



# *La sombre histoire de l'Univers*

Cycle des Conférences grand public  
du CPPM

Julien Laval

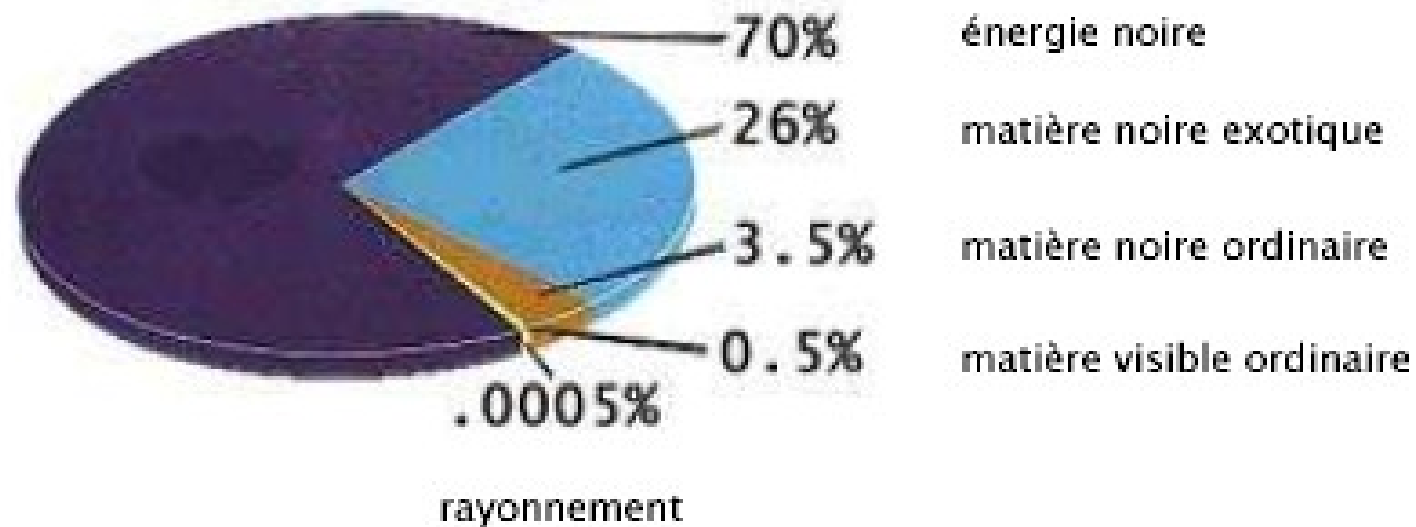
Luminy, 12 mai 2007

# *Vous avez dit sombre ?*

COSMOLOGY MARCHES ON



# *Vous avez dit sombre ?*

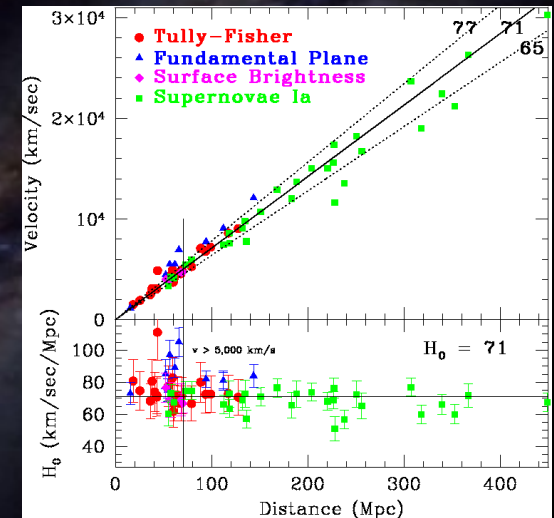
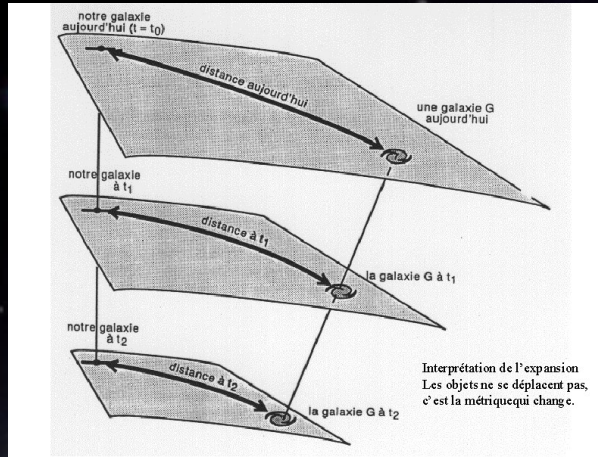


# *Vous avez dit sombre ?*

- La **cosmologie moderne** permet de mesurer de manière très précise le contenu énergétique de l'univers. Le bilan est le suivant :
  - L'univers est **plat** (absence de courbure à grande échelle)
  - Il est dominé à **70%** par une composante caractérisant l'**accélération de son expansion (énergie noire)**
  - Les **30%** restants le sont sous forme **de matière**
  - **90% de cette matière est d'origine inconnue (matière noire)**
- **Les méthodes observationnelles** : sondage des grandes structures, lentilles gravitationnelles, analyse du fond diffus micro-onde, luminosité des supernovae de type 1A
- 90% du contenu énergétique de l'univers se trouve **sous une forme inconnue**, mais le **scénario cosmologique standard** impliquant la **relativité générale** et la **mécanique quantique** est confirmé avec un grand succès.



# Expansion accélérée ?

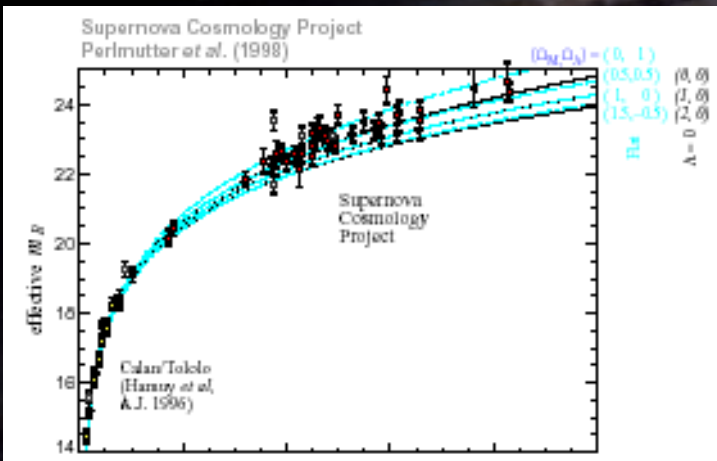


**Loi dite de Hubble** (1929), donnant la vitesse de récession des galaxies :

$$V = H \times D \quad (H \text{ est la dite constante de Hubble})$$

=> L'univers est en **expansion**

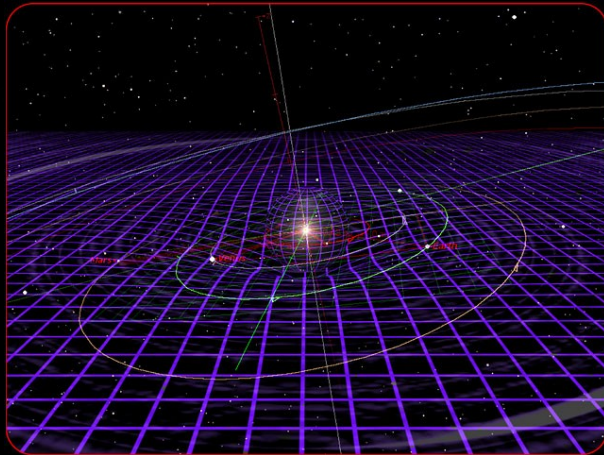
=> Plus une galaxie est éloignée, plus sa vitesse apparente est grande



La mesure de la luminosité des **supernovae de type 1A** en fonction de leur distance donne une indication positive sur **l'accélération de l'expansion** de l'univers.

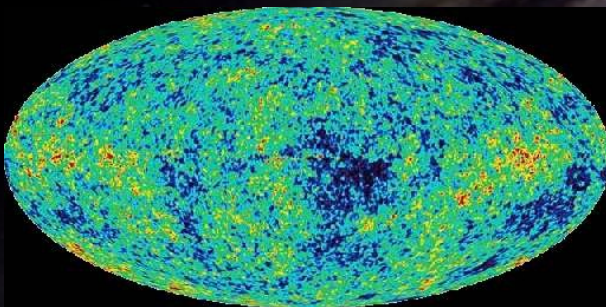
Supernova Cosmology Project (Perlmutter et al, 1998)  
SNLS (2005) => une équipe au laboratoire !

# Univers plat ?

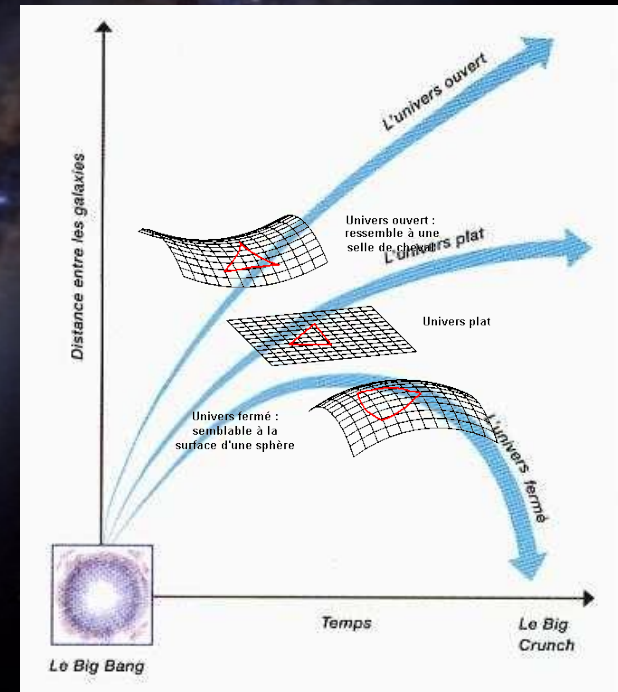


La présence d'une masse peut localement courber l'espace-temps, et donc la trajectoire d'un photon.

Cependant, à l'échelle cosmologique, c'est la densité d'énergie totale qui permet de déterminer la courbure :  
On la mesure quasiment nulle aujourd'hui.

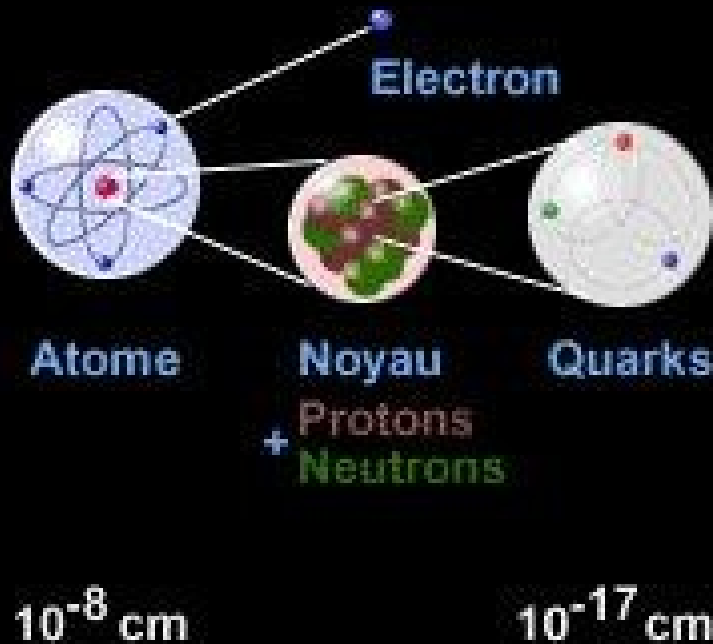


La mission WMAP (2003) a permis de mesurer la courbure avec une relativement bonne précision.  
(animation)





# Intermède : l'origine du fond diffus?



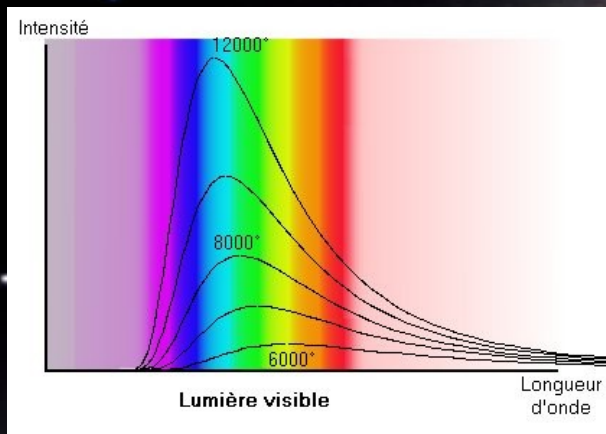
La matière est structurée aux différentes échelles, mais les liaisons peuvent être brisées grâce à de l'énergie (plus l'échelle est petite, plus l'énergie doit être importante).

L'atome le plus simple est l'atome d'hydrogène :  
1 proton + 1 électron lié

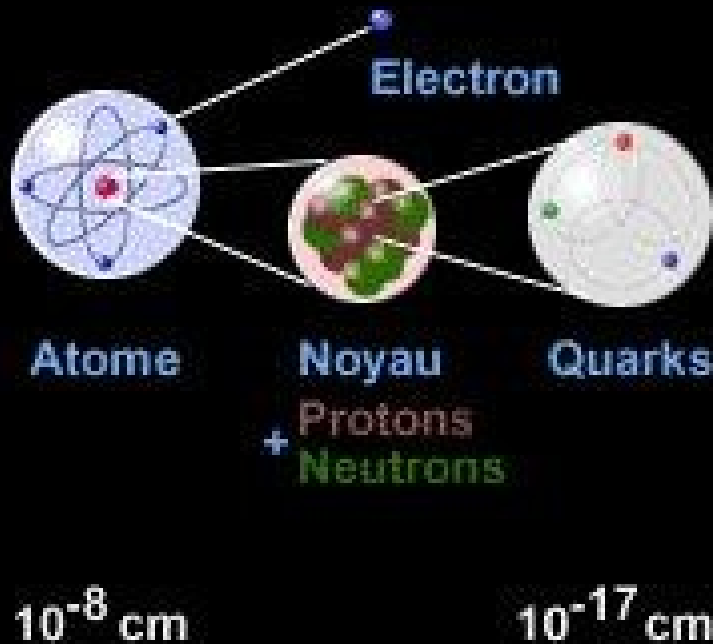
Imaginons un milieu clos que l'on remplit d'hydrogène : on augmente la température du gaz => les particules s'agitent (**cf corps noir**). Si la température (l'énergie) augmente suffisamment, les liaisons entre électrons et protons se brisent, le gaz est ionisé.

Dans l'univers jeune, la température est très élevée => toutes les particules sont dissociées et interagissent entre elles (matière et rayonnement).

Avec l'expansion, il refroidit (l'énergie des photons décroît). Lorsque la température est plus faible que l'énergie de liaison, les atomes se forment, les photons sont libres. L'univers devient transparent à la lumière. (**animation**)



# Intermède : l'origine du fond diffus?



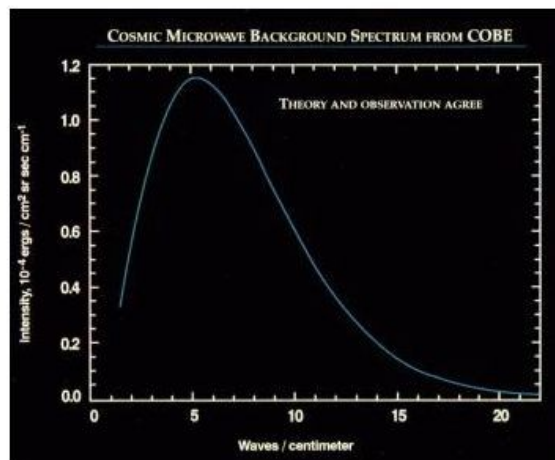
La matière est structurée aux différentes échelles, mais les liaisons peuvent être brisées grâce à de l'énergie (plus l'échelle est petite, plus l'énergie doit être importante).

L'atome le plus simple est l'atome d'hydrogène :  
1 proton + 1 électron lié

Imaginons un milieu clos que l'on remplit d'hydrogène : on augmente la température du gaz => les particules s'agitent (cf corps noir). Si la température (l'énergie) augmente suffisamment, les liaisons entre électrons et protons se brisent, le gaz est ionisé.

Dans l'univers jeune, la température est très élevée => toutes les particules sont dissociées et interagissent entre elles (matière et rayonnement).

Avec l'expansion, il refroidit (l'énergie des photons décroît). Lorsque la température est plus faible que l'énergie de liaison, les atomes se forment, les photons sont libres. L'univers devient transparent à la lumière. (animation)





*30% de matière, mais de quelle sorte ?*

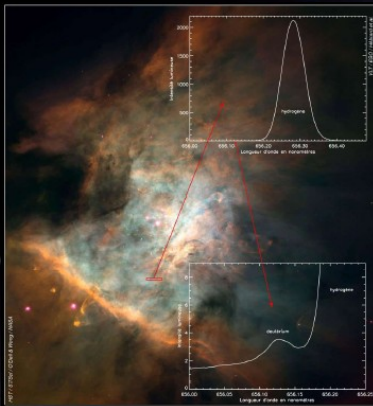
- Matière ordinaire (baryonique) : 13.5%
  - Matière visible : 1.5%
  - Matière noire baryonique : 12%
- Matière d'origine inconnue : 86.5%
  - Matière noire : 86.5%

C'est là le problème de matière noire

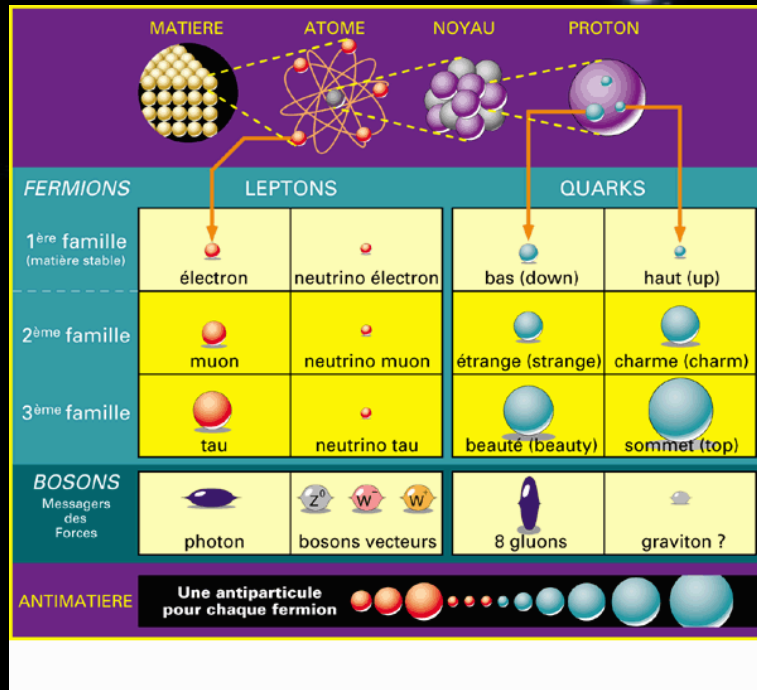
# *La matière ordinaire*



Elle se compose des objets classiques en astronomie (planètes, étoiles, galaxies, amas de galaxies), **de poussière et de gaz** (atomique, moléculaire, ionisé ou neutre). **Elle n'est pas forcément visible** (matière noire baryonique).



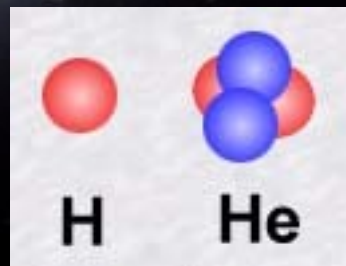
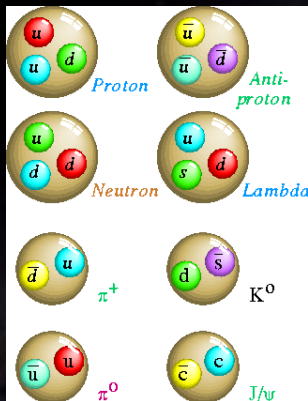
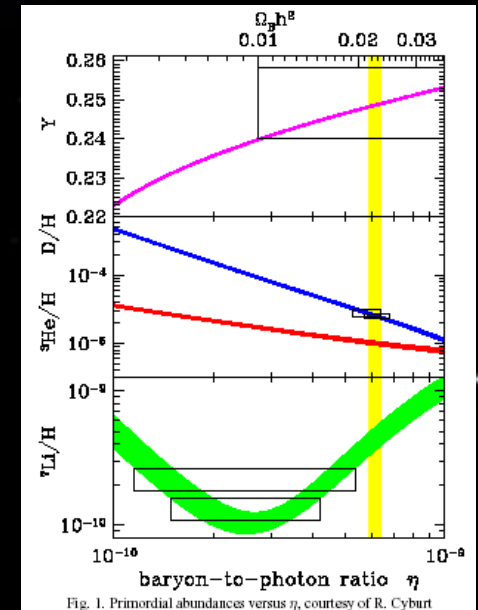
# Comment estimer la quantité totale de matière ordinaire ? (Nucléosynthèse primordiale)



La connaissance des propriétés microscopiques de la matière (particules élémentaires) permet de prédire la **synthèse des éléments légers** (hydrogène, deutérium, hélium, lithium) ainsi que **leur abondance relative**.

Cette abondance est fixée par le rapport des densités de baryons et de photons:  $\eta \approx 10^{-9}$

L'analyse en fréquence du fond diffus est très sensible à  $\eta$ , et les valeurs mesurées sont compatibles avec la théorie



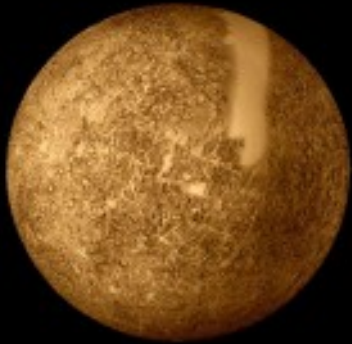


# *Comment mettre en évidence la présence de matière noire ?*

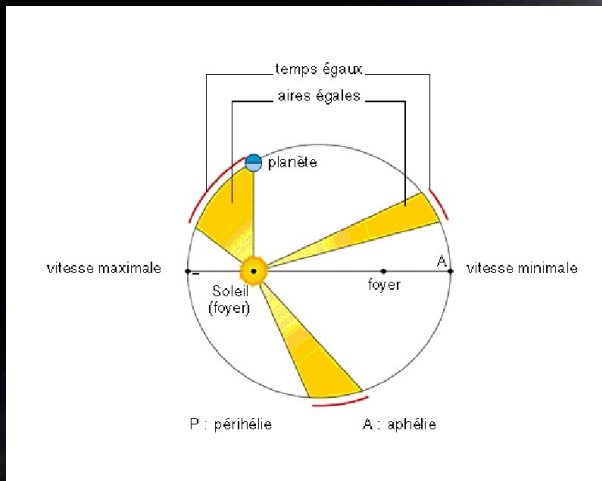
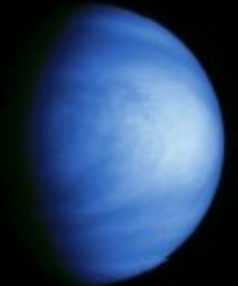
## *Le problème de la masse cachée*

- Rappel sur le mouvement des planètes
- L'échelle des galaxies
- L'échelle des amas de galaxies
- L'échelle cosmologique et la formation des structures

# *Le mouvement des planètes*



Le mouvement des planètes peut être décrit par les lois de Kepler (1609), et plus généralement dans le cadre de la théorie de la gravitation de Newton (1687). La théorie classique donne d'assez bon résultats ...



# *Mécanique newtonienne et masse cachée*

- Une planète décrit en principe une **orbite elliptique contenue dans un plan** dont le soleil est l'un des foyers ...
- Mais la présence d'autres planètes perturbe leurs trajectoires respectives ...
- Ces perturbations peuvent être traitées dans le cadre newtonien



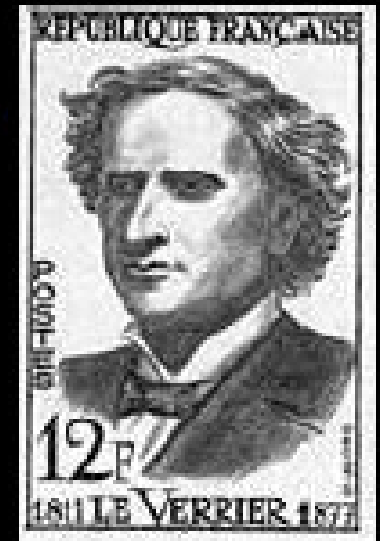


# *L'exemple d'Uranus*



Les écarts observés sont plus importants que les corrections calculées dans le cadre newtonien.

En 1845, **Le Verrier** et **Adam** formulent la conjecture de l'**existence d'une nouvelle planète** pour lever la contradiction apparente entre théorie et observations.



# *L'exemple d'Uranus*



Ils calculent la position associée à cette nouvelle planète.

Elle est découverte, il s'agit de **Neptune** !

=> L'étude du mouvement des corps permet de **mettre en évidence la présence d'objets massifs**, du fait des lois de la gravitation

Paradoxalement, la théorie newtonienne vit ses dernières heures de gloire ...



# *L'exemple de Mercure*

Il s'agit du même problème que pour Uranus :  
Les corrections calculées ne collent pas aux observations

Cependant, la recette précédente (hypothèse de la présence d'un autre corps massif) n'est cette fois pas corroborée par les observations.

En réalité, l'explication viendra avec une théorie plus fondamentale de la gravitation : la **Relativité Générale** ...





# Gravitation et masse manquante



**Le mouvement des corps célestes est sensible à toute forme de masse, qu'elle soit visible ou cachée.**

Il faut toutefois garder en tête qu'un résultat s'interprète dans le cadre de la théorie sous-jacente : **si la théorie n'est pas bonne, l'erreur d'interprétation est presque inévitable ...**

**Pour l'heure, la théorie de la gravitation d'Einstein n'a pas été mise en défaut.**

# *Matière noire à l'échelle des galaxies*



Les galaxies spirales (comme la nôtre) ont leur matière lumineuse (étoiles et gaz) concentrée dans un bulbe centrale et dans un disque aplati.

Extensions radiales typiques :

bulbe : 15000 années lumière

disque : 70000 années lumière

La masse est concentrée dans le bulbe, et la vitesse d'une étoile située à une distance  $r$  du centre doit suivre la loi suivante :

$$v^2(r) = \frac{GM(r)}{r}$$

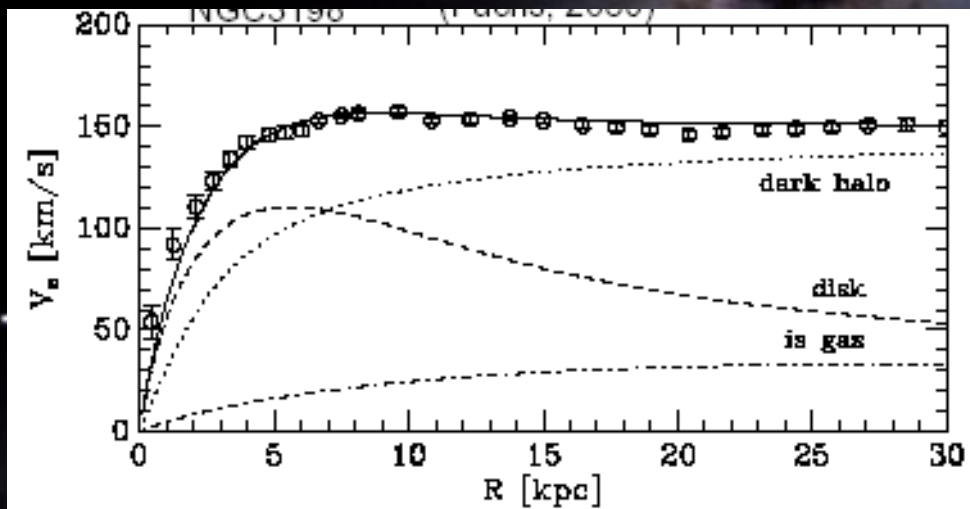
# Matière noire à l'échelle des galaxies



La vitesse de rotation des étoiles, qui devrait décroître rapidement après le bulbe si la masse était due à la matière lumineuse, reste au contraire constante jusqu'à de très grandes distances.

Il existe donc une composante sombre dominant aux grands rayons : une matière sombre distribuée sous la forme d'un halo sphérique permet de reproduire ces courbes de rotation.

Il y a environ 5-10 fois plus de masse noire que de masse lumineuse dans les spirales.



$$v^2(r) = \frac{GM(r)}{r}$$

Études systématisées par Vera Rubin dans les années 1960



# *Matière noire à l'échelle des amas de galaxies*



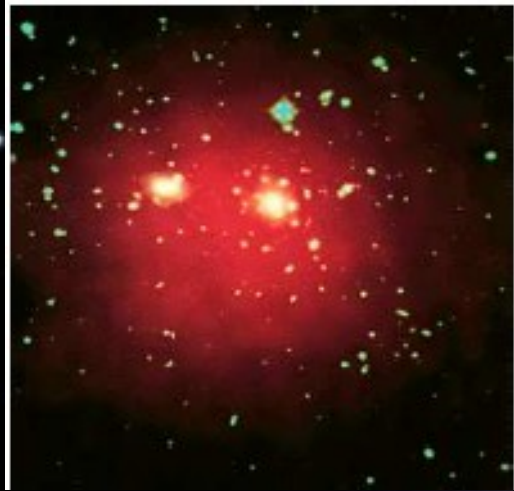
Historiquement, c'est par dans cette classe d'objet qu'une grande quantité de matière noire a été mise en évidence.

En 1933, **Zwicky** observe l'amas de Coma de Bérénice, et applique la méthode dynamique aux galaxies pour déterminer la masse totale de l'amas.

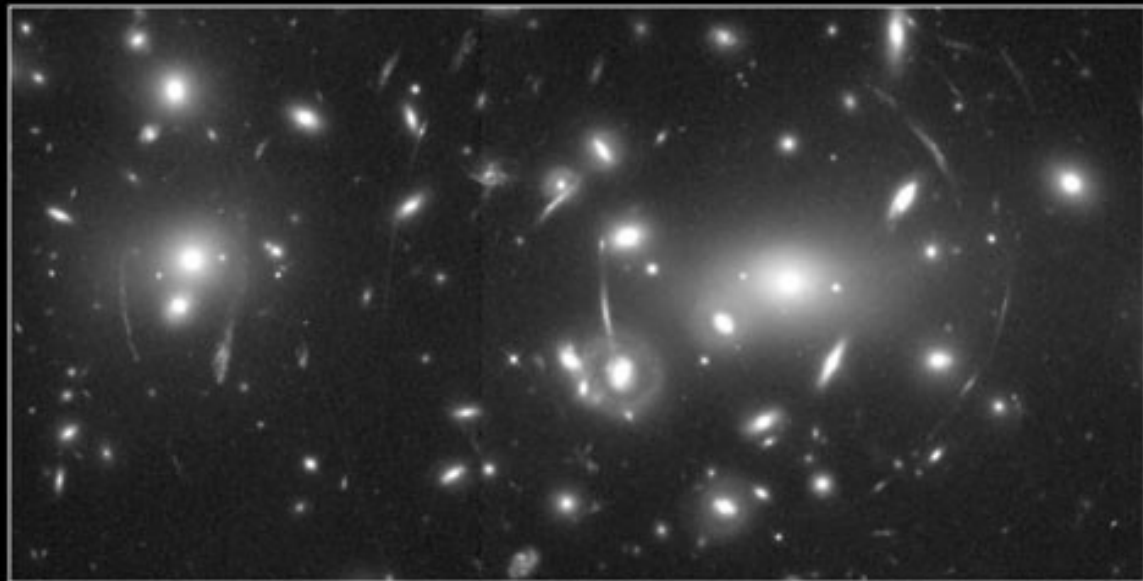


Il met en évidence un écart très important entre la masse estimée à partir de la matière lumineuse, et celle calculée sur les bases de la dynamique.

# *Matière noire à l'échelle des amas de galaxies*



Résultats des méthodes dynamiques confirmés par l'analyse du gaz X, également par l'étude des lentilles gravitationnelles (effets purement relativistes)



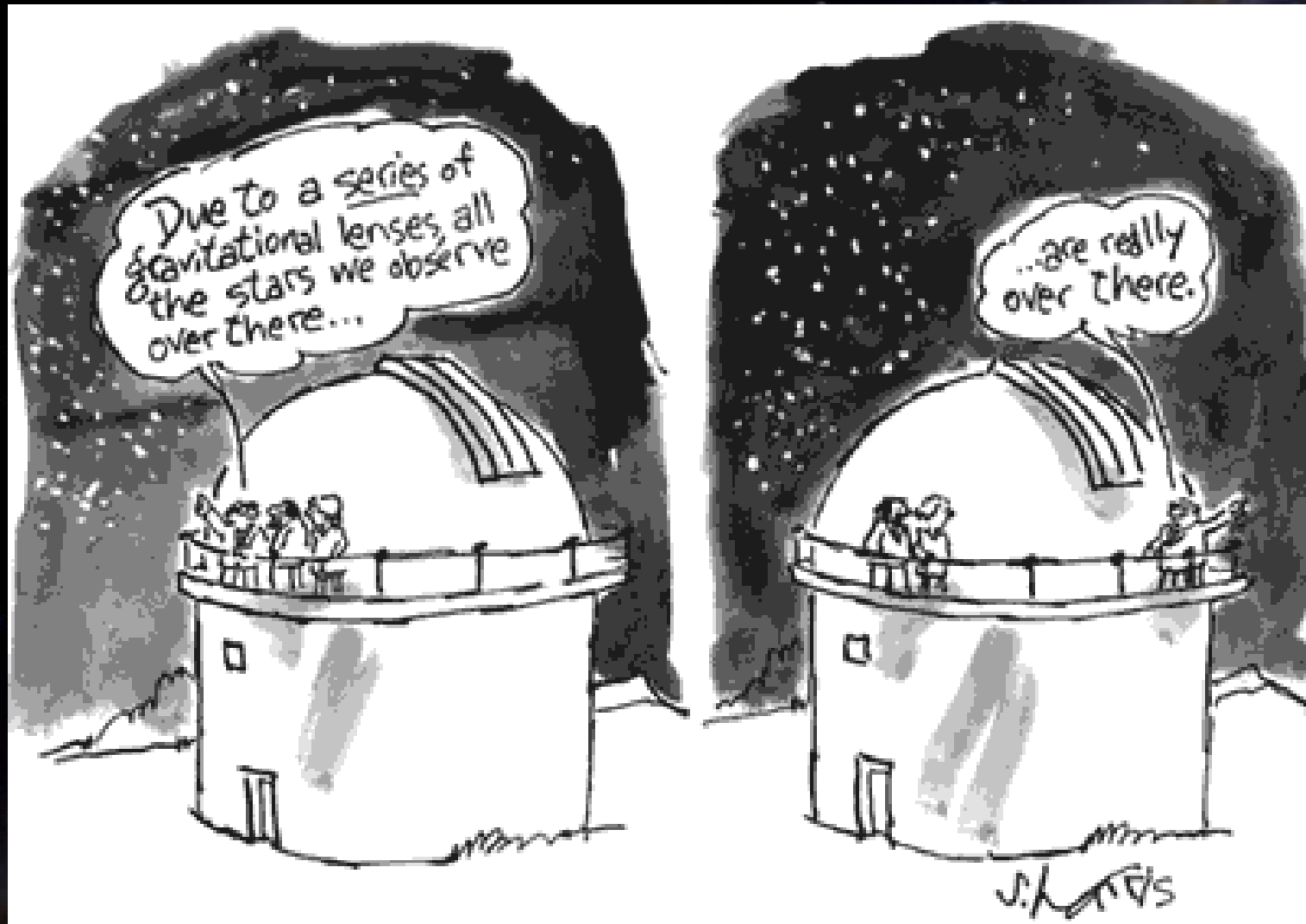
La masse sombre est environ 100 fois supérieure à la masse lumineuse à ces échelles.

**Gravitational Lens in Abell 2218**

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

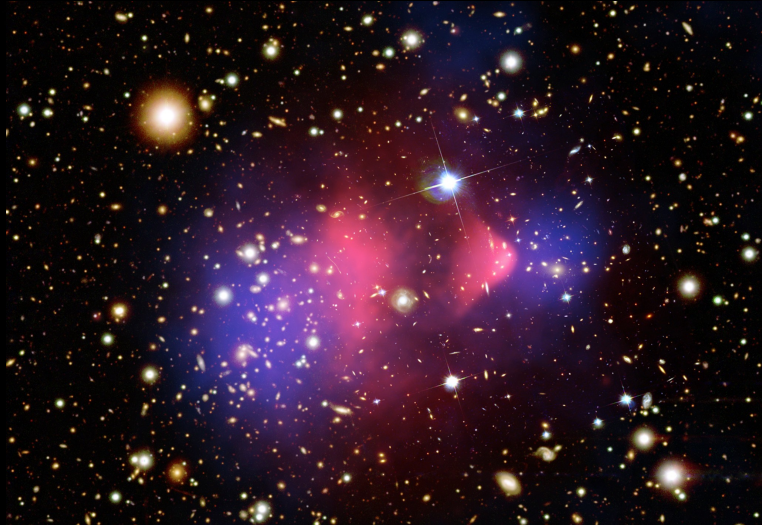
# *Matière noire à l'échelle des amas de galaxies*



L'effet de lentille gravitationnelle en « trompe-l'oeil» .. .



# *Dynamique des collisions d'amas de galaxies*



*Bullet Cluster* (amas de la balle de fusil)  
Le gaz a été freiné lors de la collision, mais pas les galaxies (considérées ici comme des particules-tests du potentiel gravitationnel).  
(réf : Clowe et al, ApJ 648L, 2006)

[http://www.nasa.gov/home/hqnews/2006/aug/HQ\\_06297\\_CHANDRA\\_Dark\\_Matter.html](http://www.nasa.gov/home/hqnews/2006/aug/HQ_06297_CHANDRA_Dark_Matter.html)

## Amas Cl 0024+17

La structure d'anneau résulte de la collision de deux amas, et ne contient aucune forme visible de matière baryonique.  
(réf : Jee et al (arXiv:07052171))



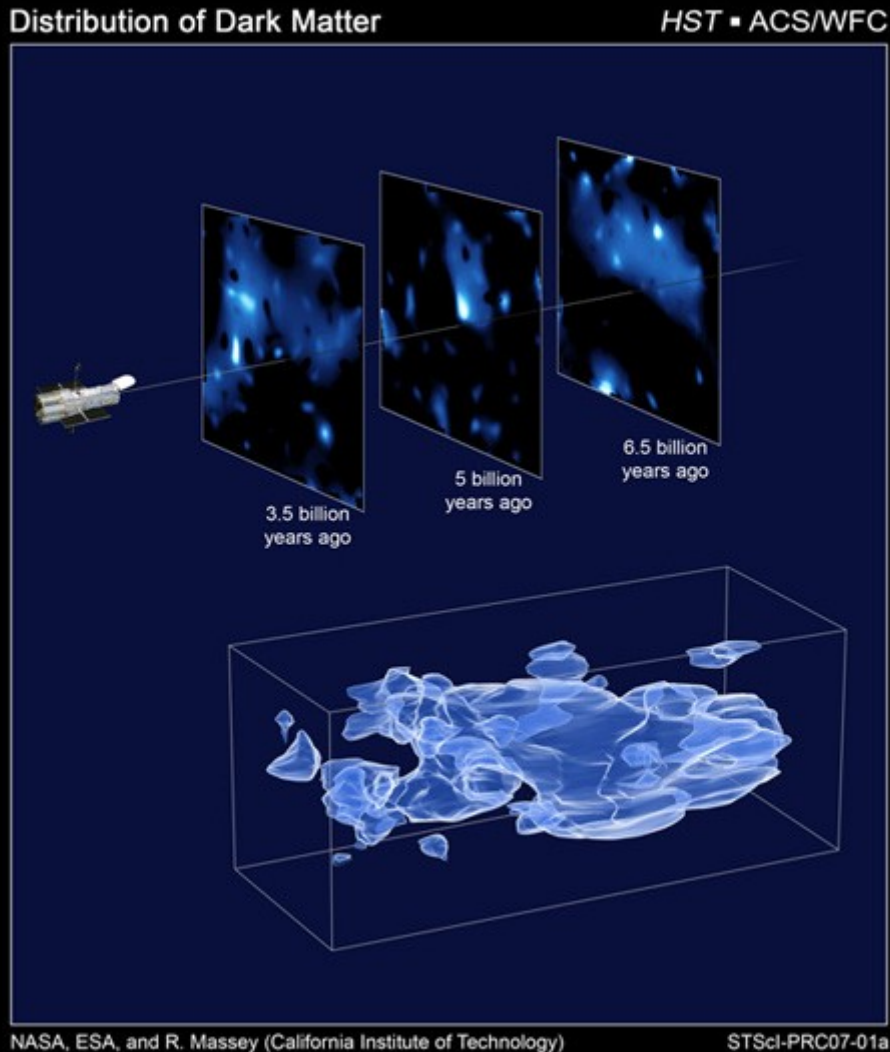
Dark Matter Ring in Galaxy Cluster Cl 0024+17 (ZwCl 0024+1652)  
Hubble Space Telescope - ACS/WFC

NASA, ESA, and M. J. Jee (Johns Hopkins University)

STScI-PRC07-17a

[http://www.nasa.gov/home/hqnews/2007/may/HQ\\_07114\\_Hubble\\_Dark\\_Matter\\_Rings.html](http://www.nasa.gov/home/hqnews/2007/may/HQ_07114_Hubble_Dark_Matter_Rings.html)

# *Distribution de matière noire en 3D*



Carte en 3-dimensions réalisée à partir des observations du télescope spatial Hubble combinées avec celle de grands télescopes au sol (VLT, JSHT, VLA) et celles du satellite XMM-Newton, dans le cadre du programme COSMOS.

# *Résultat des courses*

- La matière noire se manifeste à toutes les échelles : des galaxies jusqu'aux échelles cosmologiques (super-amas, fond diffus)
- « Noire » : interagissant **très** faiblement avec la matière ordinaire, **au moins gravitationnellement** (donc massive)
- La matière baryonique ne semble pas suffire, et ne représenterait que 15% de la masse totale ...



## *Résultat des courses*

- La matière noire se manifeste à toutes les échelles : des galaxies jusqu'aux échelles cosmologiques (super-amas, fond diffus)
- «Noir e» : interagissant très faiblement avec la matière ordinaire, au moins gravitationnellement (donc massive)
- La matière baryonique ne semble pas suffire, et ne représenterait que 15% de la masse totale ...

**Bon alors, d'où vient-elle cette matière sombre ?  
Aurions-nous comme pour Mercure mis trop de  
confiance dans notre théorie de la gravitation ?**

# *Vers une nouvelle théorie de la gravitation ?*



De nouvelles théories de la gravité ont été étudiées, mais rien n'a été très concluant jusqu'à présent.

On parle de «gravité modifiée d'échelle».  
(MOND, Beckenstein et al)

Le principal effet dans la limite non-relativiste est que la constante de gravitation de Newton n'est plus constante.

Problème sérieux avec «l'amas de la balle de fusil » ....

# *Et dans le modèle standard des particules élémentaires?*

Il y a bien les **neutrinos**, depuis qu'on sait qu'ils ont une masse, mais ils sont **trop légers** pour faire une «bonne» matière noire ...

... bonne ???

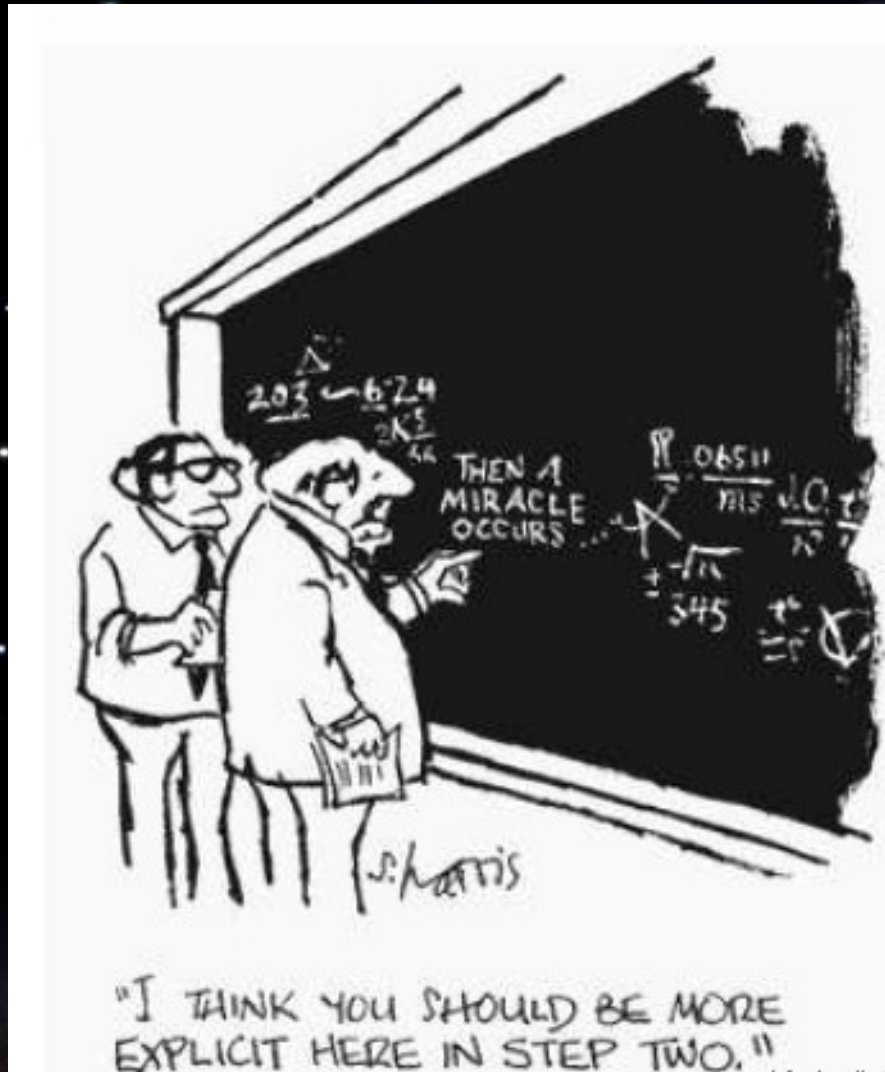
Oui, on ne sait pas de quoi elle est faite, mais certaines propriétés sont essentielles pour comprendre comment les galaxies se sont formées ... Car sans elle, pas de galaxies !

Elle doit être **suffisamment froide dans l'univers primordial** !  
(non-relativiste)

(animation) (animation CDM)



# De nouvelles particules ?



Axions

Supersymétrie

Dimensions supplémentaires

**=> des candidats  
«exotiques» existent !!!**

# Comment détecter la matière noire, et connaître sa vraie nature ?

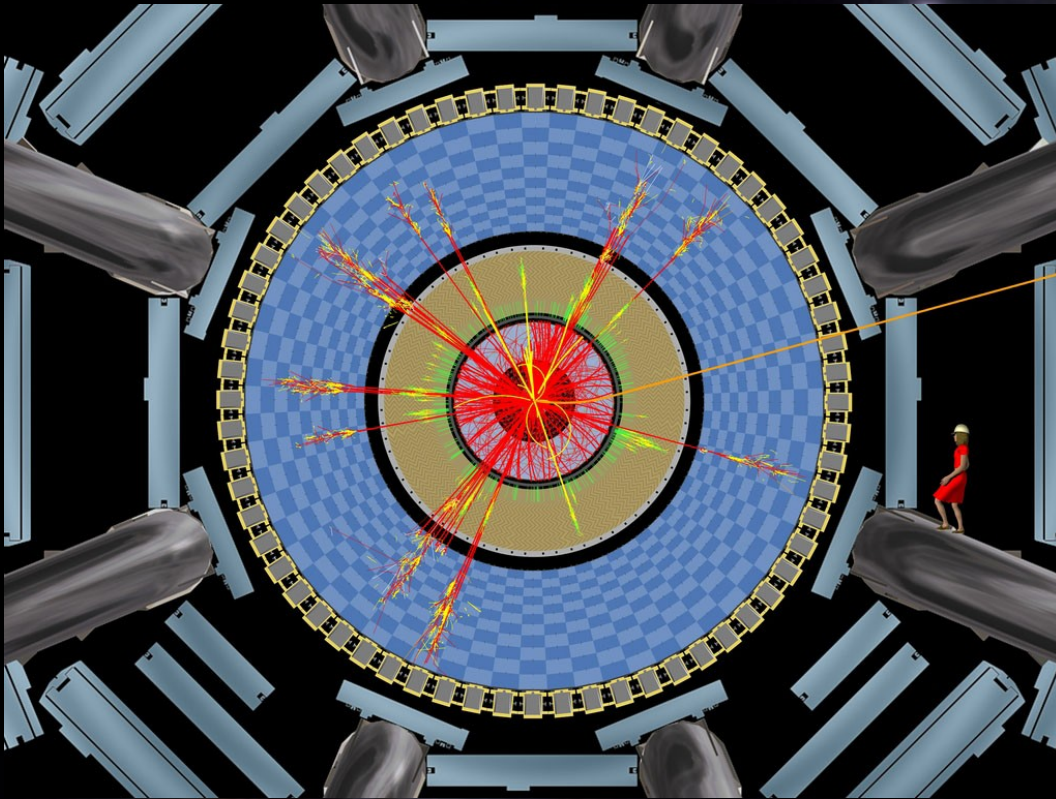
On peut essayer de **la produire dans des accélérateurs de particules**

On peut utiliser des **détecteurs ultra-sensibles** : **détection directe**

On peut essayer de **détecter ses produits d'annihilation** (si elle s'annihile : c'est souvent le cas des candidats exotiques) : on parle de **détection indirecte**



# *Les accélérateurs*



L'expérience ATLAS au LHC

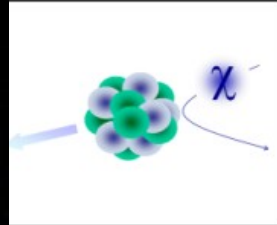
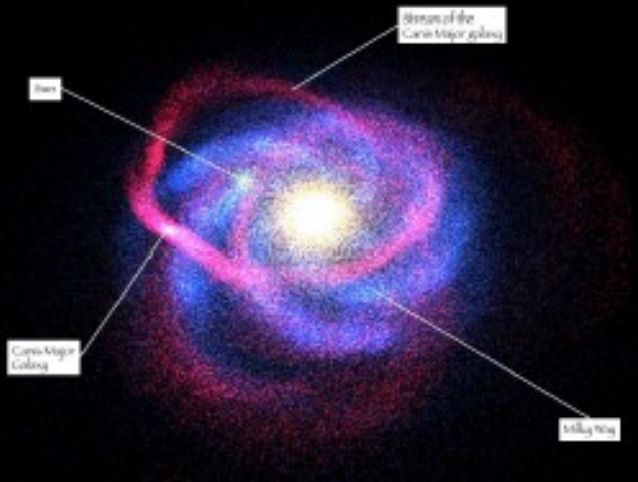
Le LHC (Large Hadron Collider) va produire des collisions de protons à des énergies colossales (environ 14 TeV).

Si les théories au-delà du modèle standard ont les effets attendus, de nouvelles particules devraient être observées.

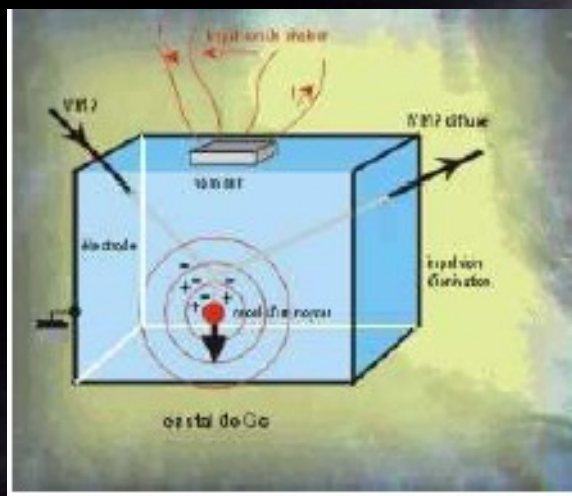
Démarrage début 2008 !



# La détection directe



Si la galaxie est remplie de matière noire, alors il s'agit d'une nouvelle forme d'éther : la Terre étant en mouvement, il en résulte un «vent de matière noire».



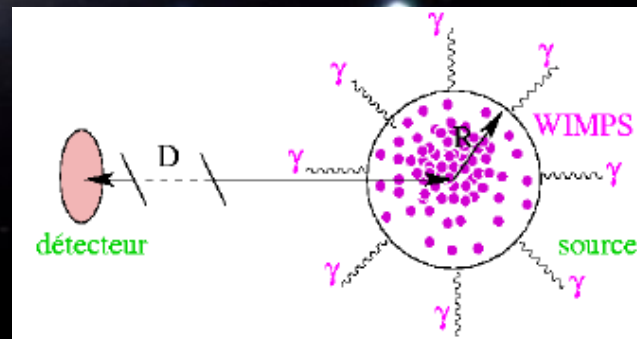
Si les particules de matière noire interagissent faiblement avec la matière ordinaire, elles peuvent déposer de l'énergie sur des détecteurs ultra-sensibles enfouis dans de profonds souterrains.  
Ex : Edelweiss (près de Modane)

# *La détection indirecte*

La matière noire est probablement **concentrée dans le centre des galaxies**, ou gravitationnellement **piégées autour d'objets massifs**.

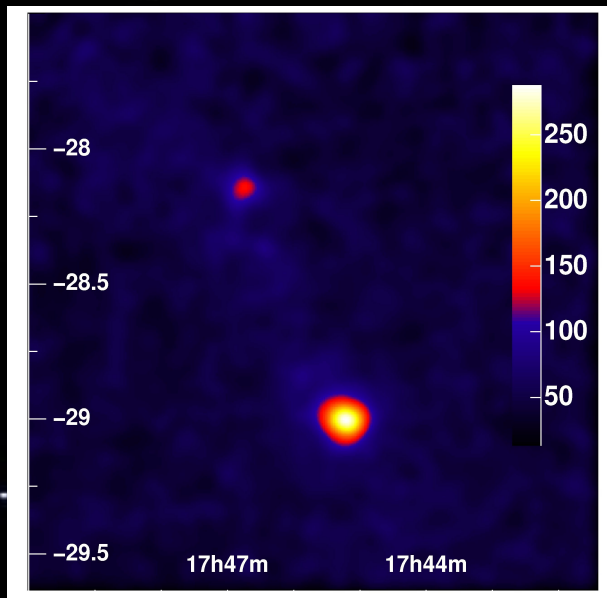
Si elle s'y **annihile**, elle peut être une **source de rayonnement cosmique** :

- **photons gamma** (photons de haute énergie, keV-TeV)
- **neutrinos**
- **particules chargés** : protons, électrons, et leurs anti-particules (antiprotons, positrons)



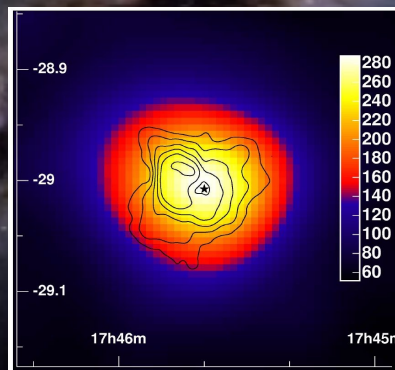


# La détection indirecte : gamma au sol

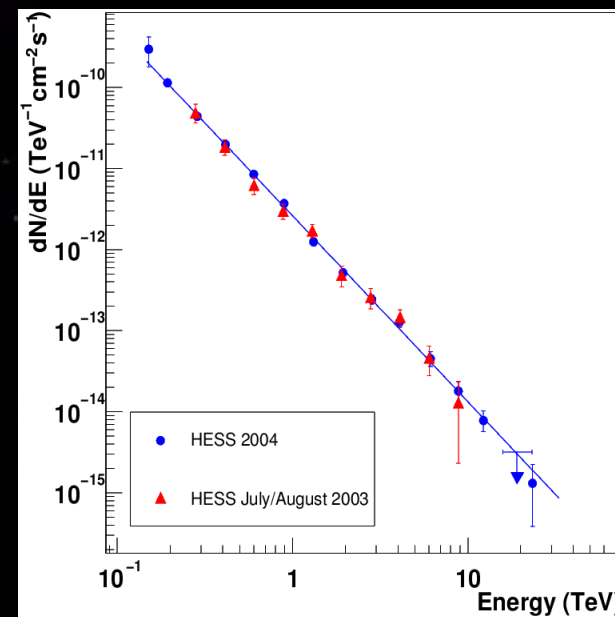


**HESS** : télescope franco-allemand construit en Namibie

Détection du Centre Galactique au TeV !



Le signal n'est pas compatible avec la matière noire ...





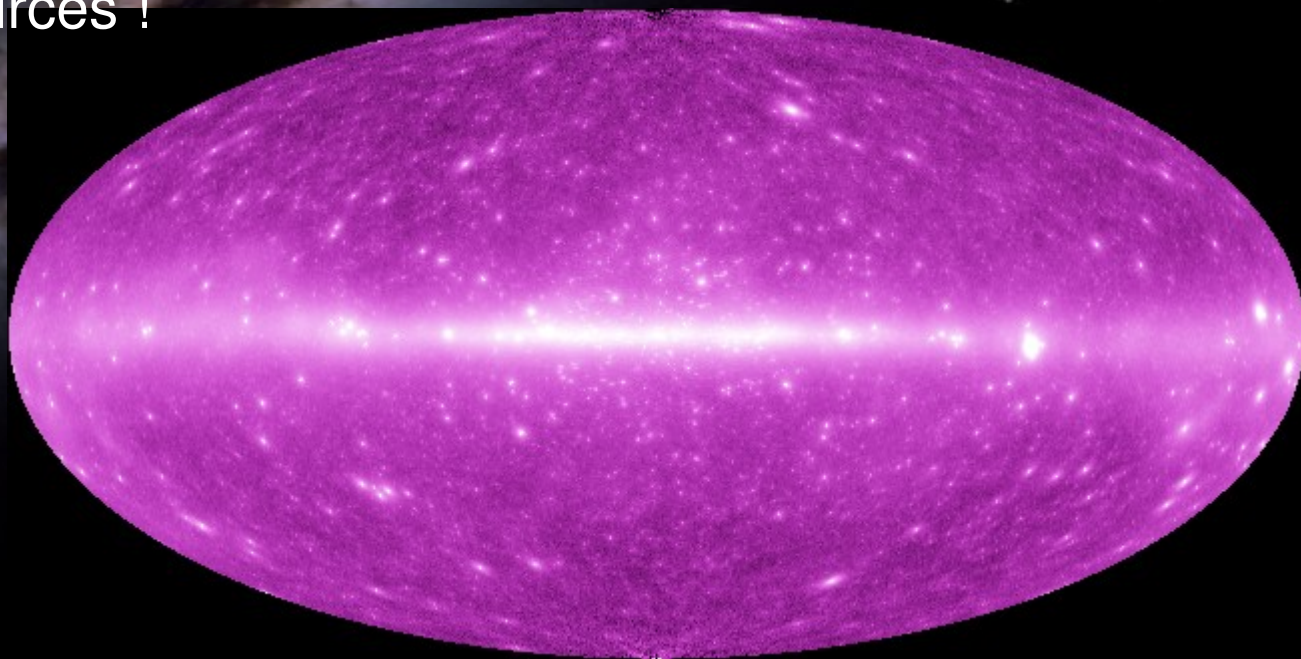
# *La détection indirecte : gamma depuis l'espace*

Après EGRET lancé dans les années 90, et qui a permis la découverte de nombreuses sources, GLAST a une sensibilité 100 fois meilleurs. (Collaboration internationale, participation du CNRS-IN2P3)

L'extrapolation des découvertes d'EGRET laisse envisager le recensement de plus de 10000 sources !



Lancement prévu  
fin 2007.



# *La détection indirecte : neutrinos*

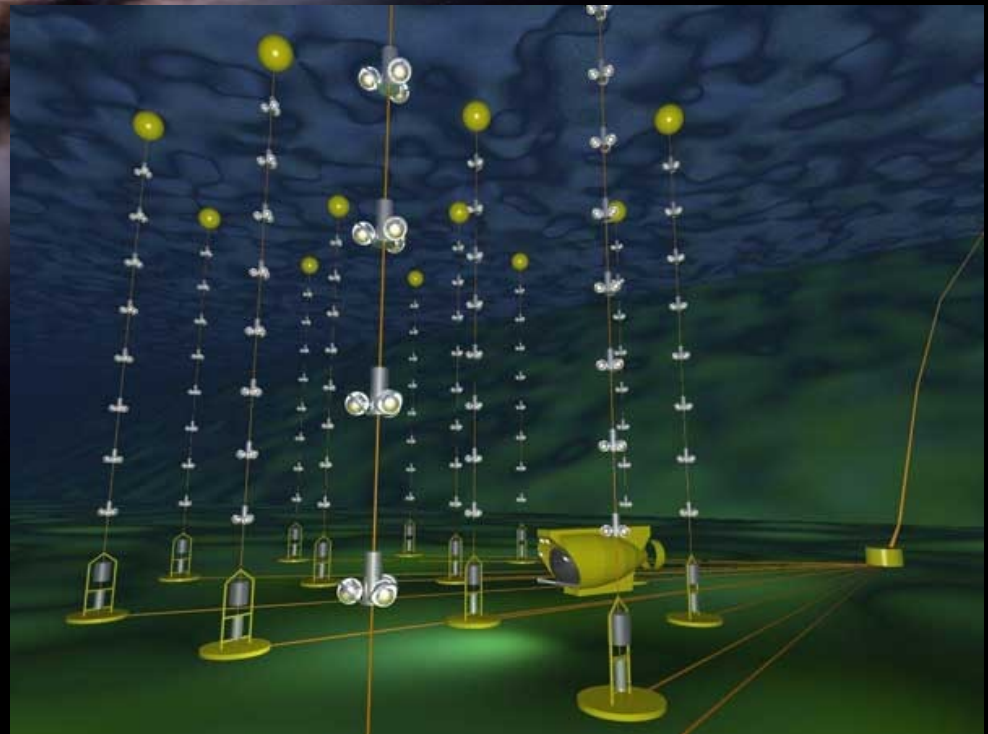


Nécessité de volumes colossaux pour la détection de neutrinos : glace polaire, et fonds des mers

**Amanda / IceCube** (pôle sud)  
opérationnel depuis 1998, en évolution vers  
1 km<sup>3</sup> d'ici 2010

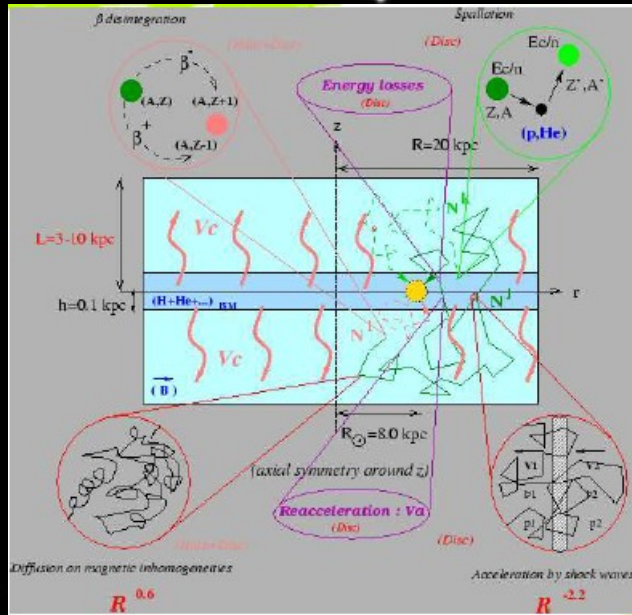
**Antares / km<sup>3</sup>** (Méditerranée)  
opérationnel depuis 2006  
complet fin 2007 (phase  
prospective pour km<sup>3</sup>)  
=> Projet majeur au CPPM

Couverture du ciel  
complémentaire des expériences





# La détection indirecte : rayons cosmiques

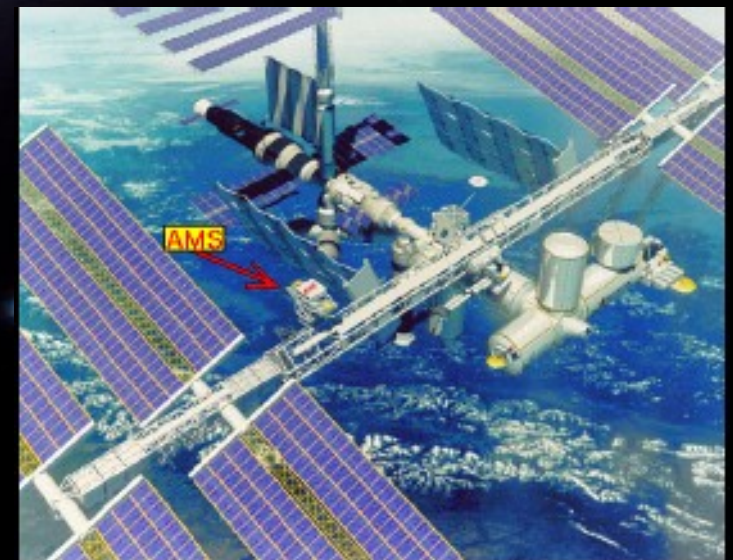


Les rayons cosmiques chargés sont déviés par les champs magnétiques, et sont confinés dans la galaxie aux énergies associées à la matière noire.

On n'est sensible qu'aux rayons cosmiques produit par l'annihilation dans la galaxie.

Excès mesuré par **HEAT** (1997) dans le spectre des positrons.

Nouveaux résultats avec **PAMELA** (lancé en juin 2006) et **AMS** (prévu pour 2008).





# *Conclusions*

- Les origines de la matière noire et de l'énergie noire restent pour l'heure un mystère
- De nombreuses expériences vont très bientôt apporter des réponses cruciales :
  - LHC : les particules prédites par les théories au-delà du modèle standard vont-elles être observées ?
  - Si oui, résoudre-elles la question de la matière noire, et seront-elles corroborées par d'autres observations ?
- La complémentarité des recherches est nécessaire

# *Laboratoires impliqués localement*

- **CPPM** (Luminy)
  - Énergie noire : groupe Renoir
  - Matière noire : groupe Antares
  - Recherche de nouvelles particules : LHC
- **CPT** (Luminy)
  - Énergie noire et matière noire : groupe de cosmologie théorique
  - Théories au-delà du modèle standard
- **LAM** (Le Verrier, Les Olives)
  - Énergie noire et matière noire : groupes de cosmologie observationnelle (lentilles gravitationnelles, sondages, supernovae) et de dynamique des galaxies (distribution de matière noire et baryonique)

# Compléments

Dossier matière noire très complet sur le site de mon collaborateur Richard Taillet (enseignant-chercheur au LAPTH – Annecy) -- remerciements à ce dernier pour la *matière* documentaire fournie:

<http://wwwlap.in2p3.fr/~taillet/>

Dessins de Ted Harris

Sites web de l'IN2P3 et de la NASA

Quelques clichés pris sur Astronomy picture of the day.



# *De nouvelles particules ?*

Pourquoi ?

Malgré ses très grands succès expérimentaux (en physique des particules, astrophysique et cosmologie), **le modèle standard souffre quelques défauts importants.**

Plusieurs **ingrédients** sont ajoutés de manière **ad hoc**, et n'ont **pas l'origine fondamentale** seyant aux théories les plus abouties (entre autres, le secteur dit de Higgs)

Il serait en réalité la théorie effective d'une théorie plus fondamentale dans laquelle les interactions pourraient être unifiées, et qui incluerait également la gravitation (?).

**Ces théories prédisent l'existence de nouvelles particules, ayant parfois les bonnes propriétés pour être la matière noire.**

# *Supersymétrie et/ou dimensions supplémentaires*

Deux types distincts de particules dans le Modèle standard :  
fermions (matière) et bosons (interactions)

**Supersymétrie** : nouvelle symétrie (aujourd'hui brisée) entre bosons et fermions

=> on ajoute un **superpartenaire** à chaque particule.

=> sous certaines conditions, **le plus léger peut être stable**

**Dimensions supplémentaires** : on ajoute des dimensions d'espace, et l'on autorise une ou plusieurs particules à ressentir leur présence ... de nouveaux **modes stables d'oscillation** peuvent apparaître et donc de nouvelles particules (lien avec la théorie des cordes).

**Des candidats à la matière noire apparaissent assez naturellement !**