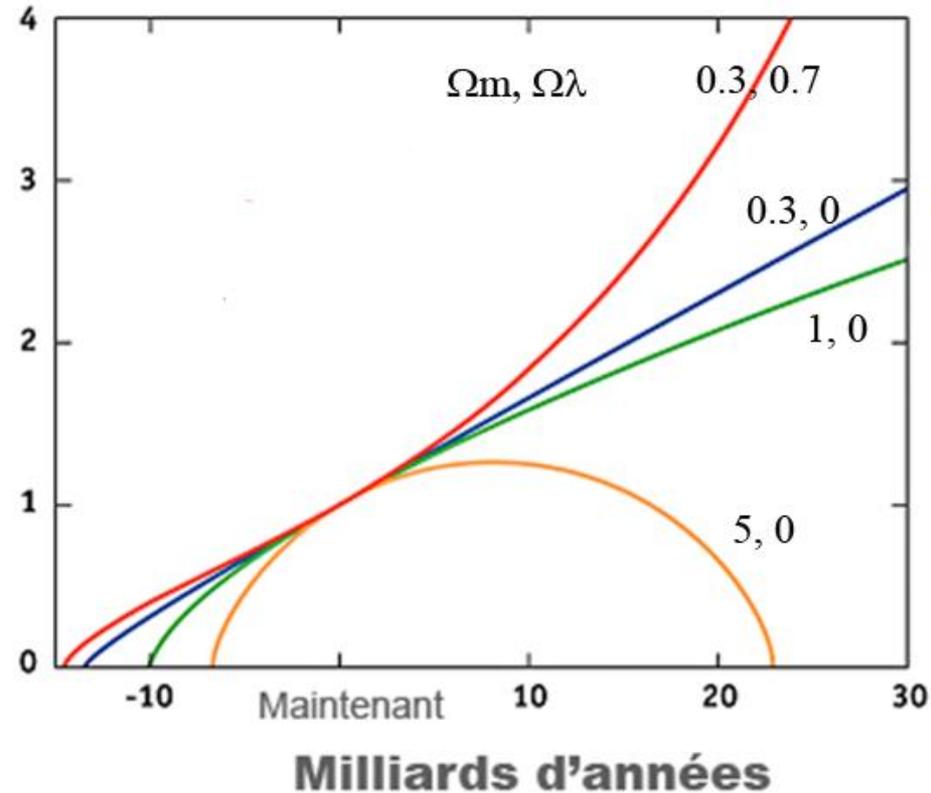
$\Omega = 1$



$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$$

$$\rho_{\text{crit}} = 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

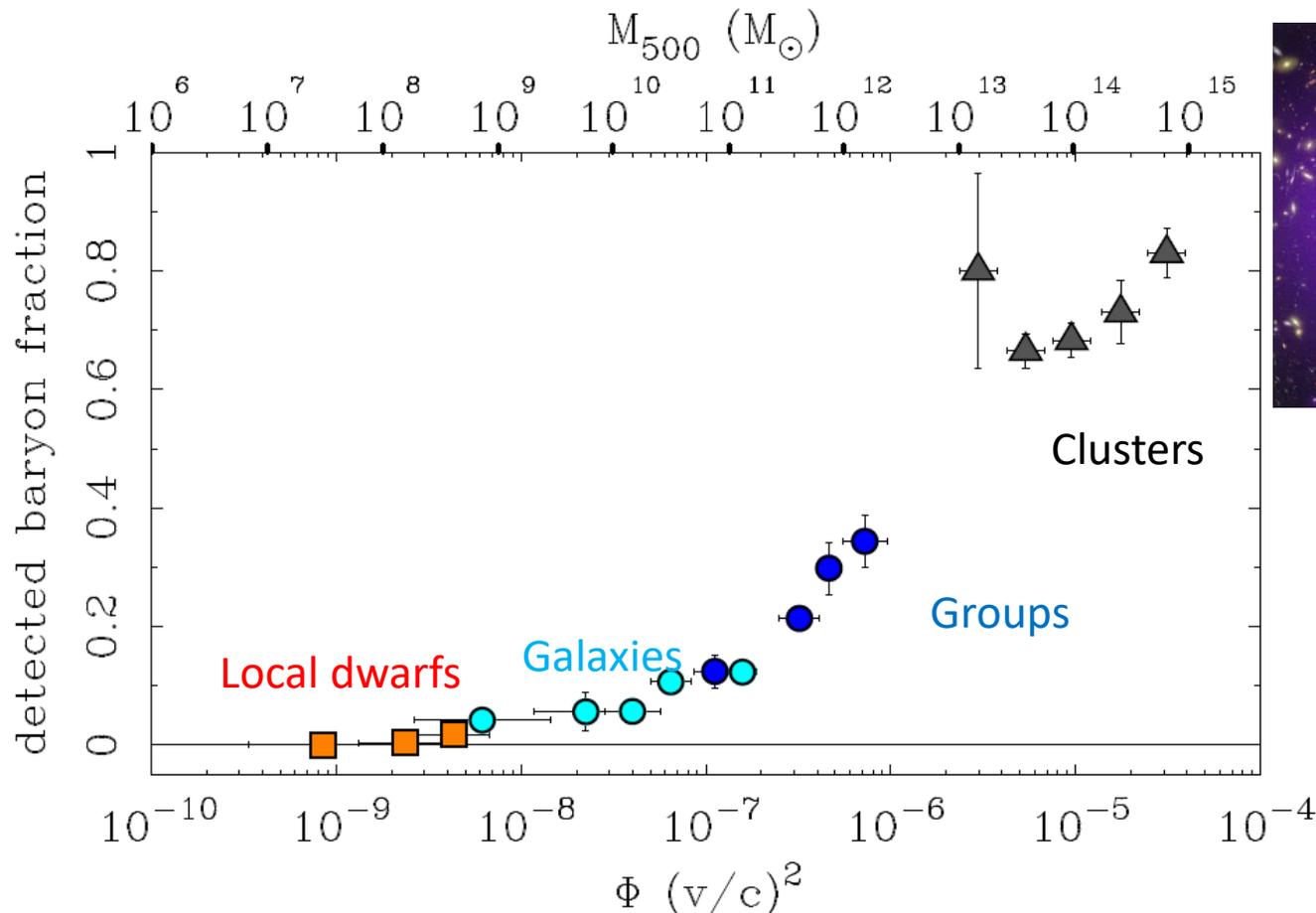
Taille de l'Univers



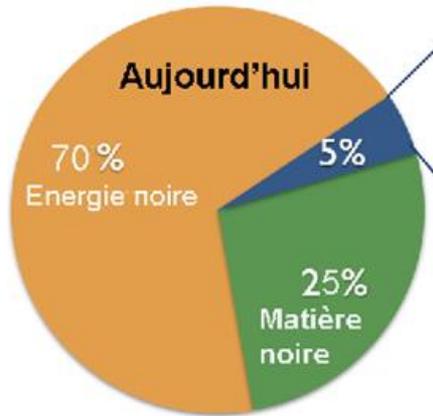
Fraction de baryons détectés

Fraction = $M_b / (0.17 M_{500})$ M_{500} masse dynamique dans R_{500}

R_{500} rayon où la densité est 500 fois la densité cosmique moyenne



Où sont les baryons?



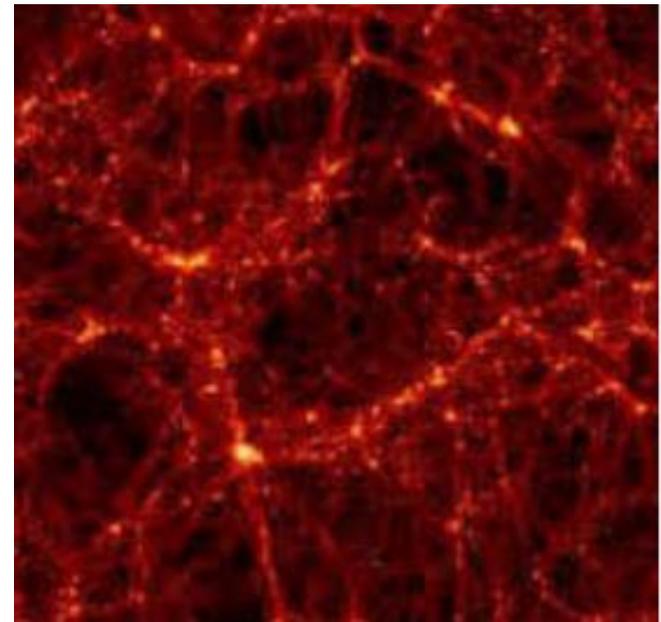
→ 6% dans les galaxies (étoiles); 3% amas de galaxies, gaz X

→ ~18% dans la forêt Lyman-alpha (filaments cosmiques)

→ ~10% dans le WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium) 10^5 - 10^6 K
raies de OVI

→ **63% pas encore identifiés!**

La majorité n'est pas dans les galaxies

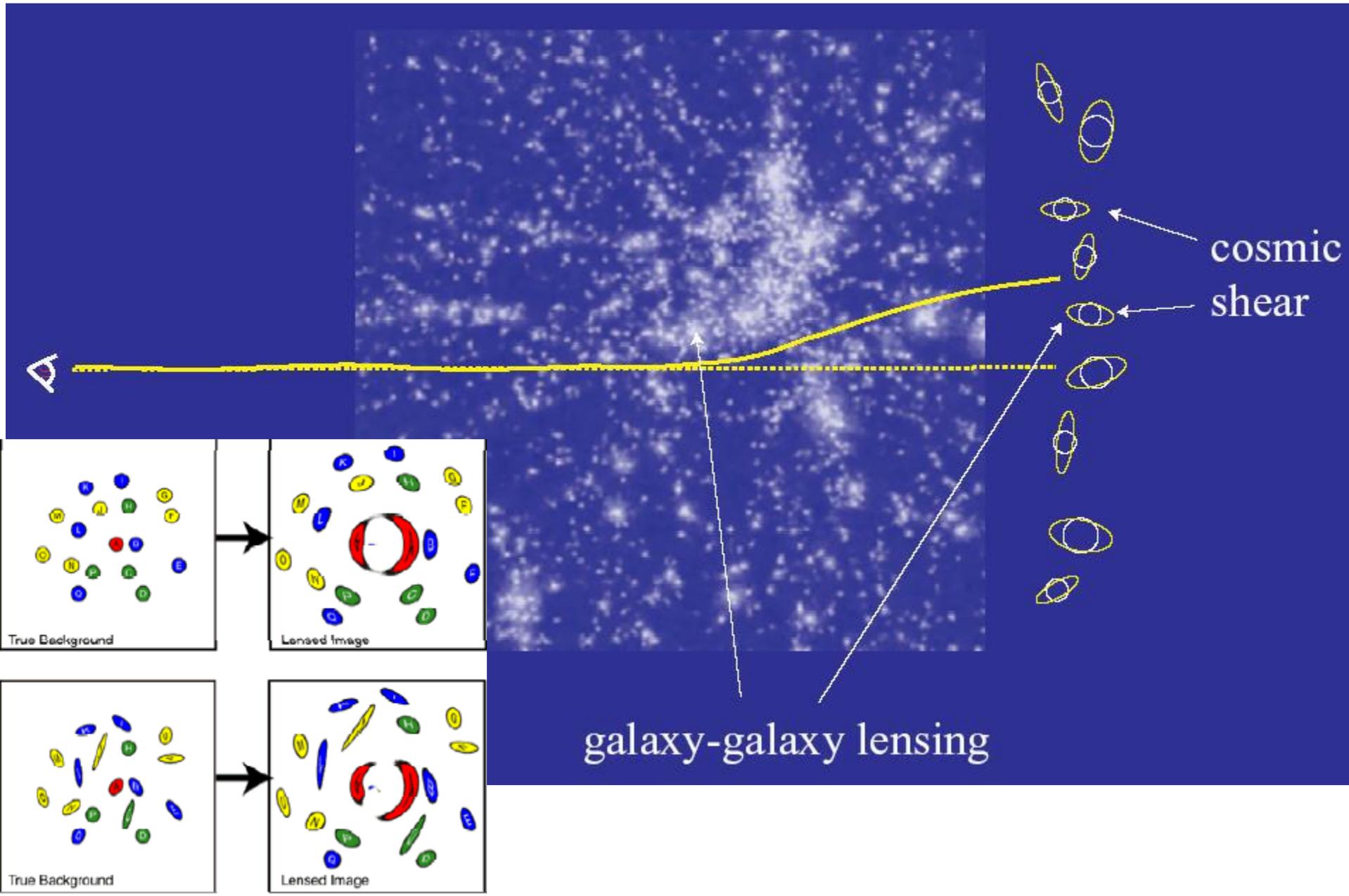


Cartographies de la matière noire

Lentilles gravitationnelles: régime fort



Lentilles gravitationnelles: régime faible

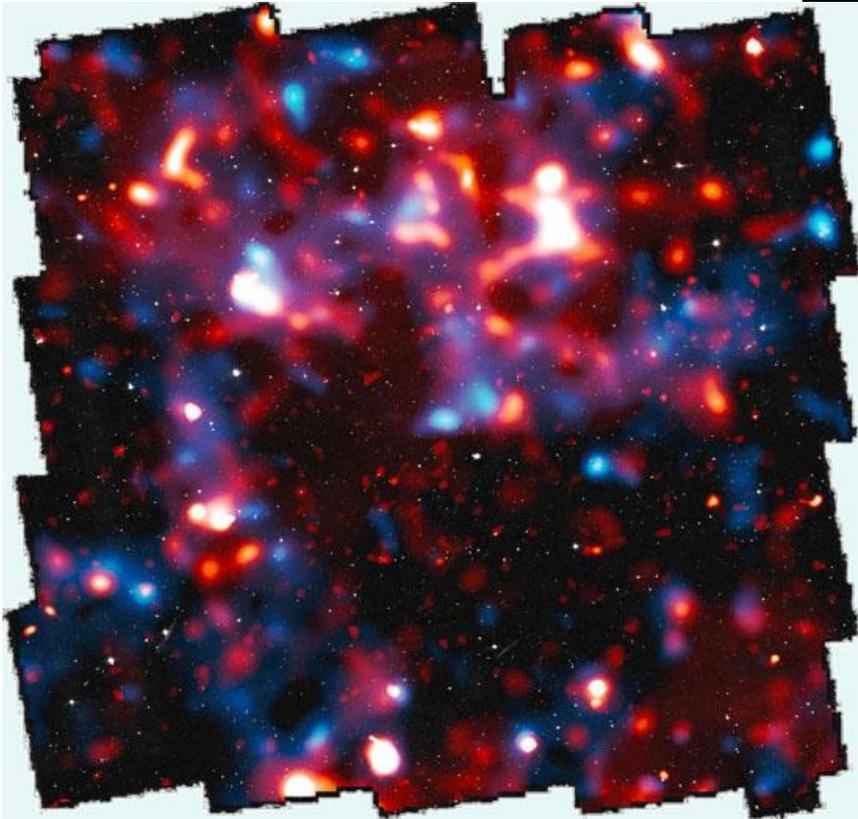
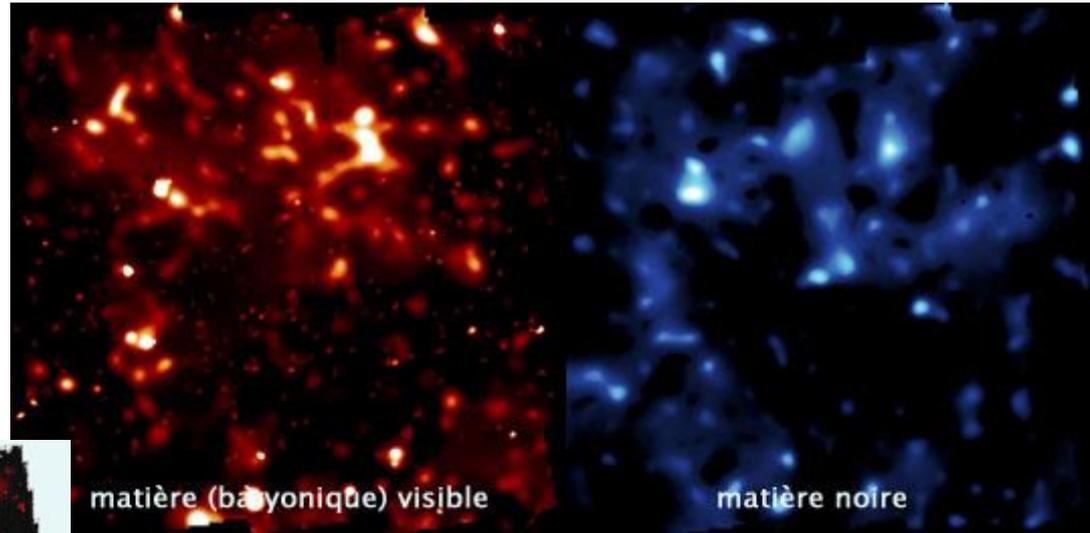


Cisaillement gravitationnel

Rouge: gaz X

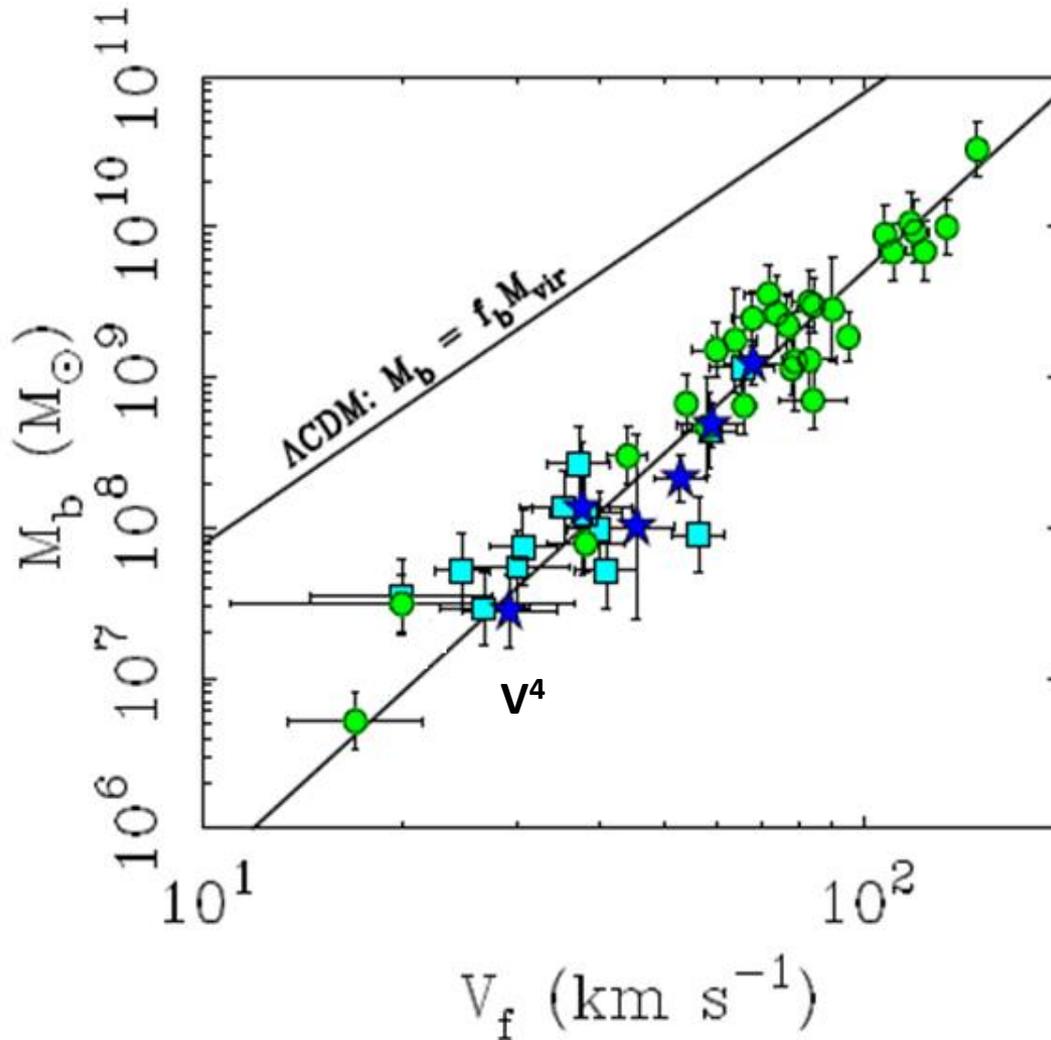
Bleu: matière totale

Champ Cosmos



**Baryons et Matière noire
sont rassemblés dans les
mêmes structures**

Relation d'échelle de Tully-Fisher



f_b fraction universelle
de baryons = 17%

CDM: Cold Dark Matter
 Λ énergie noire

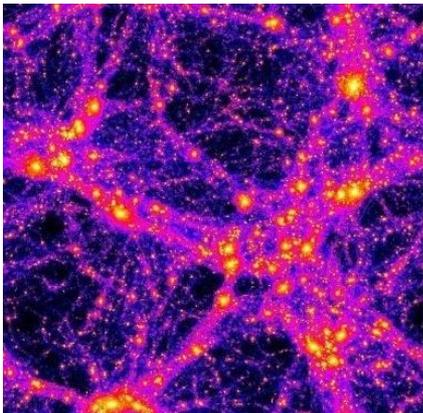
➔ la plupart des baryons
ne sont pas dans les
galaxies

Types de matière noire

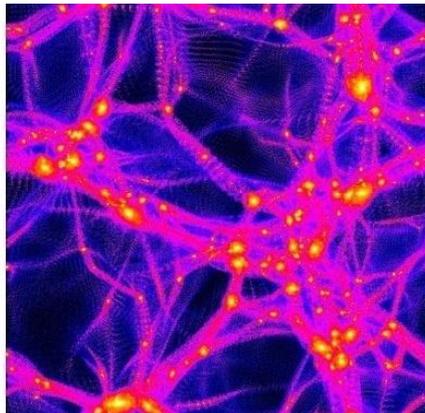
Chaude (neutrinos)
Relativiste au découplage
**Ne peut pas former
les structures,
si $m < 5 \text{ keV}$**

Froide (particules massives)
Non relativiste au découplage
WIMPS
("weakly interactive massive particles")
Neutralinos: particule
supersymétrique la plus légère

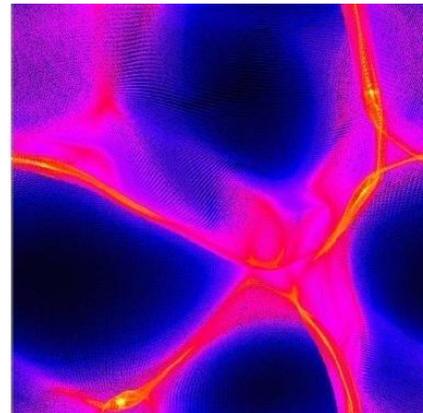
Modèle Froid (CDM)

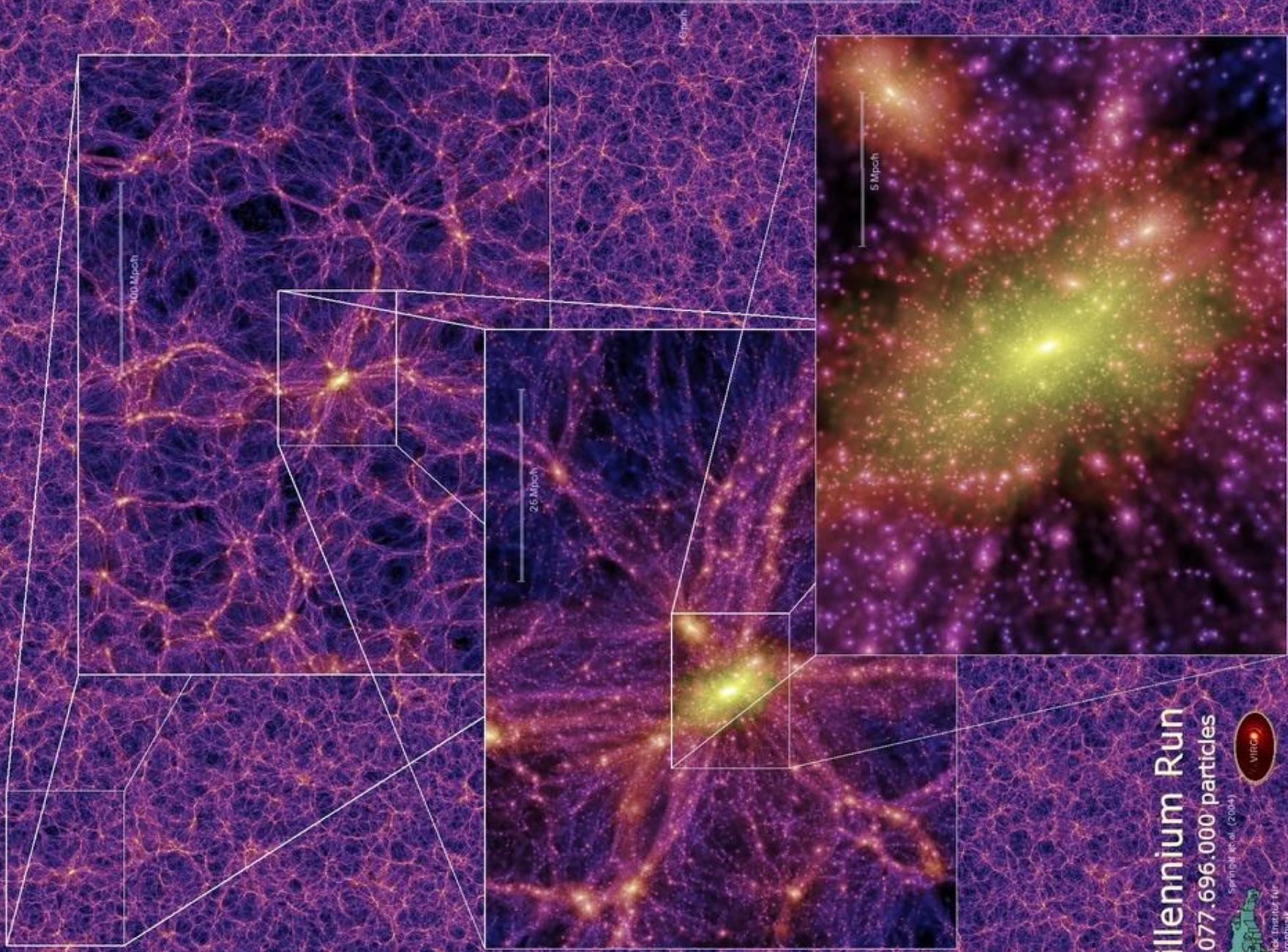


Tiède (WDM)



Chaud (HDM)





Millennium Run

10,077,696,000 particles



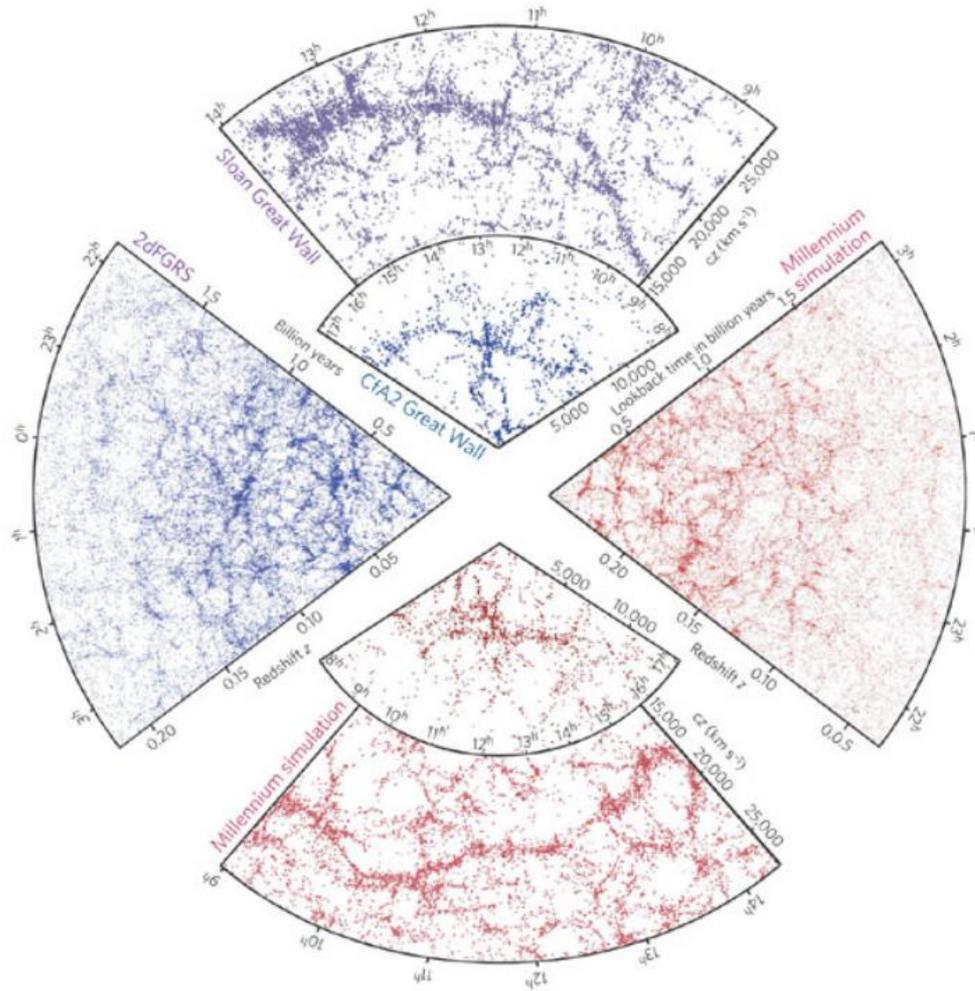
Springel et al. (2004)



Max-Planck-Institut für
Astrophysik

Cartographies de galaxies

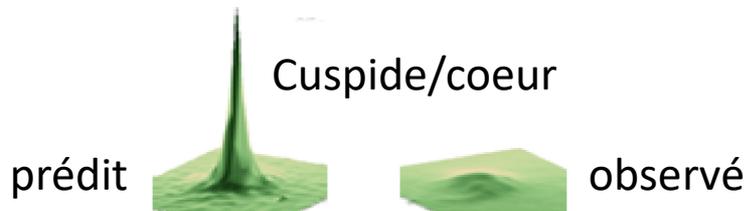
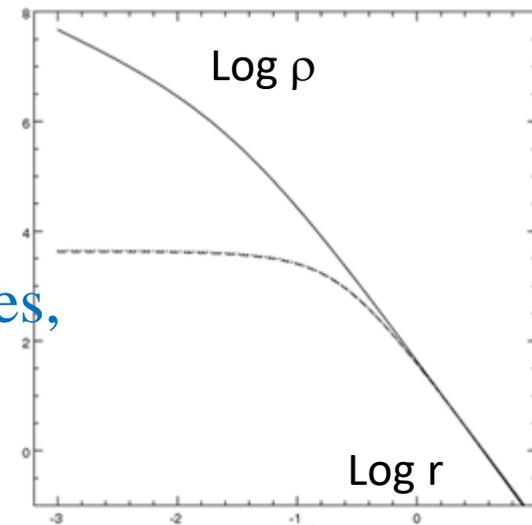
Versus
Simulations
CDM



Les simulations reproduisent bien les structures à grande échelle:
Web cosmique, les filaments, les murs, grands murs,
la structure des vides, la granularité des super-amas.

Problèmes du modèle standard CDM

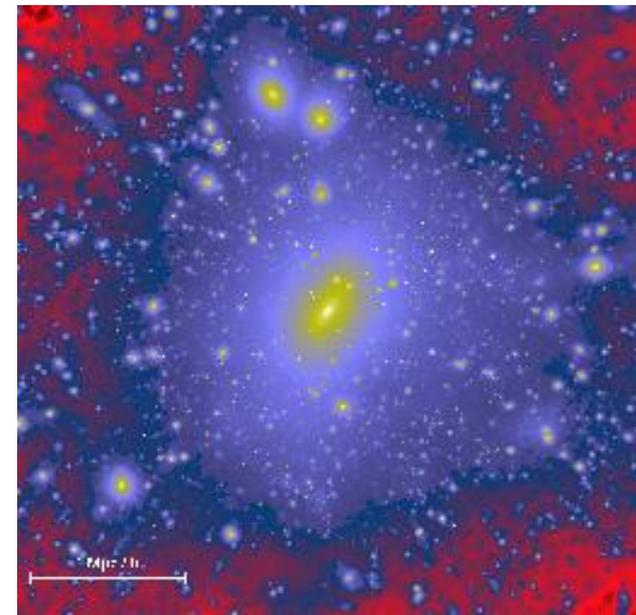
→ Prédiction de "cusps" au centre des galaxies, non observés, en particulier dans les galaxies naines, dominées par la MN



Les profils de matière noire ne sont pas universels

→ Prédiction d'un grand nombre de satellites autour des galaxies

La solution pourrait provenir d'un meilleur traitement des processus physiques (formation d'étoiles, feedback), plus de résolution des simulations, **ou bien la nature de la matière noire?**



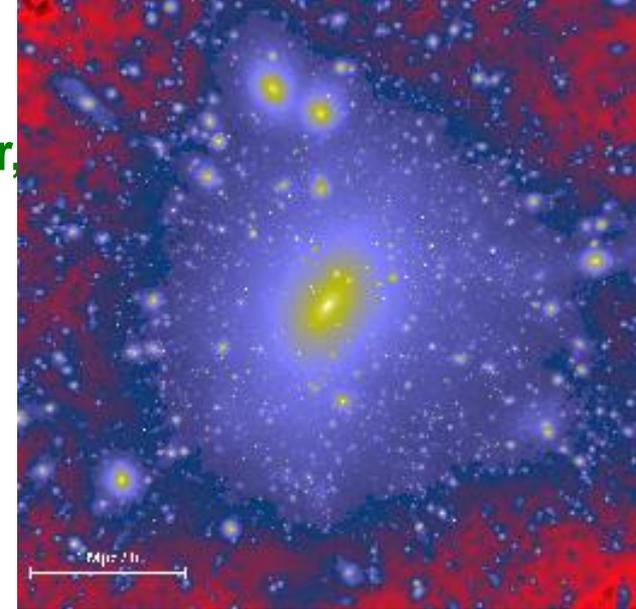
Naines Sphéroidales

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

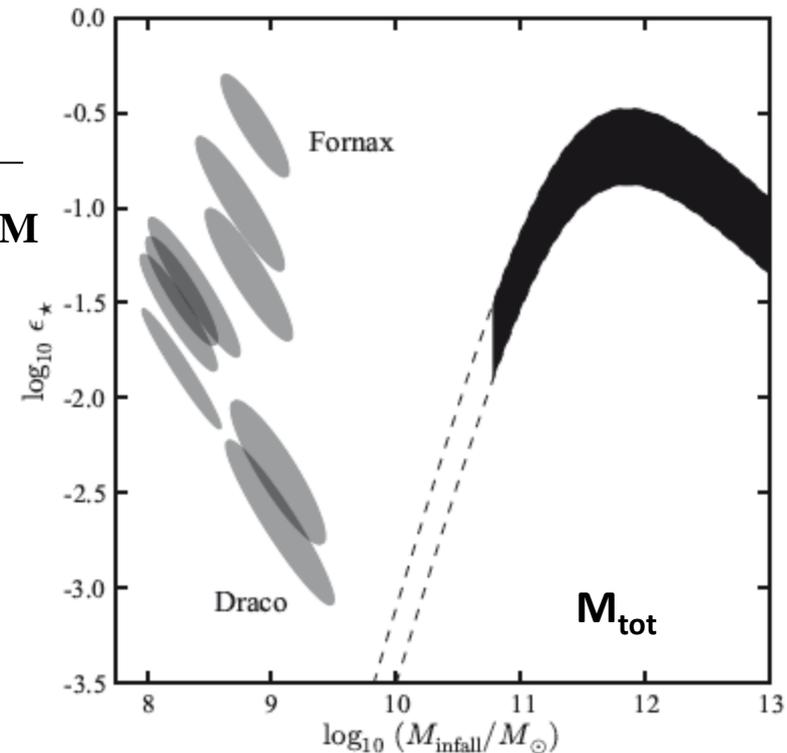


Faible brillance de surface
dominées par la matière noire
Ces dSph ne sont pas formées
dans les simulations CDM

Problème des
satellites
manquants

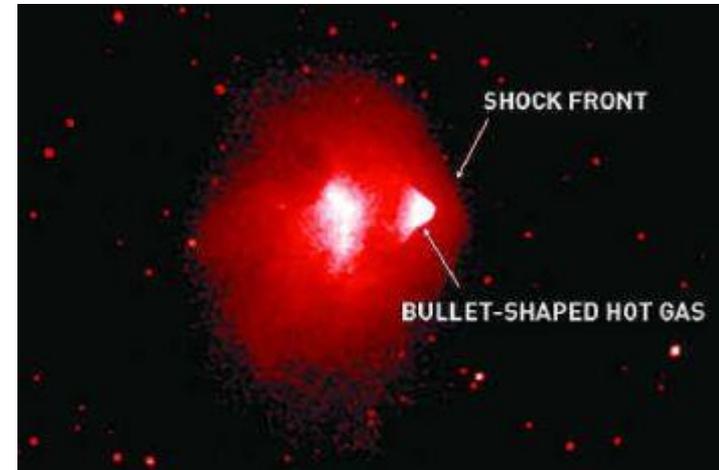
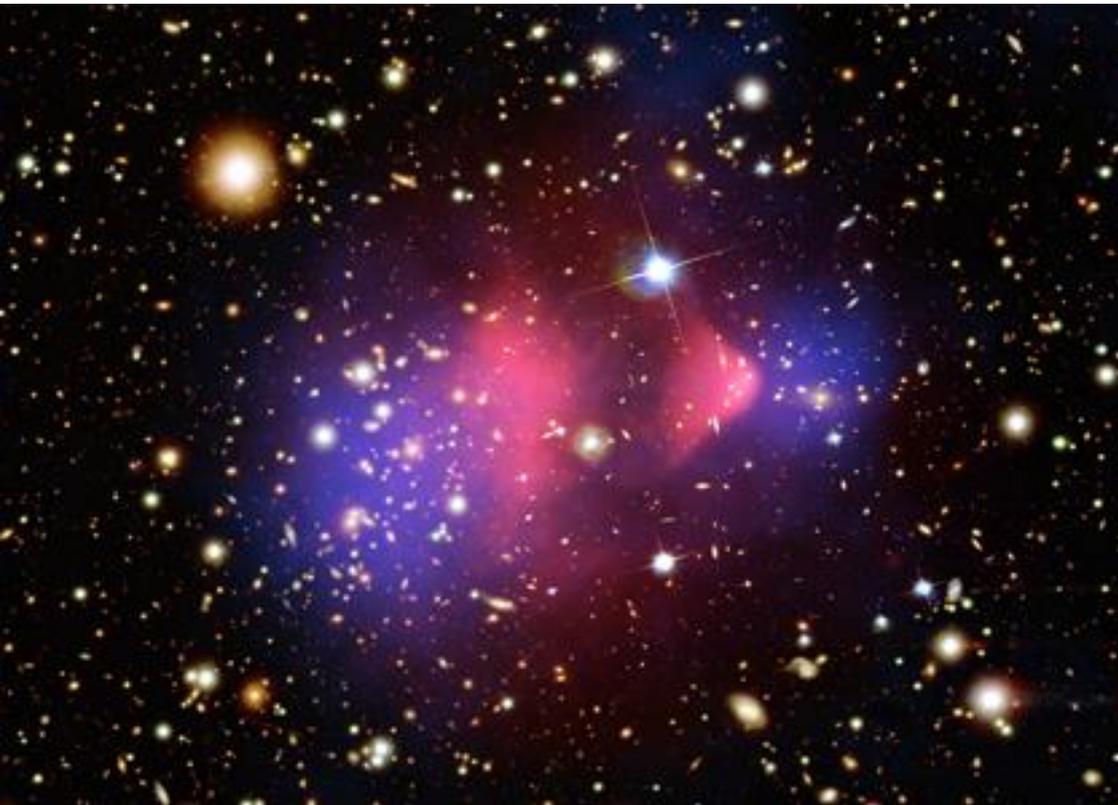


$$\frac{M_*}{f_b M_{DM}}$$



L'amas du boulet

Gaz X très chaud



Cas rare de collision violente, permettant de séparer les composantes

→ Limite sur $\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 1 \text{ cm}^2/\text{g}$

$V=4700\text{km/s}$ (Mach 3)

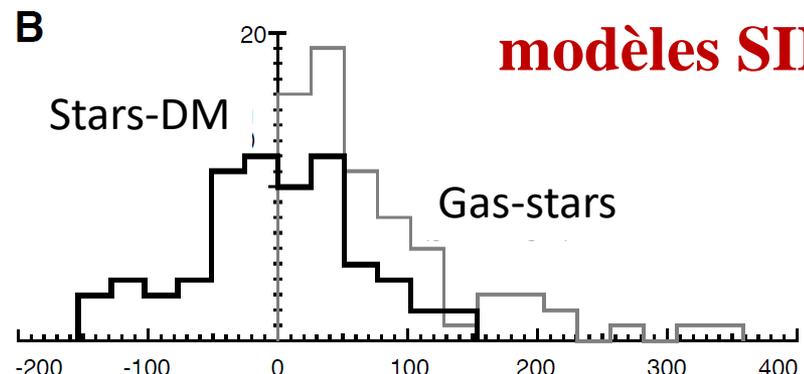
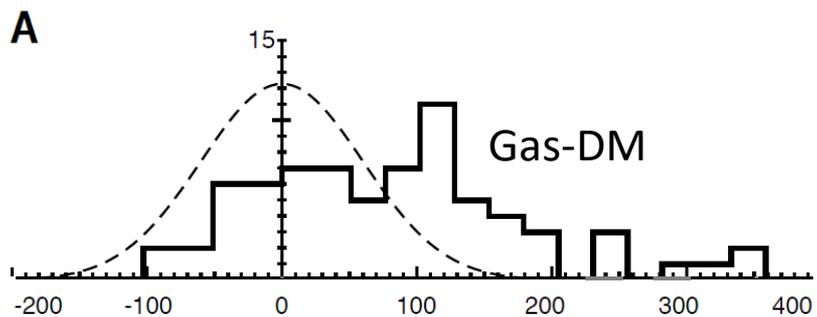
Pour les modèles de gravité modifiée: → neutrinos ou baryons noirs

Un grand nombre de collisions

Aujourd'hui, échantillon de 72

Avec des amas de faible masse et des groupes, *Harvey et al 2015*

$\sigma/m < 0.47 \text{ cm}^2/\text{g}$ [requis $\sigma/m = 0.5-3 \text{ cm}^2/\text{g}$ (*Valli & Yu 17*)]



→ Limites sur les modèles SIDM

Separation (kpc)

Alternatives à CDM standard

WDM: MN tiède, réduit les plus petites structures

SIDM: “Self-Interacting Dark Matter” (*Spergel & Steinhardt 2000*)

Interaction de diffusion, non-dissipative (Wimpzyllas, Q-ball soliton)
(pb forme des halos sphériques)

Ou bien **SIMP** “Strongly Interacting Massive Particle” (*Dover et al 1979*)

des interactions QCD mais pas EM

Pas détectable dans les recherches de WIMP

Trous noirs primordiaux?

Axions: produit en chromodynamique quantique. Explique
la violation CP

Fuzzy CDM 10^{-33} GeV $\ll M_{\text{axion}}$, Bosons condensés (*Hu et al 2000*)

Particules du modèle standard

	fermions (3 générations de la matière)			bosons (forces)	
	I	II	III		
masse →	2,4 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	171,2 GeV/c ²	0	électromagnétisme
charge →	2/3	2/3	2/3	0	
spin →	1/2	1/2	1/2	1	
nom →	u up	c charm	t top	γ photon	
Quarks	4,8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0	interaction forte
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
nom →	d down	s strange	b bottom	g gluon	
Leptons	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²	interaction faible
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
nom →	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	Z⁰ boson Z ⁰	
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	80,4 GeV/c ²	interaction faible
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
nom →	e électron	μ muon	τ tau	W[±] boson W	

Venant du Big-Bang

~400 photons /cm³

~300 neutrinos /cm³

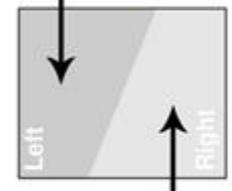
0,1 milliards de milliards/s nous traversent

→ Recherche de WIMPS depuis 1985

Extension vers Les neutrinos Stériles ?



Chiralité gauche



Chiralité droite



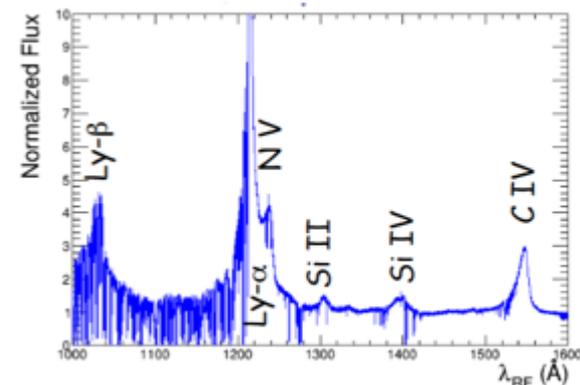
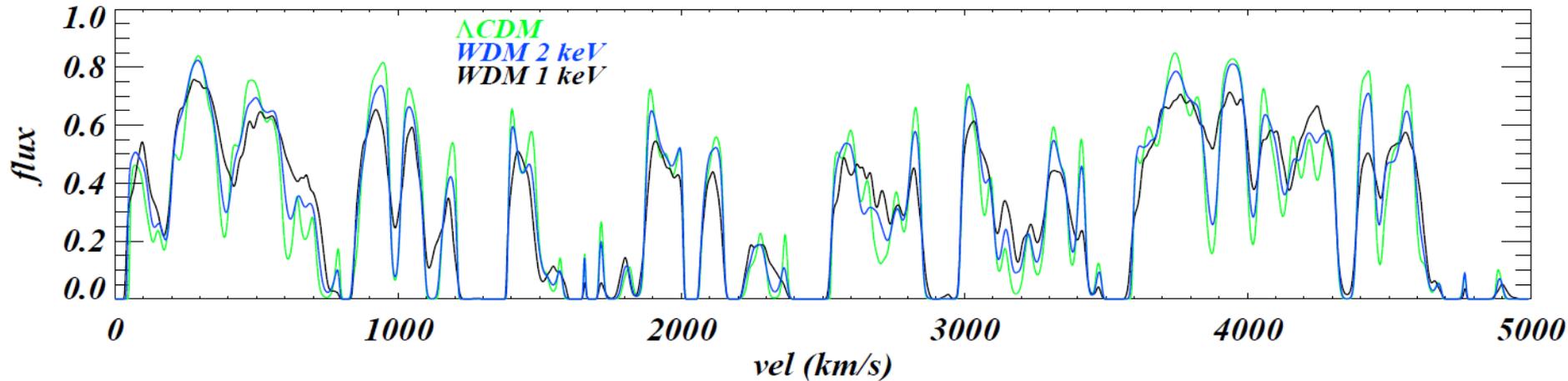
<0.0001 eV	~keV	~0.01 eV	~GeV	~0.04 eV	~GeV
0	N₁	0	N₂	0	N₃
left	sterile neutrino	left	sterile neutrino	left	sterile neutrino
electron neutrino		muon neutrino		tau neutrino	

Ly- α : contraintes sur $m(\tilde{\nu}_e)$



25 quasars $z > 4$: spectres obtenus au Keck (*Viel et al 2013*)

Forêt Ly- α et comparaison avec les simulations $m_{\text{WDM}} > 3.3 \text{ keV}$ (2σ)



WDM, $m_{\tilde{\nu}_e} > 4.65 \text{ keV}$ reliques thermiques
 $m_s > 29 \text{ keV}$ production non-résonante
Yeche et al (2017)

Trous noirs primordiaux et matière noire?

$$R_S = 2GM/c^2 = 3(M/M_\odot) \text{ km} \quad \rightarrow \quad \rho_S = 10^{18}(M/M_\odot)^{-2} \text{ g/cm}^3$$

Au début de l'Univers: densité cosmologique $\rho \sim 10^6(t/s)^{-2} \text{ g/cm}^3$

→ Masse de l'horizon à leur formation $M_{\text{hor}}(t) \sim ct$

$M_{\text{PBH}} \sim c^3t/G = 10^{-5} \text{ g}$ à 10^{-43} s (minimum)

10^{15} g à 10^{-23} s (évaporation aujourd'hui)

$1 M_\odot = 2 \times 10^{33} \text{ g}$ à 10^{-5} s (maximum)

La formation de ces trous noirs requiert de fortes inhomogénéités
Inflation, et localement une région en effondrement
+transition de phase, bulle en collisions,
défauts cosmiques

e.g. Carr et al 2010, 2016



Exclusion de la dernière fenêtre pour les "PBH"

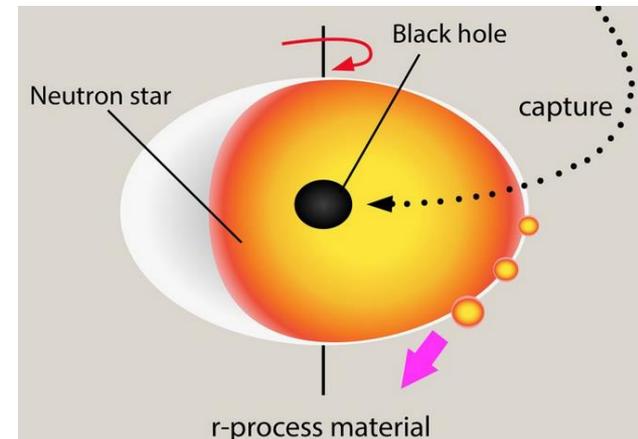
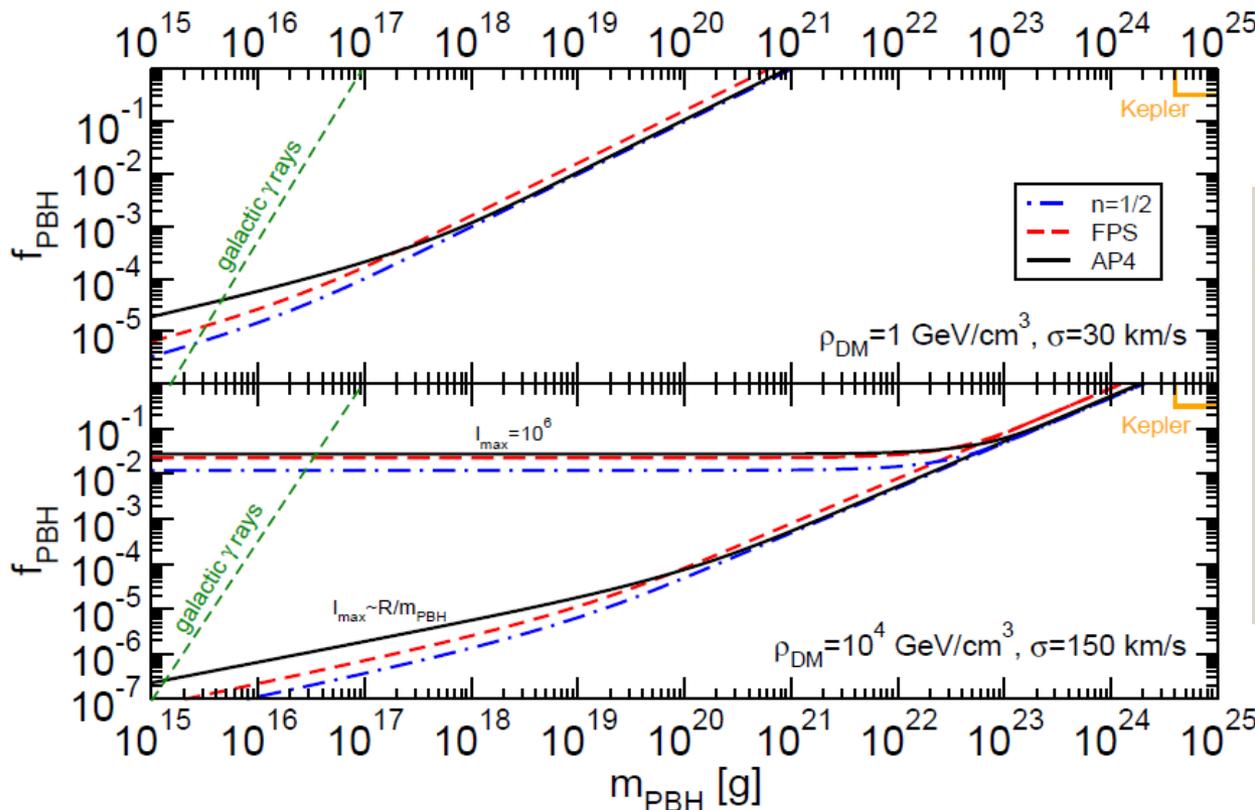
Rencontre entre une étoile à neutron et le trou noir

→ Bien plus d'énergie que pour une étoile

$$\Delta E = \frac{m_{\text{PBH}}^2}{R} \frac{2\gamma}{(1-n)} l_{\text{max}}^{1-n}$$

$n \sim 0.5$

$\gamma \sim 1$ dépend de EOS



Cotner & Kusenko 2017

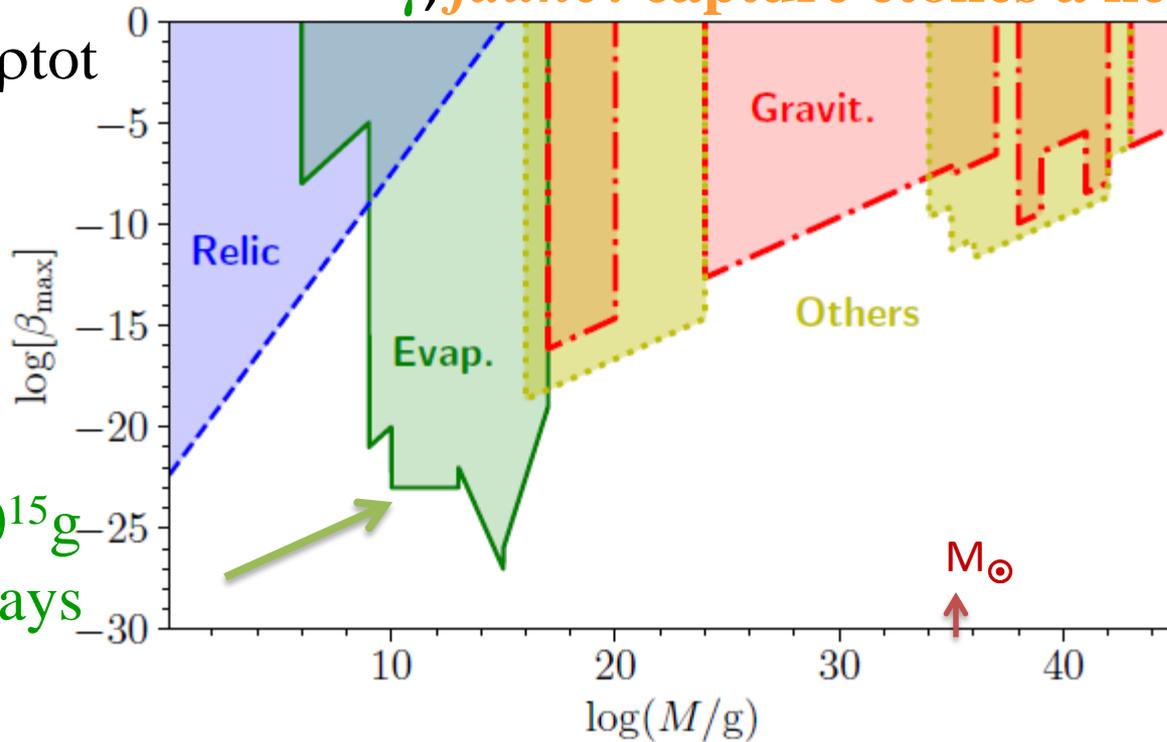
Pani & Loeb 2014

Trous noirs primordiaux

γ , jaune: capture étoiles à neutrons, GW

$$\beta = \rho_{\text{PBH}}/\rho_{\text{tot}}$$

Pour $M \sim 10^{15} \text{g}$
Trop de γ -rays
produits



NS détruite par
le PBH
Capela et al 13

Comme les PBH forment en ère radiative, ils peuvent être considérés comme non-baryonique, (comme CDM)

Mais leur masse est limitée par MACHOS, EROS

Evaporation des petites masses (pb avec Planck)

Candidats pour la matière noire

Nouvelle physique, en dehors du modèle standard SM

Kaluza-Klein DM in UED

Kaluza-Klein DM in RS (Randall-Sundrum)

Axion

Axino

Gravitino

Photino

SM Neutrino

Sterile Neutrino

Sneutrino

Light DM

Little Higgs DM

Wimpzillas

Cryptobaryonic DM

Q-balls

Champs (charged DM)

D-matter

Cryptons

Self-interacting

Superweakly interacting

Braneworld DM

Heavy neutrino

Neutralino (WIMP)

Messenger States in GMSB

Branons

Chaplygin Gas

Split SUSY

Primordial Black Holes

Mirror Matter

...

Le miracle du WIMP

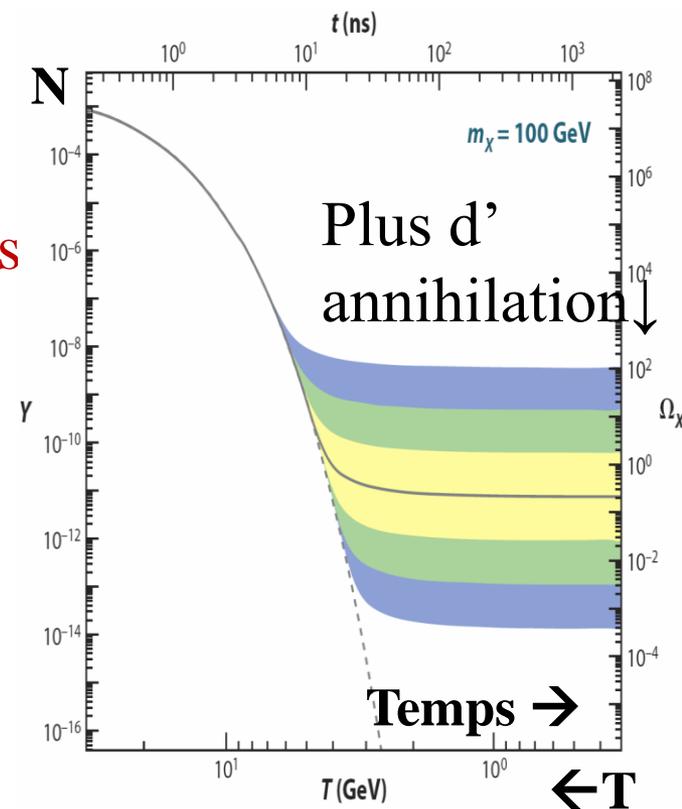
On obtient l'abondance requise de matière noire avec des particules de masse ~ 100 GeV, interagissant avec la **force faible** section d'annihilation $\langle \sigma v \rangle \sim 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$

Au début de l'Univers, l'abondance des particules est « gelée », elles se découplent lorsque leur interaction

$$n \langle \sigma v \rangle \sim 1/t_{\text{hubble}}$$

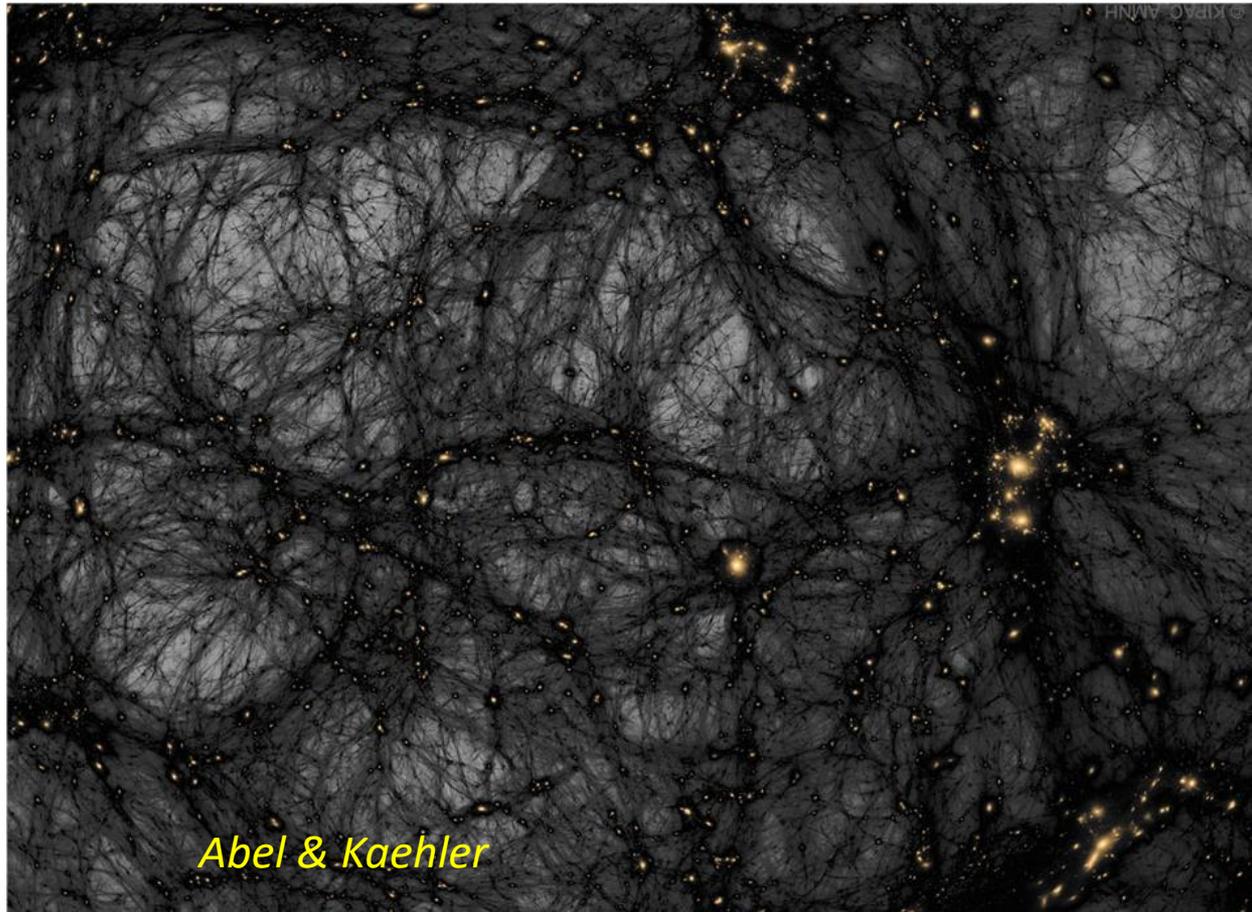
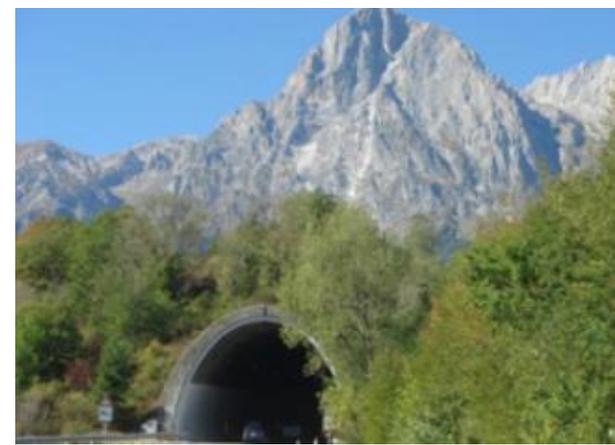
Coincidence: correspond à la particule la plus légère de la super-symétrie (neutralino)

Dans le LHC: pas de super-symétrie, Pas de nouvelle particule!



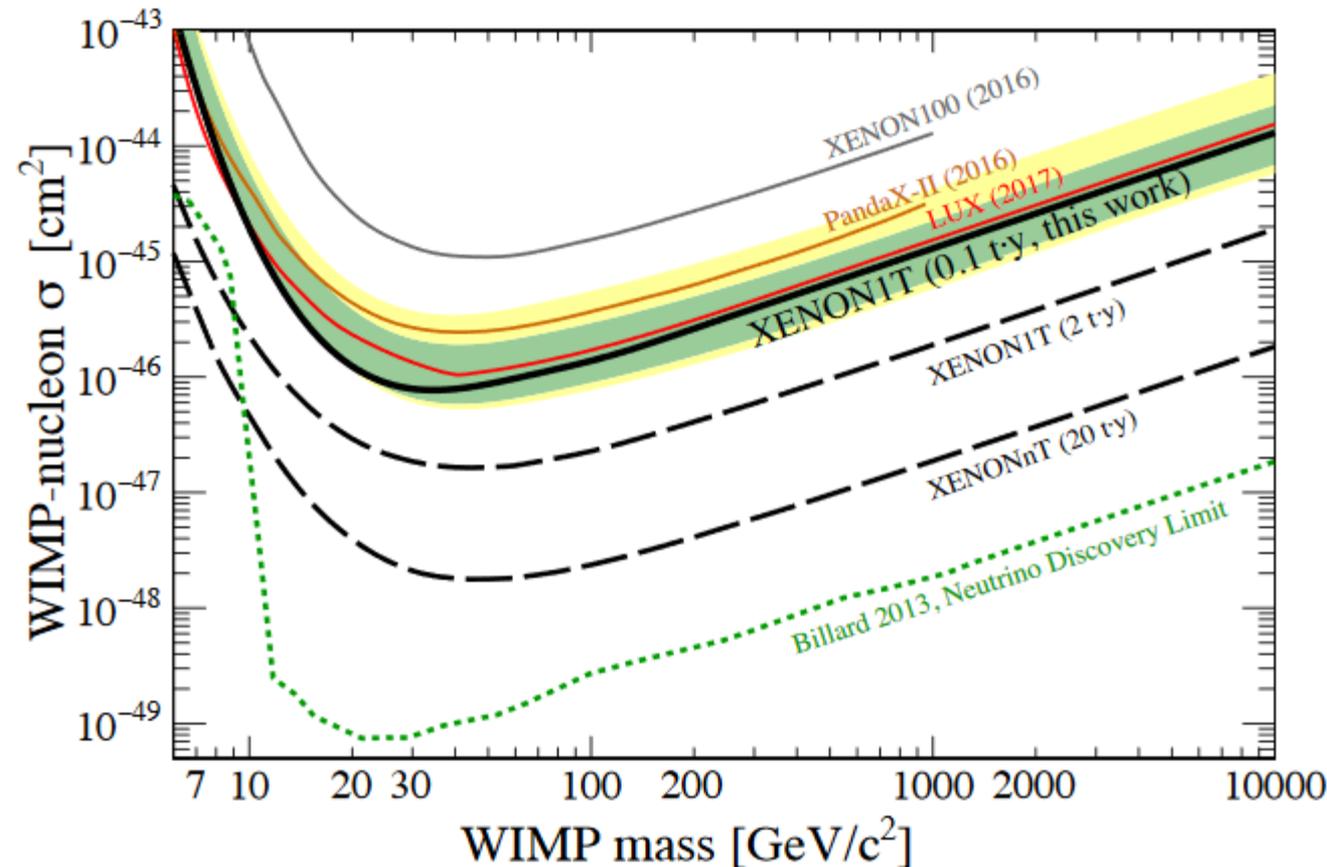
La recherche directe

Grand Sasso



Limites actuelles et Perspectives

Xenon 1t (Gran Sasso): les meilleures limites aujourd'hui (Juin 2017)
Très bientôt, on atteint le fond des neutrinos (*recul des noyaux par collision avec un neutrino atmosphérique, solaire, ou SN*)



XENONnT = Xenon1t +
plus grande cuve
et cryostat

→ 8 tonnes prévues

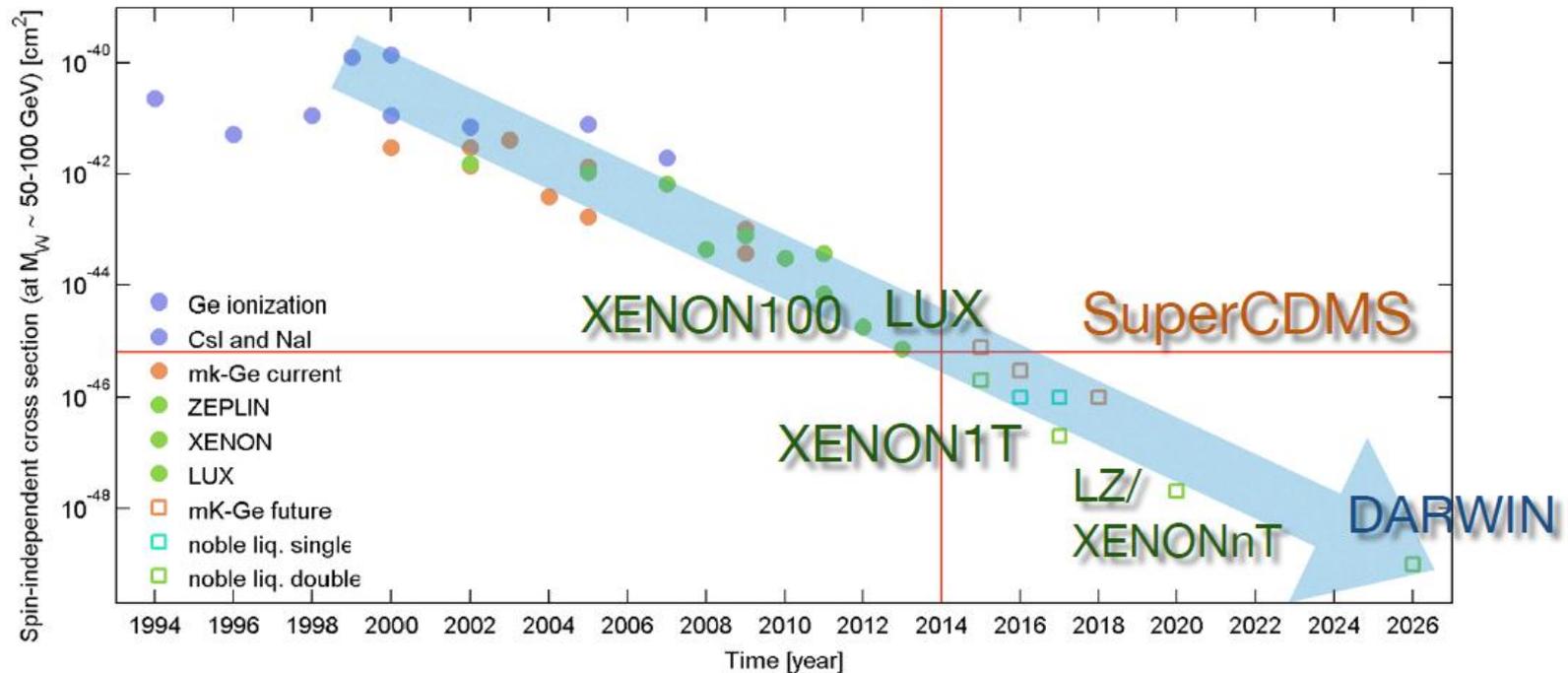
XENON coll,
Blois 2017

Perspectives des recherches

Toujours rien! (depuis 30 ans)

Environ un gain d'un facteur **10** tous les 2 ans

Détection peut-être en 2026...



Limites du nombre de particules/cc

Densité mesurée de matière noire: $10^7 M_{\odot}$ pour $R < 300 \text{pc}$
 $\rho_M \sim 1 M_{\odot} / \text{pc}^3 \sim 10^{-22} \text{g/cm}^3$

Pour des WIMPS de $100 \text{GeV} \rightarrow 1 \text{ WIMP/cm}^3$

Pour des neutrinos de $1 \text{ keV} \rightarrow 10^8 \text{ neutrinos/cm}^3$

Pour des axions de $1 \mu\text{eV} \rightarrow 10^{17} \text{ axions/cm}^3$
 $10^{-22} \text{eV} \rightarrow 10^{33} \text{ axions/cm}^3$

Accumulation des bosons, pas des fermions

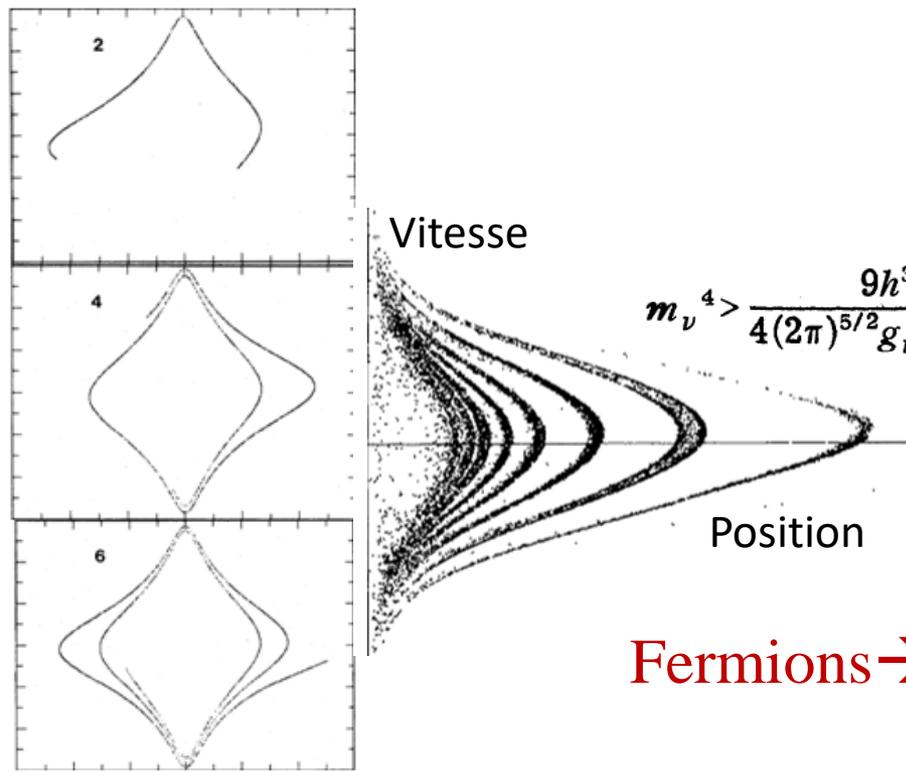
Limite de Tremaine-Gunn

Limite basée sur le **théorème de Liouville** ($df/dt = 0$)

La densité f dans l'espace des phases $(X, V) = \text{cste}$ (non-dissipation)

Densité macroscopique moyennée $<$ densité fine microscopique

Pour atteindre ρ observé, il faut une **masse minimum m** des particules



Au découplage, les particules sont relativistes, la densité est

$$Q = N / \text{Vol} / \sigma^3$$

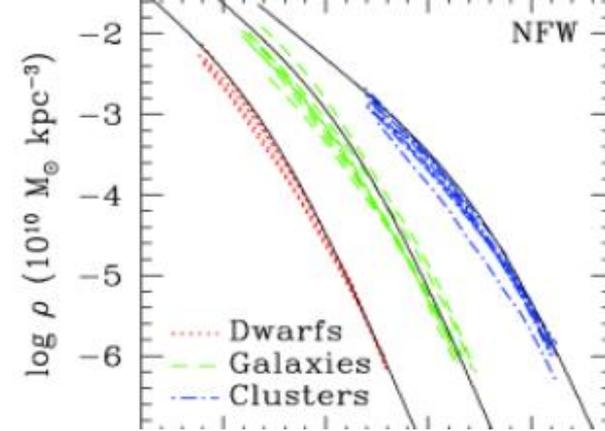
$$m_\nu^4 > \frac{9h^3}{4(2\pi)^{5/2} g_\nu G \sigma r_c^2}, \quad m_\nu > (101 \text{ eV}) \left(\frac{100 \text{ km s}^{-1}}{\sigma} \right)^{1/4} \left(\frac{1 \text{ kpc}}{r_c} \right)^{1/4} g_\nu^{-1/4}$$

→ **masse minimum $m > 2-3 \text{ keV}$**

Fermions → Principe de Pauli **$m > 0.1 \text{ keV}$**

Matière noire « Fuzzy » (floue)

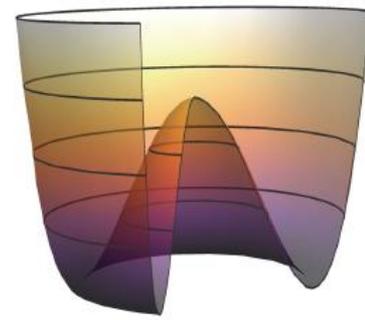
Les cuspides existent dans les amas de galaxies,
Dans les galaxies naines, cœurs de ~ 1 kpc



Des bosons engendrés de façon non-thermique \rightarrow axions
ALP (*Marsh 2016*) particules froides, qui se condensent
BEC “Bose-Einstein condensate”, état macroscopique à basse T

- l’univers décrit par un champ unique, interagissant avec la métrique
- Masse finie, très petite, λ de Broglie, $\lambda_{\text{comp}} = h/m_a v$
 $\rightarrow \lambda_{\text{comp}} = 1-2$ kpc
- En fait $\lambda_{\text{comp}} \sim 1-2$ kpc pour $m_a = 10^{-22}$ eV, et $v \sim 10$ km/s

FDM: soliton et halo flou



Un champ de masse nulle, et de spin 0 a

une grande symétrie $\Phi \rightarrow \Phi + C$ ($C=2\pi$, périodique)

Symétrie brisée dès que une masse non nulle $1/2m\Phi^2$

Solution pour la violation de la symétrie CP (Peccei-Quinn 1977)

→ Particule axion (Ω_a relié à l'échelle GUT = 10^{18} GeV $\Omega_a \sim 0.1$)

$$\Omega_{\text{axion}} \sim 0.1 \left(\frac{F}{10^{17} \text{ GeV}} \right)^2 \left(\frac{m}{10^{-22} \text{ eV}} \right)^{1/2}$$

→ Moins de petite-échelle, Nbre de satellites très réduits

→ Cœur au lieu de cuspside (soliton)

→ Halo formé de grains $\rho\lambda^3$, induit de la relaxation permanente

Disques épais, équivaut à un feedback permanent

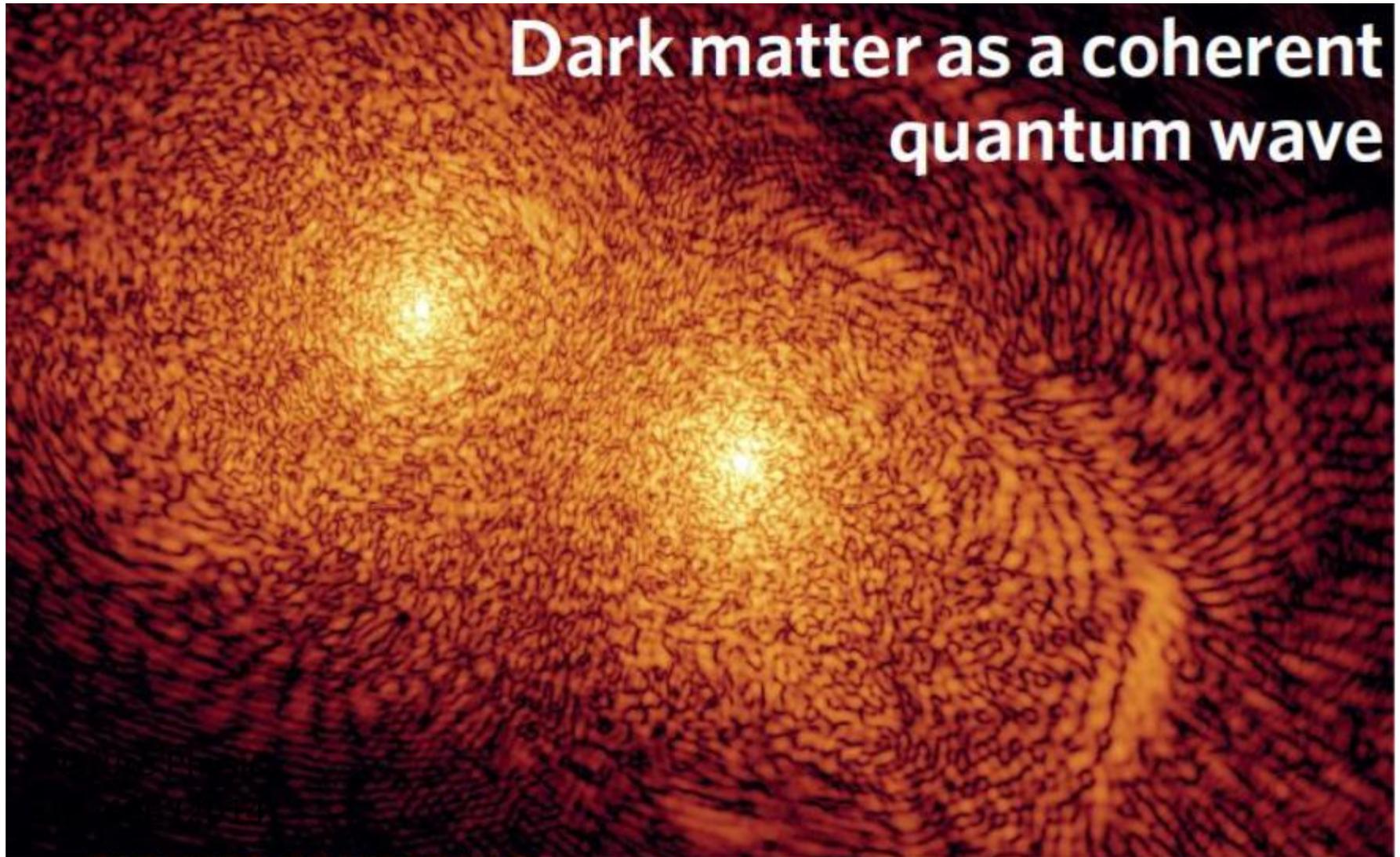
→ GC de Fornax ne tombent plus au centre par friction dynamique

→ Les solitons produisent des puits de potentiel très creux à grand redshift, pourraient résoudre le problème des quasars à $z=6$

Galaxies se forment plus tard (*Hui, Ostriker, Tremaine, Witten 2017*)

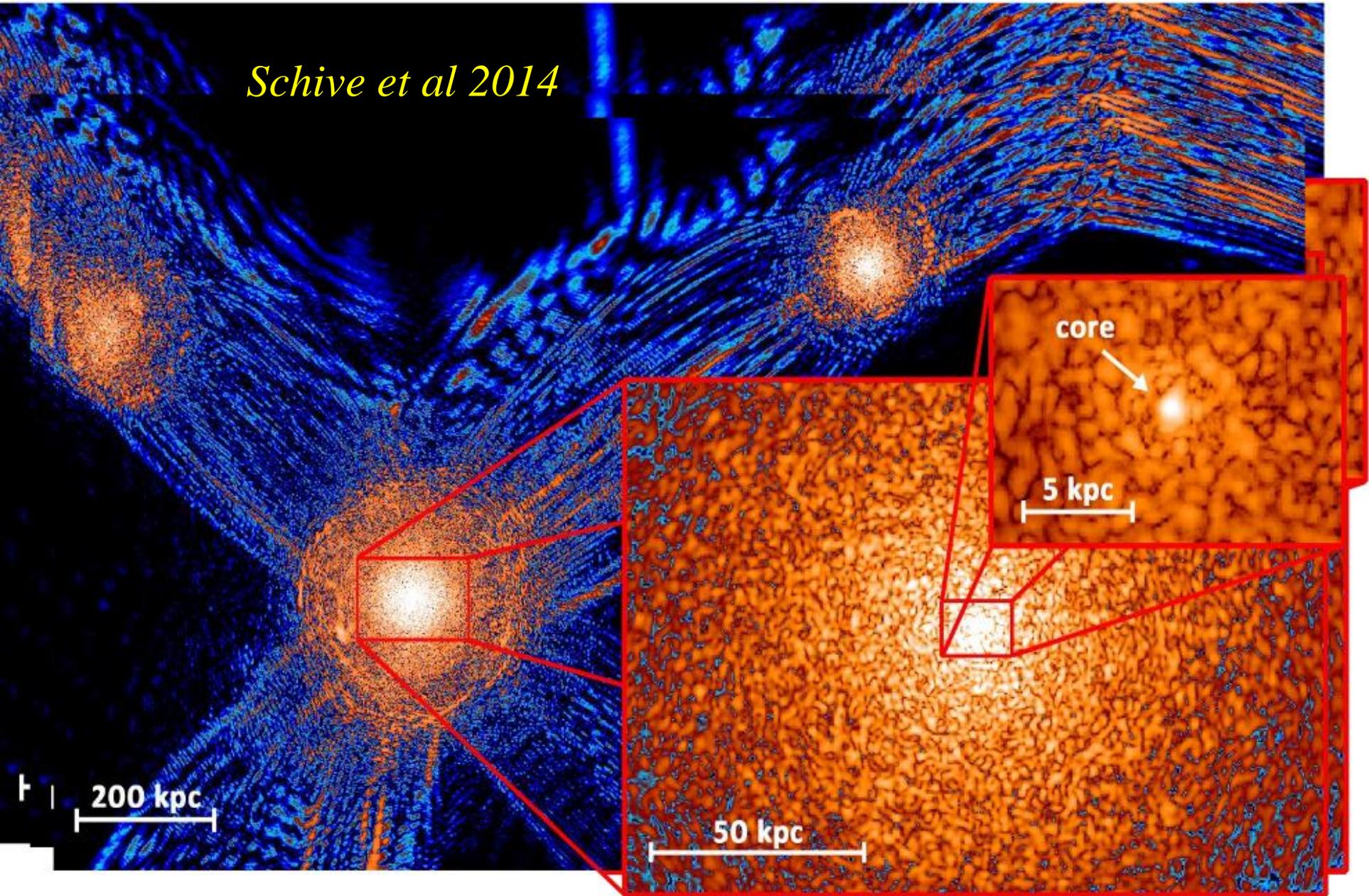
Simulations AMR: eq. Schrödinger- Poisson

Cœur= soliton, Halo= aspect granuleux + ondulatoire (Schive +2014)

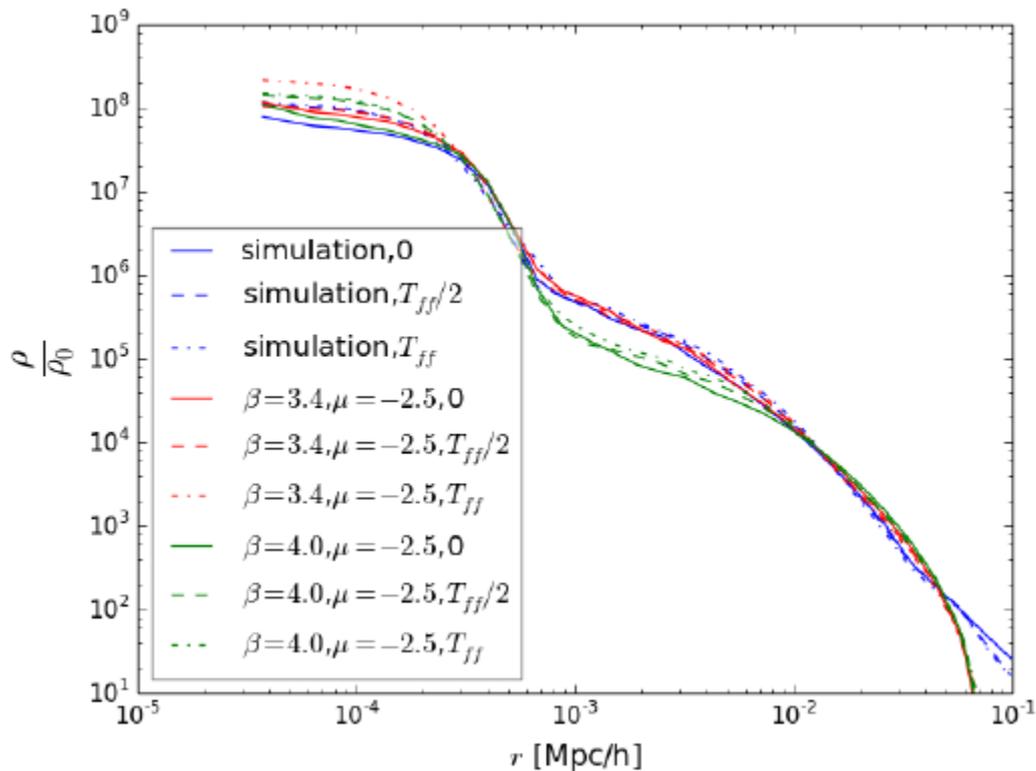


Interférences quantiques: 9 ordres de grandeur

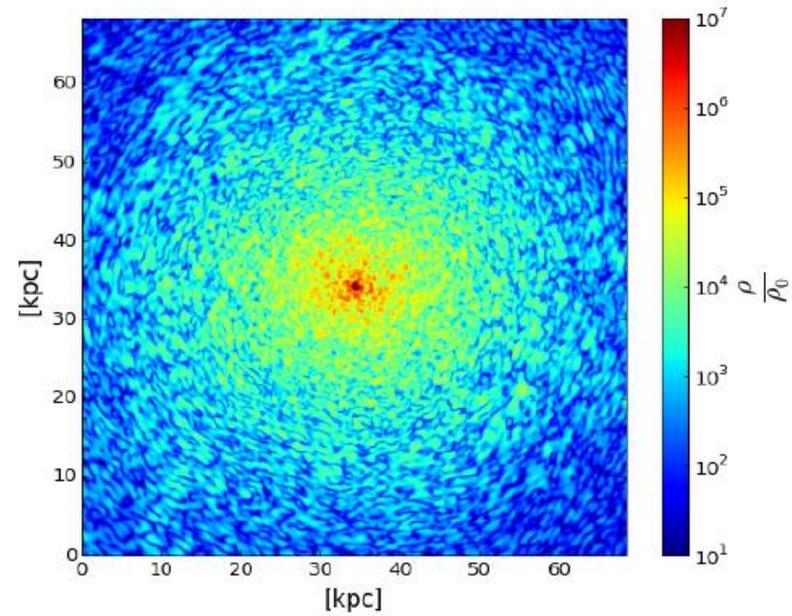
Schive et al 2014



Profil radial de densité



Lin, Schive et al 2018



Les ondes produisent des interférences et des granules dépendant du temps
→ Résolution 50pc!

Pas de cuspide, mais un saut juste après le soliton!
Profil relativement stable

Etre ou ne pas Etre



La loi de Newton est applicable partout

→ Il existe de la matière noire, de l'énergie noire

Mais 95% de ce contenu noir n'apparaît que par ses manifestations gravitationnelles

→ Possibilité de modification de la loi!



MOND = Modification de la gravité



A faible accélération

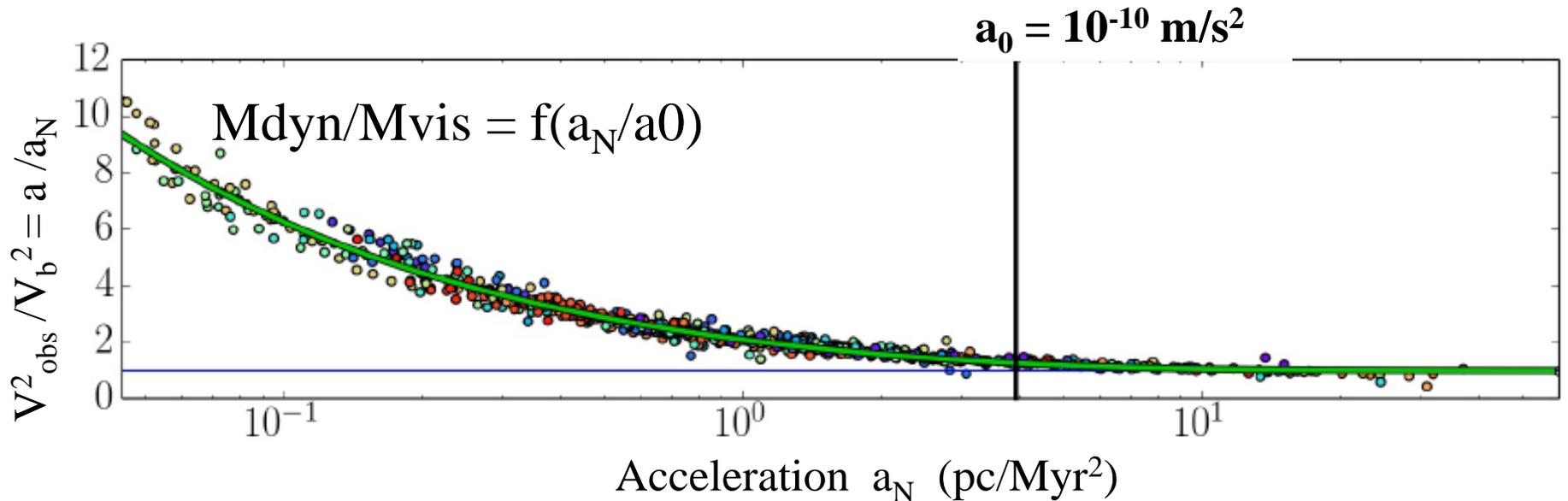
$a \ll a_0$ régime MOND $a = (a_0 a_N)^{1/2}$
 $a \gg a_0$ Newtonien $a = a_N$

$a_0 = 10^{-10} \text{ m/s}^2 \sim 10^{-11}g$
Milgrom (1983)

Asymptotiquement

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

Théorie Covariante: TeVeS
 \rightarrow Lentille gravitationnelle

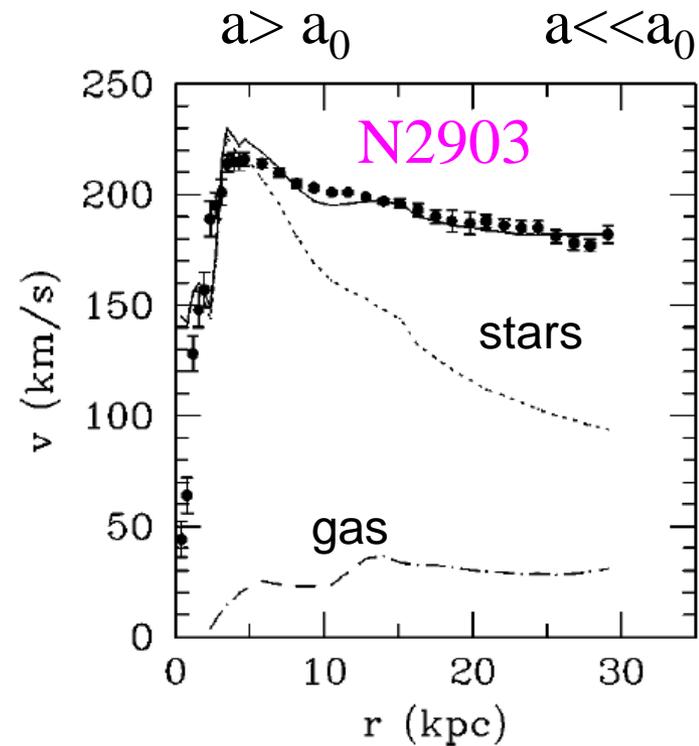
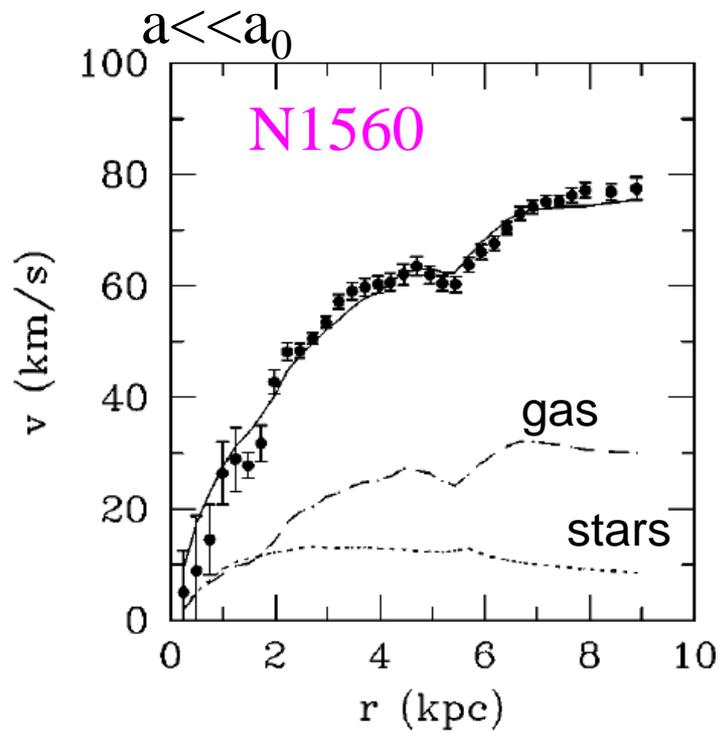
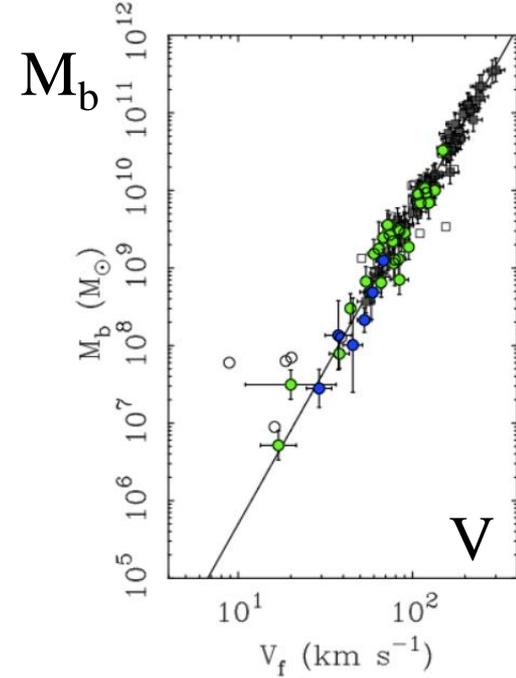


Relation de Tully-Fisher

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

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

Les courbes de rotation pour tous types



Matière noire Dipolaire (DDM)



Analogie diélectrique de MOND

$$\nabla \cdot (1 + \chi \mathbf{E}) = \rho_e / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{E}) = (\rho_e + \rho_e^{\text{pol}}) / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \left[\mu \left(\frac{|\nabla \Phi|}{a_0} \right) \nabla \Phi \right] = 4\pi G \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{g} = 4\pi G (\rho + \rho^{\text{pol}})$$

→ Matière noire dipolaire,

Peut être polarisée par de la matière baryonique

Modèle en relativité générale

Introduction d'un champ vectoriel

Reproduit CDM à grande échelle

Et MOND à l'échelle galactique

**Force interne non-gravitationnelle
pour assurer la stabilité**

Blanchet 2007

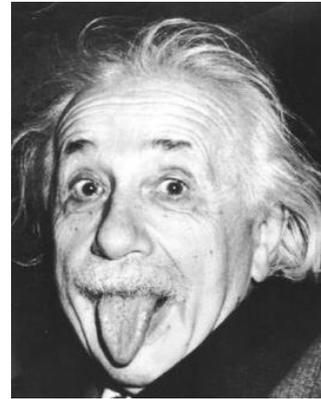
Blanchet & Le Tiec, 2008-09

Théories Einstein - éther

Les théories “Einstein æther”, ou æ-theories, sont des théories covariantes, avec modification de la relativité générale, Tenseur + vecteur (ou scalaire) du genre temps, appelé éther

*Fait revivre l'éther gravitationnel du 19ème siècle!
Pour résoudre gravité quantique et énergie noire*

Il existe un référentiel privilégié, où l'éther est au repos. donc ces théories violent l'invariance de Lorentz.



Difficile de représenter des trous noirs statiques (pas d'horizon)

GW170817: Mesure de la vitesse c_{GW}

Le sursaut gamma a été observé 1,74 sec après la fusion
Certains modèles ± 10 s délai

Distance de la galaxie NGC4993, 40 Mpc (~ 130 millions années,
soit $4 \cdot 10^{15}$ secondes)

$$\left| \frac{c_{\text{GW}}^2}{c^2} - 1 \right| < 6 \times 10^{-15}$$

Contraint la masse du graviton, contrainte sur les théories de gravité
modifiée, Energie noire $P = w \rho$

soit tenseur-scalaire $|w+1| < 1.2 \cdot 10^{-14}$

soit $f(R)$ $|w+1| < 5 \cdot 10^{-8}$ (Nojiri & Odintsov 2017)

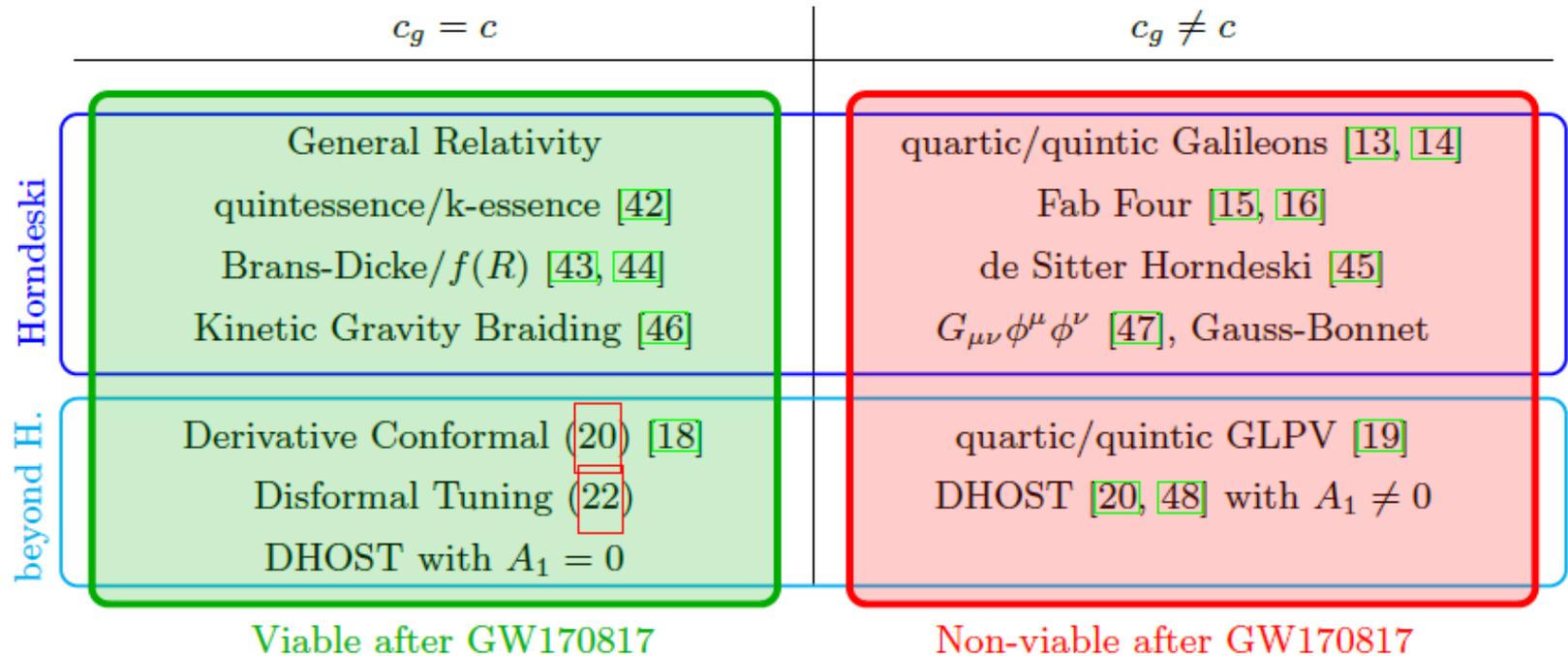
Plus contraignant que les mesures de Planck (1% sur $|w+1|$)

$$ds^2 = -(1 + 2\Psi(\mathbf{x}, t))dt^2 + a^2(t)(1 - 2\Phi(\mathbf{x}, t))d\tilde{\mathbf{x}}^2$$

$c_{\text{GW}} \neq c$ il existe un « slip » $\eta \equiv \Phi/\Psi \neq 1$ Amendola et al 17

Au-dela de Horndeski

Les modèles de gravité modifiée (énergie noire)
au-dela de Horndeski, Chaméleon, Galiléons, etc..



3 des 5 paramètres encore libres sont complètement contraints

Le modèle de galiléon quartique est éliminé

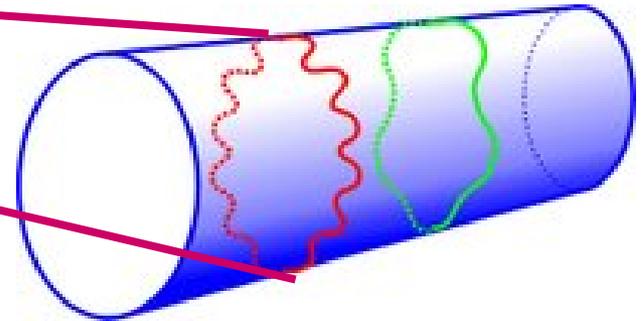
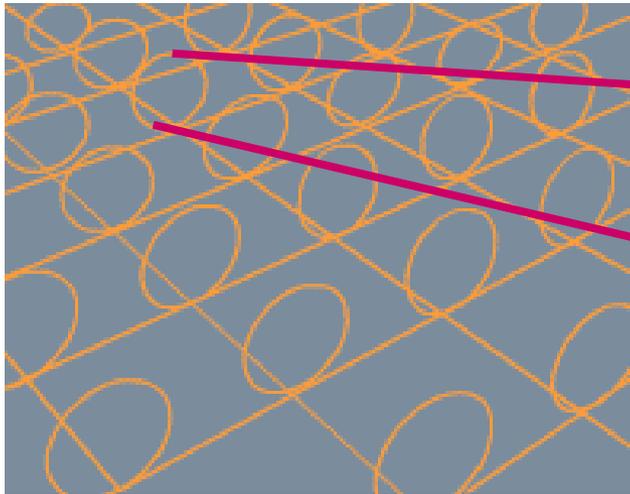
Le couplage est négligeable, $d\phi/dt \sim M_{pl} H_0$,
 $c^2/c_{GW}^2 = 1 - d\phi/dt^2/M_\gamma^4 \rightarrow M_\gamma > 10 \text{ Mev}$

Sakstein & Jain 2017

Ezquiaga et al 2017

Dimensions Supplémentaires Universelles

- Kaluza (1919) 1 dimension supplémentaire, gravité-E.M., + champ scalaire
- Klein (1926) interprétation quantique



Compactification de la dimension
supplémentaire en chaque point

Conditions périodiques
→ quantification de l'impulsion

- Tout champ se propage dans la 5^e dimension $p=n h/\lambda$

5ème dimension, et partenaires KK

- Toutes les particules SM voyagent dans les extra dimensions avec une taille $\sim \text{TeV}^{-1} \sim 10^{-18}\text{m}$
- Les particules qui voyagent dans ces dimensions apparaissent plus lourdes que leurs analogues SM (modes de Kaluza-Klein)



$$E = mc^2 + p^2c^4 = \mathbf{Mc^2}$$

→ La particule Kaluza-Klein la plus légère est stable, interagissant faiblement, donc un bon candidat pour la MN

Gravité émergente



Non pas une force fondamentale, mais une
maximisation d'entropie

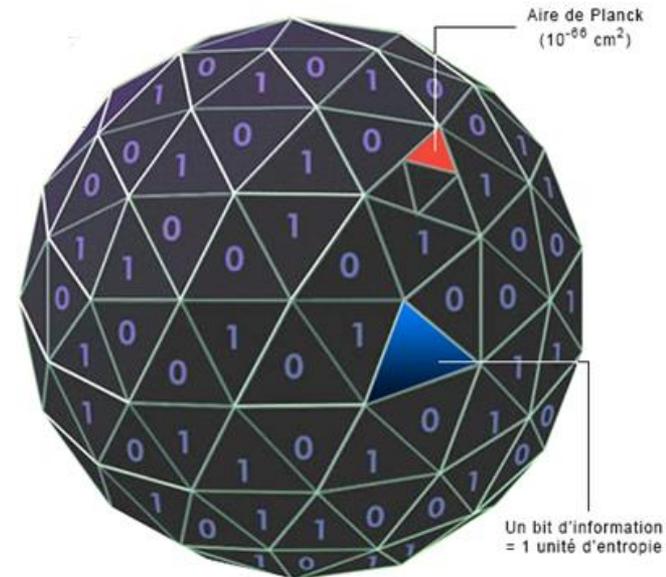
Entropie et thermodynamique de l'horizon (Bekenstein-Hawking)

Température \propto accélération (Unruh 1976)

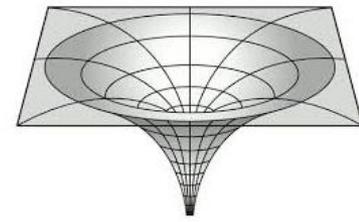
Théorie holographique (Gérard 't Hooft)

Verlinde E.: 2010, Sur l'origine de la gravité
et les lois de Newton

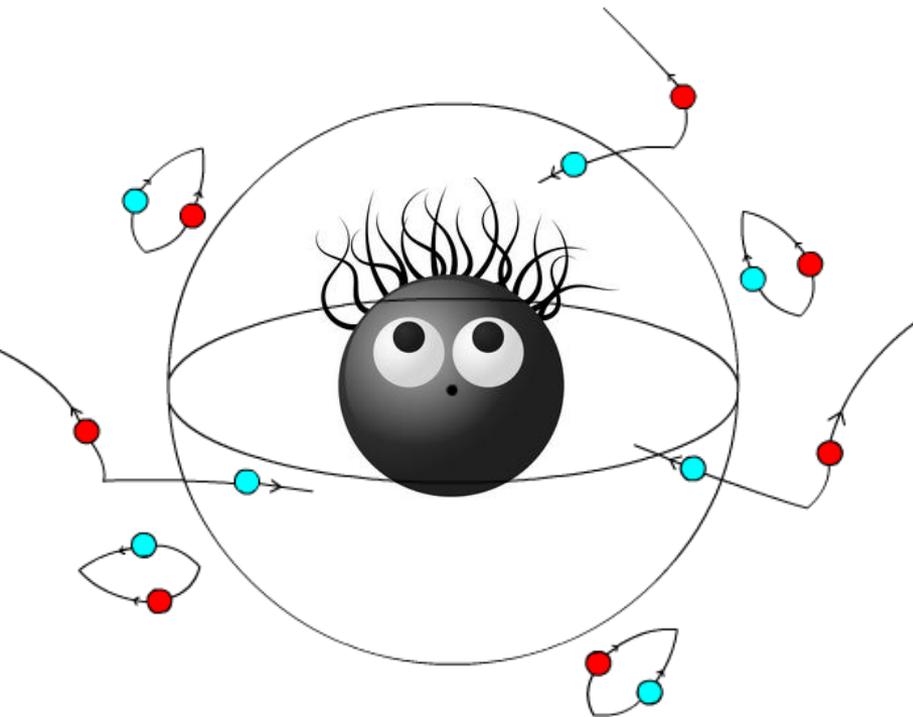
Verlinde E.: 2016, Gravité émergente et l'Univers sombre



Thermodynamique des trous noirs



- Les trous noirs, comme singularité de l'espace-temps
- Horizon à $R = 2GM/c^2$ (3 km pour $1 M_{\odot}$)
- Thermodynamique: Température $\sim 1/M$, Entropie \sim Aire $A \sim M^2$
- **$S/k = A/(4L_p^2)$** (Bekenstein, 1973, Hawking, 1974)

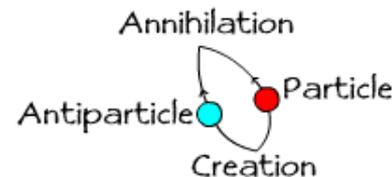


Les trous noirs s'évaporent

Durée de vie d'un trou noir de $M < 10^{-19} M_{\odot}$, inférieure à l'âge de l'Univers

$T = 10^{-7} \text{K}$ pour $1 M_{\odot}$

$S \sim 10^{76}$ bytes



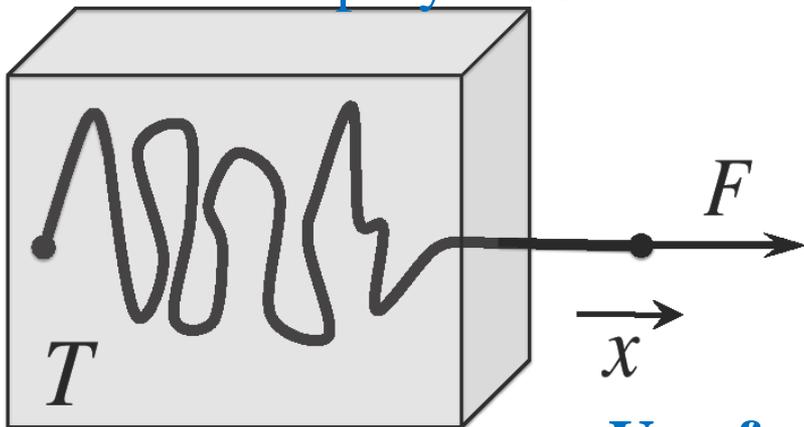
Gravité comme une force entropique

Au niveau microscopique: un grand nombre de degrés de liberté invisibles

La gravité viendrait automatiquement du fait que ces degrés de liberté microscopiques, dépendent de variables macroscopiques

→ gravité émergente

Molécule de polymère



$$F \Delta x = T \Delta S$$

Une force survient car le système a tendance à augmenter son entropie (Verlinde 2011)



L'intrication quantique

Trou noir

$$S_{BH} = \frac{kc^3}{4\hbar G} A.$$

Entropie intriquée du vide quantique

A l'horizon des trous noirs: entropie de Bekenstein-Hawking

Intrication pour deux systèmes A, B, lorsque leur fonction d'onde est mélangée

On peut définir l'entropie d'intrication: maximale lorsque les systèmes sont complètement mélangés

Les variations de l'entropie d'intrication, dues à la présence de matière peut expliquer l'émergence de la gravité (Verlinde 2016)

Ce principe retrouve la dynamique MOND

L'entropie est diffusée dans l'univers sous forme d'énergie noire

Matière noire, lorsque $\Sigma < a_0/8\pi G$, la masse sombre apparente est

$$\frac{2\pi}{\hbar a_0} M_D^2 = \frac{A(r)}{4G\hbar} \frac{M_B}{d-1} \quad \text{ou} \quad \Sigma_D^2(r) = \frac{a_0}{8\pi G} \frac{\Sigma_B(r)}{d-1}, \quad d=4$$

Soit encore $g_D^2 = g_N a_0/6$, qui est la relation de MOND (*Milgrom 1983*)

La réponse élastique est due à l'intrication de la matière avec l'entropie (énergie noire)

Cette accroissement de la gravité (matière noire) intervient quand l'entropie d'intrication de la matière tombe en-dessous de l'entropie de l'énergie noire

Le puzzle de la matière noire

Galaxies et gaz visible: 0.5% du total

Matière ordinaire (5%): dont 60% non identifiée

Matière noire exotique:

Particules inconnues, hors du modèle standard

Masses entre 10^{-22} eV (axions) et 10^{12} eV (WIMPs)

Recherchées **depuis 30ans**

→ Neutrinos, contraintes Ly- α : $m_x > 4.65$ keV et $m_s > 29$ keV

→ Trous noirs primordiaux: tous les espaces se referment?

→ Axions, matière noire floue

Problèmes des modèles matière noire pour la formation des galaxies

→ solution dans la physique des baryons

→ ou bien **gravité modifiée**, 5^{ème} force

