

Bullet cluster



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Abell 2218

Brève histoire de la matière noire

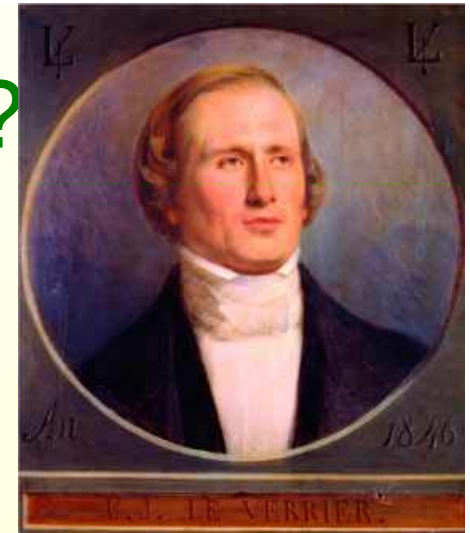
Françoise Combes

Observatoire de Paris

17 Mars 2016



Entité invisible ou solution législative?



Deux exemples de « matière invisible »

1846- U. Le Verrier: anomalies systématiques dans le mouvement d'Uranus,

Prédit l'existence d'une autre planète, et son orbite

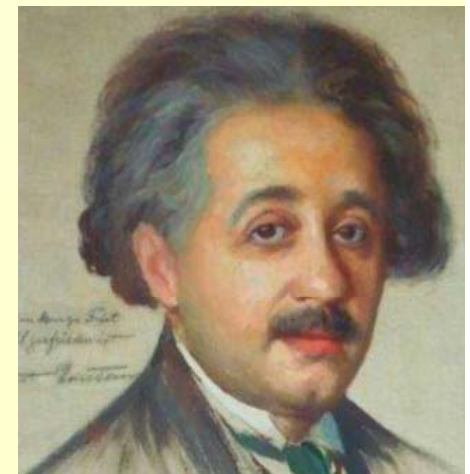
→ **Découverte de Neptune**, par Johanne Galle à Berlin

→ **1860** Avance du périhélie de Mercure de 43''/siècle inexpliquée

Propose Vulcain, planète à l'intérieur de l'orbite de Mercure

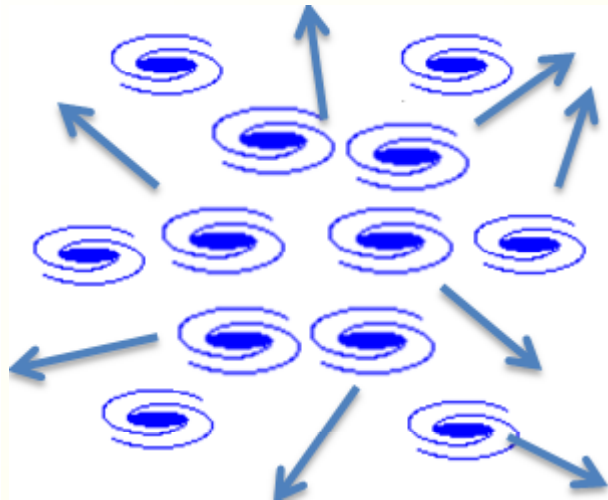
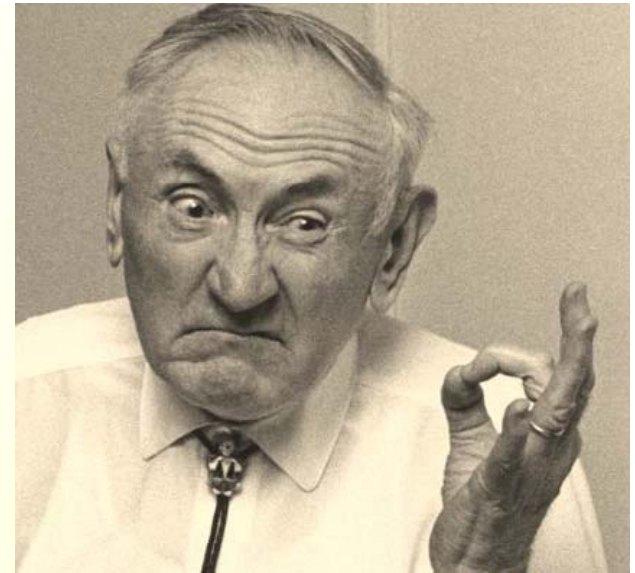
Pas observée lors de l'éclipse de 1860 → ceinture de petits corps les Vulcanoides

→ **1916** Relativité générale d'Einstein explique exactement les 43''



Histoire de la matière noire

1937 – Fritz Zwicky calcule la masse des amas de galaxies en utilisant leurs vitesses



$$M/L = 500 M_{\odot}/L_{\odot}$$

Il avance plusieurs hypothèses

- matière noire dans les galaxies
- matière entre les galaxies + obscuration
- test de la loi de Newton à grande échelle

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

1932: Jan Oort parle de matière noire au voisinage du Soleil dans la Voie Lactée

→ Solides, poussières, gaz, astres morts...





Matière noire dans les galaxies

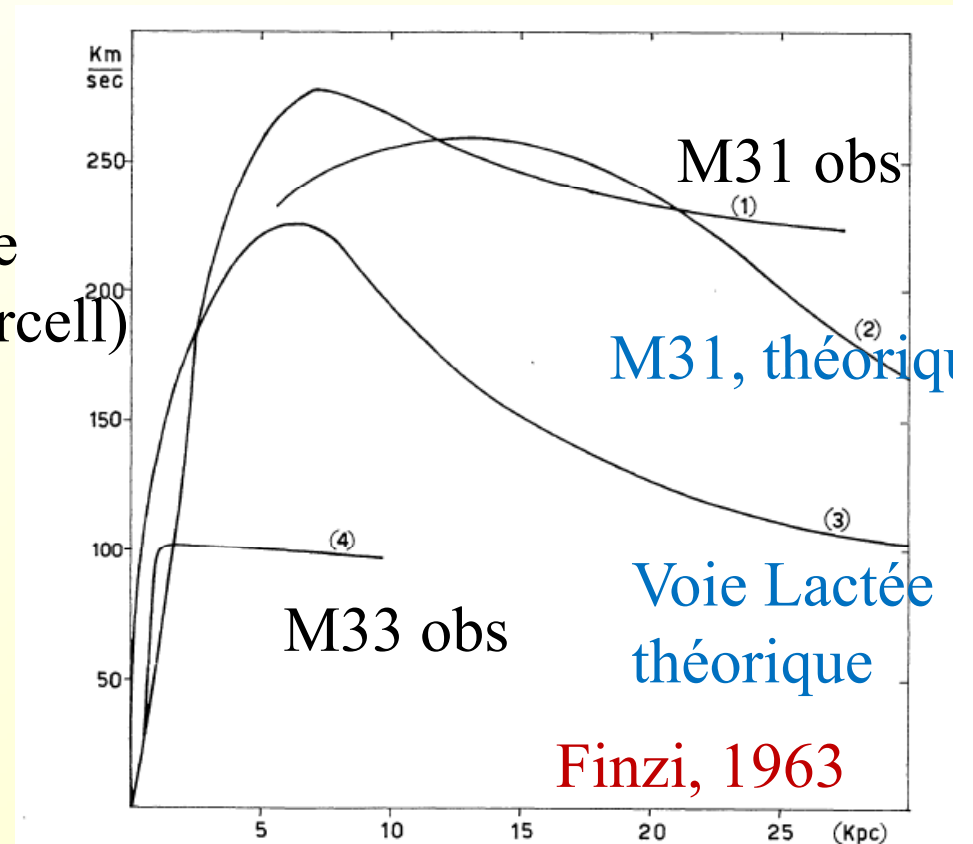
Courbes de rotation des étoiles
et du gaz ionisé ($H\alpha$ et $[NII] 0.6\mu m$)

Optique: Rubin, Ford et al 1978

Radio: La raie à 21cm de hydrogène
est découverte en 1951 (Ewen & Purcell)
Les premières courbes de rotation
sont publiées fin 1950s

→ **Courbes plates**

Interprétation à l'époque
Rapport M/L augmente avec le rayon

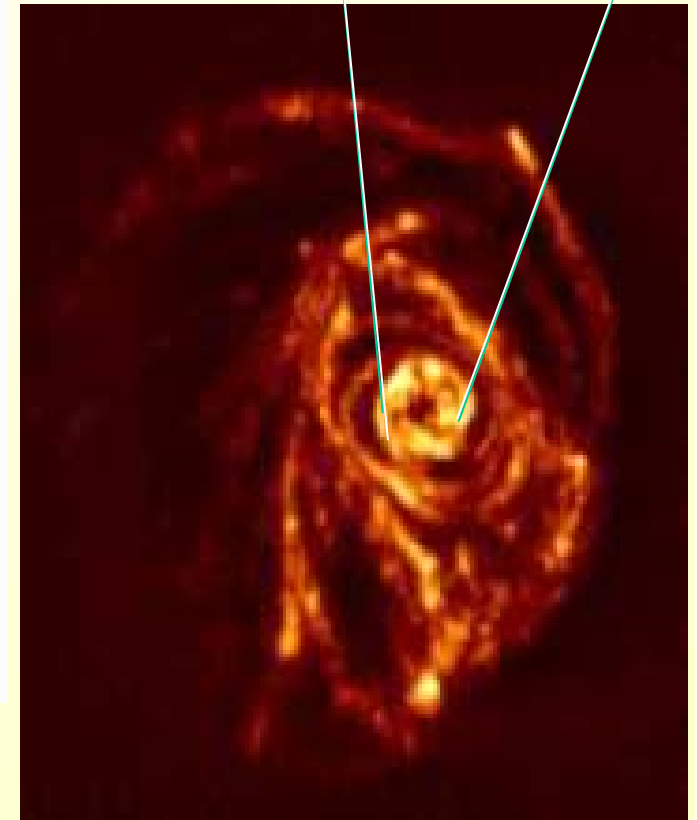
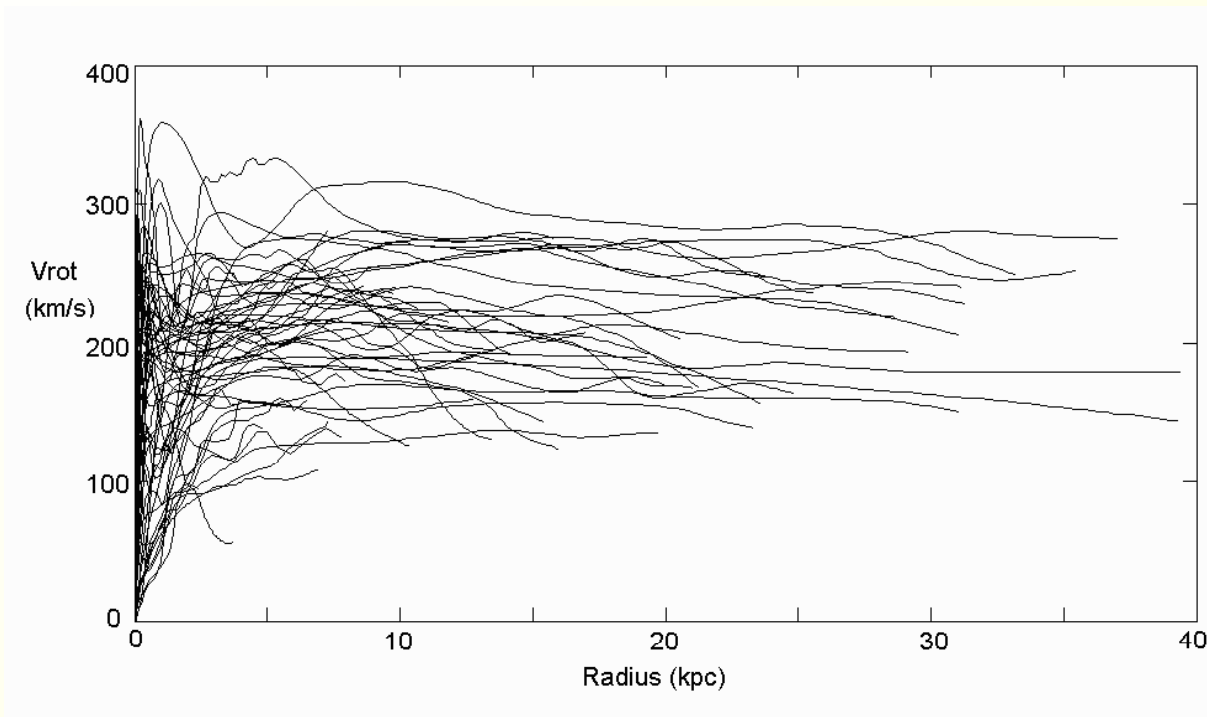


Arrigo Finzi (1963) propose une loi de gravitation en $1/r^\alpha$ avec $\alpha^4 < 2$

Galaxies avec HI

M83: optique

HI: cartographie de l'hydrogène atomique
Longueur d'onde 21cm

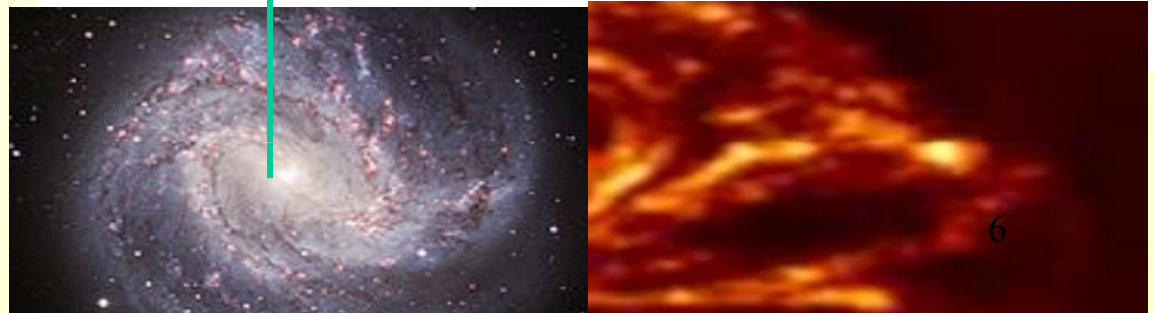
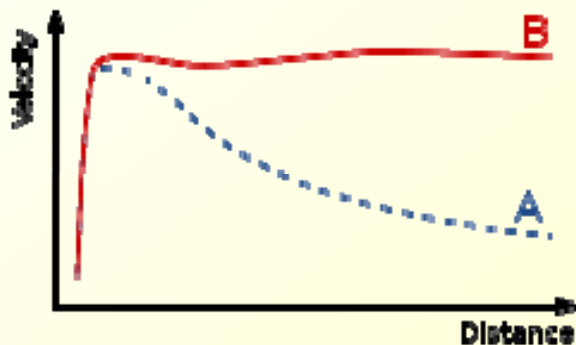
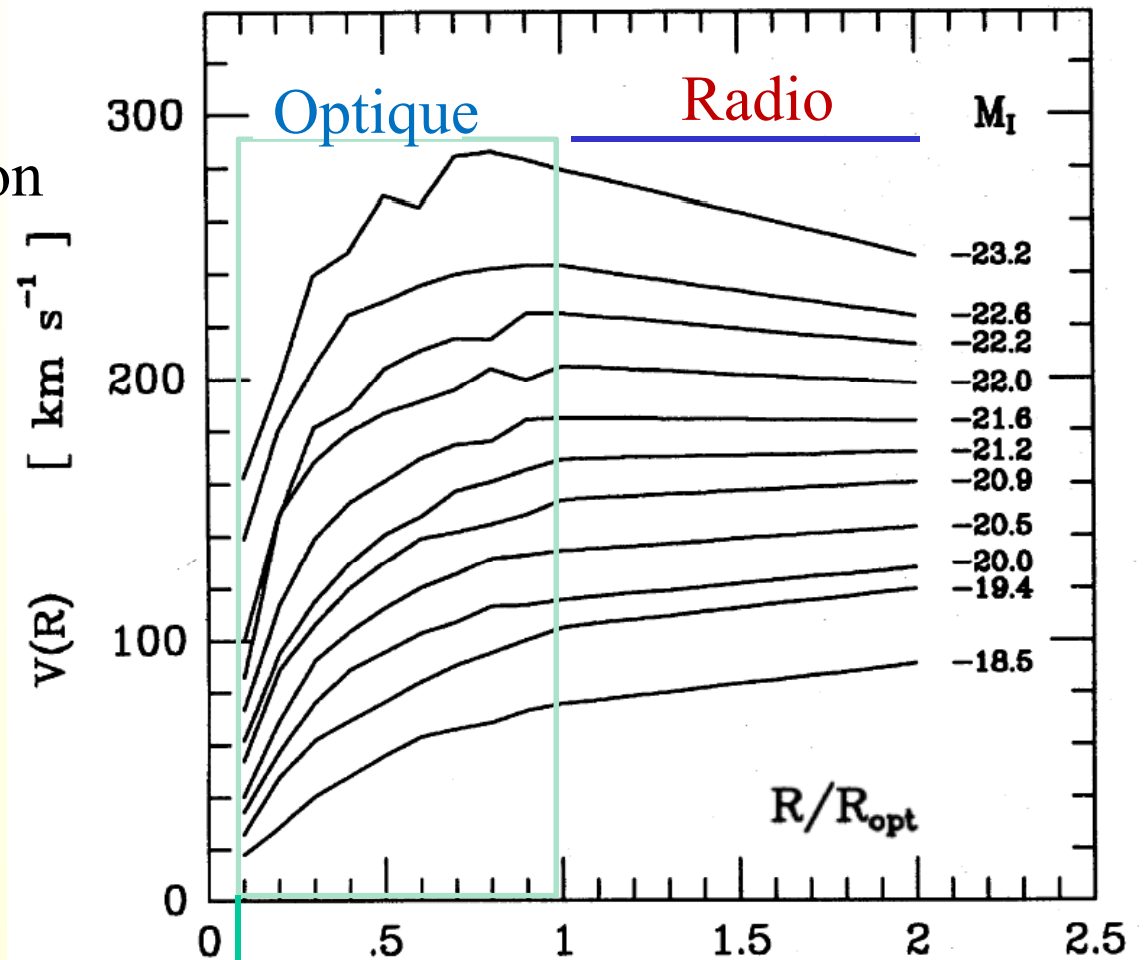


HI dans M83: une galaxie semblable à la Voie Lactée

Courbes de rotation plates

~1980: Interféromètres Radio
Dizaines de courbes de rotation
 $R(\text{gaz}) = 2-4 \text{ fois } R(\text{optique})$

→ Matière noire établie
avec certitude



La matière manquante se réduit

comme peau de chagrin

Les premiers satellites en rayons-X découvrent en **1966** (Boldt et al) une très forte émission diffuse dans l'amas de Coma
Felten et al (**1966**) interprètent cette émission comme du gaz très chaud à $T \sim 10^8$ K, soit 100 millions de degrés!
dont la masse est comparable à la matière manquante

En fait, on sait aujourd'hui $M(\text{gaz chaud}) \sim 10 M(\text{galaxies})$
Il reste encore de la **matière noire** ~ 6 fois la masse visible

Un autre coup à l'anthropomorphisme: la plupart de la matière ne rayonne pas dans les longueurs d'onde optiques, que l'œil reçoit!

XMM-Newton= X

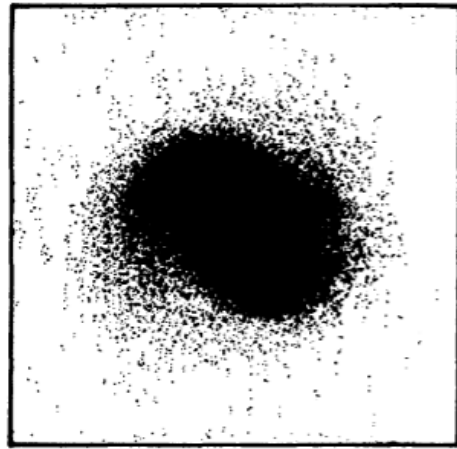
Coma Cluster
0.5-2.0 keV

Amas de Coma rayons X, optique

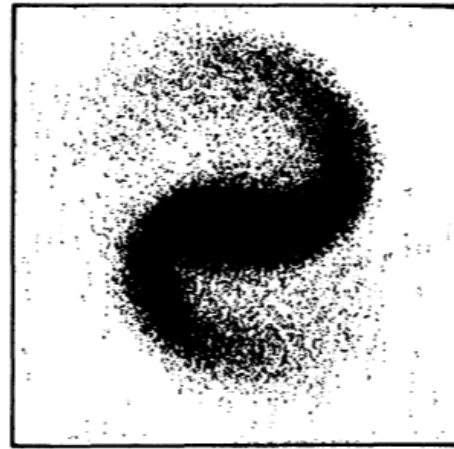
0.5 Degree

Telescope CFHT= optique

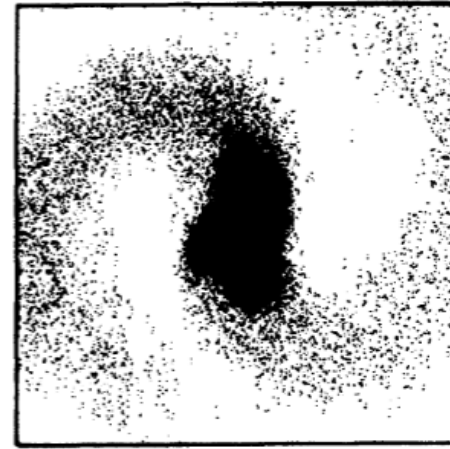
Stabilité des disques de galaxies



$t = 9.5$



$t = 10.0$



$t = 10.5$

Hohl 1971

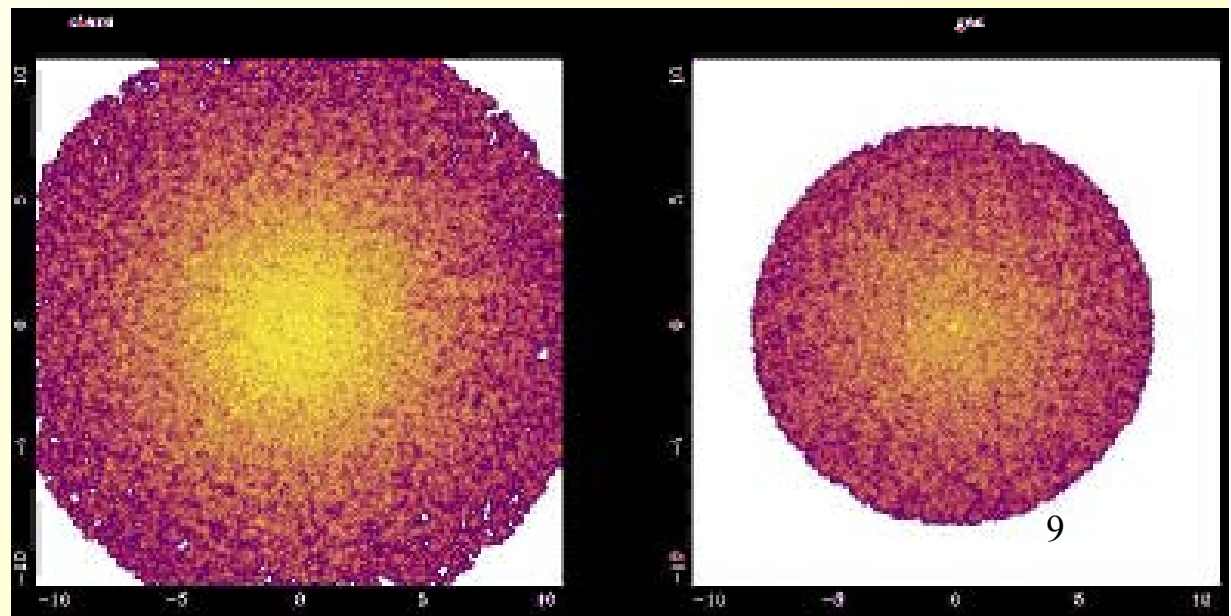
Etoiles

Gaz

Ostriker & Peebles 1973

→ Les galaxies doivent
être entourées d'un halo
Sombre

Ce n'est plus vrai!



La matière noire devient exotique

Jusqu'au début des années 1980s, seulement la matière ordinaire

1984: changement de paradigme!

☛ Fond cosmologique (3K) découvert **en 1965**,

☛ Nucléosynthèse primordiale dans le Big-Bang **(1975)**

➔ La matière ordinaire ne peut dépasser 5% $\rho_{\text{crit}} = 10^{-29} \text{g/cm}^3$

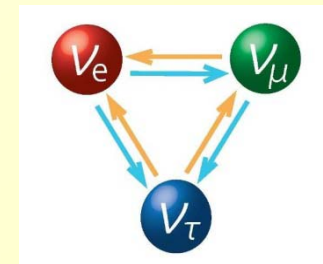
☛ Fluctuations primordiales très petites dans le fond cosmologique

Neutrinos présents avec une densité comparable à celle des photons ($\sim 300/\text{cm}^3$)

☛ Auraient-ils une masse ? Neutrinos solaires

On observe l'échange entre les 3 saveurs

Pour cela, les neutrinos doivent avoir une masse



Neutrinos et Matière noire

1976: et si la matière noire était constituée de neutrinos ?

$$\Omega = \rho/\rho_c = \Sigma m(\text{neutrino}) / 45 \text{ eV}$$

Si chacun = 15 eV, les neutrinos ferment l'Univers ($\Omega=1$)

$$1 \text{ eV} = 1.8 \cdot 10^{-33} g$$

$$m(\text{electron}) = 0,5 \text{ MeV}$$

Suppression des petites structures

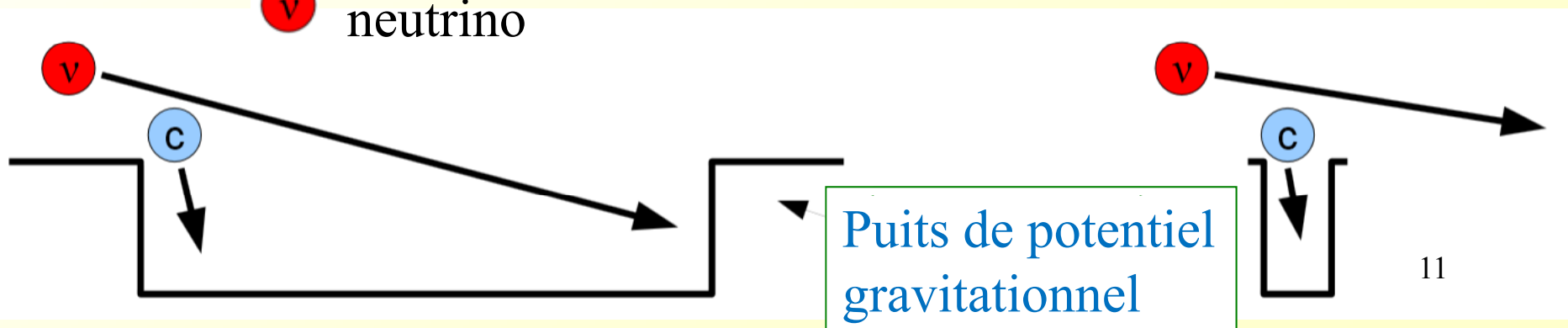


Particule CDM



neutrino

$$V_v = (1+z) (eV/m_v) 81 \text{ km/s}$$



Types de matière noire

Chaude (neutrinos)

Relativiste au découplage

**Ne peut pas former
les structures,
si $m < 5 \text{ keV}$**

Froide (particules massives)

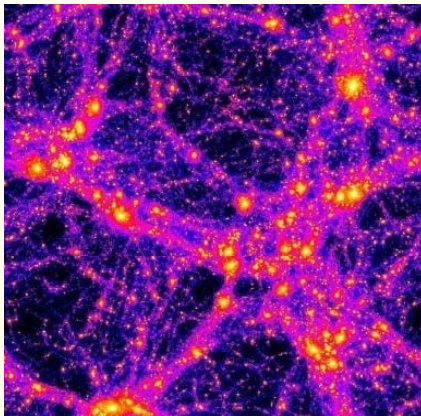
Non relativiste au découplage

WIMPS

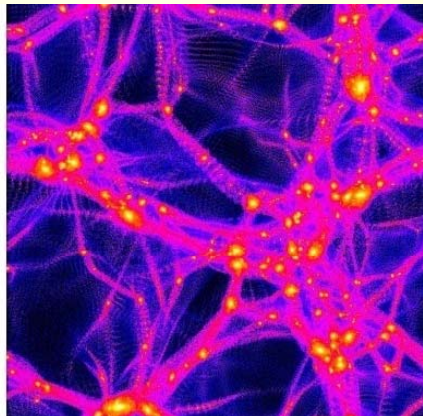
("weakly interactive massive particles")

Neutralinos: particule
supersymétrique la plus légère

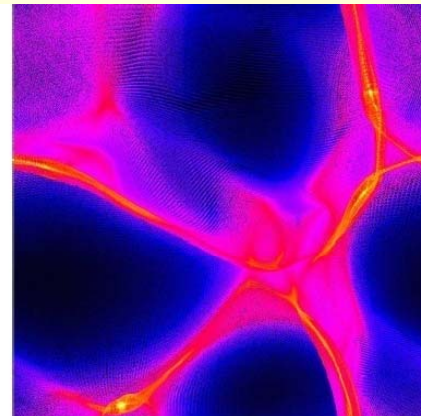
Froid



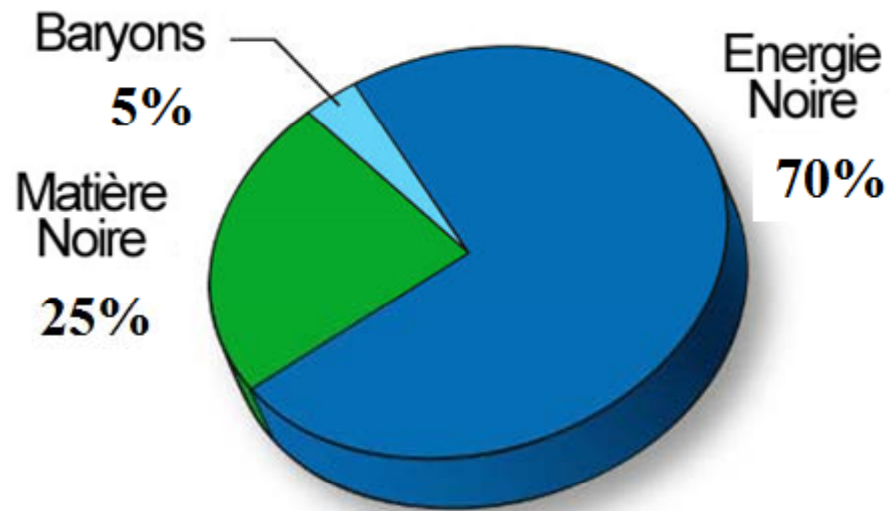
Tiède



Chaud

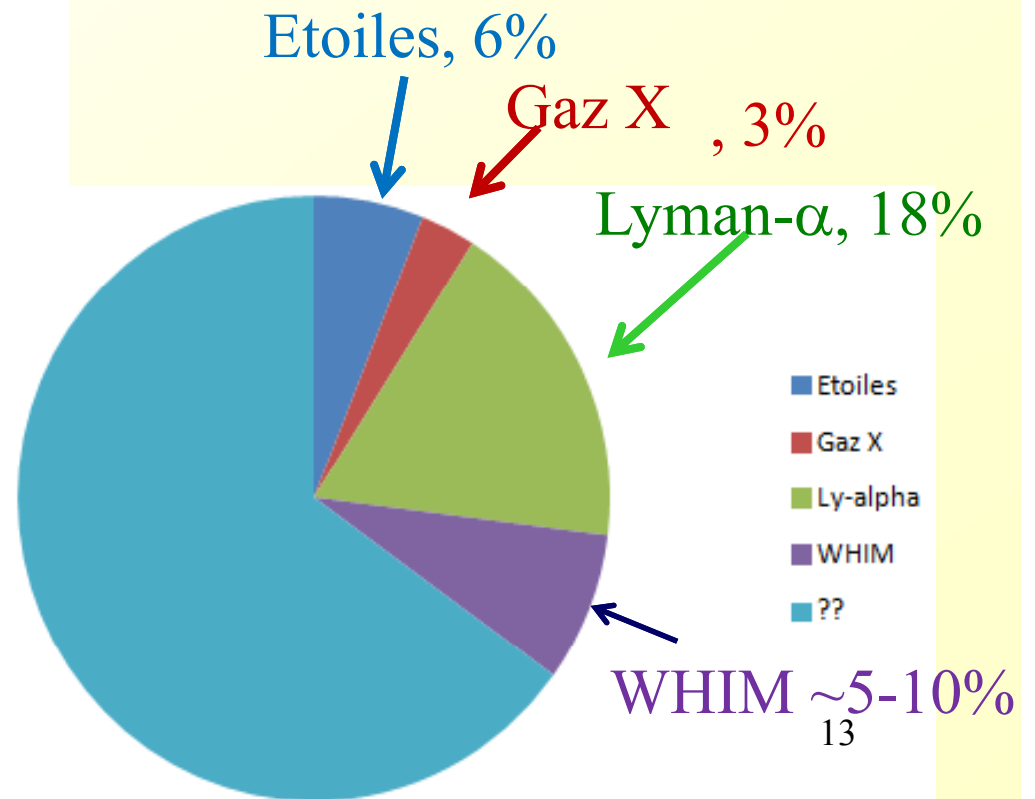


Ce que l'on sait....

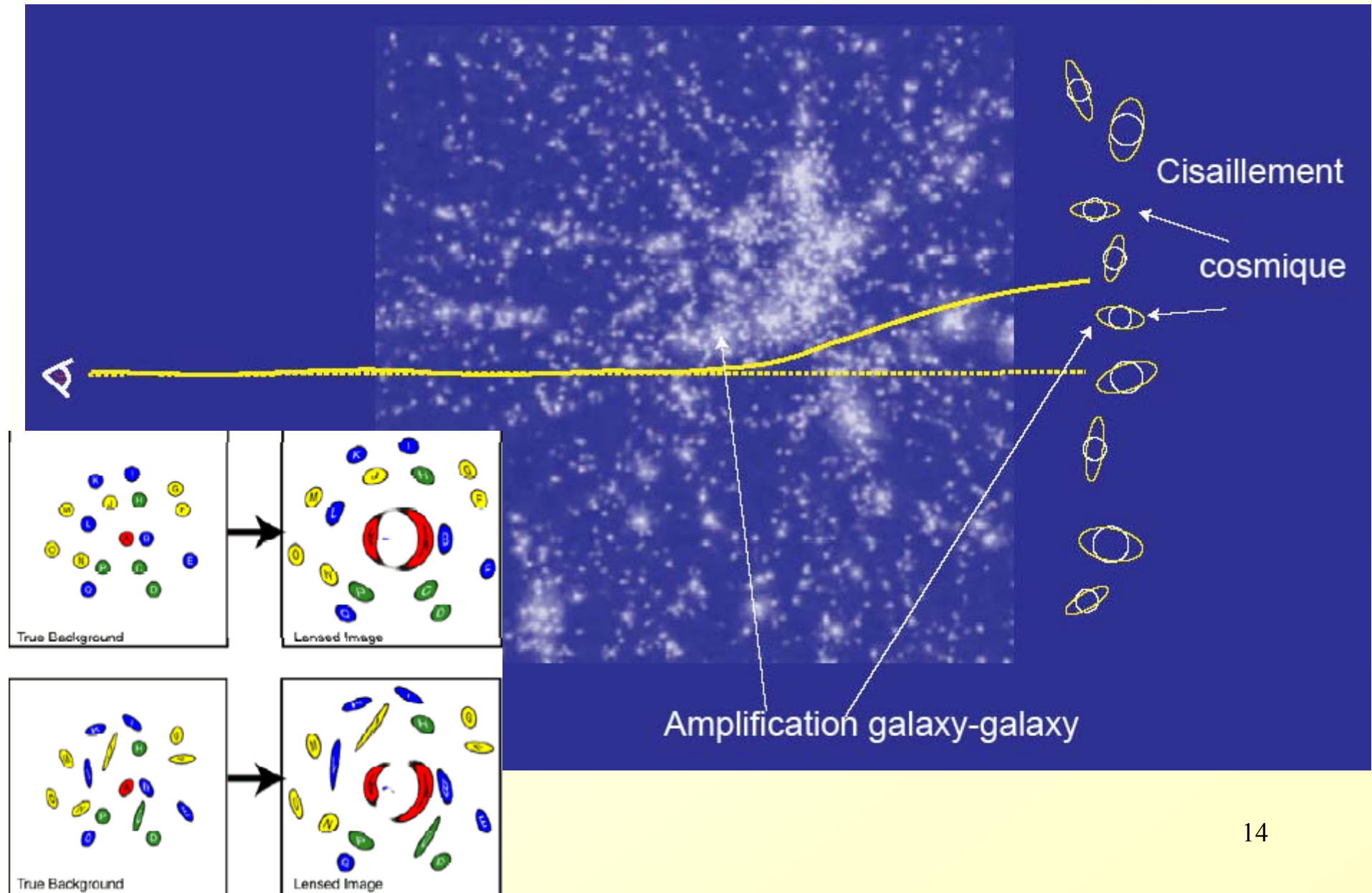


Parmi les baryons
(atomes, matière ordinaire)

?? 65%



Lentilles gravitationnelles: régime faible

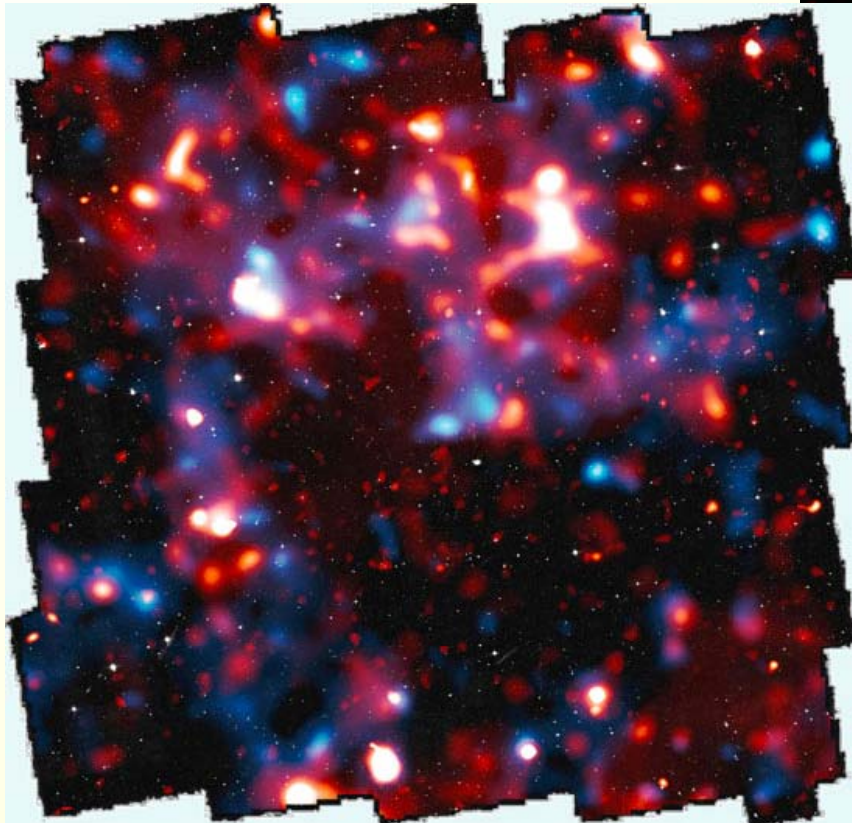
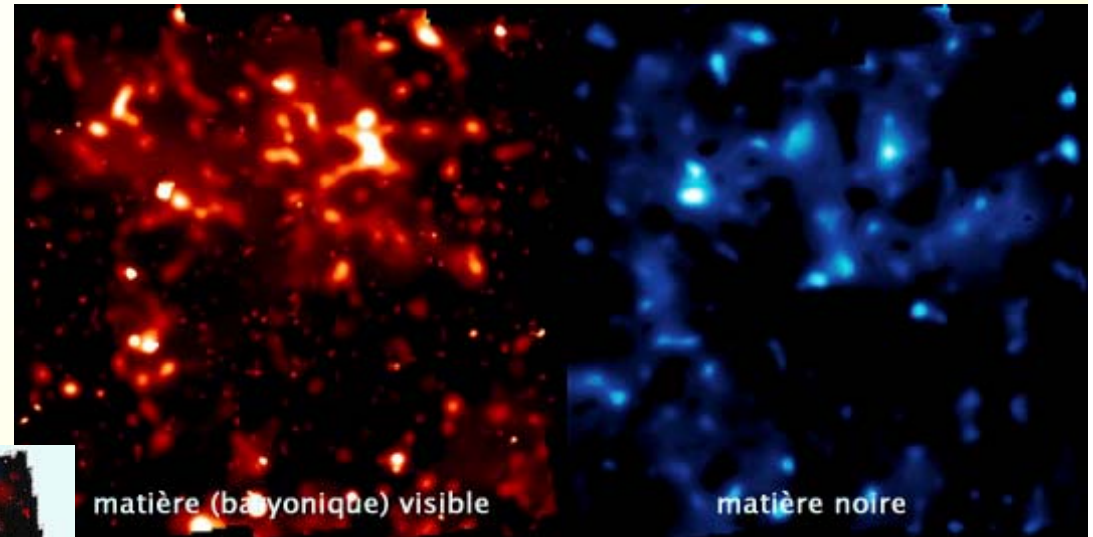


Cisaillement gravitationnel

Rouge: gaz X

Bleu: matière totale

Champ Cosmos

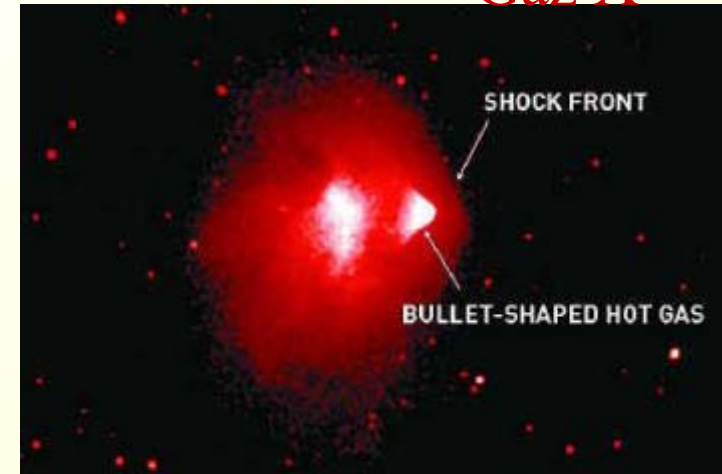


**Contraintes sur la
Matière noire, et aussi
Énergie noire**

Massey et al 2007

L'amas du boulet

Gaz X



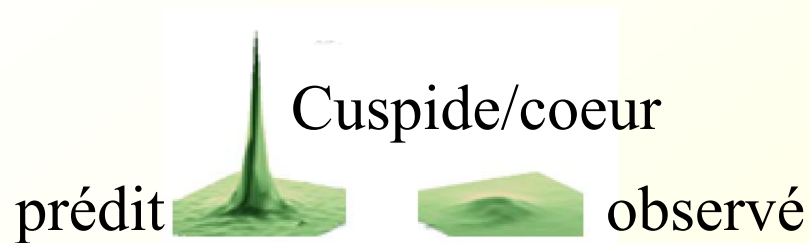
Preuve de l'existence de matière non-baryonique

Les théories de gravité modifiée ont besoin de matière non-collisionnelle: neutrinos ou baryons noirs

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

Problèmes du modèle standard L-CDM

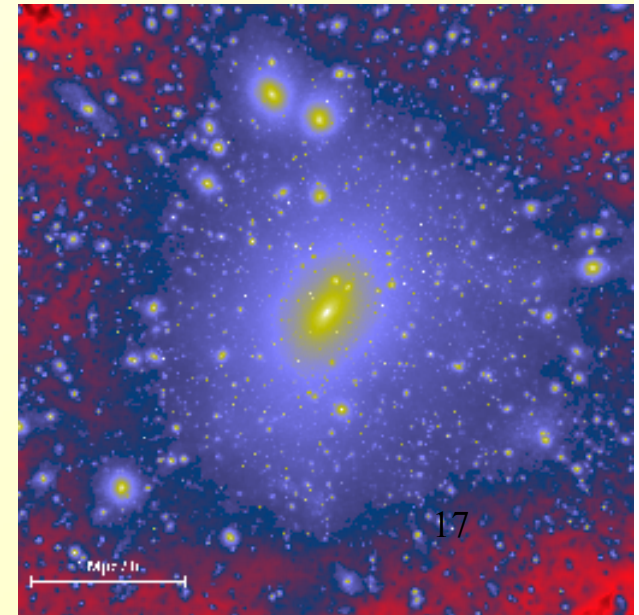
→ **Prédiction de "cuspides" au centre des galaxies**, en particulier absentes dans les naines Irr, dominées par la matière noire



Les profils de matière noire ne sont pas universels

→ **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, feedback?), du manque de résolution des simulations, ou de la nature de la matière noire?



Candidats pour la matière noire (MN)

Nouvelle physique, en dehors du modèle standard SM

MN Kaluza-Klein en UED

MN Kaluza-Klein en RS

Axion

Axino

Gravitino

Photino

SM Neutrino

Neutrino Stérile

Sneutrino

MN légère

MN petit Higgs

Wimpzillas

Cryptobaryonic MN

Q-balls

Champs (MN chargée)

D-matter

Cryptons

Self-interacting MN

Superfaible MN

Braneworld MN

Neutrino lourd

Neutralino

Etats messagers en GMSB

Branons

Gaz de Chaplygin

Split SUSY

Trous noirs primordiaux

Matière miroir

etc...

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 →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	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
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	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	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	Z^0 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	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e électron	μ muon	τ tau	$W^\pm$ boson W	

Venant du Big-Bang

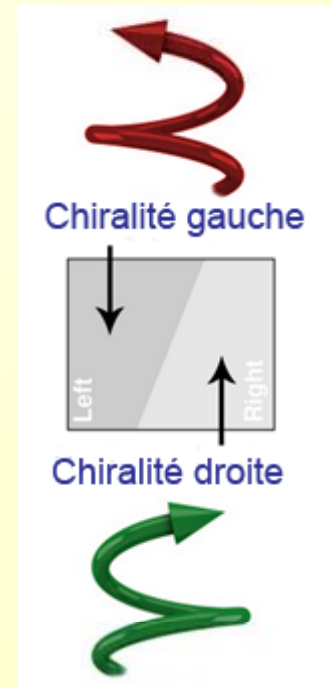
~400 photons /cm³

~300 neutrinos /cm³

0,1 milliards de milliards par sec vous traversent

→ Recherche de
WIMPS
depuis 1985

Extension vers
Les neutrinos
Stériles ?

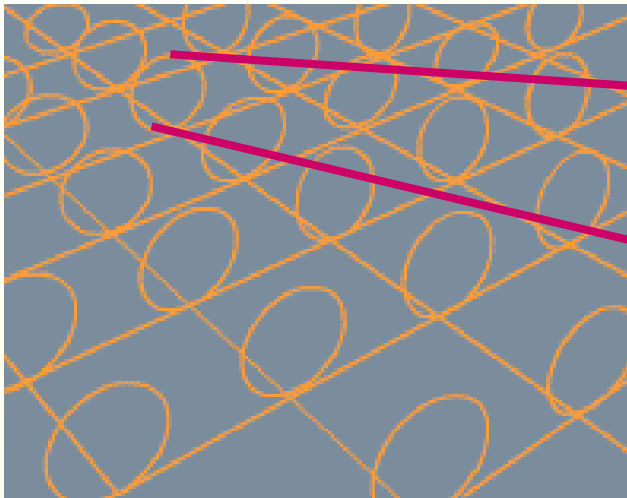


<0.0001 eV	~keV	~0.01 eV	~GeV	~0.04 eV	~GeV
ν_e	N_1	ν_μ	N_2	ν_τ	N_3
Left electron neutrino	sterile neutrino	Left muon neutrino	sterile neutrino	Left tau neutrino	sterile neutrino

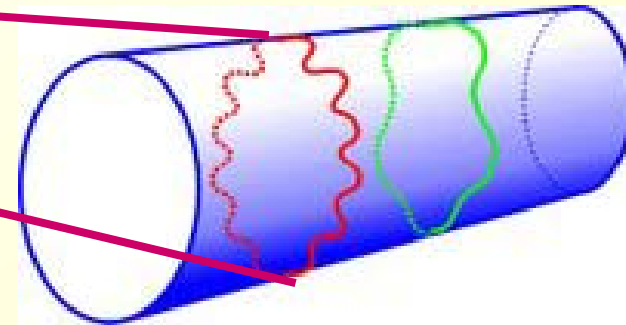
Dimensions Supplémentaires Universelles

- Kaluza-Klein: dimensions supplémentaires

$$E = mc^2 + p^2 c^4 = M c^2$$



Compactification de la dimension supplémentaire en chaque point



**Conditions périodiques
→ quantification de l'impulsion**

Universel: tout champ se propage dans la 5^e dimension

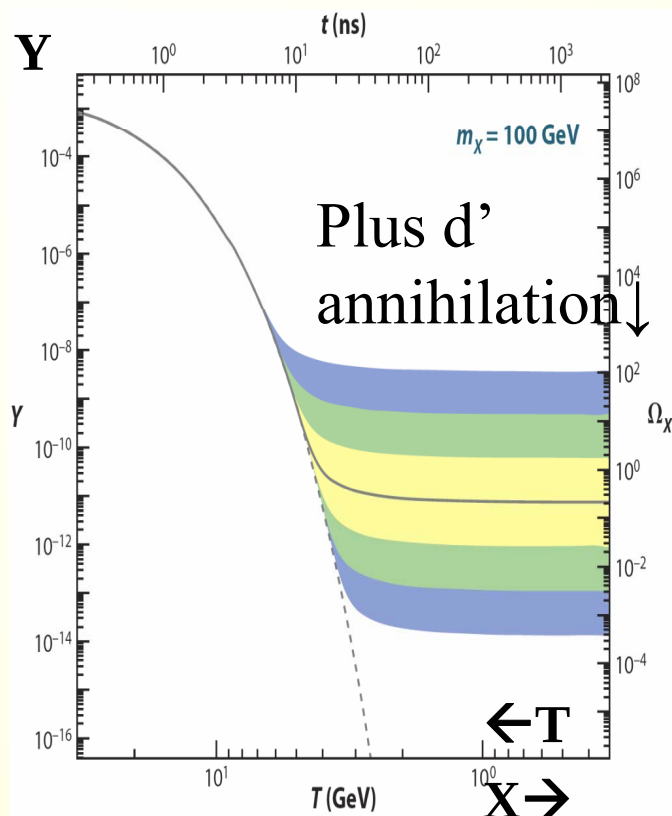
Le miracle du WIMP

L'abondance des particules est « gelée », elles se découplent lorsque leur interaction $n \langle \sigma v \rangle \sim 1/t_{\text{hubble}}$
Elles peuvent encore être créées tant que $mc^2 < kT$

$$dn/dt - 3Hn = \langle \sigma v \rangle (n^2 - n_{\text{eq}}^2),$$

On peut calculer leur densité relicue n_{eq}
 $\Omega = 6 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s} / \langle \sigma v \rangle = \Omega \sim 0.2$
pour $\langle \sigma v \rangle = 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$

section d'annihilation pour des particules
d'interaction faible de masse 100 GeV



Gravité Modifiée: MOND

A faible accélération

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

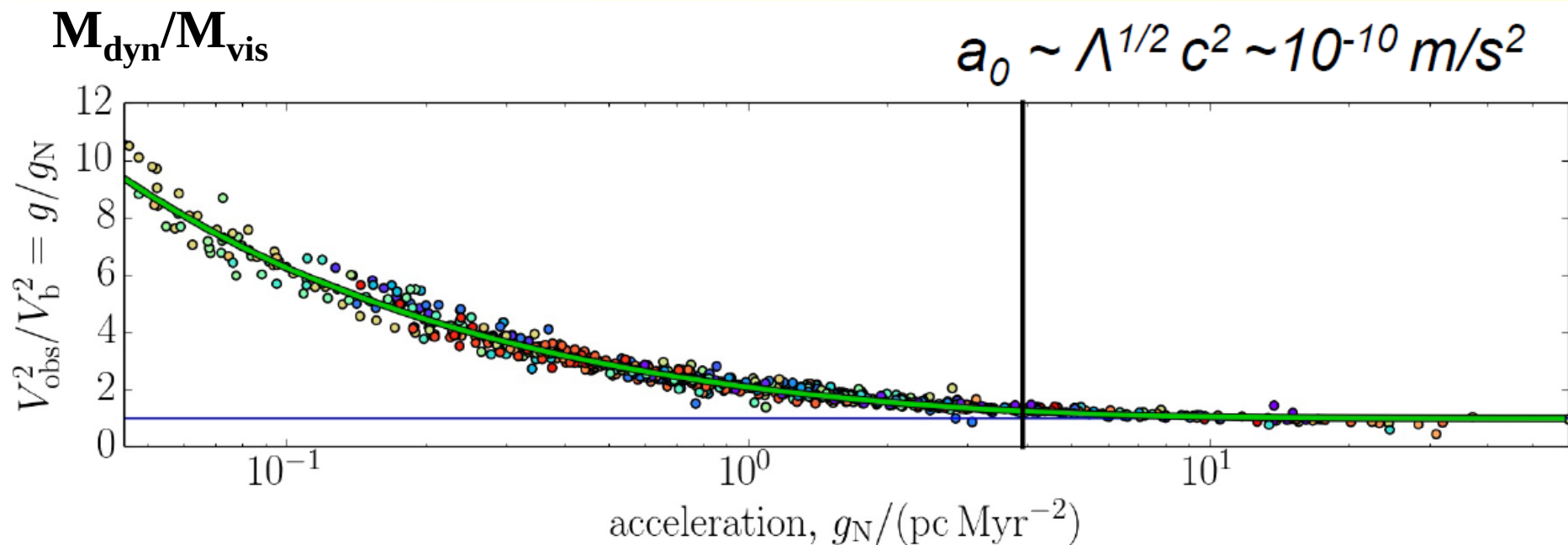
$a \gg a_0$ Newtonien $a = a_N$

Milgrom (1983)

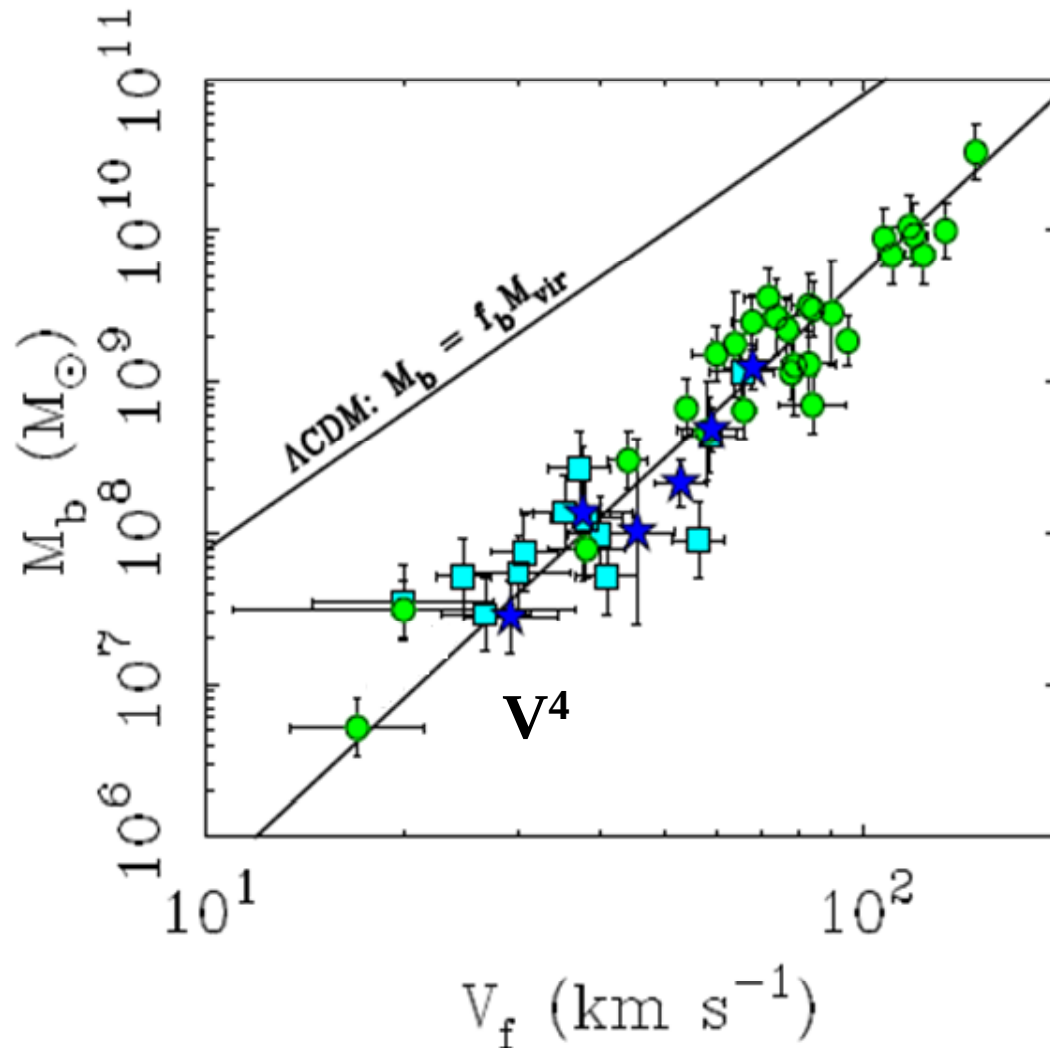


$$\nabla \cdot [\mu(|\nabla\phi|/a_0)\nabla\phi] = 4\pi G\rho$$

Nouvelle équation de Poisson



Tully-Fisher baryonique



f_b fraction universelle
de baryons = 17%

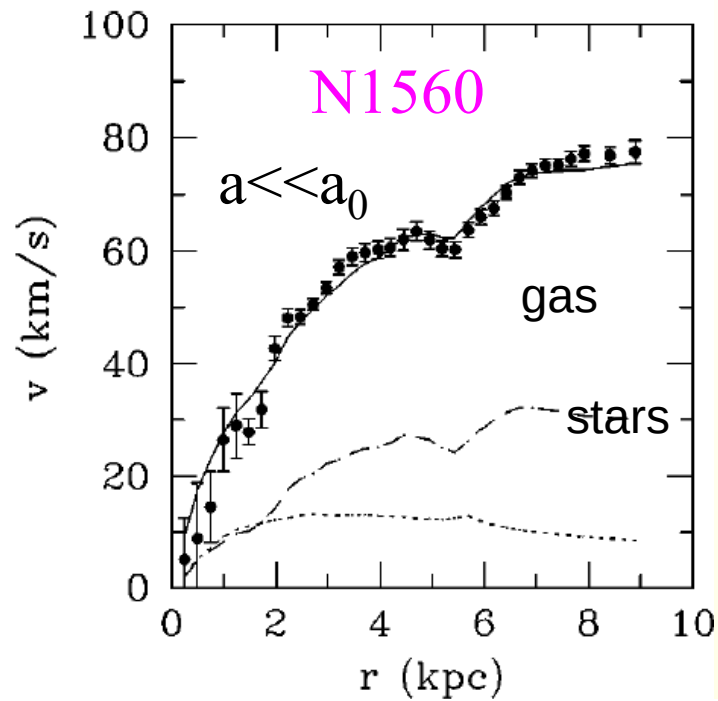
CDM: Cold Dark Matter

Λ énergie noire

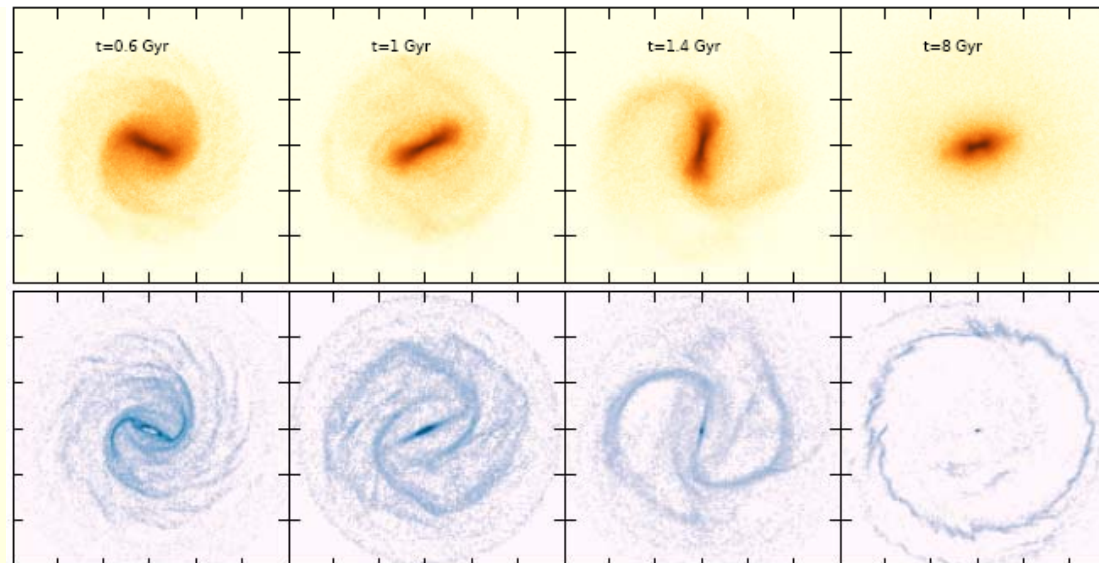
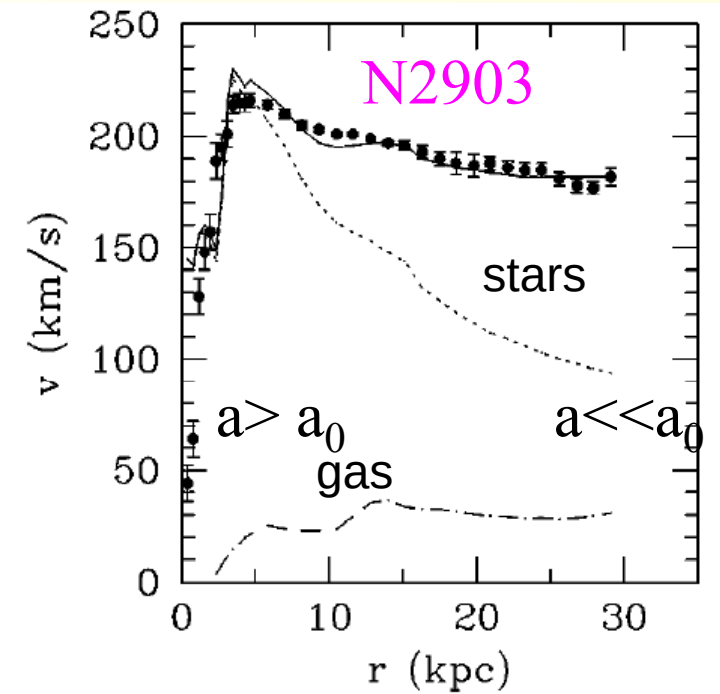
$$g_M^2 = a_0 g_N = a_0 GM/r^2 = V^4/r^2$$

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

Courbes de rotation, stabilité



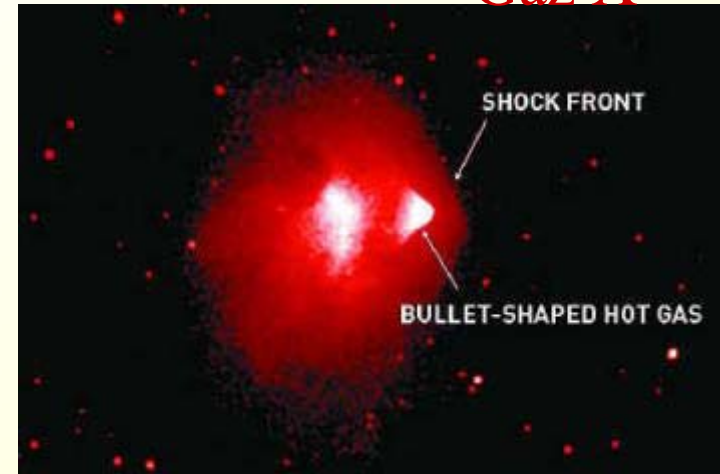
Les courbes de rotation pour tous types



Tiret & Combes
2007, 2008

L'amas du boulet

Gaz X



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

Masse totale

Possible d'expliquer les observations avec MOND et les neutrinos, avec le pourcentage habituel (masse 1-2 eV) Angus et al (2006)

Plusieurs solutions

Ajouter un champ scalaire, de type k-essence dans l'action

$$S = \frac{c^4}{8\pi G} \int \sqrt{-g} \left[\frac{R}{2} - F(a_0^{-2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi) \right] d^4x + S_{\text{matiere}}[\psi_{\text{mat}}; \tilde{g}_{\mu\nu} = \exp(2\varphi) g_{\mu\nu}]$$

$$F(X) \sim \frac{2}{3} X^{3/2} + \Lambda \text{ pour } X \ll 1$$
$$F(X) \sim X + \Lambda \text{ pour } X \gg 1$$

Mais ne suffit pas, il faut un champ vectoriel, pour rendre compte des lentilles gravitationnelles

→ TeVeS: théorie Tenseur Vecteur Scalaire (Bekenstein 2004)

Encore quelques problèmes, de nombreuses théories se sont développées depuis plus de 10 ans

Théories de l'éther d'Einstein

Les théories “Einstein æther”, ou æ-theories, sont des théories covariantes, avec modification de la relativité générale, qui décrivent un espace-temps avec une métrique, et un champ unitaire vectoriel du genre temps, appelé éther
(Gasperini, ~1980, éther scalaire)

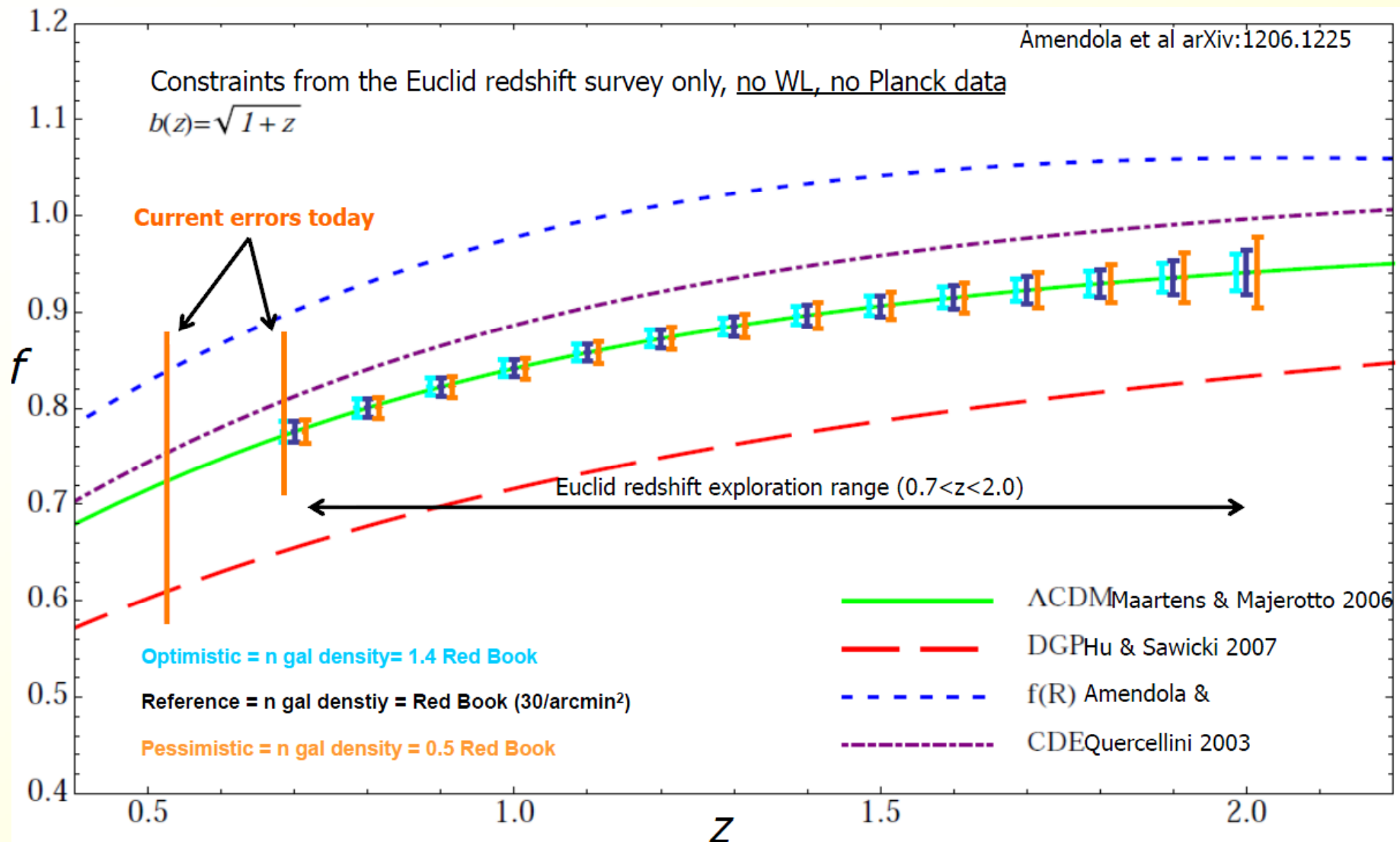
Fait revivre l'éther gravitationnel du 19ème siècle!

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)

Exploration des modèles DE avec Euclid (DGP, Dvali et al 2010, f(R), CDE...)



Succès et Problèmes de chaque modèle

CDM: succès aux grandes échelles, problèmes à l'échelle des galaxies

WDM: ne résoud pas les cusps, pas assez de structures à petite échelle

MOND succès à l'échelle des galaxies,

Mais problèmes dans les amas de galaxies, à grande échelle

(+ neutrinos, baryons?)

➔ Solution avec supernovae, trous noirs, pour le modèle CDM?

Simulations avec plus de physique, et plus de résolution

➔ Théories covariantes de Lorentz, TeVeS (Bekenstein 2004) avec des variétés à explorer (GEA, BSTV, k-essence..)

➔ Métrique différente (BIMOND), bcp de paramètres à explorer

Autres propositions? Modif de l'inertie?, non-local? DM Dipolaire..

Matière noire dipolaire

Gravité non modifiée, mais matière noire modifiée



Analogie avec les milieux diélectriques

Mêmes équations que celles de MOND

Les baryons dans la Galaxie créent un champ gravitationnel qui polarisent la matière noire dipolaire

Le champ total est alors la somme du champ extérieur et du champ dipolaire induit par la polarisation

→ Gravité plus forte

Premier modèle avec des ghosts

Modèle actuel, basé sur la gravité massive. Depuis 2010, solution « ghost-free » de la gravité massive (*Claudia de Rham et al*)

Avec 2 métriques (bimetric gravity)

MOND avec des axions

Matière noire superfluide, combinant les succès de Λ CDM à grande échelle et MOND aux échelles galactiques



DM & MOND proviennent de 2 phases d'une même substance
Des particules axionlike de masse $\sim \text{eV}$ et forte self-interaction
Le condensat $P \sim \rho^3$ donne lieu à un coeur superfluide au centre des galaxies. La DM superfluide peut-être décrite par des excitations collectives. Les phonons du superfluide obéissent à une action de type MOND

Dans les amas, plus chauds (dispersion de vitesse), la DM est le mélange superfluide/normal.. La T critique pour la DM superfluide est de l'ordre du mK, comme pour les BEC

L'histoire n'est pas terminée !

Ether, entités invisibles, matière noire

