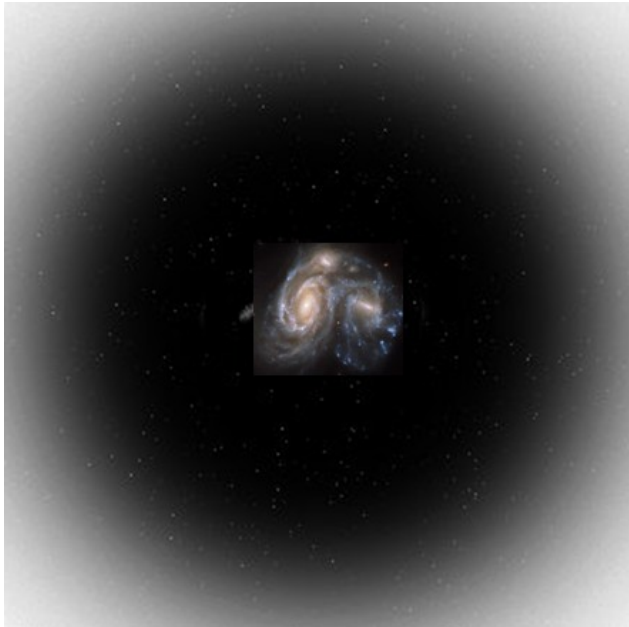


Vera RUBIN et la matière noire



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie



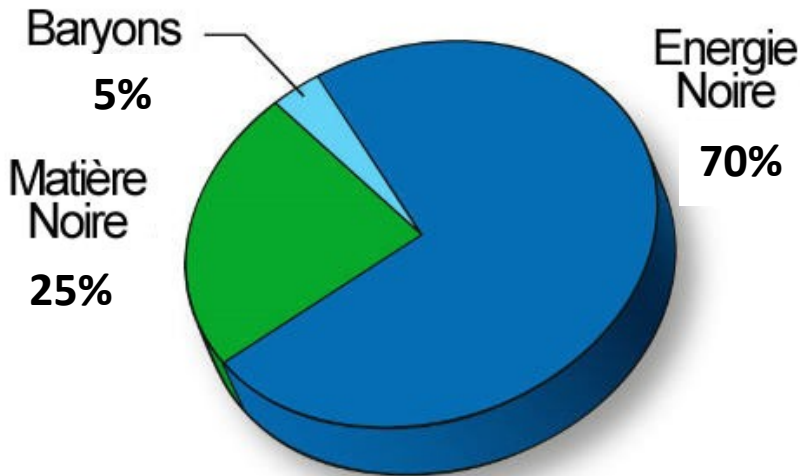
Françoise Combes
Juillet, 2019



Vera Rubin et les courbes de rotation



Matière noire ??



Densité moyenne de l'Univers

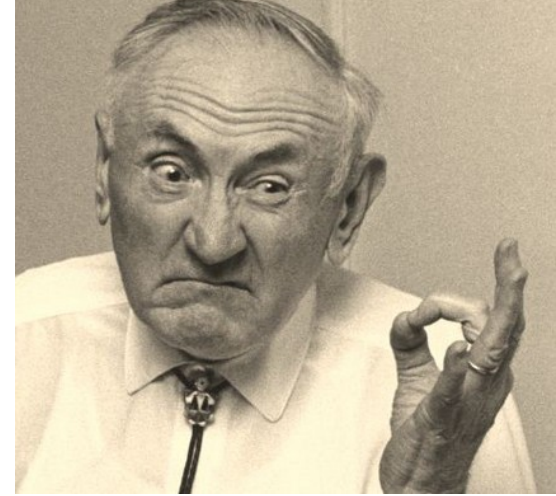
$$\rho_c \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

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

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

Une longue histoire

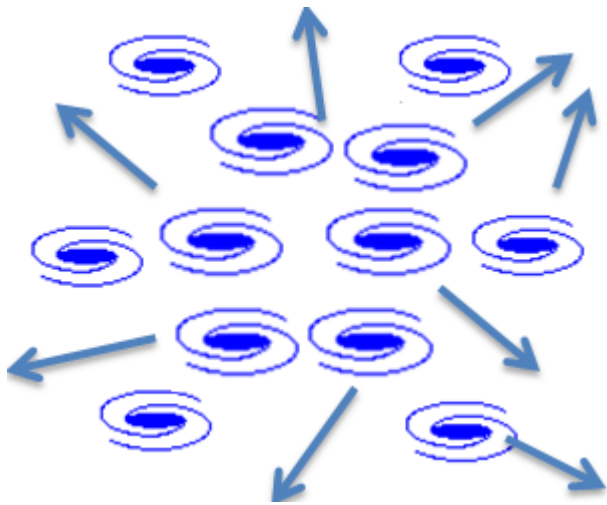
1933-7 – Fritz Zwicky calcule la masse des amas de galaxies en utilisant leurs vitesses



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

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...



Poincaré était-il le premier?



Poincaré, 1906

Il y a des étoiles que nous voyons, parce qu'elles brillent.
Mais n'y aurait-il pas des **étoiles obscures** qui circulent dans l'espace?

.....

... **matière noire**, contrairement à la matière qui brille.
Pouvons-nous considérer que l'évolution de la Voie lactée a commencé
quand la **matière était encore noire**?

In The Milky Way and Theory of Gases, PA 14, 475-488 (1906)



Matière noire dans les galaxies

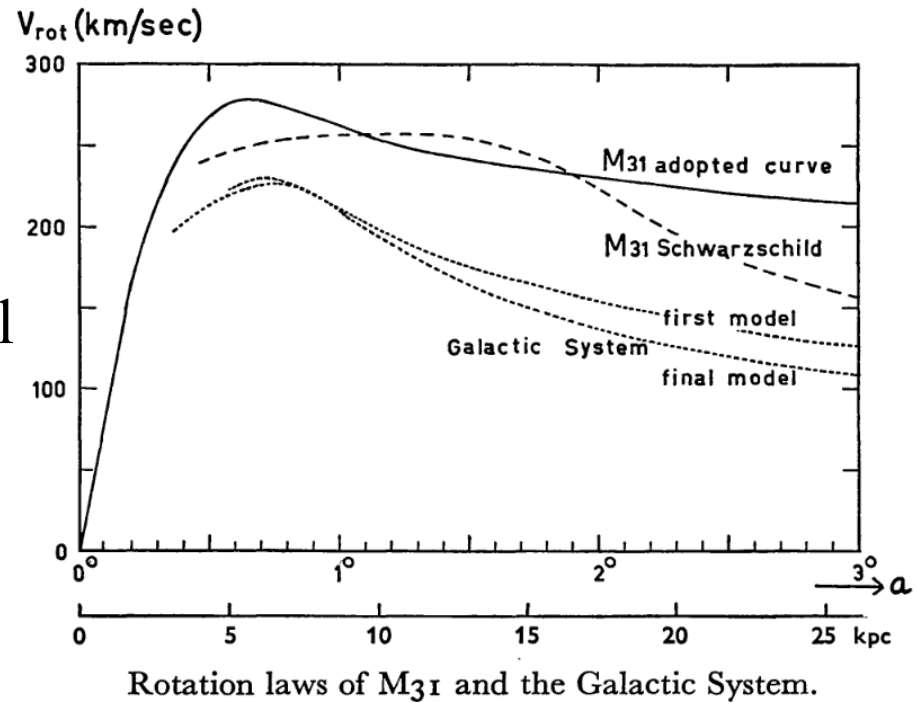
Courbes de rotation des étoiles
et du gaz ionisé (H α et [NII] 0.6mm)

Rubin, Ford et al 1978
Spectres optiques, étoiles, HII

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

→ **Courbes plates**

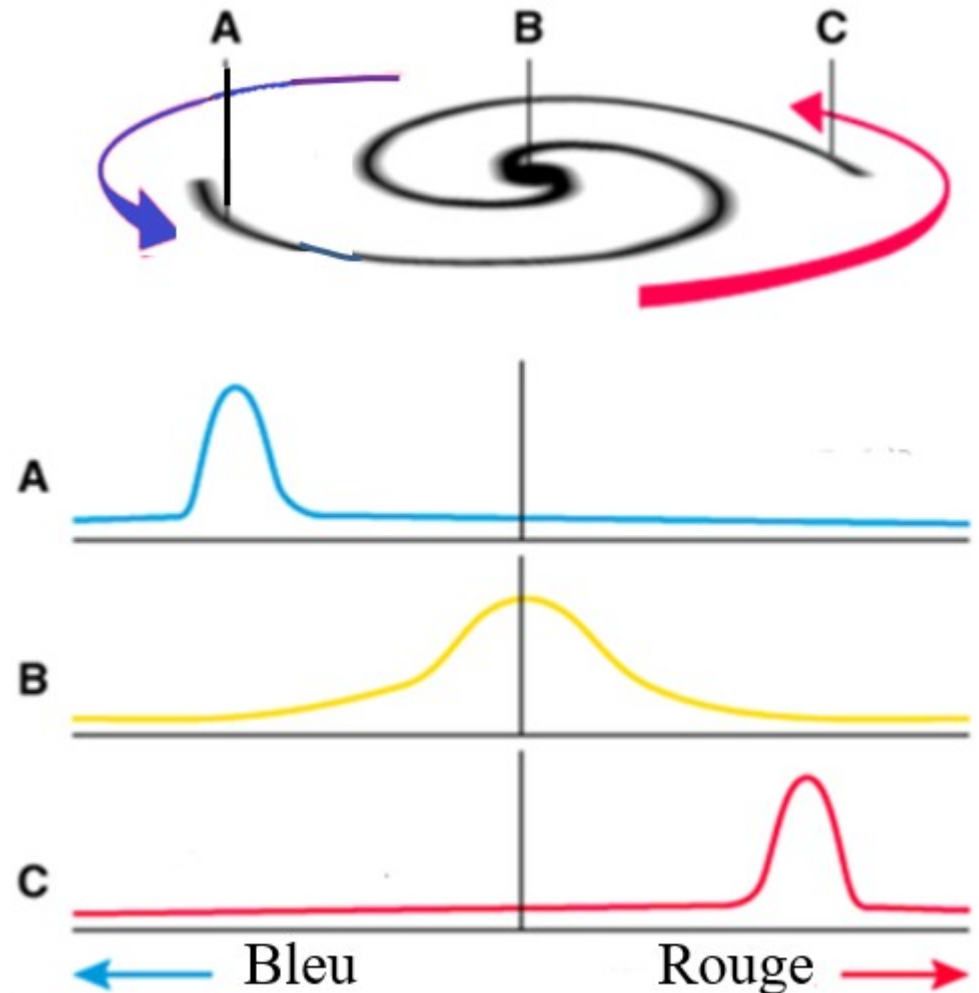
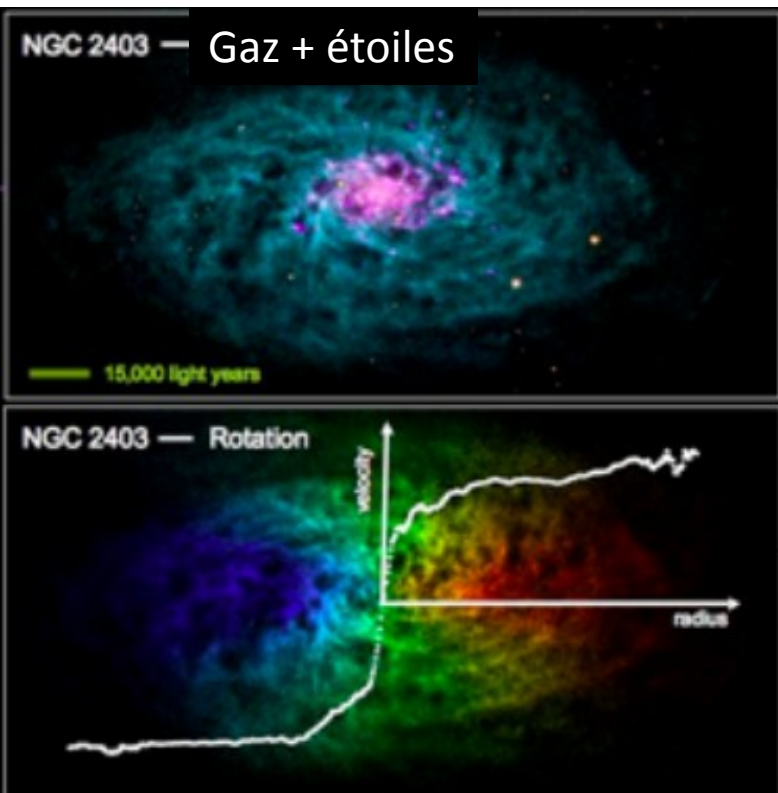
Interprétation à l'époque
Rapport M/L augmente avec le rayon



Van de Hulst 1957

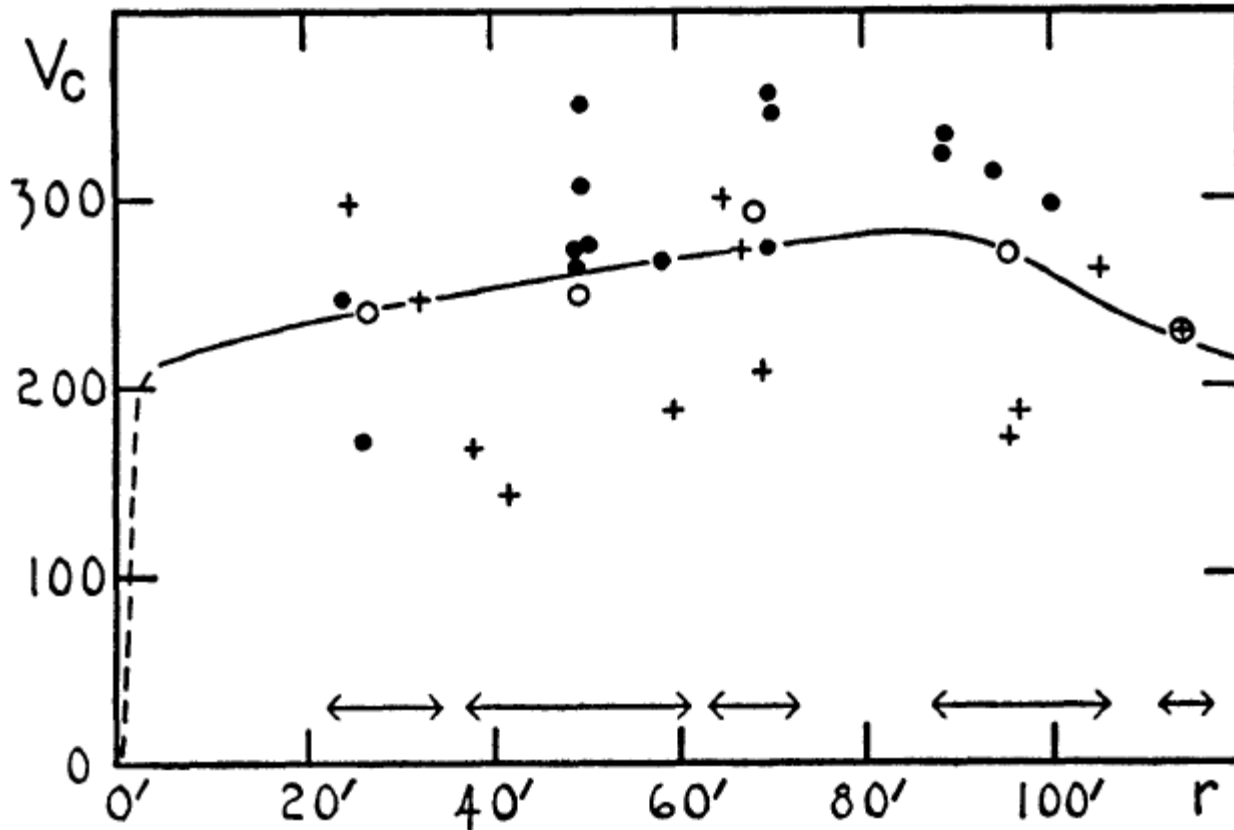
Comment construire une courbe de rotation?

- Effet Doppler
- Repliement des deux côtés,



Premières courbes de rotation: M31

Schwarzschild 1954: la masse suit la lumière! (courbe noire)
Surtout on ne connaît pas bien le rapport M/L des étoiles



Observations de Mayall

Gravité modifiée

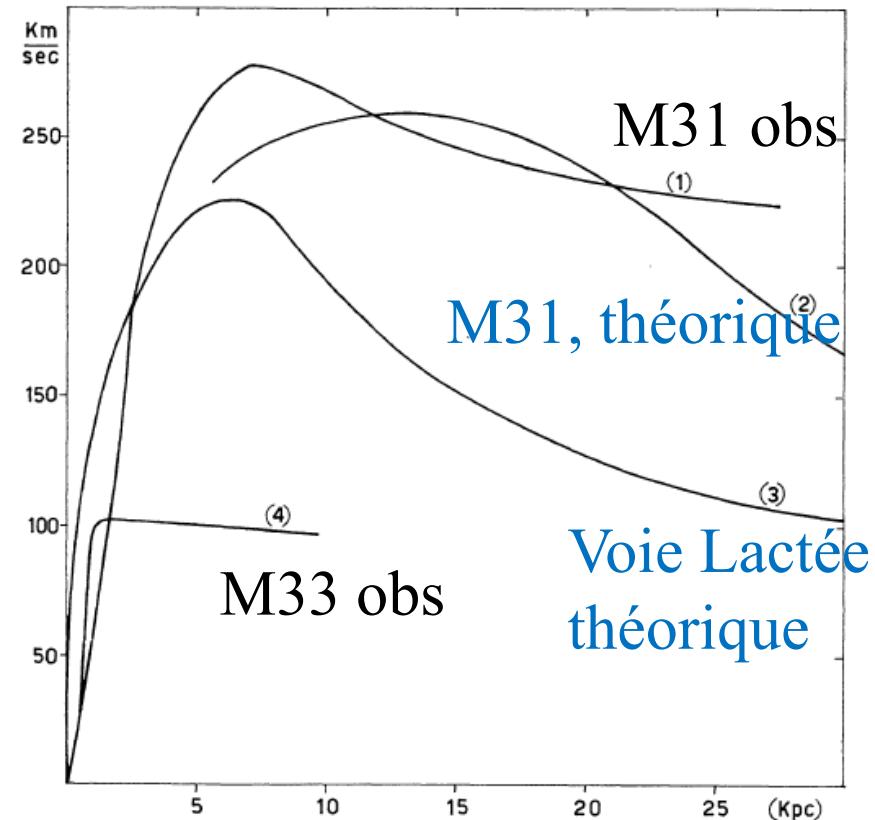
Arrigo Finzi, à Rome en 1963
10-20 ans en avance sur son temps

**Pense que le rapport M/L des étoiles
ne suffit pas**

**Remarque que la masse croît en R
→ Propose un changement de la loi**

Force in r^{-2} → $r^{-3/2}$

Potential in r^{-1} → $r^{-1/2}$



Finzi 1963



Vera Rubin: enfance

1928 Naissance à Philadelphie, de père émigré très jeune (P. Cooper)

Curieuse en tout, **s'intéresse aux étoiles dans le ciel au lieu de dormir**
Elle lit beaucoup de livres, et dès 10 ans utilise un télescope de fortune

Elle aime l'école, mais le professeur de Physique est un problème
Ne s'adresse qu'aux garçons

Le jour où elle obtient une bourse pour le Vassar College, il lui dit
Tout ira bien, si vous ne faites pas de Science

1945: elle entre à Vassar à 17 ans
(Collège féminin jusqu'en 1969)

Aime beaucoup la riche bibliothèque
Elle a un télescope de 13cm, et utilise aussi le 40cm pour les étudiants



Vera Rubin: études

Visite de Richard Feynman à Vassar, et intéressantes discussions

Rencontre avec Robert Rubin, qui travaille avec Feynman



1948: Marriage, et Etudes d'Astronomie à Cornell

Effectue sa thèse de Master avec Martha Stahr, sur les galaxies à distribution de vitesses, il n'y en avait que 108 à l'époque

Après lecture du manuscrit, le chairman du département lui dit que cela devrait donner lieu à communication à l'AAS de Dec 1950

Mais en son nom à lui! (Vera avait juste son premier enfant)

Elle décide d'y aller, ses parents l'accompagnent en voiture, et le **talk de 10min** est un succès. Avec un brouhaha de réactions, parfois hostiles.

Vera Rubin: thèse

Vera s'instruit au cours d'Astrophysique du soir. Elle jongle avec sa vie de famille, elle aura 4 enfants

So mari travaille avec un étudiant de Gamow, Ralph Alpher

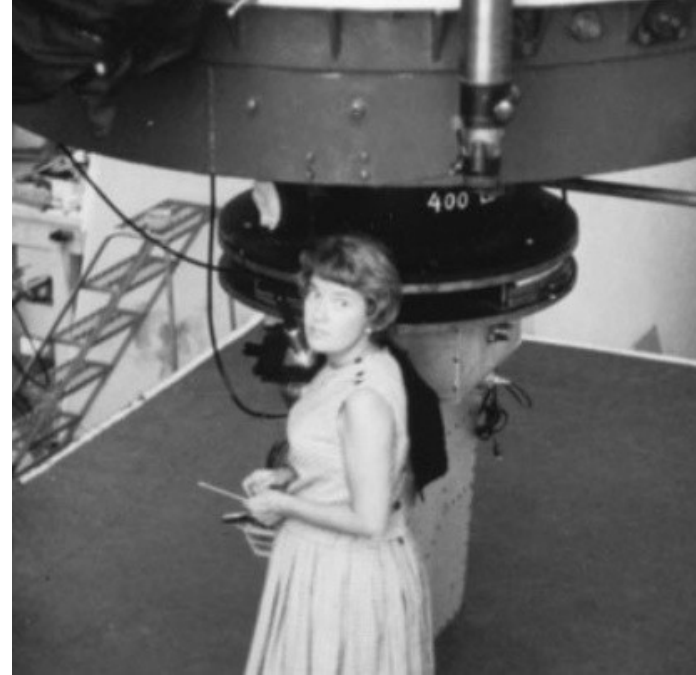
Elle rencontre Georges Gamow, et prépare une thèse avec lui, sur
« Une échelle caractéristique dans la distribution des galaxies »

Elle apprécie les discussions, et la vision d'ensemble de Gamow et participe à de nombreuses écoles d'été.

En 1954, elle fait lire son manuscrit de thèse à Gamow, qui le trouve OK, sans avoir vraiment vérifié les détails.

Mais envoyé à ApJ, l'éditeur Chandrasekhar refuse le papier, qui sera finalement publié dans les PNAS

“*Fluctuations in the Space Distribution of the Galaxies*”.



Vera Rubin: début de carrière



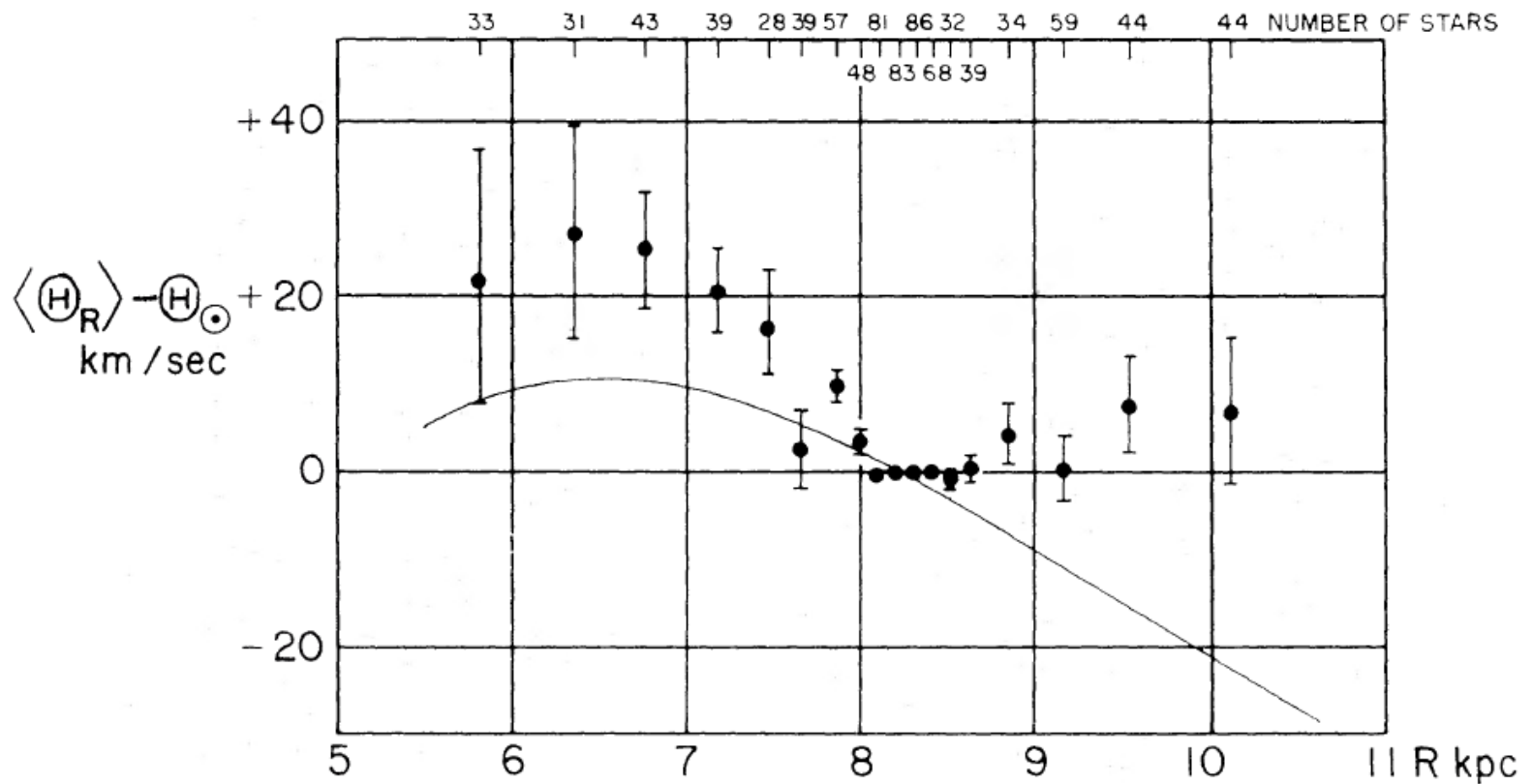
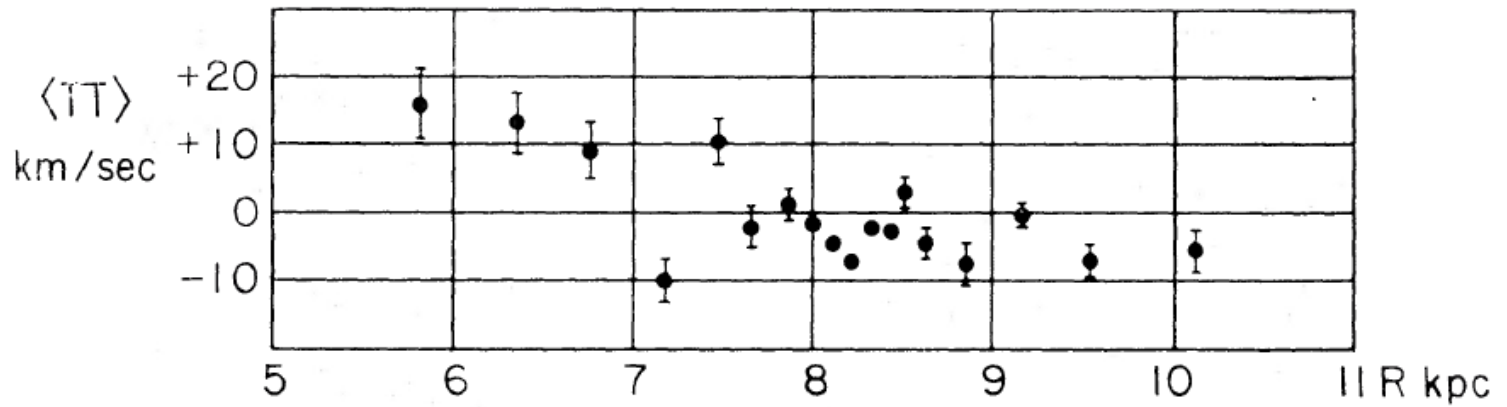
Juste après son PhD, Vera obtient un poste de chercheur à Georgetown Univ. Elle y reste 10 ans (1955-65)

Elle apprécie toujours les écoles d'été, et en **1959 ils vont en famille aux Houches, en bateau!** A l'époque, ces écoles pouvaient durer 1 mois
Ils reviennent aux Pays-Bas pour des écoles avec Jan Oort, Adriaan Blaauw, Lodewijk Woltjer, Margaret and Geoffrey Burbidge

1962: Catalogue de 1100 étoiles de la Galaxie, pour avoir un bout de courbe de rotation: **première courbe plate!**

Puis les années suivantes, elle travaille avec Geoff & Margaret Burbidge qui avaient de nombreux spectres de galaxies encore inexploités
Elle observe à McDonald, et au Palomar

Rubin et al 1962, avec 5 étudiants: étoiles dans la Voie lactée



Vera Rubin: publications

Elle demande un poste de chercheur/observateur à **Carnegie en 1965**: elle est la première femme à y être employée

Elle collabore avec Kent Ford, qui a un détecteur très sensible, un **tube-amplificateur** et ramène les plaques photos développées au labo et les mesure

Elle exige d'avoir une machine à mesurer à 2D



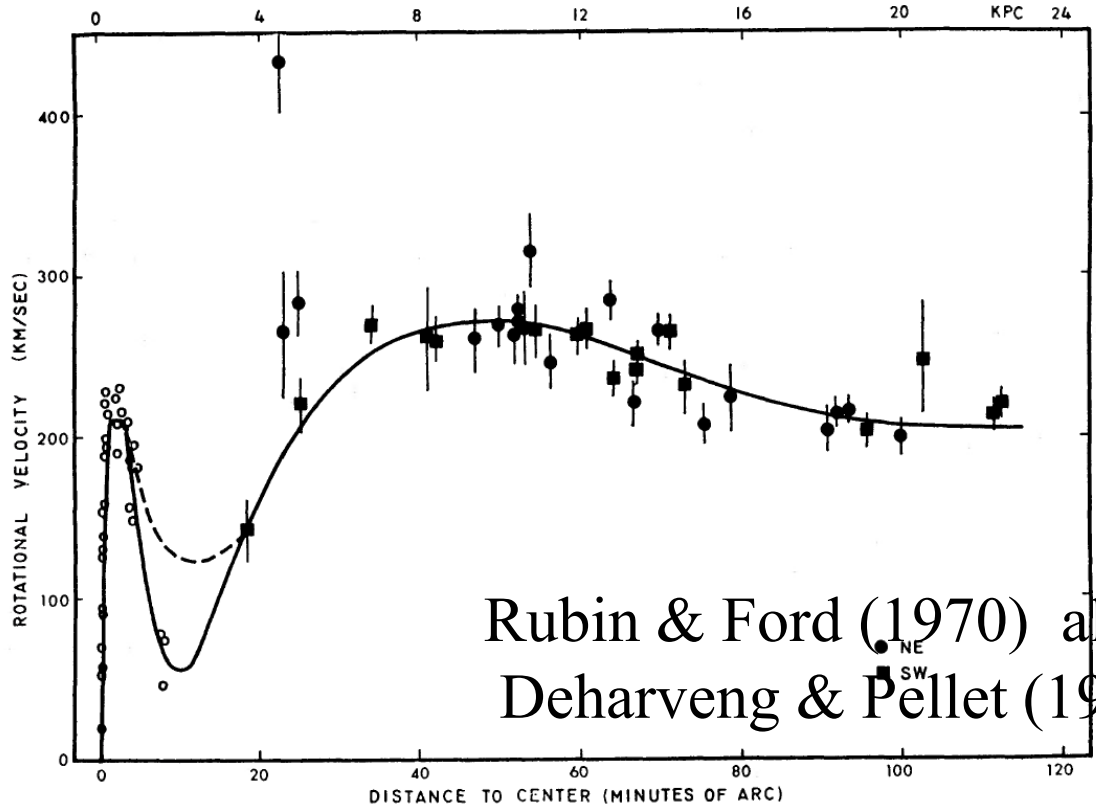
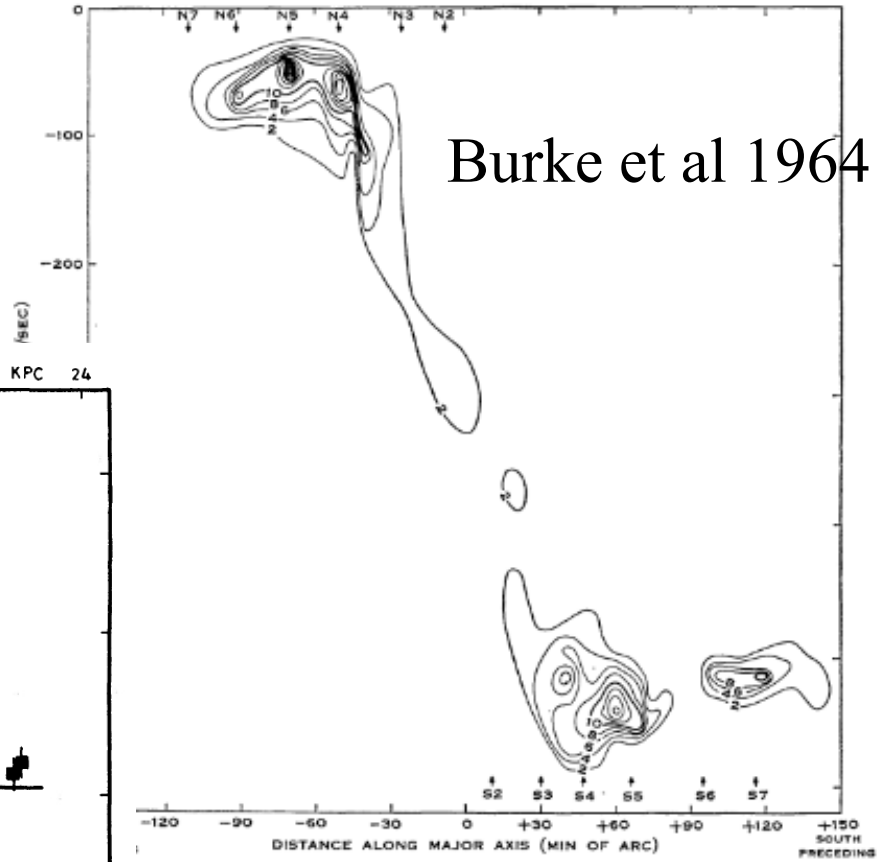
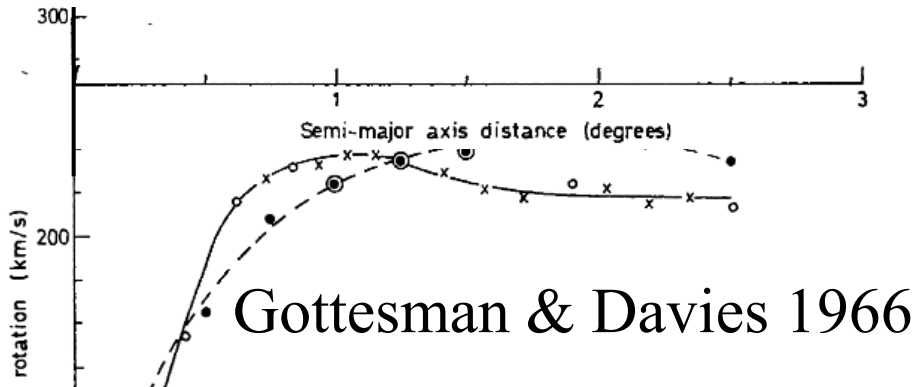
Après plusieurs publications de galaxies et courbes de rotation,
Ils s'attaquent à Andromède

Babcock (1939) avait publié des courbes (20h par étoile, ou région HII)
Baade avait fait une carte de 700 régions HII (Baade & Arp 1964)

Utilisant la carte de Baade, et avec 1.5h au lieu de 20h de pose

→ Une centaine de points!

Courbe de rotation d'Andromède



observed antenna temperatures along major axis of M31. Velocity is relative to local standard of rest. Baade's spiral arm crosses the major axis at approximately 100 minutes of arc.



La matière noire: un tabou

Vera Rubin ne mentionne **jamais la matière noire** dans ses papiers

Dans ses souvenirs, elle parle de ses conversations avec Jan Oort, qui lui-même n'en parlait pas, même après sa découverte de courbes de rotation plates (Oort, 1940)

Oort dit dans son article de 1940 (galaxies NGC 3115 & 4494)

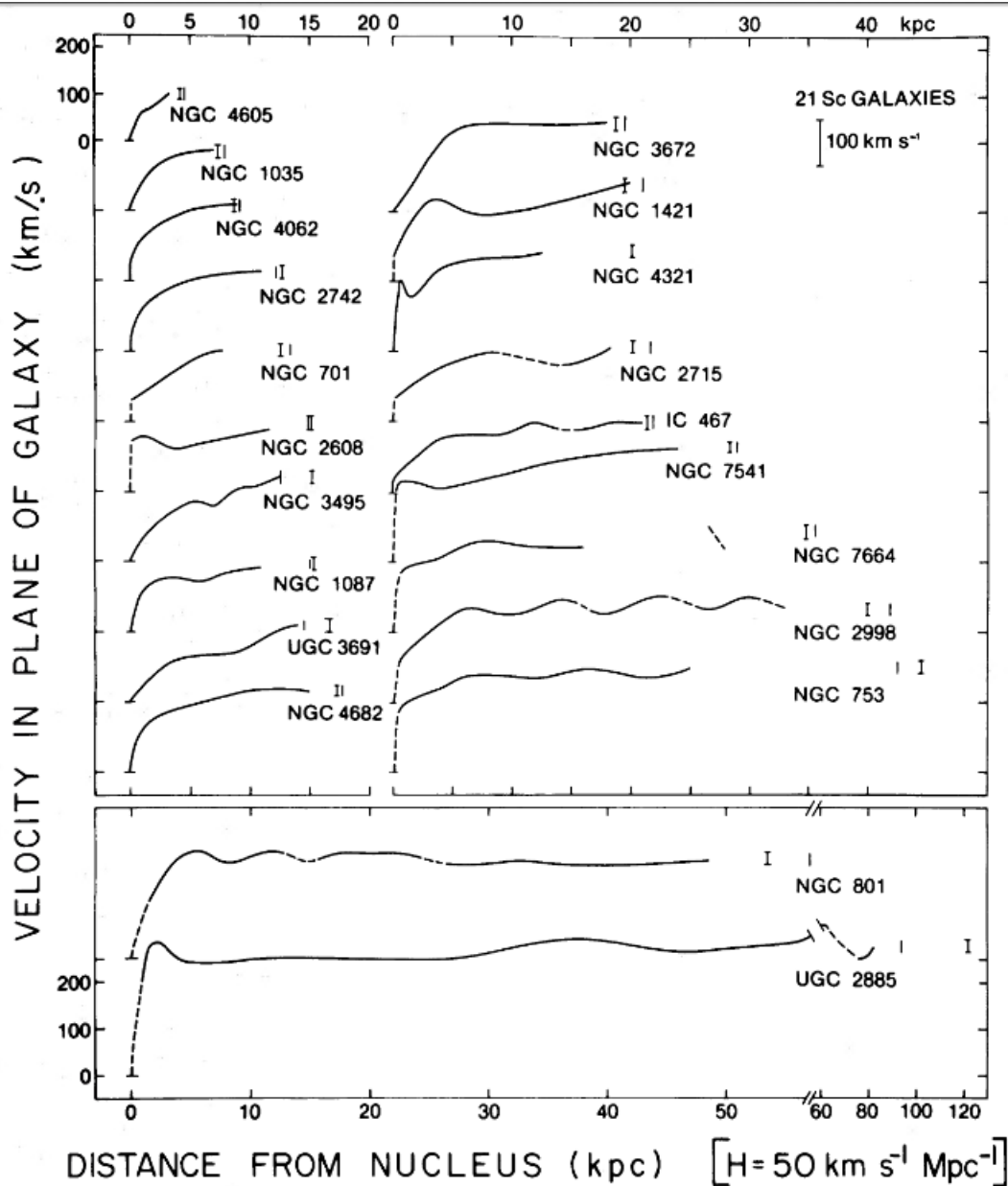
« The spectrographic measures of rotation indicate that the distribution of mass is probably very different from that of the light. »

Il avait des rapports $f = \text{masse dyn} / \text{masse visible} \sim 10-20$, et proposait l'existence d'étoiles naines, ou de gaz interstellaire

Seul Zwicky dans son papier de 1933 parle de « dark matter »



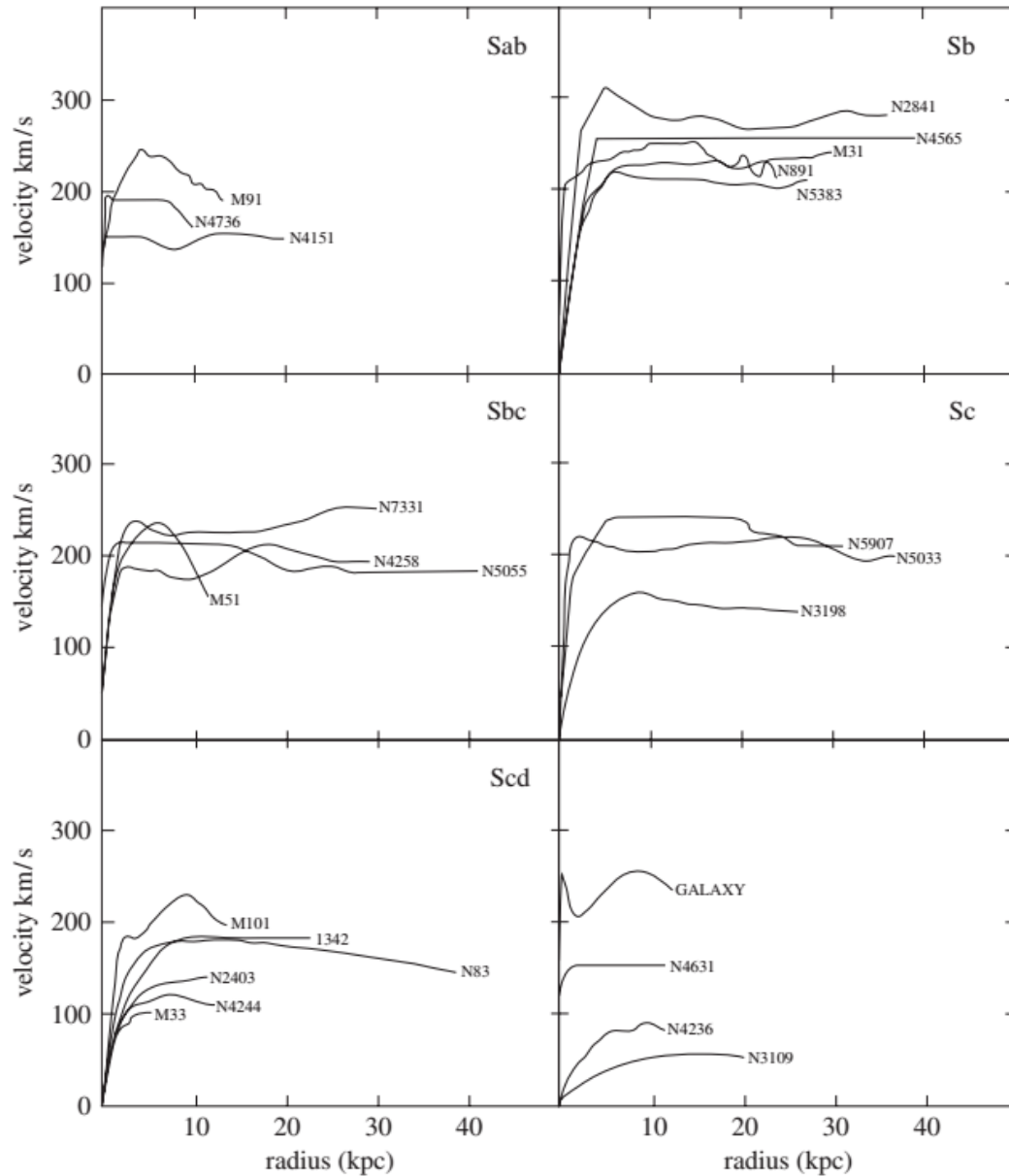
Courbes de rotation en fonction du type



Kent Ford & Vera Rubin

Rubin et al 1980

Courbes de rotation en radio



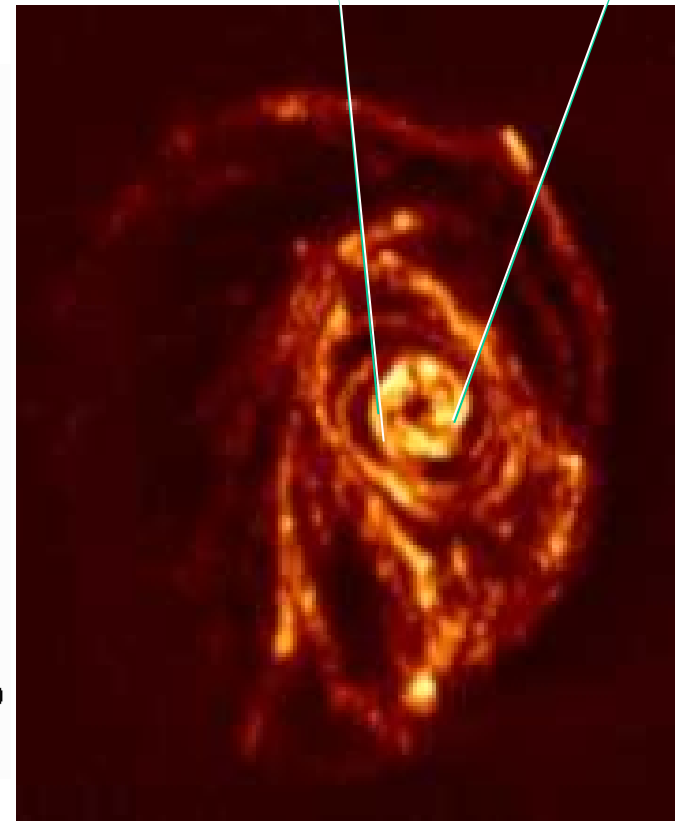
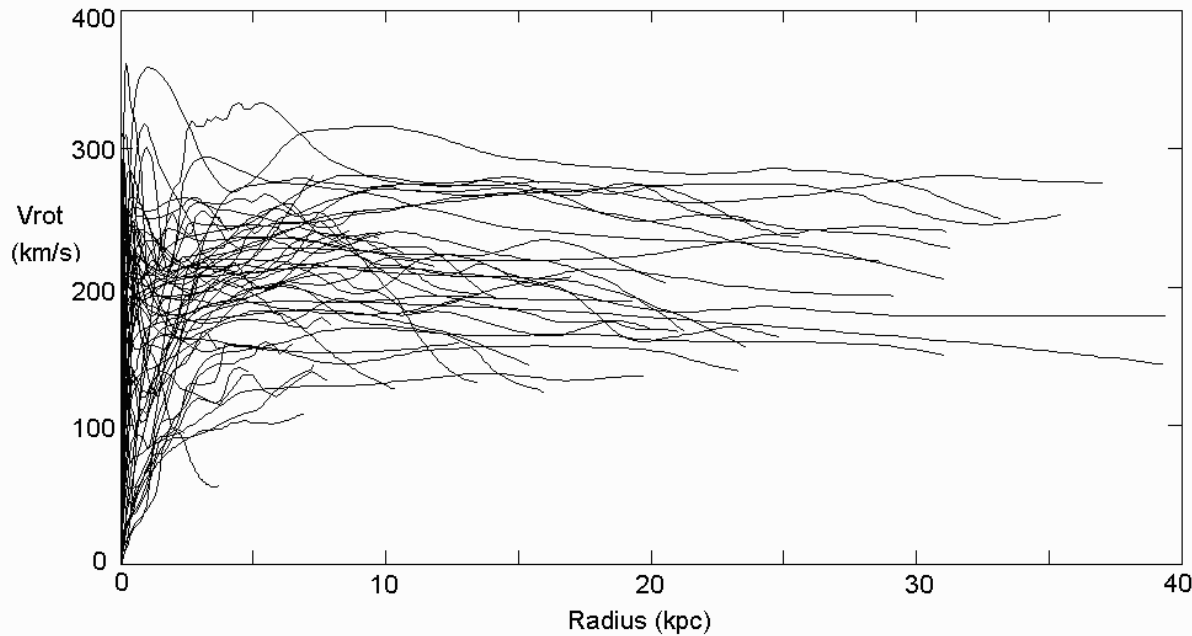
Bosma PhD 1978
Published in 1981

Les régions externes: gaz atomique HI

Sofue & Rubin, 2001, article de revue

HI-21cm, et aussi CO 2.6mm

M83: optique



HI dans M83: une galaxie semblable à la Voie lactée

Autres longueurs d'onde

Les satellites en rayons-X en 1966
→ forte émission diffuse dans Coma

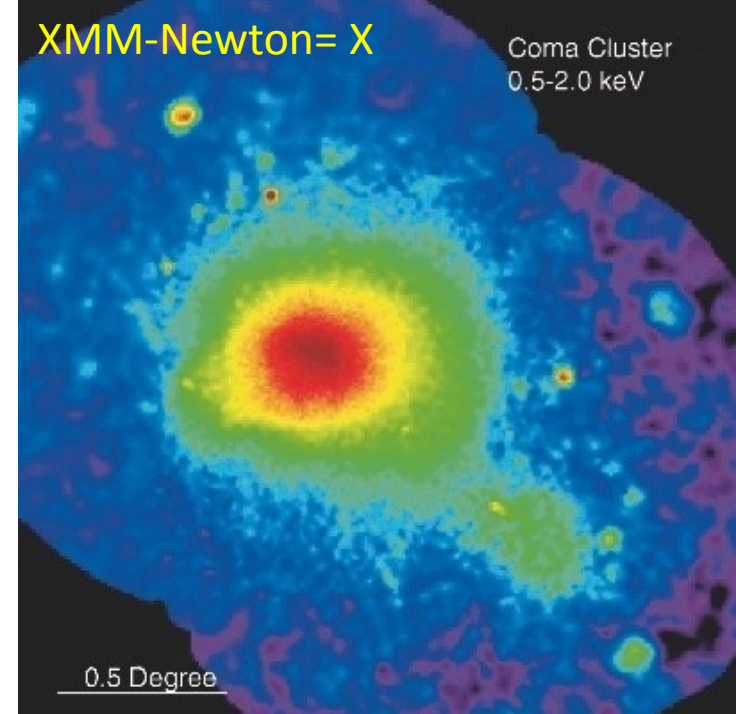
Emission du gaz très chaud
à $T \sim 10^8$ K, soit 100 millions de degrés!

dont la masse est comparable à la matière manquante

Aujourd'hui $M(\text{gaz chaud}) \sim 10 M(\text{galaxies})$

Il reste encore de la **matière noire** ~ 5 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!



Simulations N-corps et barres

Les calculs analytiques des ondes de densité

WKB → ondes très enroulées

Le contraire des barres!

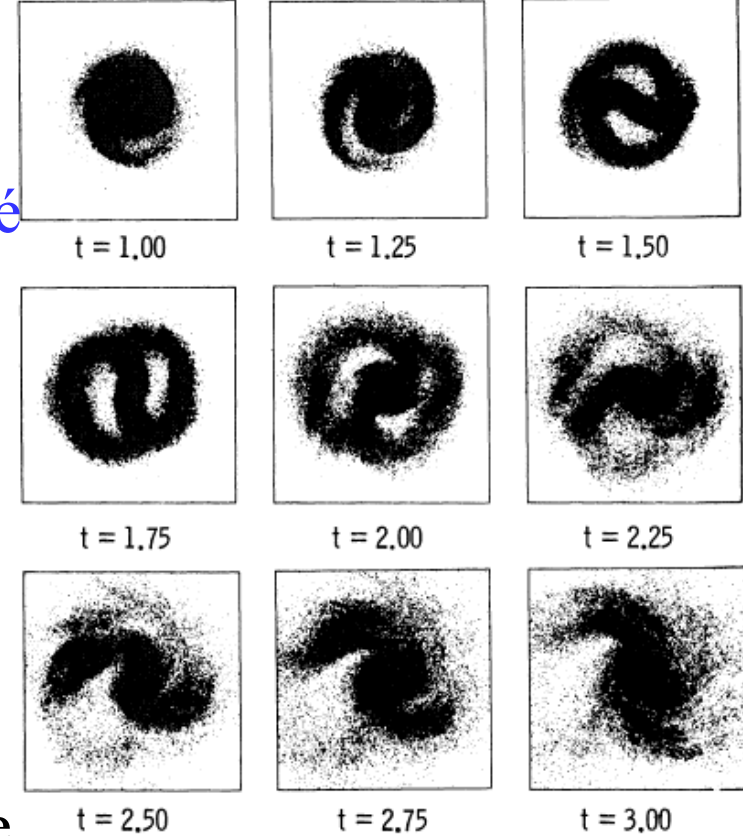
→ Surprise dans les premières simulations numériques (1970-78)

Ostriker & Peebles (1973) font l'hypothèse que les galaxies sont stabilisées par des halos de matière noire

N-corps avec $N=300$!

Halo sphérique analytique

→ Change le paradigme, et assied l'hypothèse de matière noire

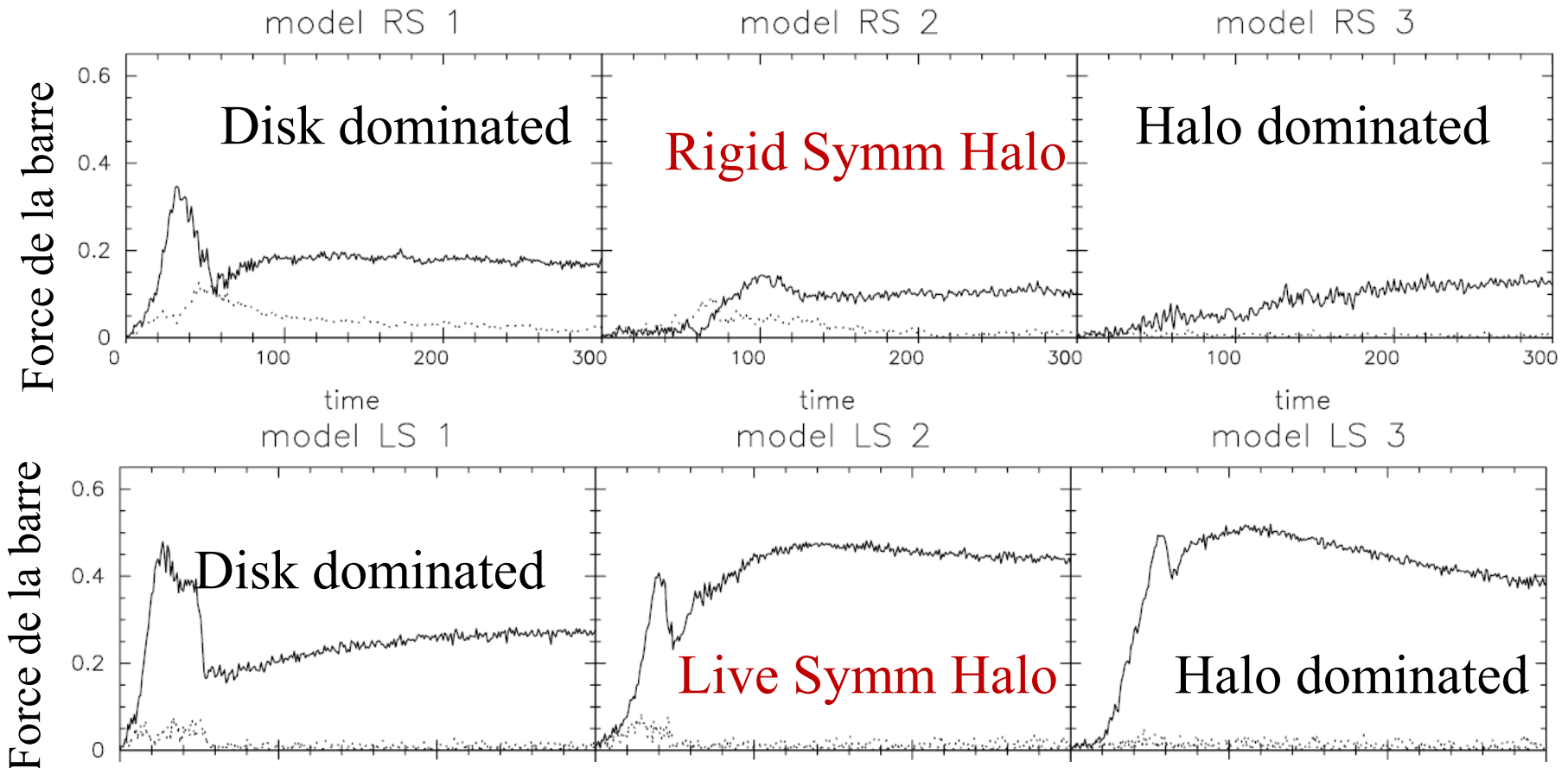


Q=1 --Hohl 1978

La théorie était erronée!

Ostriker & Peebles 1973: les galaxies sont stabilisées et les barres supprimées par le halo de matière noire

+Critère de Toomre $Q = c_r / c_{\text{crit}}$ $c_{\text{crit}} = 3.36 G \Sigma / \kappa$ $Q \gg 1$ stabilise



Athanassoula 2002, 03, Berentzen et al 2006

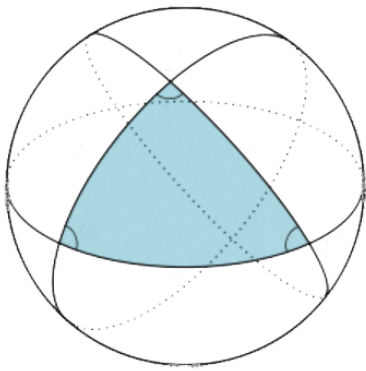
Densité de l'Univers

Années 1980-2000

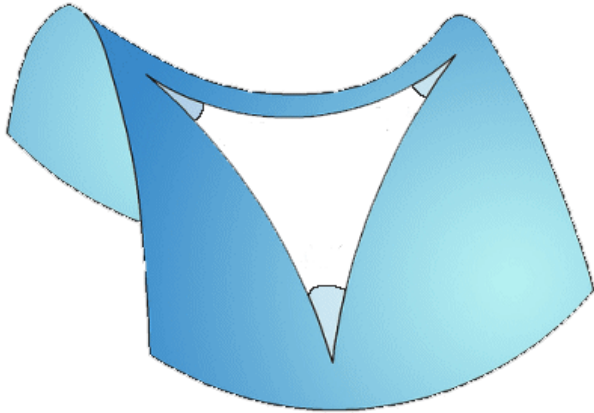
$\Omega \sim 0.1$ pas loin de Ω_b

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

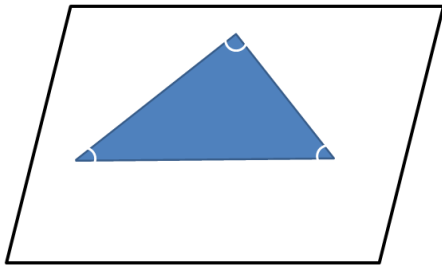
$\Omega > 1$



$\Omega < 1$



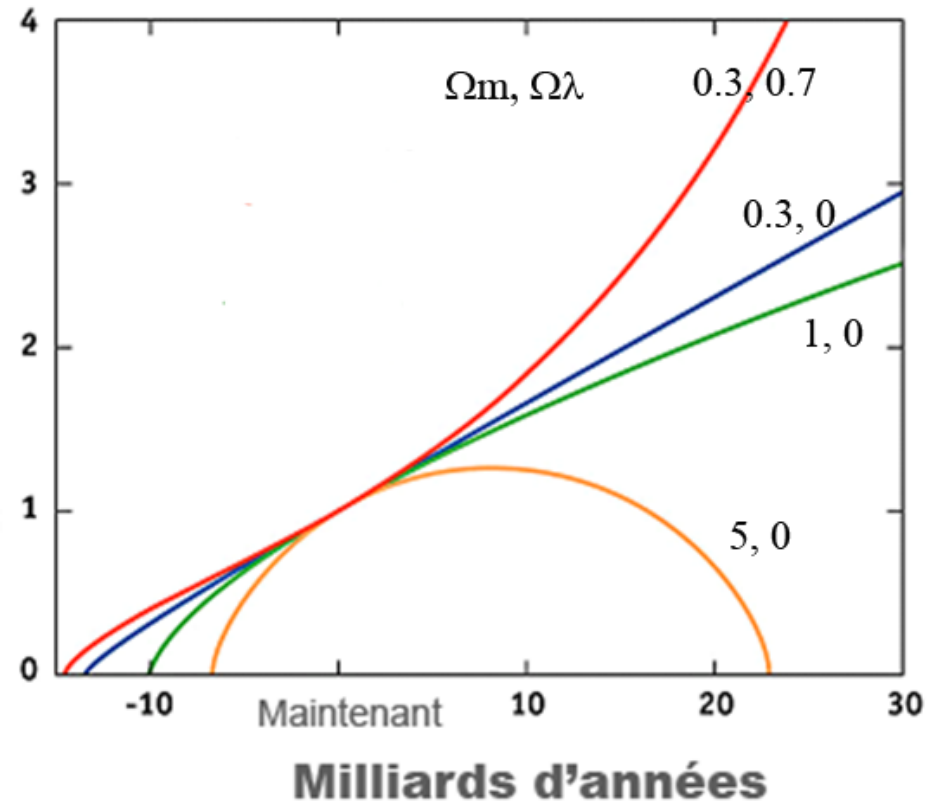
$\Omega = 1$



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

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

Taille de l'Univers

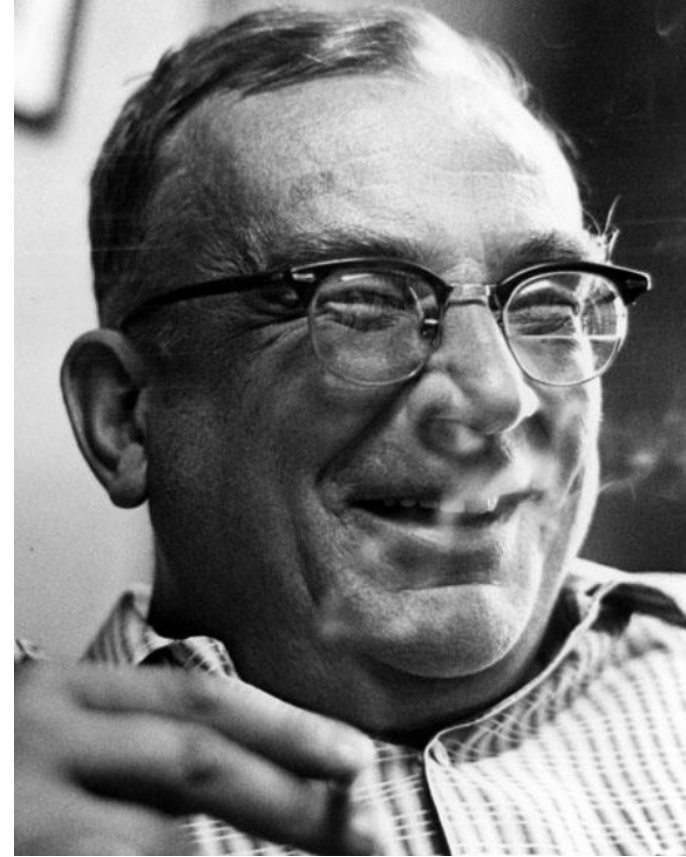
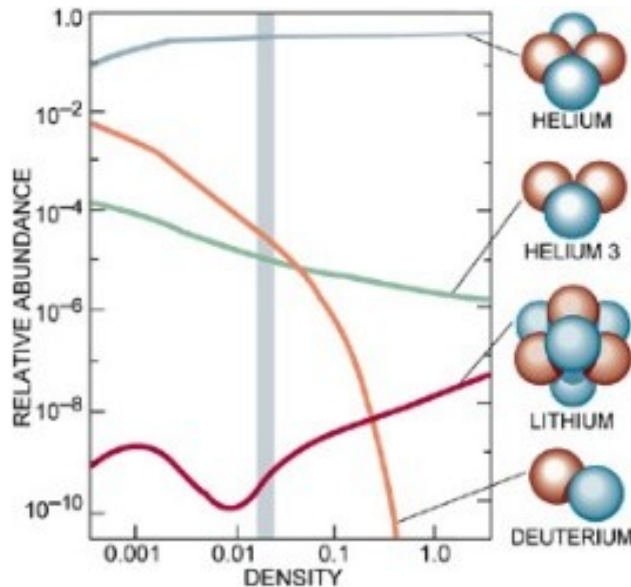


Nucléosynthèse primordiale

Dès 1948, Article Alpher, Bethe, Gamow
1st of April (α, β, γ)

Helium, Deutérium proviennent du Big-Bang

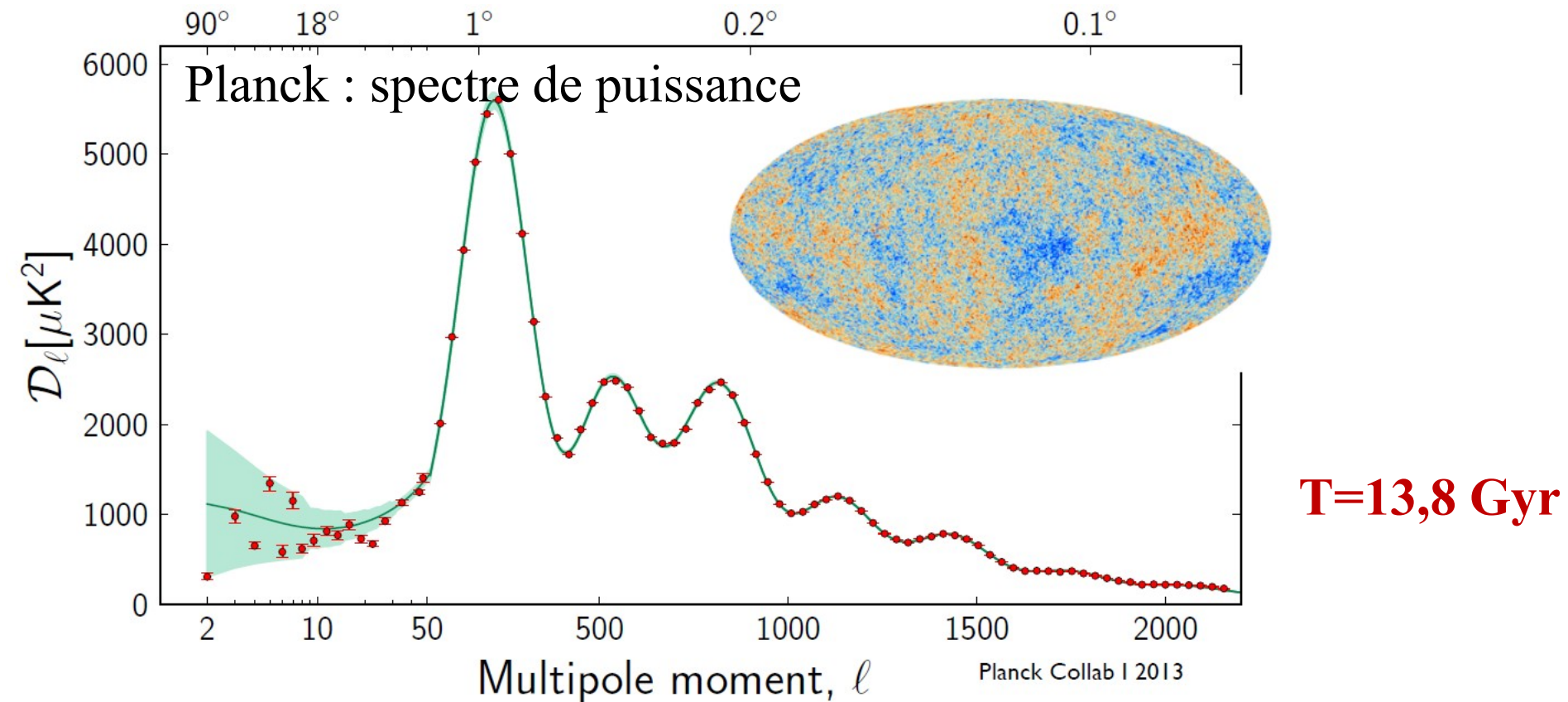
→ Il ne peut y avoir plus que 5% de baryons



George Gamow

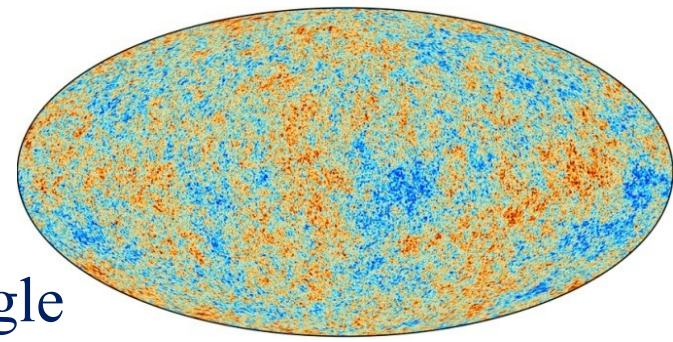
Le fonds cosmique micro-onde

Une mine d'informations!



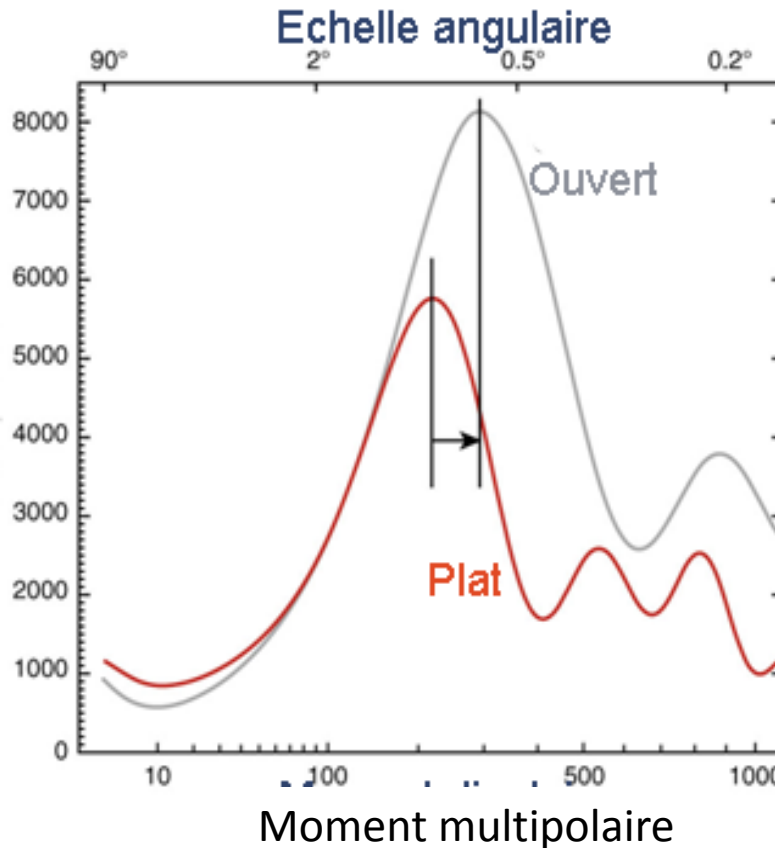
Vestige du Big-Bang, Température de corps noir 2.7 Kelvin

Courbure de l'Univers nulle



- Ondes acoustiques: photons + baryons
- → taille de l'horizon sonore vue sous un angle de $\sim 1^\circ$ (150kpc)

Règle standard 1°
Horizon sonore



La courbure = $\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$

$$\rightarrow \Omega_{\text{tot}} = 1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

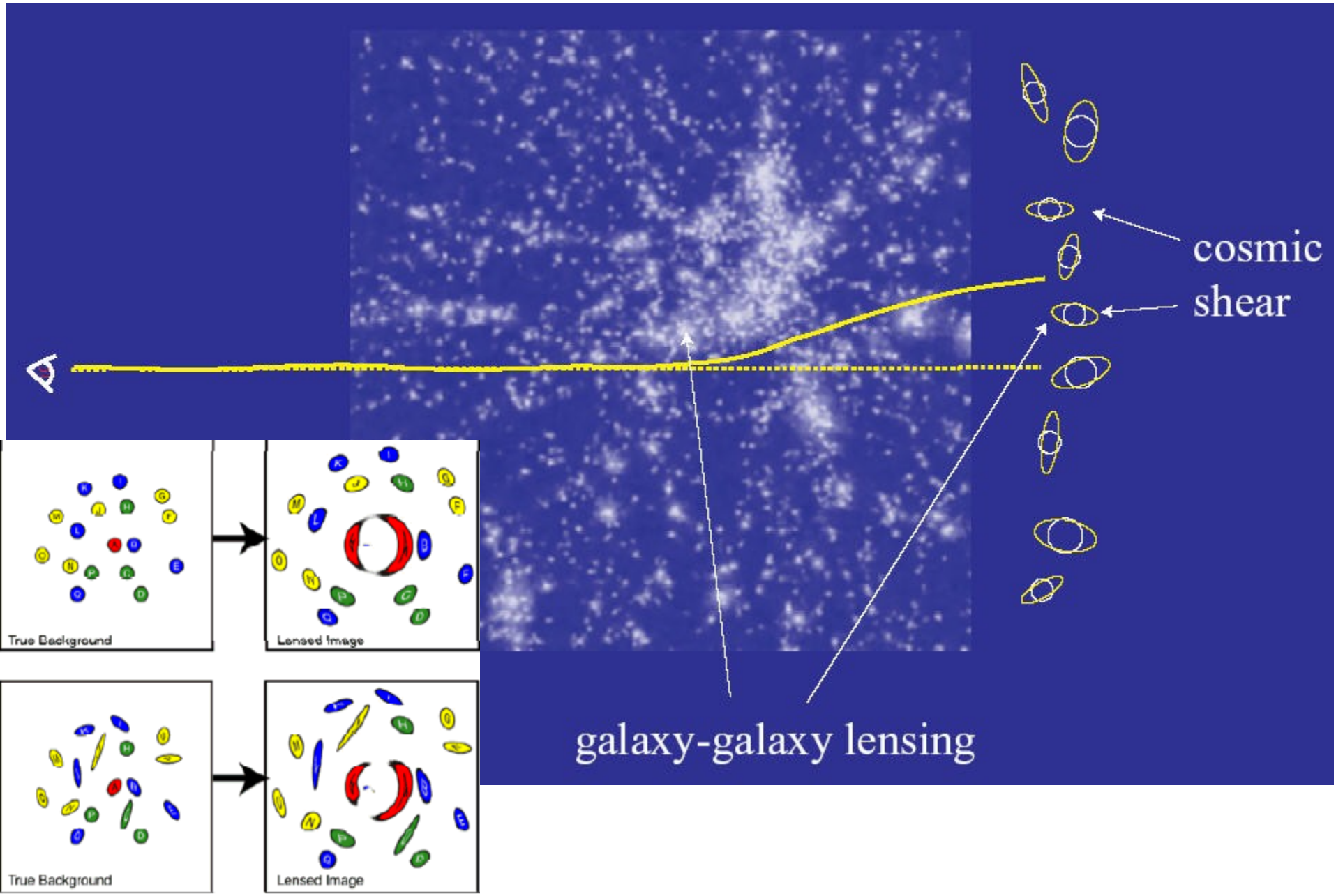
T=13,8 Gyr

Cartographies de la matière noire

Lentilles gravitationnelles: régime fort



Lentilles gravitationnelles: régime faible

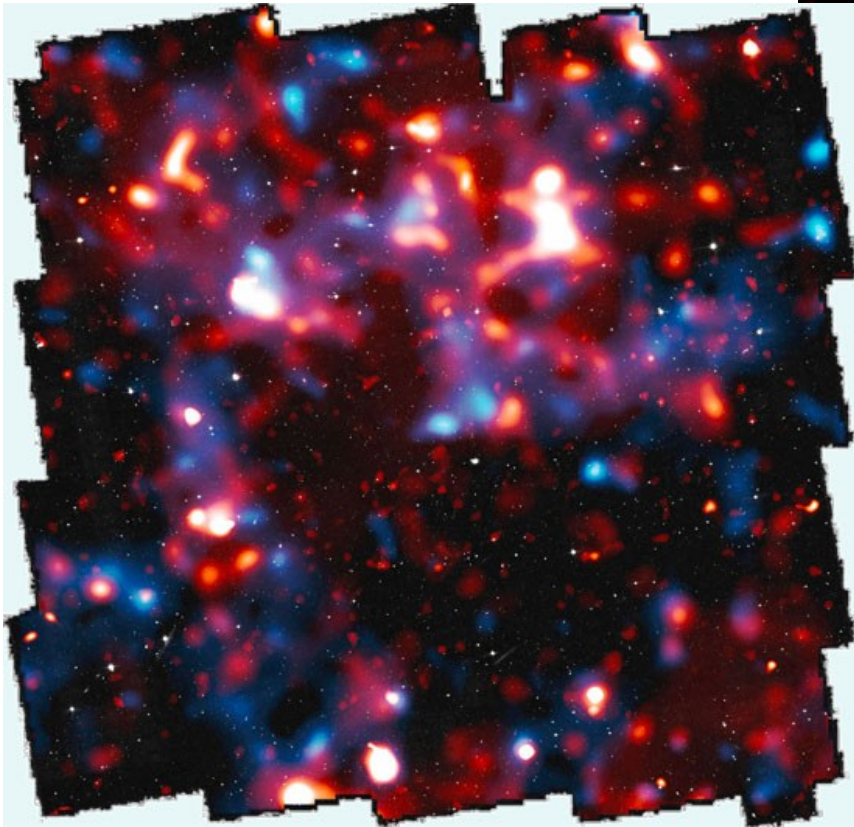
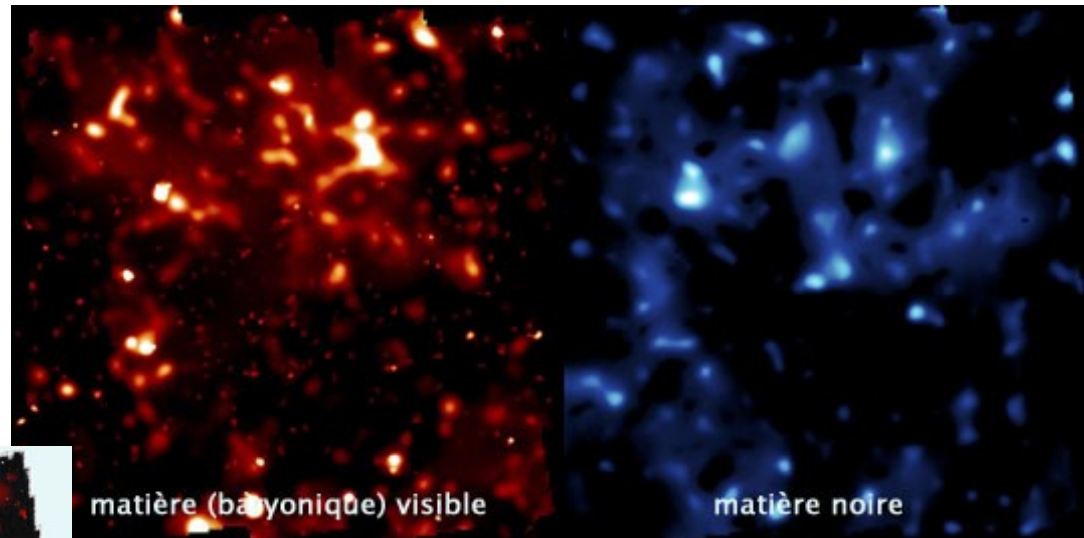


Cisaillement gravitationnel

Rouge: gaz X

Bleu: matière totale

Champ Cosmos



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

Relation de Tully-Fisher



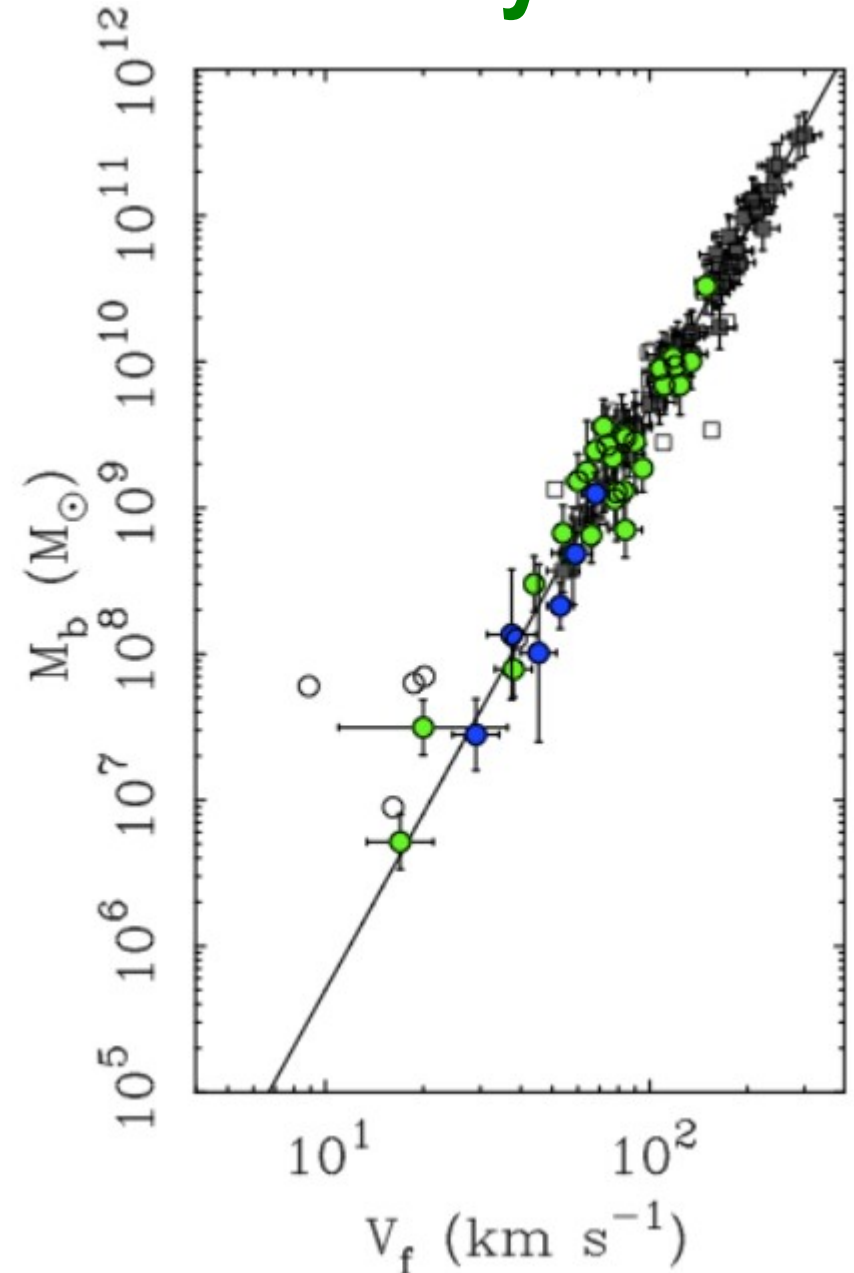
Relation entre vitesse de rotation
des galaxies spirales et
leur luminosité (1978)

DV corrigé de l'inclinaison

En ordonnée: masse visible

Corrélation avec V_f (plateau)

Indicateur de masse totale



McGaugh et al 2000

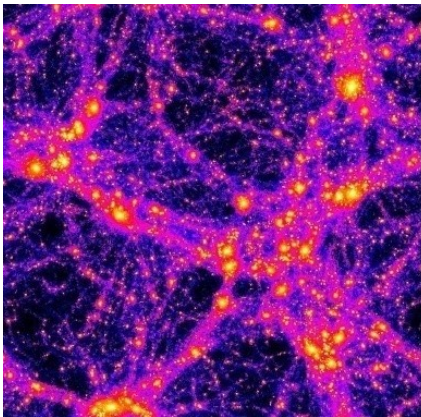


Types de matière noire

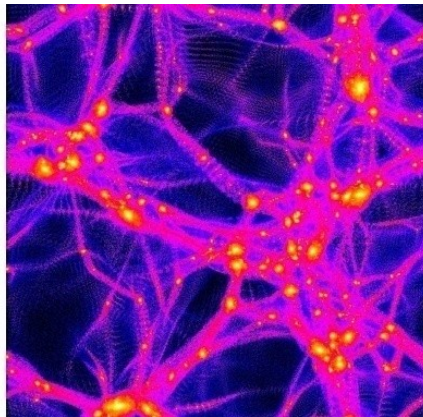
Chaude (neutrinos)
Relativiste au découplage
**Ne peut pas former
les structures,
si $m < 5 \text{ keV}$**

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

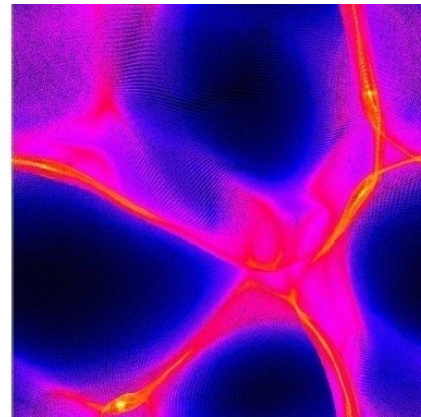
Modèle Froid (CDM)

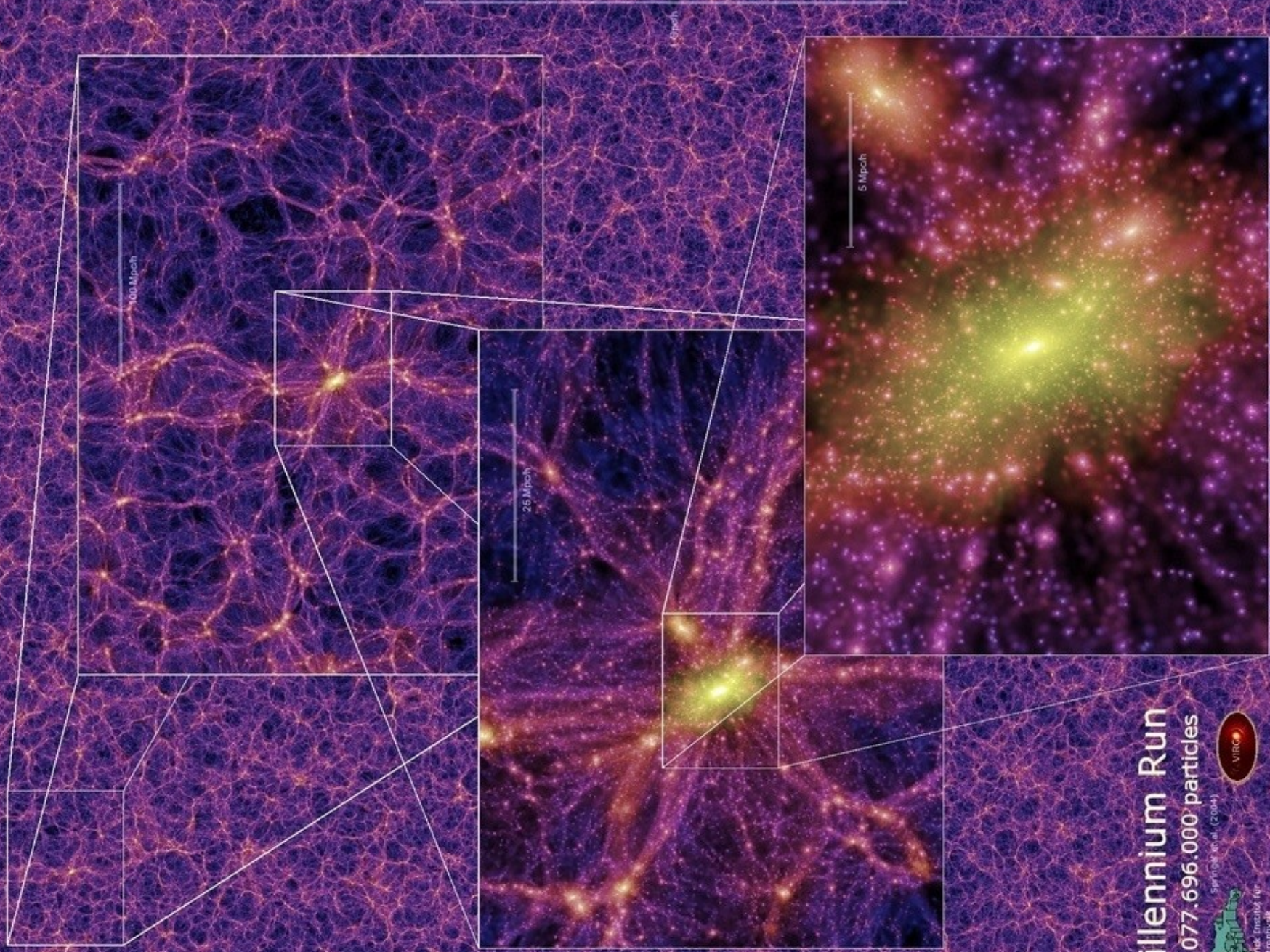


Tiède (WDM)



Chaud (HDM)





Millennium Run

10,077,696,000 particles



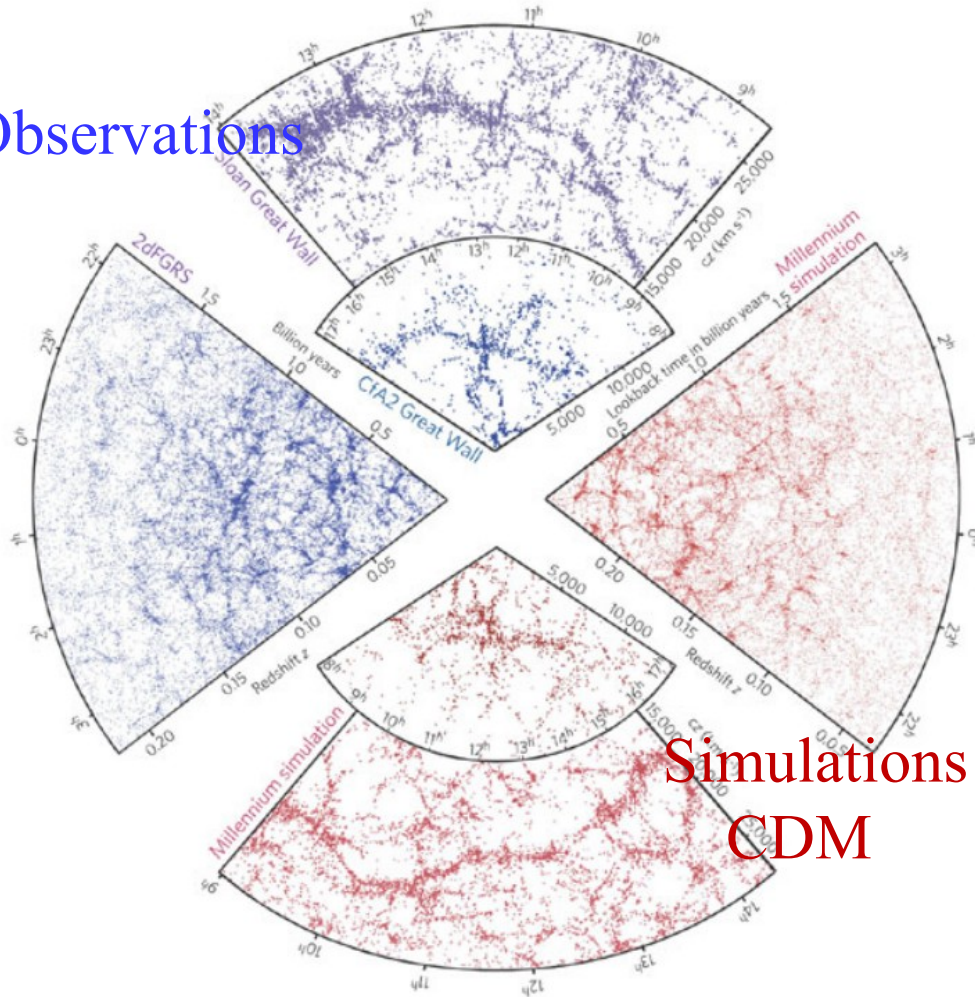
Spring et al., (2004)



Max-Planck-Institut für
Astrophysik

Pourquoi des modèles alternatifs?

Observations



→ Particules CDM introuvables

→ **Problèmes pour les galaxies**

Cuspide versus coeur

Satellites manquants

La majorité des baryons est en dehors des galaxies

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.

Le miracle du WIMP

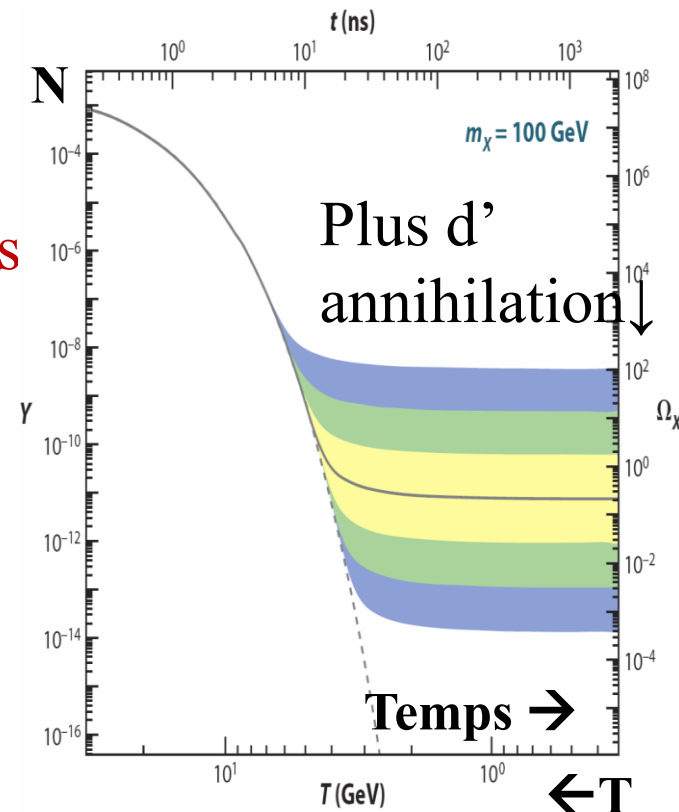
On obtient l'abondance requise de matière noire avec des particules de masse ~ 100 GeV, interagissant avec la **force faible** section d'annihilation $\langle \sigma v \rangle \sim 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$

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

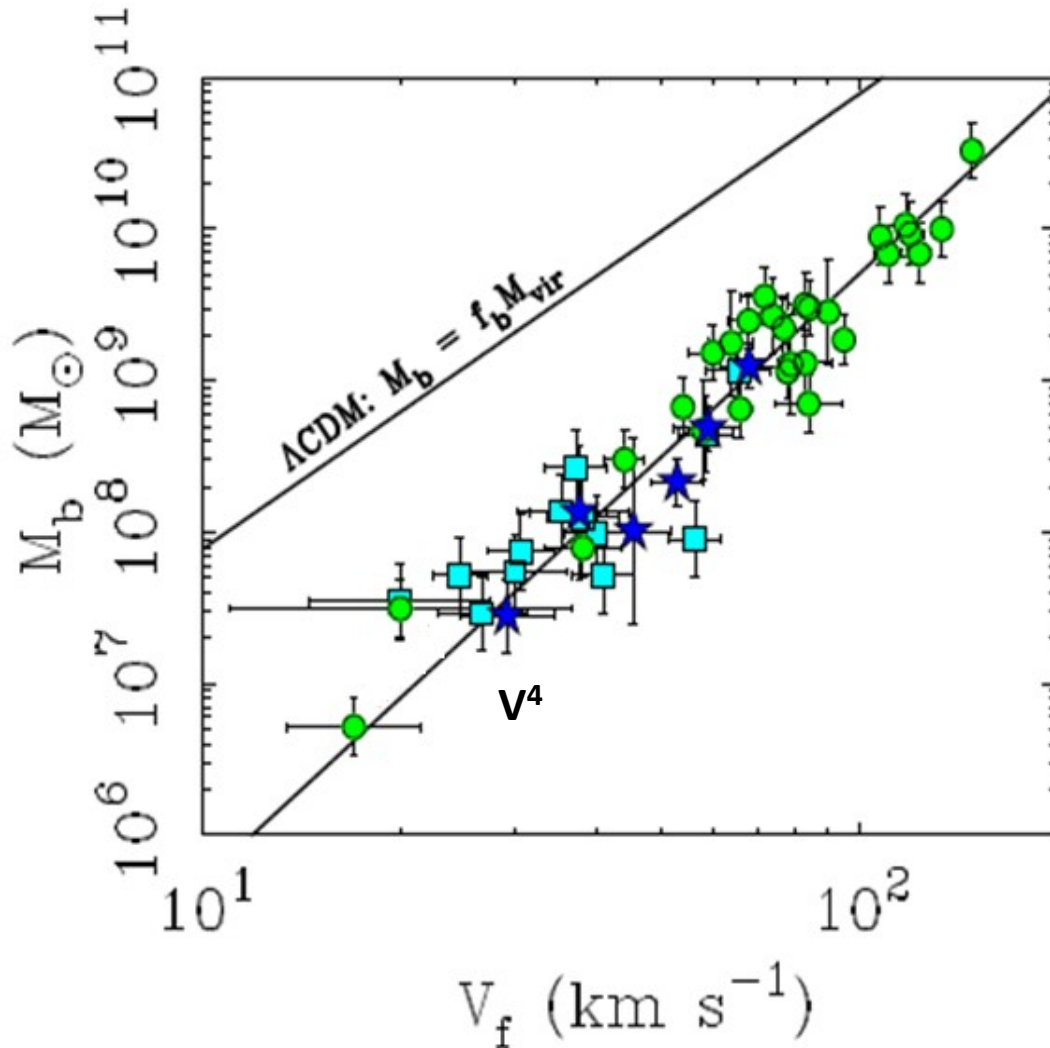
$$n \langle \sigma v \rangle \sim 1/t_{\text{hubble}}$$

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

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



Relation d'échelle de Tully-Fisher



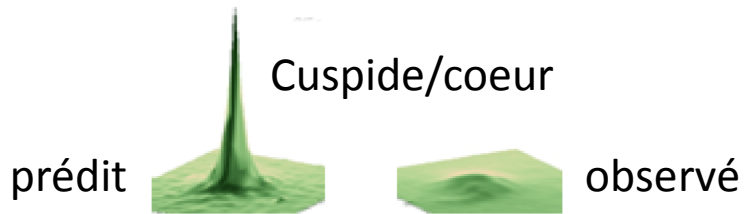
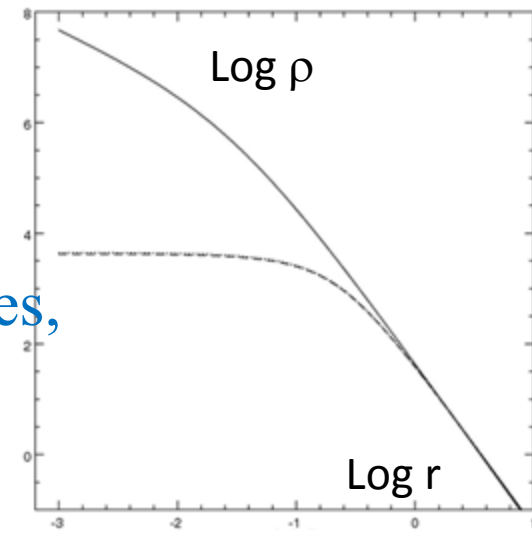
f_b fraction universelle
de baryons = 17%

CDM: « Cold Dark Matter »
Modèle standard

➔ la plupart des baryons
ne sont pas dans les
galaxies

Problèmes du modèle standard CDM

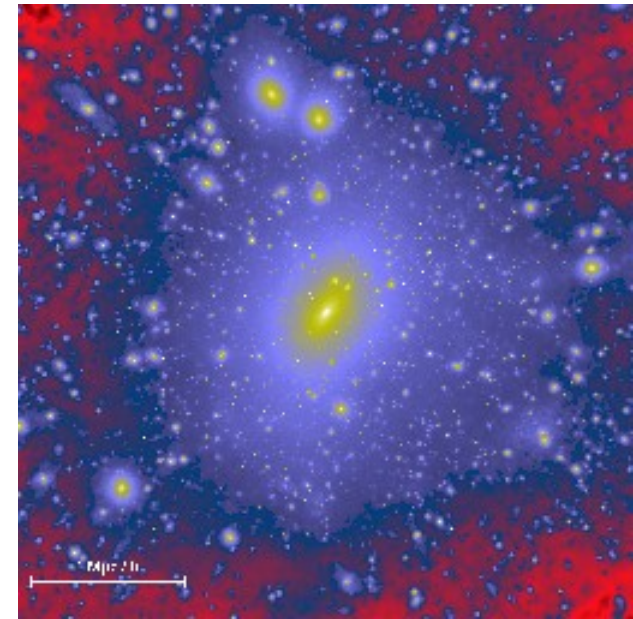
→ Prédiction de **cuspides au centre des galaxies**, non observés, en particulier dans les galaxies naines, dominées par la MN



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?**



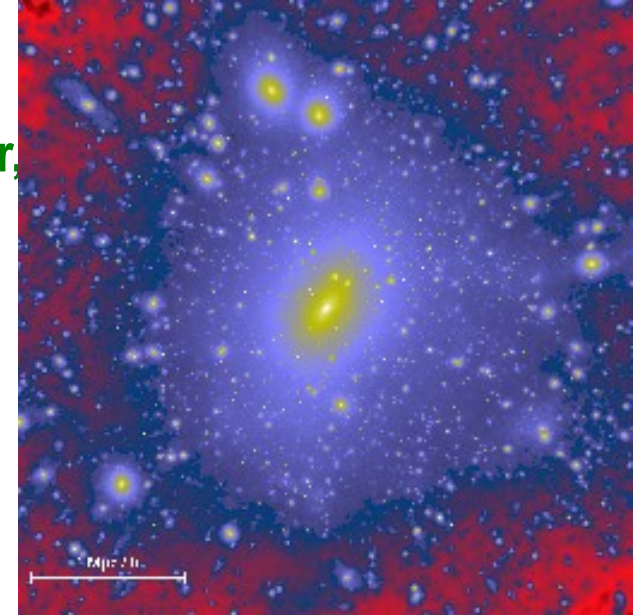
Naines Sphéroidales

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

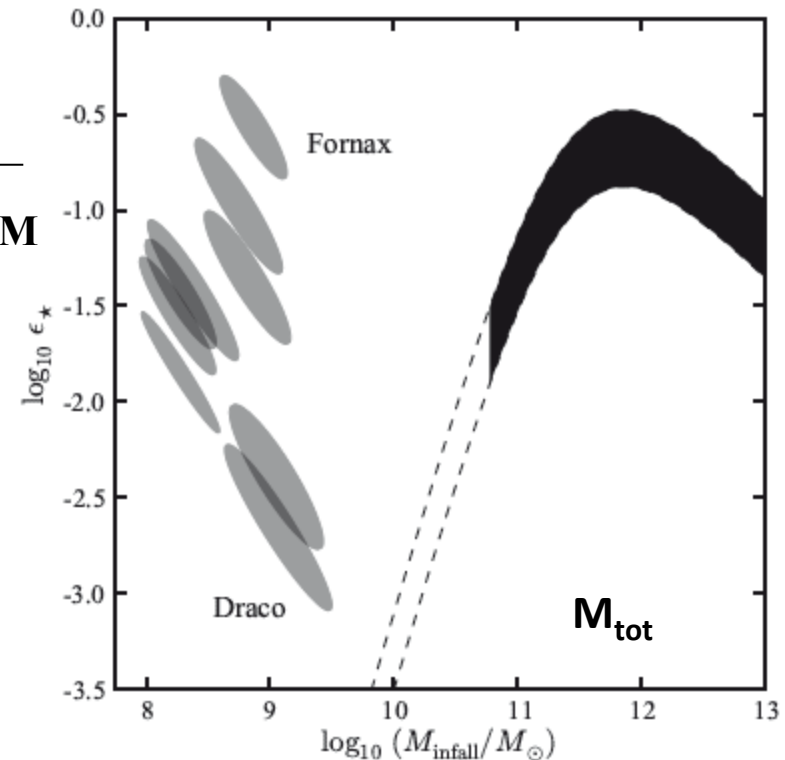


Faible brillance de surface
dominées par la matière noire
Ces naines ne sont pas formées
dans les simulations CDM

Problème des
satellites
manquants

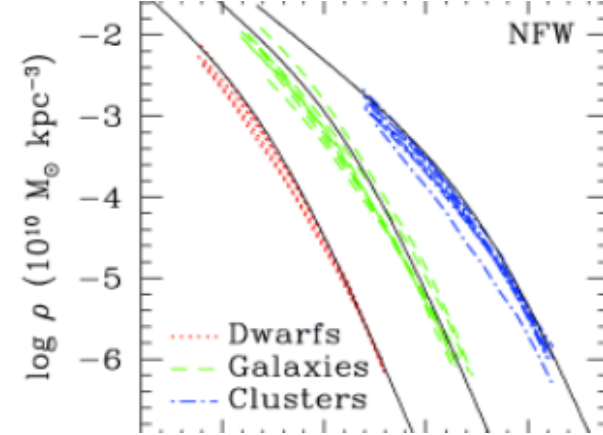


$$\frac{M_*}{f_b M_{DM}}$$



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

- 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

Pour ces masses $m_a = 10^{-22}$ eV, les oscillations empêchent les petites structures en-dessous de $M_{\text{cut}} = 3 \cdot 10^8 m_{22}^{-3/2} M_{\odot}$ (Hui et al 2017)

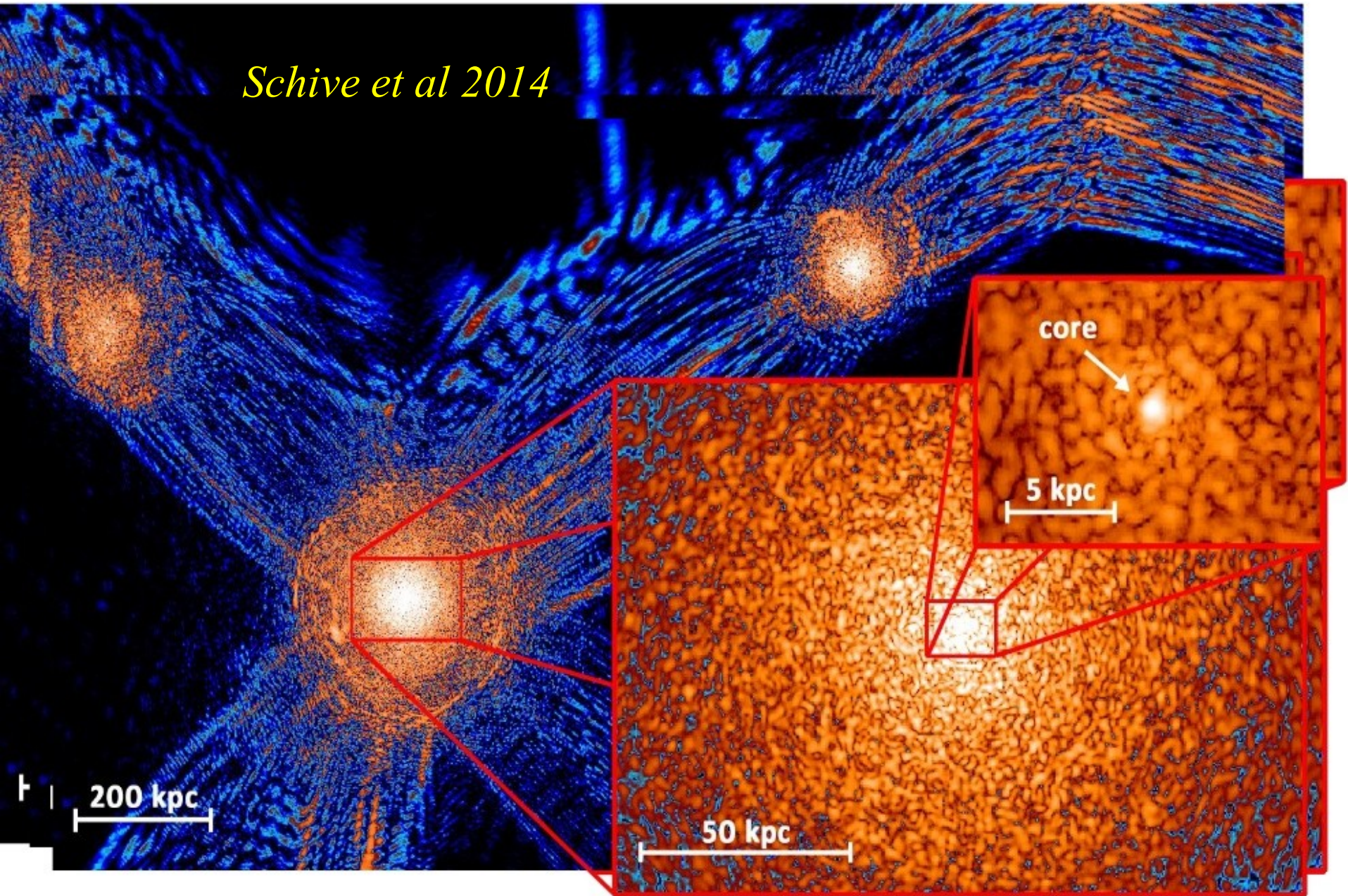
Simulations AMR: eq. Schrödinger- Poisson

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



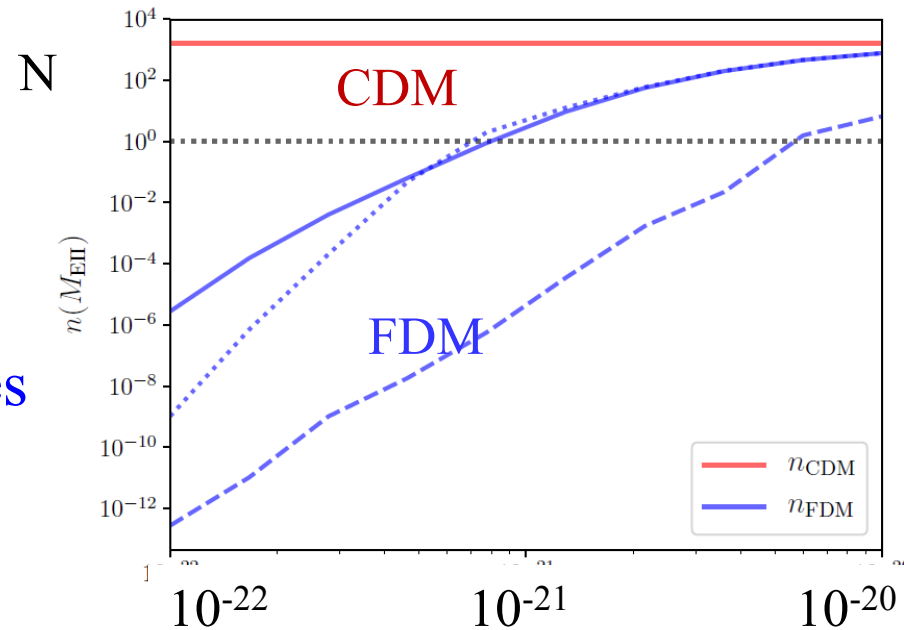
Interférences quantiques: 9 ordres de grandeur

Schive et al 2014



Contraintes actuelles

Fluctuations de ρ_{DM} : temps plus court que le temps gravitationnel
→ Les étoiles chauffent, ex les étoiles vieilles de Eridanus II
 $m > 0.6 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$
Marsh & Niemeyer 2018



En un temps encore plus court, $\sim 1/m$ de l'échelle du mois
variations cohérentes de pression, fluctuations échelle de Compton
→ fonds d'ondes gravitationnelles, stochastique monochromatique

Pulsars timing Array PTA: 26 pulsars 2004-16, *Porayko et al 2018*
GW de fréquences nanoHz, (SKA dans le futur)

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 $a = a_N$

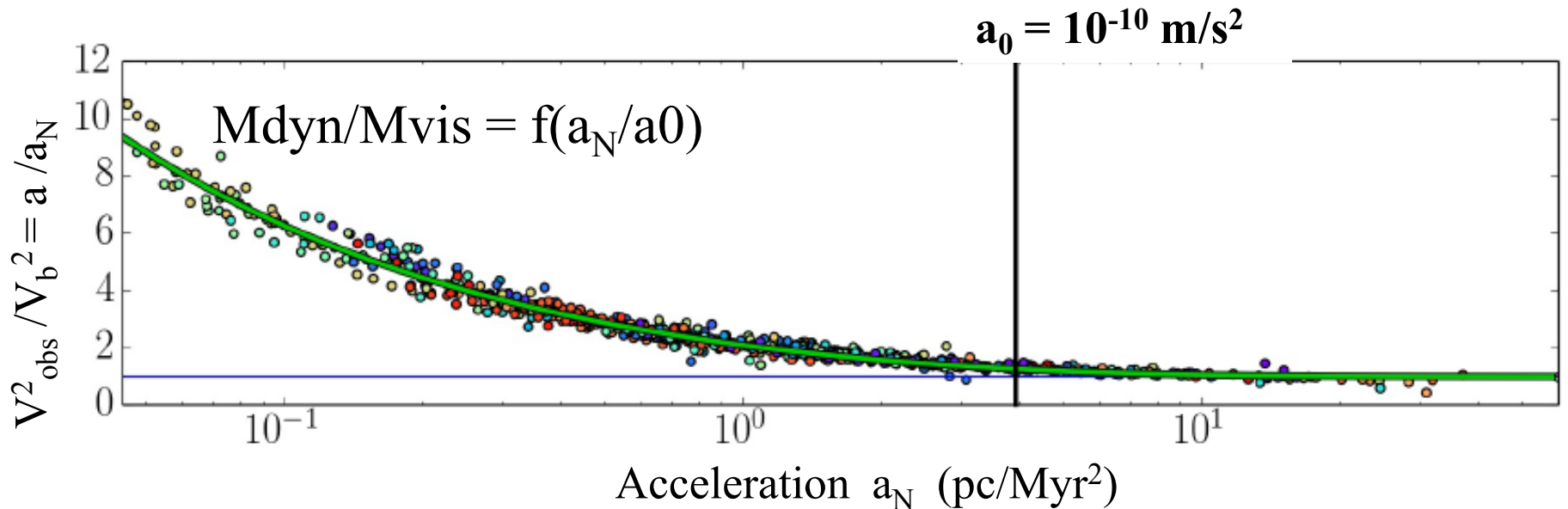
$a_0 = 10^{-10} \text{ m/s}^2 \sim 10^{-11}g$
Milgrom (1983)

Asymptotiquement

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

Théorie Covariante: TeVeS

\rightarrow Lentille gravitationnelle

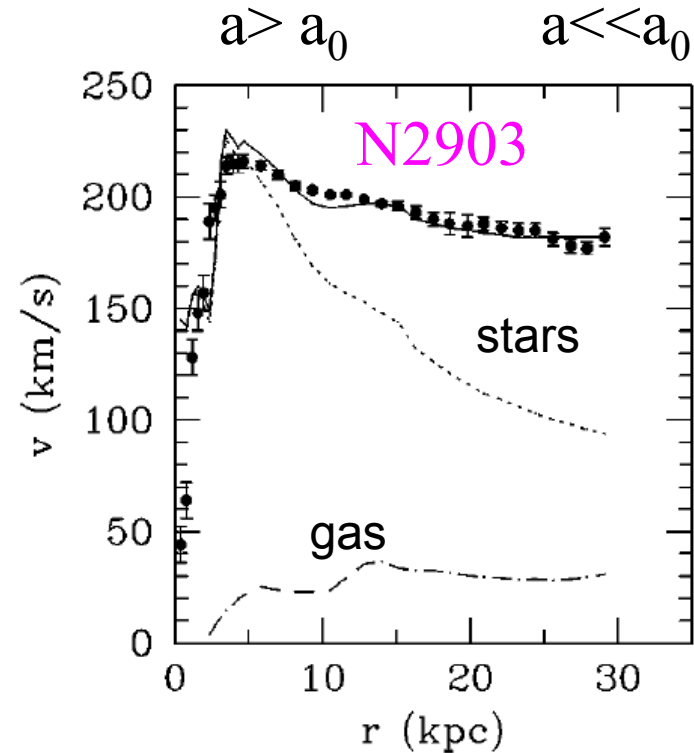
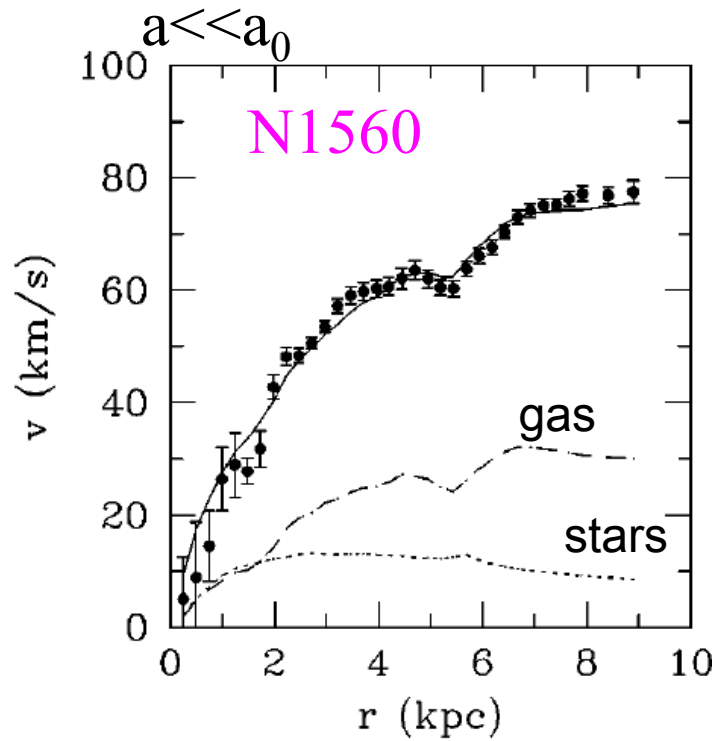
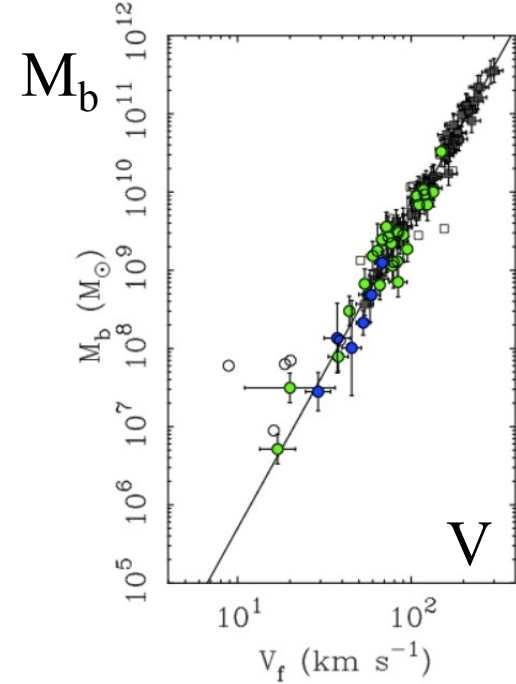


Relation de Tully-Fisher

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

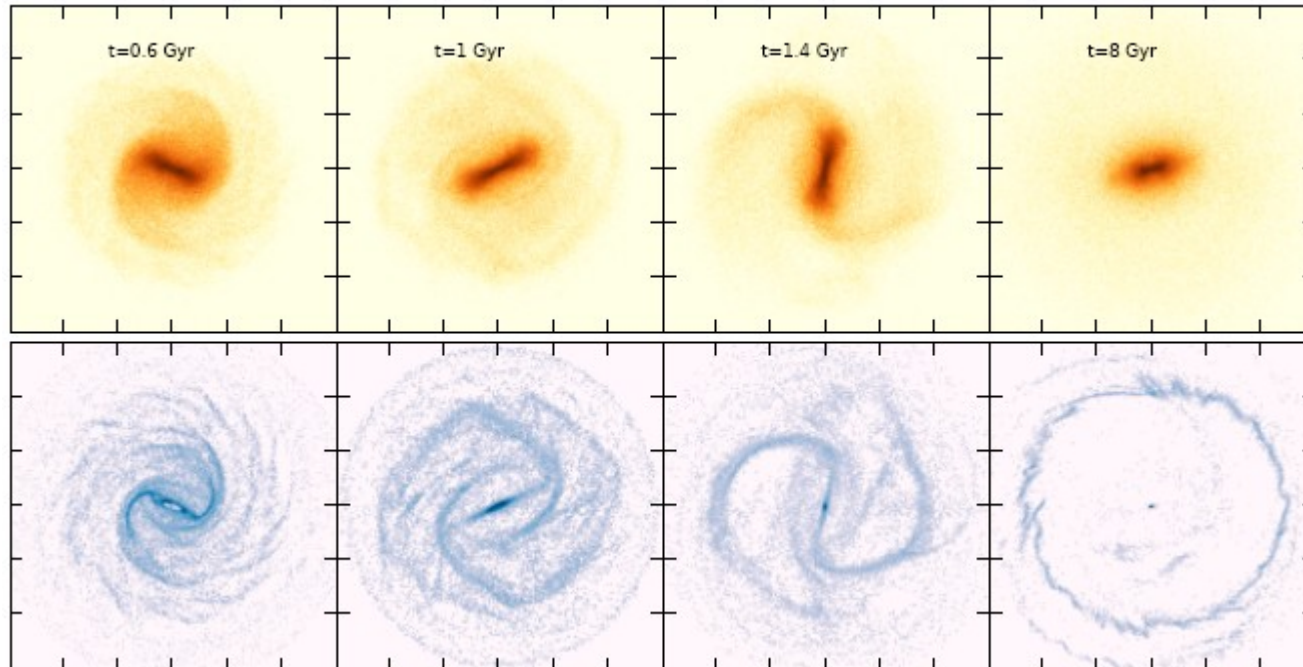
$$\rightarrow V^4 = a_0 GM$$

Les courbes de rotation pour tous types



Influence du halo noir ?

Dynamique des galaxies,
Formation de spirales et de barres



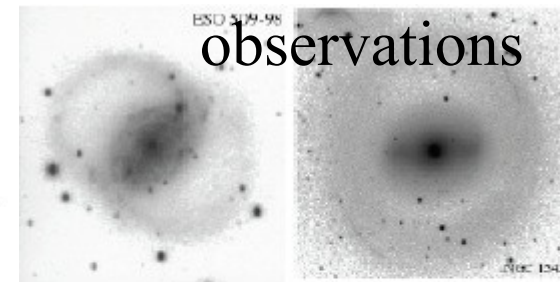
Etoiles

Gaz

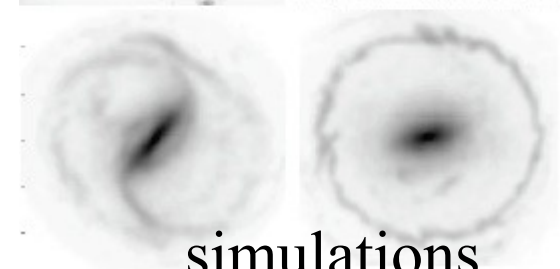
TeVéS théorie covariante

→ Toutefois instable

Problème avec les ondes gravitationnelles



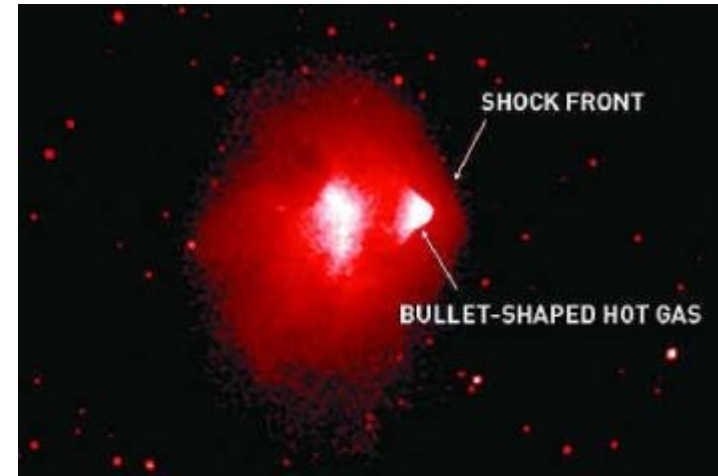
observations



simulations

L'amas du boulet

Gaz X très chaud



Cas rare de collision violente, permettant de séparer les composantes

→ Limite sur $\sigma/m < 1 \text{ cm}^2/\text{g}$

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

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

Mesure de la vitesse c_{GW}

Le sursaut gamma a été observé 1,74 sec après la fusion

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

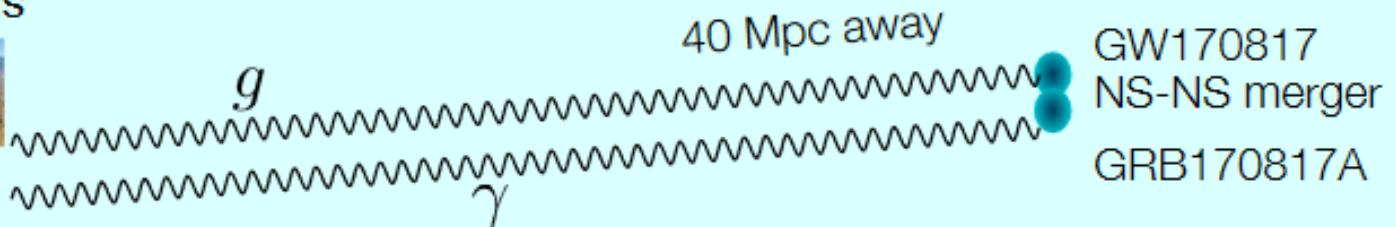
$$\left| \frac{c_{GW}^2}{c^2} - 1 \right| < 6 \times 10^{-15}$$

→ TeVeS
éliminée

LIGO/Virgo detectors



Fermi GRB monitor
Integral



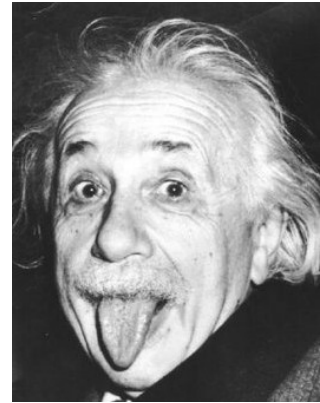
Nouvelle théorie TeVeS: $c_{GW} = c$ (Skordis & Zlosnik 2019)

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

Gravité émergente



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

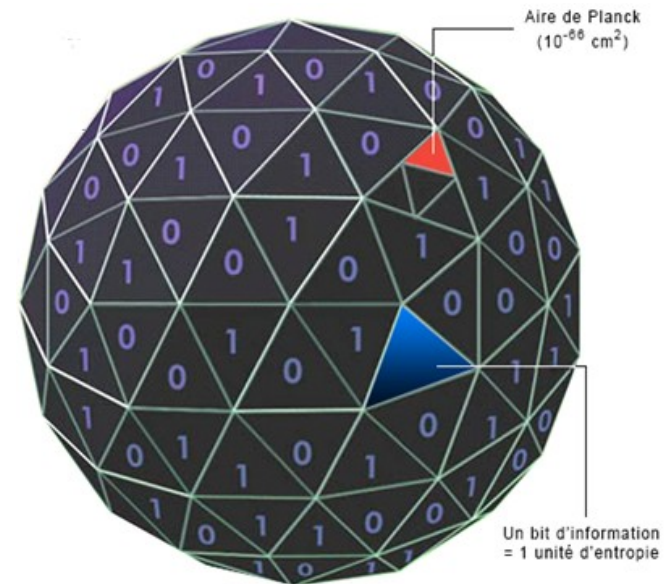
Entropie et thermodynamique de l'horizon (Bekenstein-Hawking)

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



$$S/k = A/(4L_p^2)$$

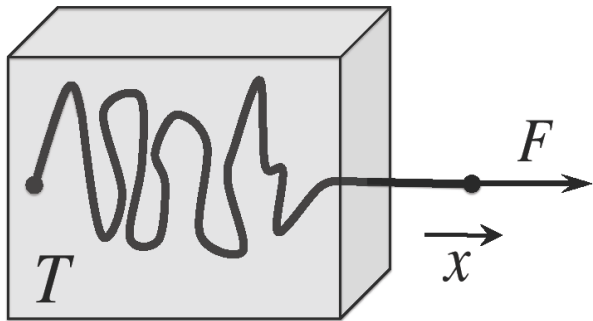
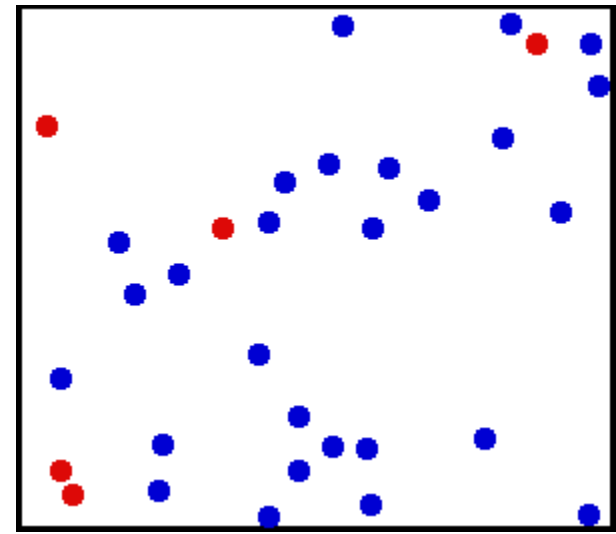
La gravité émergente

la force de gravitation est une force entropique:

Gravité: courbure de l'espace-temps (Einstein)

Ou interaction des éléments fondamentaux de l'espace-temps → gravité émergente

Inutile de connaître les processus micros



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

La constante Λ est due à l'intrication à gde échelle des éléments microscopiques (quantiques)

Gravité émergente vs MOND dans les amas

La gravité est boostée, dès que l'accélération $\ll a_0 \sim c H$

$$g_D = \sqrt{a_0 \cdot g_B / 6}, \quad \text{alors } g = g_D + g_B$$

$$\int_0^r \frac{G M_D^2(r')}{r'^2} dr' = \frac{M_B(r) a_0 r}{6}.$$



L'accélération devient 2 à 3 fois supérieure à celle de MOND dans les amas

$$g = g_B (1 + 1/x) \quad \text{avec} \quad x^2 = 6 / (cH) g_B / (1 + 3 d_B)$$

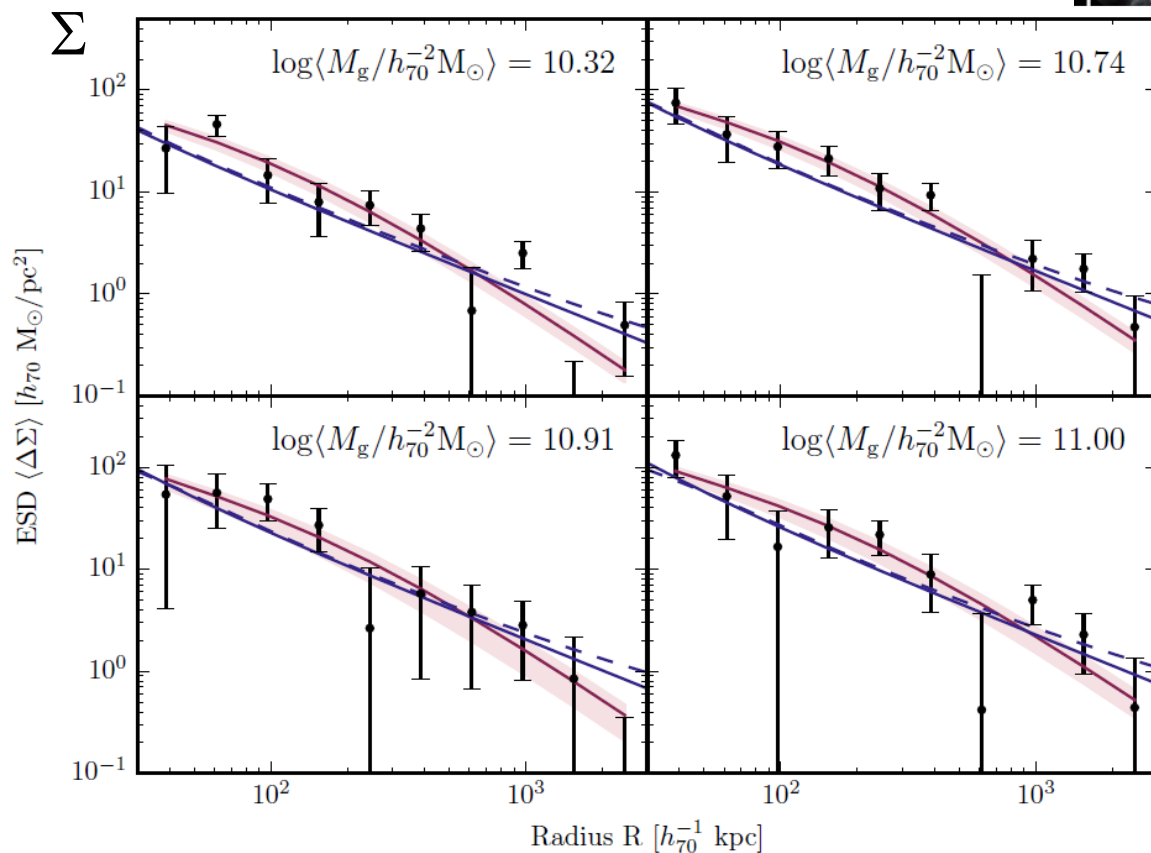
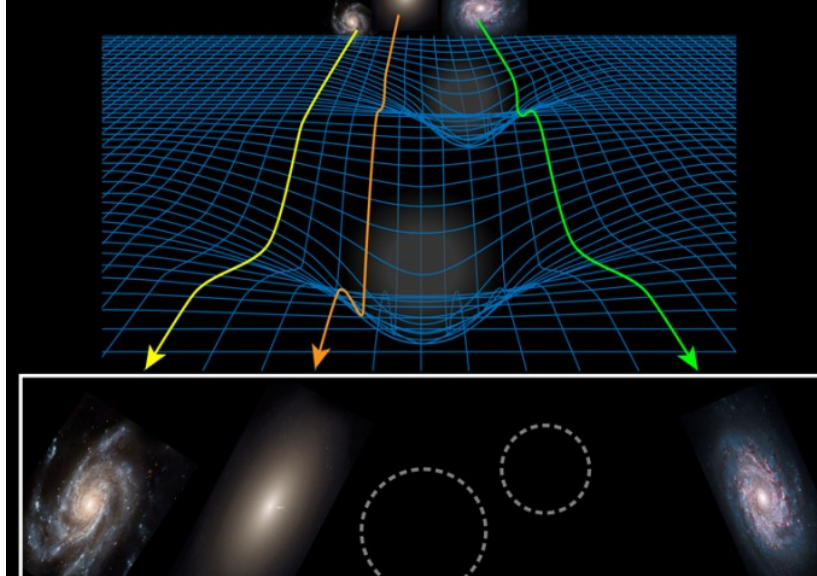
Test des lentilles gravitationnelles

KIDS: VST-ESO KiloDegree Survey

+ GAMA spectro survey

33 000 galaxies

$$M_D^2(r) = \frac{cH_0 r^2}{6G} \frac{d(M_b(r)r)}{dr}$$



Rouge Λ CDM (NFW)

Bleu: Gravité émergente
DM apparente
Compatible avec les obs

Le mystère reste entier

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**

Problèmes du CDM pour la formation
des galaxies

→ solution dans la physique des baryons

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



Vera Rubin
1928-2016



Vera and Bob Rubin