

# 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

⊕ Système

⊕ Galaxie

⊕ Groupe

⊕ Amas

⊕ Superamas

⊕ Univers



# *Introduction*

- ⊕ De quoi est composé notre Univers ?

- ⊕ Terre

- ⊕ Système

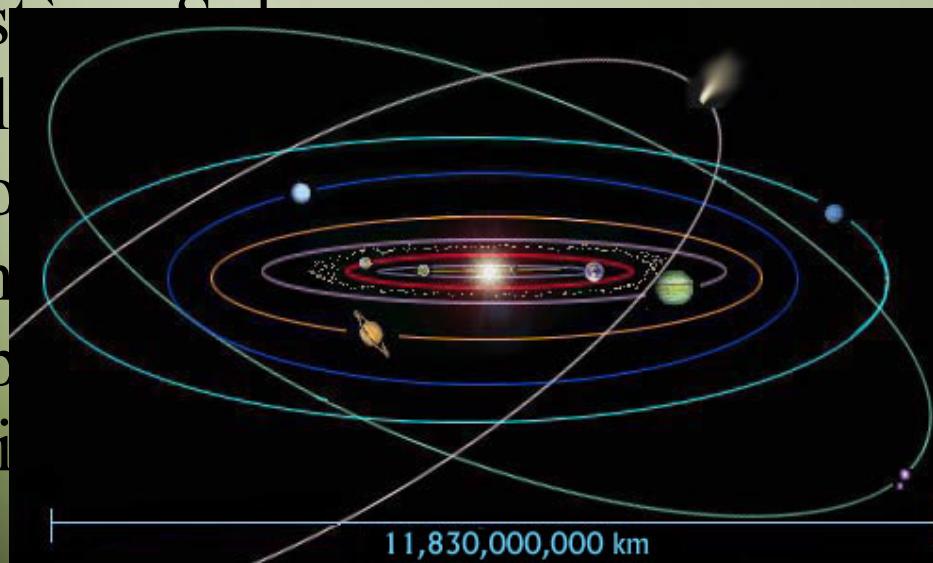
- ⊕ Galaxie

- ⊕ Groupe

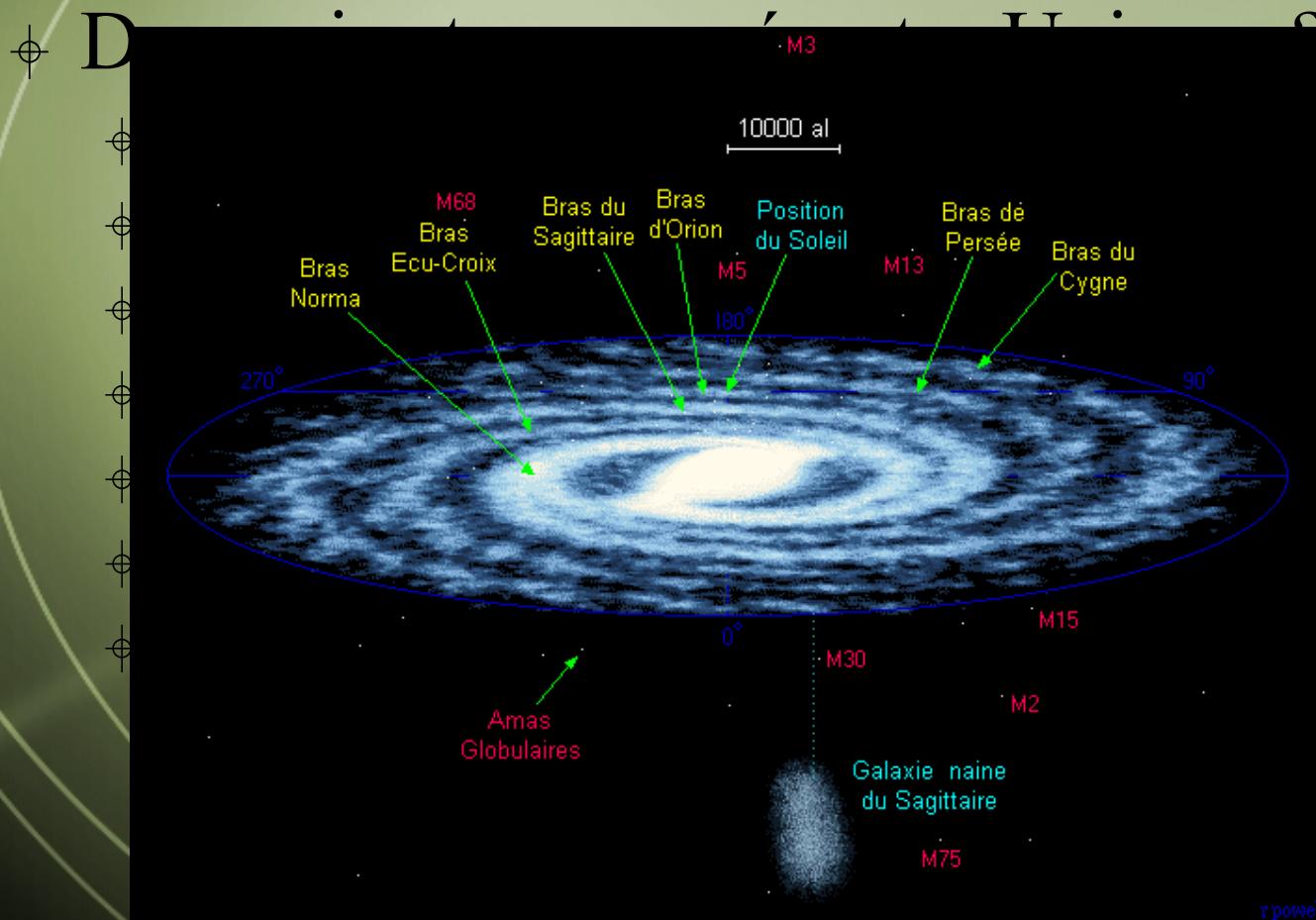
- ⊕ Amas

- ⊕ Superamas

- ⊕ Univers



# *Introduction*

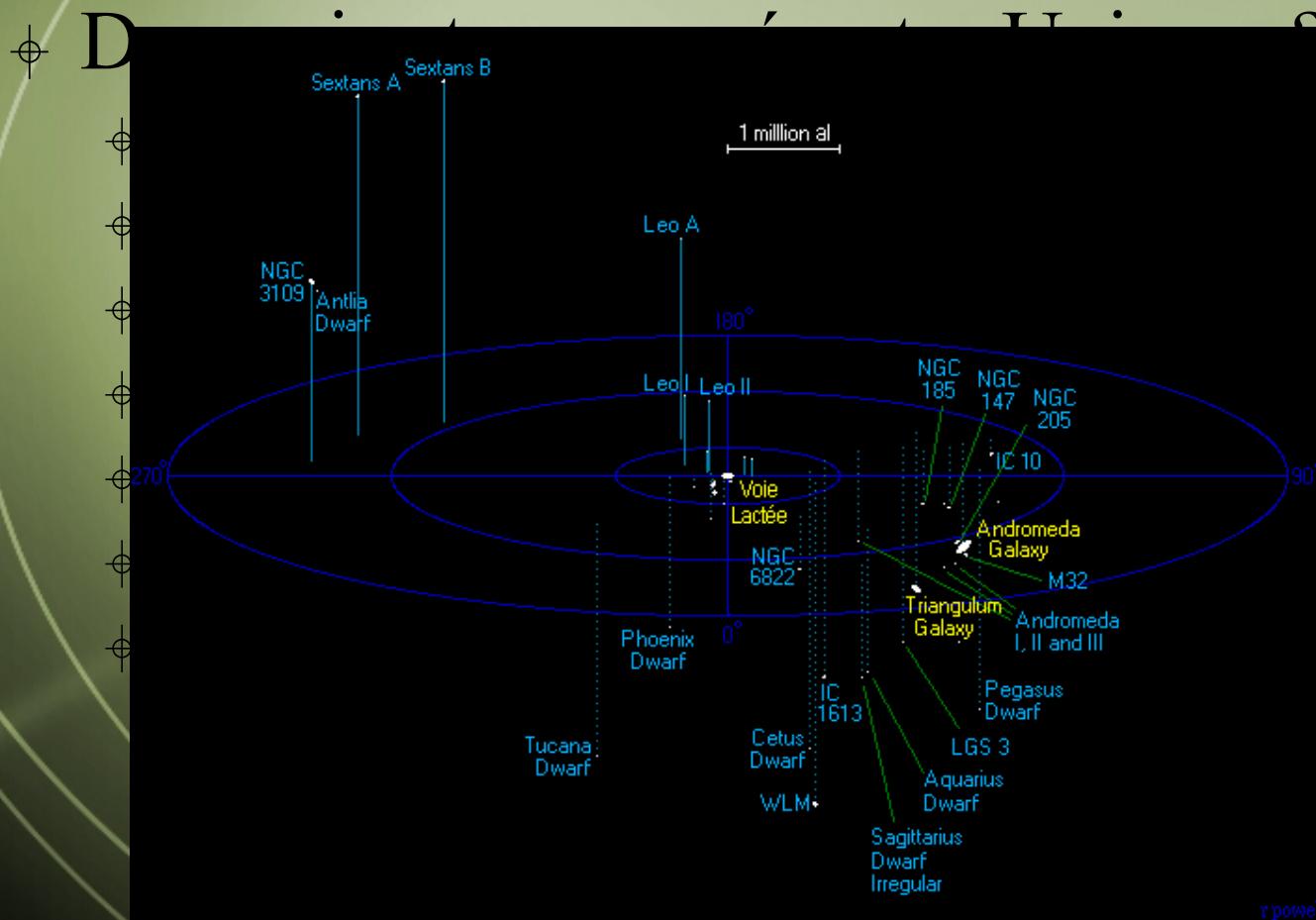


# La Voie lactée

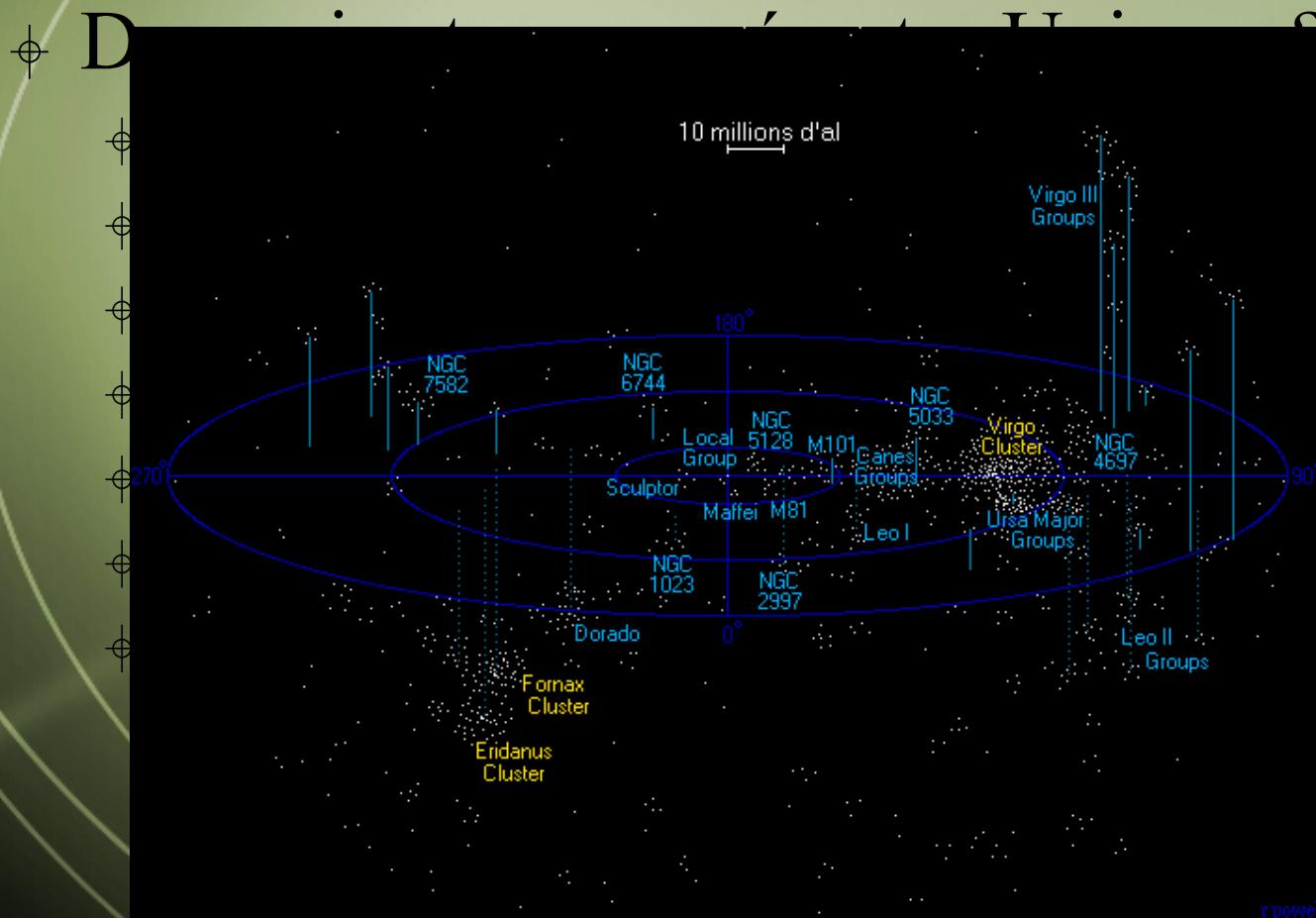
- ⊕ De quoi parle-t-on ?
- ⊕ Terre et Univers
- ⊕ Systèmes solaires
- ⊕ Galaxies
- ⊕ Groupes de galaxies
- ⊕ Amas de galaxies
- ⊕ Superamas et filaments
- ⊕ Univers et énergie sombre



# *Introduction*

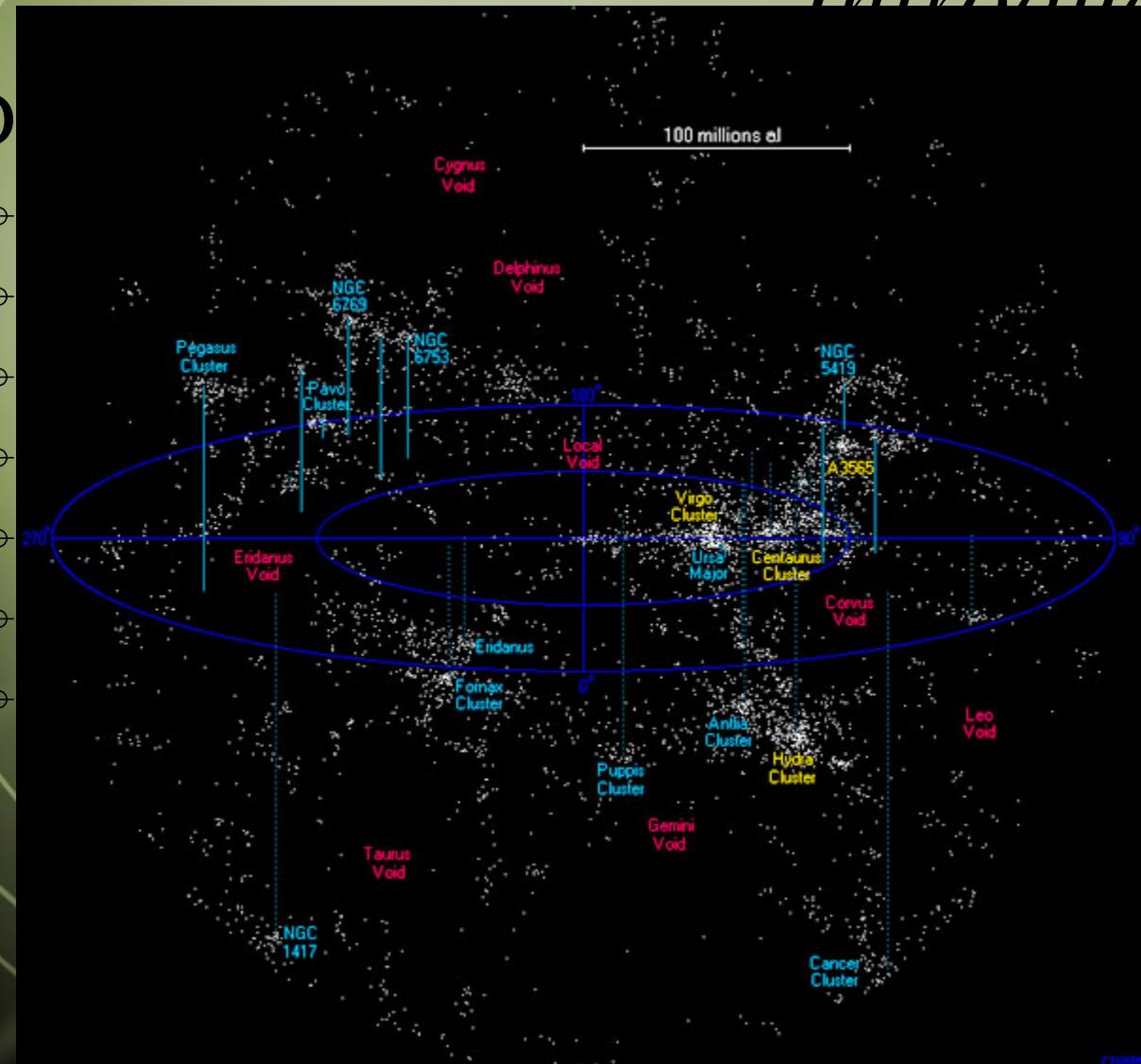


# *Introduction*



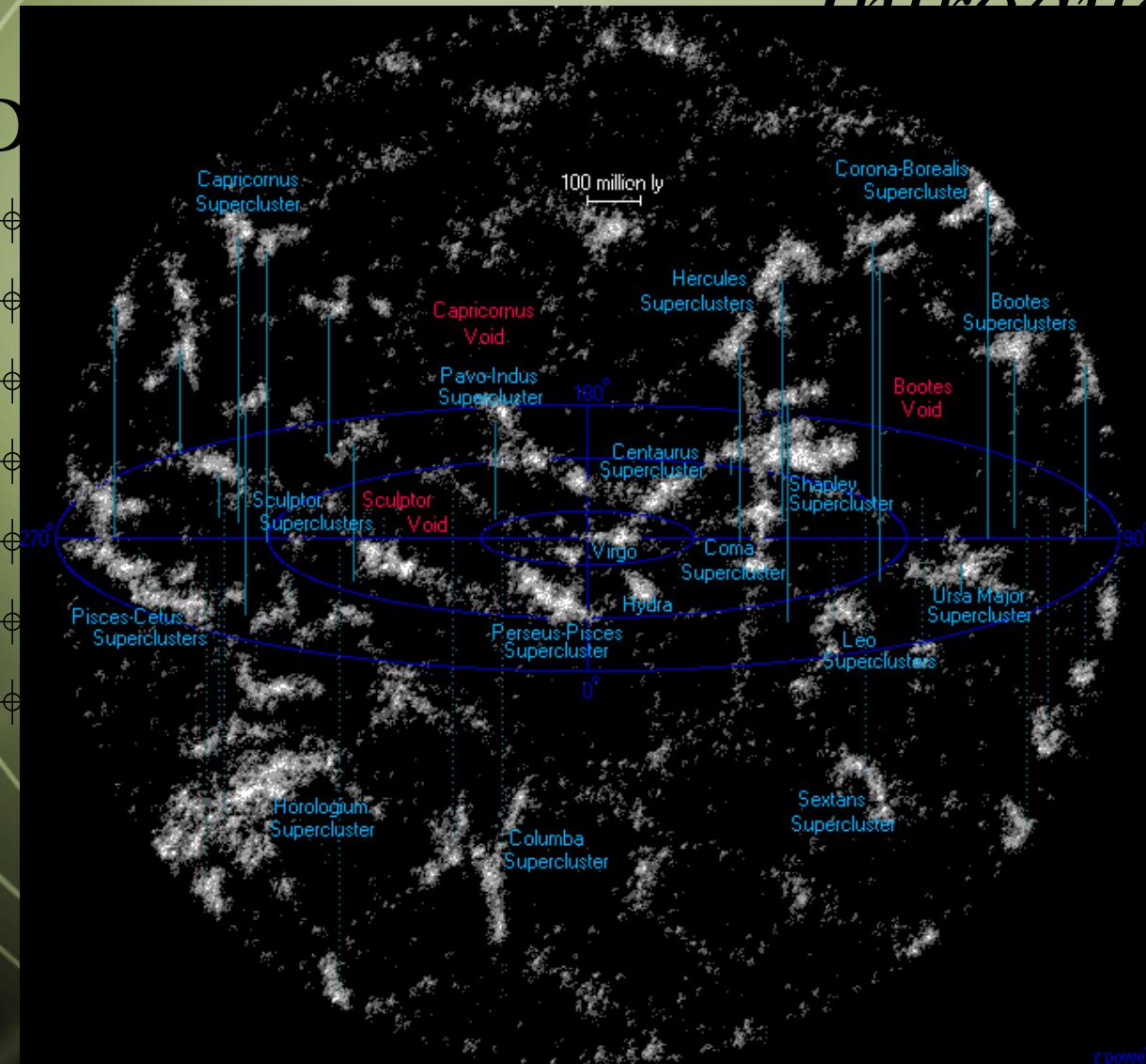
# *Introduction*

D



# Introduction

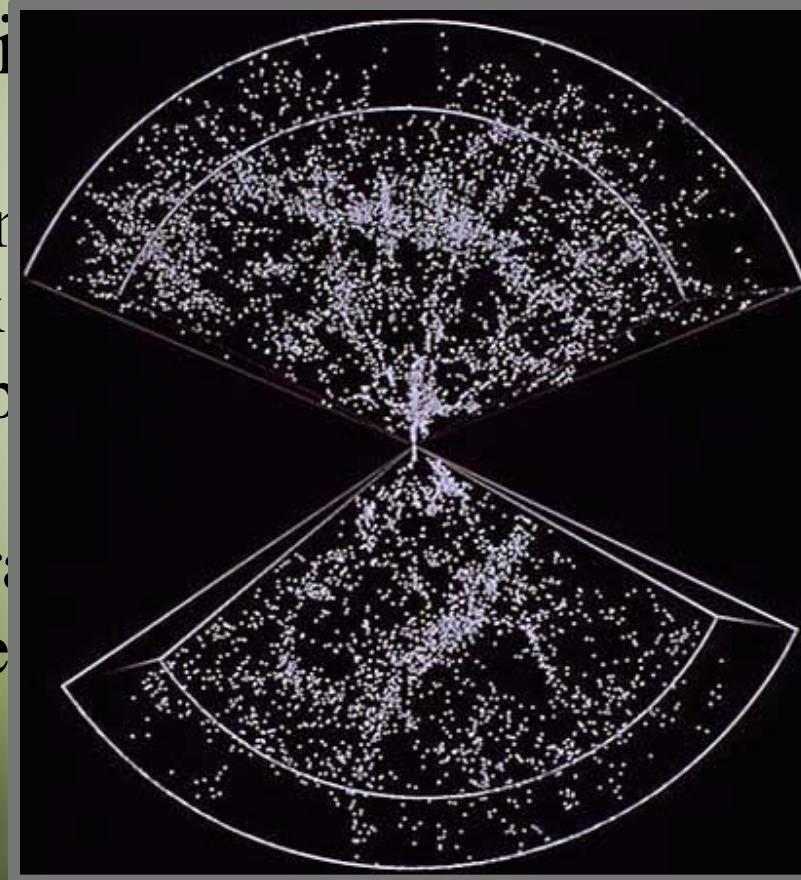
D



rpowell

# *Introduction*

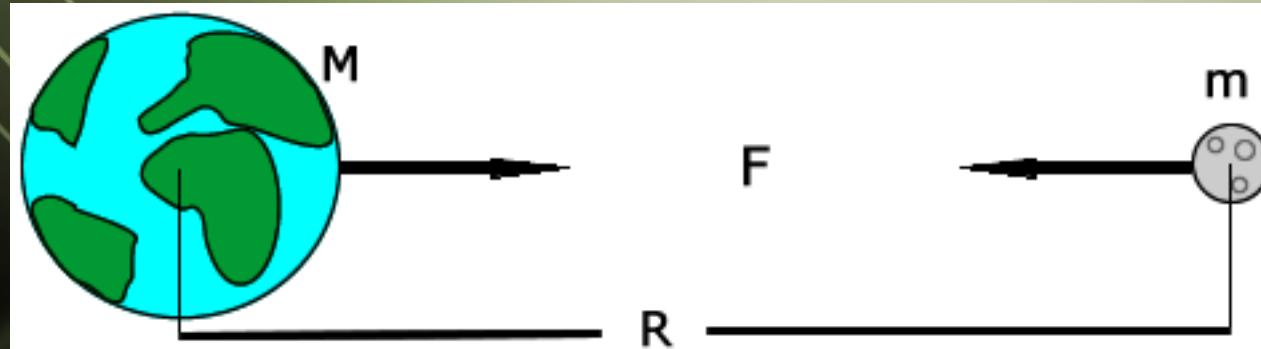
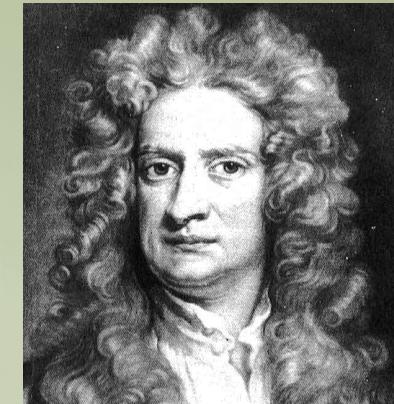
- ⊕ De quoi est composé l'univers ?
  - ⊕ Terre
  - ⊕ Système solaire
  - ⊕ Galaxie
  - ⊕ Groupe de galaxies
  - ⊕ Amas de galaxies
  - ⊕ Superamas de galaxies
  - ⊕ Univers



# *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 !

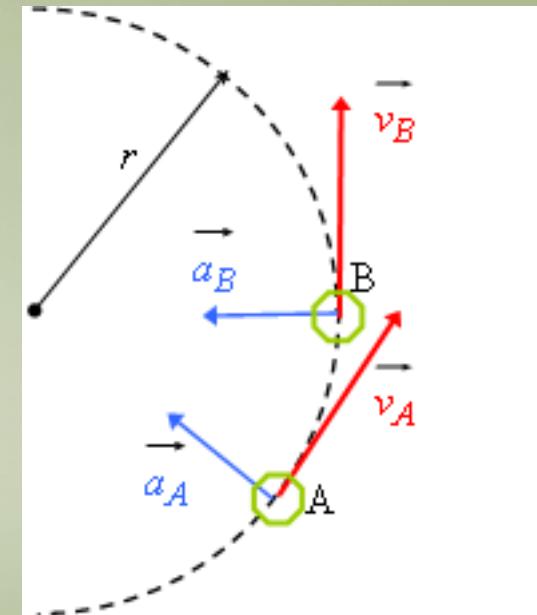
$$F_{grav} = G \frac{Mm}{r^2}$$



# *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 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  $1 \text{ L}_\odot = 4 \text{ M}_\odot$
  - ⊕ On trouve une masse totale de...
  - ⊕ ... $10^{11} \text{ M}_\odot$  (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 (sa ~~image~~ 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...
- ⊕ ...**50<sup>11</sup> M<sub>⦿</sub>** (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*

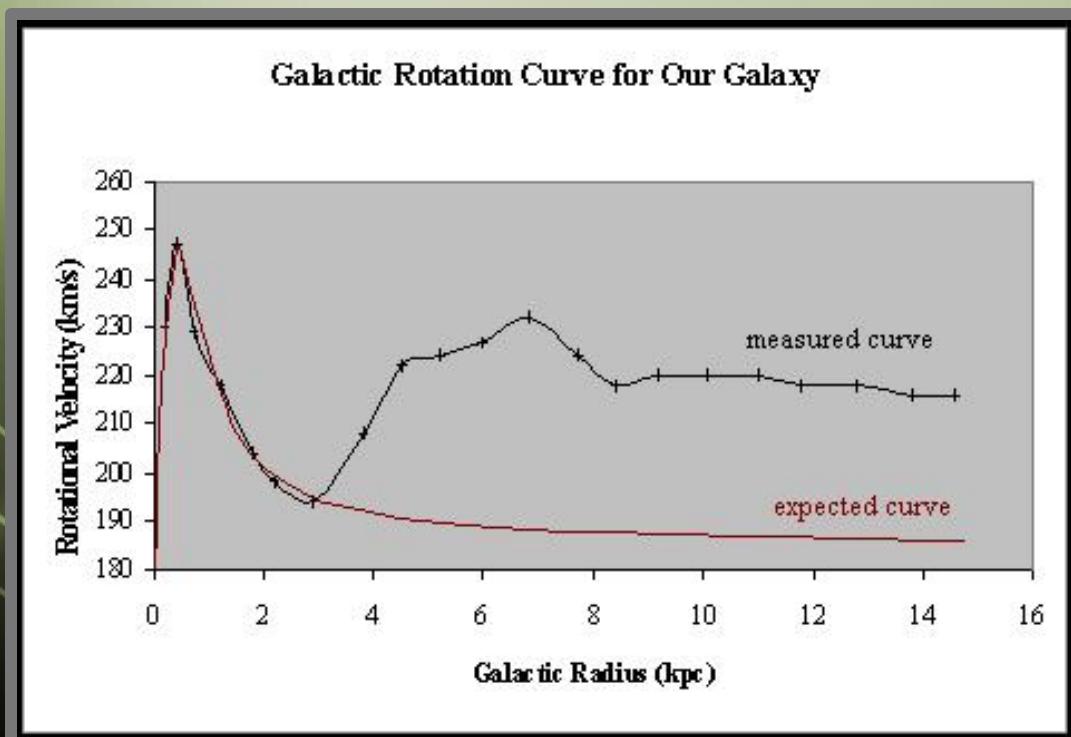
- ⊕ Regardons le problème sous un autre angle (historique)...
- ⊕ On connaît la répartition des étoiles dans la VL
- ⊕ Donc, on sait comment la masse visible se répartit dans la VL
- ⊕ Avec notre équation, on peut donc trouver la vitesse de chaque étoile autour du centre de la galaxie (en fonction de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

# *Courbe de rotation dans les galaxies spirales*

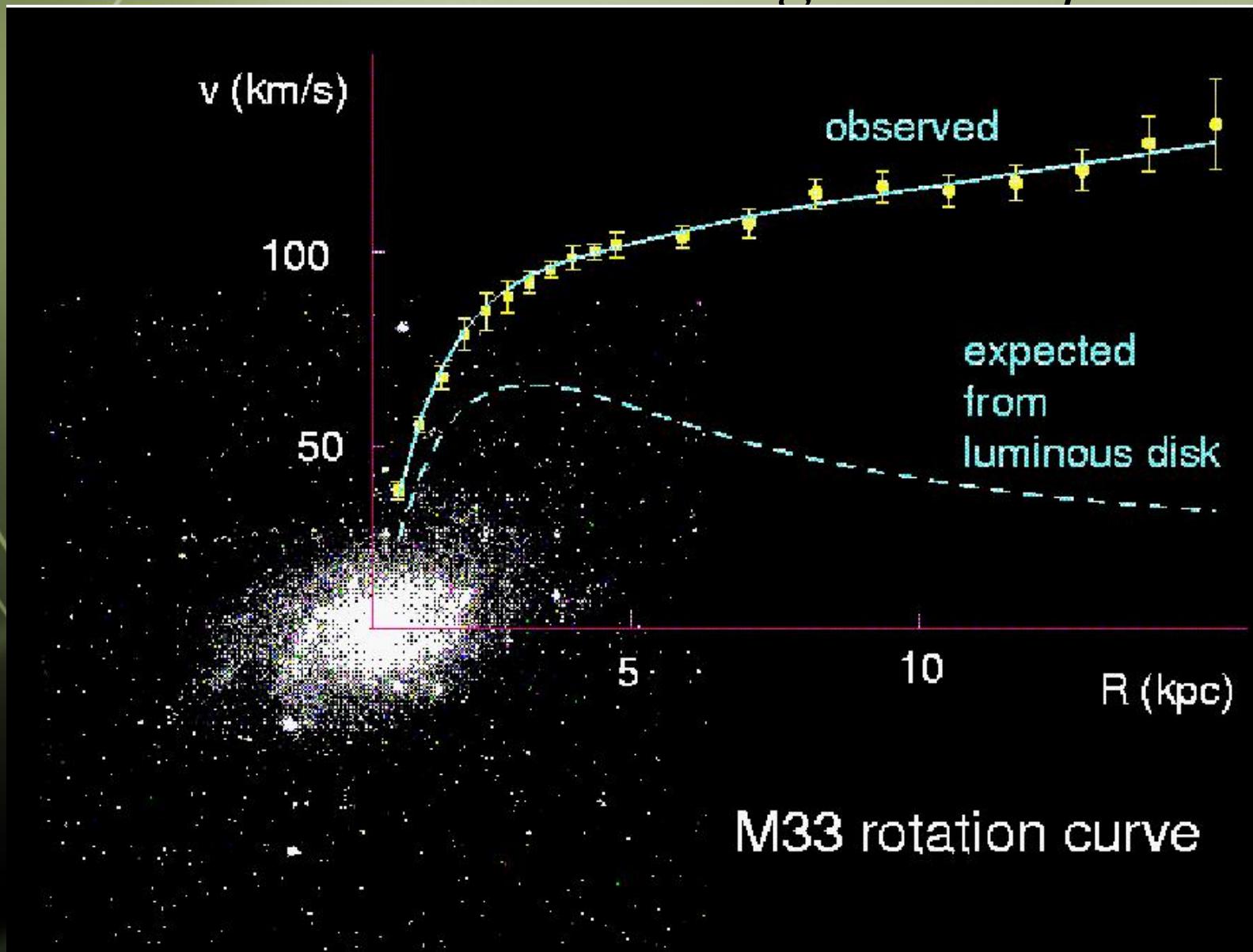
- ⊕ Exemple : courbe de rotation d'un corps solide (manège, CD, roue de vélo,...)
- ⊕ Courbe de rotation théorique de la VL :
- ⊕ Courbe de rotation mesurée de la VL :

# *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.



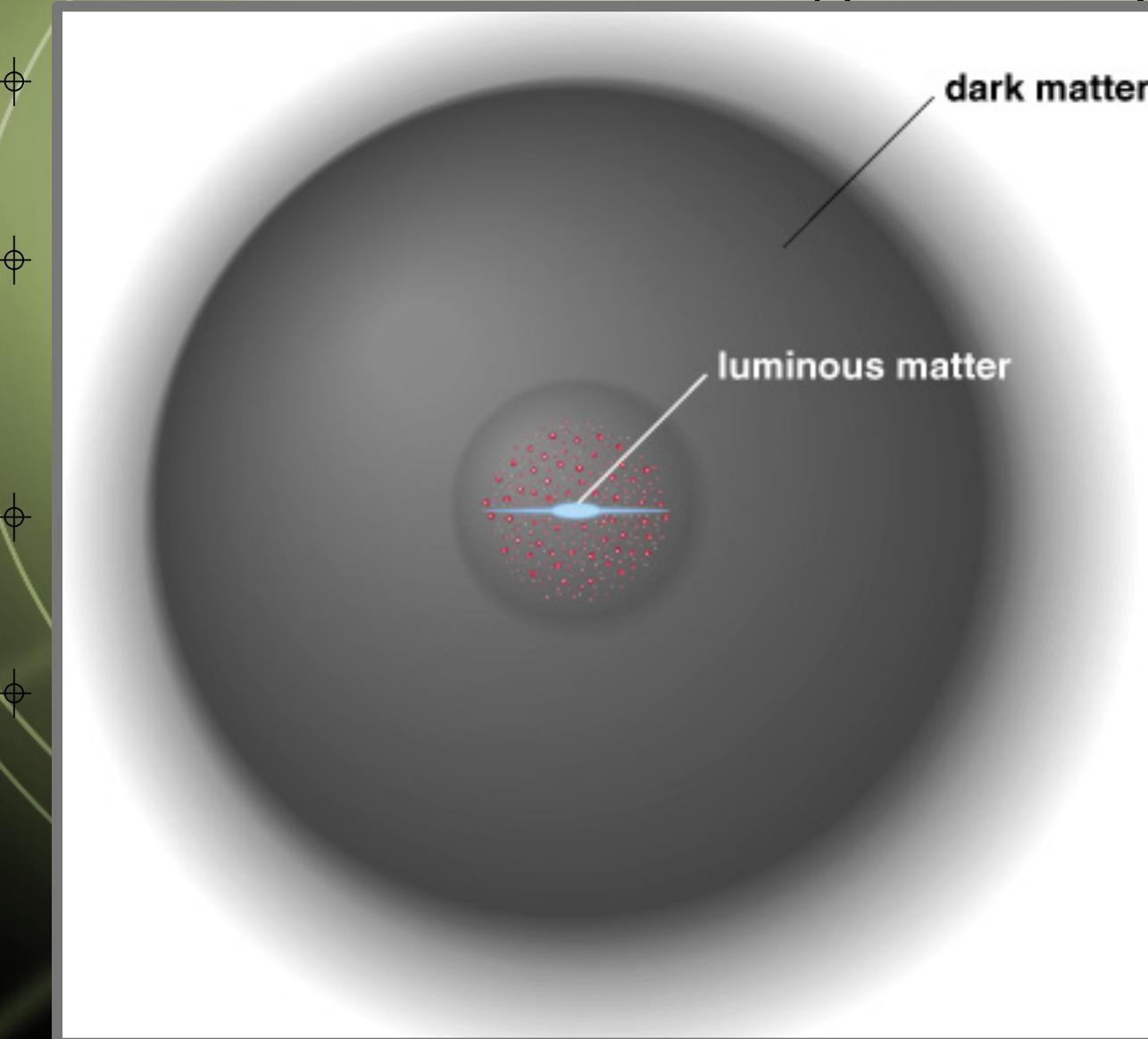
# *Courbe de rotation dans les galaxies spirales*



# *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*



nasses

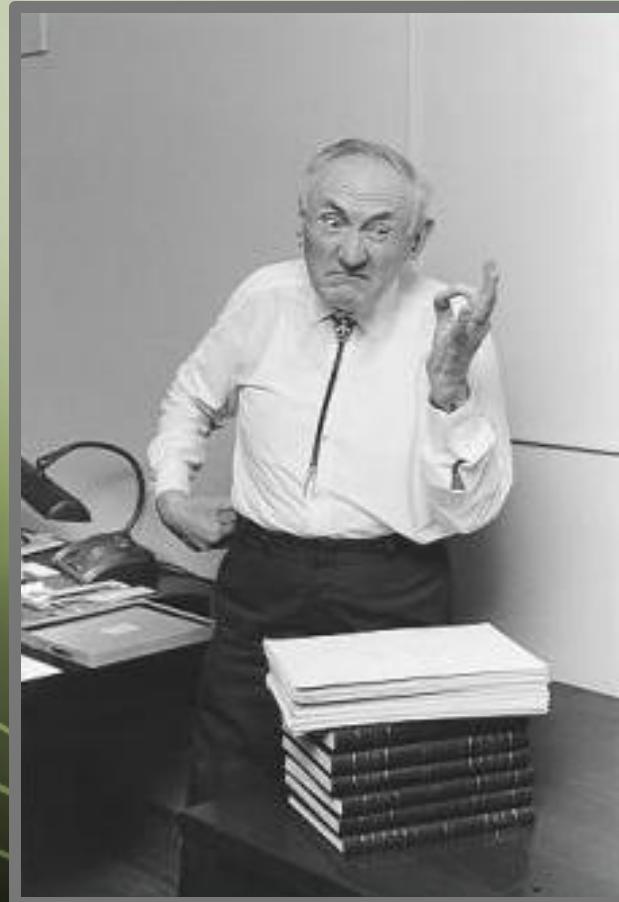
urbe  
reviner

)

halo 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) :  $10^{13} \text{ M}_\odot$
  - ⊕ Masse dynamique (=totale) :  $3.10^{15} \text{ M}_\odot$
- ⊕ 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 :
  - ⊕  $\rho_{\text{vis}} = 0,05 \text{ m}_p / \text{m}^3$ 
    - ⊕ À peu près 1 proton dans la pièce d'une maison !
  - ⊕  $\rho_{\text{noir}} = 1,5 \text{ m}_p / \text{m}^3$
- ⊕ 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 !

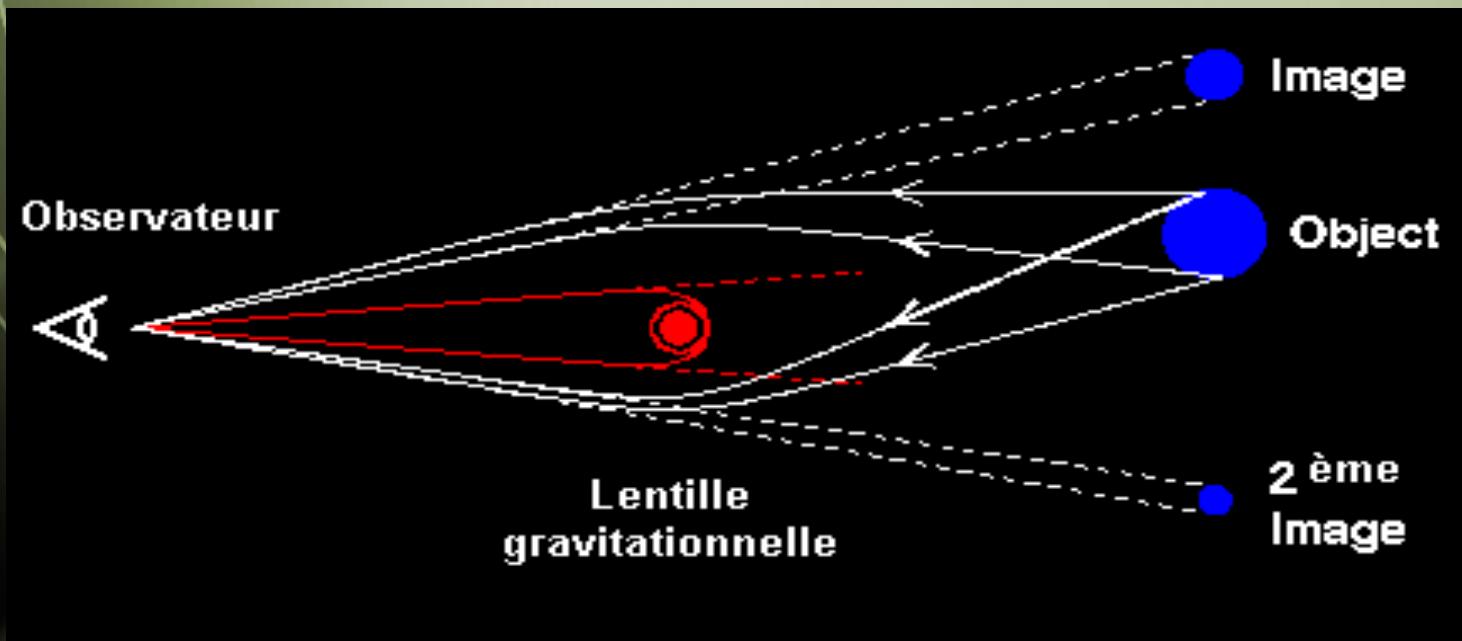
# *Matière noire ? Qu'est-ce ?*

⊕ 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 ?

→ Des nuages de gaz peuvent nous aider à



# *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 ?

⊕ C'est une étoile compacte dans un halo

⊕ Ces étoiles sont très compactes

⊕ Si elles sont assez massives, elles peuvent avoir une

luminosité comparable à celle d'une étoile de la voie lactée

⊕ ... mais elles sont très petites et donc très brillantes

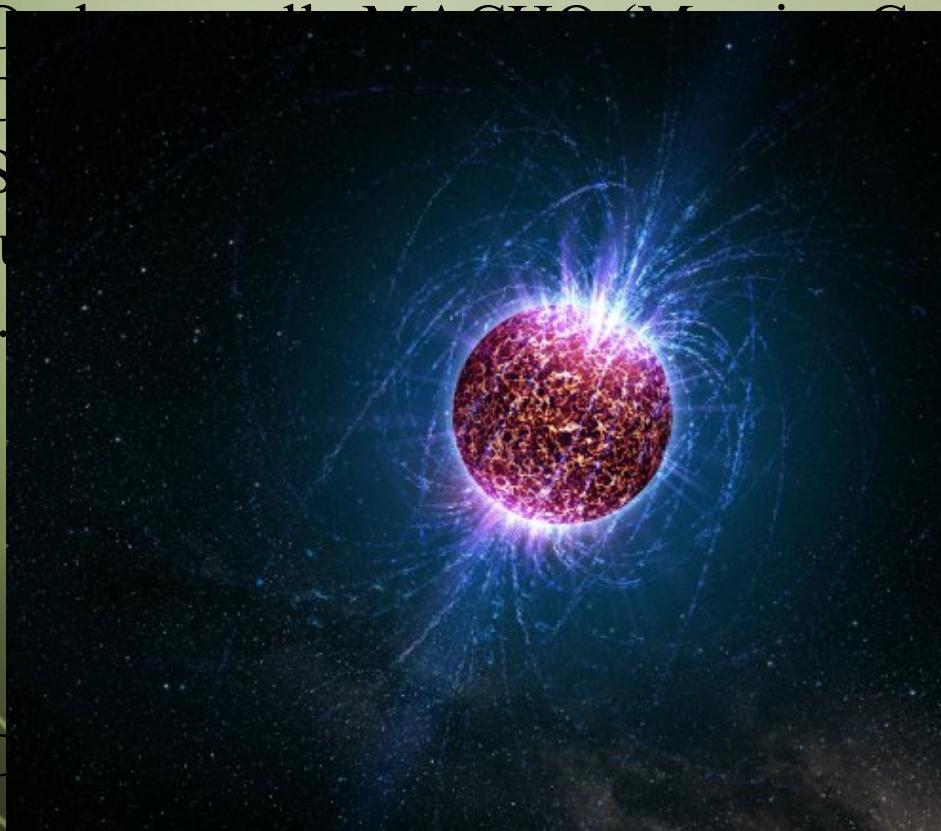
⊕ Ces étoiles sont très courantes dans l'univers

⊕ Elles sont plus courantes que d'étoiles ordinaires et que les galaxies très lointaines

⊕ Elles sont aussi plus courantes que les étoiles très brillantes !

⊕ Elles sont aussi plus courantes que les étoiles à neutrons

⊕ Elles sont aussi plus courantes que les étoiles à neutrons (et



# *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...

a galaxie peut être

# *Matière noire ? Qu'est-ce ?*

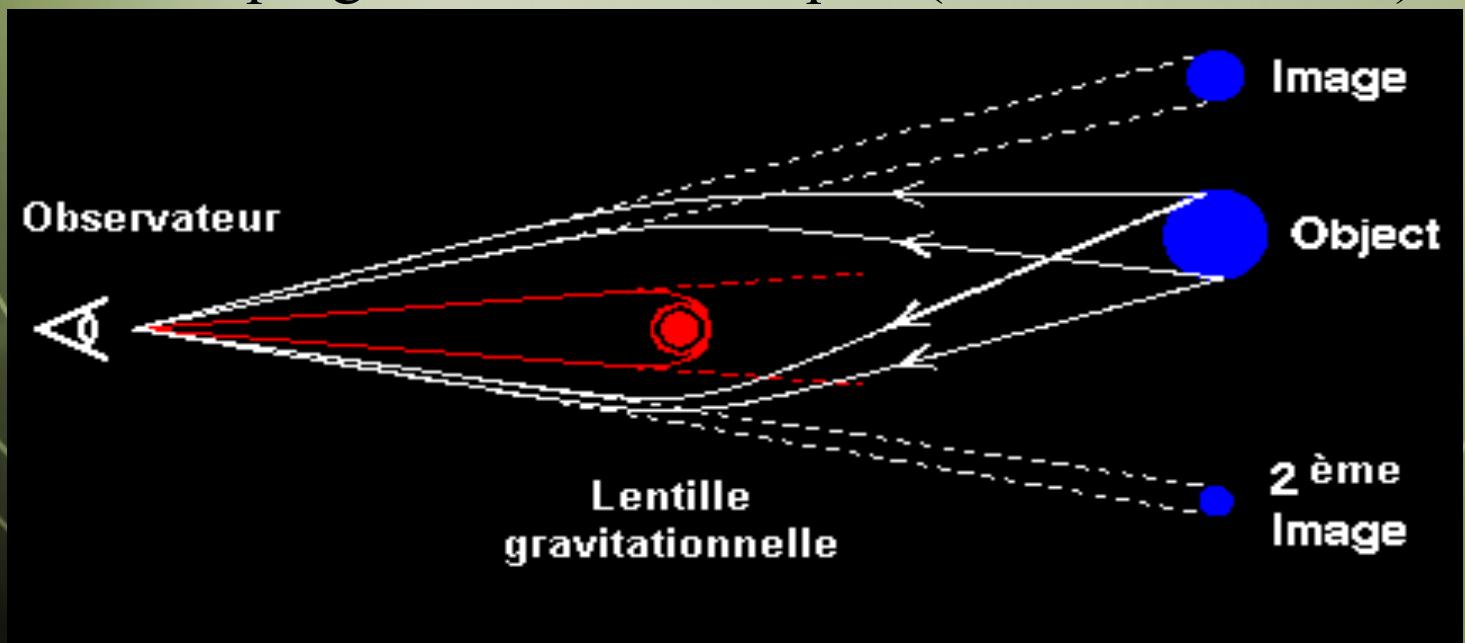
## ⊕ Naines brunes ?

- ⊕ 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 ?

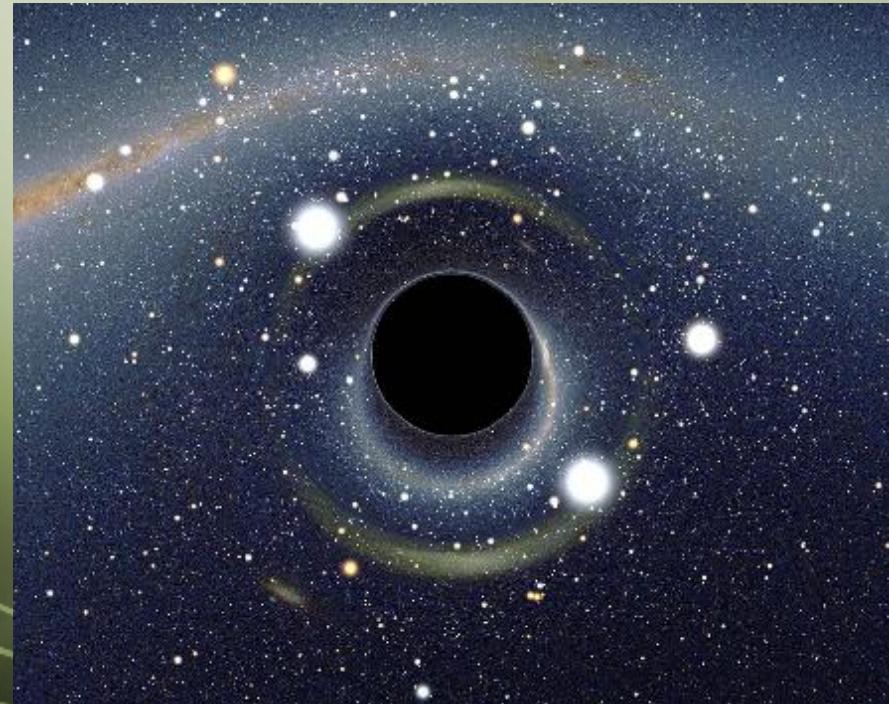
- ⊕ Ce sont aussi des MACHO
- ⊕ Très dures à observer, mais on peut le faire par les lentilles gravitationnelles
- ⊕ Deux programmes scientifiques (EROS et AGAPE)



# *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 le 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 ?*

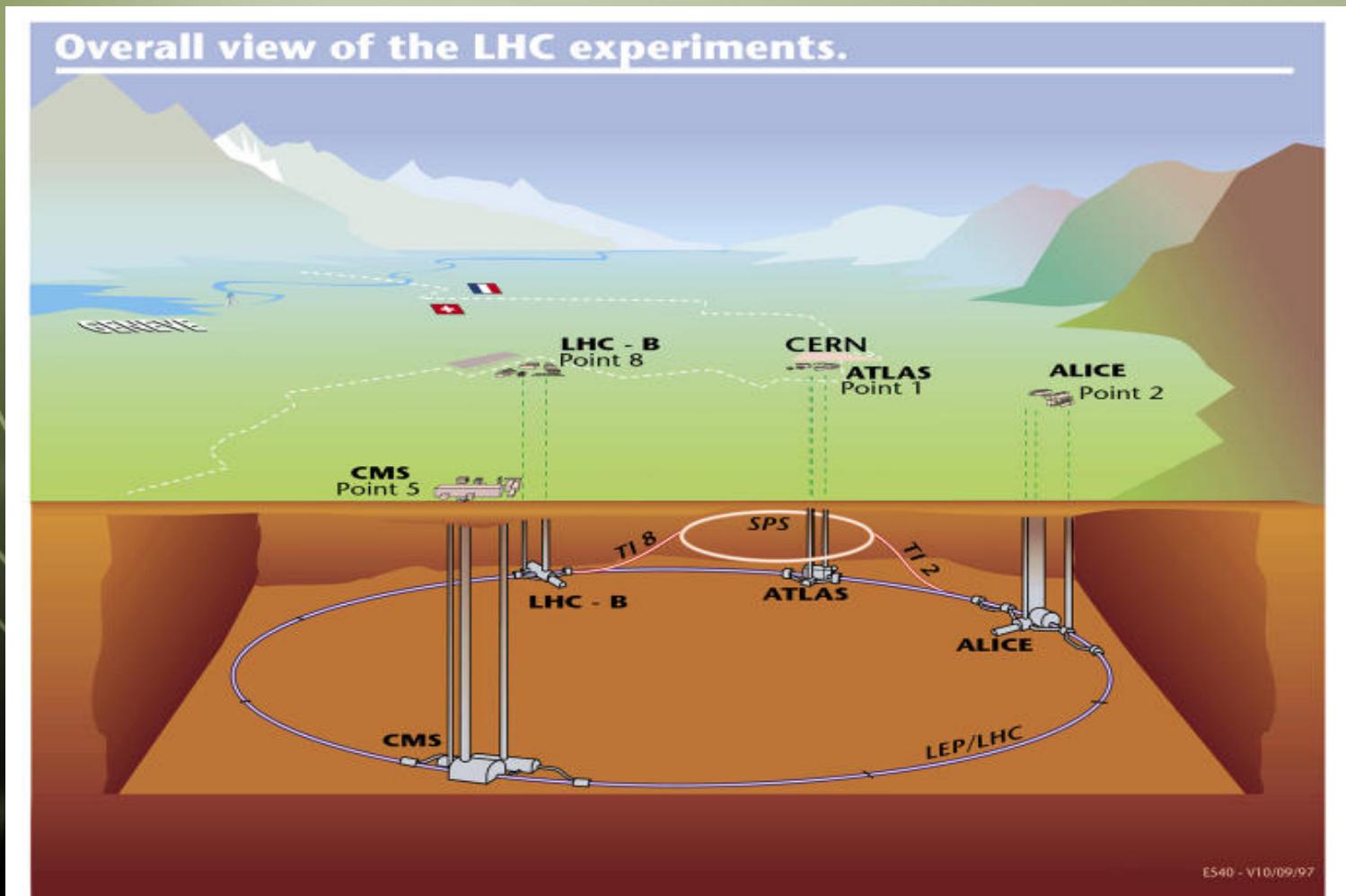
- ⊕ Mais alors, que reste-t-il ?
- ⊕ **1) Les neutrino**
- ⊕ **2) Les WIMPs**
  - ⊕ Particules « inventées » dans des théories physiques TRES compliquées (supersymétrie,...)
  - ⊕ Exemples :
    - ⊕ Neutralino
    - ⊕ Axion
    - ⊕ Gravitino
  - ⊕ Suffisant ? Insuffisant ?

# *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)

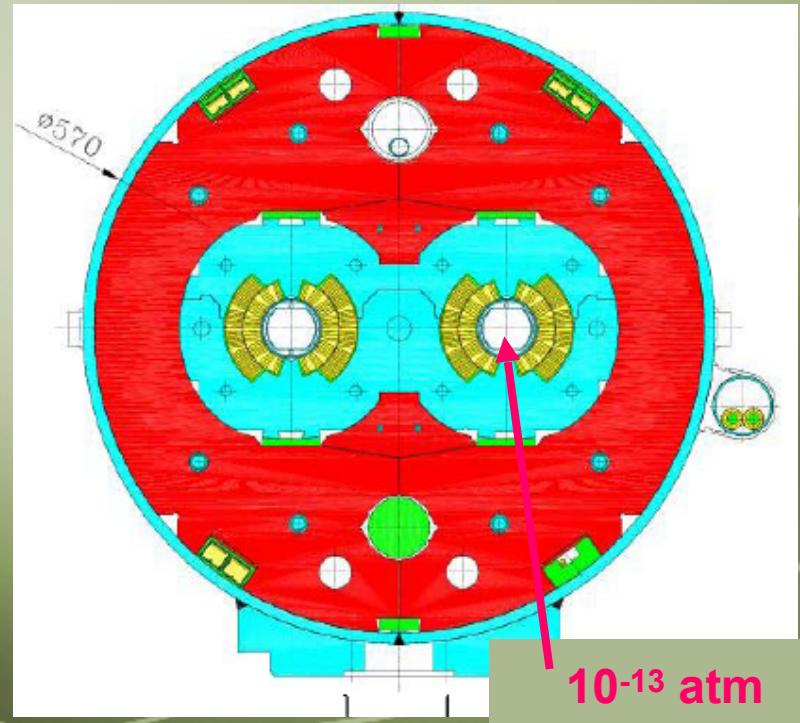
# *Matière noire ? Qu'est-ce ?*

- ⊕ Accélérateurs :
  - ⊕ Le LHC (Large Hadron Collider) - Europe



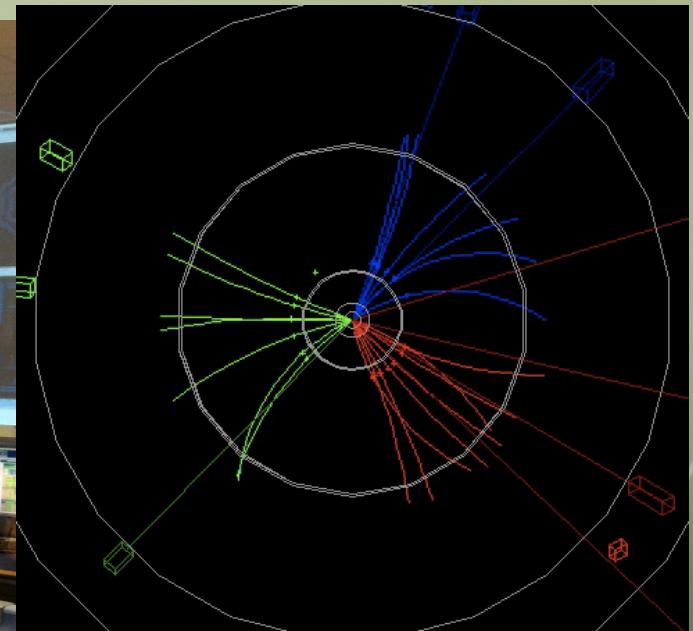
# *Matière noire ? Qu'est-ce ?*

- ⊕ Accélérateurs :
  - ⊕ Le LHC (Large Hadron Collider) - Europe



# *Matière noire ? Qu'est-ce ?*

- ⊕ Accélérateurs :
  - ⊕ Le LHC (Large Hadron Collider) - Europe



# *Matière noire ? Qu'est-ce ?*

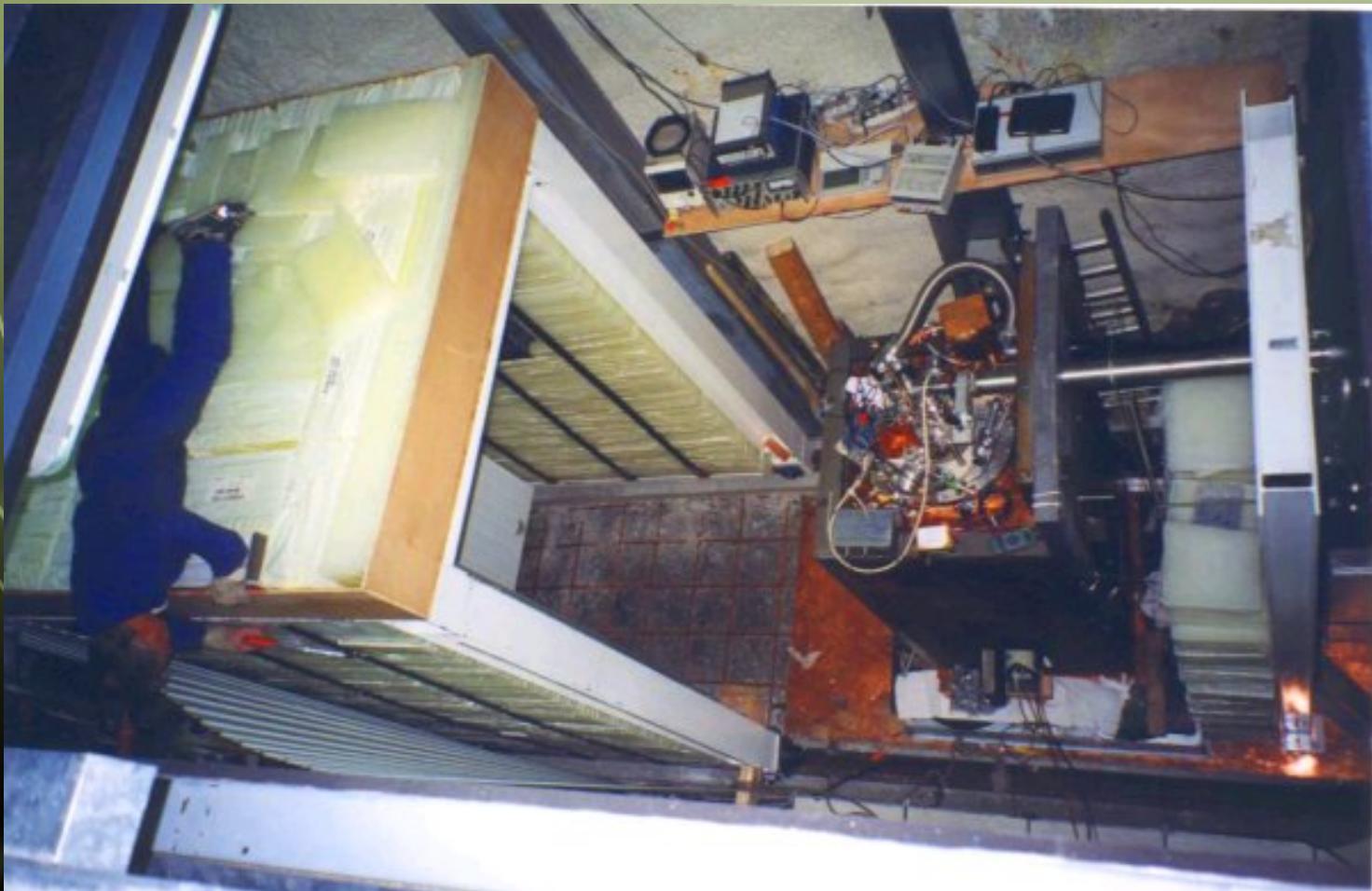
- ⊕ Accélérateurs :
  - ⊕ Le Tevatron - Etats Unis



# *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