

L'énigme de la matière sombre



Physique des deux infinis
Faculté des Sciences de Luminy-Marseille
26 août 2009

Julien Lavallo
Département de Physique Théorique
de l'Université de Turin & INFN

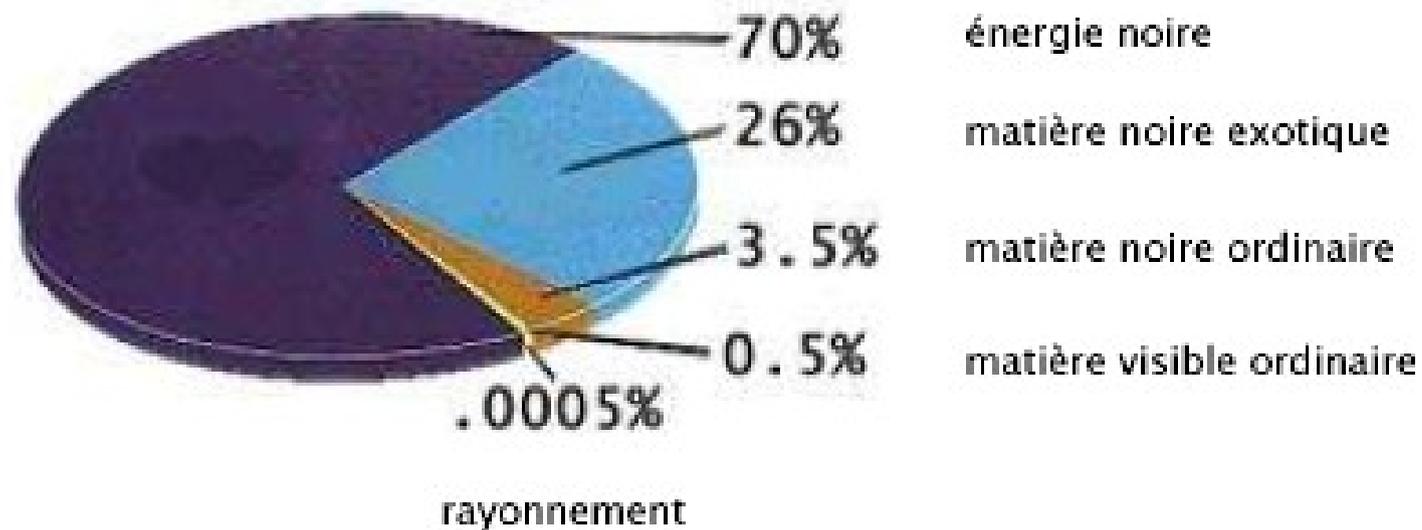


Vous avez dit sombre ?

COSMOLOGY MARCHES ON



Vous avez dit sombre ?



30% de matière, mais de quelle nature ?

- 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

Plan de l'exposé

- Historique du problème de la matière sombre (ses effets gravitationnels)
- Des vertus de la matière sombre
- Ce que la matière sombre n'est pas
- Pistes théoriques et méthodes observationnelles
- Conclusions

Comment mettre en évidence la présence de matière noire ?

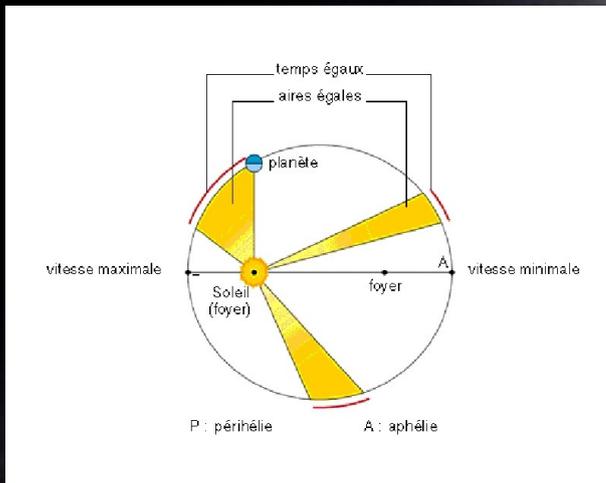
Le problème de la masse cachée

- 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'excellents résultats à l'échelle locale ...



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

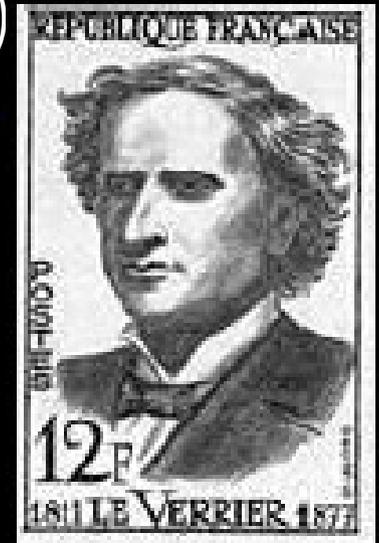


L'exemple d'Uranus



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

En 1846, **Le Verrier** (et **Adams**) formule la conjecture de l'**existence d'une nouvelle planète** pour lever la contradiction apparente entre théorie et observations.



ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN.

No. 582.

Recherches sur les mouvements d'Uranus par U. J. Le Verrier. (Beschluss).



1690,98	$\Delta = -182,6 + (1)$	-1,913 P	+0,904 Q	+1,651 R	-1,642 S
1712,25	$\Delta = + 21,7 + (2)$	-0,846	-0,349	-0,028	+0,224
1715,23	$\Delta = + 0,0$	+0,000	+0,000	+0,000	-0,000
1747,7	$\Delta = -263,3 + (3)$	-2,745	+3,351	+1,958	-3,565
1754,7	$\Delta = -246,3 + (4)$	-2,364	+2,721	+1,862	-3,221
1761,7	$\Delta = -190,3 + (5)$	-1,715	+1,668	+1,470	-2,423
1768,7	$\Delta = -105,6 + (6)$	-0,888	+0,354	+0,823	-1,289
1775,7	$\Delta = 0,0$	+0,000	-0,000	+0,000	+0,000
1782,7	$\Delta = +100,9 + (7)$	+0,774	-2,100	-0,854	+1,180
1789,7	$\Delta = +166,3 + (8)$	+1,221	-2,605	-1,520	+1,905
1796,7	$\Delta = +175,4 + (9)$	+1,193	-2,308	-1,790	+1,906
1803,7	$\Delta = +109,5 + (10)$	+0,708	-1,299	-1,573	+1,163
1810,7	$\Delta = 0,0$	+0,000	+0,000	+0,000	+0,000
1817,7	$\Delta = -108,9 + (11)$	-0,642	+1,103	-0,326	-1,136
1824,7	$\Delta = -182,7 + (12)$	-1,005	+1,690	+0,209	-1,896
1831,7	$\Delta = -188,8 + (13)$	-1,008	+1,662	+0,469	-2,123
1838,7	$\Delta = -125,0 + (14)$	-0,656	+1,061	+0,399	-1,804
1845,7	$\Delta = 0,0$	+0,000	+0,000	+0,000	+0,000

mais telle n'est pas la marche que j'ai suivie. J'ai démontré si je ne me trompe, qu'il y a incompatibilité formelle entre les observations d'Uranus et l'hypothèse que cette planète ne serait soumise qu'aux actions du soleil et des autres planètes agissant conformément au principe de la gravitation universelle. On ne parviendra jamais, dans cette hypothèse, à représenter les mouvements observés.

Les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus peuvent-elles être expliquées par l'action d'une nouvelle planète? En quel lieu du ciel cet astre devrait-il être situé?

L'exemple d'Uranus

Il calcule la position associée à cette nouvelle planète.

Elle est découverte par Galle, 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

Méthode d'analyse de Le Verrier

- Interprétation des anomalies dans un cadre théorique existant et déjà validé
- Validation observationnelle des conséquences induites, ou non
- Si non, remise en cause du cadre théorique

Paradoxalement, la théorie newtonienne vit ses dernières heures comme théorie de La Gravitation ...



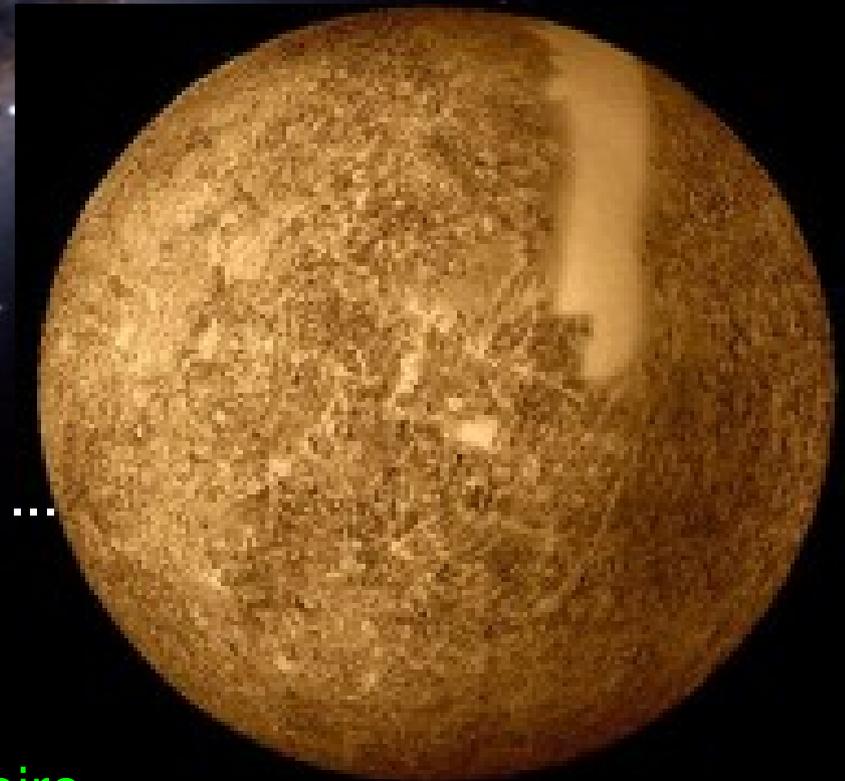
L'exemple de Mercure

Il s'agit du même problème que pour Uranus :
Les corrections calculées ne collent pas aux observations
(précession du périhélie autour du soleil)

Cependant, la recette précédente
(hypothèse de la présence d'un
autre corps massif, **Vulcain**) 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 (1917)** ...

De nouveaux effets non-cinématiques
dûs à la présence de masse (ou énergie)
sont prédits, dont la courbure de la trajectoire
de la lumière au voisinage d'un champ de gravitation ...



Résumé : Gravitation et masse manquante



Le mouvement des corps célestes est sensible à toute forme de masse, qu'elle soit visible ou cachée (déjà valide dans le cadre newtonien).

La présence d'une masse invisible se traduit par celle d'un champ gravitationnel qui peut induire d'autres signatures (formation de structures, déflexion de la lumière, etc.).

Se souvenir de la méthode Le Verrier : une « bonne » théorie est prédictive et falsifiable ...

Pour l'heure, la théorie de la gravitation d'Einstein n'a pas été mise en défaut d'un point de vue formel.

Matière sombre à l'échelle des galaxies

Densité locale de matière plus importante que son contenu lumineux ne le suggère (Oort, 1927)



BULLETIN OF THE ASTRONOMICAL INSTITUTES
OF THE NETHERLANDS.

1932 August 17

Volume VI.

No. 238.

The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems, by *J. H. Oort*.

11. *The amount of dark matter.*

From the results found for the decrease of $K(z)$ with z we may derive an approximate value of the total density of matter, Δ , in the neighbourhood of the sun. Let us suppose that we are situated inside

La densité de matière sombre n'est pas dominante dans le voisinage solaire, et ne constitue qu'environ 10% du total (cf. Catena & Ullio, arXiv:0907.0018)

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

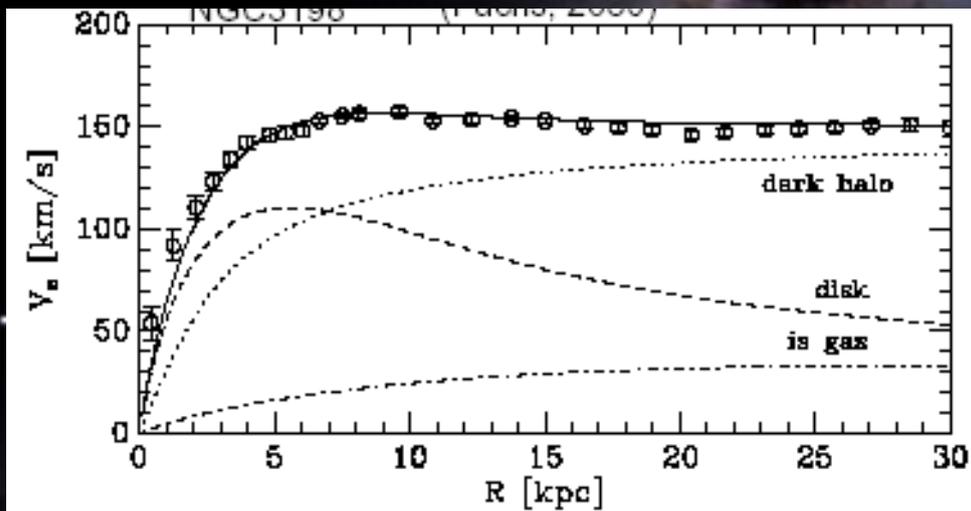
La masse est concentrée dans le bulbe, et la vitesse d'une étoile située à une distance r du centre doit suivre la loi suivante (théorème du viriel) :

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

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. (Le théorème du viriel est très utile dans ce cadre).

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 70's



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 véritablement été mise en évidence.

En 1933, **Zwicky** observe l'amas de Coma de Bérénice, et est le premier à appliquer le théorème du viriel 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.

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME 86

OCTOBER 1937

NUMBER 3

ON THE MASSES OF NEBULAE AND OF CLUSTERS OF NEBULAE

F. ZWICKY

In sections iii, iv, and v three new methods for the determination of nebular masses are discussed, each of which makes use of a different fundamental principle of physics.

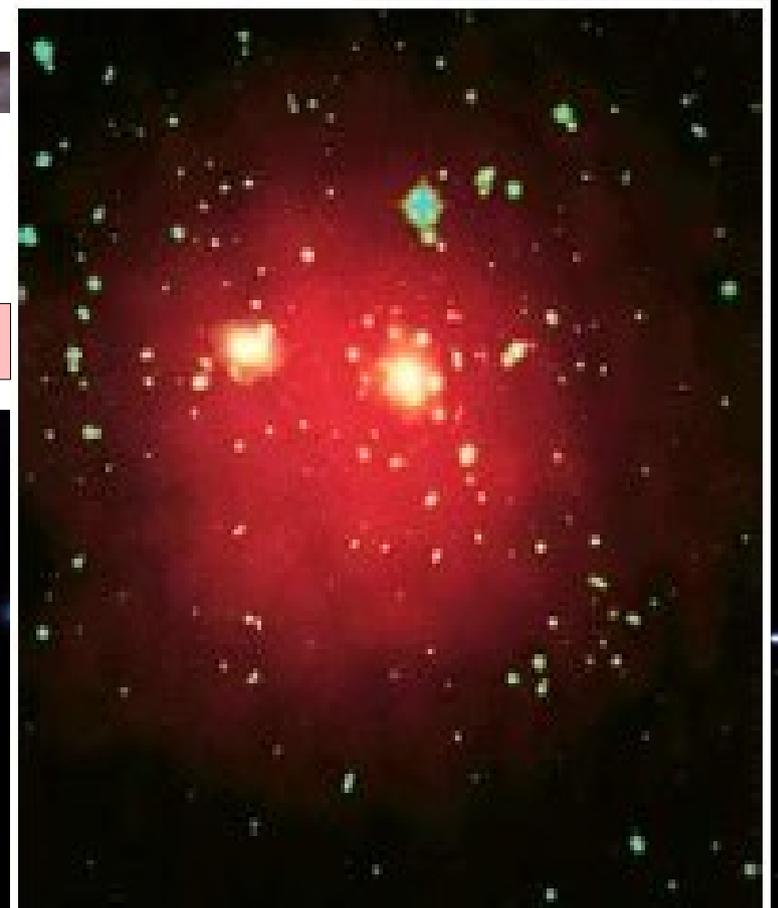
Method iii is based on the *virial theorem* of classical mechanics. The application of this theorem to the Coma cluster leads to a minimum value $\bar{M} = 4.5 \times 10^{10} M_{\odot}$ for the average mass of its member nebulae.

Method iv calls for the observation among nebulae of certain *gravitational lens* effects.

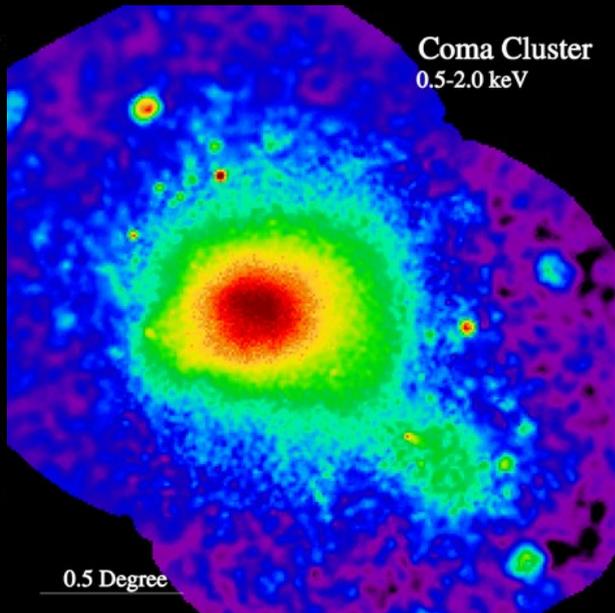
1. According to the mass-luminosity relation, the conversion factor from absolute luminosity to mass is different for different types of stars. The same holds true for any kind of luminous matter. In order to determine the conversion factor for a nebula as a whole, we must know, therefore, in what proportions all the possible luminous components are represented in this nebula.

2. We must know how much dark matter is incorporated in nebulae in the form of cool and cold stars, macroscopic and microscopic solid bodies, and gases.

3. Finally, we must know to what extent the apparent luminosity of a given nebula is diminished by the internal absorption of radiation because of the presence of dark matter.



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)



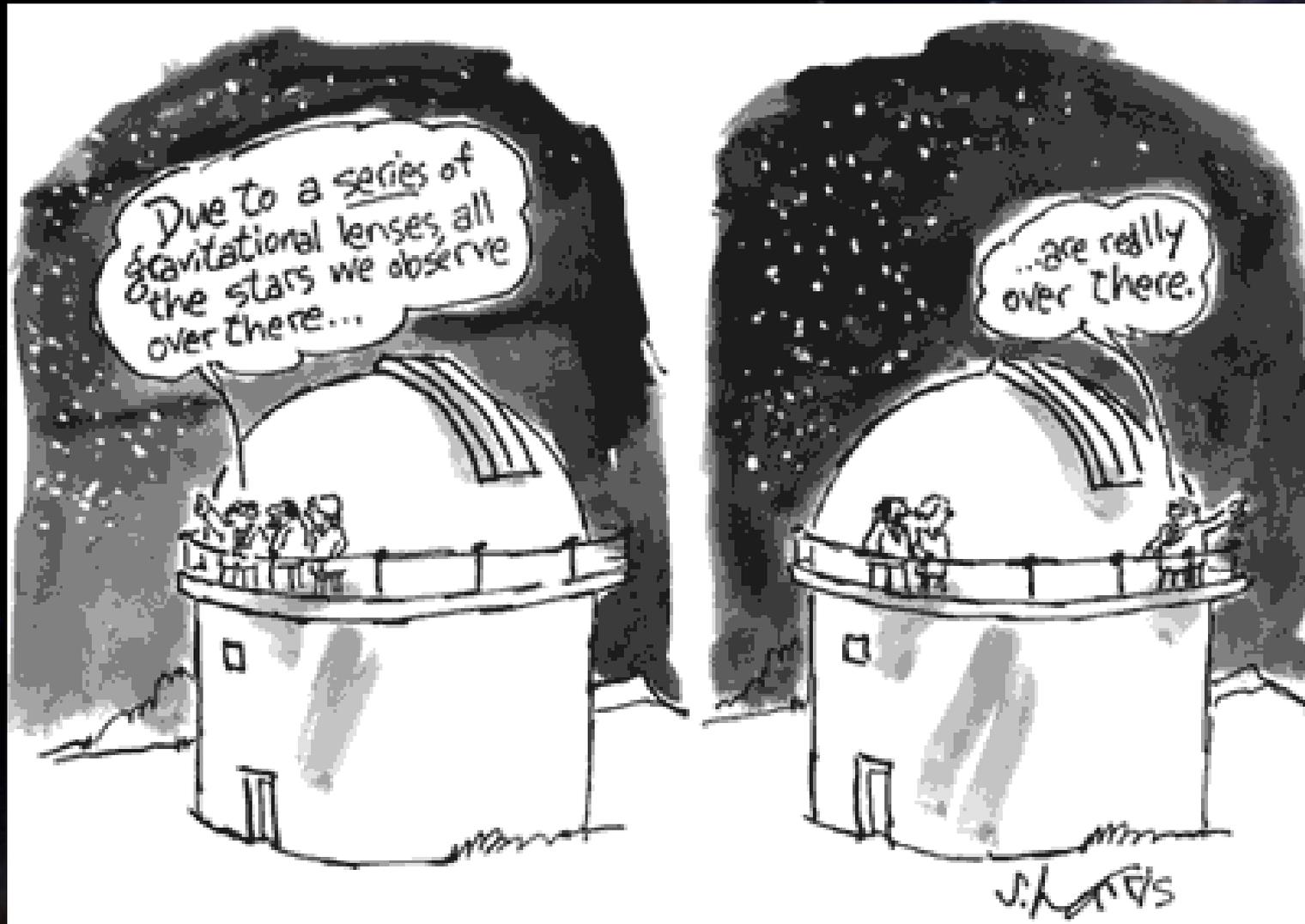
Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

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

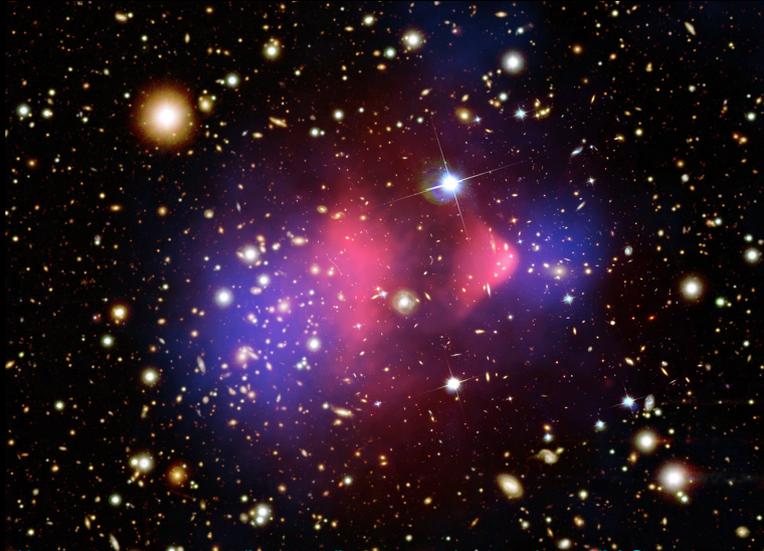
La masse sombre est environ 100 fois supérieure à la masse lumineuse à ces échelles.

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

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))



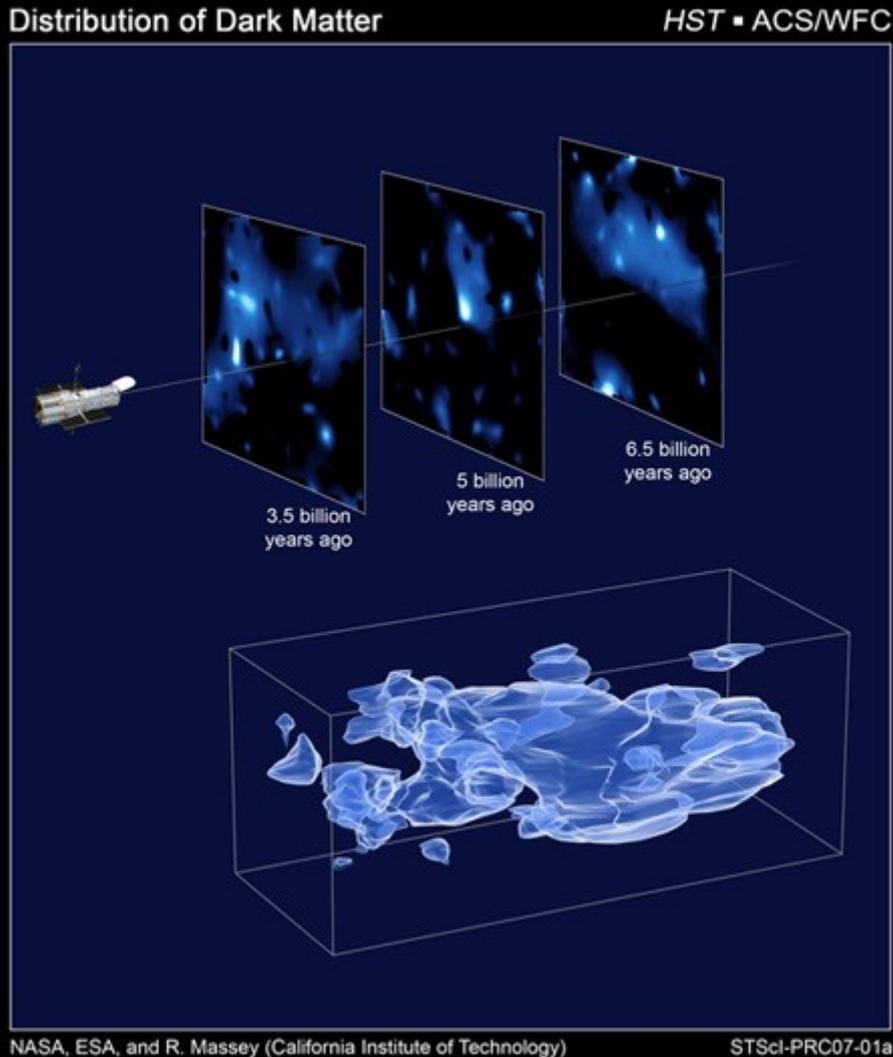
Dark Matter Ring in Galaxy Cluster Cl 0024+17 (ZwCl 0024+1652)
Hubble Space Telescope • ACS/WFC

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

STScI-PRC-07-17a

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 sombre se manifeste à toutes les échelles : des galaxies jusqu'aux échelles cosmologiques (super-amas, fond diffus)
- « Sombre » (ou 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 sombre se manifeste à toutes les échelles : des galaxies jusqu'aux échelles cosmologiques (super-amas, fond diffus)
- « Sombre » (ou 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 ...

D'où vient cette matière sombre ?

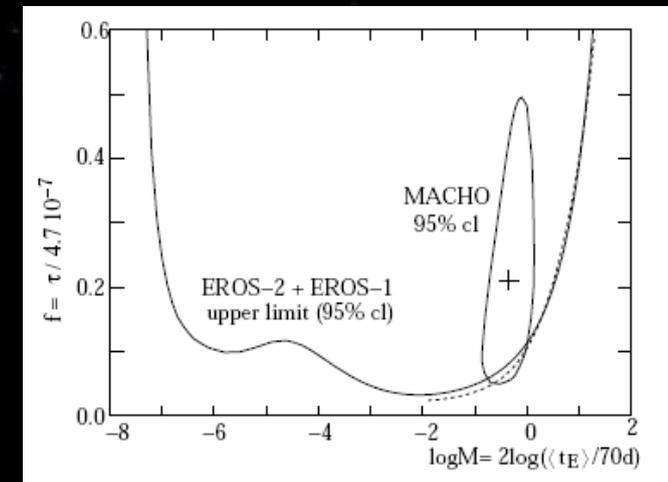
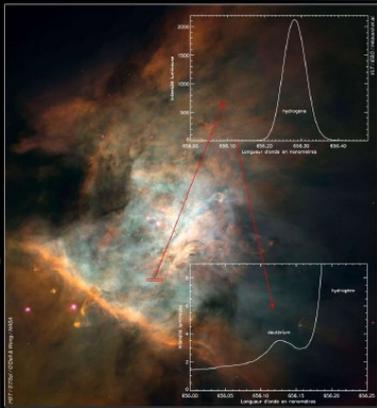
Aurions-nous comme pour Mercure accordé trop de confiance dans notre théorie de la gravitation ?

La matière ordinaire

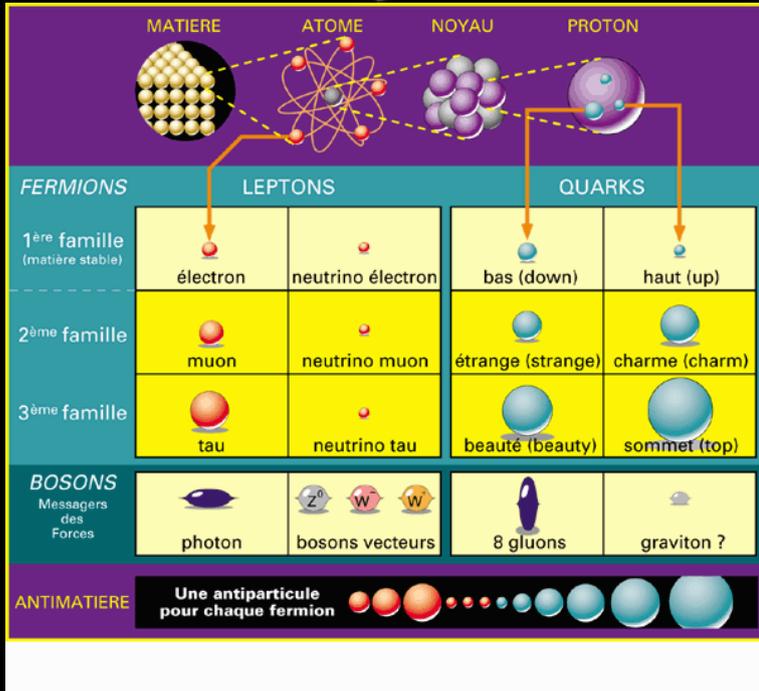
Elle se compose des objets classiques en astronomie (planètes, étoiles, trous noirs), de poussière et de gaz (atomique, moléculaire, ionisé ou neutre). Elle n'est pas forcément visible (matière noire baryonique).

Toutefois, il est exclu que les objets compacts (MACHOS: massive astrophysical compact halo objects) comptent pour une fraction importante de la matière sombre.

Résultats des expériences MACHO, EROS, etc. (Ici, EROS-2, Tisserand et al. 2006)



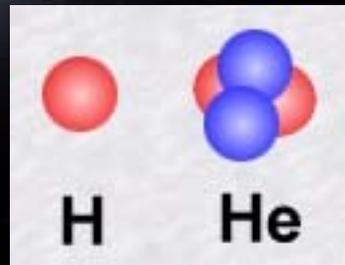
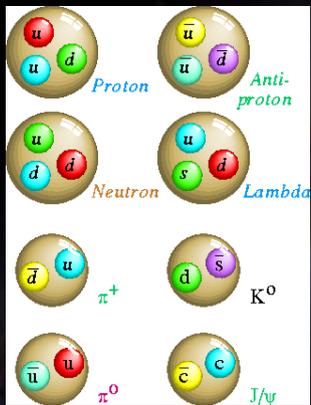
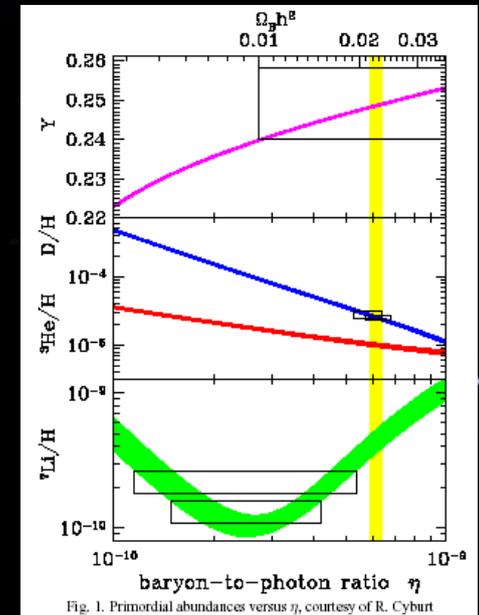
Comment estimer la quantité totale de matière ordinaire ? (Nucléosynthèse primordiale)



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:
 $\eta \approx 10^{-10}$

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



Vers une nouvelle théorie de la gravitation ?

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

Recherche initiée par le fait qu'une gravité modifiée de manière empirique peut expliquer les courbes de rotation des galaxies (théorie MOND, Milgrom et al.). La généralisation covariante (Beckenstein et al.) n'est pas encore complètement aboutie.

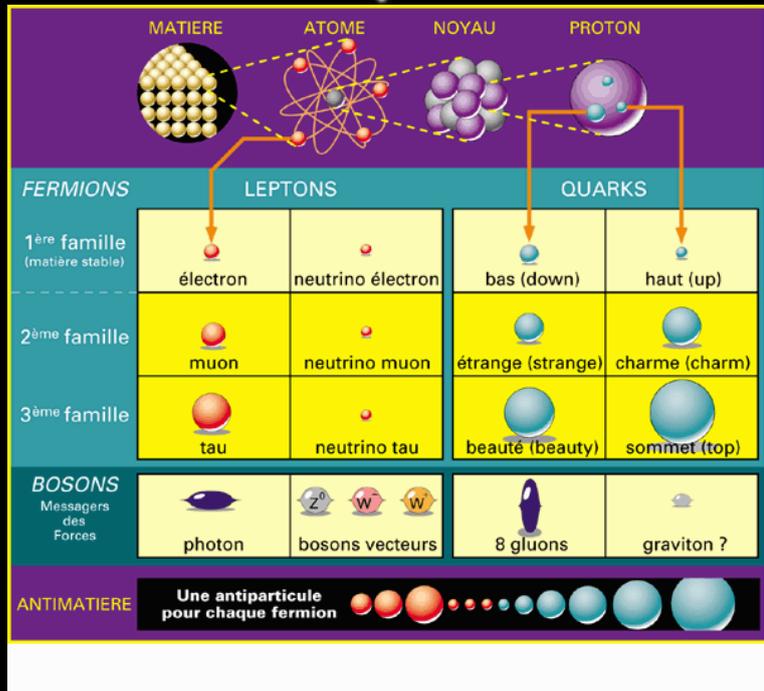
Le principal effet dans la limite non-relativiste est que l'accélération est modifiée en champ faible, en $1/r$ au lieu de $1/r^2$.

Problème sérieux avec « l'amas de la balle de fusil » (nécessité d'ajouter une composante de matière noire au modèle)

Problème sérieux pour la formation des structures ... (besoin d'une grande quantité de matière noire chaude)



Candidats dans le modèle standard des particules élémentaires?



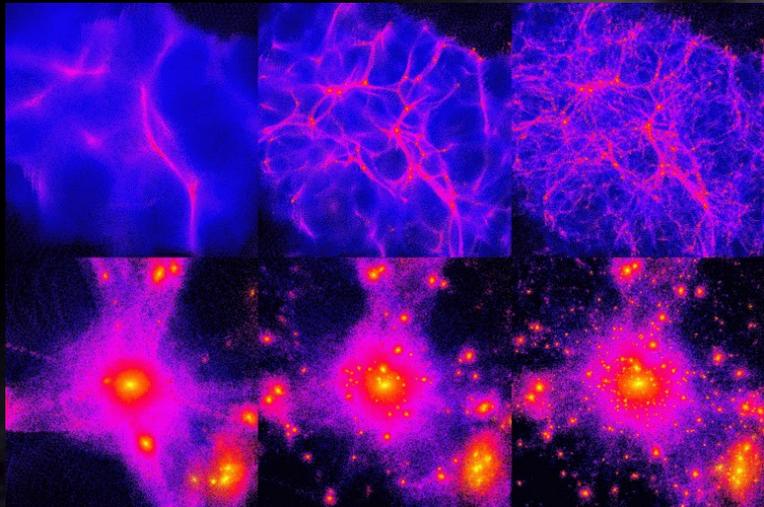
WIMPs : Weakly Interacting Massive Particles (mauviettes)

Eureka, les neutrinos !!!!!

(ils interagissent faiblement, sont neutres, certes très légers mais ont une masse ! Voir oscillation des neutrinos)

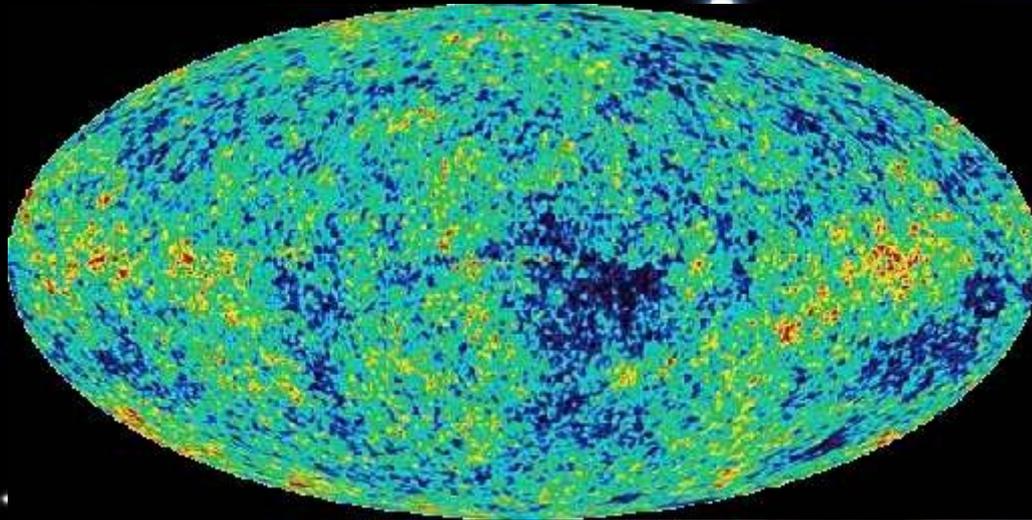
Oui, mais **il s'agirait de matière noire chaude**, ce qui retarderait trop la formation des galaxies ...

La matière noire doit être **suffisamment froide** dans l'univers primordial pour assurer la croissance des inhomogénéités lorsque rayonnement et matière se découplent !



Des vertus de la matière sombre :

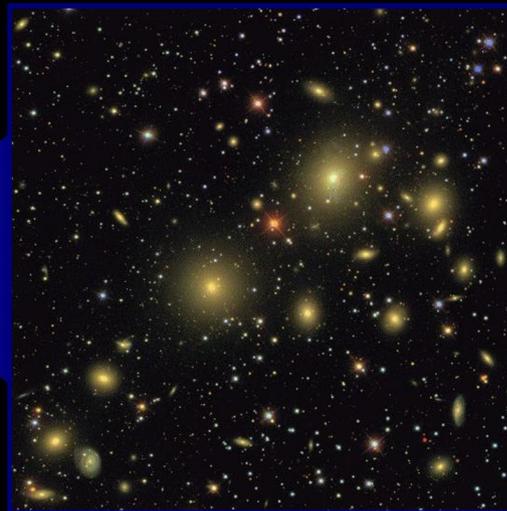
La formation des structures



Les simulations numériques partant des inhomogénéités observées du CMB permettent, à partir de matière noire froide seule, de bien reproduire les propriétés statistiques des galaxies aux grandes échelles (distribution spatiale, fonction de masse, etc.)

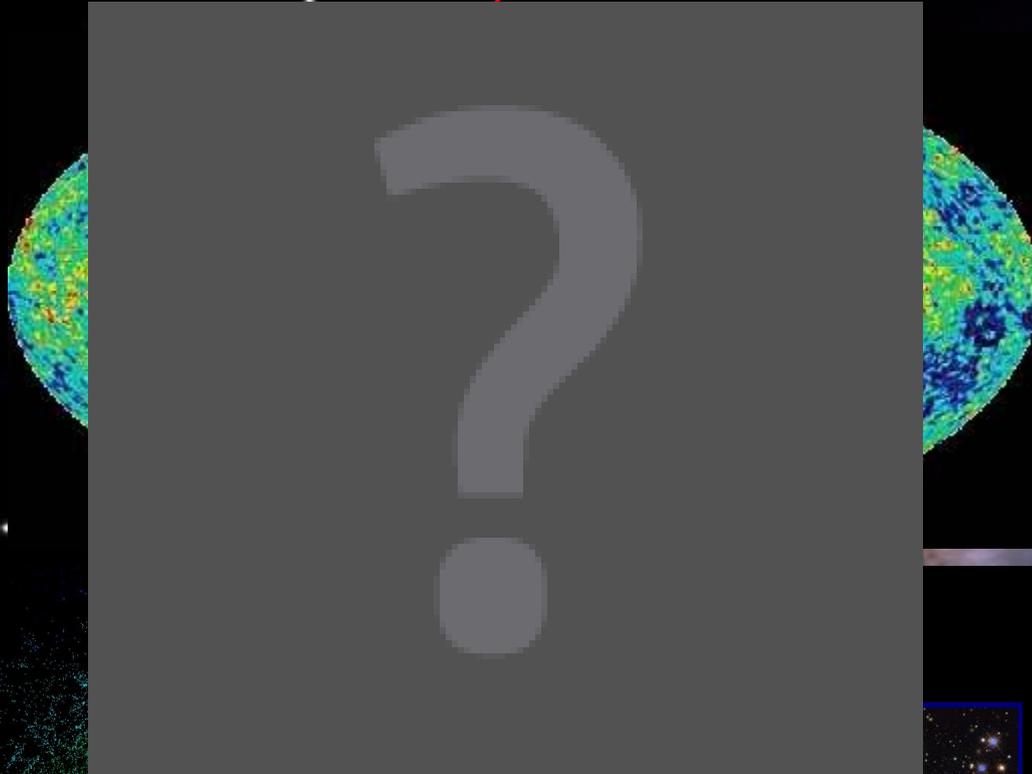
La matière noire est un ingrédient essentiel à la formation des structures dans le cadre de la relativité générale.

(en haut, WMAP, en bas SDSS)



Des vertus de la matière sombre :

La formation des structures



Les simulations numériques partant des inhomogénéités observées du CMB permettent, à partir de matière noire froide seule, de bien reproduire les propriétés statistiques des galaxies aux grandes échelles (distribution spatiale, fonction de masse, etc.)

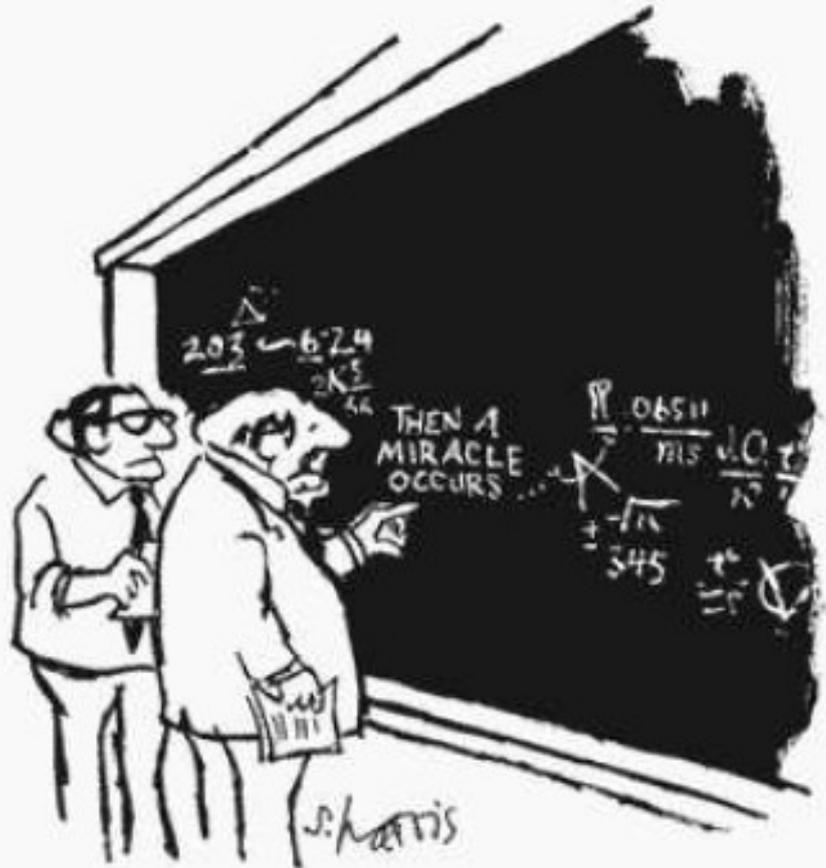
La matière noire est un ingrédient essentiel à la formation des structures dans le cadre de la relativité générale.

(en haut, WMAP, en bas SDSS)





De nouvelles particules ?



"I THINK YOU SHOULD BE MORE EXPLICIT HERE IN STEP TWO."

Historiquement, les premiers candidats sérieux ont émergé indépendamment de la question de la matière noire. Ils sont tous la conséquence des améliorations apportées au modèle standard des particules élémentaires.

Axions (Kim, 1979)

(CP problem, Peccei Quinn, 1977 ; Weinberg, 1978)

Supersymétrie (neutralino, Golberg, 1983)

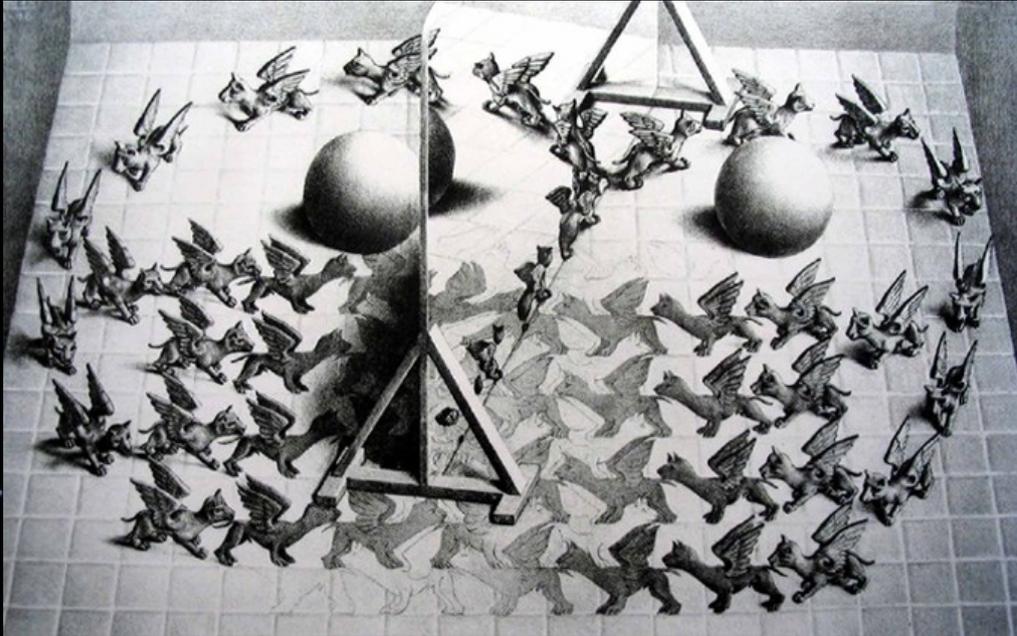
(problèmes de hiérarchie et naturalité, T'hooft 1977 ; unification des interactions, Wess & Zumino 1974)

Dimensions supplémentaires

(Appelquist et al. 2000, Cheng et al. 2002, Servant & Tait 2002)

... des candidats «exotiques» existent !!!

Intermède supersymétrique et multidimensionnel



Deux types de particules élémentaires sont observées dans la nature :

- * celles de « matière » (fermions : quarks, leptons)
- * celles « d'interactions » (bosons : photon, Z, W, gluons – gravitons)

La supersymétrie apparie ces deux types de particules :

$$\text{SUSY} * \text{FERMION} = \text{BOSON}$$

$$\text{SUSY} * \text{BOSON} = \text{FERMION}$$

Avantages :

- * origine et stabilité du mécanisme de Higgs
- * unification possible des interactions
- * cadre théorique incluant la gravité
- * explication possible de plusieurs problèmes cosmologiques (matière noire, etc)

Prédictions :

- * **de nouvelles particules**
- * **une particule stable (la plus légère) : elle pourrait caractériser la matière noire !**



Pierre Fayet
(LPTENS)



+ dimensions supplémentaires → théorie des cordes

Comment connaître la véritable nature de la matière noire ?

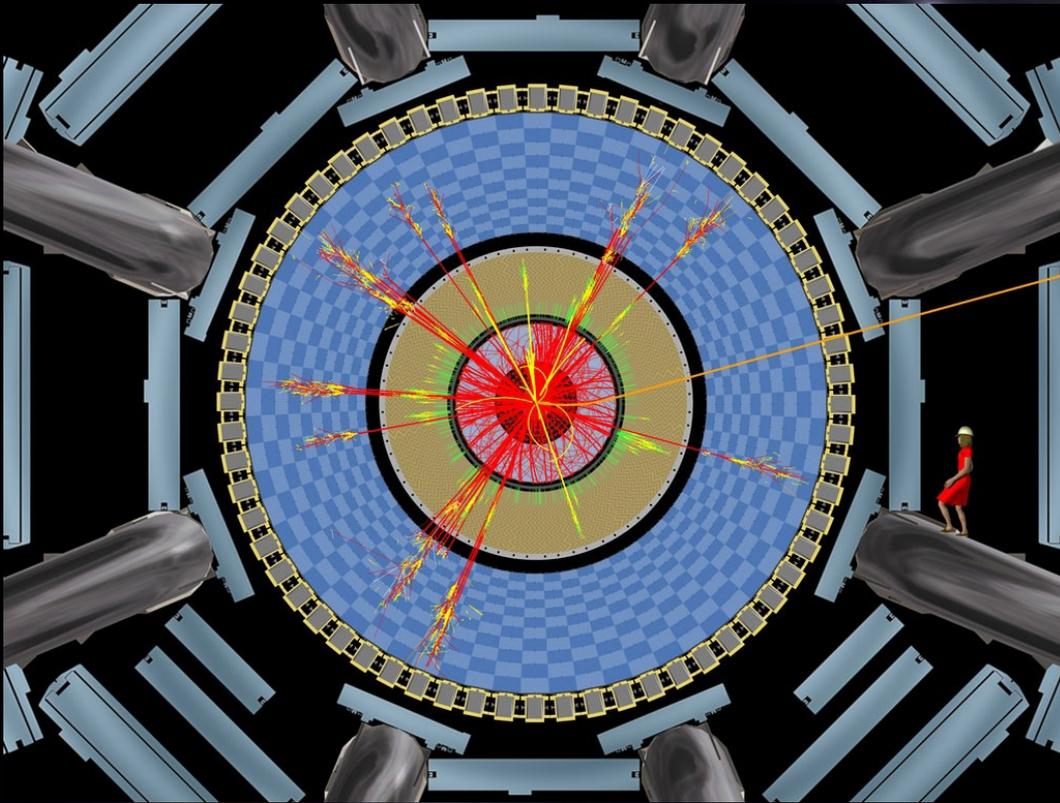


On peut essayer de **la produire dans des accélérateurs de particules**

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



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.

Redémarrage à l'automne 2009

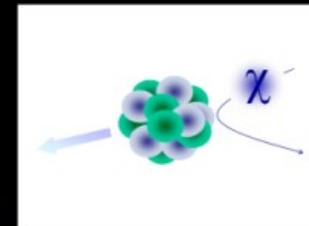
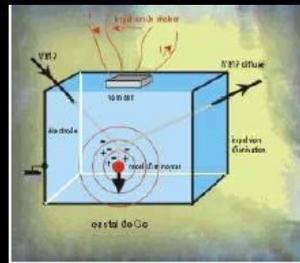
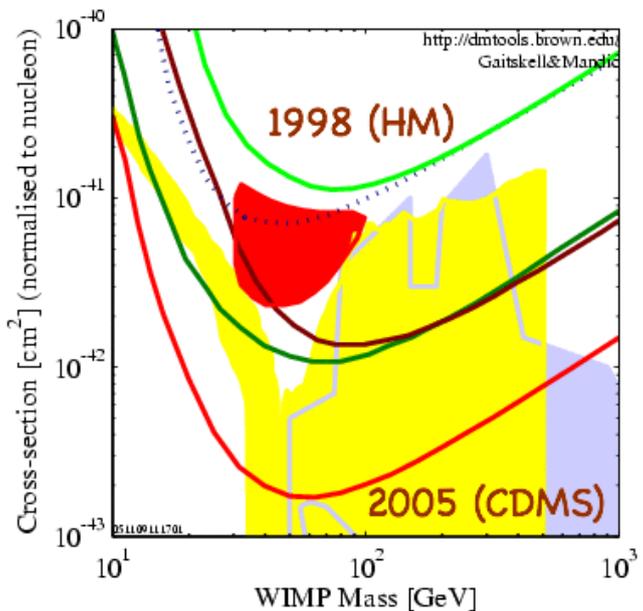
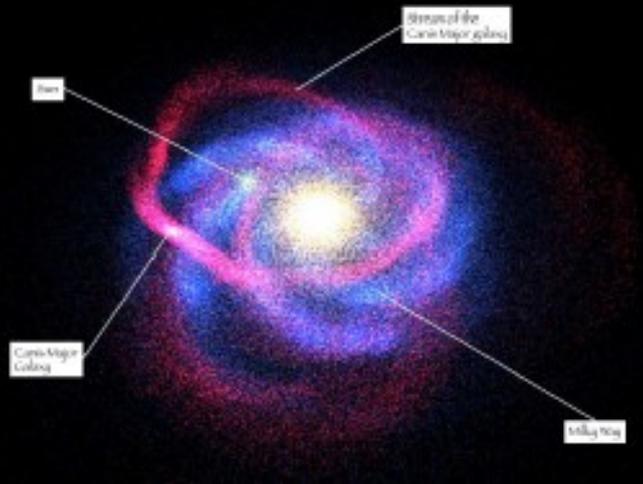
L'expérience ATLAS au LHC

La détection directe

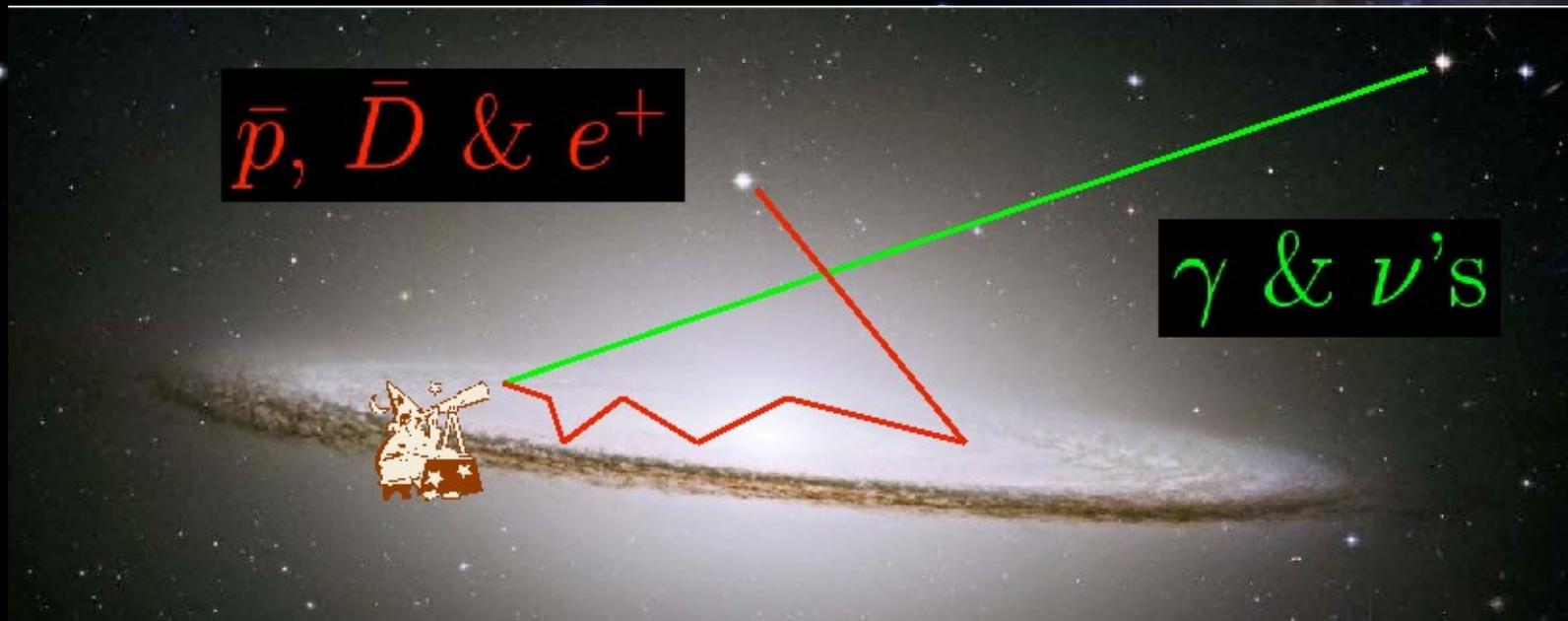
Si la galaxie est remplie de matière noire, alors il s'agit d'une nouvelle forme d'éther : la Terre étant en mouvement, il en résulte un « vent de matière noire ».

Si les particules de matière noire interagissent faiblement avec la matière ordinaire, elles peuvent déposer de l'énergie (par collision) 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)

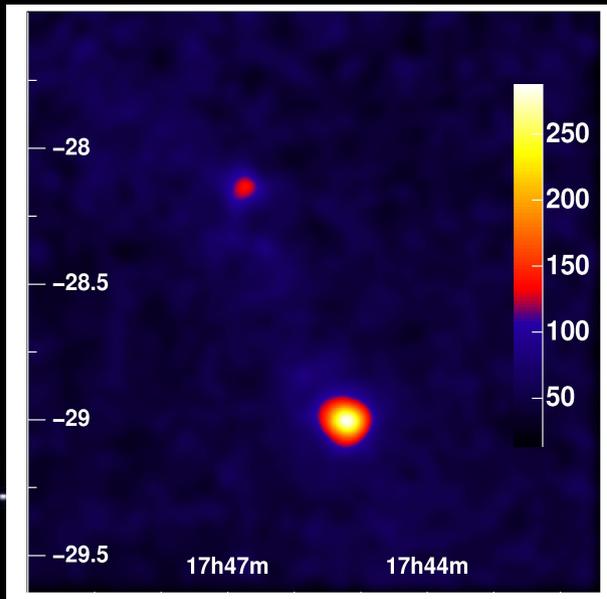


Joe Silk (Oxford)

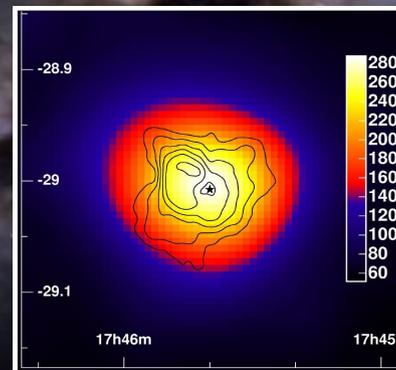
Pierre Salati
(LAPTH & Univ. de Savoie)



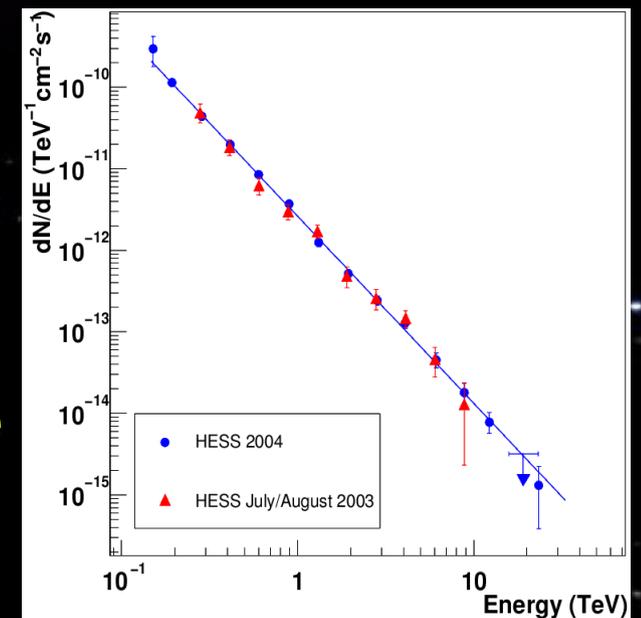
La détection indirecte : gamma au sol



HESS : télescope franco-allemand construit en Namibie
Détection du Centre Galactique au TeV !



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



(Courtesy W. Hofmann)

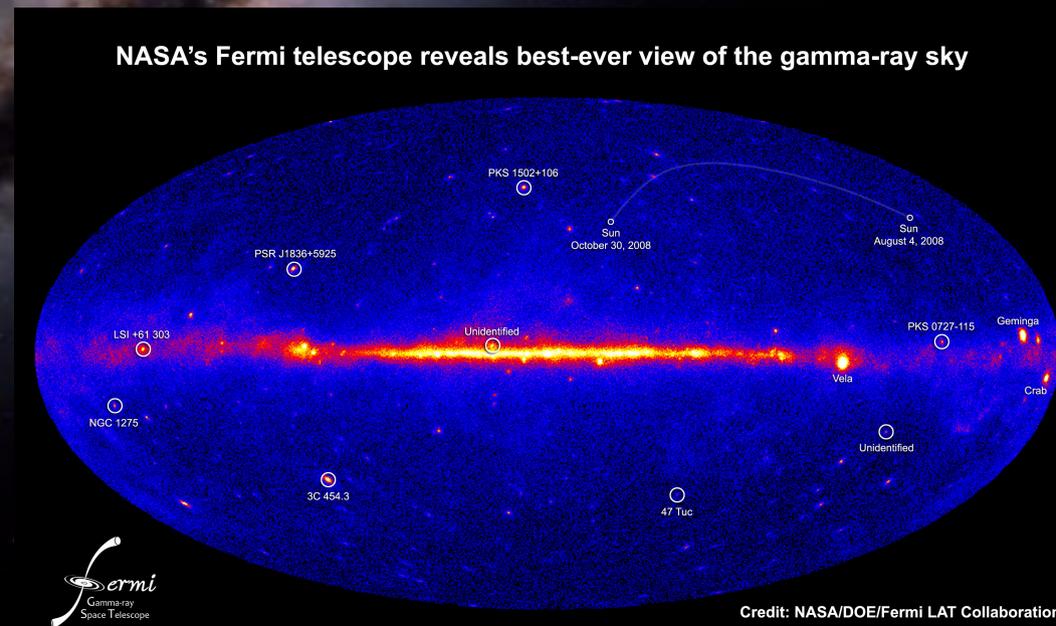
La détection indirecte : gamma depuis l'espace

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

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



En orbite depuis
juin 2008.



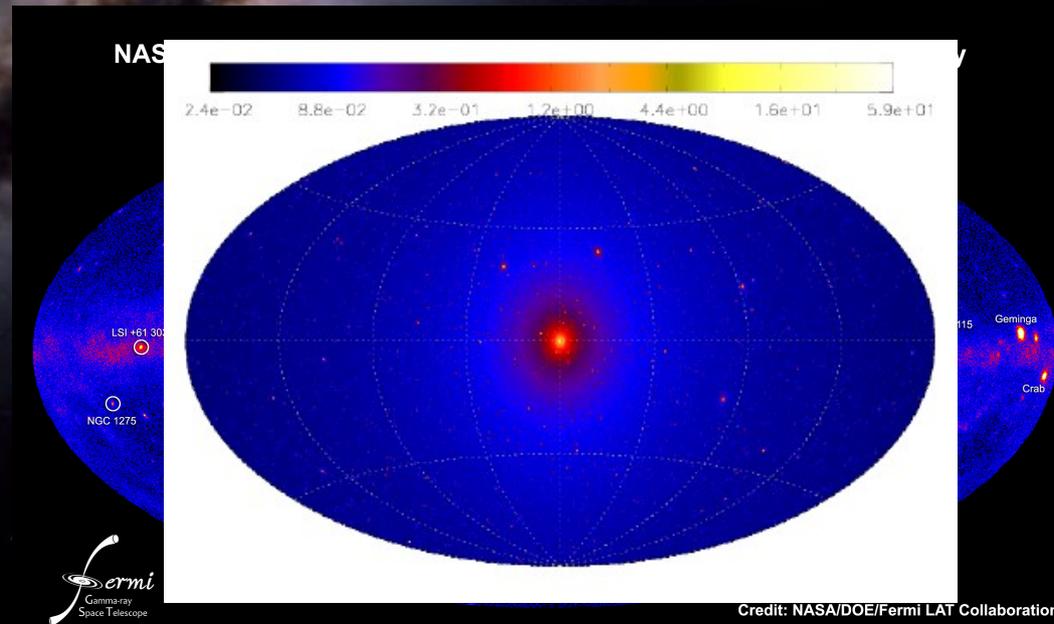
La détection indirecte : gamma depuis l'espace

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

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



En orbite depuis
juin 2008.



Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

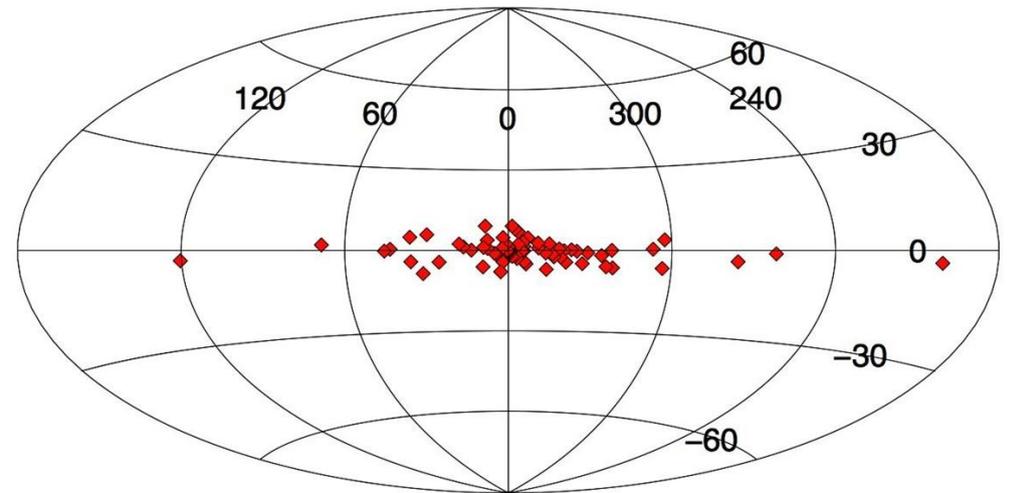
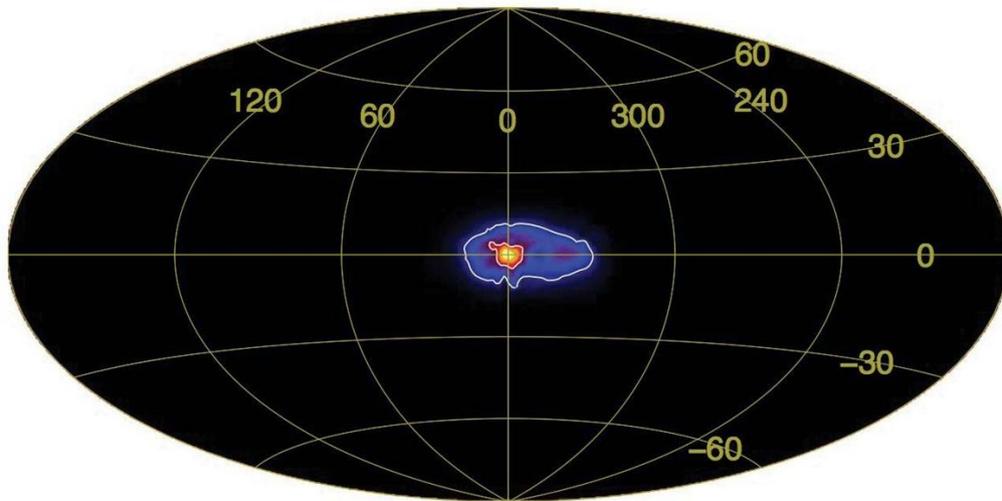
La détection indirecte : gamma depuis l'espace



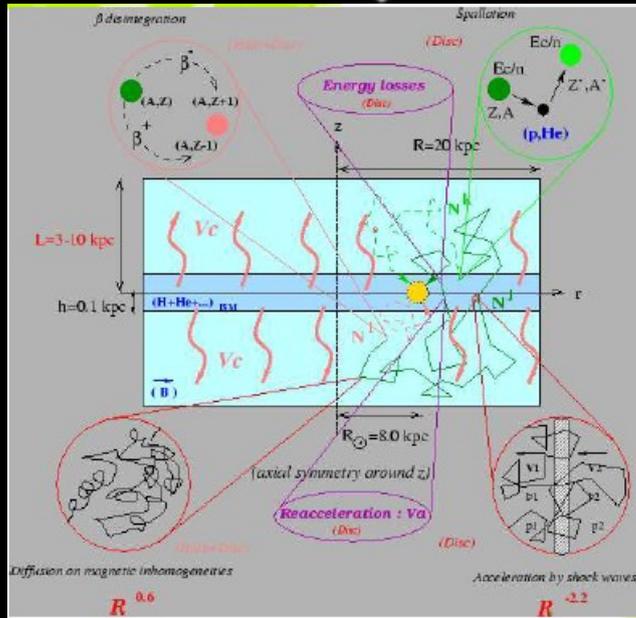
Après EGRET lancé dans les années 90, et qui a permis la découverte de nombreuses sources, GLAST a une sensibilité 100 fois meilleure. (Collaboration internationale, participation du CNRS-IN2P3)

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

Une raie à 511 keV très intense a été observée de manière très fine avec le satellite INTEGRAL, et reste sans explication probante !



La détection indirecte : rayons cosmiques d'antimatière

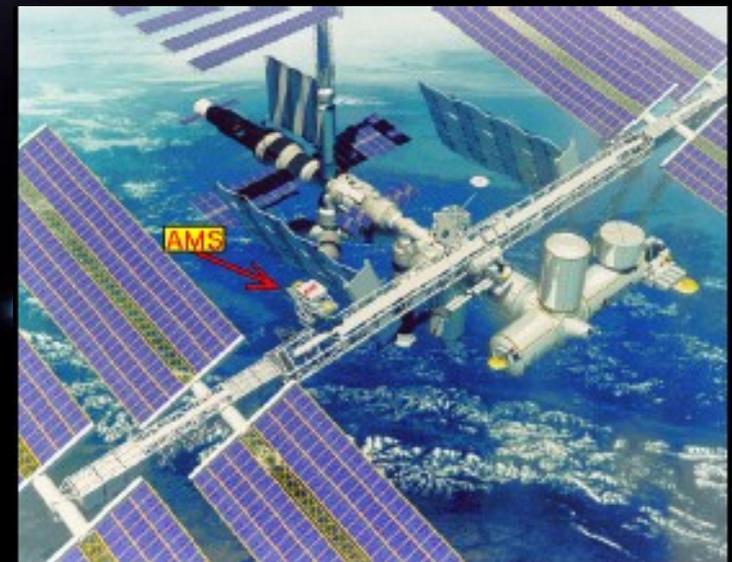


Les rayons cosmiques chargés sont déviés par les champs magnétiques, et sont confinés dans la galaxie aux énergies associées à la matière noire.

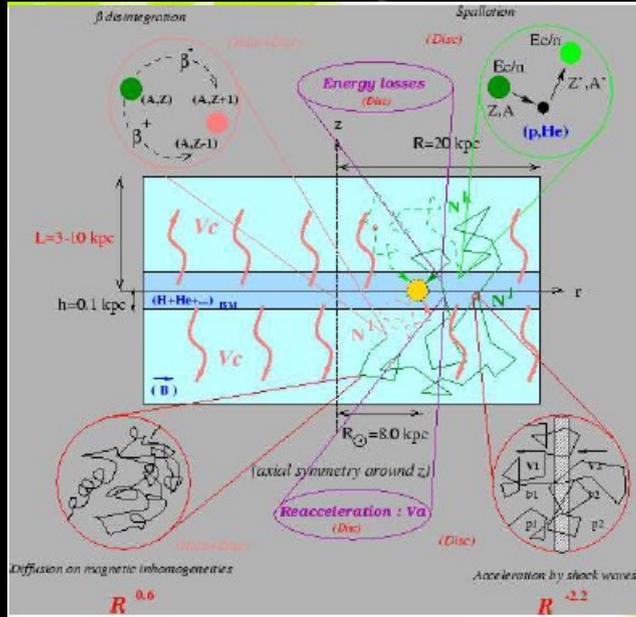
On n'est sensible qu'aux rayons cosmiques produit par l'annihilation dans la galaxie.

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

Nouvelles observations par **PAMELA** (lancé en juin 2006) et bientôt **AMS2** (prévu pour 2010).



La détection indirecte : rayons cosmiques d'antimatière

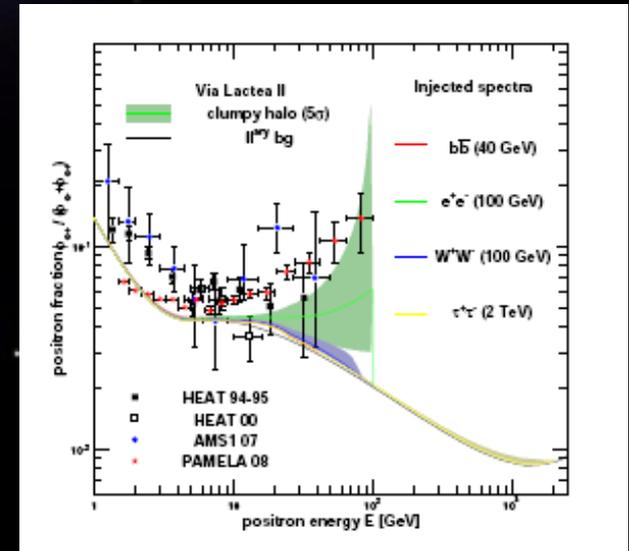


Les rayons cosmiques chargés sont déviés par les champs magnétiques, et sont confinés dans la galaxie aux énergies associées à la matière noire.

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.
Matière noire ? Pulsars ?

Nouvelles observations par PAMELA (lancé en juin 2006) et bientôt AMS2 (prévu pour 2010).



Pieri, Lavalle, Bertone & Branchini, 2009

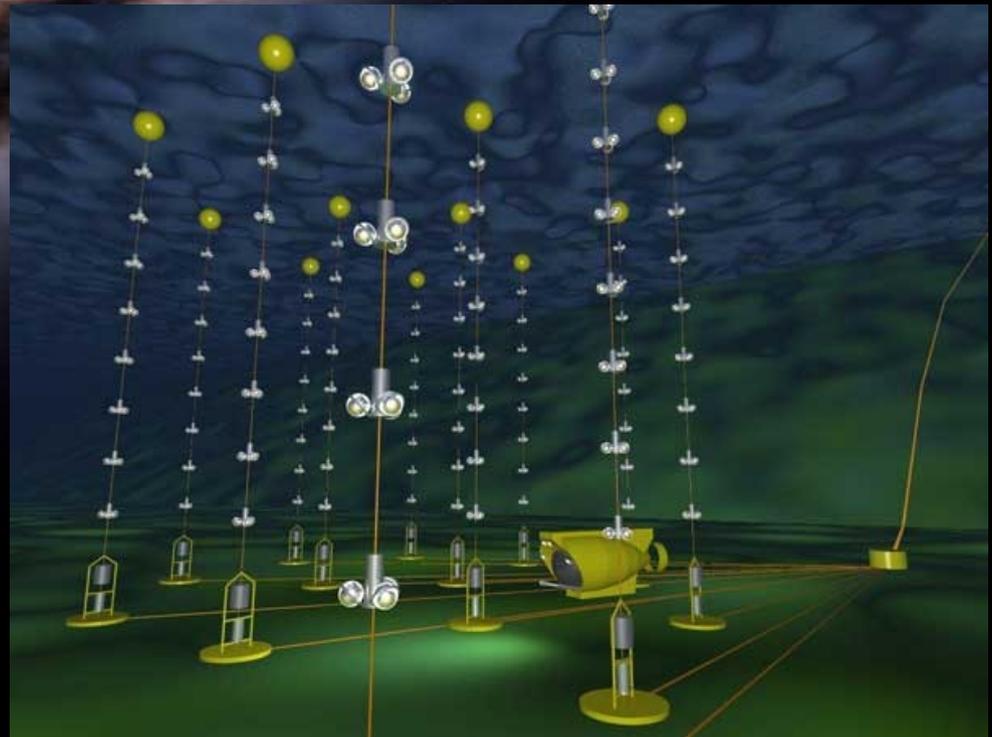
La détection indirecte : neutrinos



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 km³ d'ici 2010

Antares / km³ (Méditerranée)
opérationnel depuis 2006
complet fin 2008 (phase prospective pour km³)
=> Projet majeur au CPPM

Couverture du ciel
complémentaire des expériences



Conclusions

- Les origines de la matière noire et de l'énergie noire restent pour l'heure un mystère
- La matière noire (froide ou tiède) s'avère être un ingrédient fondamental de la formation des structures en cosmologie standard
- 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, il est vraisemblable que la matière noire soit composée de particules : il conviendra de le démontrer par d'autres méthodes complémentaires (directes et indirectes)
- Il reste de nombreux progrès à faire non seulement dans l'élaboration de physiques au-delà du modèle standard, mais aussi dans la modélisation de processus standards (e.g. Formation des galaxies, rayonnement cosmique, etc.)

Compléments

Dossier matière noire très complet sur le site de mon collaborateur Richard Taillet (enseignant-chercheur au LAPTH – Annecy) :

<http://www.lapp.in2p3.fr/~taillet/>

Dessins de Sidney Harris

<http://www.sciencecartoonsplus.com/pages/gallery.php>

Sites web de la NASA, images et animations (WMAP, HST, etc)

Quelques clichés pris sur Astronomy picture of the day.

