



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Leçon Inaugurale
La matière noire



Françoise Combes



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

Astronomes au Collège (Royal) de France

Essentiellement Mathématiciens au début

P. Gassendi l'astronomie galiléenne ~1645

J-B Morin (1629-56), astrologue de Louis XIII

P. Gassendi, prudent, enseignait Ptolémée, Copernic, Tycho, comme des « hypothèses ».



Giordano Bruno

Lecteur Royal ~1580

Contre le géocentrisme
Pour la pluralité des
mondes

En opposition à Descartes,
il affirme l'existence du vide.

Va plus loin que Galilée en
généralisant le principe d'inertie.

Observe les éclipses, passages
de Mercure et Vénus sur le Soleil



Pierre Gassendi

Lecteur Royal ~1645-55

Astronomes au Collège (Royal) de France



En France, surtout mécanique céleste,
J. Lalande, chaire d'astronomie (1762-1804)
J-B. Delambre avec son collègue P. Méchain de
l'académie mesure le méridien durant la révolution,
Une épopée de près de dix ans

Jérôme Lalande

Lecteur Royal, pendant 42 ans!



J-B. Delambre

Lecteur Imperial ~1807-15

Mécanique céleste encore jusqu'au XXème siècle

A. Dauvillier Physique cosmique

A. Lallemant Méthodes physiques, caméras

J-C. Pecker Astrophysique théorique

A. Labeyrie Astrophysique observationnelle

G. Veneziano Particules, Gravitation et Cosmologie

(pré-)Histoire de la matière noire



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

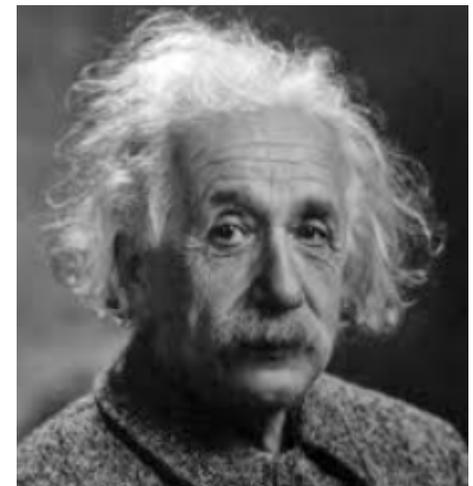
→ **Découverte de Neptune**, par Johanne Galle à Berlin

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

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

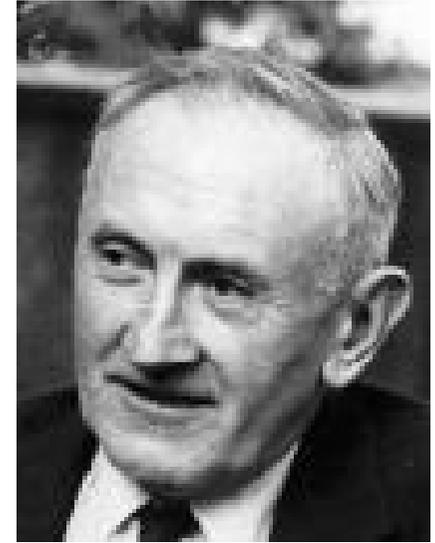
Pas observée lors de l'éclipse de 1860 → ceinture de petits corps les Vulcanoides

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



Histoire de la matière noire

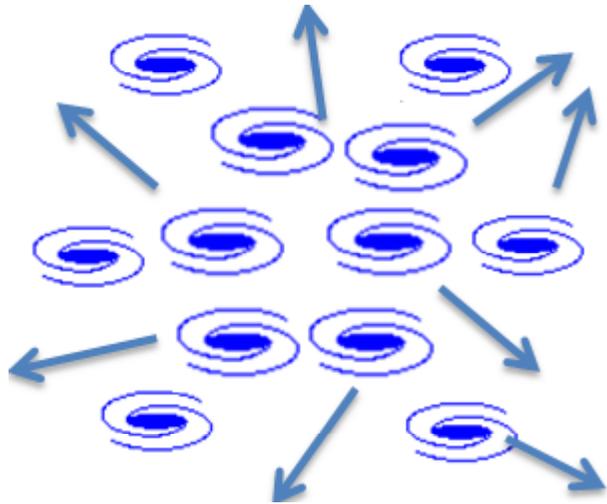
1937 – Fritz Zwicky calcule la masse des amas de Galaxies en utilisant leurs vitesses



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

Il avance plusieurs hypothèses

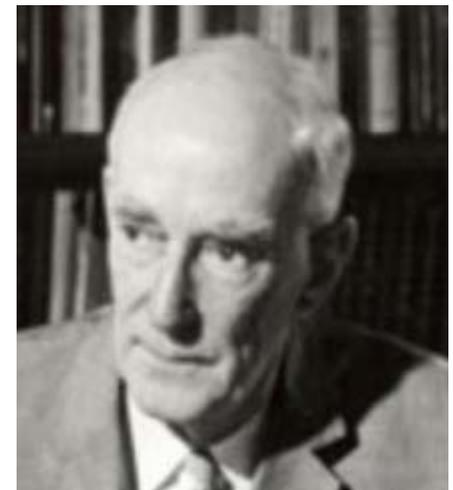
- matière noire dans les galaxies
- matière entre les galaxies + obscuration
- test de la loi de Newton à grande échelle



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

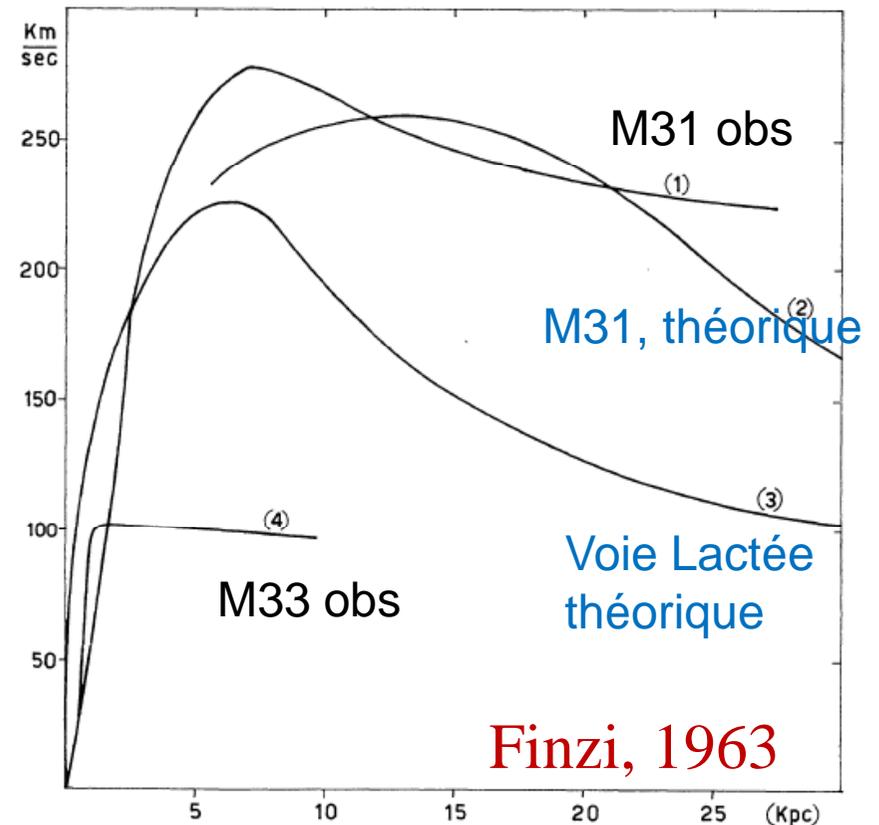
Courbes de rotation des étoiles et du gaz ionisé ($H\alpha$ et $[NII] 0.6\mu m$)

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

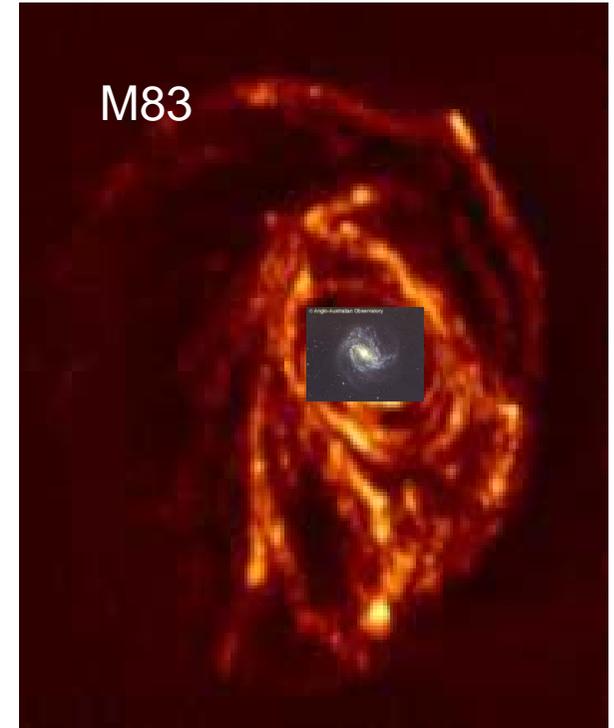
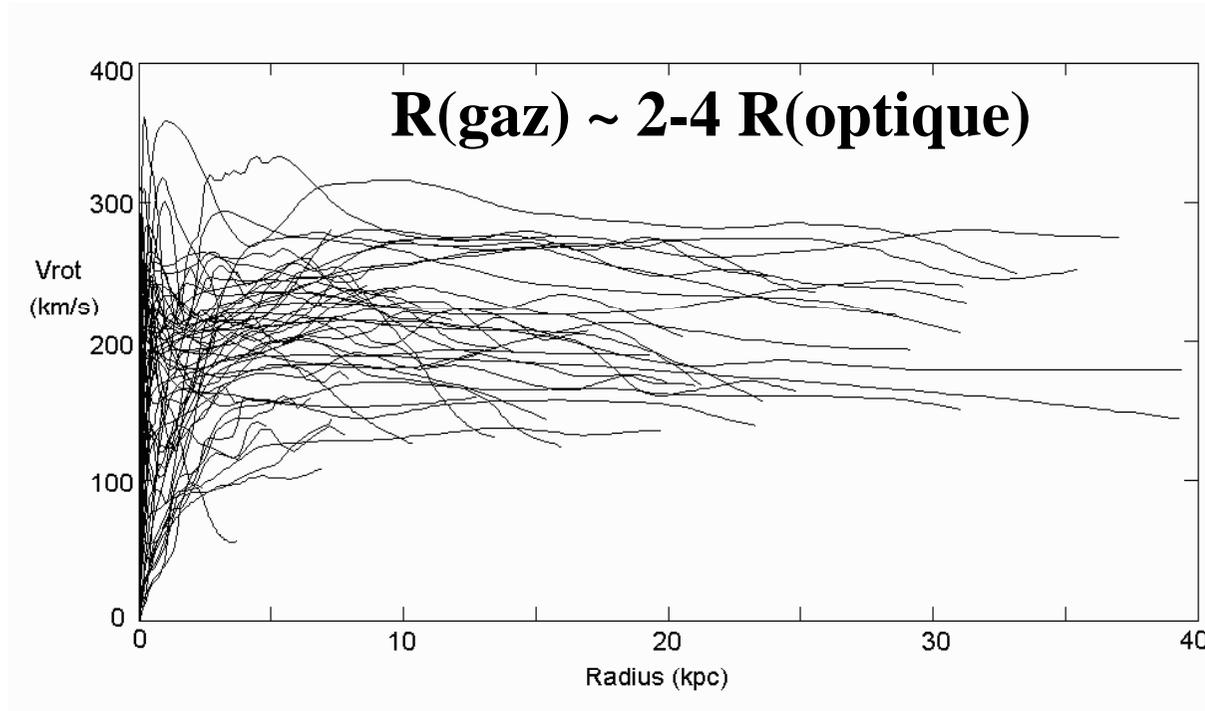
→ **Courbes plates**

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



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

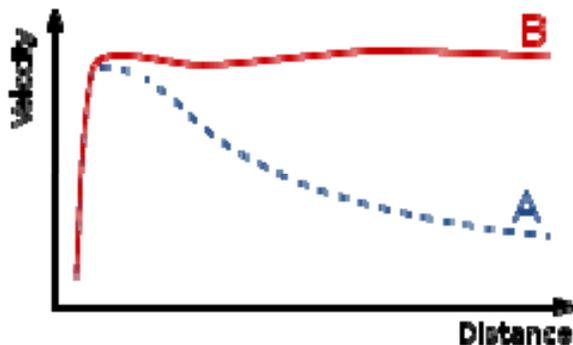
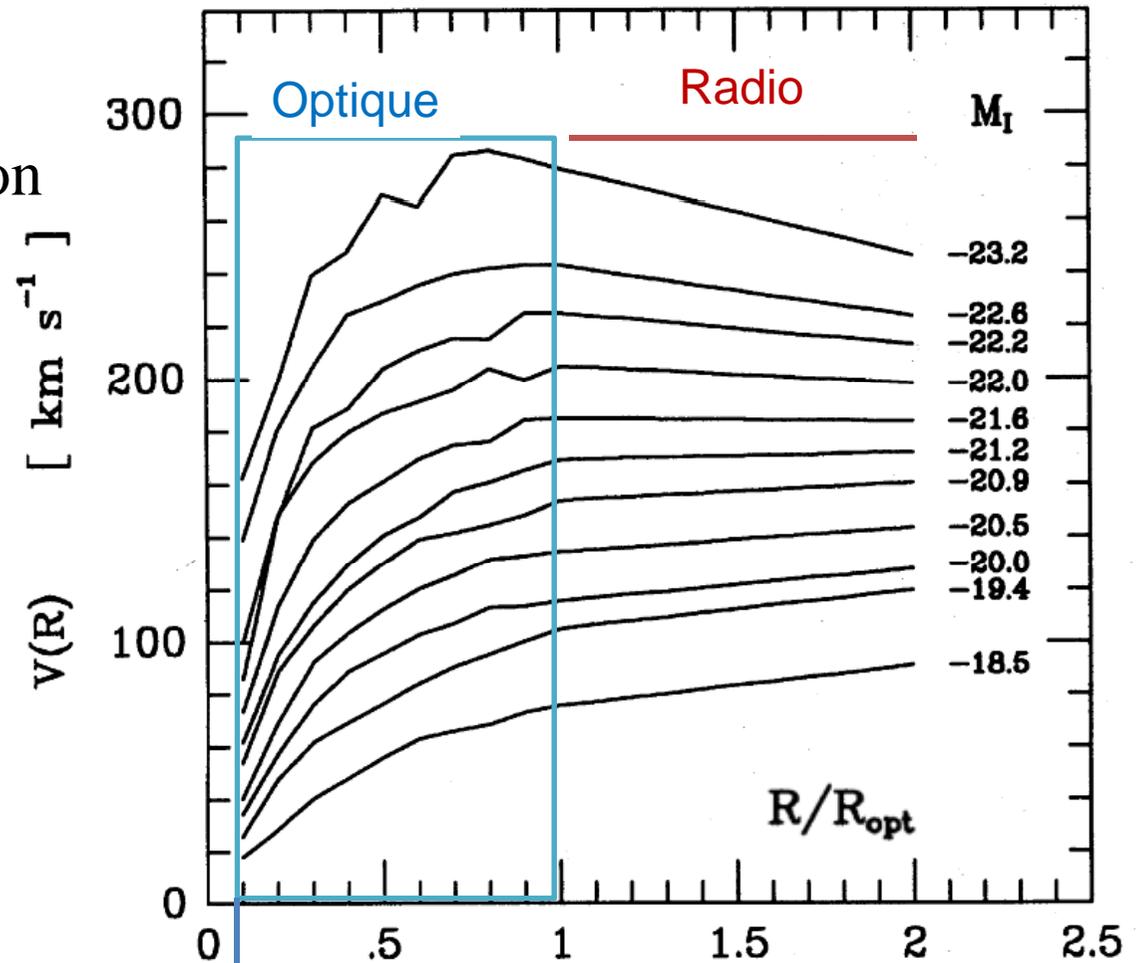
Hydrogène atomique dans les galaxies



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!

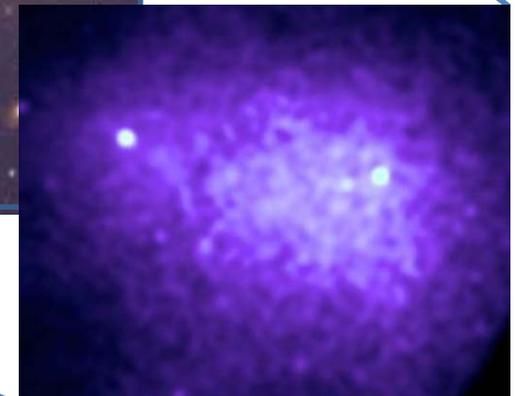
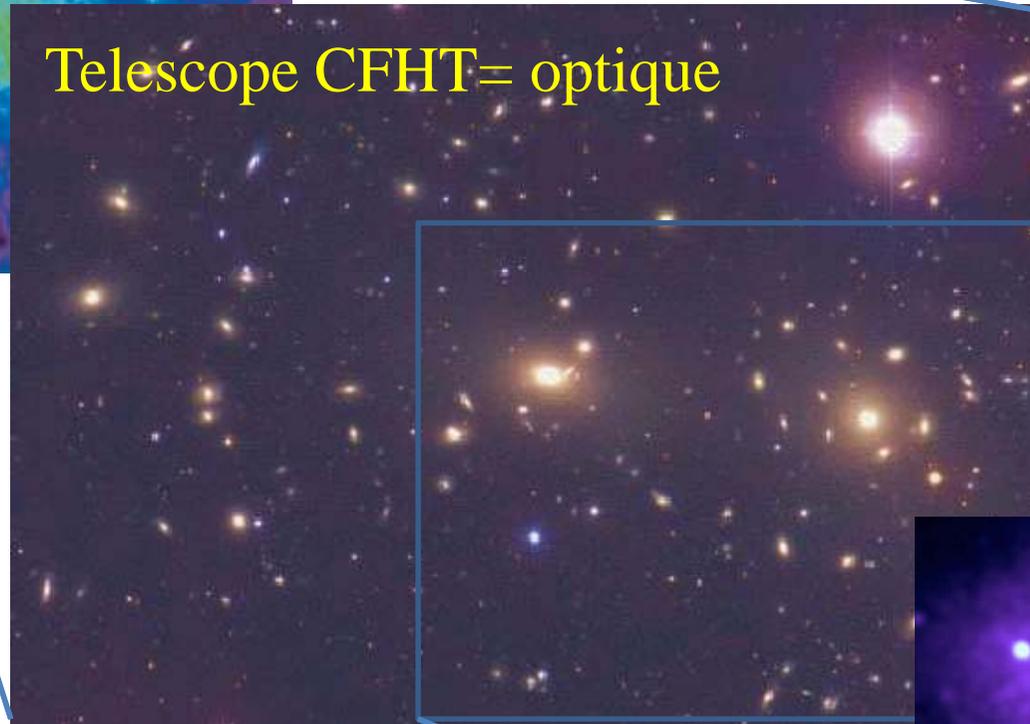
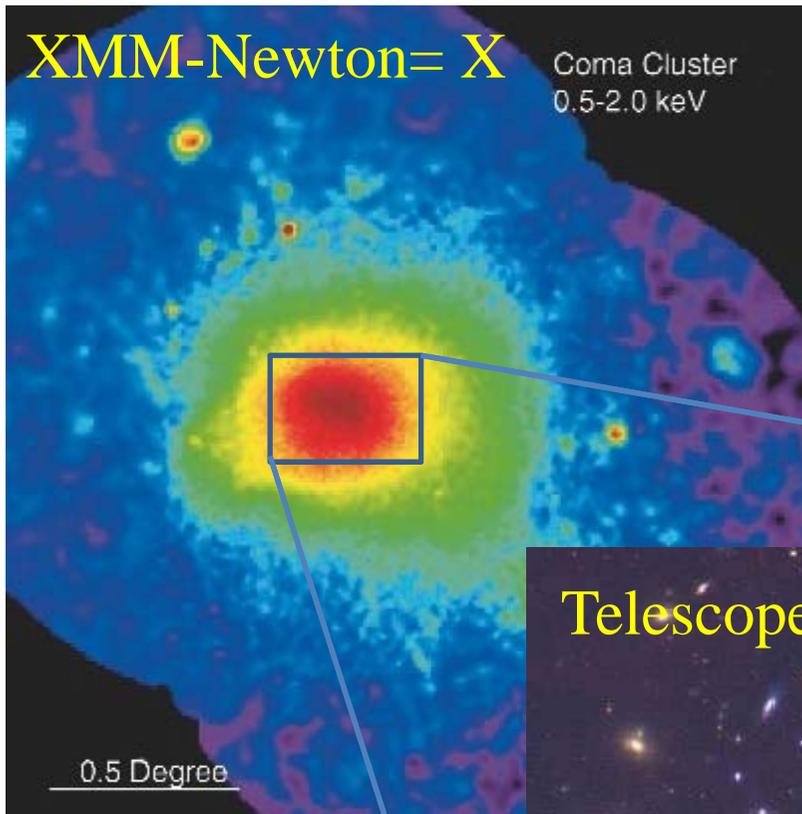
dont la masse est comparable à la matière manquante

En fait, on sait aujourd'hui $M(\text{gaz chaud}) \sim 10 M(\text{galaxies})$

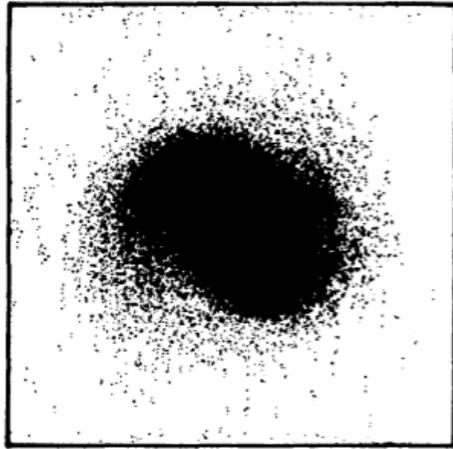
Il reste encore de la **matière noire** **~ 6 fois la masse visible**

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

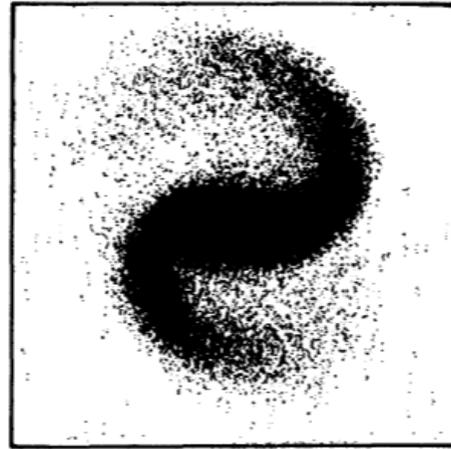
Amas de Coma rayons X, optique



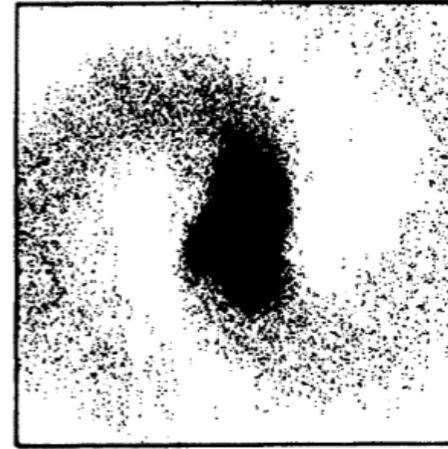
Stabilité des disques de galaxies



$t = 9.5$



$t = 10.0$



$t = 10.5$

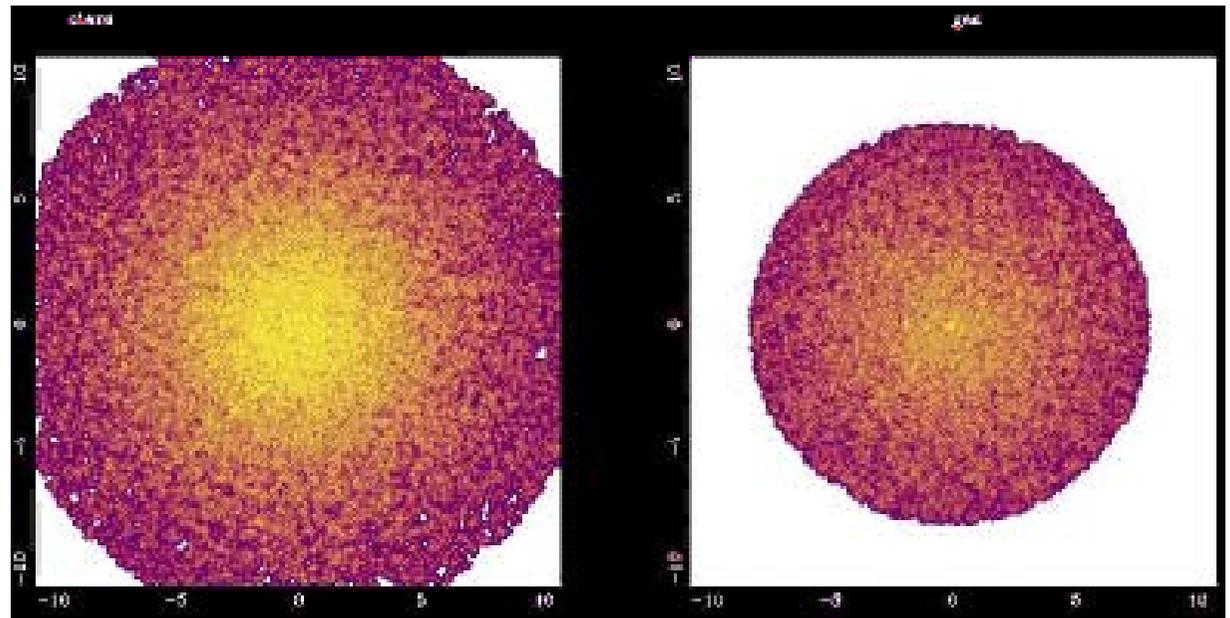
Hohl 1971

Etoiles

Gaz

Ostriker & Peebles 1973

Les galaxies doivent être entourées d'un halo sombre



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

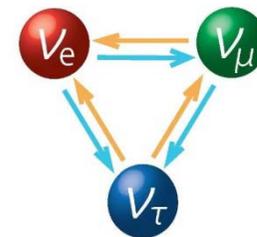
☛ Fluctuations primordiales très petites dans le fond cosmologique

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 ?

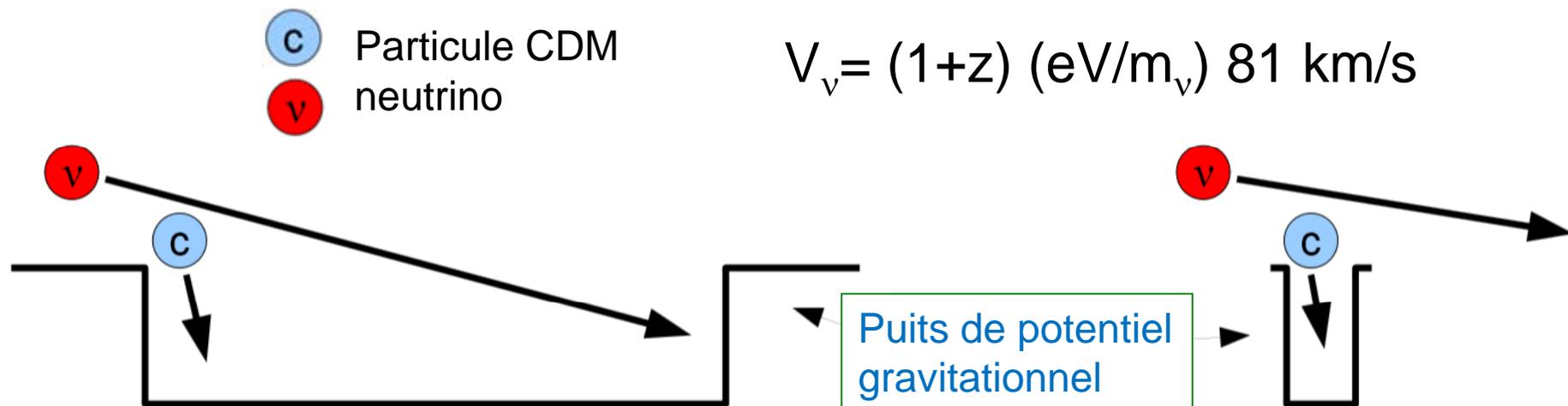
$$\Omega = \rho/\rho_c = \Sigma m(\text{neutrino}) / 45 \text{ eV}$$

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

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

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

Suppression des petites structures

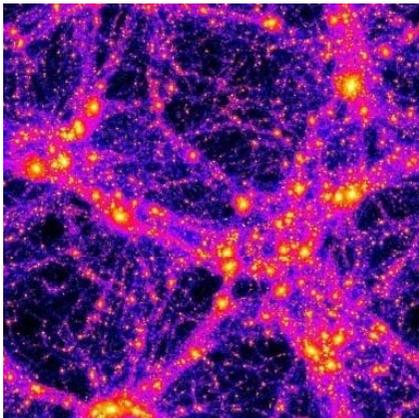


Types de matière noire

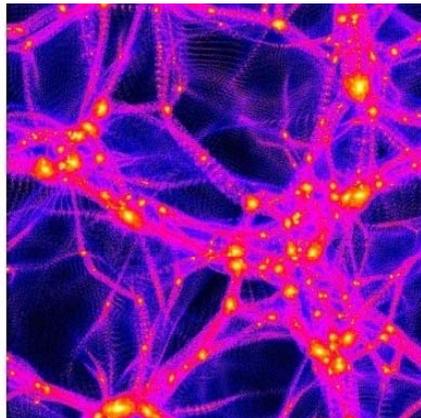
Chaude (neutrinos)
Relativiste au découplage
**Ne peut pas former
les structures,
si $m < 5 \text{ keV}$**

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

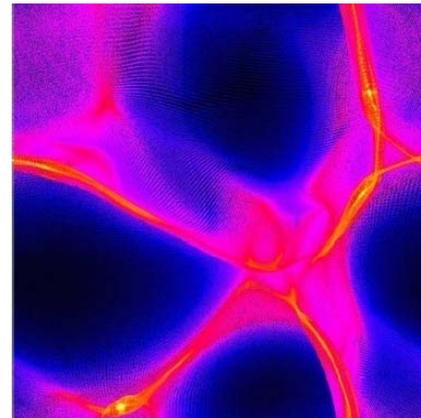
Froid



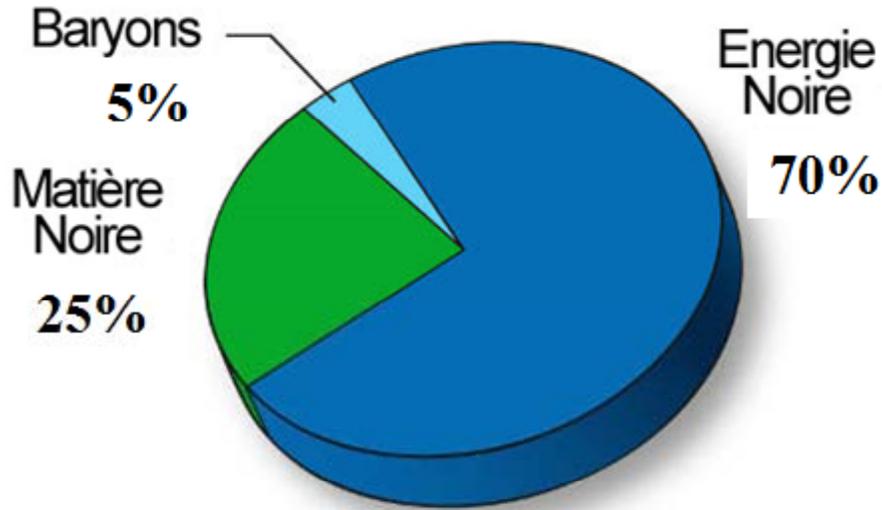
Tiède



Chaud

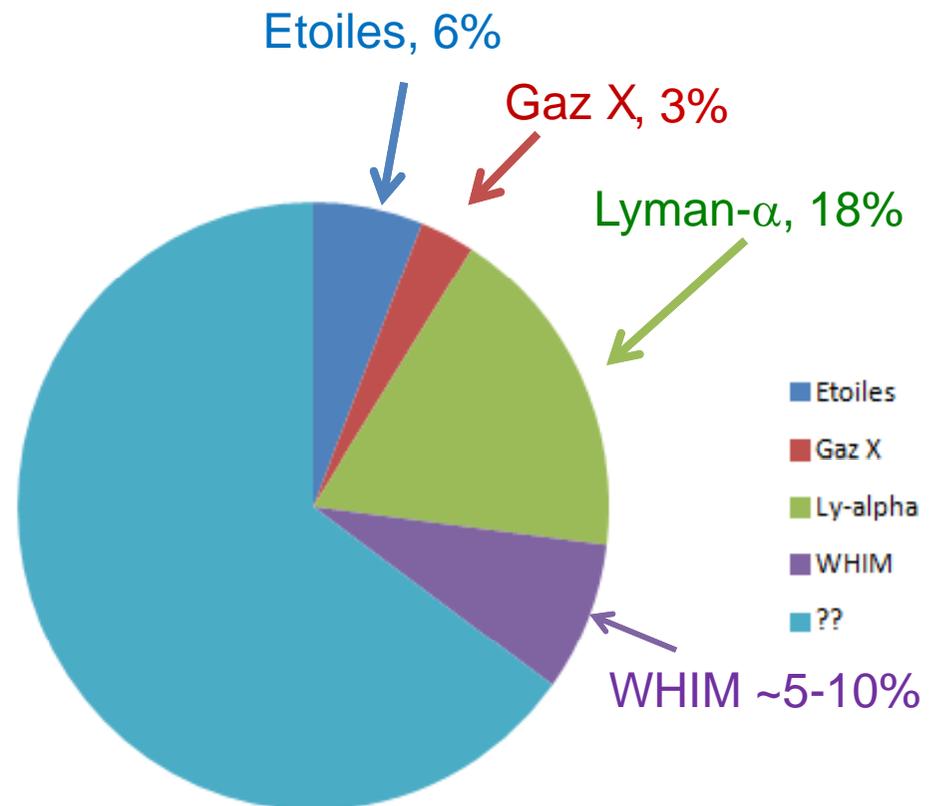


On sait beaucoup.... Et peu

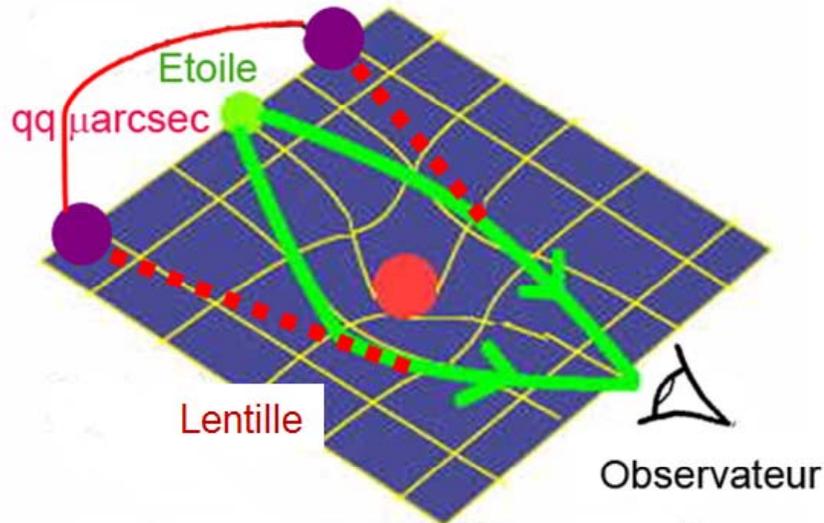


Parmi les baryons
(atomes, matière ordinaire)

?? 65%



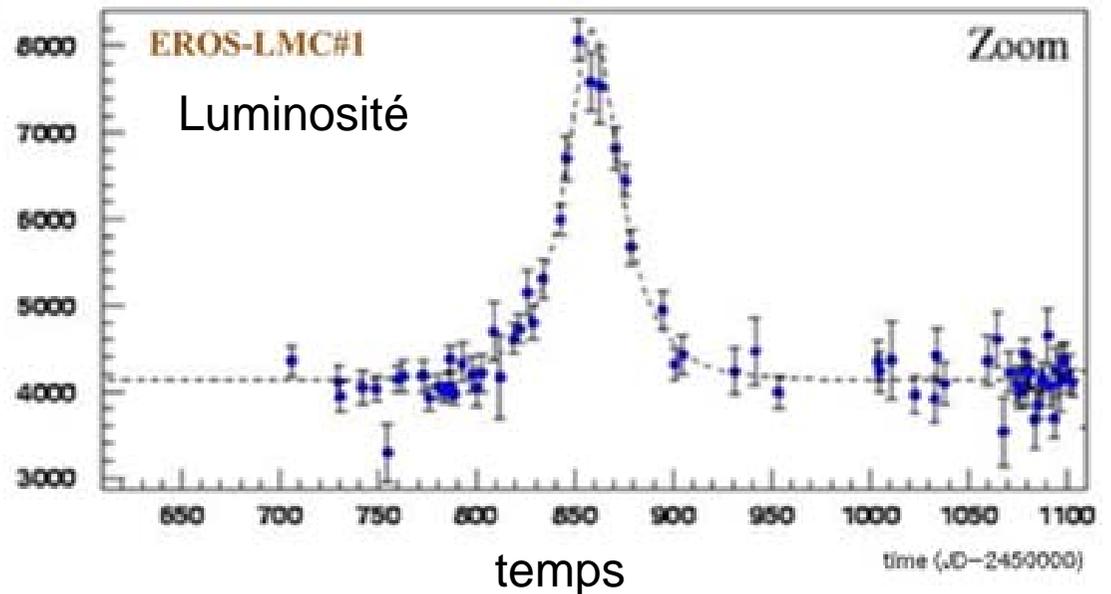
Micro-lentille gravitationnelle



Pour une lentille-étoile, la séparation des images est de $100 \mu\text{arcsec}$

→ Juste une amplification ~ 30 jours

Distorsion de l'espace par la gravité



Matière noire baryonique

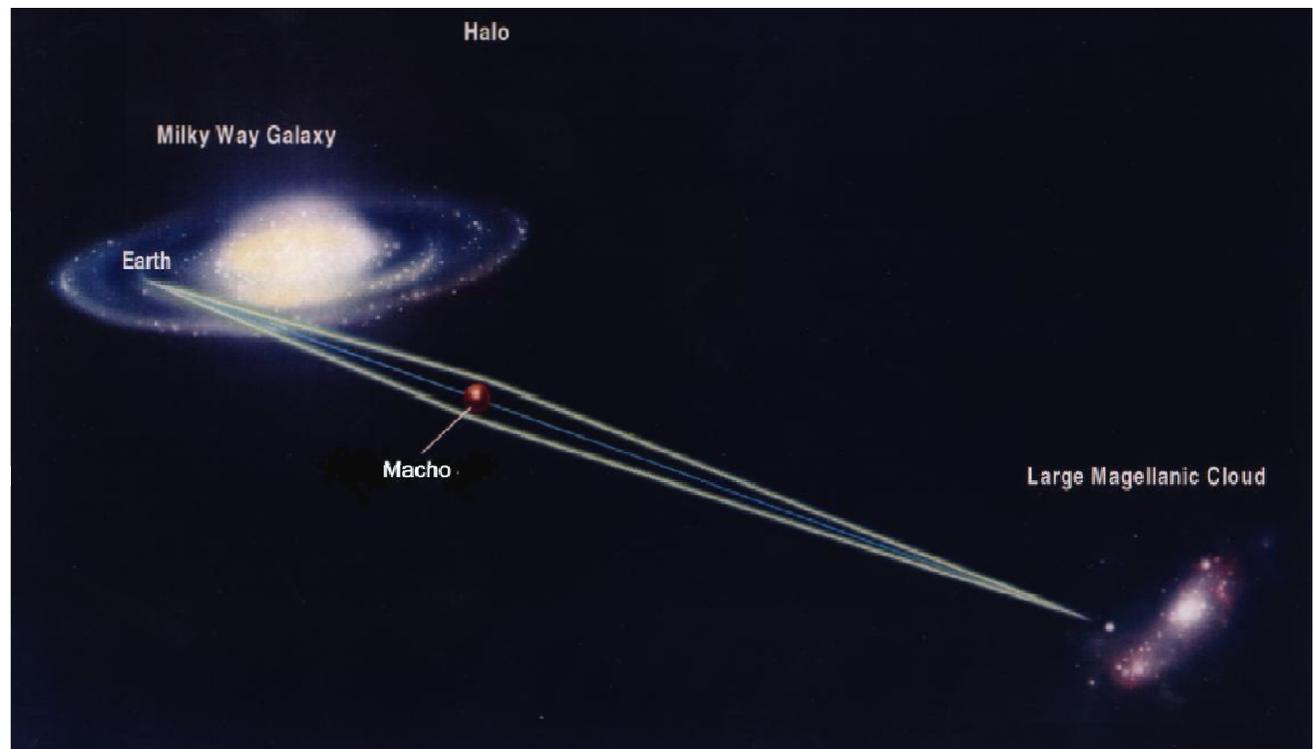
Sous quelle forme? Objets compact, naines brunes

MACHOS (MAssive Compact Halo Objects)

Expériences de micro-lentille (MACHOs, EROS, OGLE)

Les objets de masse $10^{-7} M_{\odot} < M < 5 M_{\odot}$ sont éliminés $< 10\%$ du halo

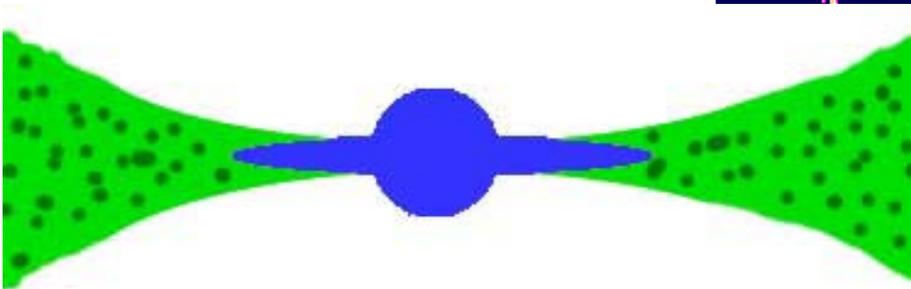
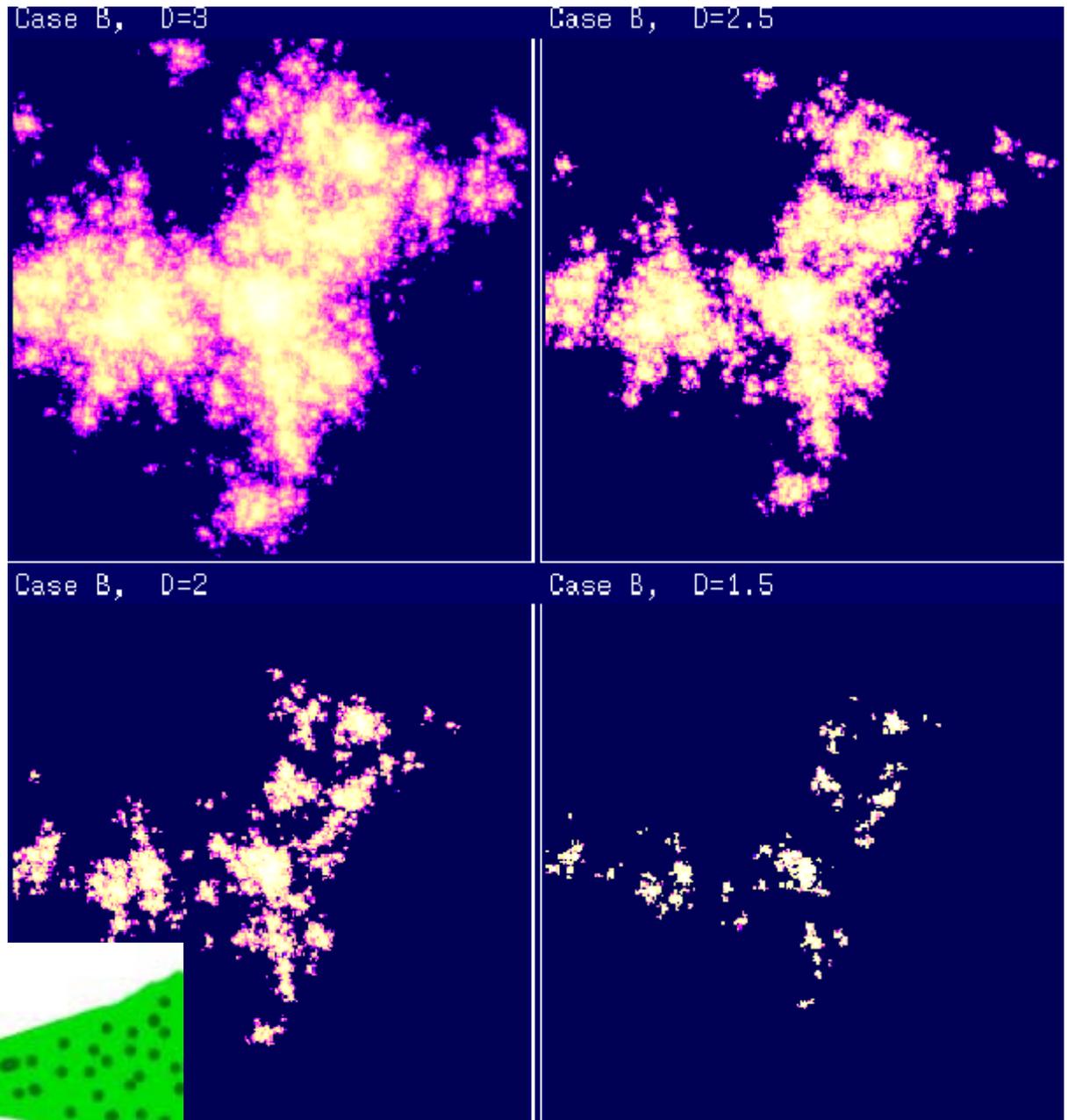
Des millions d'étoiles observées, pendant plus de 10 ans



Où sont les baryons: Gaz H₂ froid?

La stabilité du gaz H₂
est due à sa
Structure fractale

Masse $\sim 10^{-3} M_{\odot}$
densité $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
taille $\sim 20 \text{ AU}$
 $N(\text{H}_2) \sim 10^{25} \text{ cm}^{-2}$



Pfenniger & Combes 1994

Lentilles gravitationnelles: régime fort



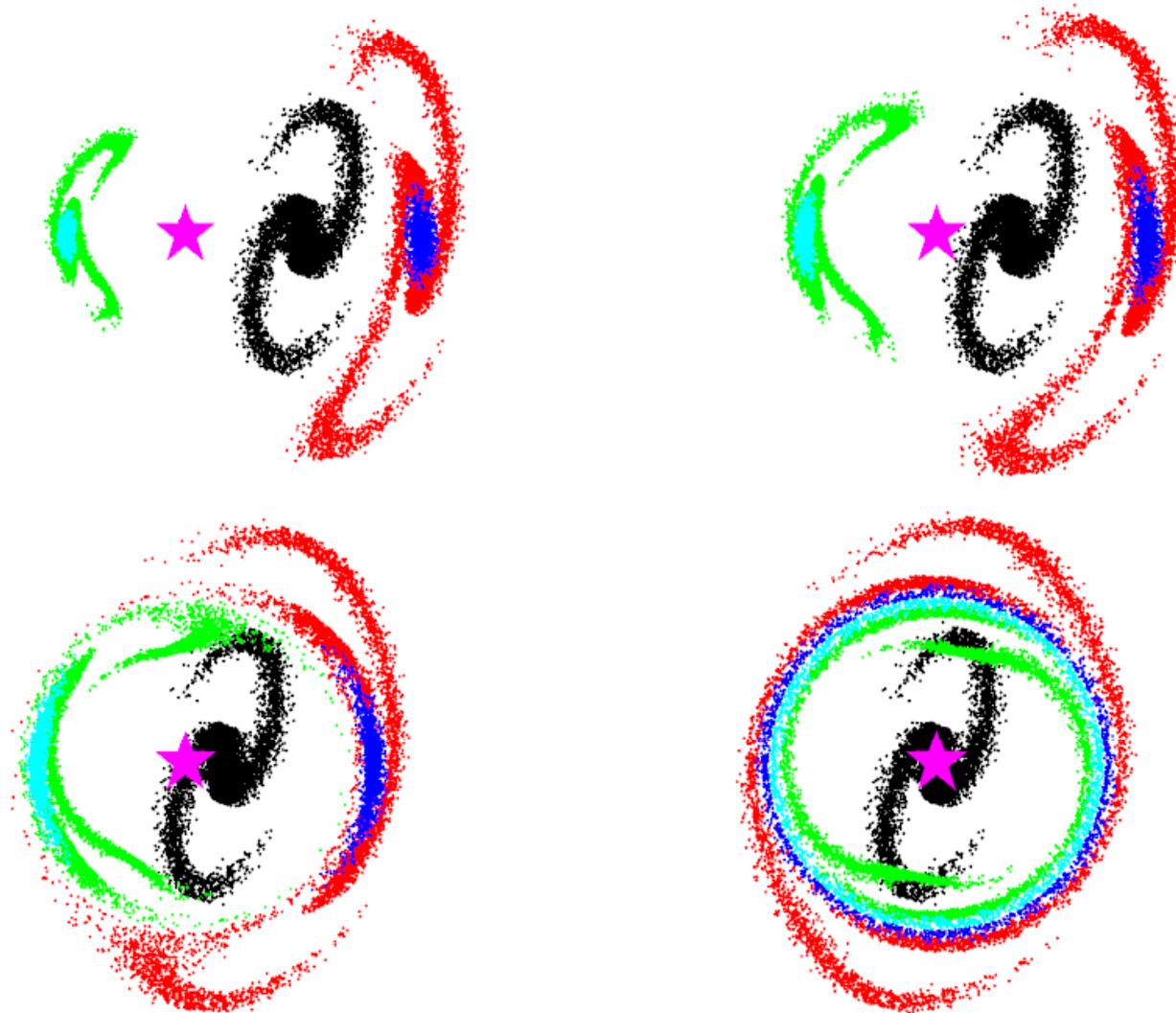
Abell 2218 HST

A370, Le premier arc
Découvert à l'Obs de
Toulouse
(Soucail et al 1987)

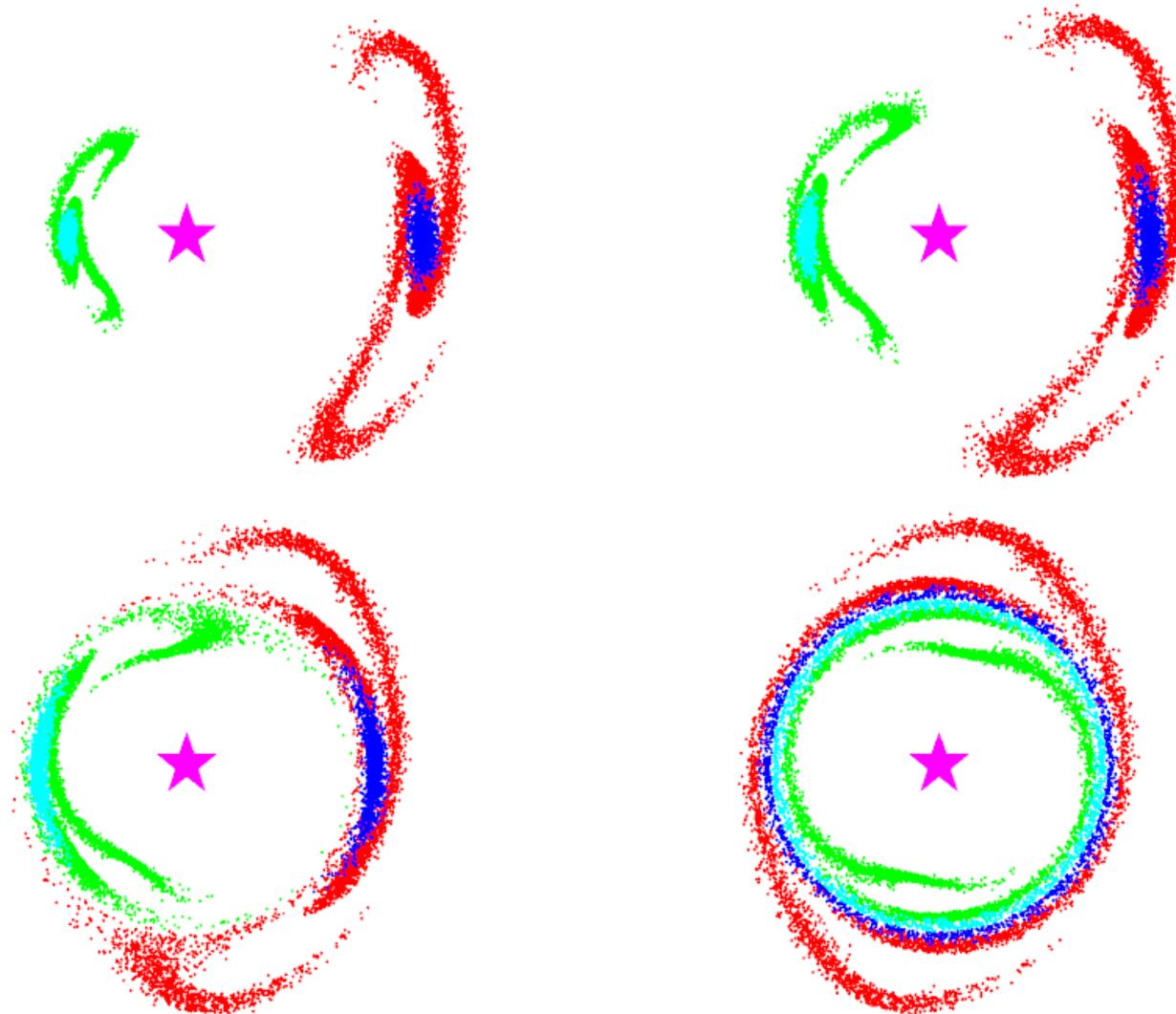


Lentilles fortes: arcs

Images d'une galaxie spirale



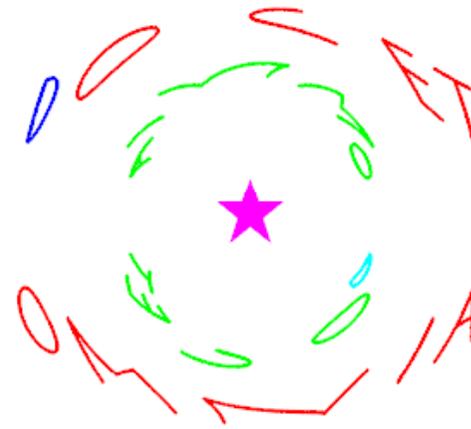
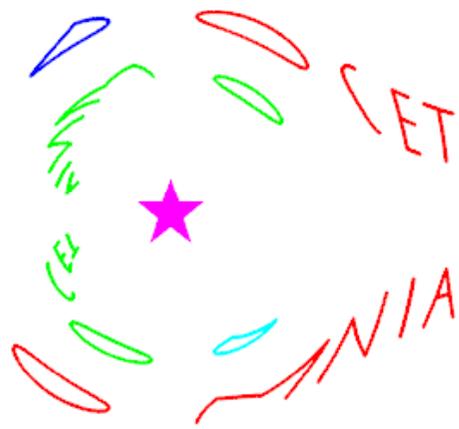
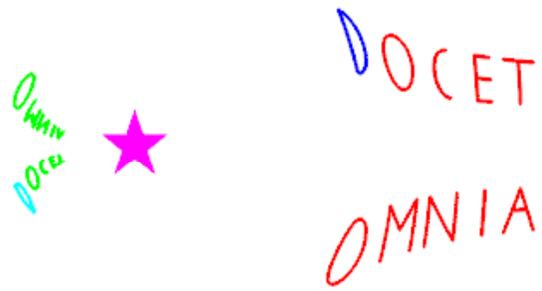
Images d'une galaxie spirale



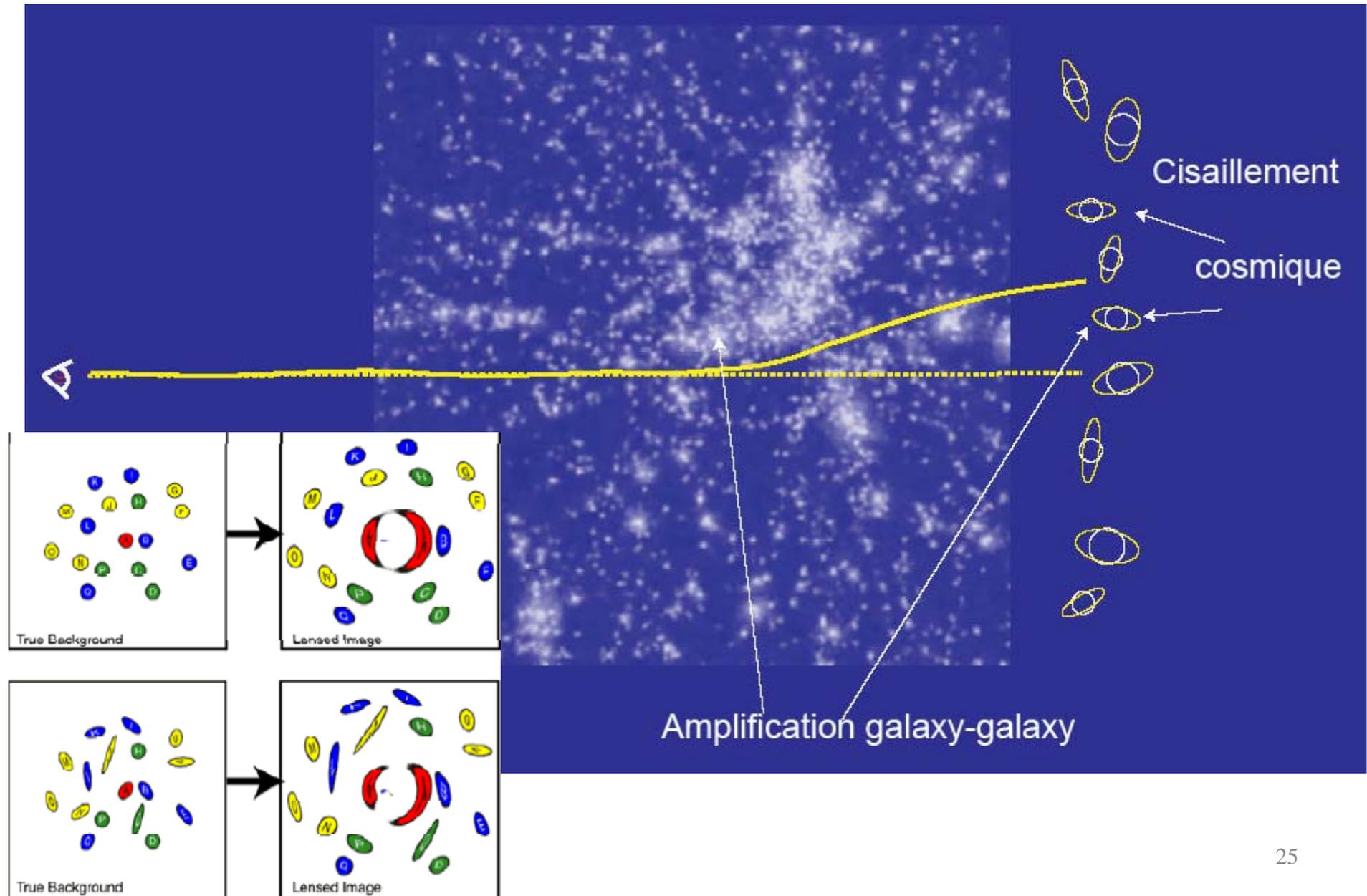
Autres images



Autres images



Lentilles gravitationnelles: régime faible

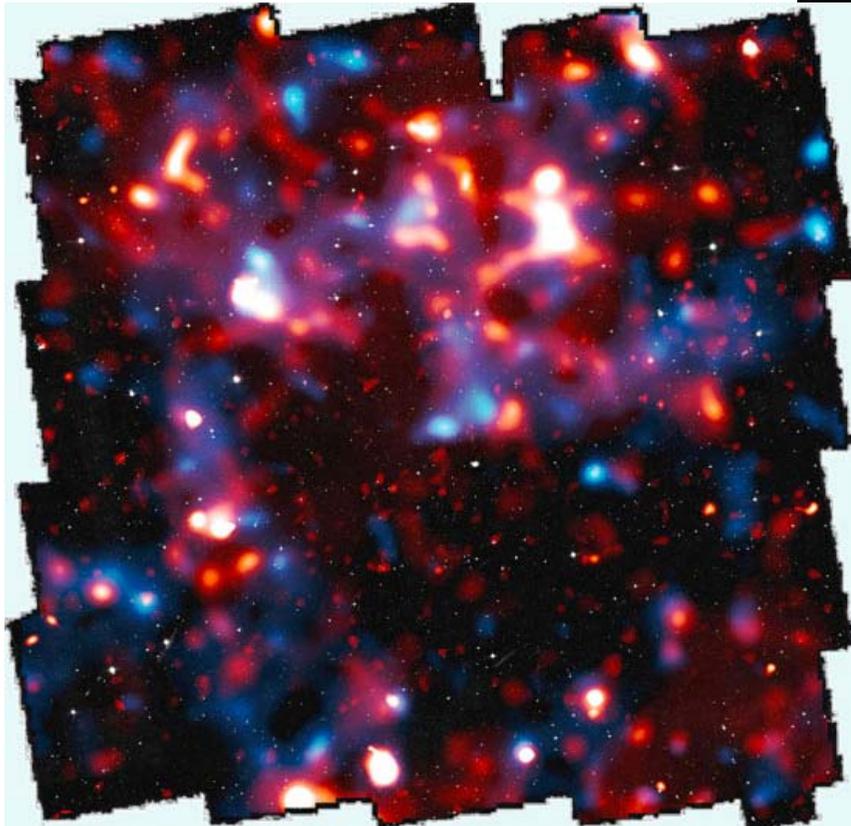
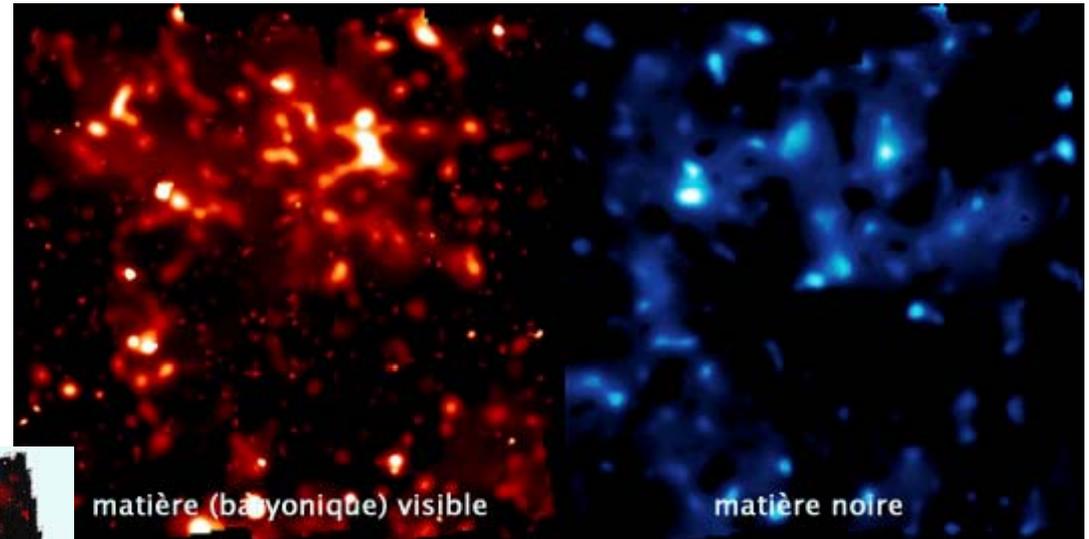


Cisaillement gravitationnel

Rouge: gaz X

Bleu: matière totale

Champ Cosmos

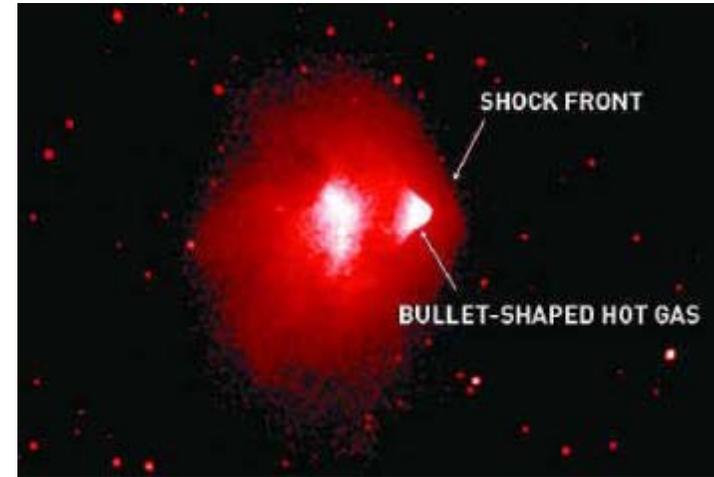


**Contraintes sur la
Matière noire, et aussi
Énergie noire**

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)

Abell 520

$z=0.201$

Rouge = gaz X

Contours = lentilles

→ Matière noire

coïncide avec le gaz X
mais vide de galaxies

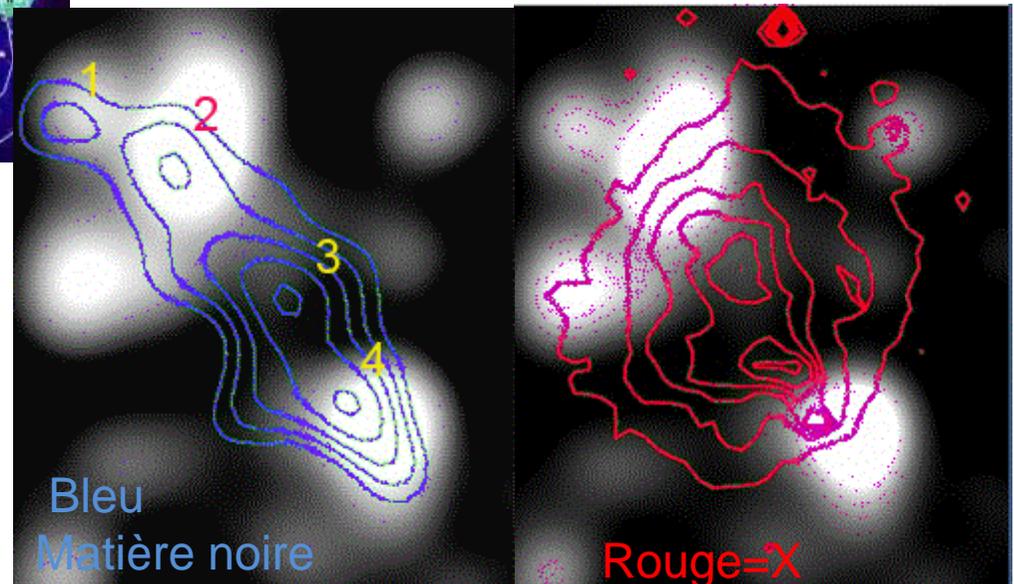
Cas opposé au boulet!



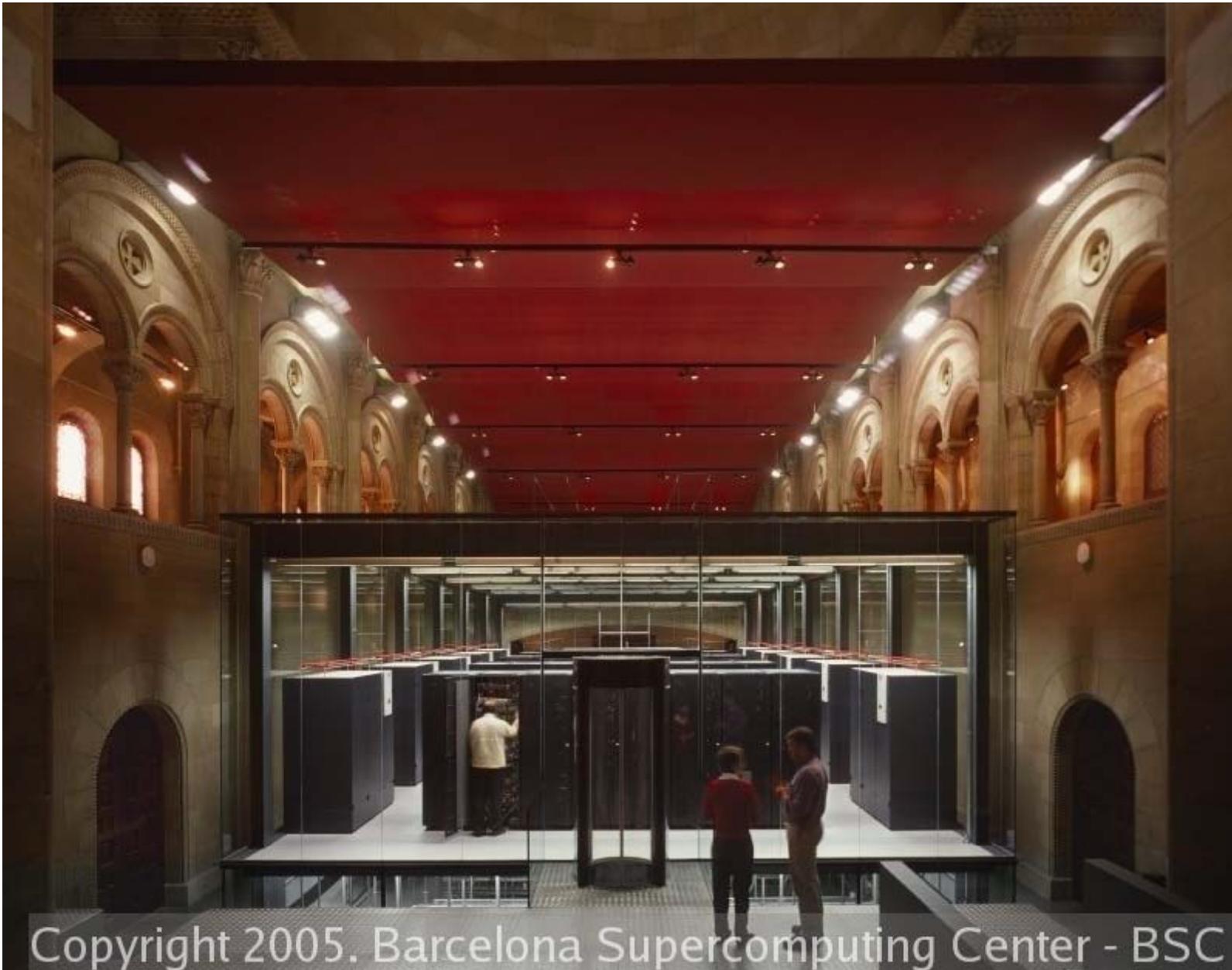
Contraintes sur la section efficace
de collision de la MN

Mahdavi et al 2007, Clowe et al 2012

Jee et al 2012, Jee et al 2014



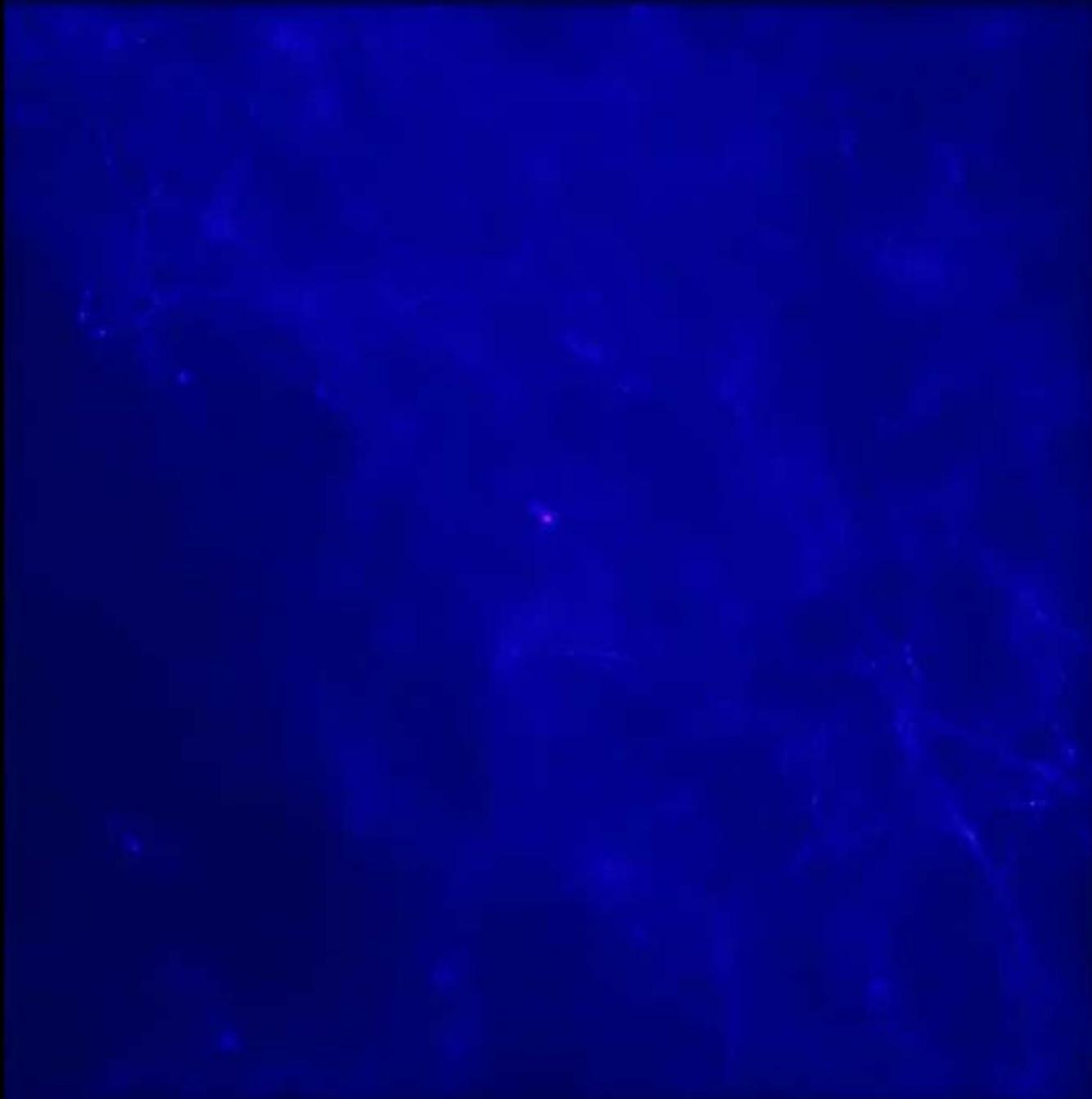
Les astronomes recréent l'univers



Copyright 2005. Barcelona Supercomputing Center - BSC



$a = 0.121$ $z = 7.3$ $t = -13.0 \text{ Gyr}$



Problèmes du modèle standard Λ -CDM

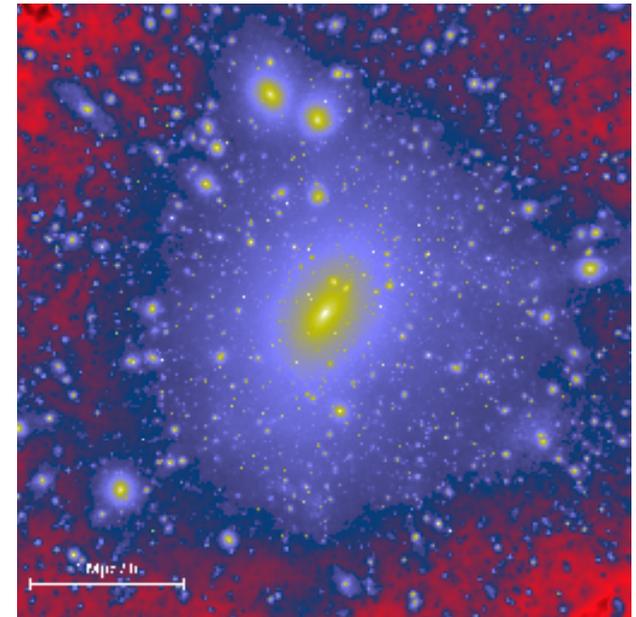
→ Prédiction de "cuspides" au centre des galaxies, en particulier absentes dans les naines Irr, dominées par la matière noire



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?



De quoi est constitué l'Univers ?

La Terre
L'Air
L'Eau
Le Feu



Platon

Aristote

Baryons, Leptons
Photons, **WIMPs**
Quintessence ?

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 →	2/3	2/3	2/3	0	
spin →	1/2	1/2	1/2	1	
nom →	u up	c charm	t top	γ photon	
Quarks	4,8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0	interaction forte
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
d down	s strange	b bottom	g gluon		
Leptons	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²	interaction faible
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	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		
1/2	1/2	1/2	1		
e électron	μ muon	τ tau	W [±] boson W		

Venant du Big-Bang

~400 photons /cm³

~300 neutrinos /cm³

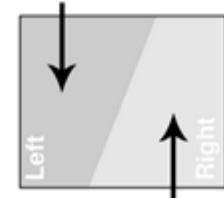
0,1 milliards de milliards par sec vous traversent

→ Recherche de
WIMPS
depuis 1985

Extension vers
Les neutrinos
Stériles ?



Chiralité gauche



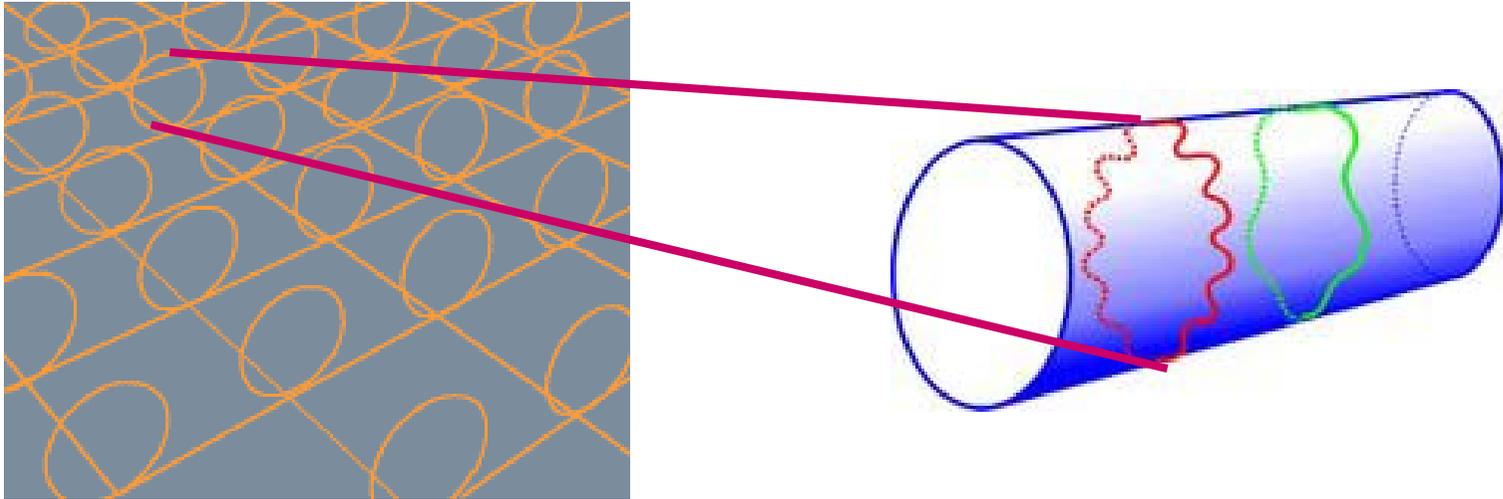
Chiralité droite



<0.0001 eV	~keV	~0.01 eV	~GeV	~0.04 eV	~GeV
0	N ₁	0	N ₂	0	N ₃
Left	sterile neutrino	Left	sterile neutrino	Left	sterile neutrino
ν _e neutrino électronique		ν _μ neutrino muonique		ν _τ neutrino tauique	

Dimensions Supplémentaires Universelles

- Kaluza-Klein: dimensions supplémentaires



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

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

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 $mc^2 < kT$

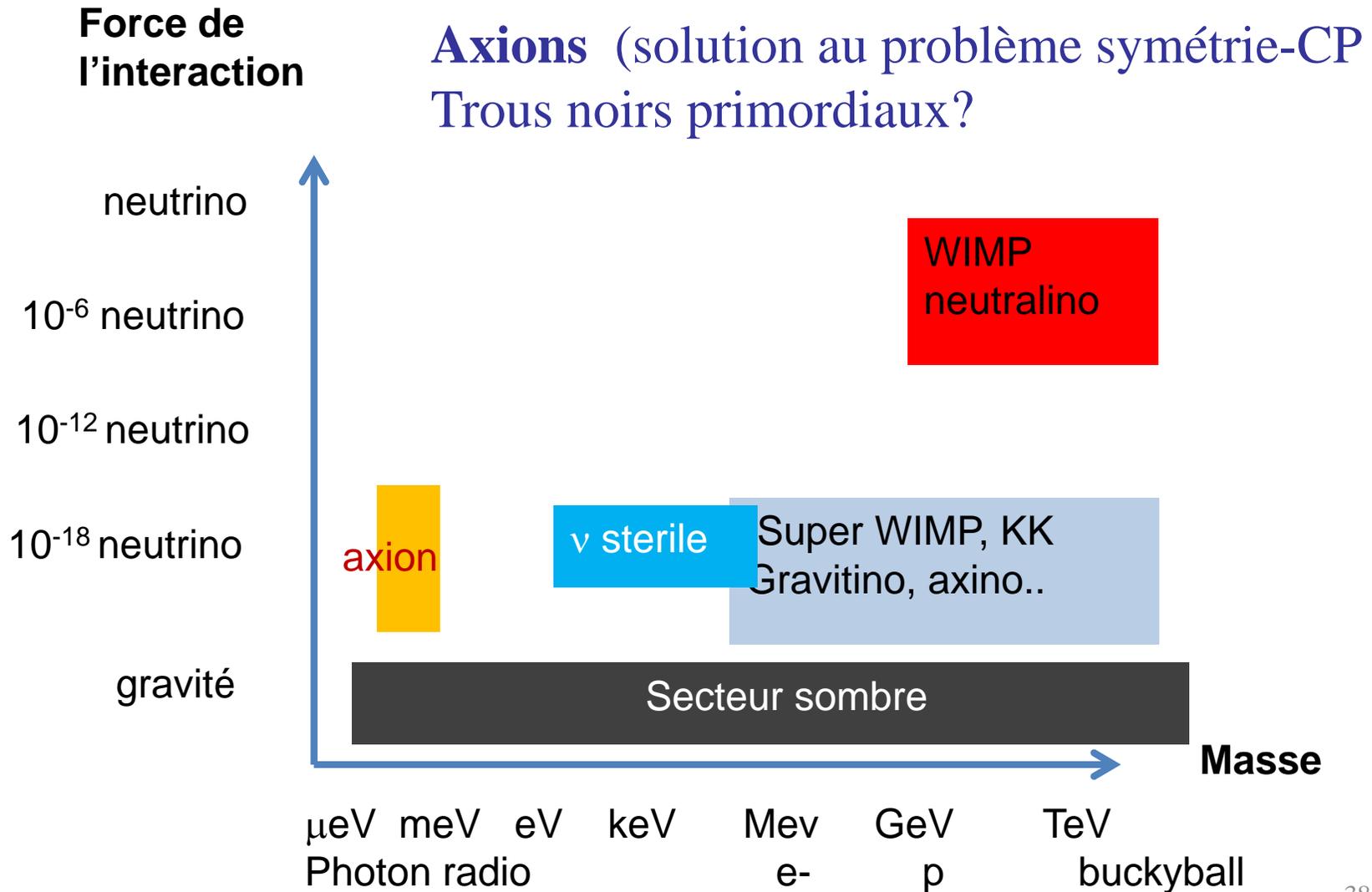
On peut calculer que leur densité relique est

$$\Omega = 6 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s} / \langle \sigma v \rangle \sim 0.2 \text{ pour } \langle \sigma v \rangle = 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$

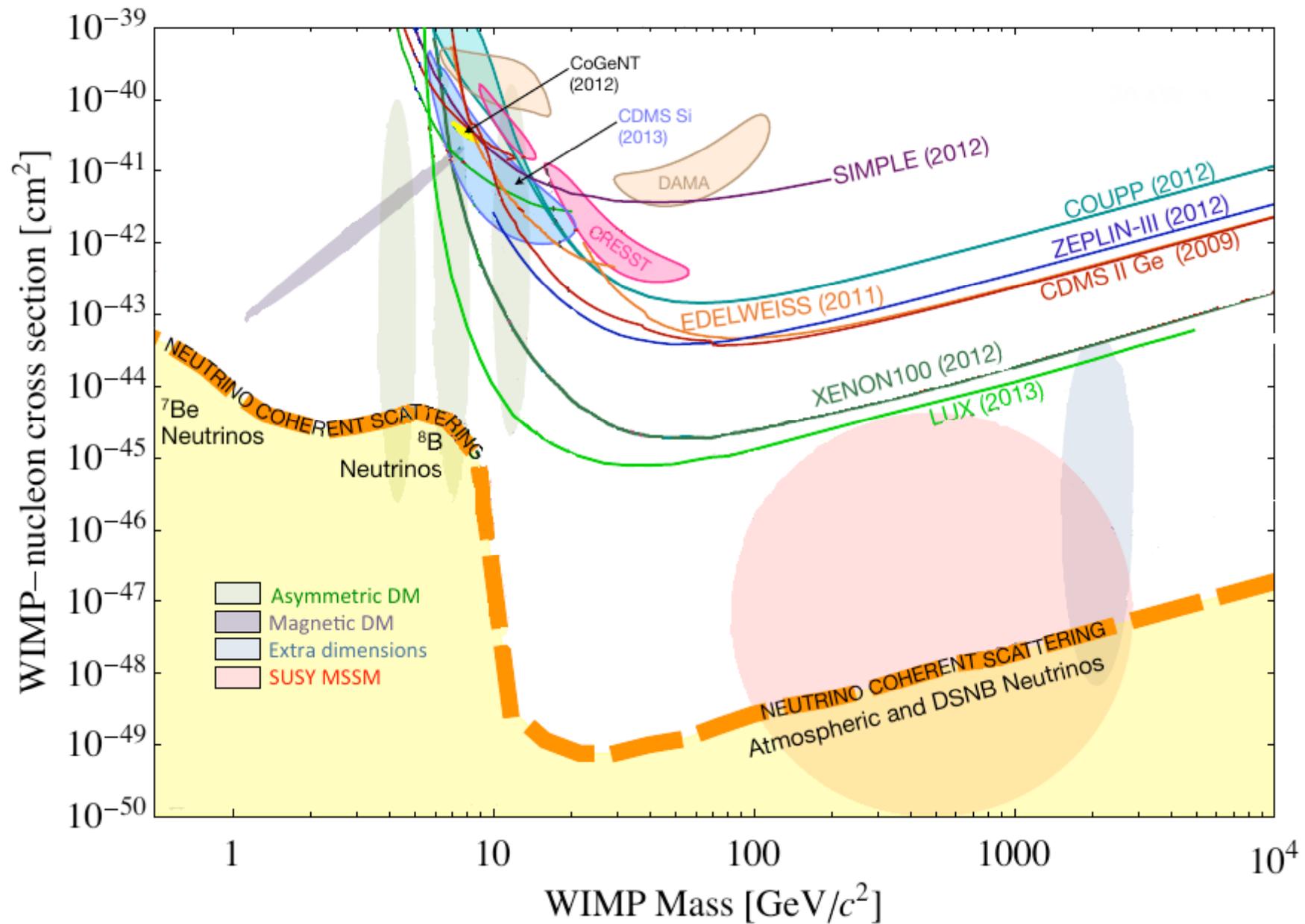
Coincidence: correspond à la particule la plus légère du modèle de la super-symétrie (neutralino)

Quelle interaction?

Domaine de masse > 20 ordres de grandeur

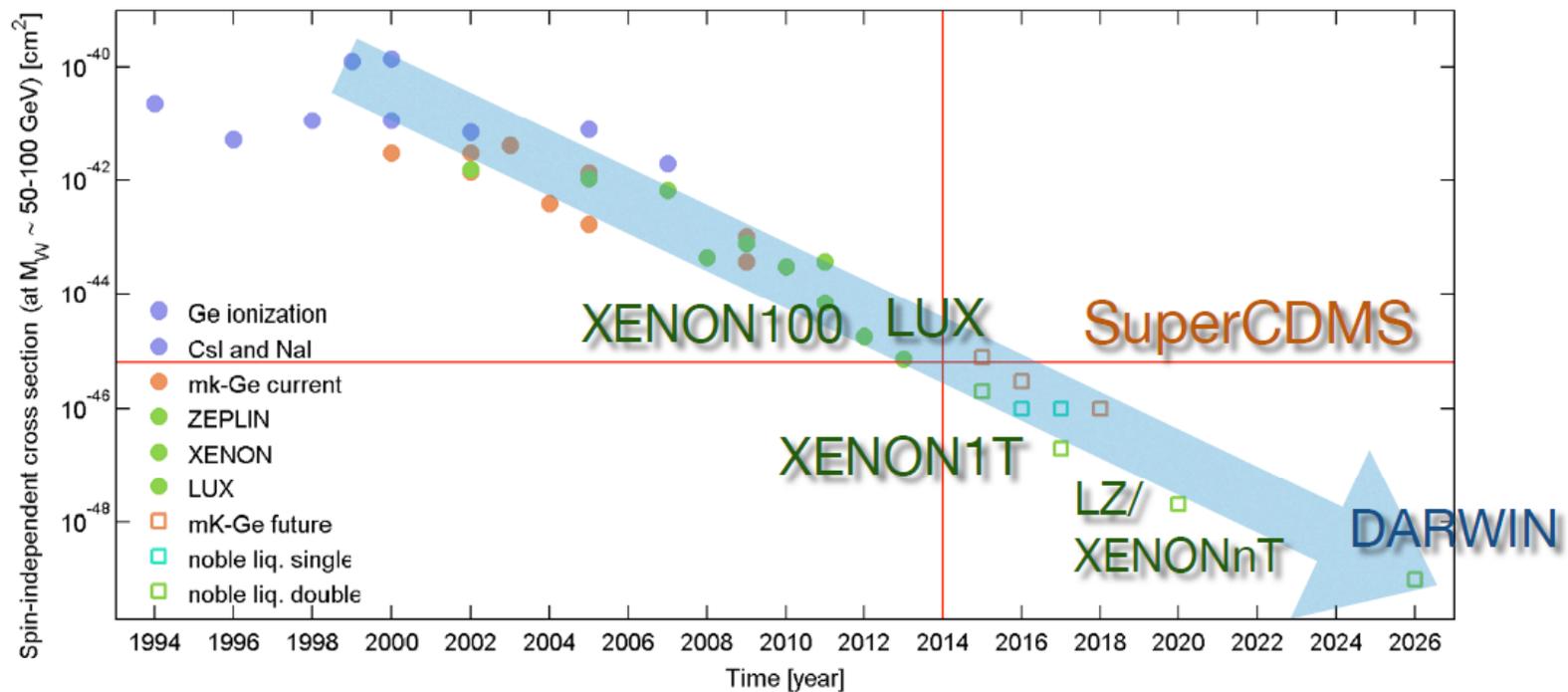


Limites de détection



Futur et Perspectives

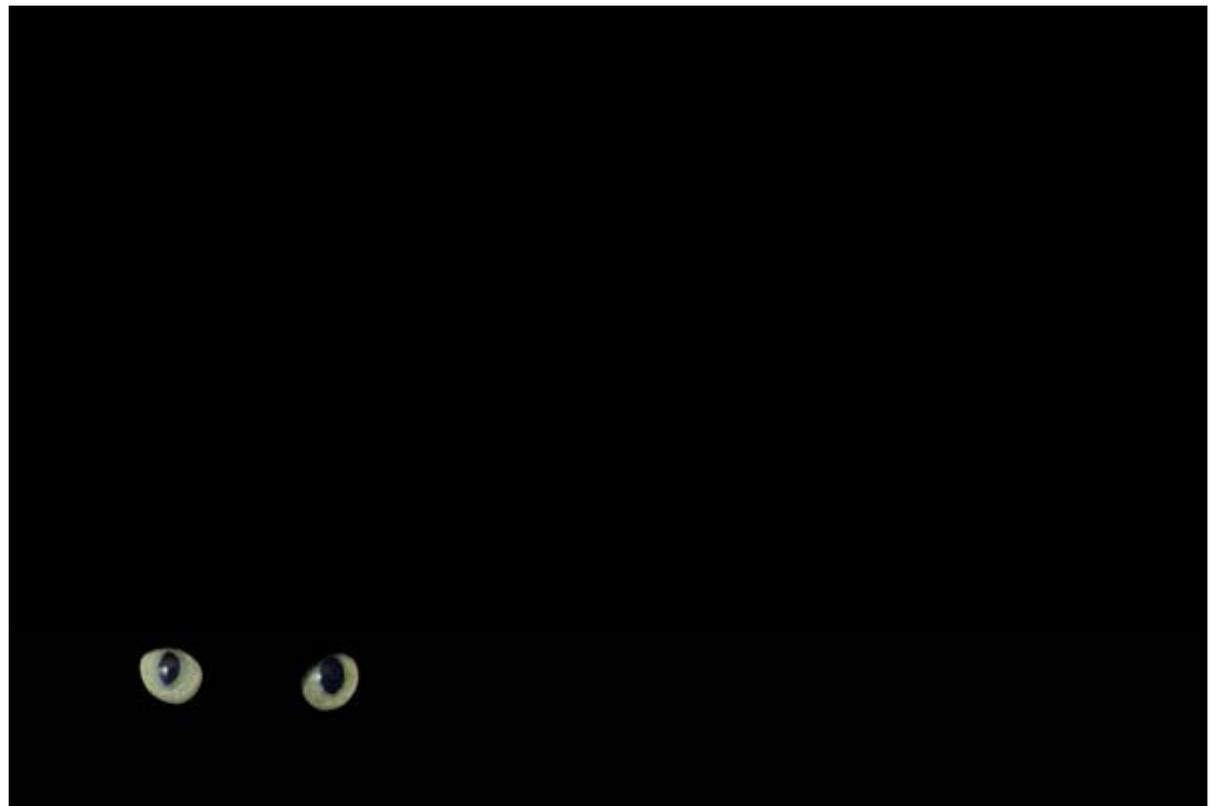
Environ un gain d'un facteur **10 tous les 2 ans**
Détection peut-être en 2026...



Le chat de Confucius (ou la chasse aux fantômes)



Attraper un chat noir dans l'obscurité de la nuit est la chose la plus difficile qui soit, surtout s'il n'y a pas de chat



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 $a = a_N$

$a_0 = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2 \sim 10^{-11}g$
 Milgrom (1983)

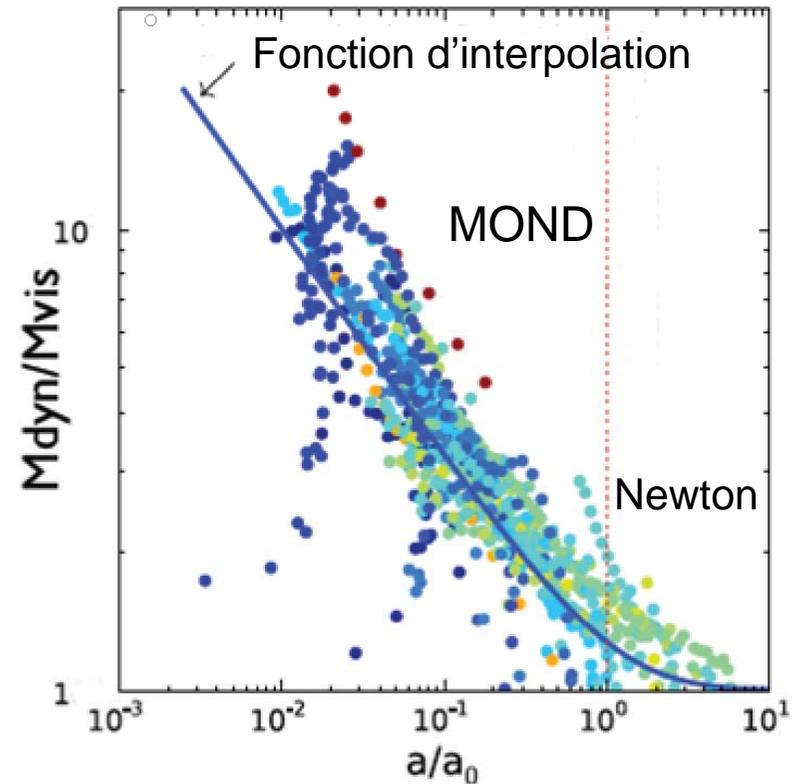
Asymptotiquement

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

Théorie Covariante: TeVeS

→ Lentille gravitationnelle

$$M_{\text{dyn}}/M_{\text{vis}} = f(a_N/a_0)$$

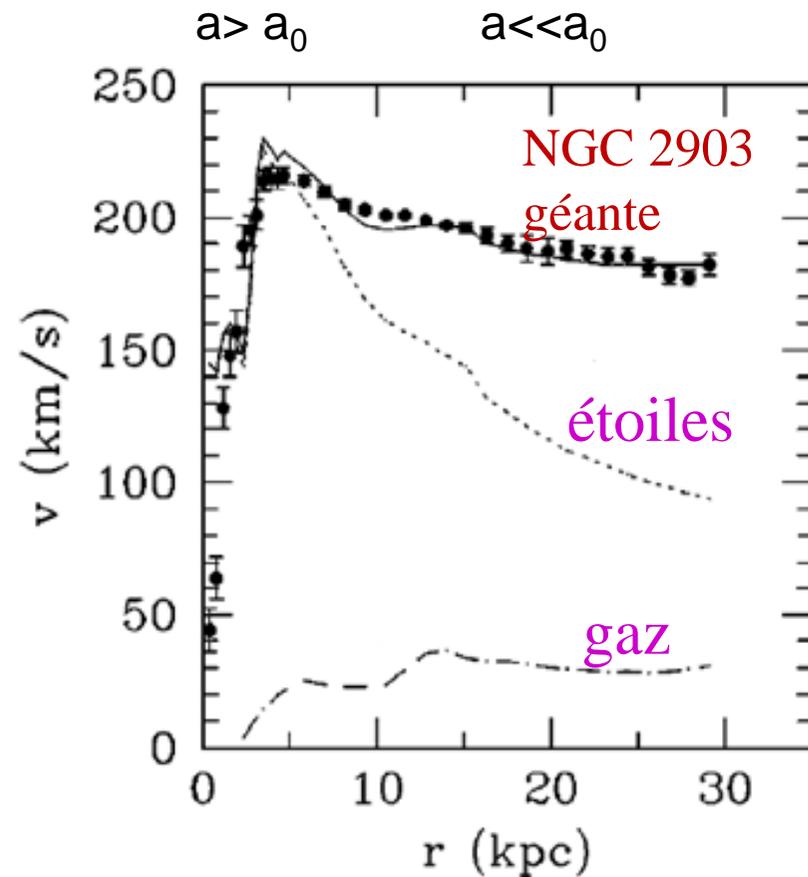
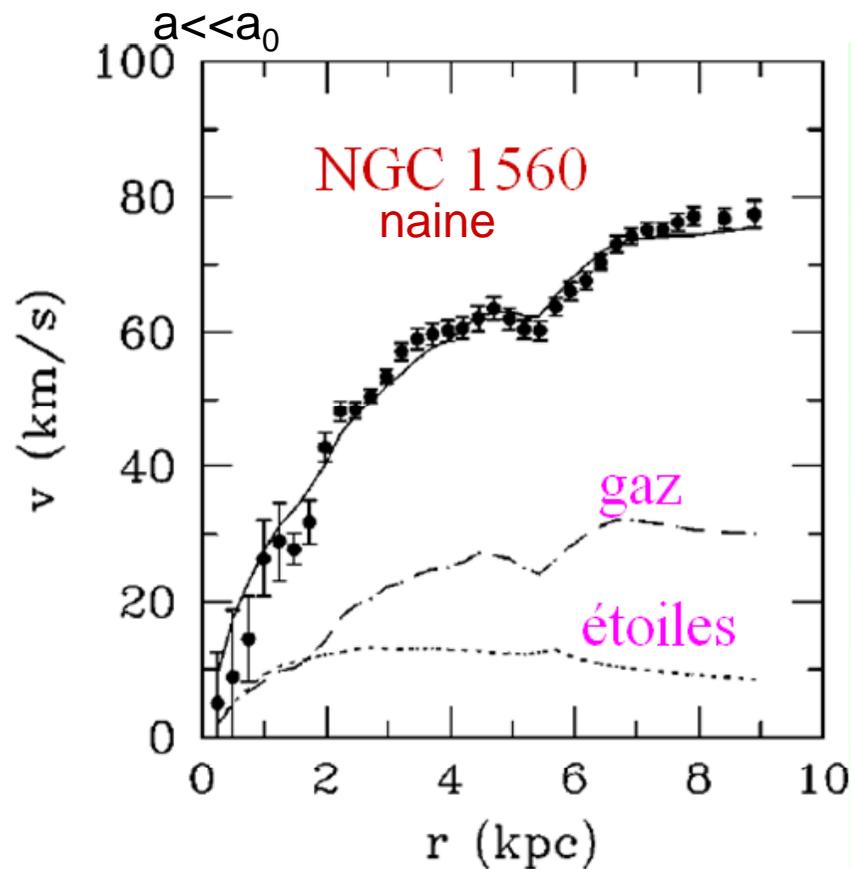


$$\nabla \cdot [\mu(|\nabla\phi|/a_0)\nabla\phi] = 4\pi G\rho$$

Nouvelle équation de Poisson

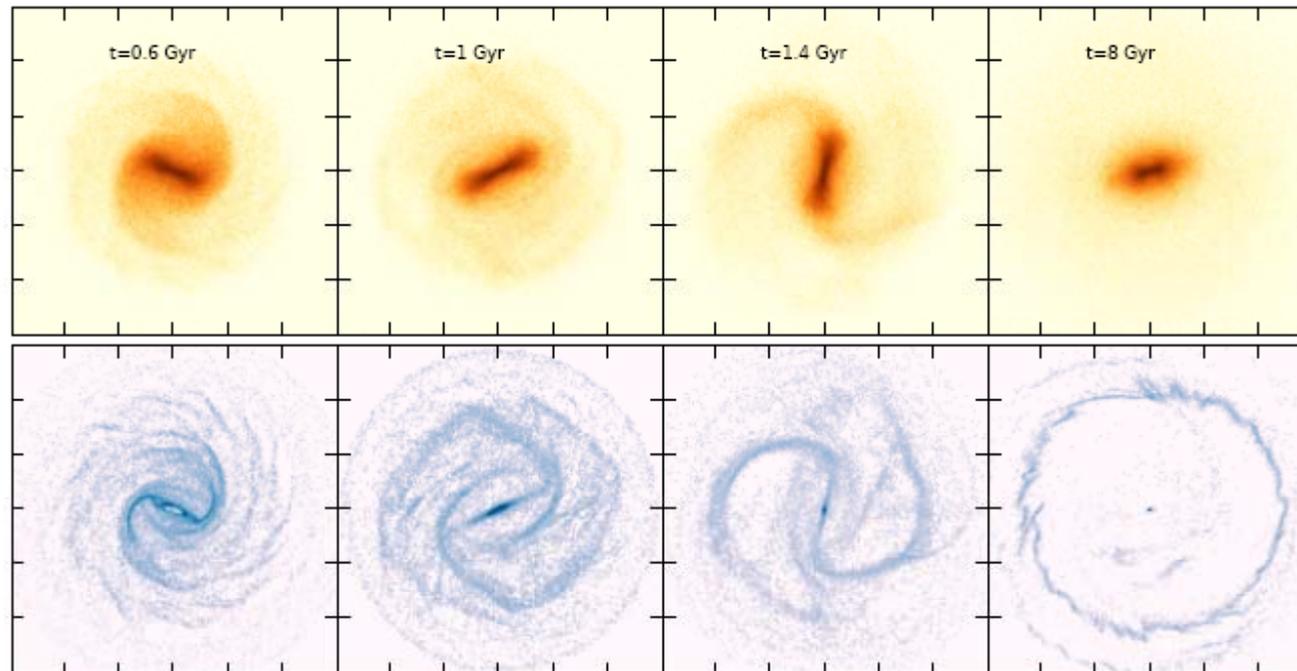
Les courbes de rotation avec MOND

Les courbes de rotation sont reproduites pour tous types de galaxies (naines, géantes)



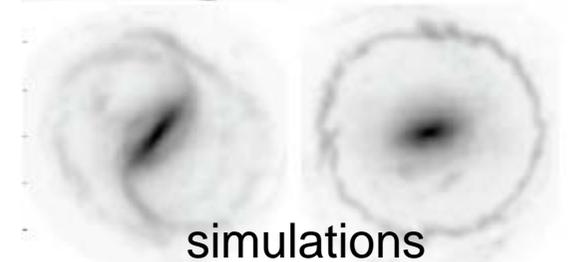
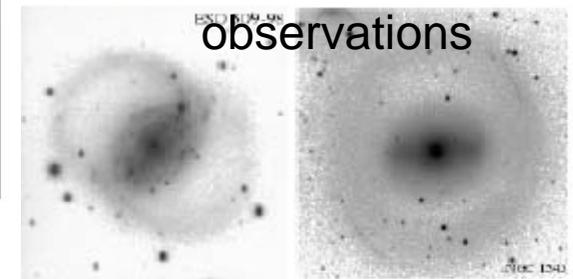
Influence du halo noir

Dynamique des galaxies,
Formation des spirales et des barres



Etoiles

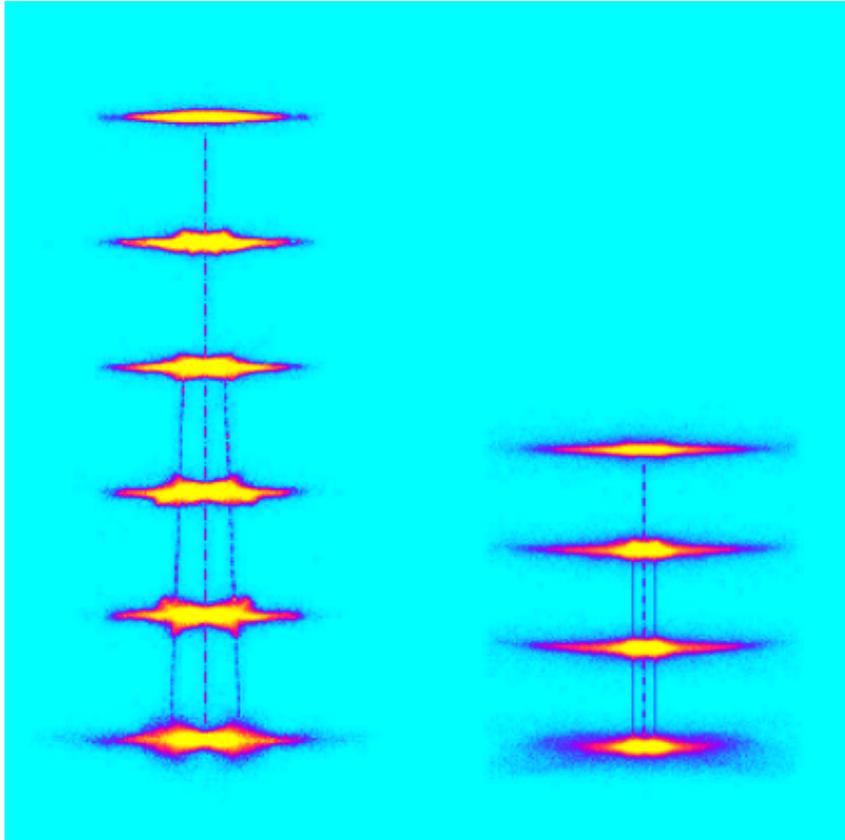
Gaz



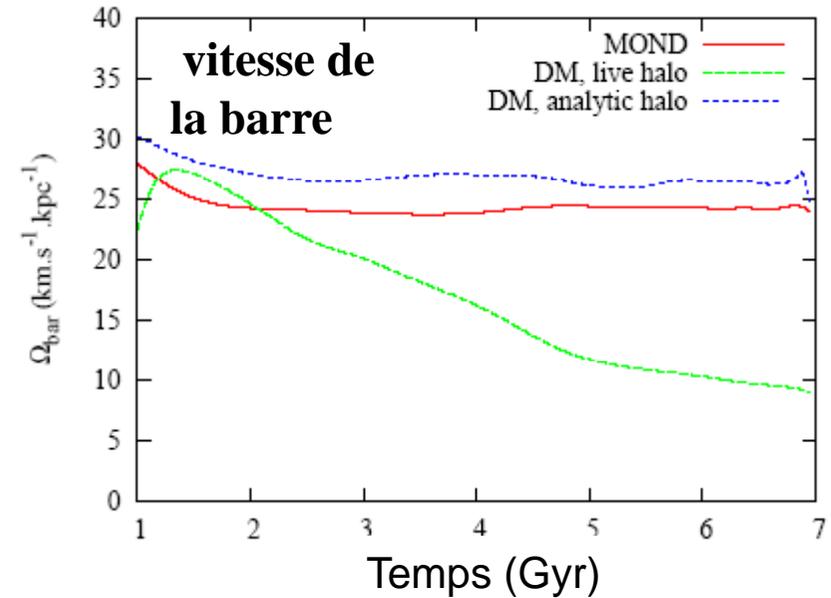
Anneaux aux résonances
→ Donnent la vitesse de la barre

Force et vitesse de la barre avec ou sans MN

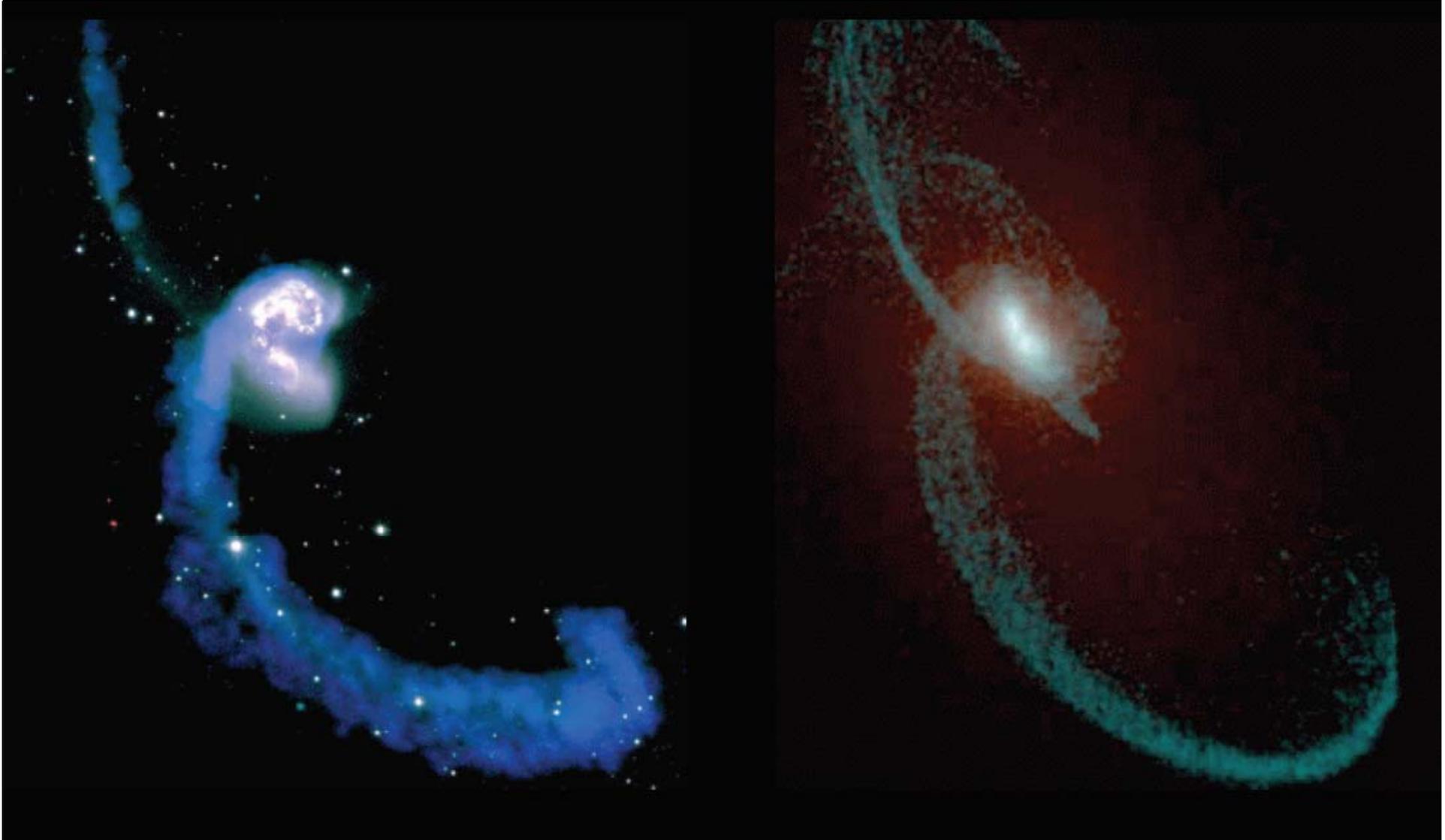
Avec MN Sans MN (MOND)



Friction dynamique bien supérieure en présence de MN
Ralentissement de la barre
→ Résonances verticales différentes



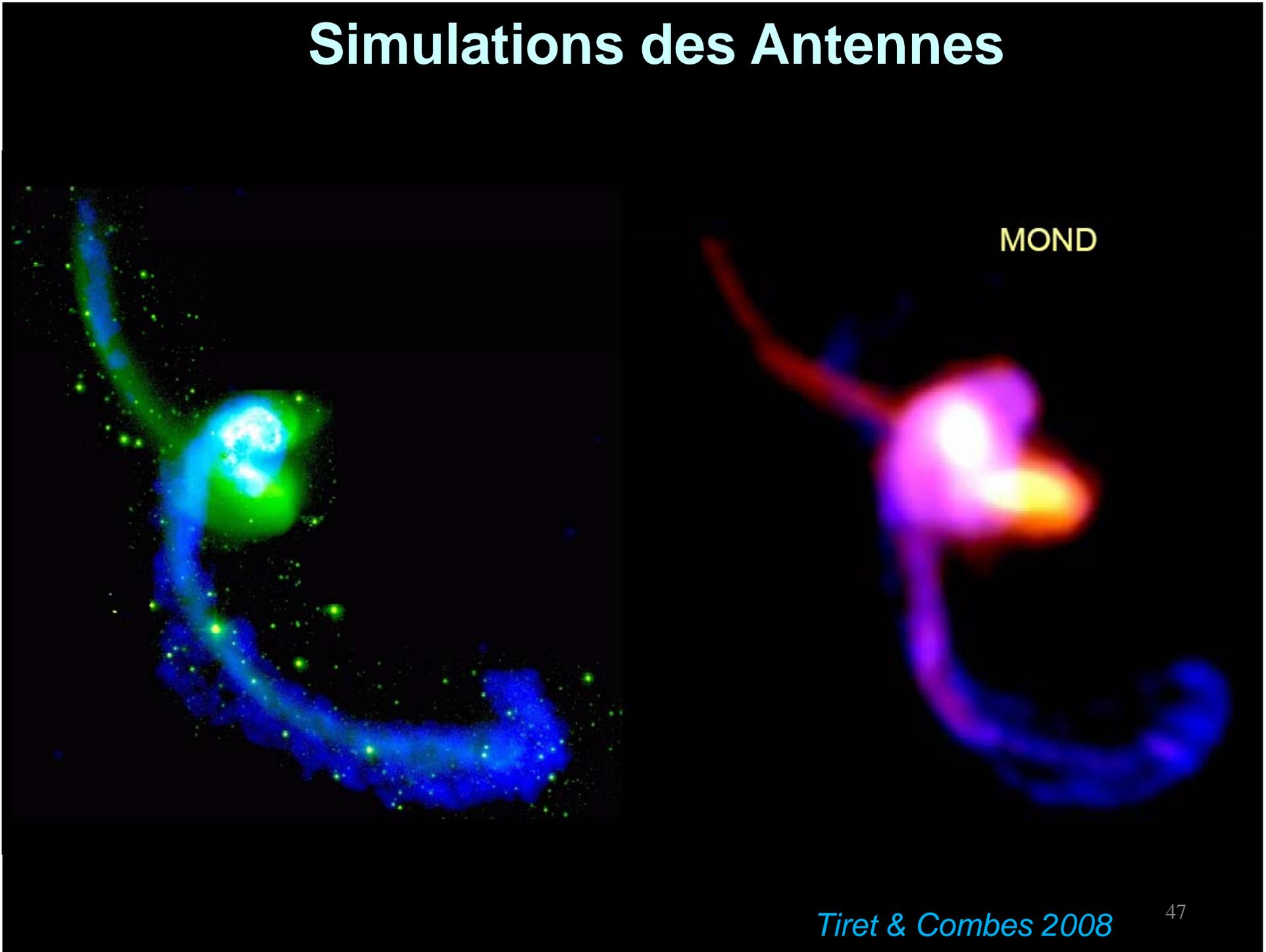
Simulations des Antennes



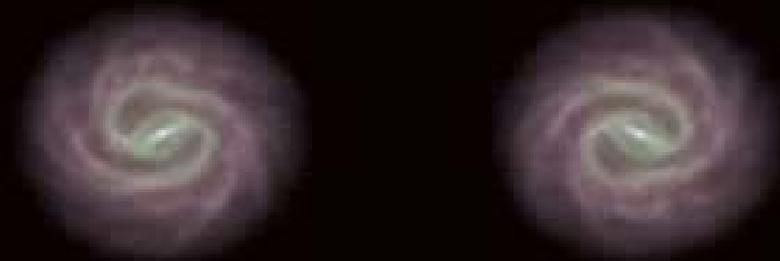
Simulations Matière noire (Barnes 1998)

Simulations des Antennes

MOND

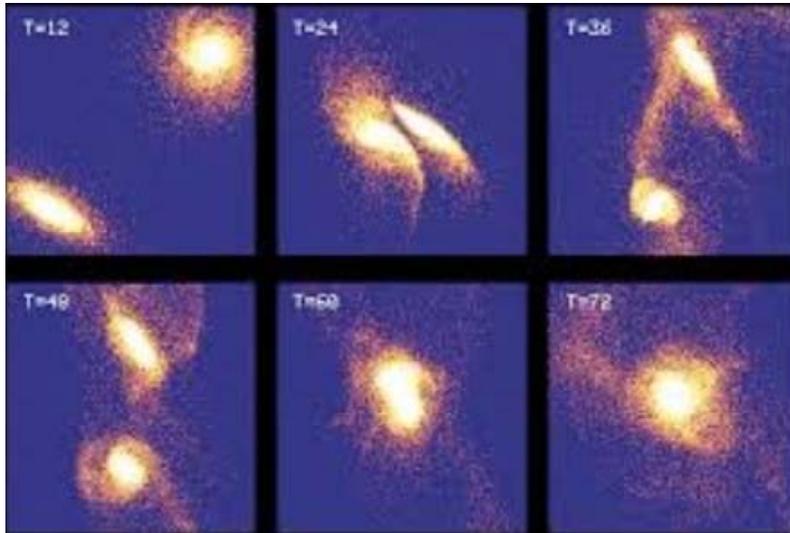


$t = 0.00 \text{ Gyr}$

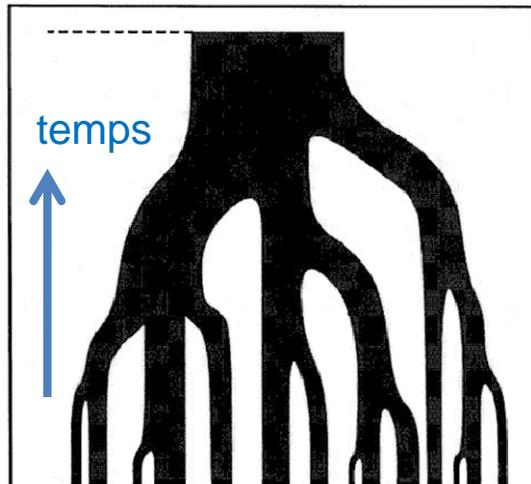
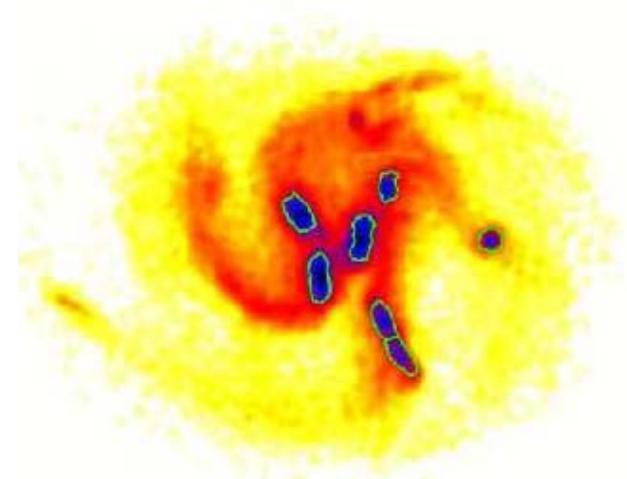


Formation des bulbes

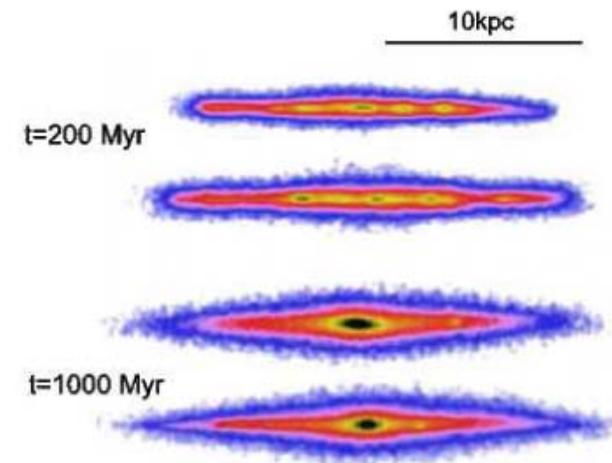
Formation par fusions de galaxies
majeures et mineures



Galaxies à grumeaux



Annulation du moment
angulaire après de
multiples fusions

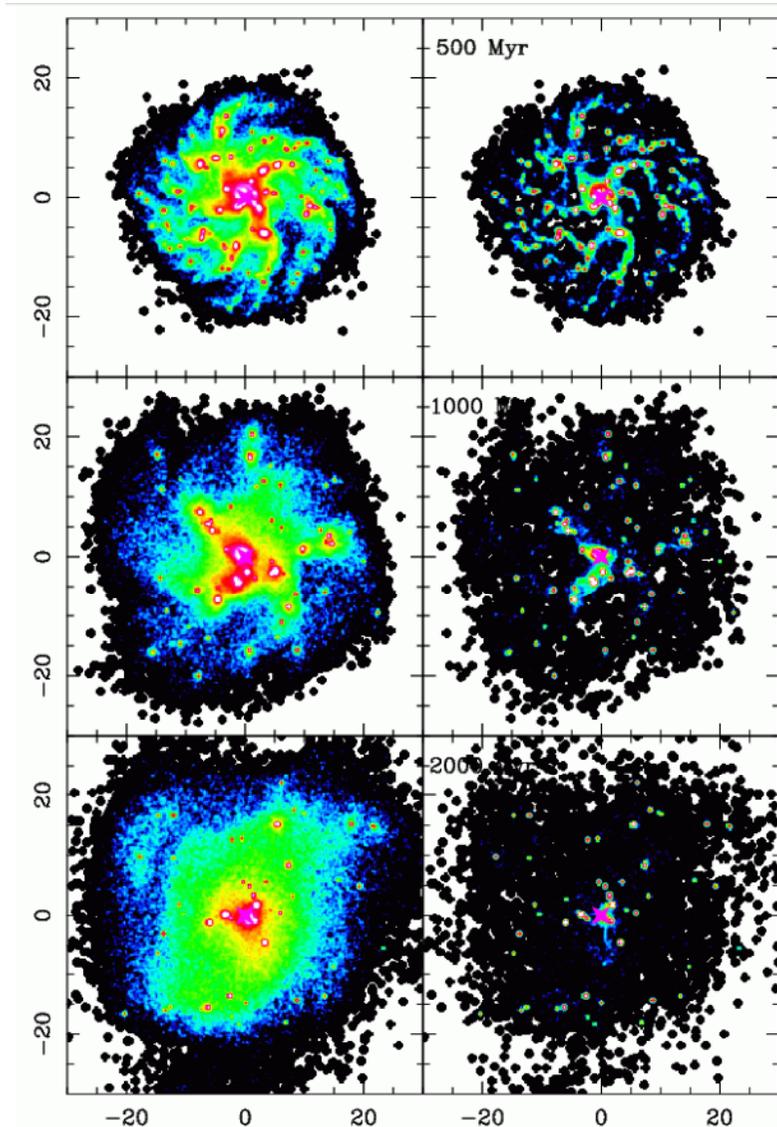


Formation des galaxies sans bulbe ?

Galaxies jeunes 50% de gaz,

→ forment des grumeaux de gaz et étoiles

évolution MOND

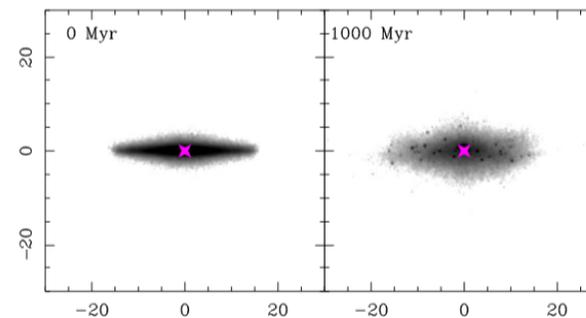


Absence de matière noire

→ faible friction dynamique

Les grumeaux se détruisent par formation d'étoiles avant

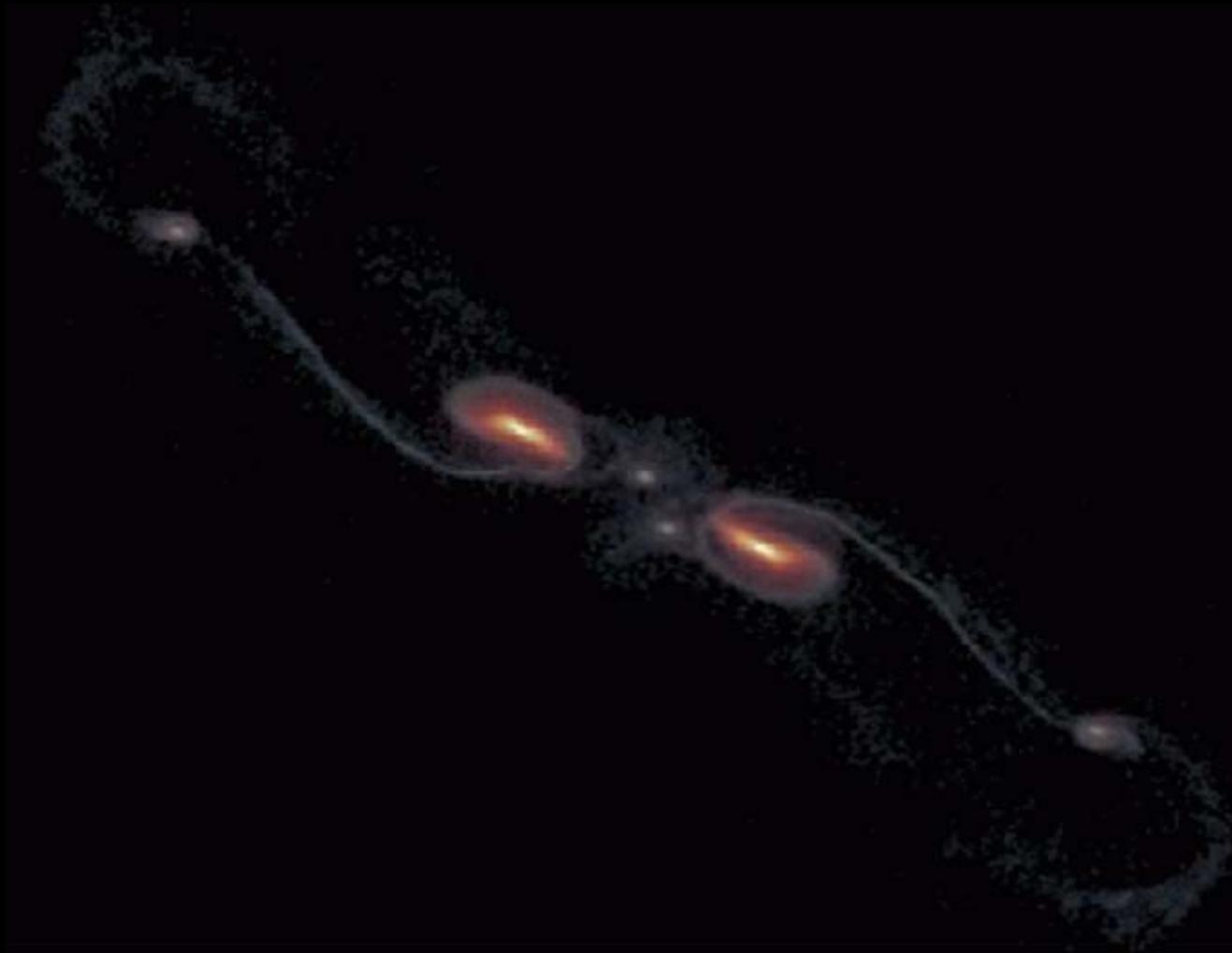
Formation du bulbe (Newton)



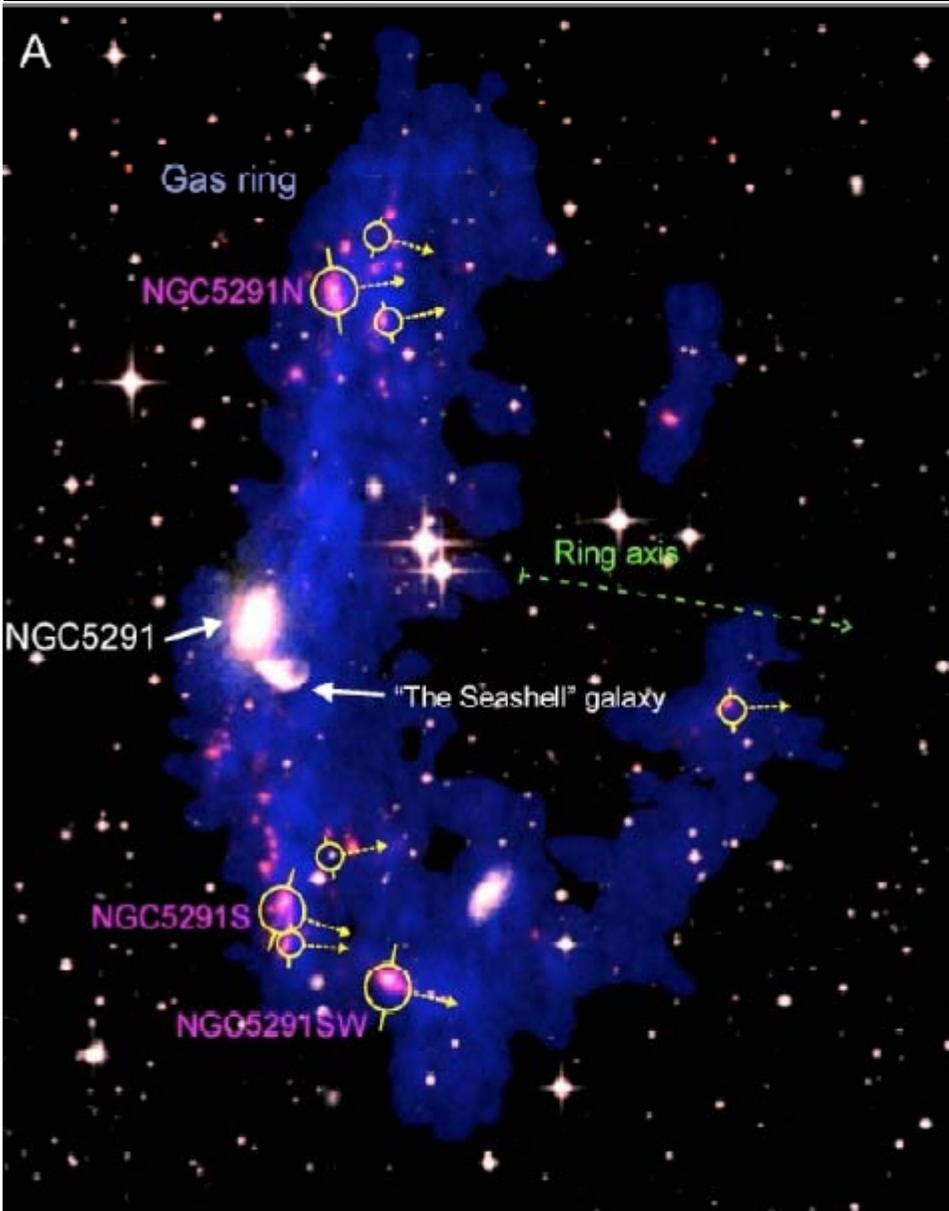
Formation de galaxies naines de marée

Echange de moment angulaire dans le disque:

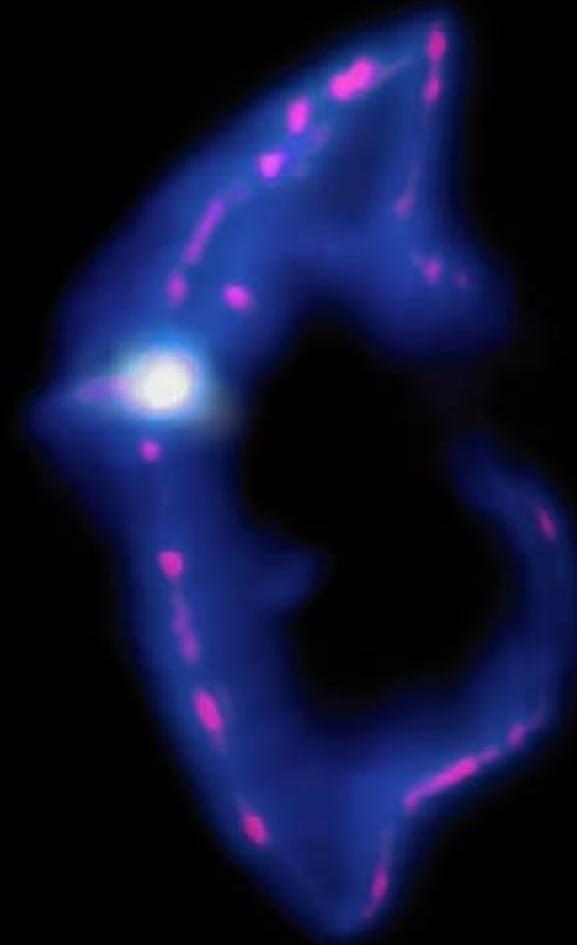
→ plus facile avec MOND de former les naines de marée



Naines de marée dans NGC 5291



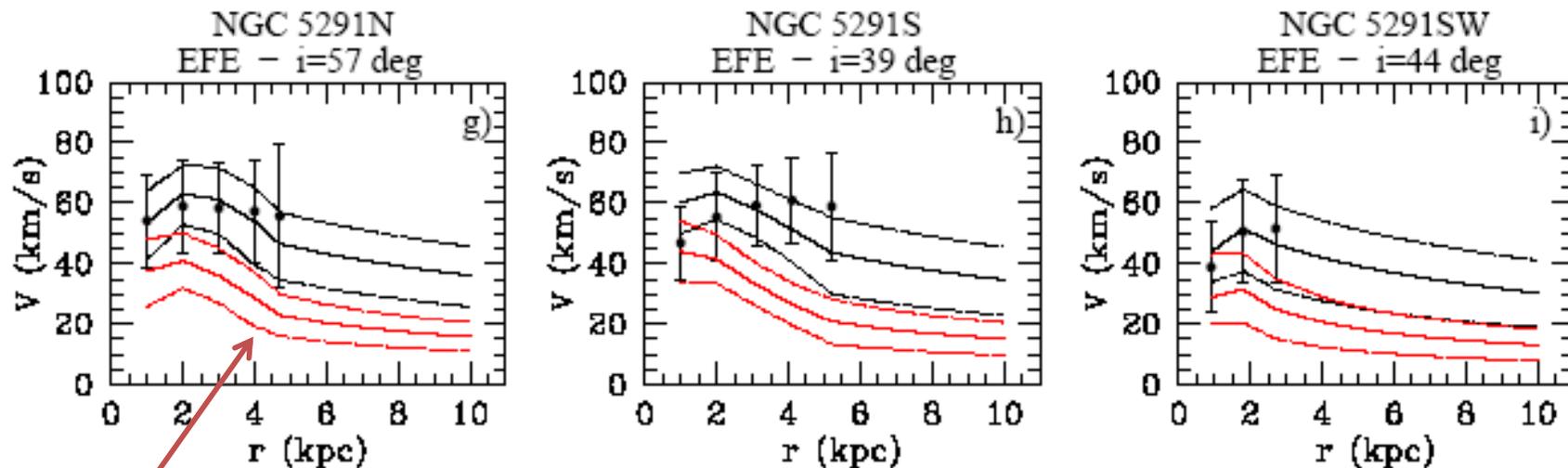
B *Head-on collision simulation*



Dynamique des naines de marée

Ces galaxies naines, formées tardivement, ne devraient pas avoir de matière noire, selon la théorie standard

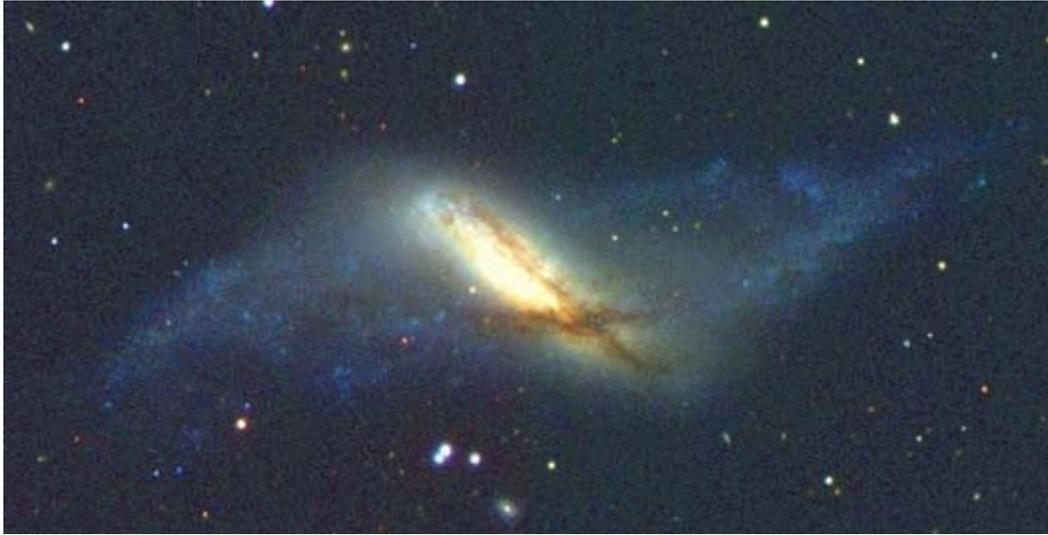
Les observations pourtant montrent des **courbes de rotation « plates »**
→ **Naturel pour MOND**



Rouge: prédictions du modèle MN

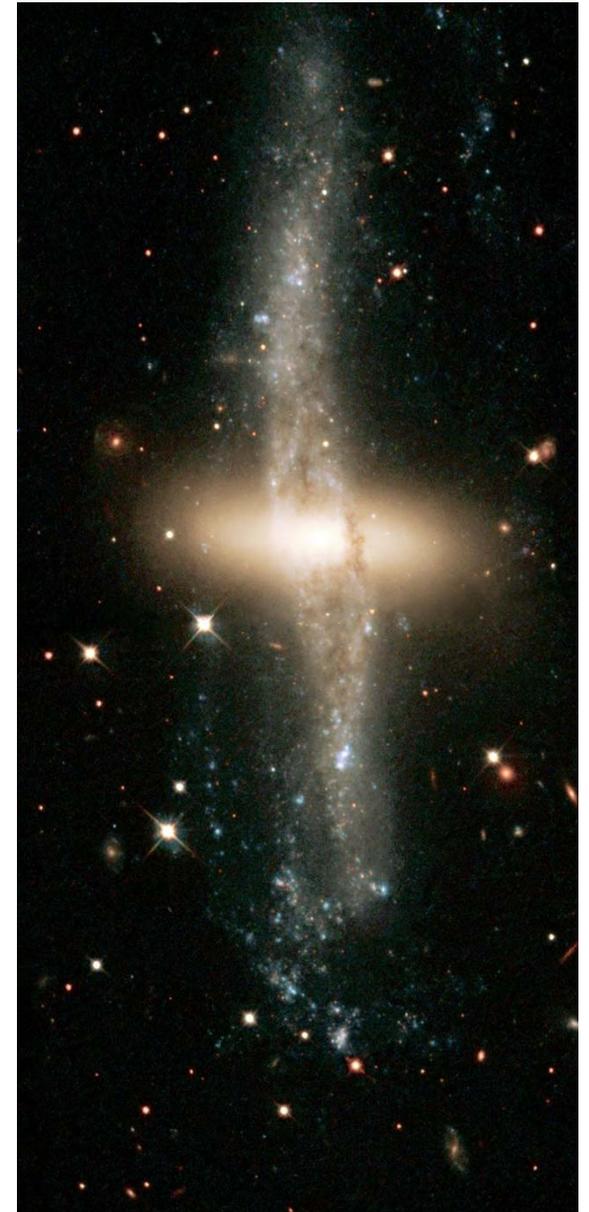
Gentile et al 2007

Anneaux polaires et accretion cosmique



→ L'anneau polaire est une occasion de tester la distribution de matière noire à 3D

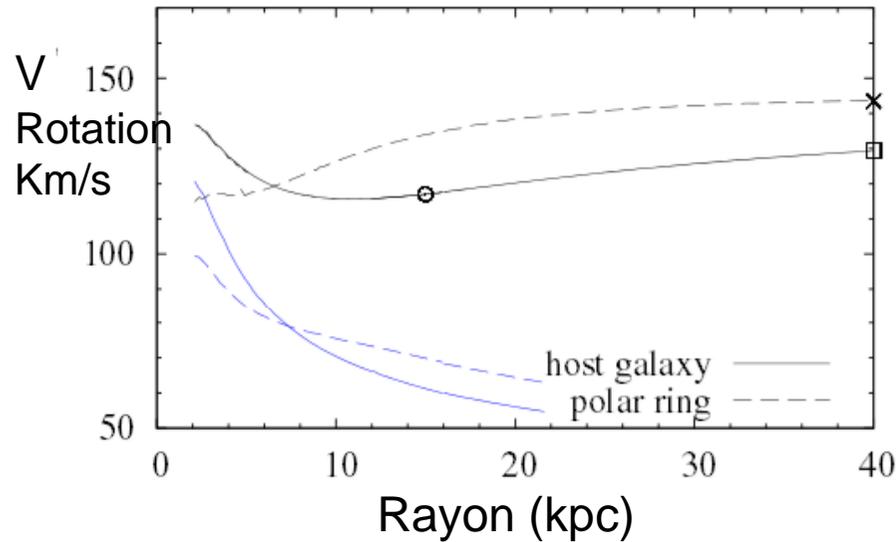
→ Vitesse de rotation supérieure dans le disque polaire par rapport au plan équatorial



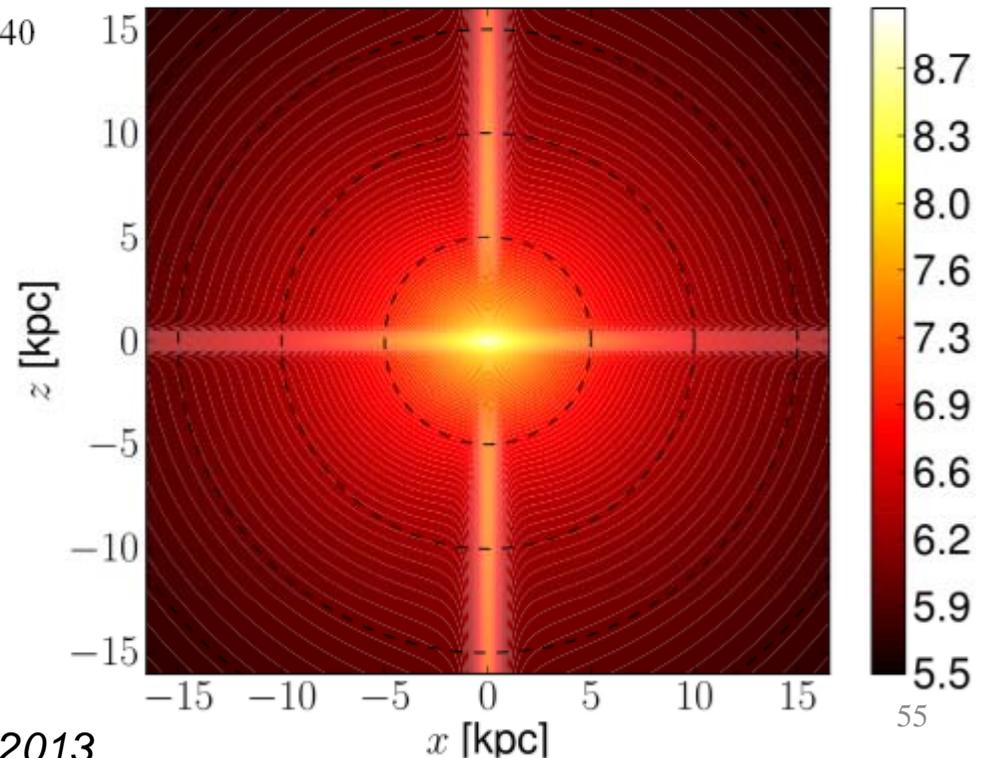
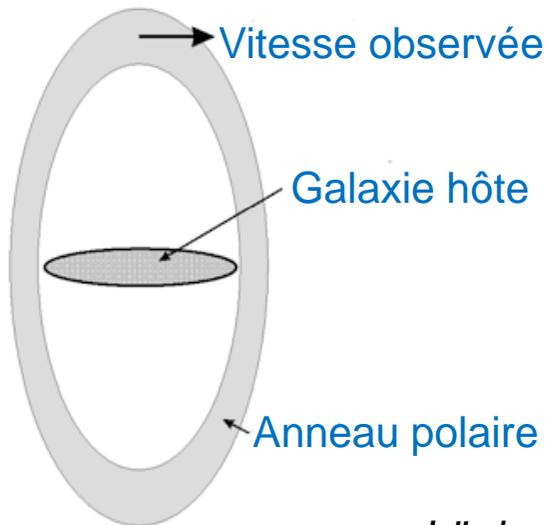
Galaxies à anneaux polaires avec MOND

→ Vitesse supérieure dans le plan polaire obtenue naturellement

Carte de la matière noire fantôme



Ligne de visée



Lüghausen et al 2013

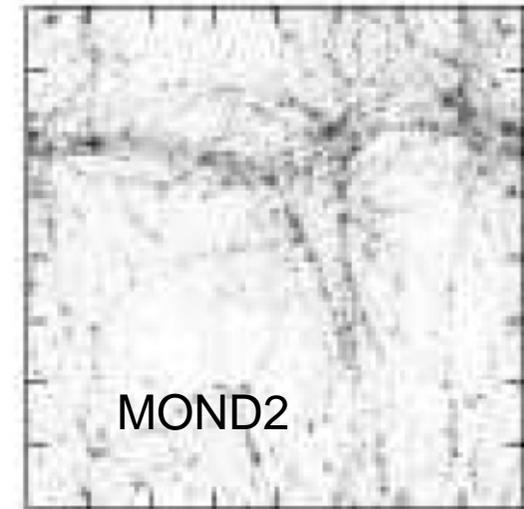
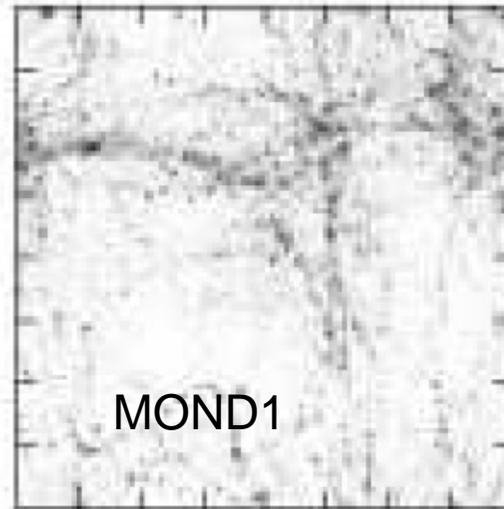
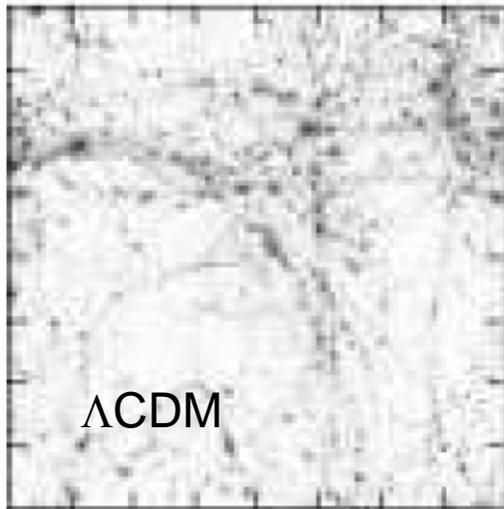
MOND simulations cosmologiques

Départ $z=50$, matière sans dissipation, 2 modèles vs standard Λ CDM

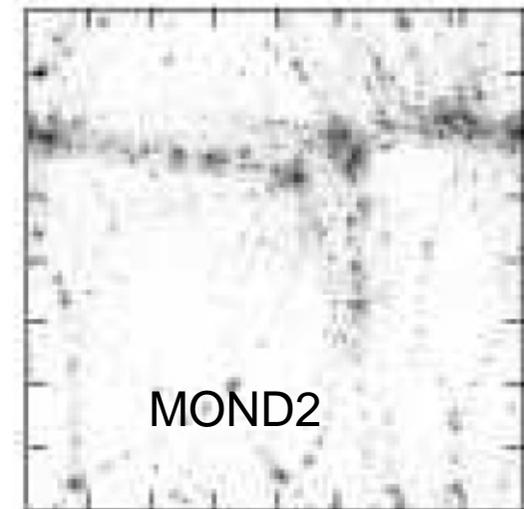
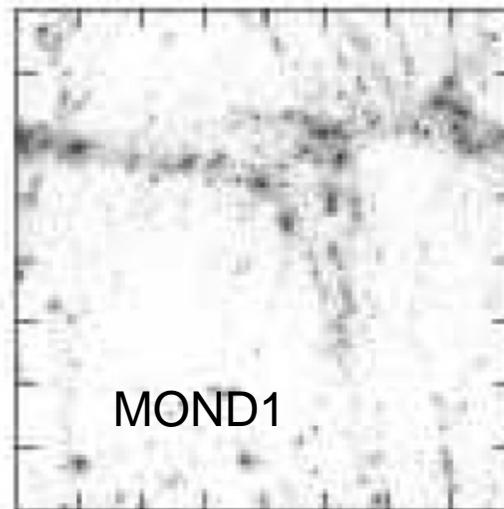
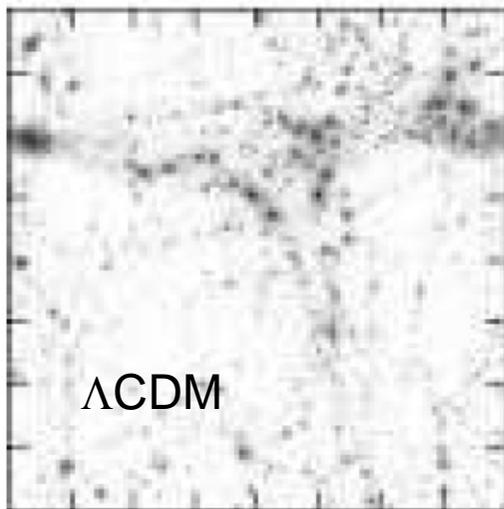
Plus facile de former des structures, plus tôt

Llinares et al 2009

$z=2$



$z=5$



Contenu de l'Univers: de quoi parle-t-on?

Ce que l'on voit, les galaxies = **0.3%** du total

Matière noire baryonique: gaz très chaud ? Gaz très froid ?

Matière noire non-baryonique:

Particules encore inconnues, hors du modèle standard

Masses entre 10^{-6} eV (axions) et 10^{12} eV (WIMPs)

Recherchées **depuis 30ans**



Problèmes des modèles matière noire pour la formation des galaxies

-- solution dans la physique des baryons

-- **gravité modifiée**, 5^{ème} force, pourrait aussi résoudre le problème de l'énergie noire