

Matière noire et gravité modifiée

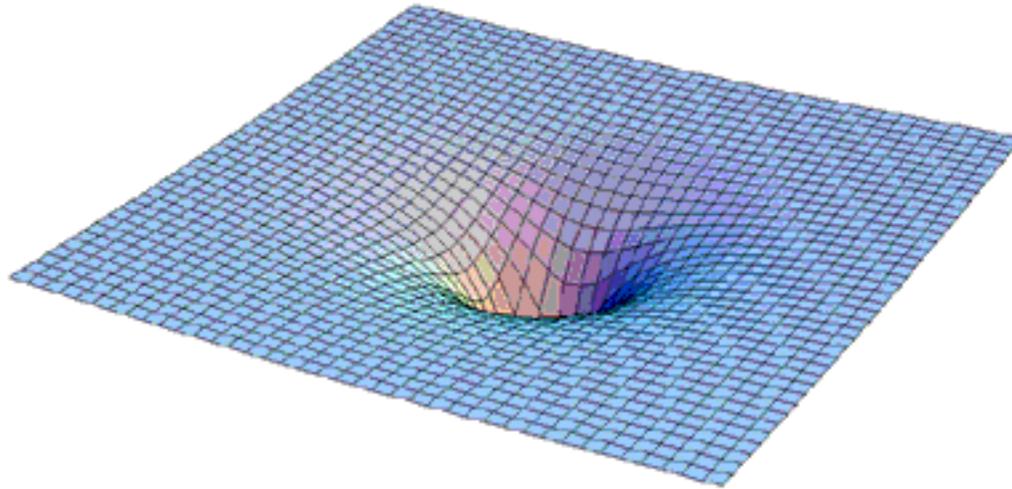
Collège de France - 25 février 2015

Benoit Famaey



Gravitation

$$\begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} \\ g_{10} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{20} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{30} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix}$$



Champ tensoriel (d'ordre 2) métrique $g_{\mu\nu}$
définissant l'élément de longueur $ds^2 = -d\tau^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$

Géodésiques:
$$\frac{d^2 X^\alpha}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dX^\mu}{d\tau} \frac{dX^\nu}{d\tau} = 0$$

↳ dérivées premières de g

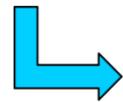
Action de la gravitation

$$S = S_g + S_{\text{matiere}}$$

$$S_g = \frac{c^4}{16\pi G} \int (g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} - 2\Lambda) \sqrt{-g} d^4x$$

=> **Equations d'Einstein:**

$$\underbrace{\frac{\delta S_g}{\delta g^{\mu\nu}}}_{\text{}} = - \frac{\delta S_{\text{matiere}}}{\delta g^{\mu\nu}}$$



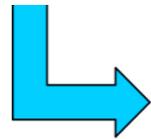
inclut des dérivées secondes de g

$$- \frac{2}{\sqrt{-g}} \frac{\delta S_{\text{matiere}}}{\delta g^{\mu\nu}} \equiv T_{\mu\nu} \text{ (tenseur énergie-impulsion)}$$

Champ faible

- Relativité générale extrêmement bien testée à l'échelle du **système solaire** et en **champ fort**
- En champ faible, $|\Phi_N| \ll c^2$ on retrouve la gravitation Newtonienne pour

$$g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = \left(-1 - 2\frac{\Phi_N}{c^2} \right) c^2 dt^2 + \left(1 - 2\frac{\Phi_N}{c^2} \right) (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$



$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} = -c^2 \Gamma^i_{00} = -\nabla \Phi_N$$

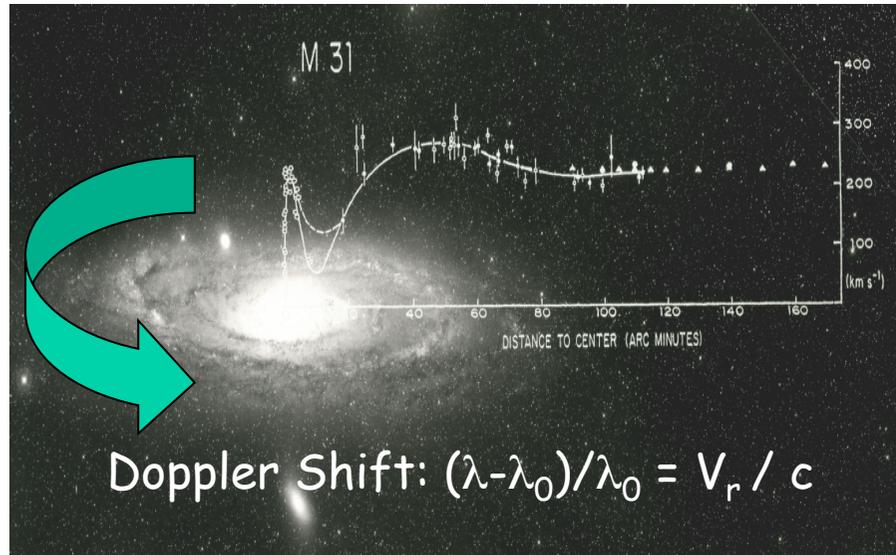
- Pour un fluide parfait on a

$$T_{\mu\nu} = \rho c^2 u_\mu u_\nu + p(g_{\mu\nu} + u_\mu u_\nu)$$

qui dérive de $S_{\text{fluide parfait}} = - \int \rho c^2 \sqrt{-g} d^4x$

- Equation non-triviale pour composante 00: $\nabla^2 \Phi_N = 4\pi G \rho$

Le problème de la masse manquante



- On observe ρ_{matiere} des baryons dans les galaxies (gaz + étoiles: conversion en masse grâce à M/L)
- On trouve Φ_N en résolvant $\nabla^2 \Phi_N = 4\pi G \rho$

$\Rightarrow (R |\partial \Phi_N / \partial R|)^{1/2} = V_c$ trop basse dans le plan galactique comparée à V_c observée

Solutions possibles

Problème à **grande échelle** et en **champ très faible** (accélération gravitationnelle dans les galaxies = 10^{-11} fois valeur à la surface terrestre)

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int (R - 2\Lambda) \sqrt{-g} d^4x + S_{\text{matiere}}[\psi; g_{\mu\nu}] - \int c^2 \rho_{\text{matnoire}} \sqrt{-g} d^4x$$

- 
- particules
 - $p=0$
 - pas de dissipation
ni aucune influence hydro
 - non-relativiste au découplage

Solutions possibles

Problème à **grande échelle** et en **champ très faible** (accélération gravitationnelle dans les galaxies = 10^{-11} fois valeur à la surface terrestre)

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int \underbrace{(R - 2\Lambda)}_{\text{tenseurs d'ordre supérieur}} \sqrt{-g} d^4x + S_{\text{matiere}}[\psi; g_{\mu\nu}]$$

- Tenseurs d'ordre supérieur
- E.g., non-localité!
- Instabilités?

Solutions possibles

Problème à **grande échelle** et en **champ très faible** (accélération gravitationnelle dans les galaxies = 10^{-11} fois valeur à la surface terrestre)

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int (R - 2\Lambda) \sqrt{-g} d^4x + S_{\text{matiere}}[\psi; g_{\mu\nu}]$$

Couplage à
 $\tilde{g}_{\mu\nu} = f(\varphi, U_\mu, \dots, g_{\mu\nu})$

$$+ S_\varphi + S_{U_\mu} + \dots$$

Solutions possibles

Problème à **grande échelle** et en **champ très faible** (accélération gravitationnelle dans les galaxies = 10^{-11} fois valeur à la surface terrestre)

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int (R - 2\Lambda) \sqrt{-g} d^4x + S_{\text{matiere}}[\psi; g_{\mu\nu}] - \int c^2 \rho_{\text{matnoire}} \sqrt{-g} d^4x + \int \left[c^2 \rho_{\text{matnoire}} u_\mu \dot{\xi}^\mu - V(|\rho \xi^\mu|_\perp) \right] \sqrt{-g} d^4x$$

Solutions possibles

Problème à **grande échelle** et en **champ très faible** (accélération gravitationnelle dans les galaxies = 10^{-11} fois valeur à la surface terrestre)

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int (R - 2\Lambda) \sqrt{-g} d^4x + S_{\text{matiere}}[\psi; g_{\mu\nu}] - \int c^2 \rho_{\text{matnoire}} \sqrt{-g} d^4x$$

- Tenseurs d'ordre supérieur
- E.g., non-localité!
- Instabilités?

$$+ \int \left[c^2 \rho_{\text{matnoire}} u_\mu \dot{\xi}^\mu - V(|\rho \xi^\mu|_\perp) \right] \sqrt{-g} d^4x$$

Couplage

$$\tilde{g}_{\mu\nu} = f(\varphi, U_\mu, \dots, g_{\mu\nu})$$

- particules
- p=0
- pas de dissipation
ni aucune influence hydro
- non-relativiste au découplage

$$+ S_\varphi + S_{U_\mu} + \dots$$

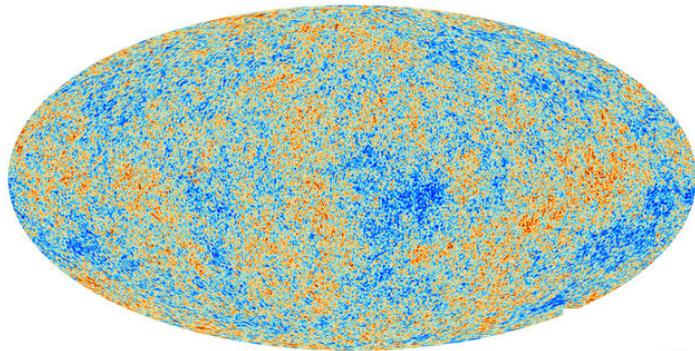
$$+ S_{\hat{g}_{\mu\nu}} + S_{\text{matjumelle}}[\hat{\psi}; \hat{g}_{\mu\nu}] + S_{\text{int}} g_{\mu\nu} \hat{g}_{\mu\nu}$$

« All of the above »... ou encore quelque chose de tout à fait différent (gravitation d'origine thermodynamique, non-métrique, etc.)

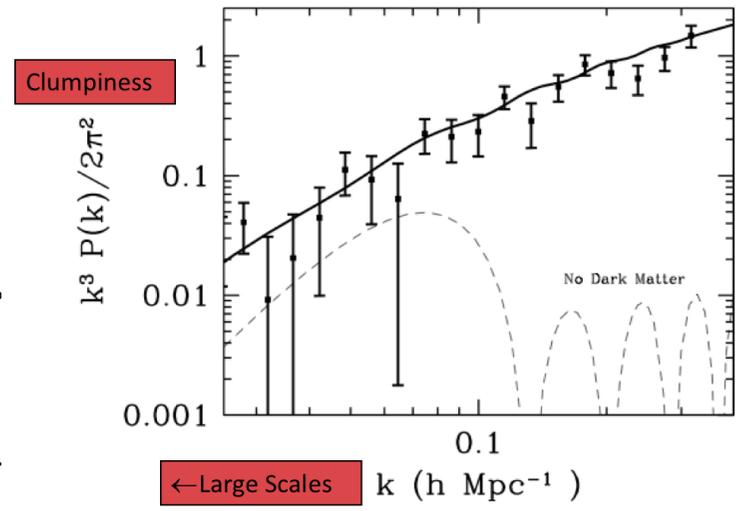
Arguments en faveur de particules de matière noire

Fond diffus cosmologique => modèle de concordance cosmologique

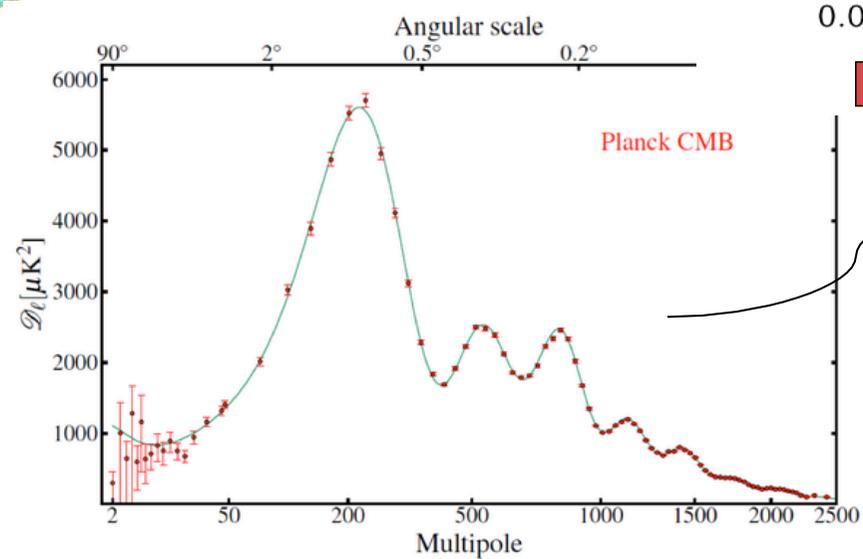
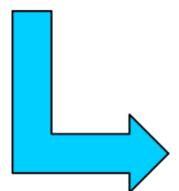
Matière ordinaire = 16% de la matière, 5% du bilan énergétique total
 $\Lambda \approx 10^{-52} \text{ m}^{-2} \Rightarrow$ 68% 'énergie noire' et 32% matière (ordin.+noire)



Formation structures

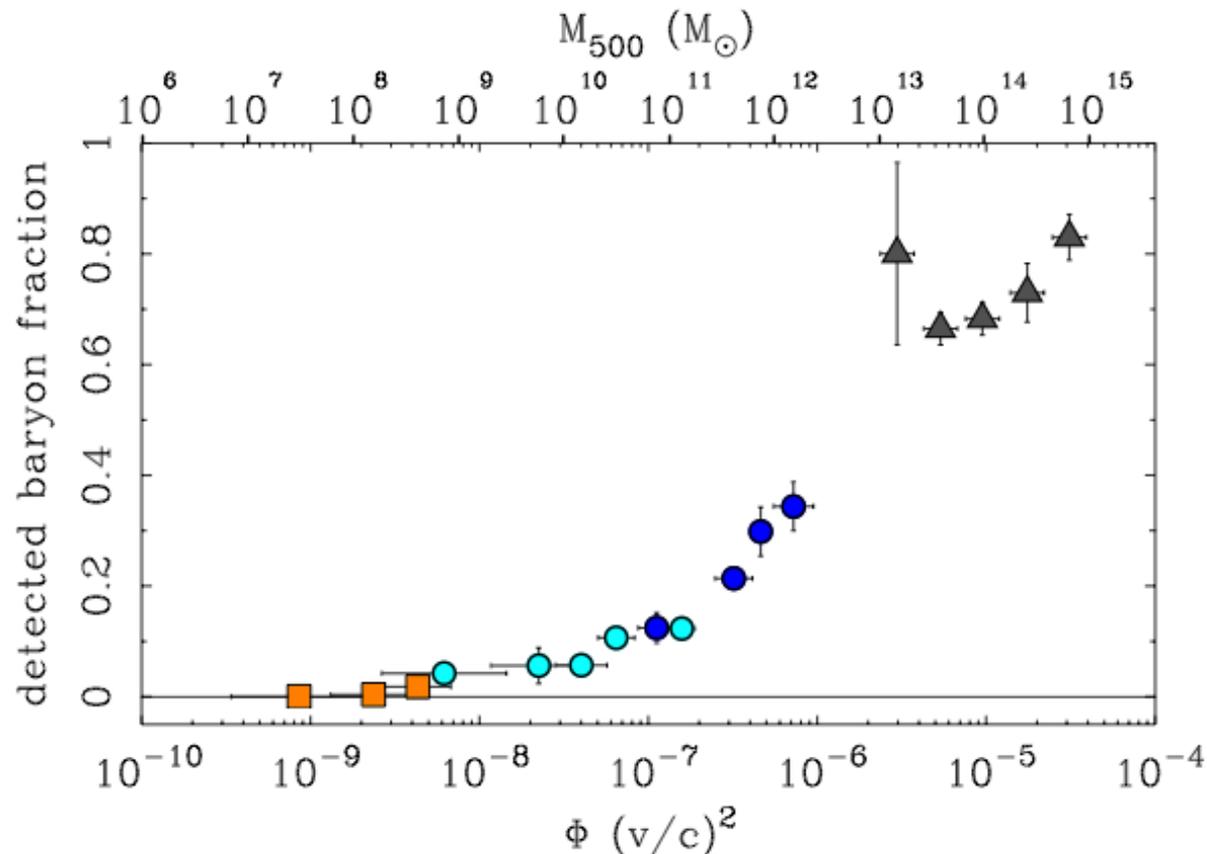


$\Delta T/T \sim 10^{-5}$



+ besoin d'un terme de forçage pour contrer le « Silk damping »

Arguments en défaveur de particules de matière noire

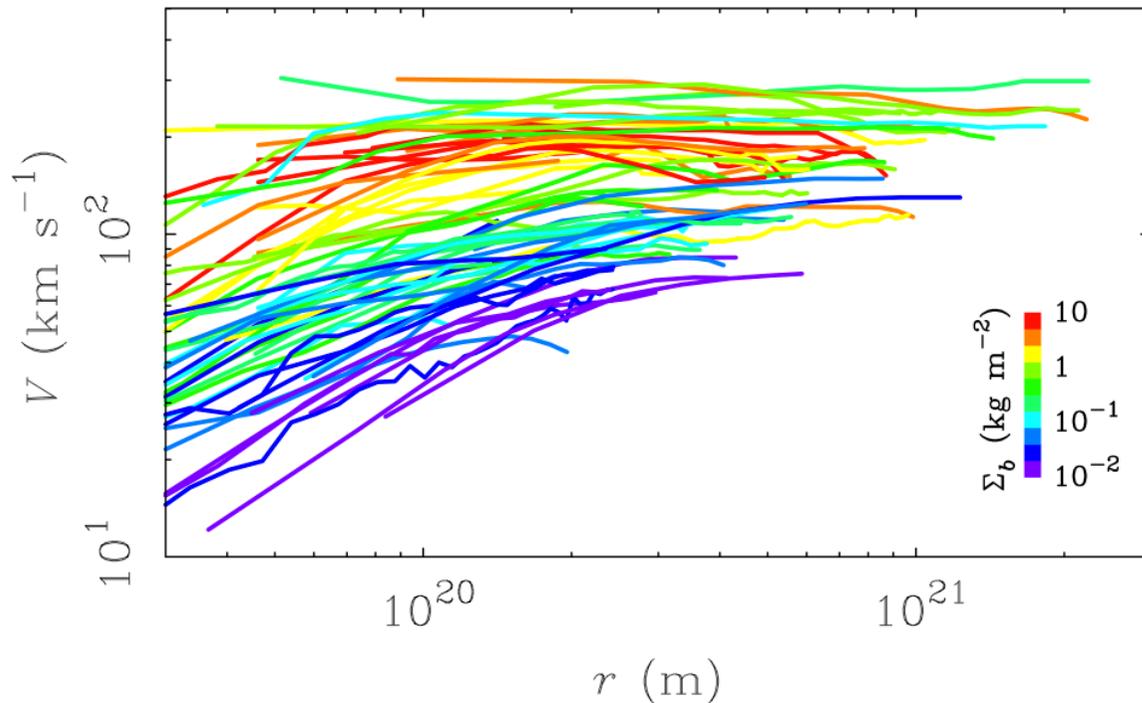


- Particules de matière noire reliées aux baryons QUE gravitationnellement => **PAS DE RELATION 1 À 1 PRECISE**
- Mais si modification effective de la gravitation: **RELATION 1 À 1**
par exemple en fonction de la distance ou de l'intensité du champ gravitationnel engendré par la matière ordinaire?

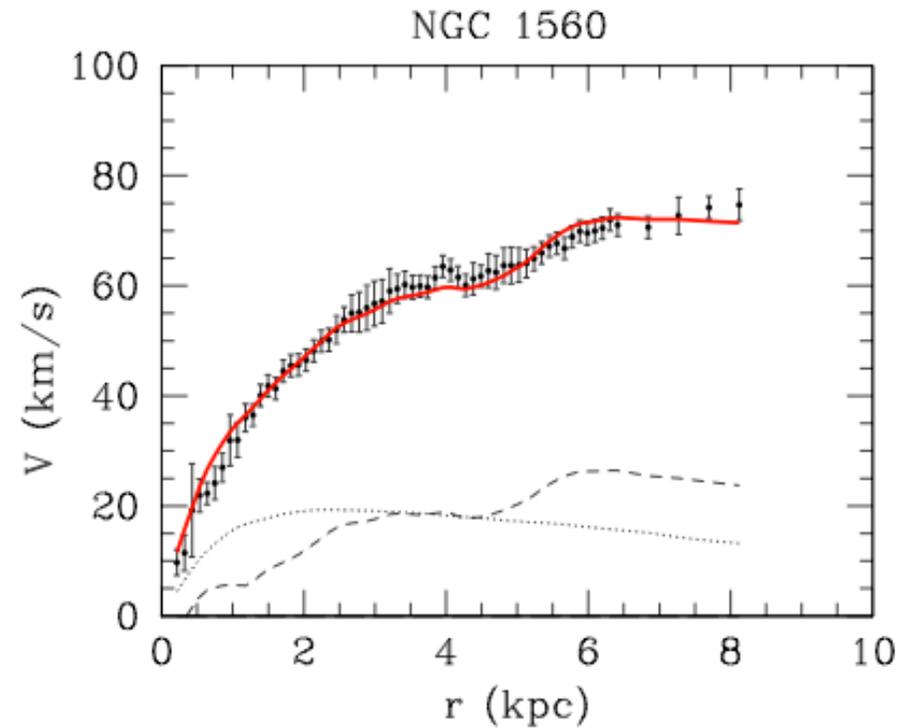
Pour V_c donné, prédictions matière noire pure: un et un seul profil de courbe de rotation due au halo...

mais

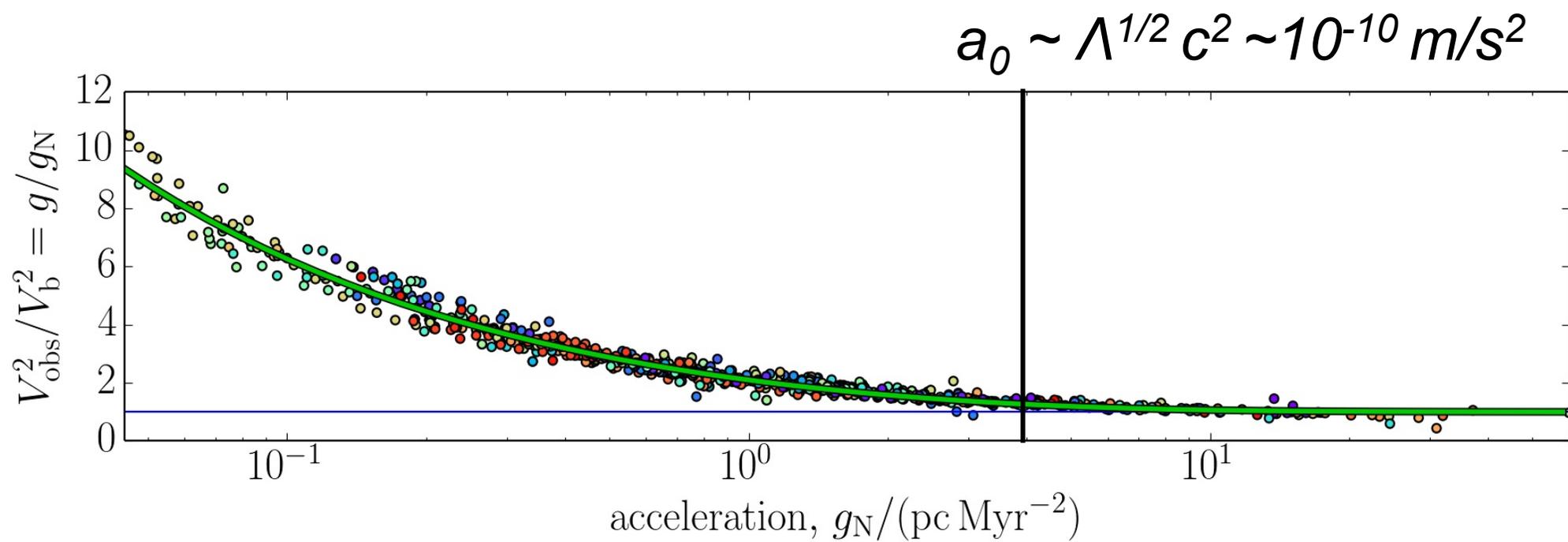
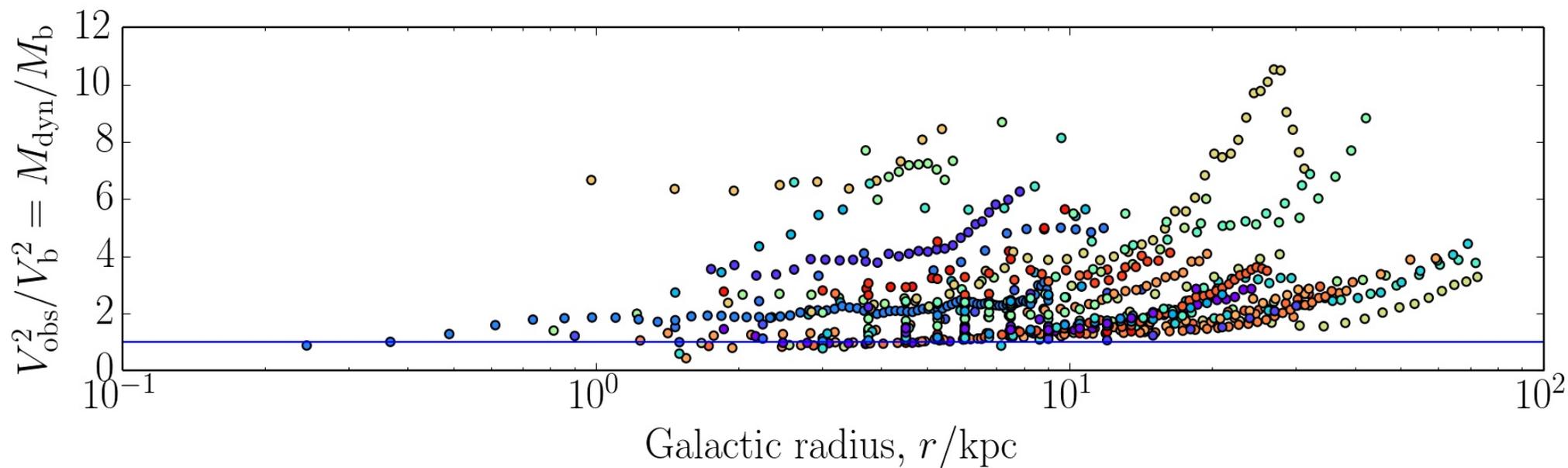
DIVERSITÉ de profils observés à V_c donné
VS.
UNIFORMITÉ des profils observés à Σ_b donné

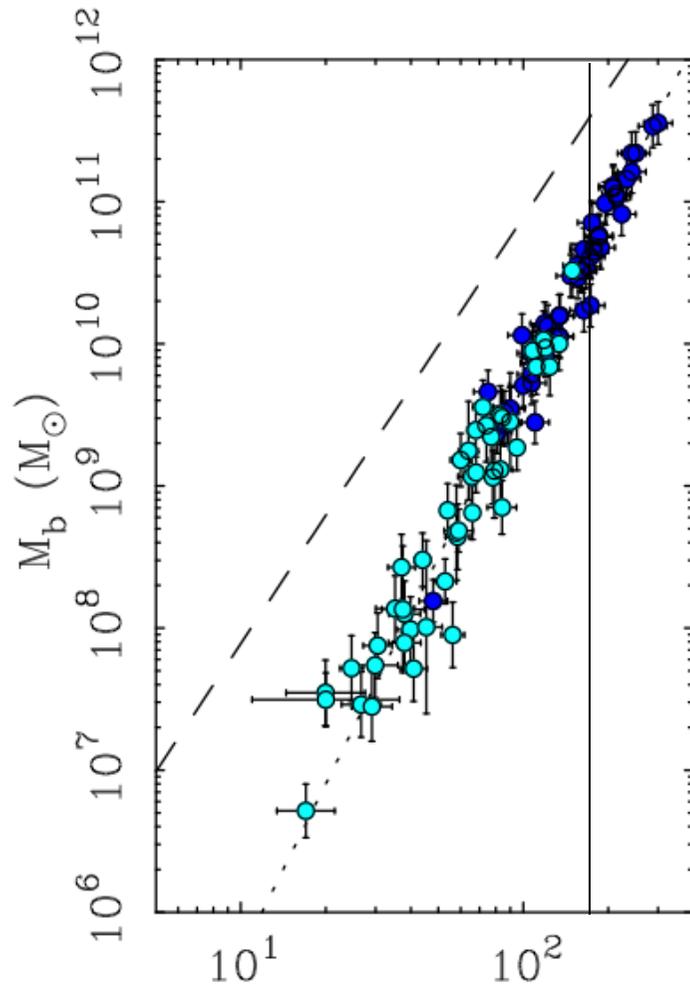


Famaey & McGaugh (2012)



Gentile et al. (2010)

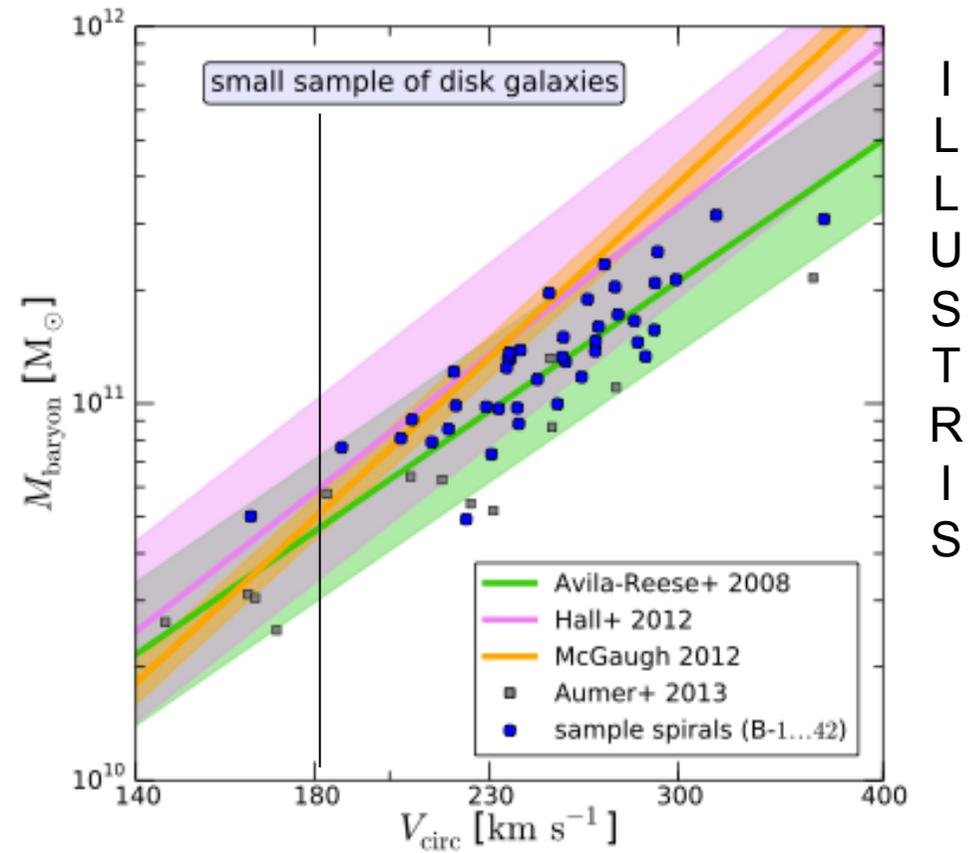




Pas Vmax!!!! → V_f (km s⁻¹)



Pente de 3.5 & plus grande dispersion



Relation baryonique de Tully-Fisher:
 $\text{Log } M_b = 4 \log V - \log \beta$

Rôle **INDEPENDANT** de l'accélération de transition fixant la relation entre masse baryonique et vitesse

$$a_0 \approx V^4 / (GM_b) \approx 10^{-10} \text{ m/s}^2$$

$$\text{càd } \beta = Ga_0$$

Paradigme MOND

Toutes ces occurrences indépendantes de a_0 dans la dynamique observée des galaxies ont été prédites par [Milgrom \(1983\)](#) **a priori**

La loi de Milgrom est très simple:

$$\begin{array}{ll} g = g_N & \text{si } g \gg a_0 \\ g = (g_N a_0)^{1/2} & \text{si } g \ll a_0 \end{array}$$

Valable uniquement en symétrie sphérique => généralisation de l'équation de Poisson comme la 1^e équation de Maxwell dans milieux électriquement non-linéaires

La transition entre ces deux régimes est « libre » mais devrait venir d'une théorie sous-jacente

Paradigme MOND

A titre d'exemple on peut très facilement obtenir une telle dynamique en ajoutant 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 plus compliqué pour obtenir un renforcement des effets de lentilles gravitationnelles... (=> champ vectoriel, 2de métrique,...)

Depuis 10 ans, pléthore de modèles relativistes reproduisant cette dynamique Milgromienne et un effet renforcé de lentille pour des systèmes statiques et à symétrie sphérique en champ faible

MAIS PROBLÈME DU FOND DIFFUS POUR BCP D'ENTRE ELLES

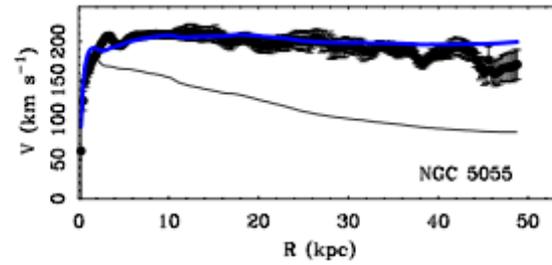
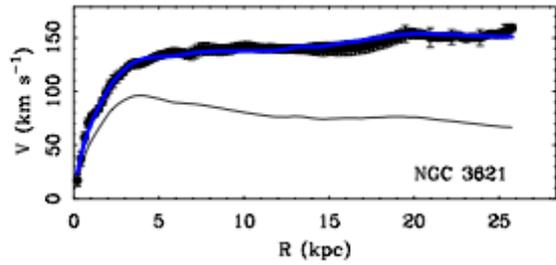
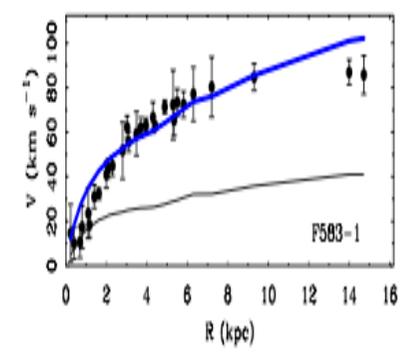
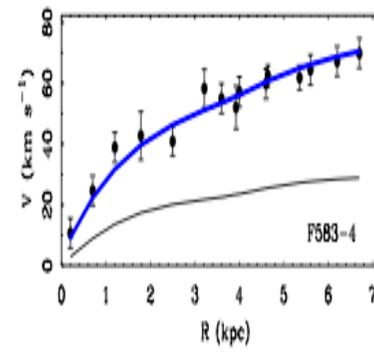
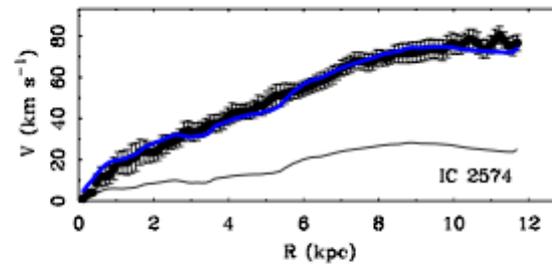
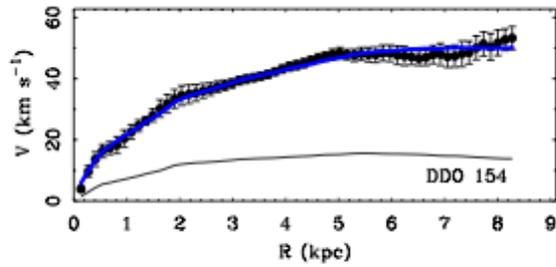
Quelques lois dérivant de la dynamique '*Milgromienne*'

LOIS DE LA DYNAMIQUE PRÉDITES DÈS 1983:

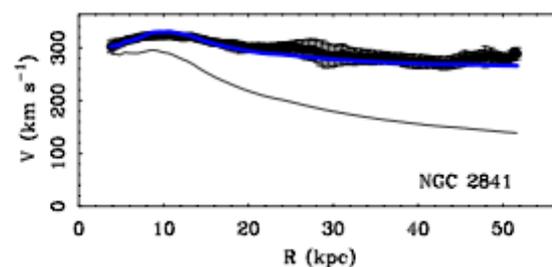
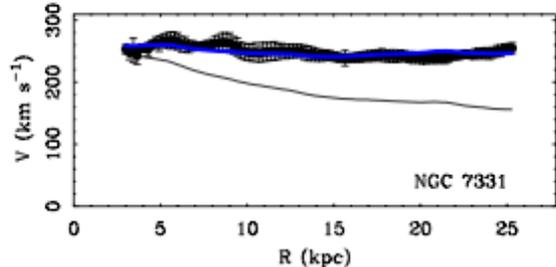
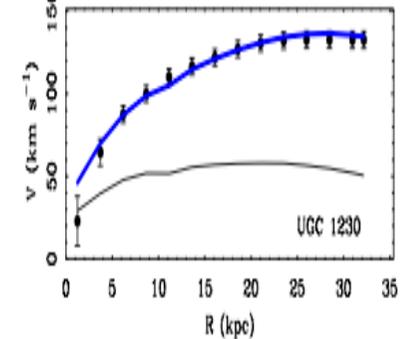
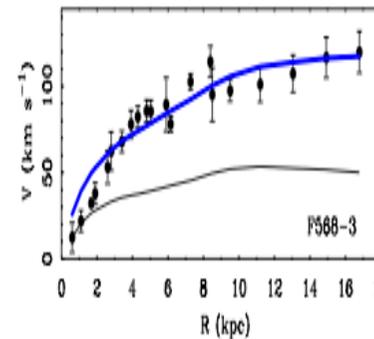
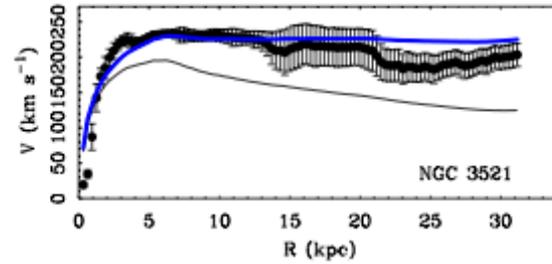
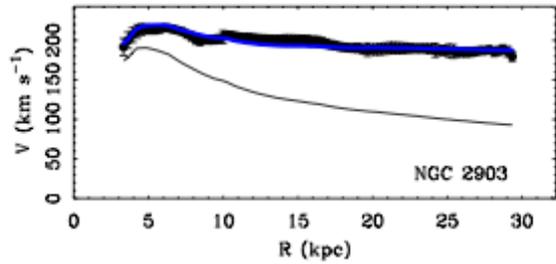
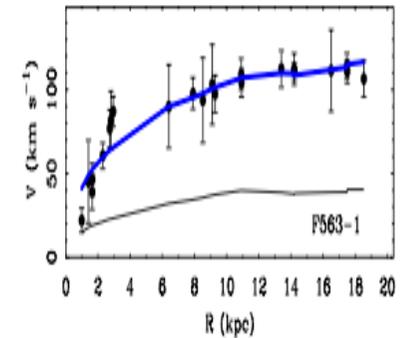
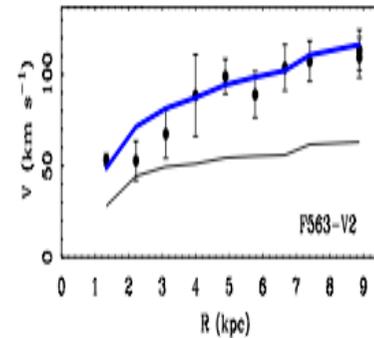
- 1) Accélération en $\sim 1/r \rightarrow V_\infty = \text{cst}$
- 2) a_0 est l'accélération de transition par définition
- 3) $V^2/r = (GMa_0)^{1/2}/r$ at large $r \rightarrow$ relation de Tully-Fisher baryonique

- 4) Corrélation entre densité de surface baryonique moyenne et profil de la courbe de rotation
- 5) a_0/G densité de surface critique pour stabilité des disques
- 6) $a_0/(2\pi G)$ densité de surface centrale caractéristique des « halos »

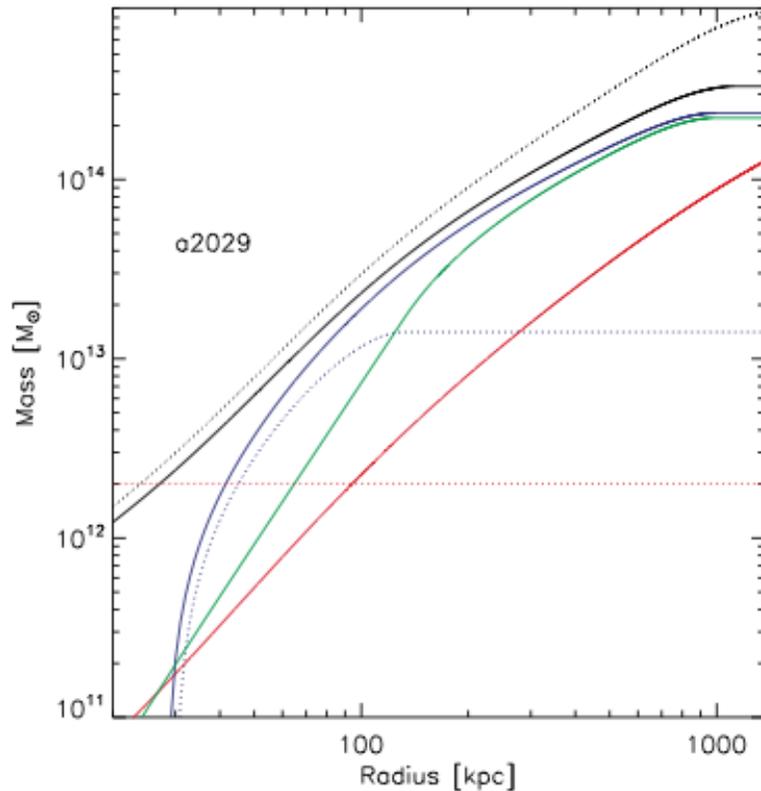
Courbes de rotation galactiques



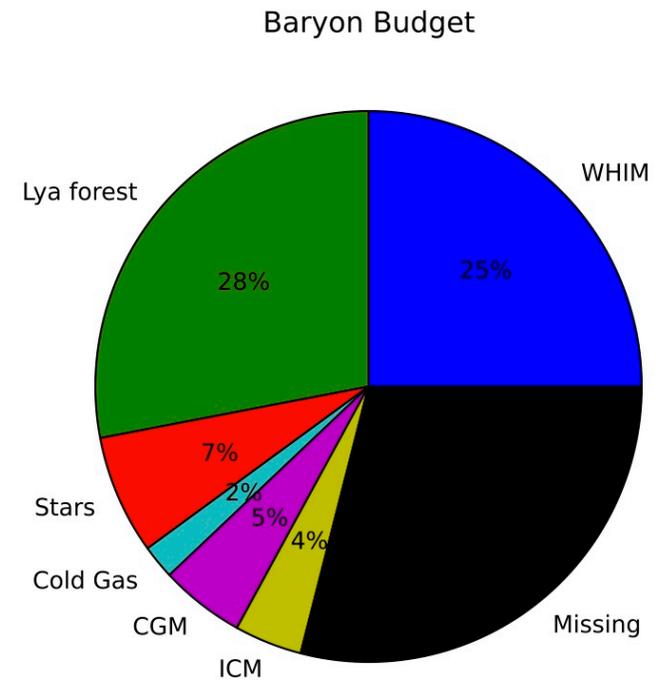
$$v(x) = 1/[1 - \exp(-x^{1/2})]$$



Amas de galaxies



Angus, Famaey & Buote (2008)

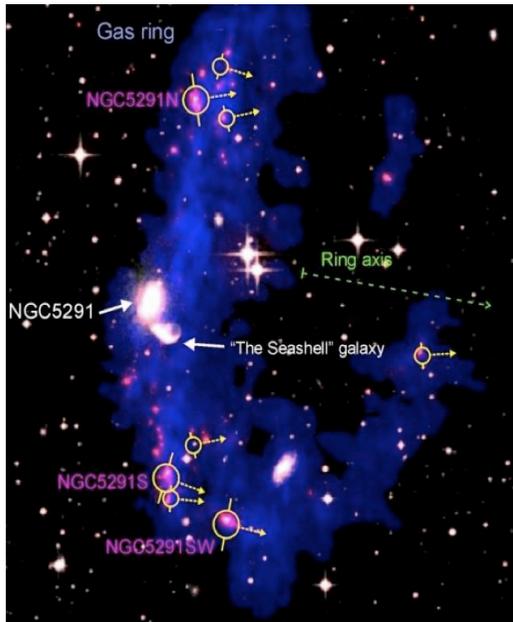


⇒ masse manquante additionnelle (concentrée au centre)

- 1) Nouveau degré de liberté se comportant comme de la matière noire (cf. Fond Diffus => amas = échelle intermédiaire?)
- 2) Ou mélange de gravitation modifiée et de matière noire chaude
- 3) Ou baryons manquants = «cluster baryonic dark matter» (**CBDM**)?

Isoler la matière ordinaire

Petites galaxies supportées par la rotation et denses en gaz ($> 10^{-21} \text{ kg/m}^3$)



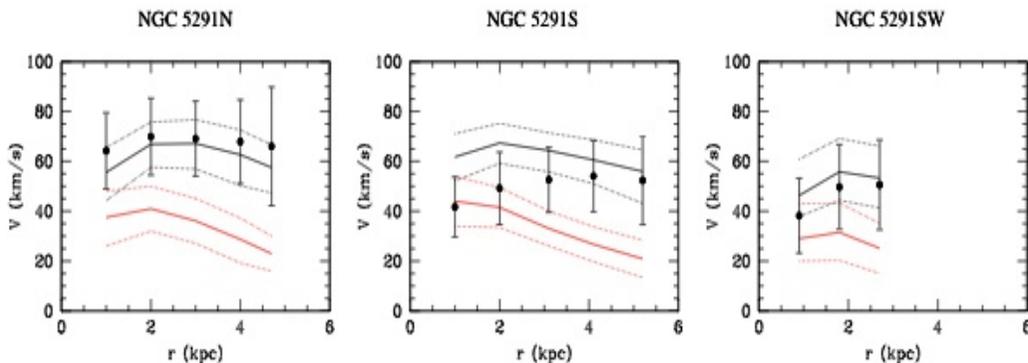
Galaxies naines de marée de NGC 5291

Bournaud et al. (2007)

Gentile, Famaey et al. (2007)

~~CDM~~

MOND



Grands amas supportés par la dispersion des vitesses, riches mais peu denses en gaz

CDM

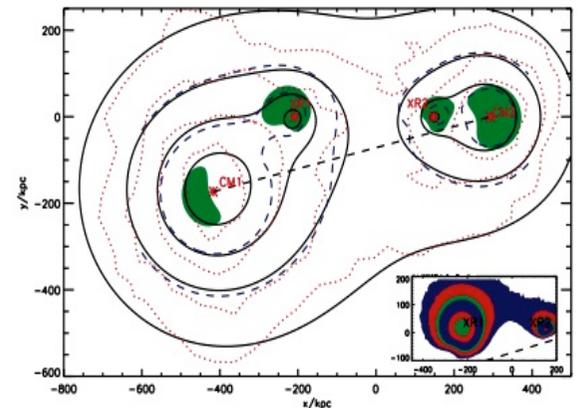
~~MOND~~



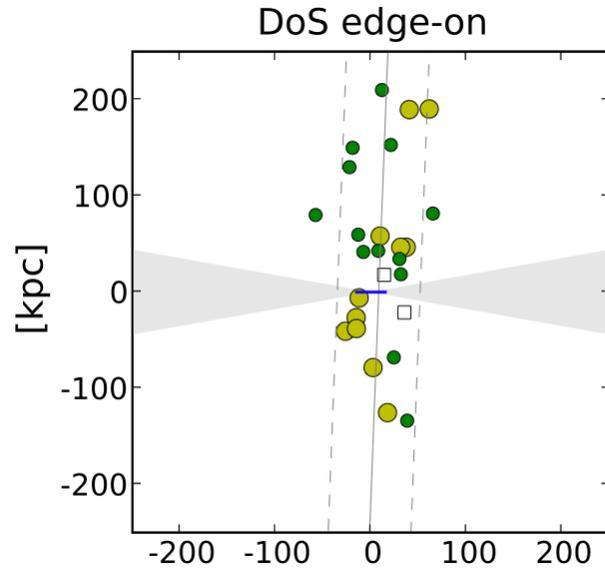
« Bullet Cluster »

Clowe et al. (2006)

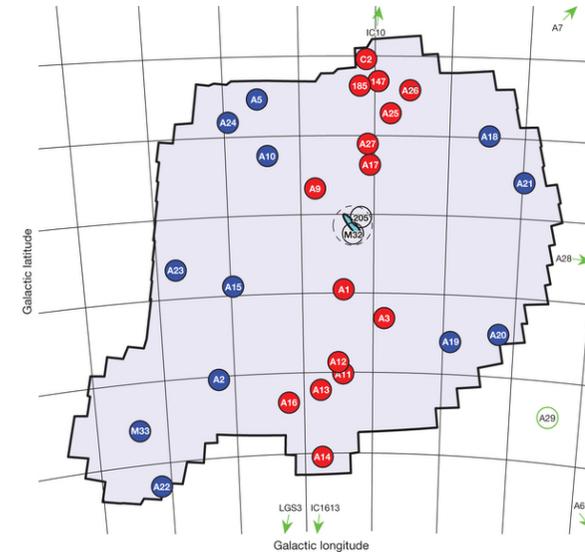
Angus, Shan, Zhao & Famaey (2007)



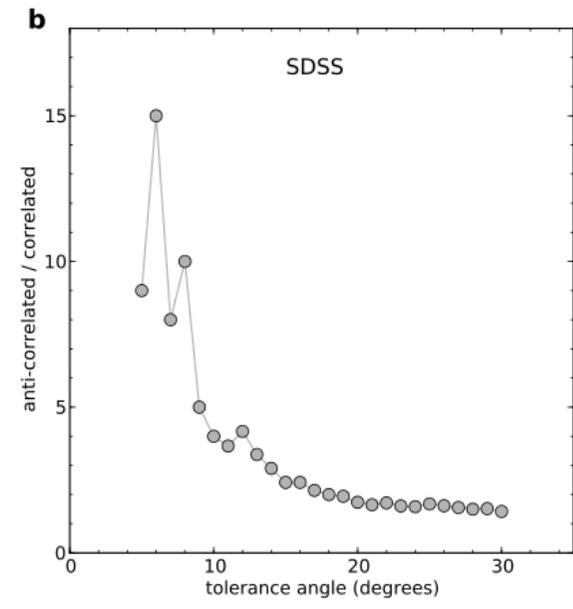
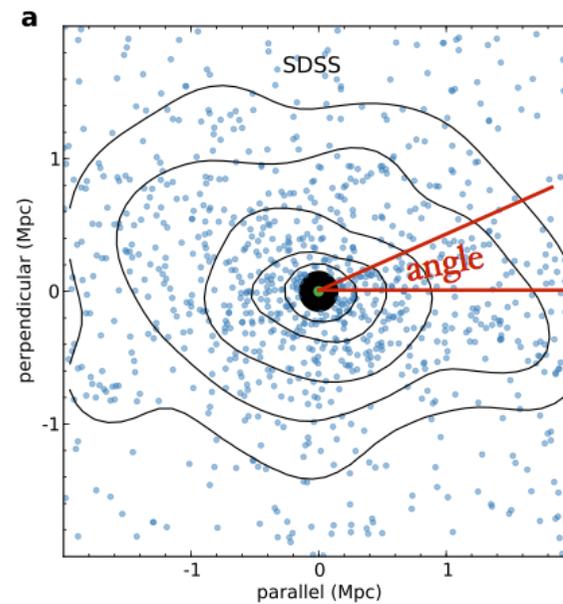
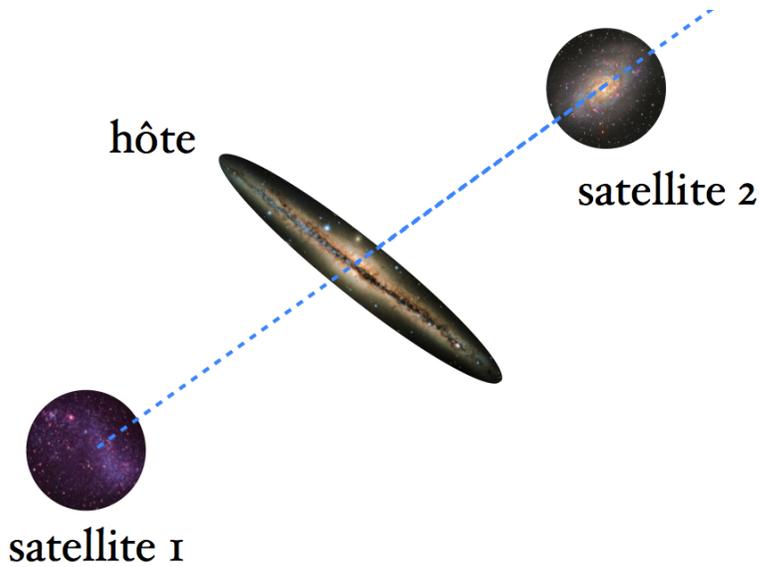
Problème des alignements de galaxies satellites



Kroupa, Famaey et al. (2010)



Ibata et al. (2013, 2014)



Conclusions et perspectives I

- **Fond diffus, structure à grande échelle et amas de galaxies** parfaitement compris et expliqués dans le cadre du modèle standard de la cosmologie, dit Λ CDM, dans son régime linéaire

Dans ce cadre, matière noire = particules qui forment un fluide de poussières sans dissipation ... et $\Lambda \approx 10^{-52} \text{ m}^{-2}$, sans aucun lien...

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int (R - 2\Lambda) \sqrt{-g} d^4x + S_{\text{matiere}}[\psi; g_{\mu\nu}] - \int c^2 \rho_{\text{matnoire}} \sqrt{-g} d^4x$$

- On continue à chercher ces particules dans de nombreuses expériences de détection directe (LUX, CDMS, ...)

Conclusions et perspectives II

- **DEUX GROS PROBLEMES AUX ECHELLES GALACTIQUES:**

- 1) **Champ gravitationnel entièrement prédictible à partir de la distribution de la matière ordinaire**

=> SOIT phénomène émergent lié à la physique compliquée des baryons aux échelles galactiques (« fine-tuning »...)

OU suggestif d'un **lien entre champ gravitationnel, baryons et nouveau degré de liberté lié à la matière noire dans l'action,**

via « nouvelle » constante $a_0 \sim \Lambda^{1/2}$ => **Recherche théorique**

Mais attention à reproduire aux échelles cosmologiques les effets d'un **fluide de poussières sans dissipation**

(donc effets de type matière noire «classique»)

dans le fond diffus (et éventuellement les amas de galaxies)

Conclusions et perspectives III

- **DEUX GROS PROBLEMES AUX ECHELLES GALACTIQUES:**

2) Distribution des galaxies satellites dans l'espace des phases en complète contradiction avec les modèles

=> Lien avec les filaments? (mais facteur 100 à 1000 en épaisseur)

OU alternative possible: mécanismes de formation à partir des disques des galaxies hôtes (galaxies « naines de marée »)

Ne peut marcher qu'avec une modification effective de la gravitation aux échelles galactique...

Conclusions et perspectives IV

- **Perspective de tests génériques, 2 différences fondamentales entre matière noire et modification effective de la gravité:**
 - **Friction dynamique**
 - En gravitation modifiée moins de fusions mais durant plus longtemps
 - Pas de ralentissement des barres en gravitation modifiée
 - Pas de ralentissement et chute des galaxies satellites
 - Pas de fusion de petits groupes de galaxies (type M81)
 - **Effet de champ externe (brisure principe fort d'équivalence)**
 - Dynamique interne des amas globulaires en fonction de distance au centre
 - Diminution de l'effet de matière noire dans les galaxies proches du centre des amas ou dans les galaxies satellites (e.g. autour de M31) ou naines de marée proches de leurs hôtes
- Explorer la dynamique via plusieurs traceurs du champ gravitationnel (e.g. rotation + mouvement vertical + courants de marée) et maîtriser la connaissance de la masse **baryonique**

Merci de votre attention

