

La matière noire

François Mernier
Modave 2011

Table des matières

- ⊕ Introduction
- ⊕ Loi de Newton de la gravitation
- ⊕ Matière noire dans les galaxies
- ⊕ Courbe de rotation des galaxies spirales
- ⊕ Matière noire dans les amas de galaxies
- ⊕ Matière noire ? Qu'est-ce ?
- ⊕ La gravitation newtonienne modifiée
- ⊕ Conclusion

Introduction

- ⊕ De quoi est composé notre Univers ?
 - ⊕ Terre
 - ⊕ Système Solaire
 - ⊕ Galaxie (la Voie Lactée)
 - ⊕ Groupe Local
 - ⊕ Amas
 - ⊕ Superamas (de la Vierge)
 - ⊕ Univers (?)

Introduction

⊕ De quoi est composé notre Univers ?

⊕ Terre

⊕ Sys

⊕ Gal

⊕ Gro

⊕ Am

⊕ Sup

⊕ Un



Introduction

⊕ De quoi est composé notre Univers ?

⊕ Terre

⊕ Système Solaire

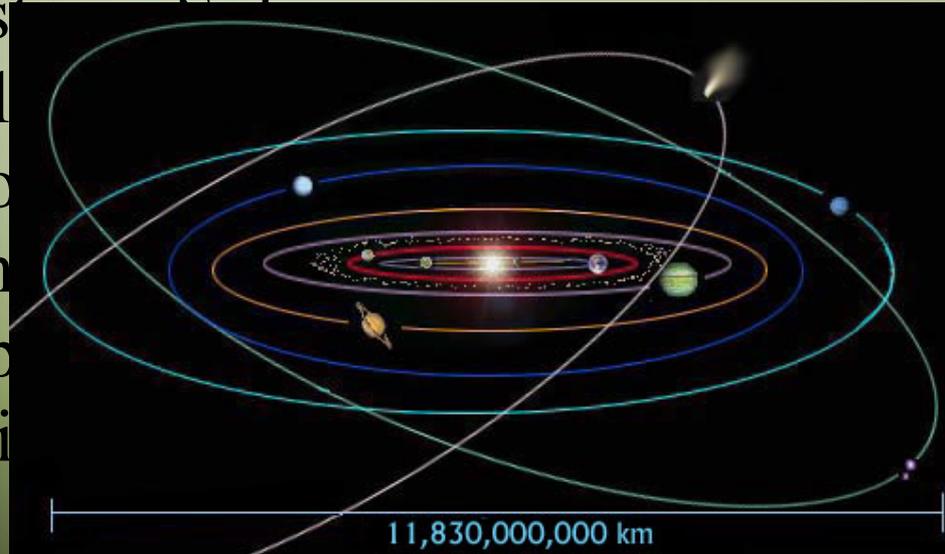
⊕ Galaxie

⊕ Groupe

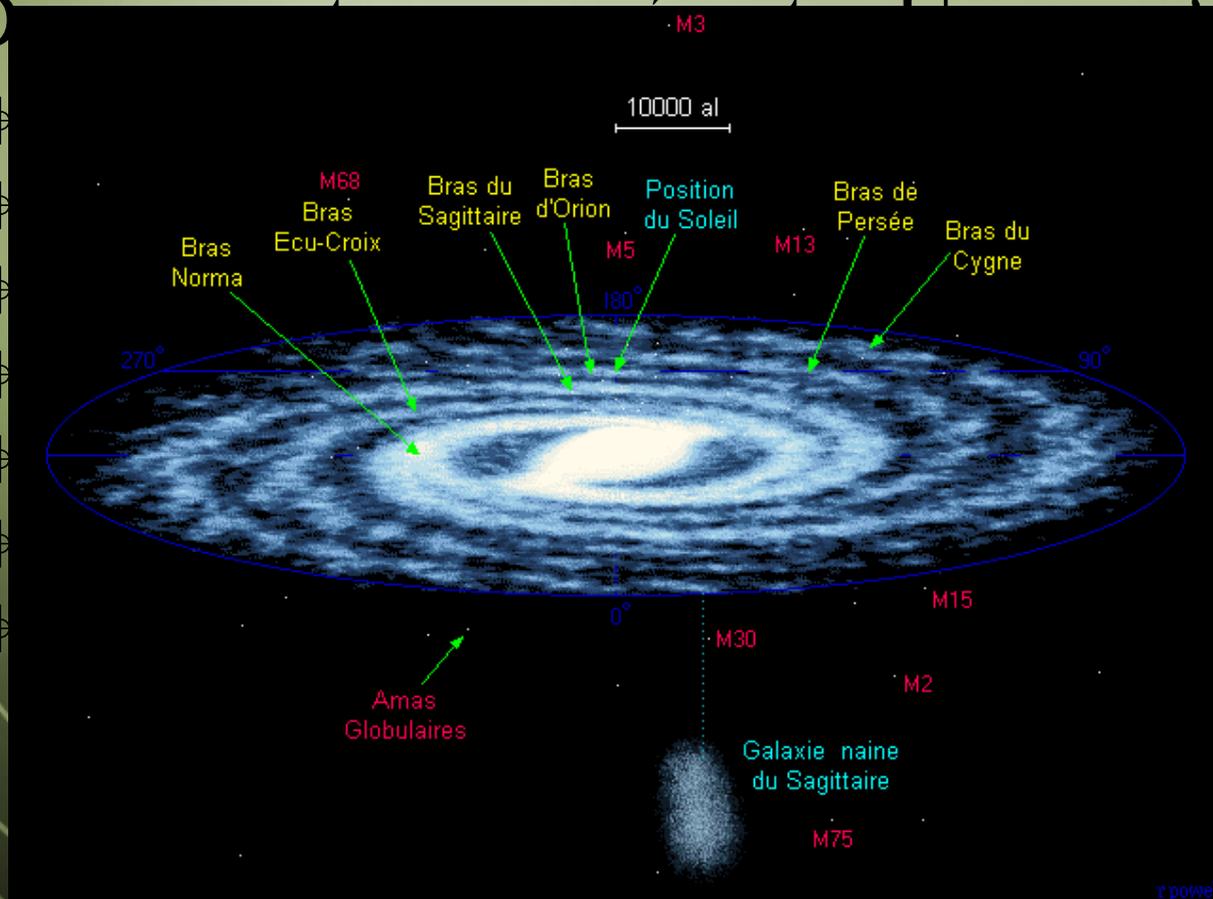
⊕ Amas

⊕ Super

⊕ Uni

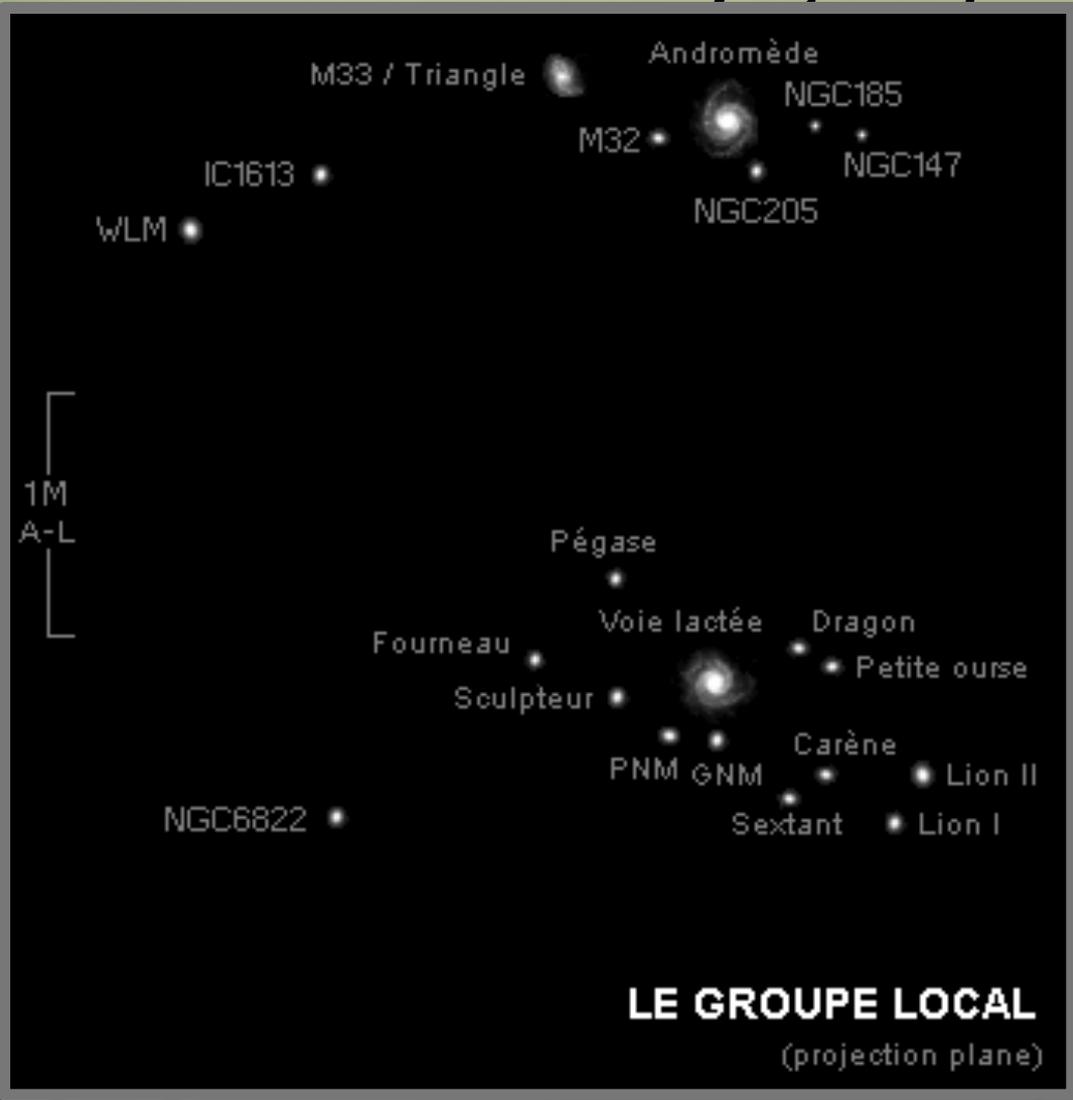


Introduction

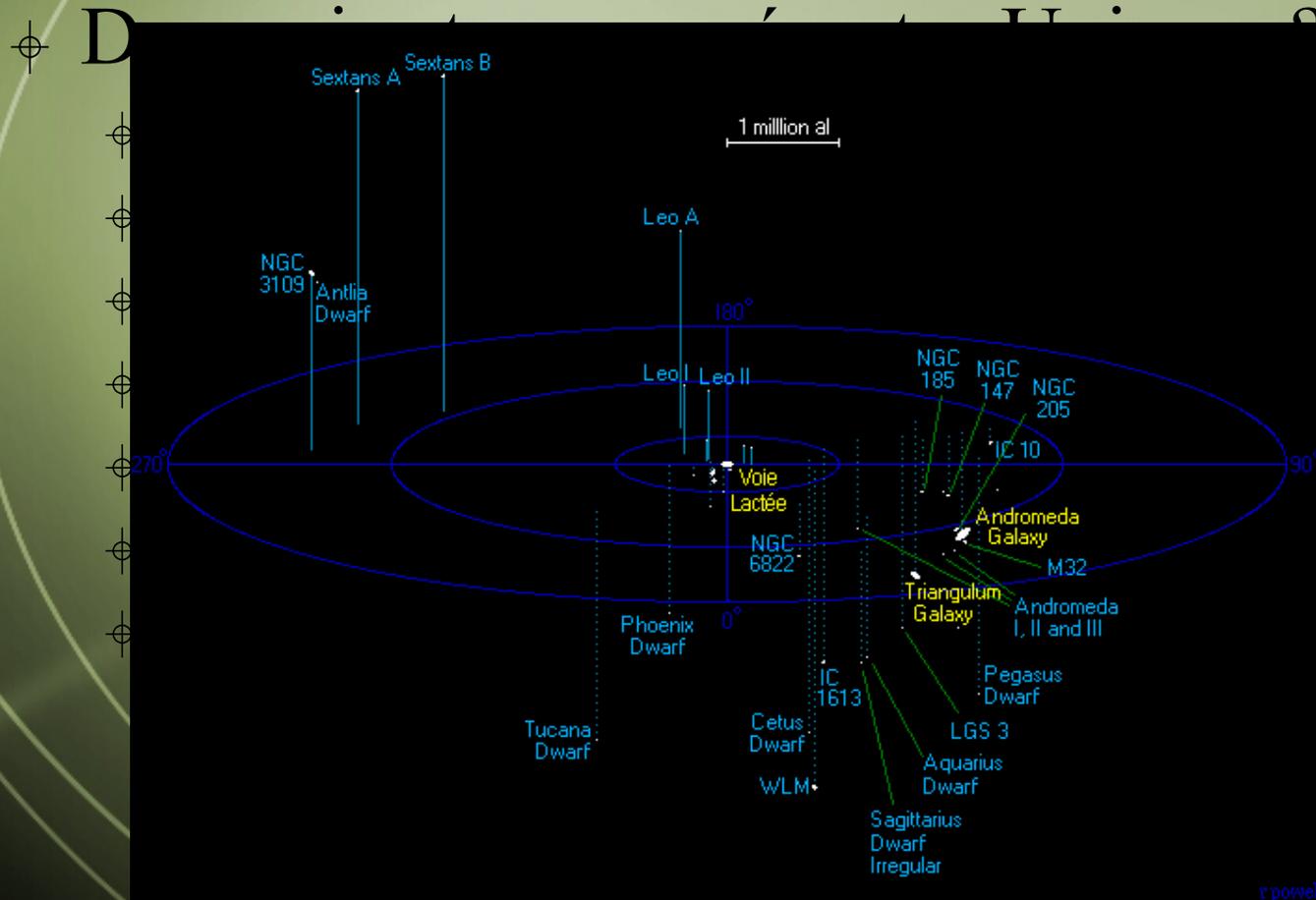


Local Group

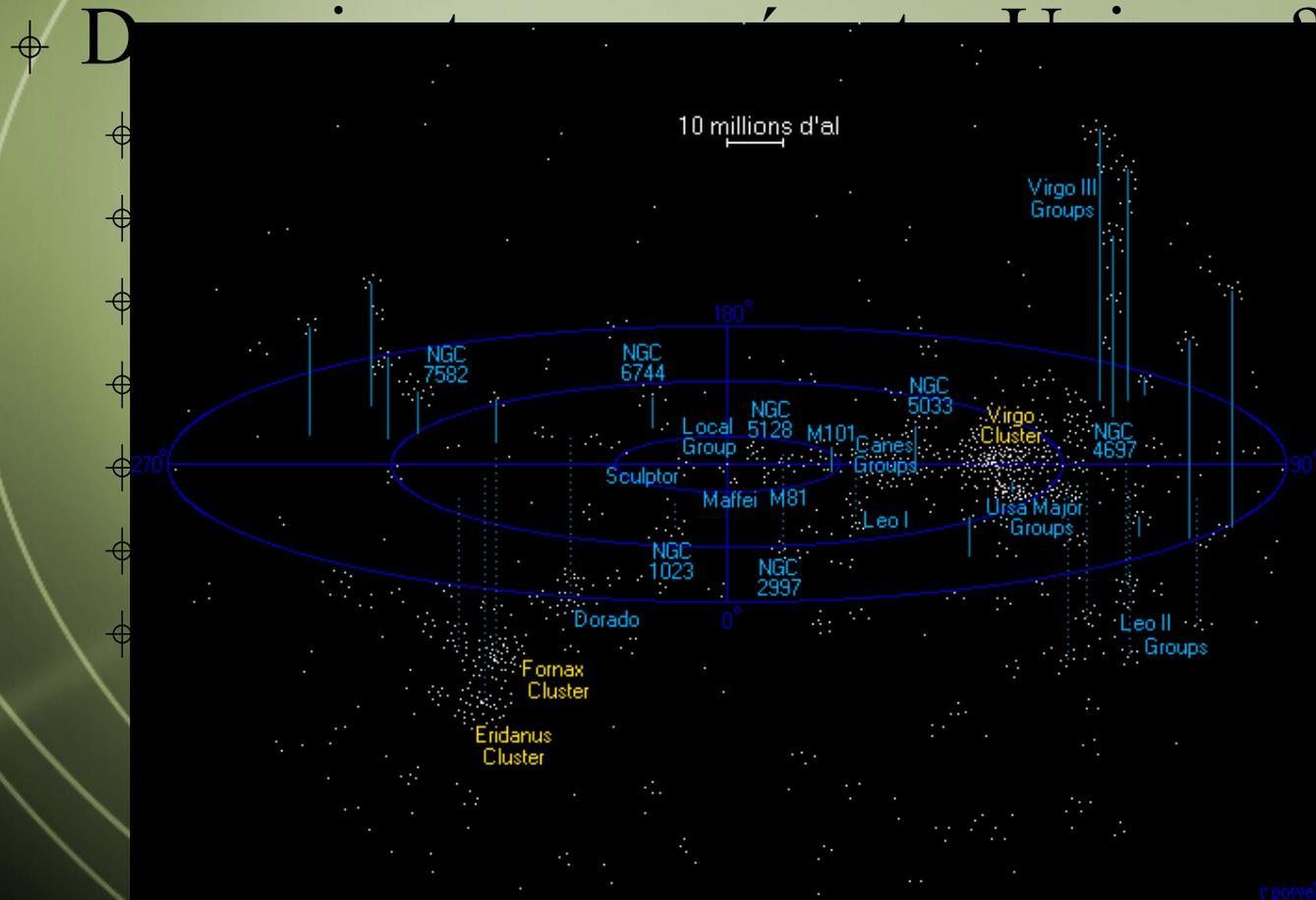
- ⊕ De qu
- ⊕ Terr
- ⊕ Syst
- ⊕ Gala
- ⊕ Gro
- ⊕ Am
- ⊕ Sup
- ⊕ Uni



Introduction

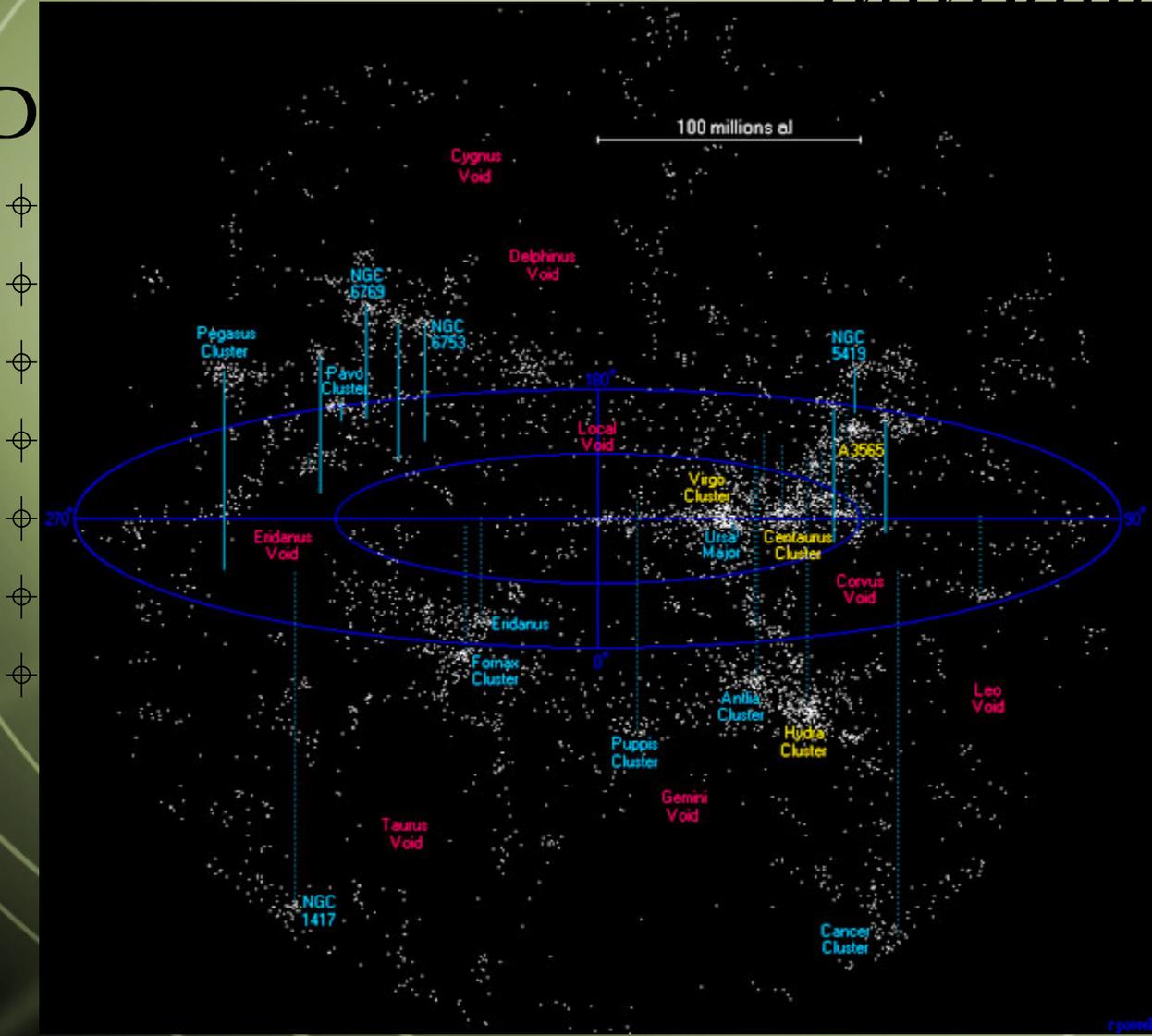


Introduction



Introduction

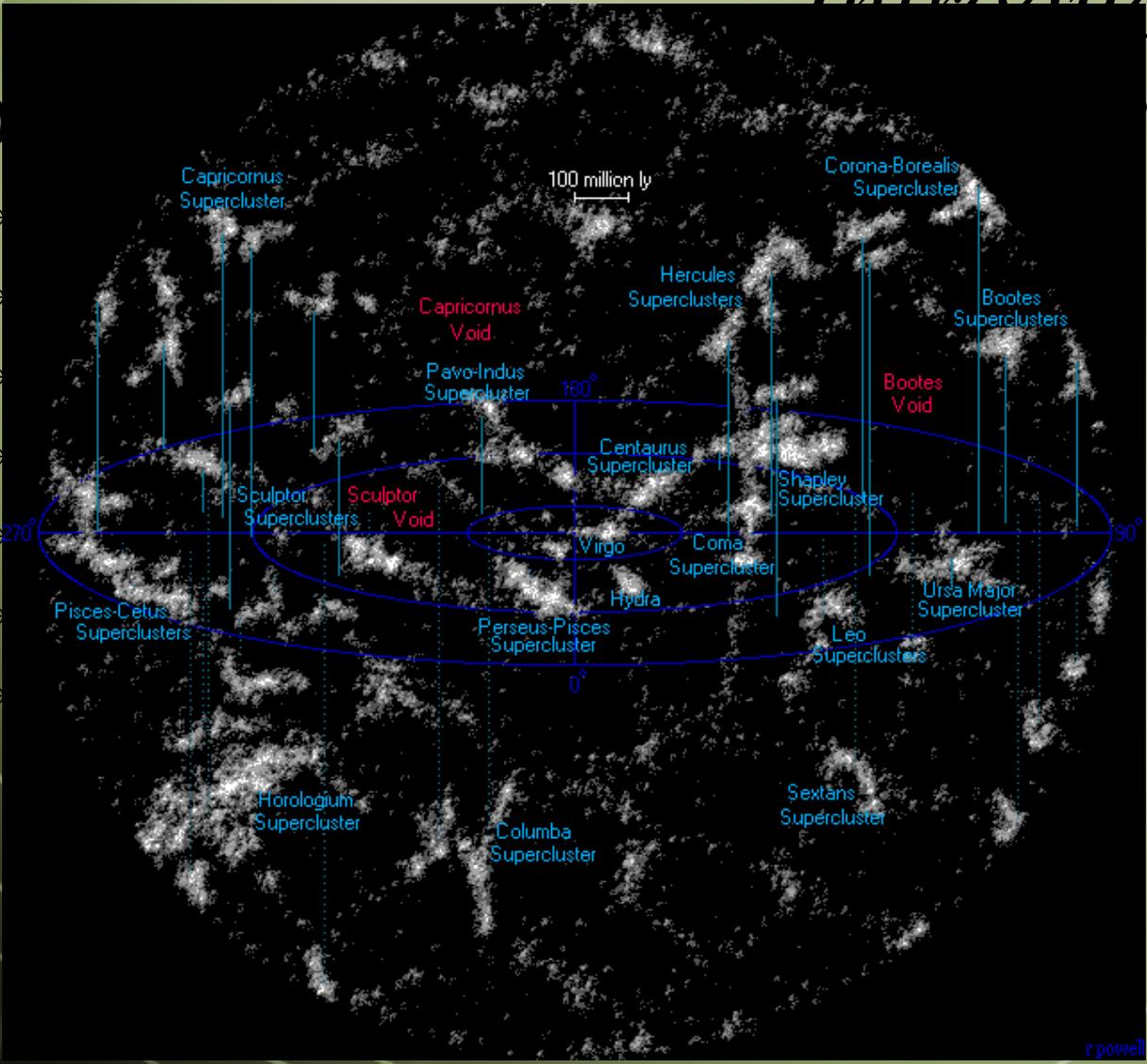
D



rpovod

Introduction

D



Introduction

⊕ De quoi

⊕ Terre

⊕ Systèm

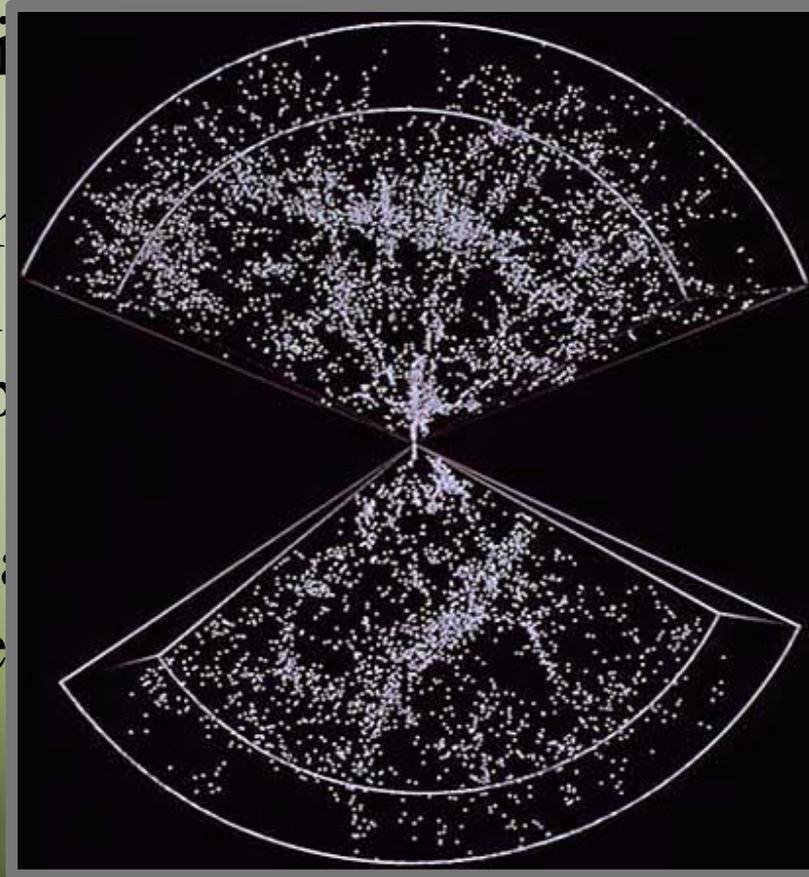
⊕ Galax

⊕ Group

⊕ Amas

⊕ Super

⊕ Unive

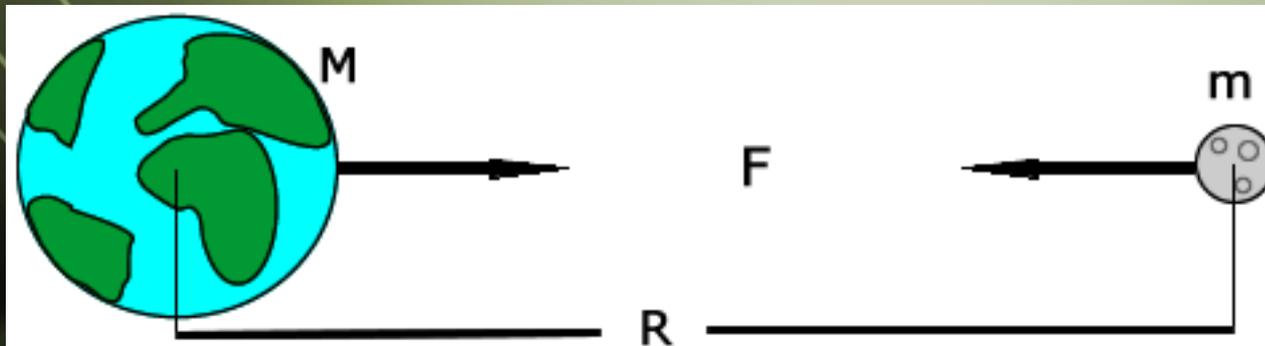
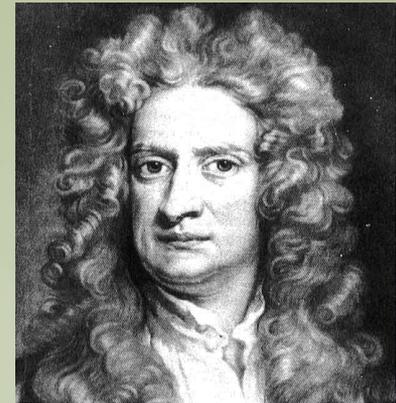


vers ?

La loi de Newton de la gravitation

- ⊕ Détermine comment 2 corps de masse M (grande masse) et m (petite masse) s'attirent entre eux sous l'effet de la gravitation !

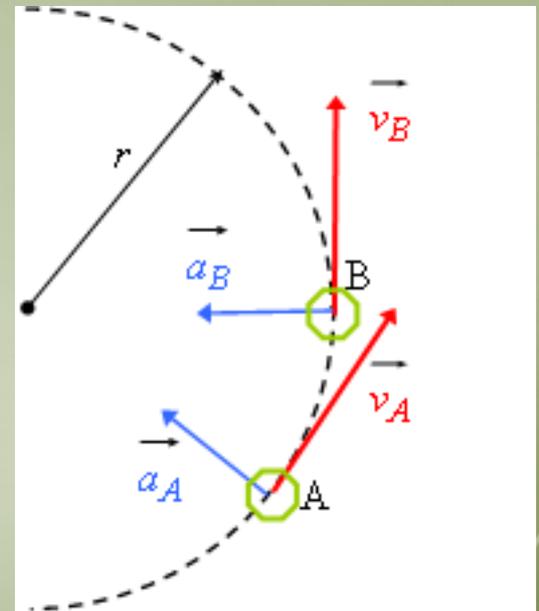
$$F_{grav} = G \frac{Mm}{r^2}$$



La loi de Newton de la gravitation

- ⊕ Regardons également l'action de la force centripète...

$$F_{centr} = \frac{mv^2}{r}$$



La loi de Newton de la gravitation

- ⊕ Regardons également l'action de la force centripète...

$$F_{centr} = \frac{mv^2}{r}$$

- ⊕ Dans l'espace, la force centripète est provoquée par la force gravitationnelle...
- ⊕ Donc, on a une relation entre la vitesse d'un corps (étoile, planète,...) et la masse de ce qui se trouve à l'intérieur de l'orbite du corps.

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

La loi de Newton de la gravitation

- ⊕ NB : On peut aussi retrouver la troisième loi de Kepler (généralisée) :

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

Constante !

- ⊕ Démonstration ? :-D

Matière noire dans les galaxies

- ⊕ Et si on calculait la masse totale de la Voie Lactée ?
- ⊕ Comment faire pour déterminer cette masse ?
- ⊕ 2 méthodes
 - ⊕ 1) On calcule la masse de chaque étoile de la VL (grâce à sa luminosité) et on additionne toutes ces étoiles
 - ⊕ 2) On regarde la vitesse des étoiles autour de la VL et on détermine la masse (cf: équation)

Matière noire dans les galaxies

⊕ Méthode 1)

- ⊕ Plus une étoile brille, plus elle a du « carburant » à brûler...
- ⊕ ...donc, plus elle est massive
- ⊕ On a en moyenne $1 L_{\odot} = 4 M_{\odot}$
- ⊕ On trouve une masse totale de...
- ⊕ ... $10^{11} M_{\odot}$ (100 milliards de masses solaires)

Matière noire dans les galaxies

⊕ Méthode 2)

⊕ Reprenons notre équation :

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

⊕ Il suffit de regarder une étoile (ou un nuage de gaz) en bordure de la VL et de mesurer sa vitesse. On peut alors directement trouver la masse de ce qu'il y a dans l'orbite de cette étoile (donc la masse de la VL !)

⊕ Pour mesurer la vitesse, on l'utilise l'effet Doppler

⊕ On trouve une masse totale de...

⊕ ...**50¹¹ M_☉** (500 milliards de masses solaires)

Matière noire dans les galaxies

⊕ On a donc :

⊕ Masse visible : $10^{11} M_{\odot}$

⊕ Masse totale : $50^{11} M_{\odot}$

⊕ La Voie Lactée contient donc 5 fois plus de matière totale que la matière que l'on voit (étoiles) ?!

⊕ Autrement dit : 20% de matière visible et 80% de matière noire (noire = qu'on ne voit pas)

Courbe de rotation dans les galaxies spirales

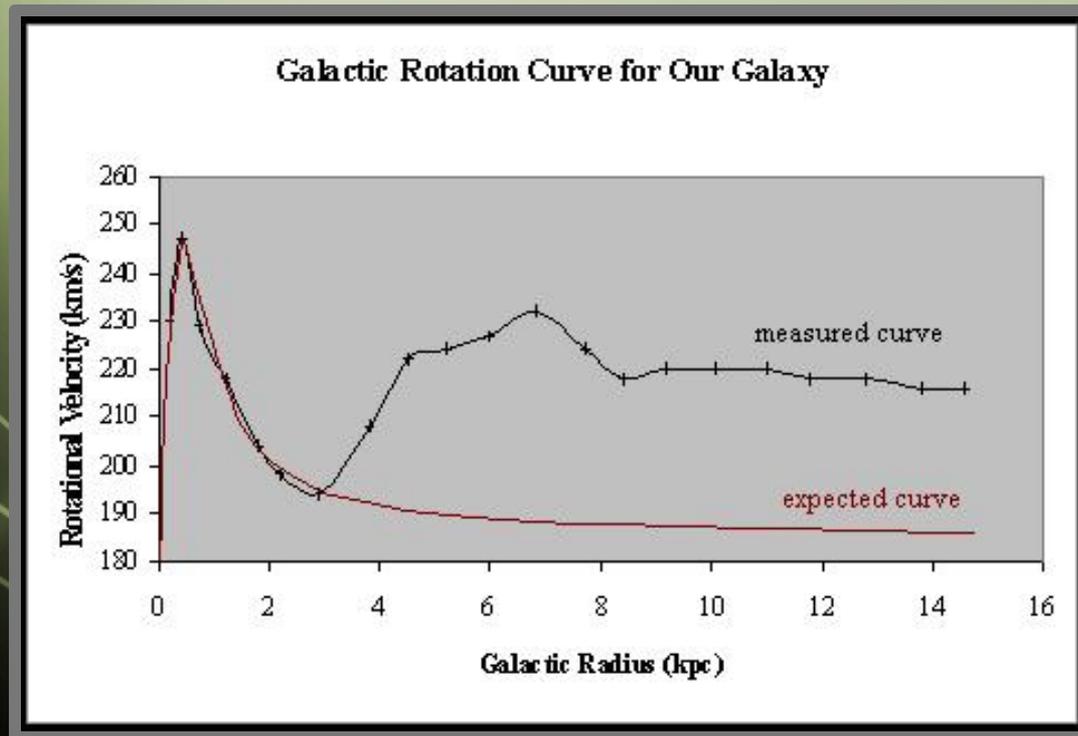
- ⊕ Regardons le problème sous un autre angle (historique)...
- ⊕ On connaît la répartition des étoiles dans la VL
- ⊕ Donc, on sait comment la masse visible se répartit dans la VL
- ⊕ Avec notre équation, on peut donc trouver la vitesse de chaque étoile autour du centre de la galaxie (en fonction de son rayon).
- ⊕ C'est ce qu'on appelle une courbe de rotation.

Courbe de rotation dans les galaxies spirales

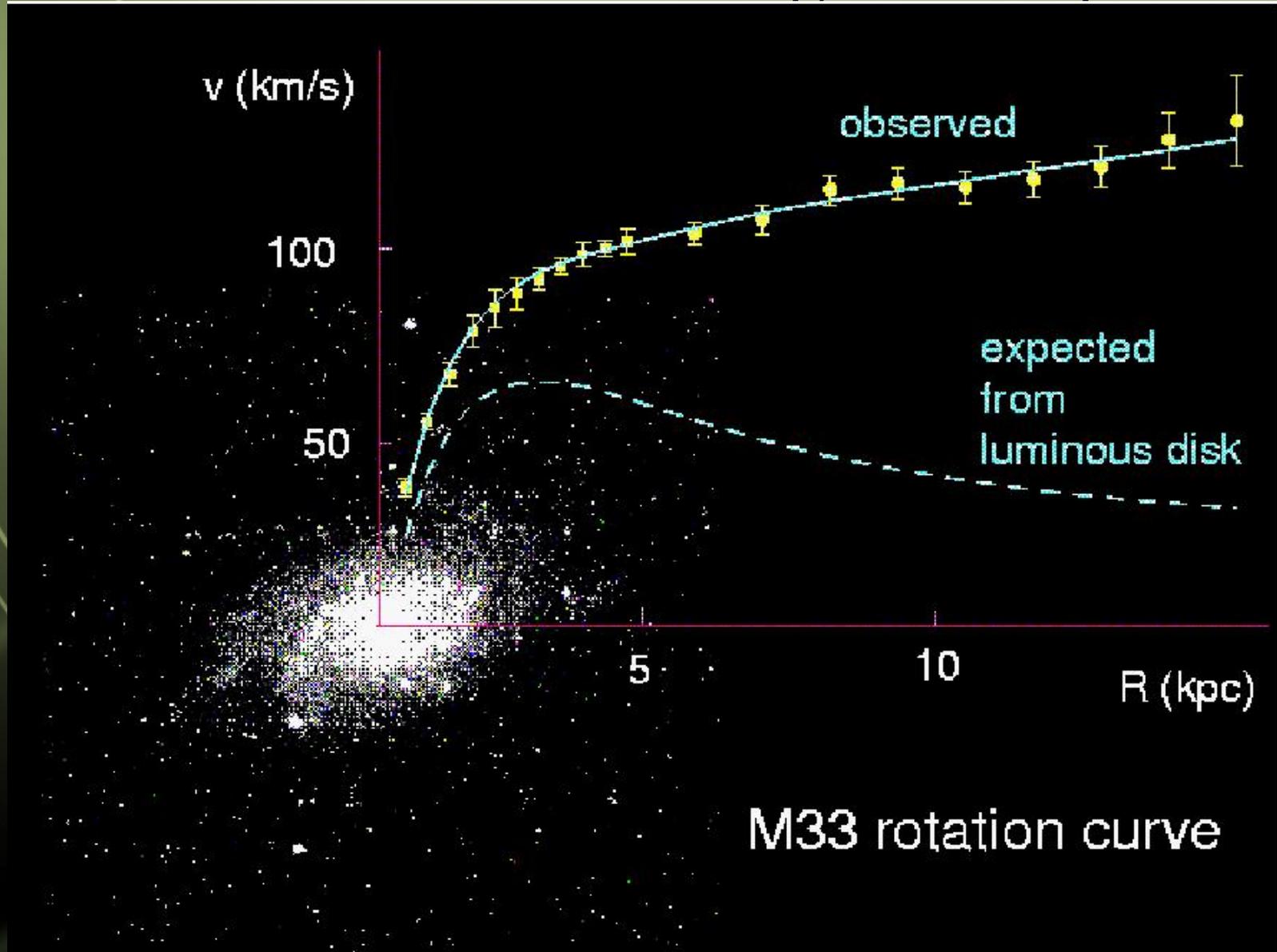
- ⊕ Exemple : courbe de rotation d'un corps solide (manège, CD, roue de vélo,...)
- ⊕ Courbe de rotation théorique de la VL :
- ⊕ Courbe de rotation mesurée de la VL :

Courbe de rotation dans les galaxies spirales

- ⊕ Les deux courbes ne sont pas les mêmes !
- ⊕ Donc il y a un gros problème !
- ⊕ On a obtenu la même chose dans d'autres galaxies spirales.



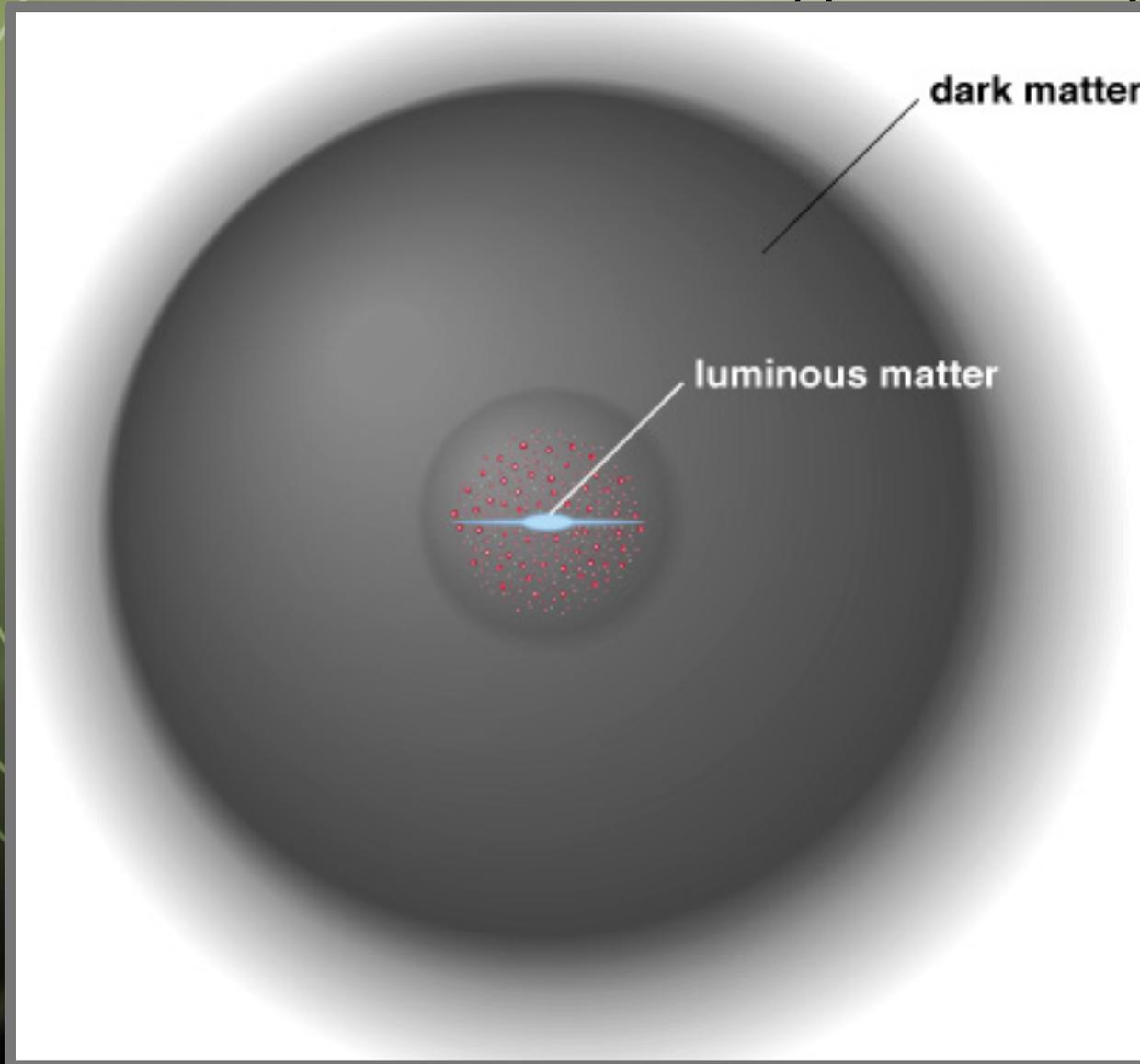
Courbe de rotation dans les galaxies spirales



Courbe de rotation dans les galaxies spirales

- ⊕ **Rappel** : les vitesses d'orbite et les masses à l'intérieur de l'orbite sont liées !
- ⊕ Donc, en regardant l'aspect de la courbe de rotation d'une galaxie, on peut deviner comment se répartit la masse (totale)
- ⊕ Et on peut donc deviner comment se répartit la matière noire !
- ⊕ On pense qu'il existe un très grand halo de matière noire qui entoure chaque galaxie spirale...

Courbe de rotation dans les galaxies spirales



dark matter masses

luminous matter

masses

urbe

eviner

)

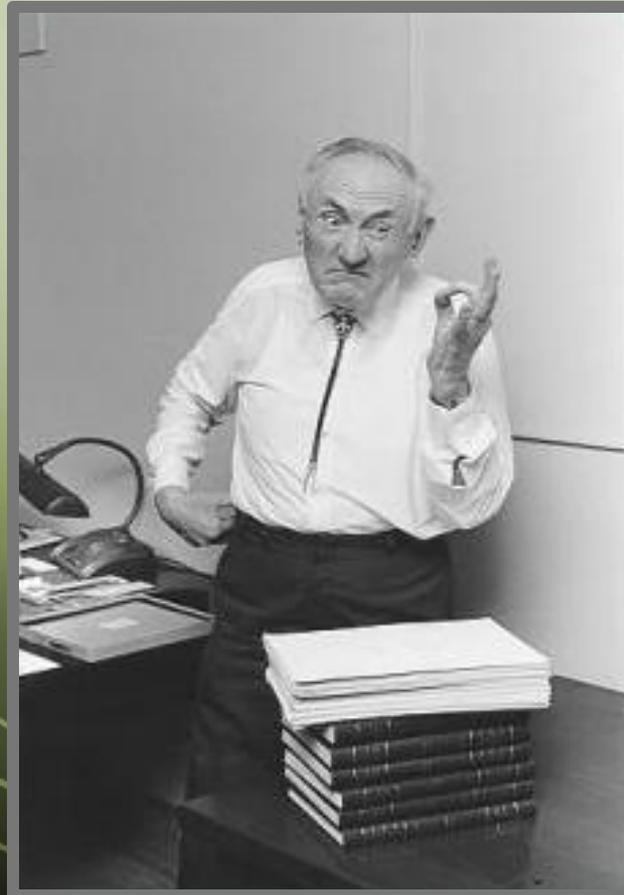
nalo de

laxie



Matière noire dans les amas de galaxies

- ✦ En 1933, Fritz Zwicky compare la masse « dynamique » et la masse « lumineuse », d'un groupe de 7 galaxies liées gravitationnellement.



Matière noire dans les amas de galaxies

- ⊕ En 1933, Fritz Zwicky compare la masse « dynamique » et la masse « lumineuse », d'un groupe de 7 galaxies liées gravitationnellement.
- ⊕ Il trouve :
 - ⊕ Masse lumineuse (=visible) : $10^{13} M_{\odot}$
 - ⊕ Masse dynamique (=totale) : $3 \cdot 10^{15} M_{\odot}$
- ⊕ Il y aurait donc 300 fois plus de matière noire que de matière visible !!
- ⊕ La matière noire des galaxies ne suffit pas, il faut ajouter l'existence de matière noire entre les galaxies (dans les amas)

Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ Selon des études basées sur le même principe que décrit avant (matière lumineuse VS dynamique), on a calculé les masses volumiques de la matière visible et de la matière noire :
 - ⊕ $\rho_{\text{vis}} = 0,05 m_p / m^3$
 - ⊕ À peu près 1 proton dans la pièce d'une maison !
 - ⊕ $\rho_{\text{noir}} = 1,5 m_p / m^3$
- ⊕ Il y a à peu près 30 fois plus de matière noire que de matière visible dans l'univers !
- ⊕ Dit autrement : la matière connue de l'univers (étoiles, planètes, galaxies) représente 5% de la matière totale de l'univers !

Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ De quoi peut être constituée cette matière noire ?
 - ⊕ Nuages de gaz
 - ⊕ Naines brunes
 - ⊕ Naines blanches
 - ⊕ Etoiles à neutrons
 - ⊕ Trous noirs
- ⊕ Mais cette matière noire doit contenir plus de 95% de la matière totale de l'univers...
- ⊕ ...Donc est-ce suffisant ?

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Nuages de gaz ?

- ⊕ Oui ! On a détecté dans l'univers d'immenses nuages très chauds (plusieurs millions de degrés) invisibles à l'oeil nu (car émettent dans les rayons X)
- ⊕ Mais bien que très massifs, cela reste insuffisant...
- ⊕ Pire : gaz très chaud donc les molécules s'y déplacent très vite...
- ⊕ ...donc ces vitesses doivent être créées par une forte gravité...
- ⊕ Donc, cela conforte l'idée qu'il existe de la matière noire !

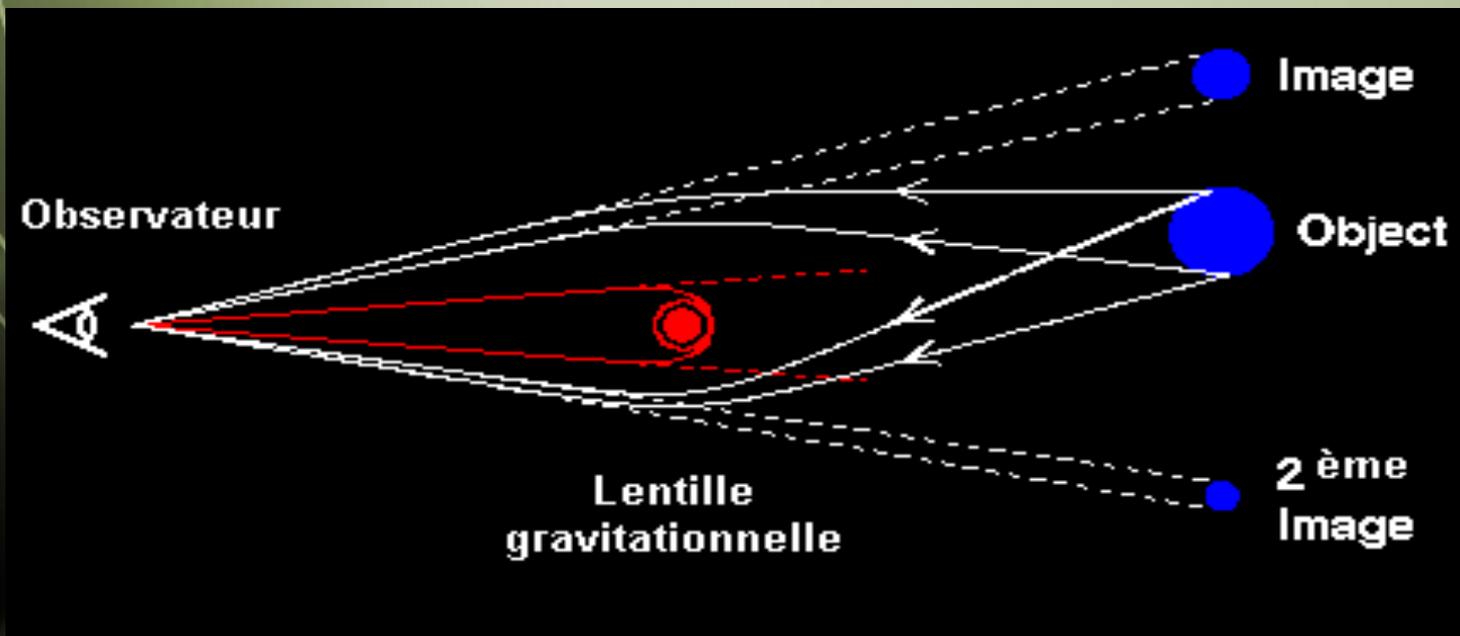
Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Nuages de gaz ?



Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ Nuages de gaz ?
 - ⊕ Par contre, ces nuages peuvent nous aider à « cartographier » la matière noire
 - ⊕ Comment ? Par un phénomène de « lentille gravitationnelle »



Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ Nuages de gaz ?
 - ⊕ Par contre, ces nuages peuvent nous aider à « cartographier » la matière noire
 - ⊕ Comment ? Par un phénomène de « lentille gravitationnelle »
 - ⊕ Exemple : amas du Boulet (collision de 2 amas voisins)

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Nuages de gaz ?



Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ Naines blanches / étoiles à neutrons ?
 - ⊕ On les appelle MACHO (Massive Compact Halo Objects)
 - ⊕ Sont très massifs et n'émettent (presque) pas de lumière, donc bons candidats...
 - ⊕ ...mais 2 problèmes :
 - ⊕ Il doit y avoir beaucoup plus d'étoiles mortes que d'étoiles vivantes, donc quand on regarde les galaxies très lointaines (donc très anciennes !), on devrait les voir très brillantes !
 - ⊕ Ces étoiles mortes doivent provenir de nombreuses supernovae et l'on devrait voir plus d'éléments lourds (et des nébuleuses)
 - ⊕ Donc, peu vraisemblables :-)

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Naines blanches / étoiles à neutrons ?

⊕ Compact Halo

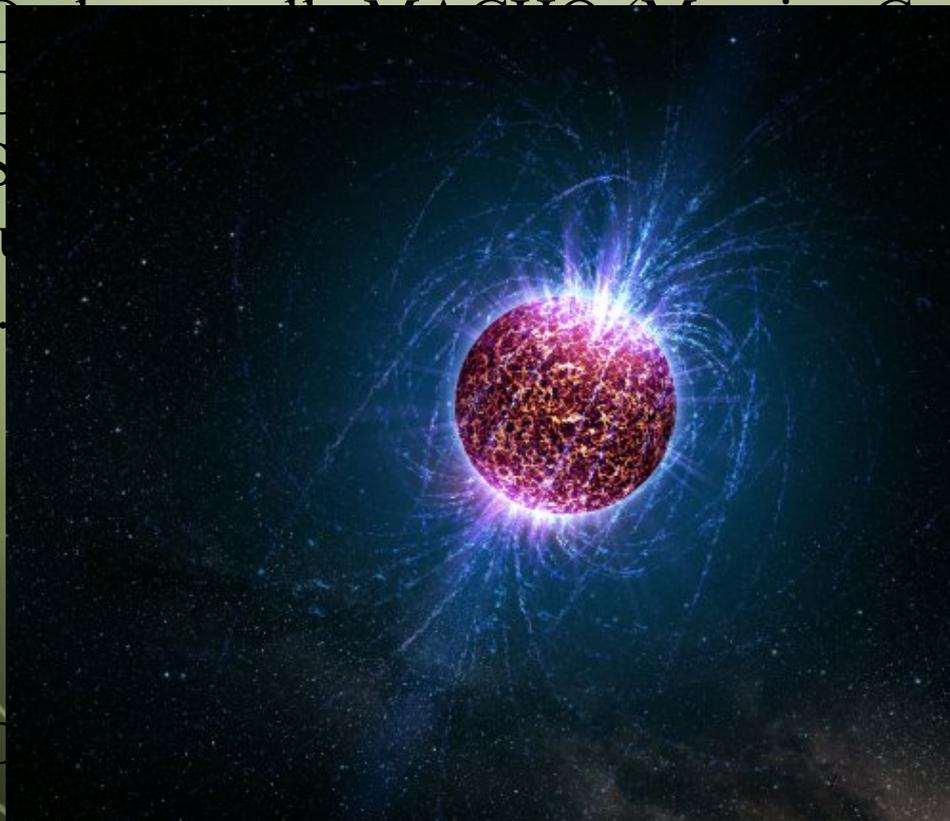
⊕ (ne) pas de

⊕

⊕ ..

tes que d'étoiles
ies très lointaines
r très brillantes !
mbreuses
ments lourds (et

⊕ D



Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Naines brunes ?

- ⊕ Ce sont aussi des MACHO
- ⊕ Très dures à observer, mais on peut le faire par les lentilles gravitationnelles
- ⊕ Deux programmes scientifiques (EROS et AGAPE) ont essayé de détecter beaucoup de naines brunes...
- ⊕ ...sans résultat
- ⊕ Conclusion : moins de 10% de la galaxie peut être formé par des naines brunes
- ⊕ Donc, insuffisant :-)

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Naines brunes ?



peut le faire par les

(EROS et AGAPE)

de naines brunes...

la galaxie peut être

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Naines brunes ?

- ⊕ Ce sont aussi des MACHO
- ⊕ Très dures à observer, mais on peut le faire par les lentilles gravitationnelles
- ⊕ Deux programmes scientifiques (EROS et AGAPE) ont essayé de détecter beaucoup de naines brunes...
- ⊕ ...sans résultat
- ⊕ Conclusion : moins de 10% de la galaxie peut être formé par des naines brunes
- ⊕ Donc, insuffisant :-)

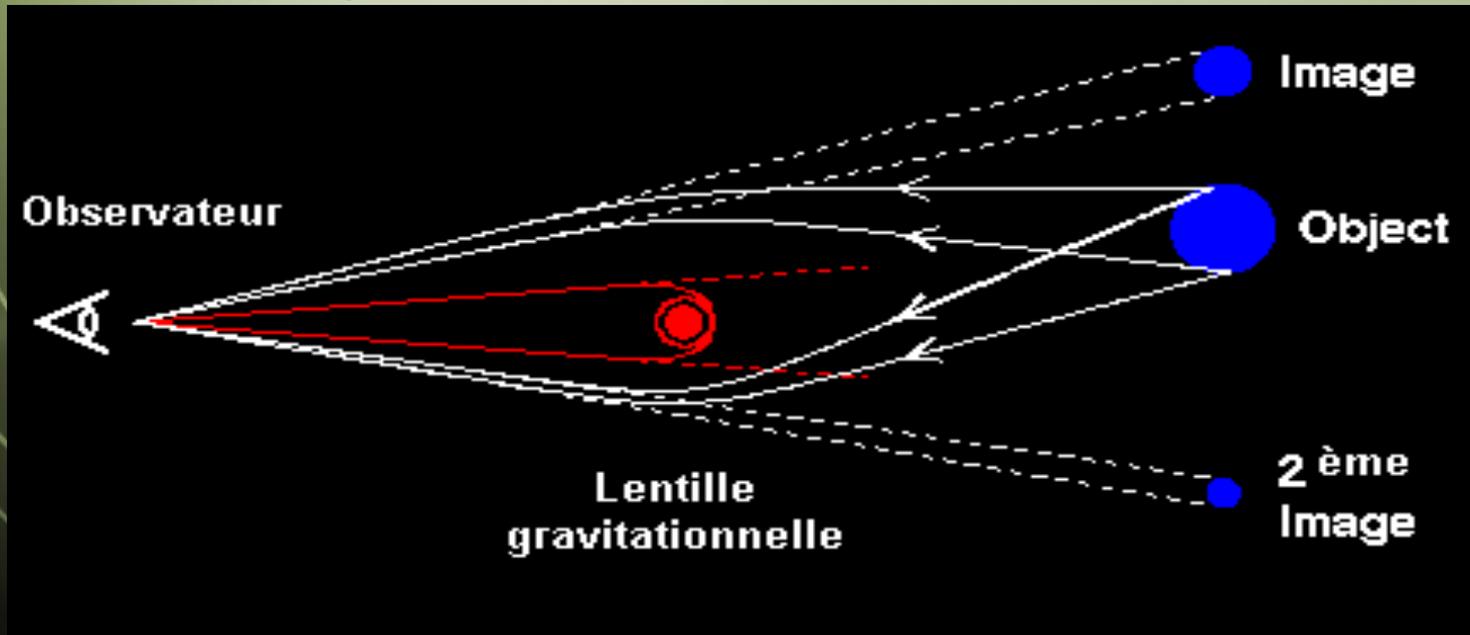
Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Naines brunes ?

⊕ Ce sont aussi des MACHO

⊕ Très dures à observer, mais on peut le faire par les lentilles gravitationnelles

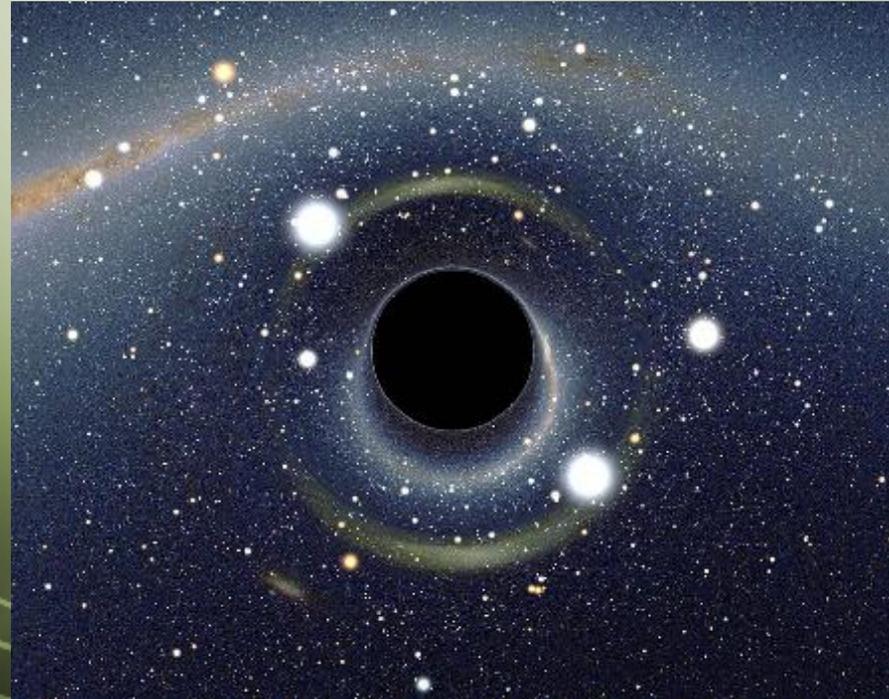
⊕ Deux programmes scientifiques (EROS et AGAPE)



Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Trous noirs ?

- ⊕ Il en faudrait plusieurs millions !
- ⊕ Or, ces trous noirs devraient fortement perturber le mouvement des étoiles aux alentours
- ⊕ Et on n'observe pas ces perturbations
- ⊕ Bof aussi :-)



Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ Mais alors, que reste-t-il ?
- ⊕ Ultime solution : des particules élémentaires exotiques qui n'interagissent pas entre elles
- ⊕ **1) Les neutrino**
 - ⊕ Particules neutres extrêmement petites
 - ⊕ Elles sont émises en énorme quantité dans les étoiles, les supernova, etc
 - ⊕ Avantage 1 : on les a détectés !
 - ⊕ Avantage 2 : il traversent la matière sans interagir
 - ⊕ Inconvénient : leur masse est TRES faible (nulle ?)
 - ⊕ Très nombreux mais insuffisant :-)

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Mais alors, que reste-t-il ?

⊕ 1) **Les neutrino**

⊕ 2) **Les WIMPs**

⊕ = « Weakly Interacting Massive Particles »

⊕ = « Mauviettes »

⊕ Particules TRES lourdes qui interagissent peu avec la matière

⊕ Avantage : si on les découvre, ils pourront résoudre en grande partie la mystère de la matière noire

⊕ Inconvénient : on ne les a pas (encore) découverts

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Mais alors, que reste-t-il ?

⊕ 1) **Les neutrino**

⊕ 2) **Les WIMPs**

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Mais alors, que reste-t-il ?

⊕ 1) **Les neutrino**

⊕ 2) **Les WIMPs**

⊕ Particules « inventées » dans des théories physiques TRES compliquées (supersymétrie,...)

⊕ Exemples :

⊕ Neutralino

⊕ Axion

⊕ Gravitino

⊕ Suffisant ? Insuffisant ?

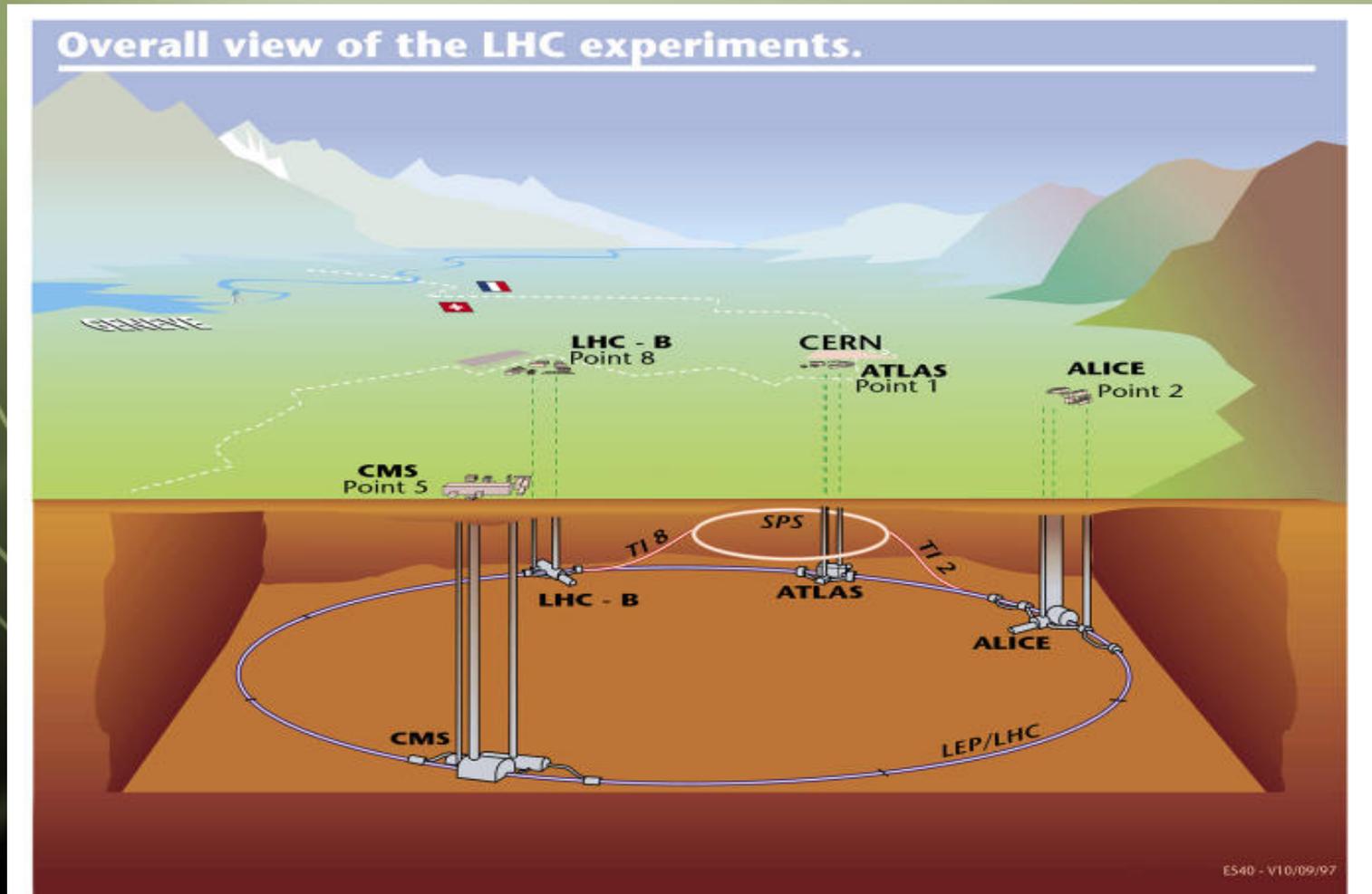
Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ Comment « découvrir » ces WIMPs ?
- ⊕ Par définition, particules inconnues, donc difficile de les trouver telles quelles
- ⊕ Mais on pourrait les « créer » en faisant interagir des particules connues (protons,...) ?
- ⊕ Les WIMPs ont une grande masse, donc on doit faire entrer en collision des particules à hautes énergies
- ⊕ Besoin d'accélérateurs de particules
 - ⊕ Exemple : le LHC, près de Genève (frontière franco-suisse)

Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Accélérateurs :

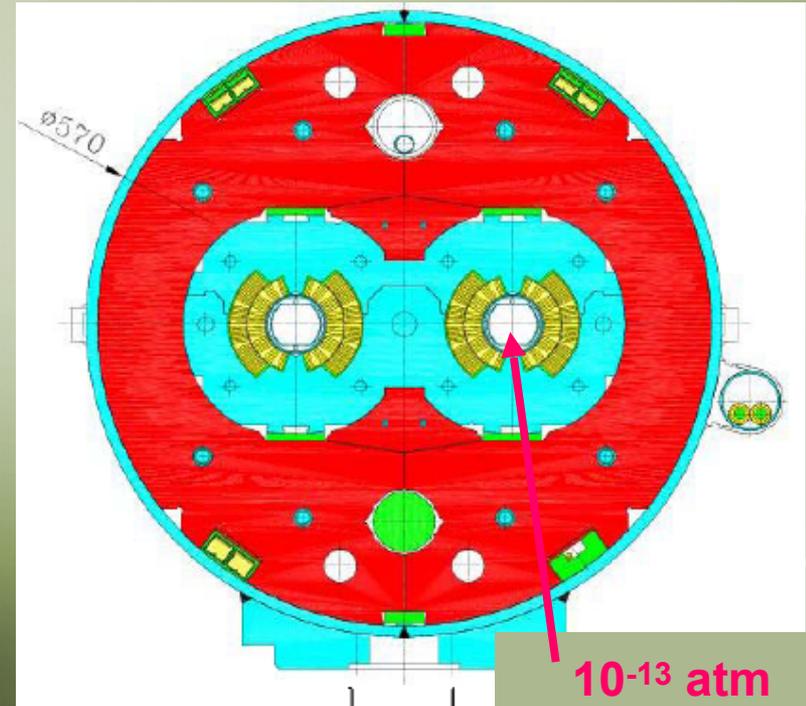
⊕ Le LHC (Large Hadron Collider) - Europe



Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Accélérateurs :

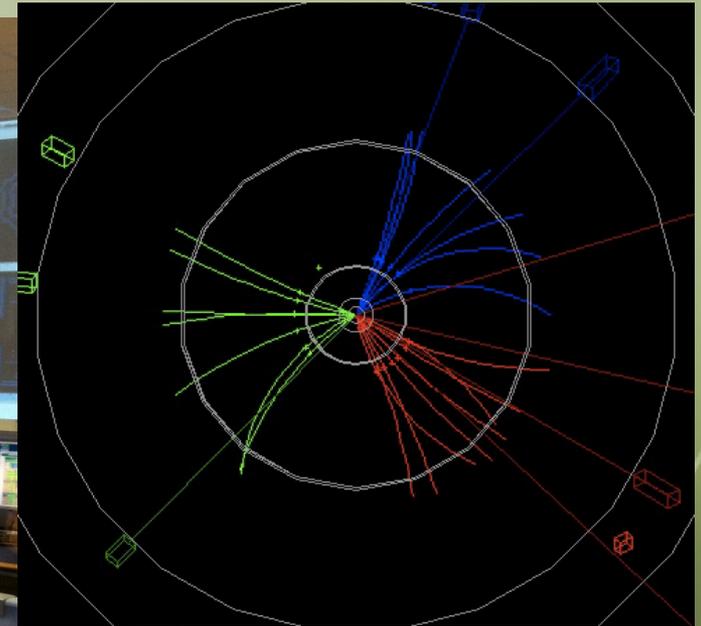
⊕ Le LHC (Large Hadron Collider) - Europe



Matière noire ? Qu'est-ce ?

⊕ Accélérateurs :

⊕ Le LHC (Large Hadron Collider) - Europe



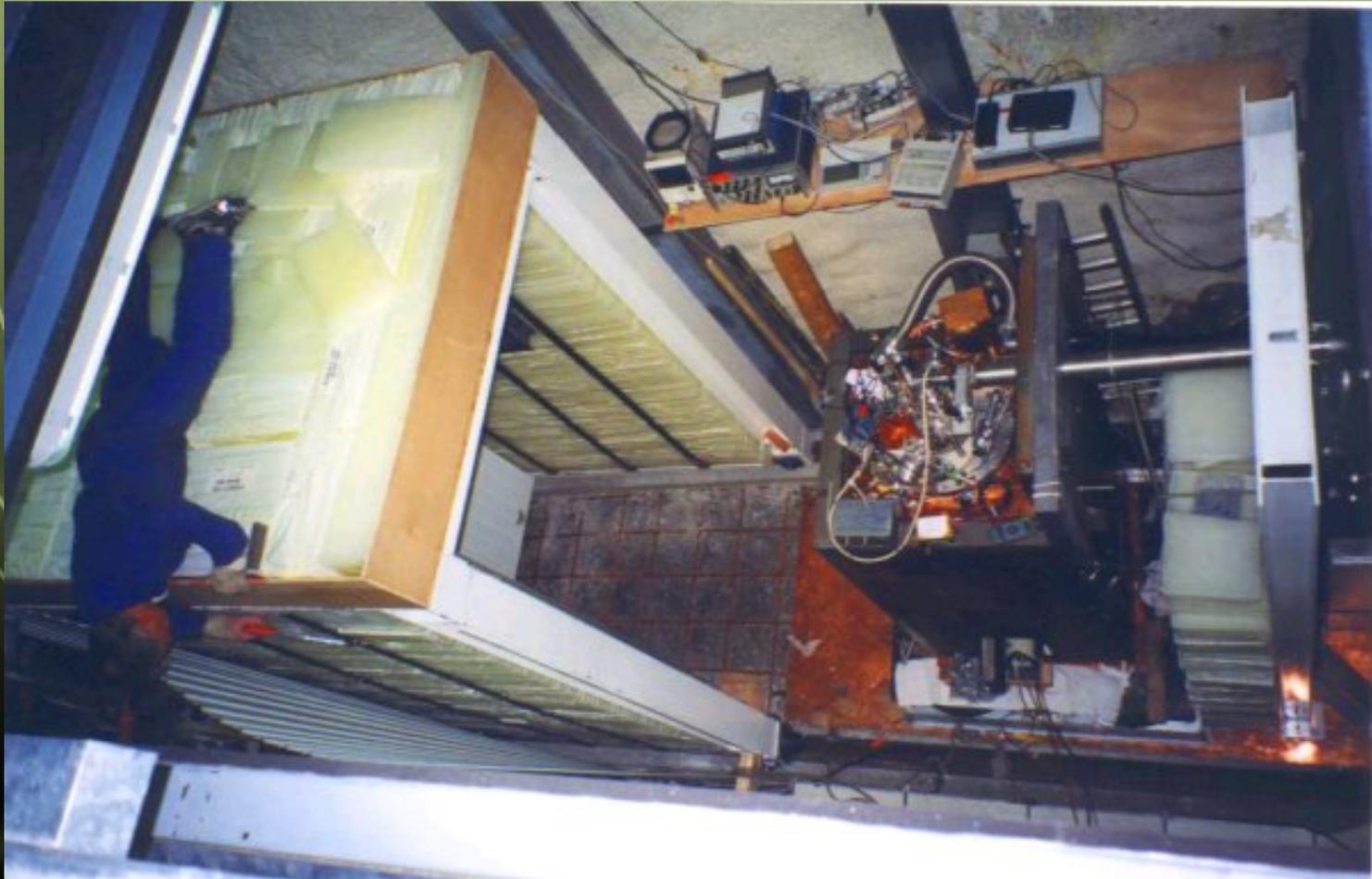
Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ Accélérateurs :
 - ⊕ Le Tevatron - Etats Unis



Matière noire ? Qu'est-ce ?

- ⊕ Détecteurs :
 - ⊕ Edelweiss - Tunnel du Fréjus (France)



La gravitation newtonienne modifiée

- ⊕ Reprenons notre équation :

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- ⊕ Le problème à résoudre : vitesse observée (v) et masse observée (M) ne satisfont pas l'équation
- ⊕ Solution 1 (rappel) : M n'est pas correct
- ⊕ Solution 2 : G n'est pas correct ?!

La gravitation newtonienne modifiée

- ⊕ Reprenons notre équation :

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

À revoir !

- ⊕ Le problème à résoudre : vitesse observée (v) et masse observée (M) ne satisfont pas l'équation
- ⊕ Solution 1 (rappel) : M n'est pas correct
- ⊕ Solution 2 : G n'est pas correct ?!

La gravitation newtonienne modifiée

- ⊕ Reprenons notre équation :

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

À revoir !

- ⊕ Le problème à résoudre : vitesse observée (v) et masse observée (M) ne satisfont pas l'équation
- ⊕ Solution 1 (rappel) : M n'est pas correct
- ⊕ Solution 2 : G n'est pas correct ?!

La gravitation newtonienne modifiée

- ⊕ Idée : la gravitation newtonienne modifiée (ou « MOND »)
- ⊕ La constante G n'est peut-être pas une constante fondamentale...
- ⊕ Elle serait différente lorsque la force de gravitation est faible (càd lorsque les étoiles tournent loin du centre galactique)
- ⊕ Il n'y a donc pas de matière noire, on se serait juste trompé en écrivant les lois du mouvement !

La gravitation newtonienne modifiée

- ⊕ Il faut donc « étendre » la théorie de Newton pour la rendre compatible avec les observations
- ⊕ On y travaille... Mais pas simple !
- ⊕ Avantage : explication simple, pas besoin de recourir à des particules farfelues
- ⊕ Inconvénient : aucune théorie sérieuse ou vérifiable n'a encore été mise au point

Conclusion

- ⊕ On est face à un gros problème : les étoiles (et les galaxies) ne tournent pas du tout comme elles le devraient
- ⊕ Deux explications possibles :
 - ⊕ L'univers est rempli de matière invisible, aux propriétés inconnues, sans doute faite de particules inconnues
 - ⊕ Les lois de la physique sont à revoir
 - ⊕ Ou autre explication ? Mais laquelle ?
- ⊕ Quelle explication est la bonne ?

Références

- ⊕ M. Seguin, B. Villeneuve, *Astronomie et Astrophysique*, De Boeck, 2002
- ⊕ *Science & Vie*, n°1078, juillet 2007
- ⊕ P. Magain, *Astrophysique* (SPAT0033-1), Université de Liège, 2010
- ⊕ A. Jorissen, *Structure de l'univers* (PHYS-F-105), Université Libre de Bruxelles, 2007
- ⊕ Wikipédia