## MOND et les Galaxies



Françoise Combes Observatoire de Paris

Mardi 4 Novembre 2008



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



## Evidences de la matière noire

→ Amas de galaxies, Masse viriel / masse visible ~100 (Zwicky 1937) Amas de Coma: vitesses des galaxies entre elles

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

Bien au-delà de la masse visible, la vitesse reste grande, au lieu de V<sup>2</sup> ~GM/r (Képler)



## Galaxies avec HI

HI: cartographie de l'hydrogène atomique Longueur d'onde 21cm M83: optique







HI dans M83: une galaxie semblable à la Voie Lactée

## Cisaillement gravitationnel

Rouge: gaz X Bleu: matière totale

#### Champ Cosmos





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

Massey et al 2007

# **Tully-Fisher relation**

Correlation with Vflat Better than Vmax

Uma cluster Verheijen 2001





McGaugh et al (2000) → Baryonic TF

## Hypothèses pour la CDM

Particules qui au découplage ne sont plus relativistes Particules **WIMPS** (weakly interactive massive particles)

**Neutralinos:** particule supersymmétrique la plus légère LSP Relique du Big-Bang, devrait se désintégrer en gamma (40 Gev- 5Tev)

Peut-être particules plus légères, ou avec plus d'intéraction non-gravitationnelles? (Boehm, Fayet, Silk 04, 511kev INTEGRAL)

**Axions** (solution au problème symétrie-CP, 10<sup>-4</sup> ev) Trous noirs primordiaux? (réionisation plus tôt, plateau en P(k)) Recherches directes et indirectes Pourraient être formées dans les prochains accélérateurs (LHC, 14TeV) Recherche directe: CDMS-II, Edelweiss, DAMA, GENIUS, etc

**Indirecte:** rayons gamma de l'annihilation (Egret, GLAST, Magic) Neutrinos (SuperK, AMANDA, ICECUBE, Antares, etc)



### Hypothèses pour les baryons noirs

Baryons en objets compacts (naines brunes, naines blanches, trous noirs) sont soit éliminés par les expériences de micro-lensing ou souffrent de problèmes majeurs (Alcock et al 2001, Lasserre et al 2000)

➔ Meilleure hypothèse, c'est du gaz, Soit du gaz chaud dans le milieu intergalactique et inter-amas Soit du gaz froid au voisinage des galaxies (Pfenniger & Combes 94)

# Où sont les Baryons? →6% dans les galaxies ; 3% dans les amas de galaxies gaz X

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

→ 5-10% dans le WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium) 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup>K Raies de OVI

→65% ne sont pas encore identifiés!

La majorité ne sont pas dans les galaxies



### Destin du gaz: froid ou chaud?

Après recombinaison, GMC de  $10^{5-6}$ Mo collapse et fragmentent jusqu'à  $10^{-3}$  Mo, H<sub>2</sub> cooling efficace

Les premières étoiles se forment, mais avec une faible efficacité L'essentiel du gaz ne forme pas d'étoiles

→ Après les premières étoiles, ré-ionisation

Le gaz froid peut survivre, assemblé dans les filaments à grande échelle, puis dans les galaxies

Façon de résoudre la « catastrophe de refroidissement »

Régule la consommation du gaz en étoiles

### Problèmes du modèle standard $\Lambda$ -CDM

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

→ Faible moment angulaire des baryons, et en conséquence formation de disques de galaxies bcp trop petits

Prédiction d'un grand nombre de petits halos, non observés

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

## Prédictions ACDM: « cusp » ou « core »

Distribution radiale de la densité de matière noire

Loi de puissance de la densité  $\alpha \sim 1-1.5$ , observations  $\alpha \sim 0$ 



### Dwarf Irr : DDO154 the prototype



F10. 14.—(a) Ratio of the local total (luminous and dark) mass to the stellar mass  $M_{\star}$  and to the H I mass  $M_{HI}$  (b) Complete mass model for DDO 154 using the rotation curve of Table 5. When not indicated, the errors are smaller than the size of the symbols. The contribution of the H I component was calculated using the surface densities of Fig. 9. The total H I mass is  $2.7 \times 10^8$   $M_{\odot}$ . The stellar disk has  $(M/L_B)_{\star} = 1.0$ , giving a total mass of  $5.0 \times 10^7 M_{\odot}$ . The halo parameters are  $r_c = 3.0$  kpc and  $\rho_0 = 0.015 M_{\odot}$  pc<sup>-3</sup>. The total mass (dark and luminous) at the last observed velocity point (7.6 kpc) is  $3.8 \times 10^9 M_{\odot}$ .

Carignan & Beaulieu 1989



Hoffman et al 2001 Truncation by HI ionisation V begins to decrease

# Inner cusps of CDM



#### Hoekstra et al (2001)



16

### Courbe de rotation des galaxies naines

Distribution radiale de DM identique à celle du gaz HI

Le rapport DM/HI dépends légèrement du type (plus grand pour les early-types)



### Moment angulaire et formation des disques

Les baryons perdent leur moment angulaire (AM) au profit de la CDM

Paradigme: baryons initialement → même AM spécifique que DM Le gaz est chaud, chauffé par les chocs à la température Viriel du halo

→Une autre façon d'assembler la masse est l'accrétion de gaz froid Le gaz est canalisé le long des filaments, modérément chauffé par des chocs faibles, et rayonne rapidement

L'accrétion n'est pas sphérique, le gaz garde son moment angulaire Gaz en rotation autour des galaxies, plus facile de former des disques

### Accrétion externe de gaz

#### Katz et al 2002, Keres et al 2005

Chauffage par les chocs à la température viriel, avant de refroidir à la température de l'ISM neutre? Sphérique

Accrétion de gaz froid plus efficace: chocs faibles, et rayonnement efficace

gaz canalisé le long des filaments domine à z>1





# Trop de petites structures

Aujourd'hui, les simulations CDM prédisent 100 fois trop de petits halos autour des galaxies comme la Voie Lactée



## Destruction des petites structures

Plus de gaz froid dans le halo des nainesMoins de concentration→ Fragmentation

Les fragments baryoniques chauffent la DM par friction dynamique et lisserait les cuspides dans les galaxies naines

La matière est plus dissipative, plus résonante, et plus sensible à **la destruction par fusion** 

Pourrait changer la fonction de masse des galaxies

### LSB (Mayer et al 01)



HSB

21

### Matière noire dans les amas de galaxies

Dans les amas, le gaz chaud domine la masse visible La plupart des baryons sont devenus visibles!

 $f_b = \Omega_b / \Omega_m \sim 0.15$ 

La distribution radiale dark/visible est renversée La masse devient de plus en plus visible avec le rayon

(David et al 95, Ettori & Fabian 99, Sadat & Blanchard 01)

La fraction de masse de gaz varie de 10 à 25% selon les amas



Distribution de la fraction de **gaz chaud fg dans les amas** L'abscisse est la densité moyenne au rayon r, normalisée à la densité critique (Sadat & Blanchard 2001)

# Autres solutions pour les courbes de rotation des galaxies



La matière noire peut résoudre le problème,

mais aussi.....

Une modification de la loi de Newton

(Milgrom 1983)

### Modification a faible accélération

 $a = (a_0 a_N)^{1/2}$   $a_N \sim 1/r^2 \Rightarrow a \sim 1/r \Rightarrow V^2 = cste$   $a_N = a \ \mu (x)$ 

 $x = a/a_0$   $a_0 = 1.2 \ 10^{-10} \ m/s^2$  soit 1 Angstroms/s<sup>2</sup>

 $x \ll 1$  Régime Mondien  $\mu(x) \rightarrow x$  $\mu(\mathbf{x})$ x>>1 Newtonien  $\mu(x) \rightarrow 1$ 1 0.8 0.6 0.4 0.2 Х 1 2 5 7 3 6 4

### Masse dynamique / Masse visible

Le rapport dépend remarquablement de l'accélération,
→ Seule quantité qui fasse changer de régime de façon universelle



26

### MOND: MOdified Newtonian Dynamics

Loi de la gravité modifiée, ou loi de l'inertie (Milgrom 1983)



 ${g_M}^2 \sim \! V^4 \!/ R^2 \sim GM \!/ R^2$ 

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

En-dessous de la valeur de l'accélération  $a_0 \sim 2 \ 10^{-10} \text{ m/s}^{-2}$  $g_M = (a_0 \ g_N)^{1/2}$ 

Potentiel logarithmique

Loi de Tully-Fisher  $M \sim V^4$ 

### Ajustement selon la densité de surface

Les courbes de rotation sont ajustées parfaitement, quel que soit le type morphologique (naines LSB, géantes HSB)



## Loi de Tully-Fisher

Luminosité  $\sim \Delta V_{rot}^4$ 



Les galaxies naines, dominées par le gaz, vérifient aussi la relation, si l'on prend en compte la masse HI

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



### Courbes de rotation multiples..

Sanders & Verheijen 1998, tous types, toutes masses --- gas, .... disque stellaire, --- bulbe



### Problèmes de MOND dans les amas

A l'intérieur des amas de galaxies, il existe encore de la DM, qui ne peut pas être expliquée par MOND, car **le centre de l'amas** n'est que modérément dans le régime MOND  $(0.5 a_0)$ 

Données en rayons-X: gaz chaud en équilibre hydrostatique, et les lentilles gravitationnelles faibles (cisaillement)

MOND réduit d'un facteur 2 la masse manquante
→Il reste une autre composante, qui pourrait être des neutrinos....
(plus des baryons)

La fraction baryonique observée n'est pas totalement la fraction universelle (15%) attendue

## MOND et les amas



Selon la physique des baryons, du gaz froid pourrait se trouver au centre des amas (flots de refroidissement) D'autre part, les neutrinos pourrait représenter 2x plus de masse que les baryons

## L'amas du boulet

### Gaz X



Preuve de l'existence de matière Non-baryonique?

Masse totale

Expliquable avec MOND + neutrinos (% habituel, Angus et al $^{33}$ 2006)

### Model of the bullet in MOND (Angus et al 2007)

.....Clowe et al 2006





100 Radius [kpc]

### CDM simulation

Collision velocity from the bow-shock = 4700±500km/s (Mach 3) Hayashi & White 2006 Farrar & Rosen 2007 → impossible to reconcile with CDM Milosavljevic et al 2007, Springel & Farrar 2007



CDM can only V < 3500 km/s MOND > 4500 km/s

Collision by 16% over-estimated?

V\_gas could be higher than V\_CDM <sup>36</sup>
#### Mahdavi et al 2007



### Abell 520 z=0.201

Red= X-ray gas Contours= lensing → Massive DM core Coinciding with X gas but devoid of galaxies

Cosmic train wreck

Opposite case!

# Abell 520 merging clusters



Contours=total mass Contours = X-ray gas

5 Contours 12 ruy gus

How are the galaxies ejected from the CDM peak??

#### Jee et al 2007

## CL 0024+17



-50 50 0 X (arcsec) 100



0 X (arcsec)

#### Contours=lensing





#### Contours= X-ray

# Cosmic ring of DM, CL0024+17

*Jee et al 2007* 



#### Mass reconstruction





## Galaxies and DM not coinciding

CL0024+17 : known for a long time that 2 clusters are colliding along the line of sight (Czoske et al 2001)

At about the  $3\sigma$  level, the ring in DM is not seen in the galaxy distribution Qin et al 2008

Artefact of the weak lensing models?

MOND: Milgrom & Sanders 2008 interprete the ring as  $^{\circ}$ Phantom Dark Matter,  $r_t = (GM/a_0)^{1/2}$ 



# Simulation de la collision

ZuHone et al 2008: No DM ring, except for an initially circular velocity distribution  $\beta = -\infty$ Contrary to the simulation by Jee et al 2007



#### KATRIN KArlsruhe TRItium Neutrino Exp

The upper limit on neutrino mass (2.2ev) could drop to 0.3ev in 2014



43



# Perseus Cluster

Cooling flows, A few 10<sup>10</sup> Mo observed through cold molecules

Salomé et al 2006



## MOND: fit des data CMB, WMAP

#### **Inclut les neutrinos massifs 1-2eV**



Fit par MOND (avec aucune-CDM) des pics acoustiques (Skordis et al 06)



Fit avec CDM +  $\Lambda_{45}$ 

# Développements covariants pour MOND

- Théorie covariante de Lorentz TeVes, qui tend vers MOND à la limite (J. Bekenstein, 2004) → permet de considérer MOND et CMB, structure à grande échelle
- Théorie qui remplace GR, et tend vers Newton, ou MOND selon la valeur de acc, permet d'expliquer les lentilles gravitationnelles
- Etend la théorie AQUAL, qui résolvait la conservation du moment (formulation lagrangienne), sans propagation superluminique

# Conséquences de MOND relativiste

Principe d'équivalence faible vérifié (masse gravit et inertie) Mais pas le principe d'équivalence fort (invariance en fonction de l'espace-temps)

➔ Métrique de l'espace différente de la métrique gravitationnelle TeVeS a trois paramètres libres

 $[a_0 \sim c H_0 aujourd'hui, mais ne varie pas dans le temps]$ 

Traite les lentilles gravitationnelles, conformément aux observations (comme GR +DM), lentilles fortes ou faibles

## Interprétation de MOND?

Analogie avec l'électromagnétisme  $GM/r^2 = g_N = \mu (g_N + g_s) = \mu/(1-\mu) g_s$ 

 $E = (D - P)/\epsilon_0 \rightarrow -Q/r^2 = d = \mu (d + p) = \mu/(1-\mu) p$ 

 $\epsilon_0$  permissivité du vide,  $\mu$  permissivité relative d= D/ $\epsilon_0$ , p = -P/ $\epsilon_0$ 

Analogie entre la charge –Q et la masse M, créant un champ en  $1/r^2$ en l'absence de « diélectrique » Le champ scalaire  $g_s$  de la 5<sup>ème</sup> force joue le rôle de la polarisation p et l'accélération totale  $g = g_N + g_s$  celle du champ E = d + p

Origine quantique, le vide étant polarisé par les baryons et leur gravité?

## **Gravitational Polarization**

In the context of General Relativity (Blanchet & Tiec 2008)

An action in standard GR is proposed, at the phenomenological level Dipolar medium, that could be polarized by gravity

The dipolar fluid is equivalent to standard DE and DM

With the hypothesis of weak clustering of the dipole moment mass distribution, the theory can reproduce MOND phenomenology at galactic scales

 $\Lambda \sim a_0^2/c^4$ , as observed  $(a_0 \sim cH_0/2\pi)$ 

## Anomalie de Pioneer

Les sondes Pioneer 10 et 11, ont mesuré une accélération anormale après 10 AU dans le système solaire, du même ordre que  $a_0$ 

Autres explications?





Contraintes sur MOND à partir d'observations

Tests et contraintes sur la théorie?

Peut-on déterminer la forme de la fonction d'interpolation µ?

# MOND in the Milky Way



Contrary to CDM MW is dominated by baryons

#### TVC: Terminal Velocity Curve Vs longitude





# Vitesse d'échappement

Potentiel en régime MONDien  $\Phi(r) = (GMa_0)^{1/2} \ln r$ 

 $\frac{1}{2} V_{esc}^2 = \Phi(\alpha) - \Phi(r) \rightarrow \text{ pas d'échappement possible!}$ 

 $\equiv \frac{|g|}{a_0}$ 

Mais une galaxie n'est jamais totalement isolée 
→ Effet du Champ extérieur

$$-\nabla \cdot [\mu(x)g] = 4\pi G\rho(X, Y, Z), \qquad x$$

# EFE: External Field Effect

If external field  $g_e$ , is in the X direction

At large radii, it is equivalent to a dilatation  $\Delta$ 

 $\Phi^{\infty}_{\rm int}(X, Y, Z) = -\frac{GM_{\rm int}}{\mu_m \sqrt{(1 + \Delta)(Y^2 + Z^2) + X^2 + s^2}},$ 

Define an internal potential  $\Phi_{int}$ 

$$\nabla^2 \Phi_{\rm int} + \Delta \frac{\partial^2}{\partial X^2} \Phi_{\rm int} \to 4\pi G \rho / \mu_m,$$

Where  $g \ll g_e \ll a_0$ Keplerian dependence, with renormalization  $G \rightarrow Ga_0/g_e$  Voie Lactée: effet d'Andromède

Observations RAVE (Smith et al 2007)  $\rightarrow$  498 <  $v_{esc}$  < 608kms<sup>-1</sup>

544 km/s  $\rightarrow$  g<sub>e</sub> = a<sub>0</sub>/100



Wu et al 2007 Simulations avec le modèle de Besançon

# Dwarf Irregular NGC 1560

Escape from a dwarf galaxy?



# EFE: precession

#### Newton: aucun effet



MOND: effet non-linéaire, couple gravitationnel et précession
Violation principe équivalence fort
➔ Origine des Warps?

## Orbit of the LMC (Large Magellanic Cloud)



Recent proper motions measurements with **HST** Reveal that the velocity of the LMC is 378km/s (SMC 302km/s) *Kallivayalil et al 2006, Piatek et al 2007* 100km/s higher than before, close to escape → First passage of LMC+SMC → Origin of the Magellanic Stream? Besla et al 2007

Tidal forces, or ram-pressure stripping? Efficiency? *Ruzicka et al 2008, Mastropietro 2008* 



# Multi-grid algorithm



Différences finies + grille adaptative  $\nabla[\mu(|\nabla\Phi|/a_0)\nabla\Phi] = 4\pi G\rho,$ 



# Influence of DM halo

Without DM (MOND) With DM halo 1.7 1.5 0.40.60.81 2 2.21.2 3.2 1 4 ŝ 2.5

*Tiret & Combes 2007* 

61

## Bar strength and pattern speed with and w/o DM





With DM, the bar appears
later, and can reform
after the peanut weakening
through halo AM exchange,
→ But Ωb falls off



Tiret & Combes 2007

# Peanut formation and evolution



Simulations with stars only (no gas) The peanut moves in radius due to the slowing down of the bar Angular momentum exchange with the DM halo



63

# Statistiques de force de barre

Près de 80% de galaxies spirales barrées aujourd'hui

Problème complexe: la présence de gaz détruit la barre, l'accrétion peut reformer la barre





➔ MOND compatible avec les observations

# Resonant rings with MOND

Now with gas



*Tiret & Combes 07* 

# Test crucial de MOND: interactions de galaxies, friction dynamique



Les Antennes Prototype du major merger

# Interactions of galaxies: the Antennae: MOND versus CDM

Dynamical friction is much lower with MOND: mergers last much longer



Also much longer time-scale for merging of dissipationless galaxies (Nipoti et al 2007)







### Adaptive grid for galaxy interactions





#### MOND

#### Observations

# Friction Dynamique


## Debate on dynamical friction

Ciotti & Binney 2004 (CB04), Nipoti et al 2008 Analytically, the dynamical friction is predicted stronger with MOND than in the ENS, Equivalent Newtonian system with dark matter

However, depends on geometry, plane-parallel, or spherical
Slowing down of bars: CB04 predicts a stronger slowing in MOND
But their bars is only 5% of the baryonic mass, not realistic
→ N-body simulations show that CDM bars are much more
slowed down (Tiret & Combes 2007a)

Nipoti et al 2007, Tiret & Combes 2007b reveal that DF is less efficient in galaxy interactions
In CDM, a lot of particles acquire E and AM, and DF concept applicable
→ In MOND, a small number of particles in the outer parts acquire big quantities (no analytical treatment)

#### Globular clusters in dwarfs, wide binaries..

Globular clusters in dwarf galaxies should spiral inwards in a Hubble time The existence in Fornax of 5 GC without any stellar nuclear cluster is a challenge for both CDM and MOND (Sanchez-Salcedo et al 06)

Exitence of wide-binaries of stars in dwarf spheroidial is also a challenge for CDM models They should have tighten due to dynamical friction againt CDM particles (Hernandez & Lee 2008)



Merger induced starbursts degeneracy

CDM: dynamical friction on DM particles very efficient → mergers in one passage

MOND: with the same Angular momentum, the merger will require many passages

Starburst at each passage when minimal approach

➔ Number of "merger/SB" can be explained both ways





Formation de naines de marées

## Formation of Tidal Dwarf Galaxies

Exchange of AM is within the disk:  $\rightarrow$  much easier with MOND to form TDG

In DM, requires very extended DM distribution (Bournaud et al 03)



### TDG in N5291 HI ring



#### Head-on collision simulation



#### Dynamics of the TDGs



With MOND, Gentile et al 2007

All inclinations= 45°, from simulations (Bournaud et al 07)  $\rightarrow$  dark H<sub>2</sub>



#### Compatible also with no DM

→ In fact, the inclination could be more edge-on (65-90°)

→ The radial HI distribution is unknown

→ If 45°, either cold  $H_2$ , or MOND can explain (also Milgrom 07)



TDG rotation curves accounted for without any DM, with 65°

# MOND and the dark baryons

Is MOND compatible with the existence of dark gas in galaxies? What fraction provides the best fit to the rotation curves?

Fit de ~50 courbes de rotation, c=M(dark)/MHI



*Tiret & Combes 08, Milgrom 07* 

#### Nuages H<sub>2</sub> froid et Matière noire baryonique

Sur 90% de baryons noirs, 10% pourraient être dans les galaxies

Autour des galaxies, la matière baryonique domine

La stabilité du gaz  $H_2$  froid est due à sa structure fractale



Masse ~  $10^{-3}$  Mo densité ~ $10^{10}$  cm<sup>-3</sup> taille ~ 20 AU N(H<sub>2</sub>) ~  $10^{25}$  cm<sup>-2</sup> t<sub>ff</sub> ~ 1000 yr

Caractère adiabatique: la durée de vie est bien plus longue

Fractal: les collisions mènent à la coalescence, chauffage, et à un équilibre statistiques (Pfenniger & Combes 94)

## Combination with MOND

NGC 1560: fits with variation of  $a_0 \sim 1/(gas/HI)$ 



### Phantom dark matter PDM

MOND forces could be interpreted in terms of Newtonion force +DM

 $\rho_{PDM} = \Delta \Phi_{MOND} / 4\pi G - \rho_{vis}$ 



 $\rho_{PDM}$  peut être négative

## Dark matter in Ellipticals

Absence of gas  $\rightarrow$  very difficult to trace the potential Velocity dispersions of stars: degree of anisotropy??

Globular clusters as tracers X-ray gas, in hydrostatic equilibrium



# PN and DM in Ellipticals

Planetary Nebulae: Romanowsky et al 2003 Dearth of dark matter??

..... Visible matter (isotropic)- - isothermal (isotropic)





## Anisotropy of velocities

 $\beta = 1 - \sigma_{\theta}^2 / \sigma_r^2$ , - $\propto$ , 0, 1 circular, isotropic and radial orbits

When galaxy form by mergers, orbits in the outer parts are strongly radial, which could explain the low projected dispersion (Dekel et al 2005)

Elongated orbits, simulated by a single merger Is it the case for all E-gal? (multiple mergers, more relaxed objects..)

The observation of the velocity profile is somewhat degenerate and cannot lead to the dark matter content univocally





## Dwarf spheroidals

Quite difficult to model, many free parameters, as **the anisotropy of velocities:** 

If isotropic models  $\rightarrow$  cores are better than cusps

For steep cusp, high tangential anisotropy is required

The degeneracy density-anisotropy could be raised by kurtosis (Lokas 02)

Problem of truncation of light (25'), and decrease of  $\sigma_v$  at 30' (Wilkinson et al 04)



Draco Dwarf Galaxy By SDSS



## Fornax and Draco



### DM profile from satellites

SDSS, 2500 deg<sup>2</sup>, 3000 satellites Mb=-16, -18 (galaxies –14) **Removal of interlopers**  $\sigma_v = 120$ km/s at 20kpc and 60km/s at 350kpc (Prada et al 2003)

 $\rightarrow$  Declines agree with  $\rho \sim r^{-3}$  of NFW (CDM profile)

 $\sigma_v$  within 100kpc varies as L<sup>0.3</sup>, quite close to TF relation

In average 2 satellites per galaxy, and 0.2 interlopers

See also McKay et al (2002)  $\sigma \sim L^{0.5}$  from 1225 SDSS satellites  $M_{260}$  in agreement with lensing results **But flat velocity dispersion recovered (as if \rho \sim r^{-2})** 

# Dispersion versus radius (simulated)

Simulations  $M_{vir}=1.5 \ 10^{12} \ h^{-1} \ M_o$ Filled: true satellites

Open: interlopers Within 350kpc

\_\_\_\_without

----- with interlopers From Klypin et al 01

Prada et al 2003



#### Gaussian method to reject interlopers

Distribution of relative V of true satellites in N-body simulations

Close to Gaussian curve (except high  $\sigma$ )

This is used to suppress the interlopers: Gaussian + constant fit →But constant varies (R) →And HPBW depends on R<sub>0.2</sub>

This is exactly what we want to measure!!





### Test of the SDSS satellites

250

If the anisotropy parameter is taken into account, MOND gives a good fit Was not considered by Klypin & Prada 07

250

200

150

100

50

0

1

10

Radius (kpc)

 $\sigma_{ke_6}\,(km.s^{-1})$ 

Angus et al 2007



#### Velocity dispersion around E-gal in MOND

2 types of CDM CDM1: NFW cusp CDM2: as required by rotation curves

350 CDM1 300 PN satellites 250 CDM2 DV 200 CDM2 MOND, Newton CDM 150 Km/s MONE 100 50 Newton 0 0.01 0.1 100 10 1 1 CDM1 0.8 0.6 CDM1 0.4 CDM1 CDM2 β MOND. Newto 0.2 CDM2 CDM2 0 MOND -0.2 MOND -0.4 -0.6 0.1 10 100 0.01 Radius (kpc)

*Tiret et al 2007* 

#### MOND et les groupes de galaxies

Il existe encore de la masse manquante dans les groupes.
Si dans les amas (T>3kev), cela pourrait être les neutrinos, C'est impossible dans les groupes, à cause des contraintes de phase (Tremaine-Gunn limit)
Pour T< 2kev, MOND a des problèmes:</li>
→ Masse baryonique, ou neutrinos stériles?

Groupes compacts: la moindre friction dynamique résoud le problème de **l'existence des groupes de Hickson** 

### Masse résiduelle en fonction de M

Fit des groupes et amas, Angus et al 08 Les neutrinos ne peuvent pas expliquer la masse manquante dans les gorupes, Baryons noirs?





## Perspectives pour la matière noire

Paramètres de l'Univers:  $\Omega_m$ =0.27, dont 15% baryons

Le modèle de matière noire CDM, avec  $\Lambda = 0.73$  est celui qui correspond le mieux aux observations, surtout pour les grandes structures *Attendre les résultats du LHC?* 

Encore des problèmes non résolus:

CDM devrait dominer au centre des galaxies avec une cuspide
 Problème du moment angulaire des baryons, perdu au profit de la CDM, et formation des disques
 Prédiction d'une multitude de petits halos, non observés

La physique des baryons pourrait résoudre une partie des problèmes et notamment l'accrétion de gaz froid

Ou bien MOND?? Autre gravité modifiée?

### Parmi d'autres possibilités ...

Au lieu d'interpréter les observations: accélération de l'expansion, matière noire.. en termes de GR + autres élèments Changer et généraliser la thèorie de la gravitation

Même démarche que celle d'Einstein qui généralisait la théorie de Newton Theories f(R): ajouter des termes au scalaire de Ricci R, ou au tenseur R<sub>uv</sub>..

Ou bien modèles de dimension plus élevée

Branes, inspirées de la théorie des cordes: une 5ème dimension dans laquelle s'étend la gravité (Randall & Sundrum 1999) DGP model (Dvali et al 2000, Deffayet 2001)

Matière noire + Energie noire 3 R"/R = -  $4\pi G (\rho + 3 P) + \Lambda$ 

L'expansion de l'univers s'accélère, Solutions:

→ Univers dominé par un composant w=  $P/\rho < -1/3$  (quintessence)

 $\rightarrow$  Constante cosmologique  $\Lambda$  positive

→ Les équations de relativité Générale sont à changer...

Parmi les modèles de gravité modifiée, il est possible de rendre compte de matière noire et énergie noire

### Energie noire, quintessence

#### Energie quantique du vide?

Prédictions 120 ordres de grandeur de plus à l'échelle de Planck56 ordres de grandeur à l'échelle EW (Electro-weak)Ne domine que très récemment (principe anthropique?)P = w E $w \sim -1$ w = w0 + w1 z

Constante cosmologique Λ = constante
ou bien ρ(t) densité dépendant du temps?
→ 5ème élément ou "Quintessence"
Les 4 autres étant:Photons, Neutrinos (Leptons), Baryons, CDM

Serait-il possible que le 4ème (inconnu) et le 5ème, l'énergie noire soient la même chose?

#### Gas de Chaplygin → Quartessence