

La Matière Noire de notre Univers

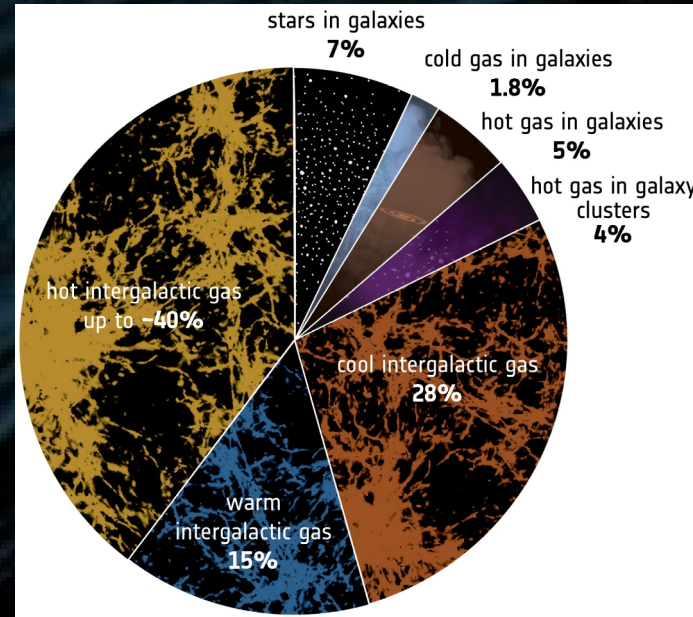
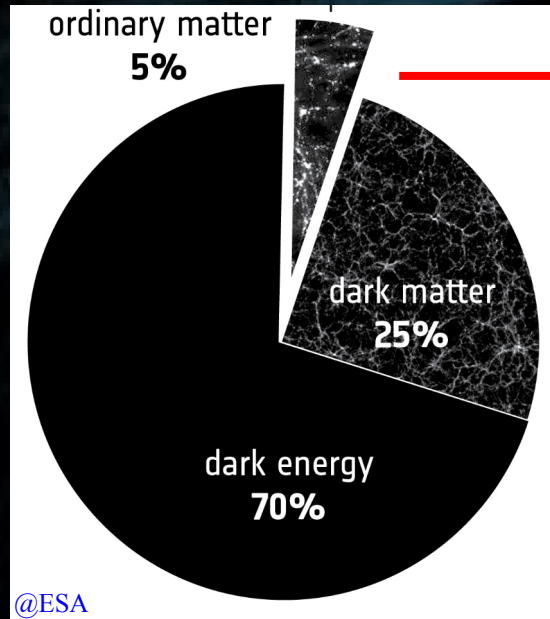
Julien Laval
CNRS

Laboratoire Univers & Particules de Montpellier (CNRS & U. Montpellier)

Cycle de Conférences du CPPM – Marseille



Le bilan énergétique de l'univers aujourd'hui



Bilan :

- Matière ordinaire : 5 %
- Matière noire : 25 %
- Énergie noire : 75 %

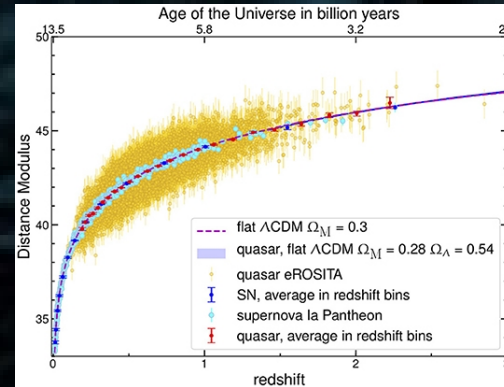
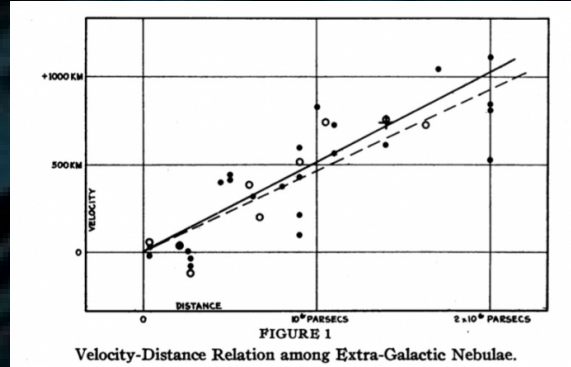
La cosmologie et ses avancées



Edwin Hubble



Albert Einstein & Georges Lemaître



La loi de Hubble-Lemaître

Vitesse de récession = $H \cdot \text{distance}$

Cosmologie :

Étude de l'**origine** et **évolution** de l'univers et ses constituants

Sort du champ mythologique durant la Grèce antique

Comprendre le mouvement des corps céleste :
→ la gravitation

Une longue épopée: Ptolémée, Galilée, Newton ...
(et leurs contemporain.e.s)

... puis Einstein.

Une **approche rationnelle et mathématisable** :

→ Gravitation classique (Newton, 1687)

→ Relativité Générale (Einstein, 1915)

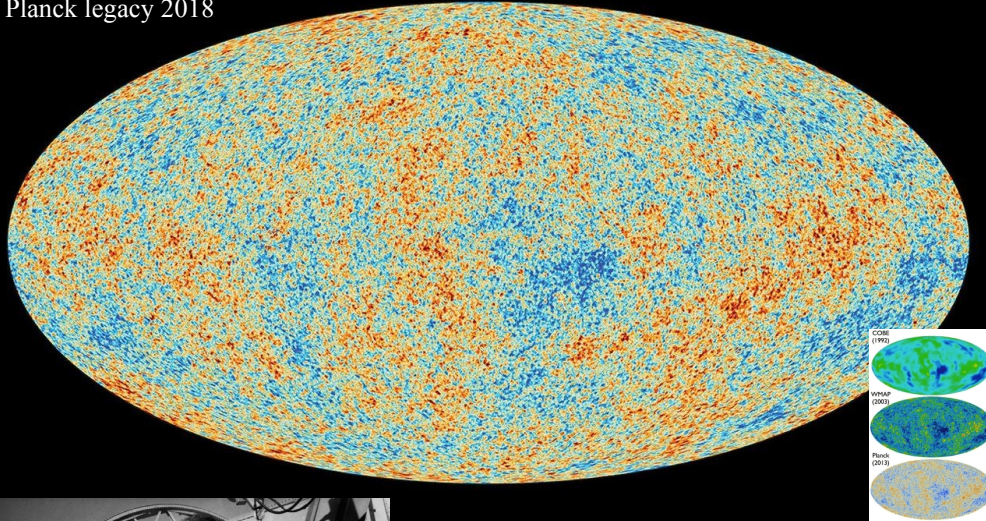
L'univers n'est pas statique (Friedmann, 1917)

Diagramme de Hubble-Lemaître (1927)

L'UNIVERS EST EN EXPANSION

Une observation majeure : le fond diffus

@ESA
Planck legacy 2018

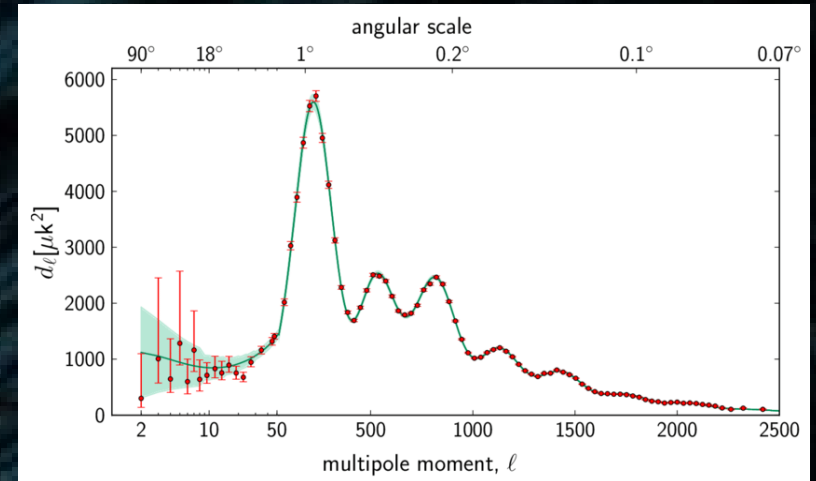


Le fond diffus cosmologique :

- Première image de l'univers (rayonnement de corps noir, 3°K)
- Un système à l'équilibre + univers homogène et isotrope
- Mesure de la matière, de la radiation, et de leurs propriétés
- Fluctuations : preuves de l'existence de matière noire !



Arno Penzias & Robert Wilson
Nobel 1978
Rayonnement du corps noir (1965)



État des connaissances en cosmologie

Notre modèle d'univers : Big bang chaud modernisé

Conditions initiales toujours spéculatives, mais scénario testable (ce qu'on peut voir, ne pas voir, limite des connaissances scientifiques).

Inflation cosmique : une fluctuation du vide quantique déclenche une phase d'expansion accélérée
→ Inflation : donne un espace-temps « plat », et la connexion causale du ciel à 3°K (singularité initiale ?).

Énergie de l'inflaton convertie en radiation très énergétique : production des particules, alors toutes relativistes (très chaudes – expansion) => Big bang chaud.

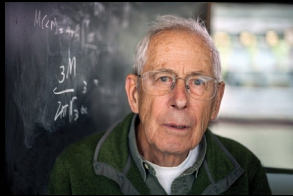
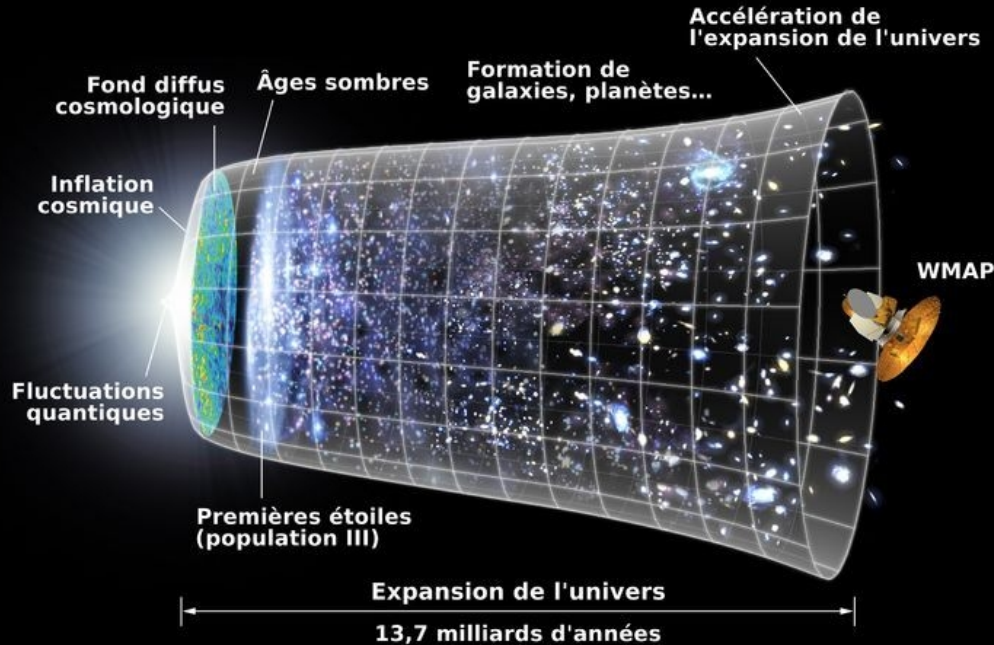
Phase de radiation (la température et la densité décroissent – expansion).

Production des noyaux légers : H, D, He, Li, Be (1-10min).

Phase de matière (expansion) – 55000 ans.

Recombinaison : les noyaux s'apparient aux électrons
→ atomes neutres, lumière libre (380 000 ans)
→ première image : le fond diffus cosmologique (3°K)

Formation des galaxies (1 milliard d'années).



James Peebles
Nobel 2019

Modèle cosmologique standard LCDM ('80)

NASA/WMAP Science Team

Vers une archéologie de la matière noire

La matière dans l'univers

- Matière ordinaire (baryonique) : 15%
 - Matière visible : 5%
 - Matière baryonique « invisible » (gaz froid, poussière, planètes, etc.) : 10%
- Matière d'origine inconnue : 85%
 - Matière sombre/noire exotique : 85%

Sa nature, son origine ?

C'est là le problème de la matière noire en cosmologie

Vers une archéologie de la matière noire

- **Analogie historique avec les planètes du système solaire**
- **Anomalies gravitationnelles et matière noire**
 - **L'échelle des galaxies**
 - **L'échelle des amas de galaxies**
 - **L'échelle cosmologique et la formation des structures**

Le mouvement des planètes



Mouvement des planètes décrit par les **lois de Kepler (1609)**, et plus précisément encore dans le cadre de la **théorie de la gravitation de Newton (1687)**.

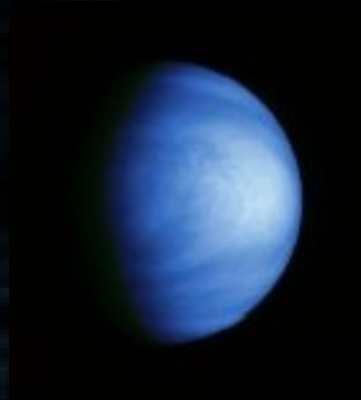
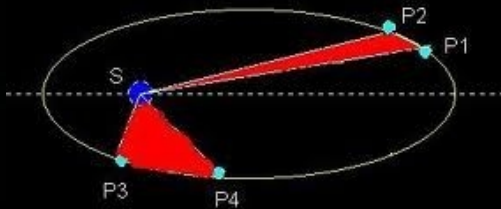
Théorie classique : excellente description (ou presque) des observations à l'échelle du système solaire.

Mouvement des planètes régi par la force gravitationnelle que les corps massifs environnants exercent sur elles (l'effet du soleil domine).

2^{ème} loi de Newton :

→ masse fois accélération = force subie

→ la force décroît comme le carré inverse de la distance



Mécanique newtonienne et masse cachée

La course des planètes en gravité newtonienne

- Une planète unique décrit en principe une **orbite elliptique contenue dans un plan** dont le soleil est l'un des foyers.
- Cependant la présence d'autres planètes perturbent cette trajectoire.
- Ces perturbations peuvent être calculées de manière détaillée dans le cadre newtonien si l'on connaît les propriétés de ces autres planètes.

$$\vec{a}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j \neq i} \vec{F}_j = -G \sum_{j \neq i} \frac{m_j}{d_{ij}^2} \vec{e}_{ji}$$

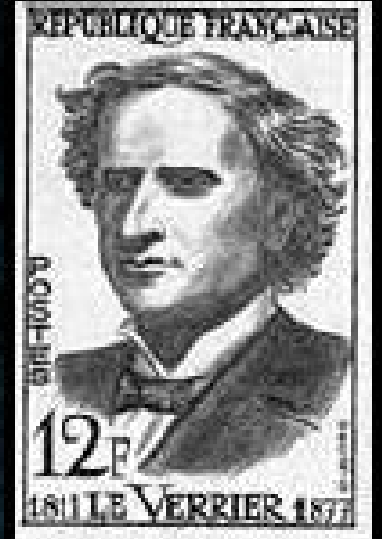


L'exemple d'Uranus



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

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



L'exemple d'Uranus

ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN.

No. 582.

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

1690,98	$\Delta = -182^{\text{d}}6 + (1) -1,913 \text{ P} +0,904 \text{ Q} +1,651 \text{ R} -1,642 \text{ S}$
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	$\Delta = -188,6 + (13) -1,008 +1,662 +0,469 -2,123$
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.

1846 JAN. 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

Le Verrier calcule la position associée à cette nouvelle planète, dont il a conjecturé l'existence. Elle est **découverte** par Galle (Berlin), il s'agit de **Neptune** !

In a letter, received at Berlin on 23d September, M. Le Verrier invited Dr. Galle to search for the planet, which he expected would be recognised by its disk.

The same evening Dr. Galle examined the heavens, comparing the stars with the excellent map by Dr. Bremiker (Berlin Star-maps, Hora XXI.) He very soon found a star of about the 8th magnitude, nearly in the place pointed out by M. Le Verrier, and which did not exist in the map. There could be little doubt that

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

Méthodologie suivie par Le Verrier

- Interprétation des anomalies dans un cadre théorique existant et déjà validé
- Nouvel ingrédient/objet → prédictions nouvelles
- Confirmation observationnelle des conséquences
- Sinon, remise en cause du cadre théorique

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

L'exemple de Mercure

Problème similaire à celui d'Uranus :

Les corrections calculées en tenant compte des planètes *connues* n'expliquent pas les observations (précession trop rapide du périhélie).

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

=> le cadre théorique se fragilise ...

L'explication viendra avec une *nouvelle théorie plus fondamentale de la gravitation* : **la Relativité Générale d'Einstein (1917)**.

De **nouveaux effets** dus à la présence de masse (ou énergie) sont **prédits**, dont la courbure de la trajectoire de la lumière dans un champ de gravitation intense ...

Solution apportée par la **modification du cadre théorique** lui-même : ici, la modification des lois de la gravité incorpore la description des phénomènes classiques, **mais en prédit aussi de nouveaux**.

→ **À nouveau, c'est l'expérience/observation qui permet de trancher.**



Résumé : Gravitation et masse manquante



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

La présence d'une masse « cachée » se traduit par celle d'un champ gravitationnel qui induit des effets potentiellement observables (mouvement d'objets distants, déflexion de la lumière, etc.).

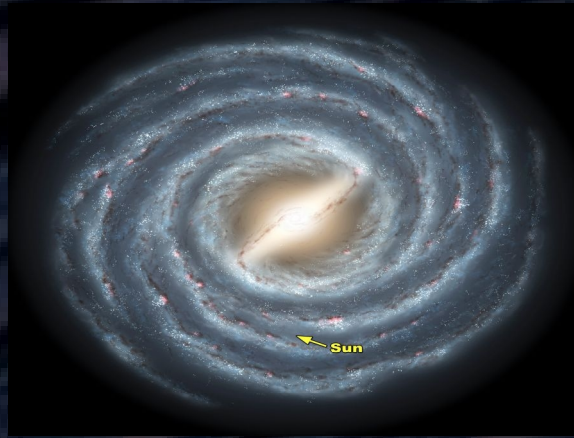
Se souvenir de la méthode suivie par Le Verrier :
Une « bonne » théorie est prédictive ... et donc falsifiable.

Pour l'heure, la théorie de la gravitation d'Einstein n'a jamais été mise en défaut d'un point de vue observationnel (de l'échelle des planètes à l'échelle cosmologique).



Anomalies gravitationnelles et matière noire

Matière noire dans les galaxies



Les distances typiques pour une galaxie comme la Voie Lactée :

[rayon du halo : 200 kpc]

rayon du disque : 15 kpc

rayon du bulbe : 3 kpc

1 pc = 3.3 années lumière = $3 \cdot 10^{16}$ m

distance soleil – centre galactique = 8 kpc

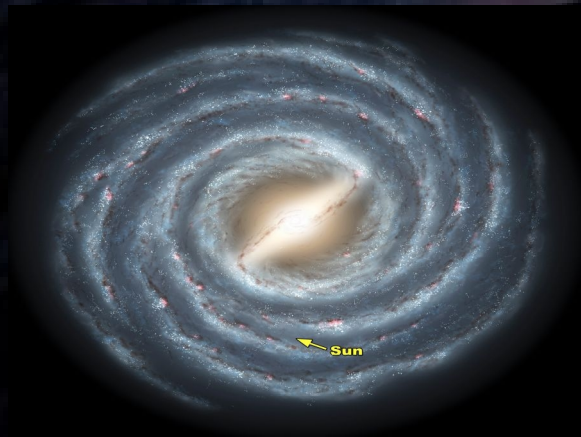
distance Voie Lactée – Andromède = 800 kpc

100-400 milliards d'étoiles

1 masse solaire = $2 \cdot 10^{30}$ kg

Matière noire dans les galaxies

La densité locale de matière est plus importante que son contenu lumineux ne le suggère (Oort, 1927-1932)



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*.

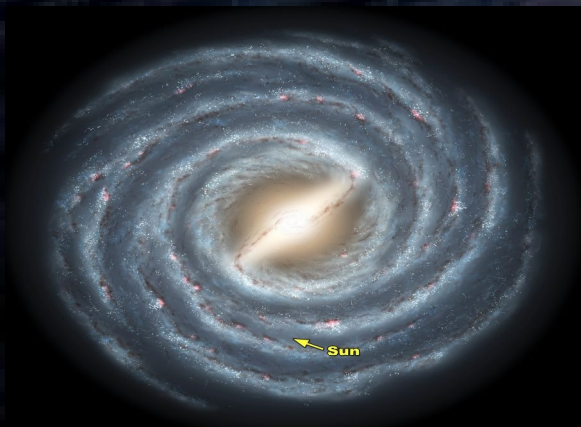
11. *The amount of dark matter.*

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 mais constitue malgré tout une part non négligeable d'environ 10% du total, soit 0.01 masse solaire par parsec cube (0.4 atome d'hydrogène par cm cube).

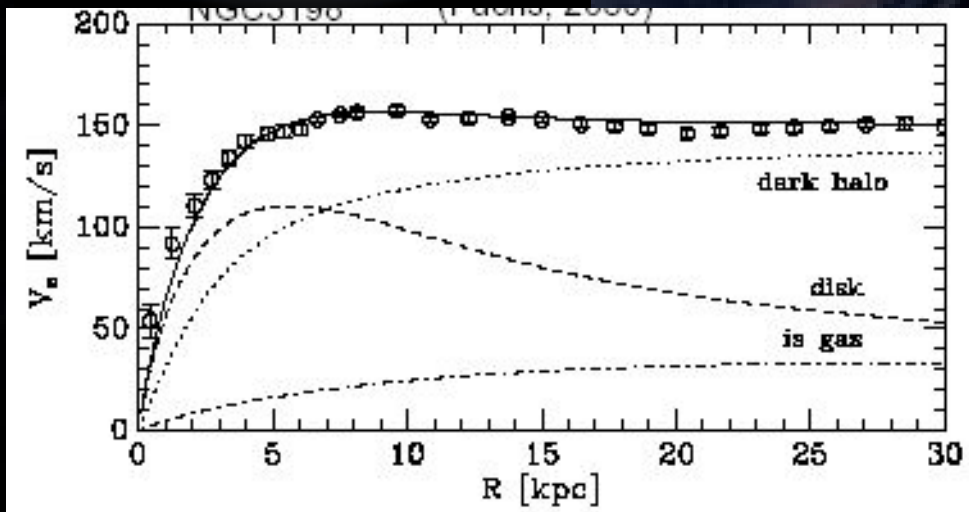
(cf. Bovy & Tremaine, 2012 – arXiv:1205.4033 – pour une mise à jour)

Matière noire dans les galaxies



Vitesse de rotation des étoiles dans une galaxie spirale : devrait décroître rapidement au-delà du bulbe si la matière lumineuse traçait la masse. Or, constante jusqu'à de très grandes distances, par-delà la partie lumineuse..

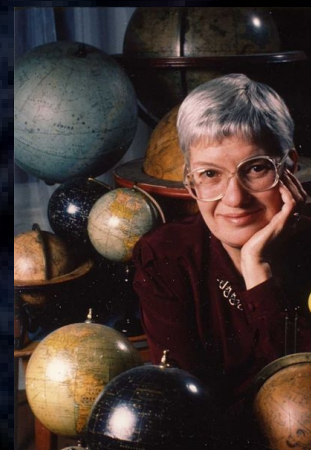
Il existe donc une composante sombre dominante aux grands rayons : une matière sombre distribuée sous la forme d'un halo sphérique permet de reproduire les courbes de rotation observées.



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

Études systématisées par Vera Rubin et al. (1928-2016) dans les années 70.

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{G M(r)}{r}}$$



Virgo Cluster
ROSAT PSPC
> 0.4 keV, smoothed

Q50
star
N4839
M89
M85
Q50
star
M80
R1553
N4325
Q50
star
R1541
N49
Q50
N4301

MPE
all-Sky Survey

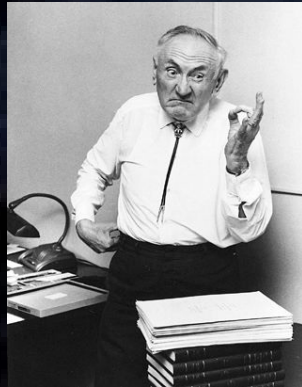
2 deg

Habitants : 100 – 10000 galaxies
Taille : 5 – 10 Mpc (Mpc = million de pc)

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

En 1933, **Fritz 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.

Conclusion de Zwicky :
masse cinématique $\gg$ masse lumineuse



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.

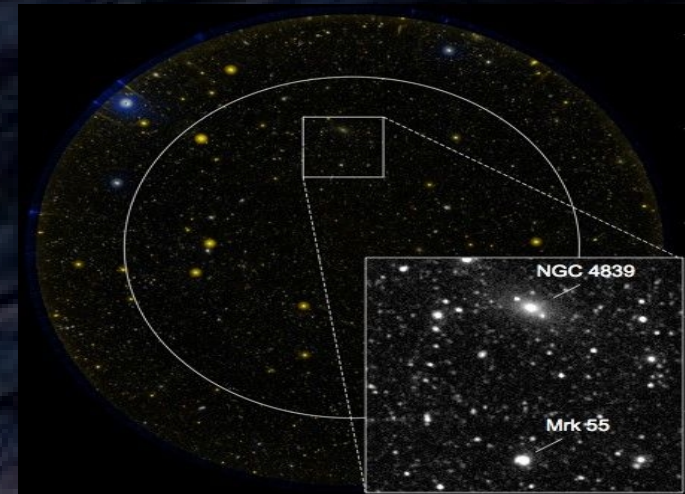
Method iv calls for the observation among nebulae of certain *gravitational lens* effects.

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.

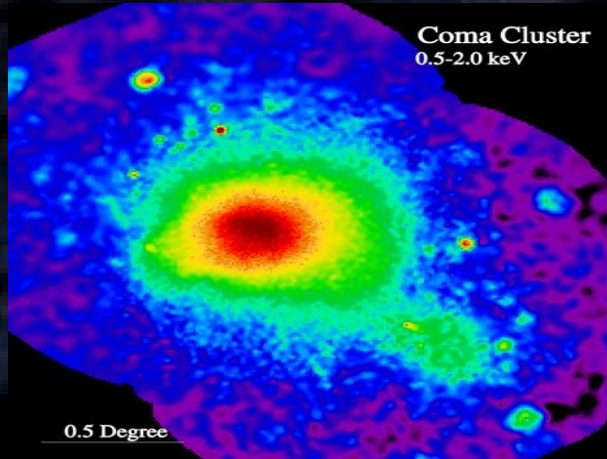
3. Finally, we must know to what extent the apparent luminosity of a given nebula is diminished by the internal absorption of radiation because of the presence of dark matter.

$$\frac{M}{L} > 100 \left[\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \right]$$



Gallex (UV) - NASA

Matière noire dans les amas de galaxies



Résultats des méthodes cinématiques
confirmés par l'analyse du gaz X

$$\frac{dP}{dr} = \frac{d(n k_b T)}{dr} = -\rho_{\text{gas}} \frac{G M_{\text{tot}}(r)}{r^2}$$

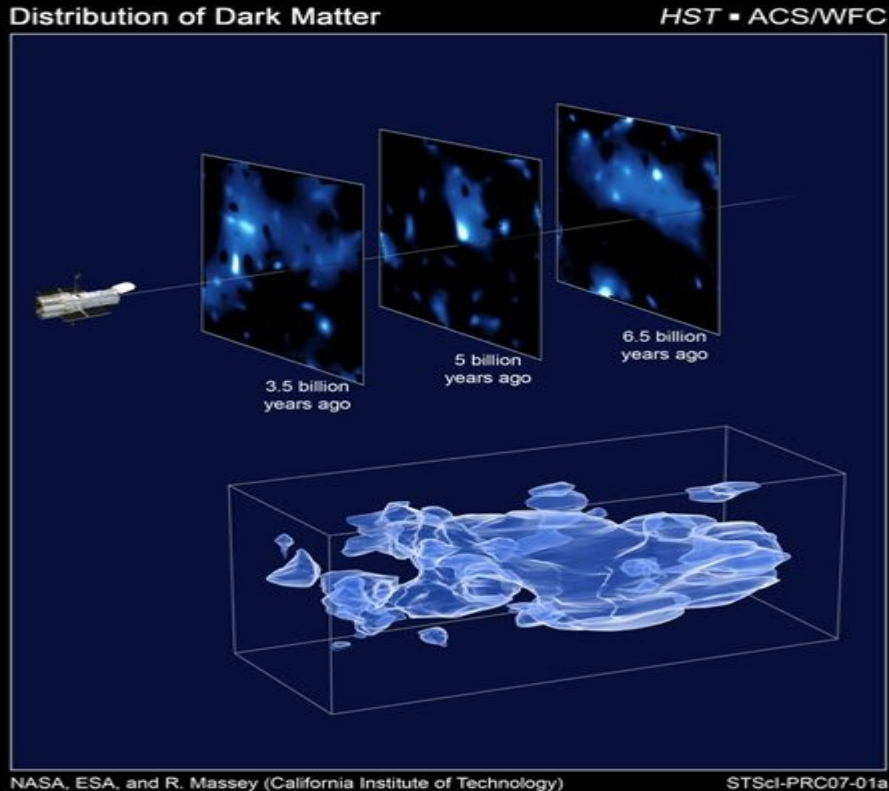


Abel 2218 by HST/NASA

... également par l'étude des lentilles
gravitationnelles (effets purement
relativistes)

La masse sombre est environ
10 fois supérieure à la masse
lumineuse (gaz + galaxies) à
l'échelle des amas de galaxies.

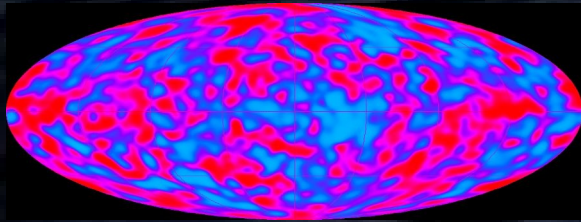
Tomographie de la matière noire



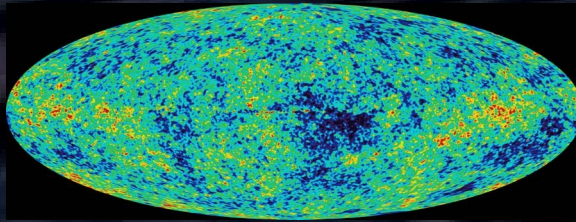
Carte en 3 dimensions réalisée à partir des observations du télescope spatial Hubble combinées avec celle de grands télescopes au sol (VLT, JSHT, VLA) et celles du satellite XMM-Newton, dans le cadre du programme **COSMOS**.

HST + VLT + JSHT + VLA – NASA/ESA

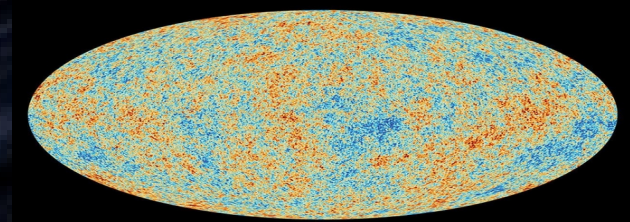
Matière noire à l'échelle cosmologique



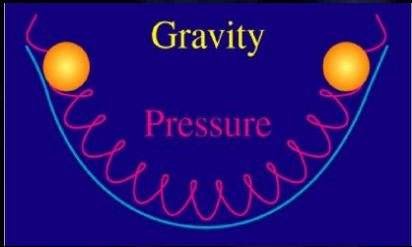
COBE (1992) - NASA



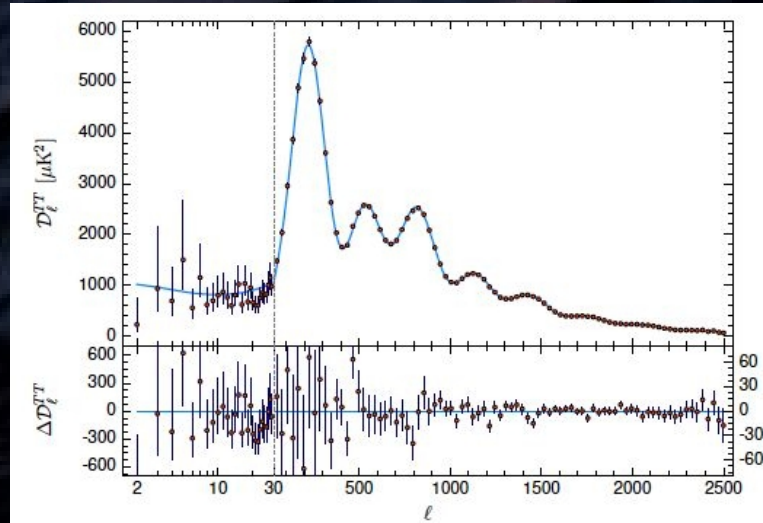
WMAP (2001-2012) - NASA



Planck (2011-2013) - ESA



@ Wayne Hu



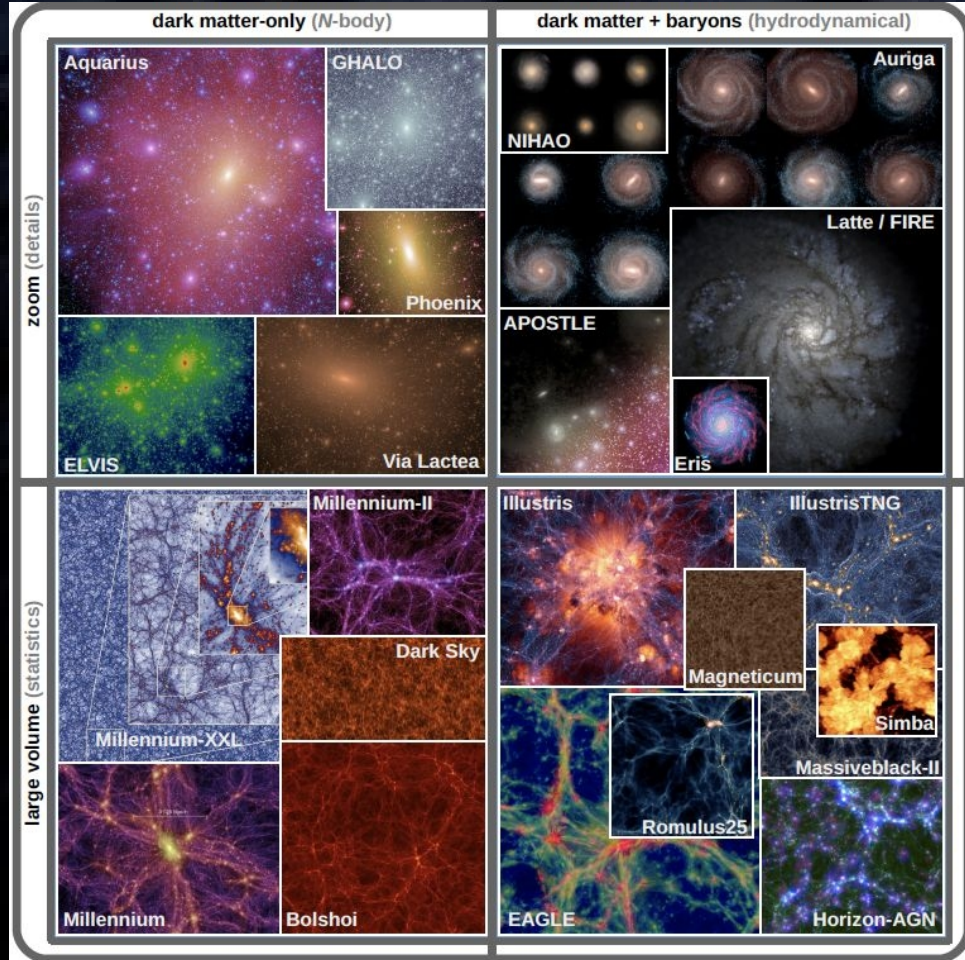
Planck Collab. 2018

Fond diffus cosmologique :
=> mesure l'abondance de matière
=> mesure l'abondance de baryons
*** les deux différent !

La matière ordinaire ne peut pas creuser des puits gravitationnels suffisamment profonds
=> la matière noire est essentielle.

La matière (noire + baryonique) constitue 30% de l'énergie totale de l'univers. Une partie infime est d'origine connue (15%) !

La matière noire est indispensable



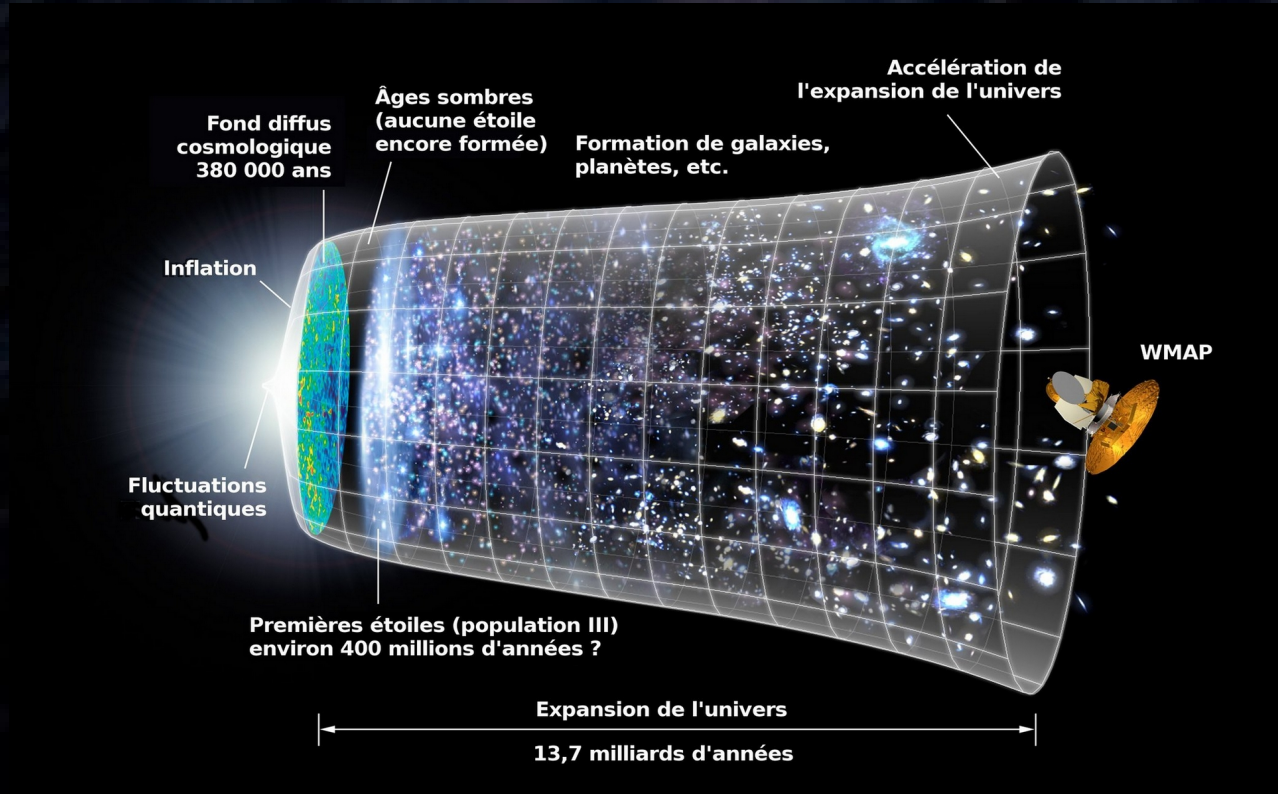
Matière noire : ingrédient essentiel de notre compréhension actuelle de la formation des galaxies, dont elle est le socle.

Joue donc un rôle fondamental à toutes les échelles et à tous les temps cosmiques.

Galaxies : constituées d'un **halo sphérique étendu de matière noire, avec des étoiles et du gaz dans les régions centrales ; les halos ont des propriétés similaires indépendamment de leur masse (plus petits = plus denses), sauf dans les régions très centrales où l'activité « baryonique » peut les altérer.**

→ Explication naturelle des courbes de rotation plates

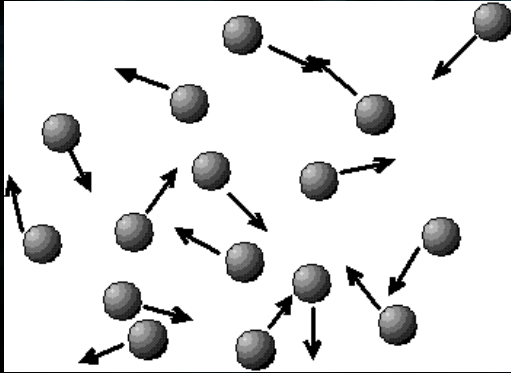
Résumé et chronologie



- Avant l'inflation ? (**Singularité ?**)
- **Inflation** $\sim 10^{-35}$ s + **perturbations cosmologiques**
- Réchauffage et Big Bang chaud, ère de **radiation**
[Plasma rayonnement/matière chaud]
→ **Production de matière noire (froide)**
- **Nucléosynthèse primordiale** 1s-10min
(noyaux légers, H, He, Li)
- Ère de **matière** $\sim 60\,000$ ans
→ **Les fluctuations de matière noire croissent : graines de galaxies**
- **Recombinaison**, premiers atomes + fond diffus micro-onde $\sim 380\,000$ ans
- L'univers est neutre
→ **Le gaz ordinaire s'agglomère dans les galaxies noires qui ont grossi**
- Formation des **premières étoiles** ~ 0.5 -1 milliard d'années + **réionisation**.
- **Les galaxies sont visibles**.
- ...
- **Humanité** ~ 14 milliards d'années.

Notion de matière noire « froide »

Agitation thermique d'un gaz :
Notion de température pour
l'équilibre thermique



Abus de langage :
On dit “froid”, mais on veut en réalité dire “lent”.

$$\boxed{T} = \frac{m_\chi \langle v^2 \rangle}{3} \longrightarrow \langle v^2 \rangle = 3 \frac{\boxed{T}}{m_\chi}$$

T : température du plasma (photons) durant le contact thermique

Plus massive $\Rightarrow$ plus lente (barbarisme : plus froide)

$$\langle v^2 \rangle \propto T \propto 1/a \xrightarrow{\text{découplage thermique}} \langle v^2 \rangle \propto 1/a^2$$

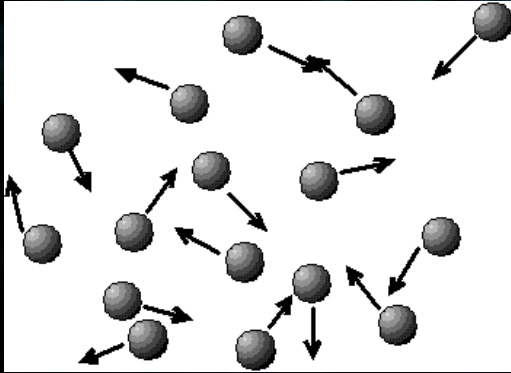
Vitesse x Temps caractéristique = distance caractéristique

$$\lambda_{\text{fs}} \approx v_{\text{kd}} (a_{\text{kd}} / a_{\text{eq}}) / H_{\text{eq}}$$

Diminue quand la masse de la particule augmente (fermion ou boson).

Notion de matière noire « froide »

Agitation thermique d'un gaz :
Notion de température pour
l'équilibre thermique



Abus de langage :
On dit “froid”, mais on veut en réalité dire “lent”.

$$\boxed{T} = \frac{m_\chi \langle v^2 \rangle}{3} \longrightarrow \langle v^2 \rangle = 3 \frac{\boxed{T}}{m_\chi}$$

T : température du plasma (photons) durant le contact thermique

Plus massive $\Rightarrow$ plus lente (barbarisme : plus froide)

$$\langle v^2 \rangle \propto T \propto 1/a \quad \xrightarrow{\text{découplage thermique}} \quad \langle v^2 \rangle \propto 1/a^2$$

Vitesse x Temps caractéristique = distance caractéristique

$$\lambda_{\text{fs}} \approx v_{\text{kd}} (a_{\text{kd}} / a_{\text{eq}}) / H_{\text{eq}}$$

Diminue quand la masse de la particule augmente (fermion ou boson).

Notion de matière noire « froide »

Vitesse x Temps caractéristique = distance caractéristique

$$\lambda_{\text{fs}} \approx v_{\text{kd}} (a_{\text{kd}} / a_{\text{eq}}) / H_{\text{eq}}$$

Diminue quand la masse de la particule augmente (fermion ou boson).



Notion de matière noire « froide »

Vitesse x Temps caractéristique = distance caractéristique

$$\lambda_{\text{fs}} \approx v_{\text{kd}} (a_{\text{kd}} / a_{\text{eq}}) / H_{\text{eq}}$$

Diminue quand la masse de la particule augmente (fermion ou boson).



fluctuations
de différentes tailles

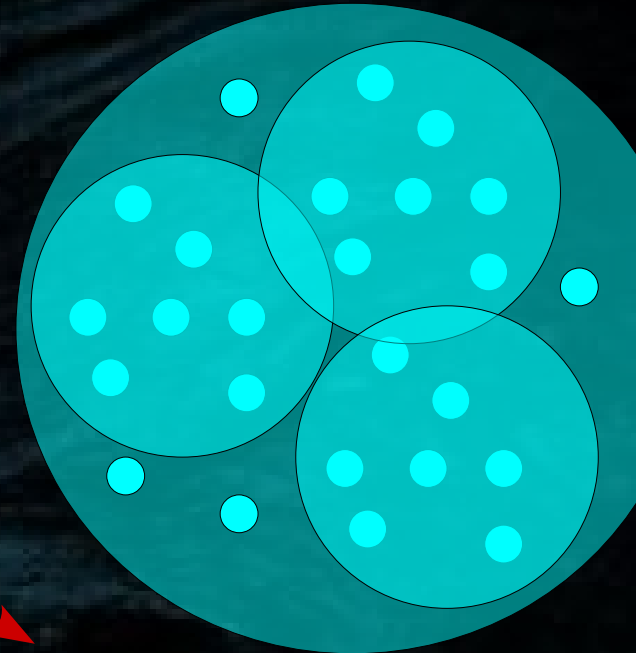
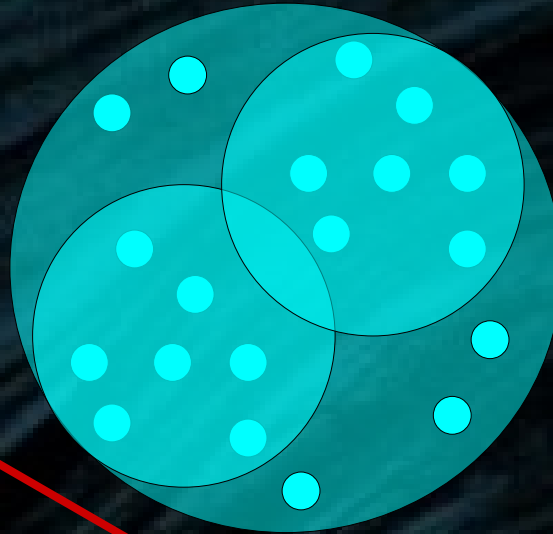
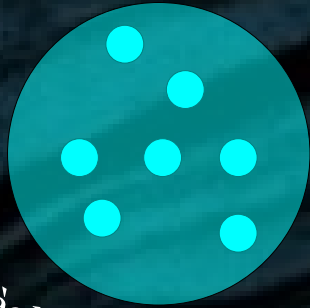
évolution ...



Il s'agit d'un filtre en taille de perturbations :
Les plus petites sont lissées, les plus grosses peuvent croître
(similaire à l'échelle de Jeans)



Notion de matière noire « froide »



Flèche du temps

Principe de formation hiérarchique :

- Les petites structures d'abord (les plus denses)
- qui tombent dans des plus grosses et les font croître
- et ainsi de suite ...

=> La matière noire doit être suffisamment lente (froide)

Qu'est-ce que la matière noire ?

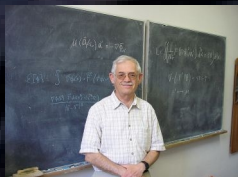
Qu'est-ce que la matière noire ?

- Modifications des lois de la gravité ? (cf. le cas « Mercure »)
- Une nouvelle forme de matière ? (cf. le cas « Neptune »)

Vers une nouvelle théorie de la gravitation ?



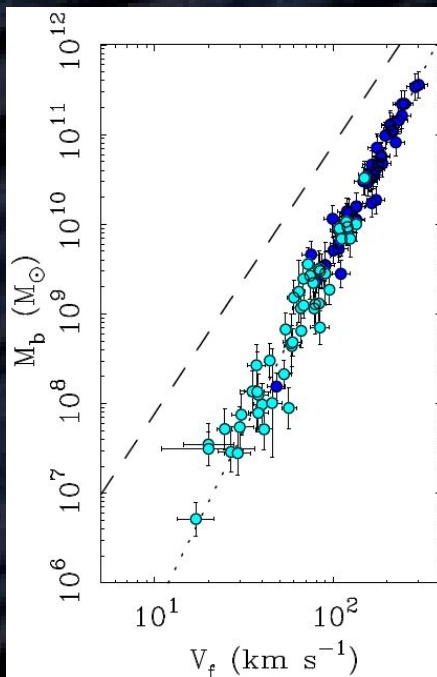
M. Milgrom



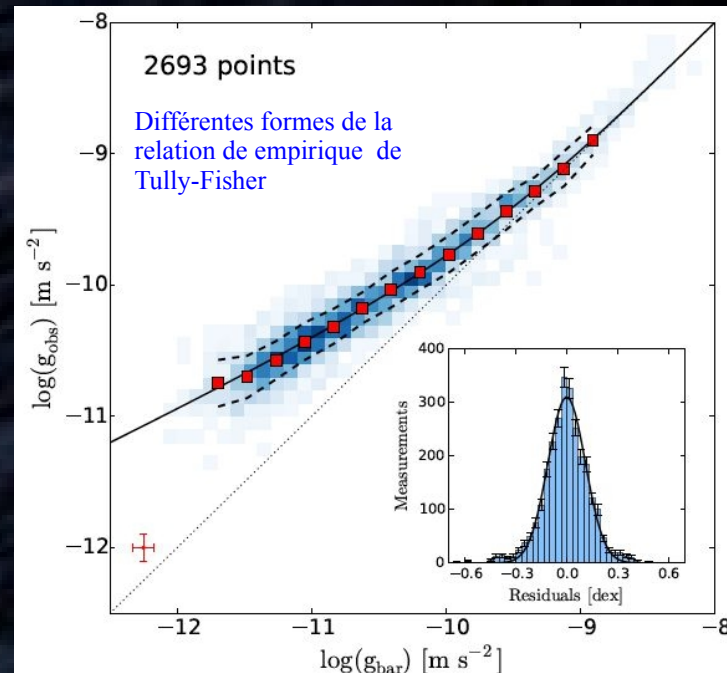
J. Beckenstein



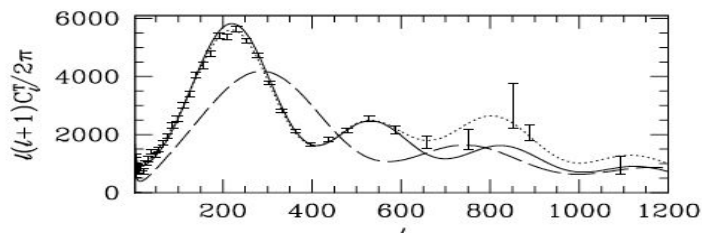
C. Skordis



Famaey+'12



McGaugh+'16



Skordis+'06

Courbes de rotation plates :

- Peuvent être expliquées en **modifiant la 2^{de} loi de Newton (MOND)**, de sorte que les baryons suffiraient => Tully-Fisher.
- **Ne fonctionne plus à des échelles plus grandes + problèmes cosmologiques majeurs (e.g. formation des structures incohérente).**
- Formulation relativiste très (trop ?) complexe.
- Alternative à une nouvelle forme de matière toujours explorée.

Pourquoi de nouvelles particules ?

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z^0 boson Z^0	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	$W^\pm$ boson $W^\pm$	

@Wikipedia

Propriétés de particules de matière noire ?

- massives
- interagissant faiblement avec la matière ordinaire
- « froide » dans l'univers primordial (?)

Modèle standard des particules élémentaires :

Matière = fermions (leptons+quarks)

Forces = bosons vecteurs (photons, gluons, Z, W)

Masse $\sim$ couplage au boson scalaire de Higgs

=> Description complète des particules connues et de leurs interactions fondamentales hors gravitation.

→ Rien ne correspond aux propriétés désirées ...

→ Il faudrait un neutrino ... mais bien plus lourd !

Pourquoi étendre le modèle standard ?

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	BOSONS DE JAUGE
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z^0 boson Z^0	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	$W^\pm$ boson $W^\pm$	

@Wikipedia

Les limites du modèle standard :

- N'explique pas l'asymétrie matière/antimatière
- Absence d'un terme permis dans la description des interactions fortes (pb dit de CP fort)
- Hiérarchie des masses
- Métastabilité du vide électrofaible (Higgs)
- Problème de la gravitation quantique
- etc.

=> Fortes motivations pour étendre ce modèle.
Q : Une théorie plus fondamentale contient-elle naturellement de la matière noire ?

la réponse est « possiblement »

Des candidats exotiques ?

MN thermique (hors neutrinos)
[production très simple]
[1 keV – 100 TeV]

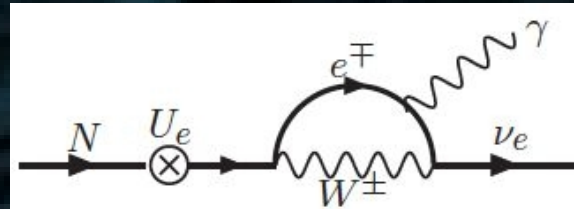
WIMPs, FIMPs, asymétrique, etc.



- photons (MeV-TeV)
- neutrinos (keV-TeV)
- antimatière cosmique
- radio+X (émission secondaire)

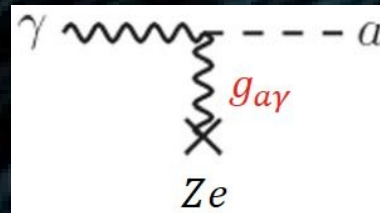
Neutrinos stériles
[asymétrie matière-antimatière – lien indirect]
[1 – 50 keV]

(production par mélange aux neutrinos actifs)



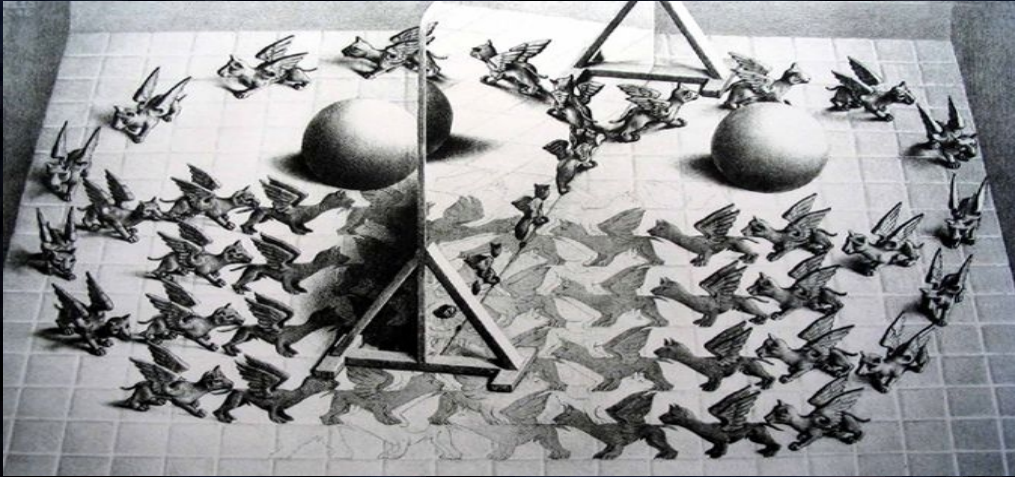
- raie X (1-50 keV)

Axions (QCD)
[Pb de CP fort]
[1 μ eV – 1 meV]
[$\leftrightarrow$ pour axions non-QCD]



- conversion axion $\leftrightarrow$ photon dans champs magnétiques (e.g. blazars ou SN)
[Calore+'20-'21]

Intermède supersymétrique



- Deux types de particules élémentaires 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 :

SUSY (FERMION) = BOSON
SUSY (BOSON) = FERMION

Avantages :

- * stabilisation du mécanisme de Higgs (pré-LHC)
- * unification possible des interactions
- * cadre théorique incluant la gravité
- * candidats matière noire + inflation

Prédictions :

- * **de nouvelles particules**
- * **une particule stable (la plus légère) : elle pourrait caractériser la matière noire !**
(e.g. neutralino, gravitino)

[+ dimensions supplémentaires → théorie des cordes]



J. Wess



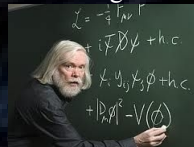
R. Zumino



H. Pagels

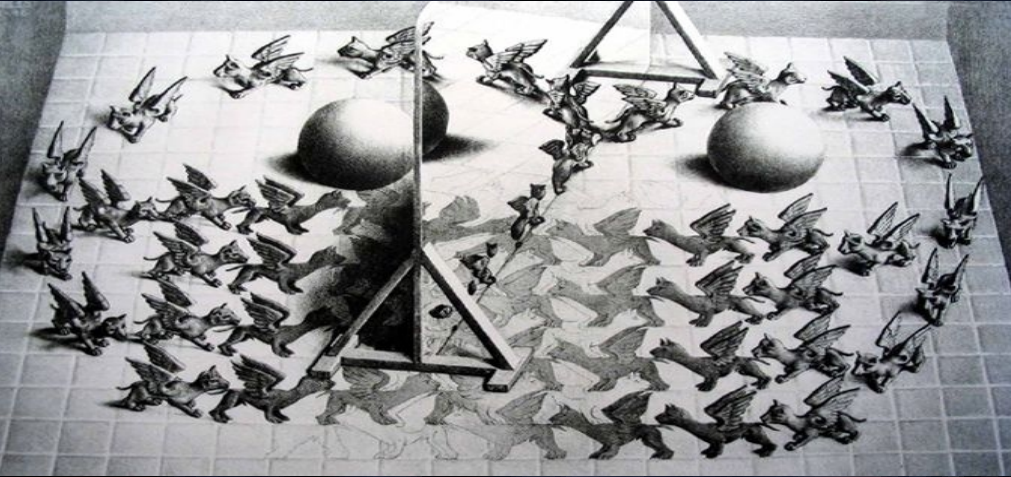


J. Primack



P. Fayet

Intermède supersymétrique



J. Wess



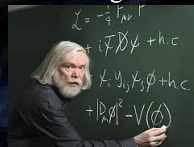
R. Zumino



H. Pagels



J. Primack



J. Ellis



P. Fayet

Deux types de particules élémentaires dans la nature :

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

La supersymétrie relie ces deux types de particules :

SUSY : B = BOSON
F = FERMION

Avantages :

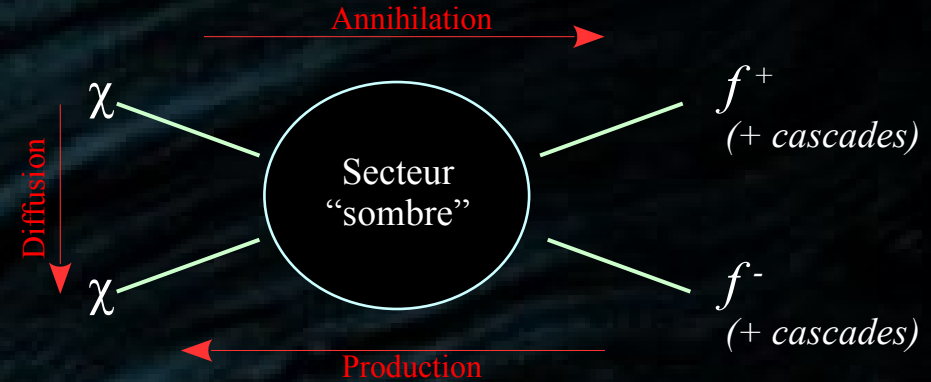
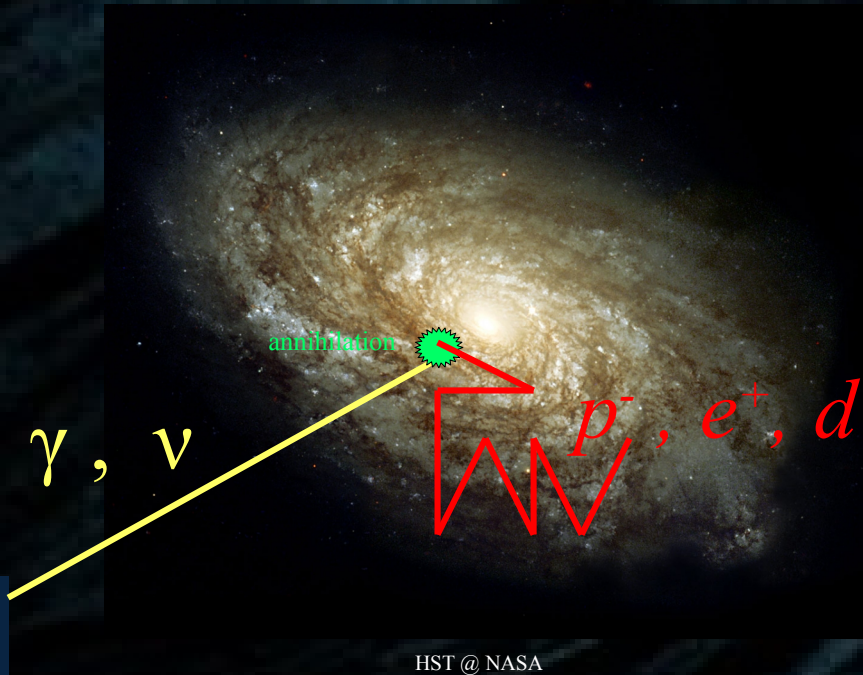
- * stabilisation du boson de Higgs (pré-LHC)
- * unification possible des constantes de couplage
- * cadre théorique incluant la gravité
- * candidats matière noire +

Prédictions :

- * de nouvelles particules
- * une particule stable (la plus légère) : elle pourrait caractériser la matière noire ! (e.g. neutralino, gravitino)

[+ dimensions supplémentaires → théorie des cordes]

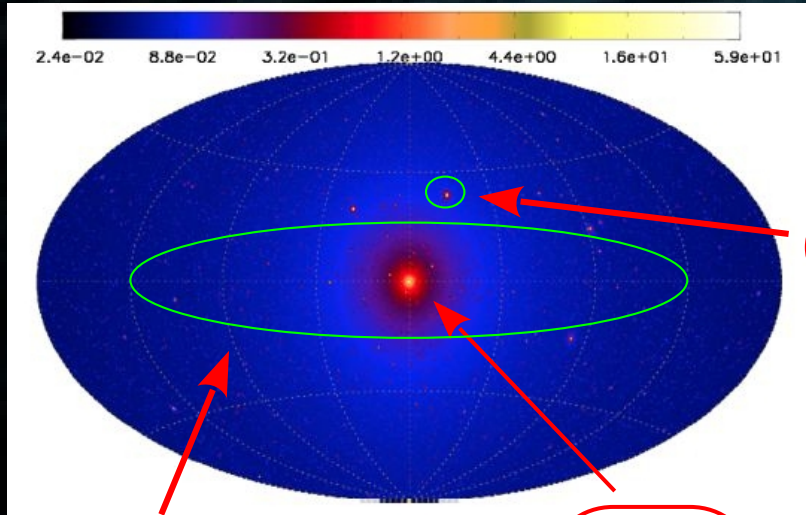
Recherches de particules de matière noire



Recherches de traces d'annihilations
(i) à la recombinaison (excellente précision)
(ii) dans le rayonnement gamma, neutrino, ou d'antimatière cosmique, en direction de cibles concentrées (galaxies) – plus sensibles aux incertitudes astrophysiques.

Annihilation de WIMPs en gamma

Pieri, JL+ '11



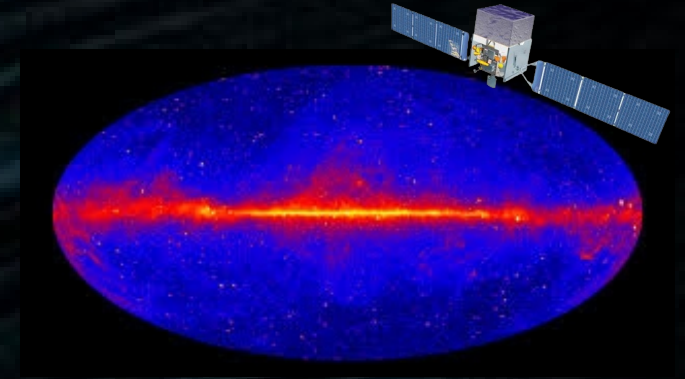
Grosses sous-structures
(galaxies naines satellites)

Émission
diffuse

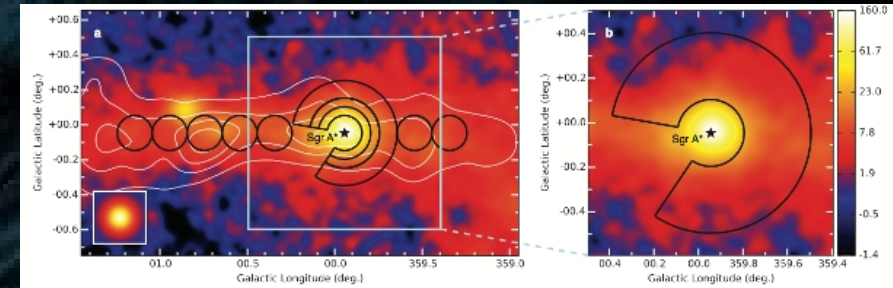
Centre
galactique

Mode opératoire :

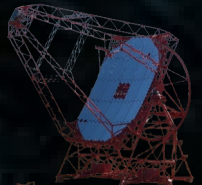
- Bien modéliser le/s halo/s de MN (incertitudes)
- Comprendre les avants-plans (origine astrophysique)
- Maximiser signal/bruit => galaxies naines
- Limites si fond astrophysique non-maîtrisé



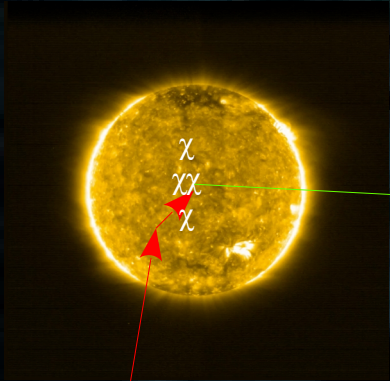
Carte du ciel Fermi-LAT @ NASA (12 ans)



Centre galactique observé par HESS
@ Collab. HESS-II

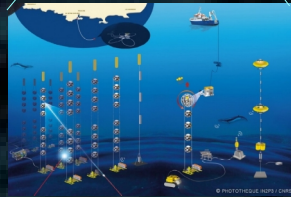
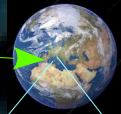


Autres types de recherche

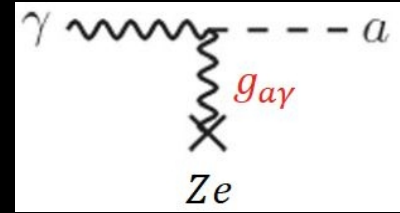


Neutrinos en direction du soleil
ANTARES + KM3NET

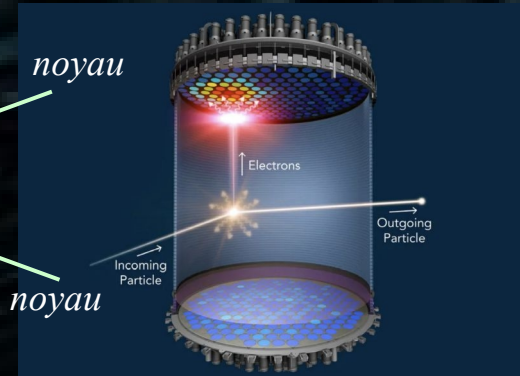
ν



Les **axions** peuvent se convertir
en photons dans des champs
magnétiques intenses

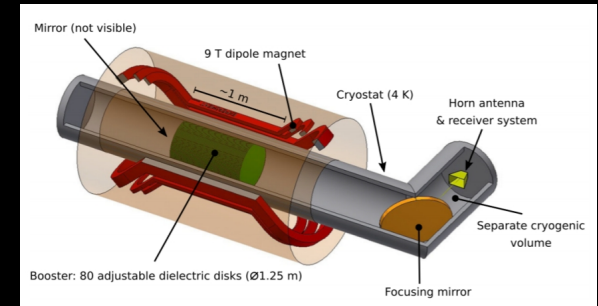


Les **WIMPs** interagissent
faiblement avec la matière :
collisions sur noyaux possibles



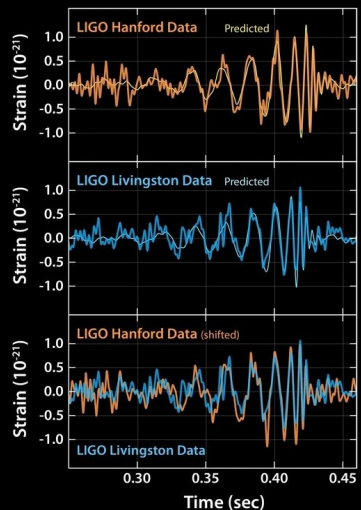
Principe des expériences XENON1t et DARKSIDE-20k

Principe de l'expérience
MADMAX



Un éléphant dans la pièce (vraiment?)

LIGO+VIRGO '15-16



Did LIGO detect dark matter?

Simeon Bird,^{*} Ilias Cholis, Julian B. Muñoz, Yacine Ali-Haïmoud, Marc Kamionkowski, Ely D. Kovetz, Alvise Raccanelli, and Adam G. Riess¹

¹*Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University,
3400 N. Charles St., Baltimore, MD 21218, USA*

arXiv:1603.00464 (PRL)

Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914

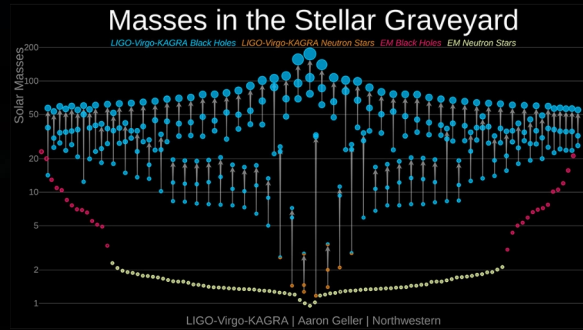
Misao Sasaki,¹ Teruaki Suyama,² Takahiro Tanaka,^{3,1} and Shuichiro Yokoyama⁴

arXiv:1603.08338 (PRL)

GRAVITATIONALLY COLLAPSED OBJECTS OF VERY LOW MASS

Mon. Not. R. astr. Soc. (1971) **152**, 75–78.

Stephen Hawking



LIGO/VIRGO/KAGRA (O3)

arXiv:2111.03606 – 2111.03634

Julien Lavalle, Cycle de Conférences du CPPM

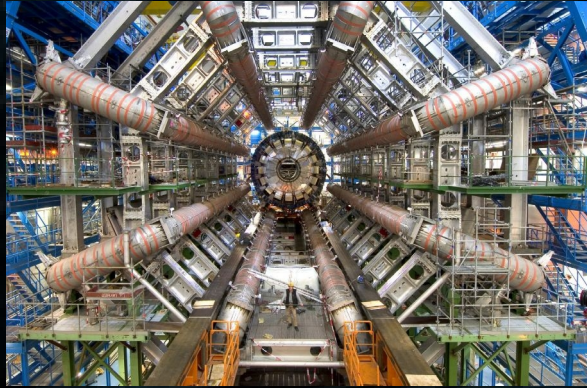


Des trous noirs peuvent avoir été formés dans des phases très primordiales de l'univers, juste après l'inflation ... qui pourraient être la matière noire ...

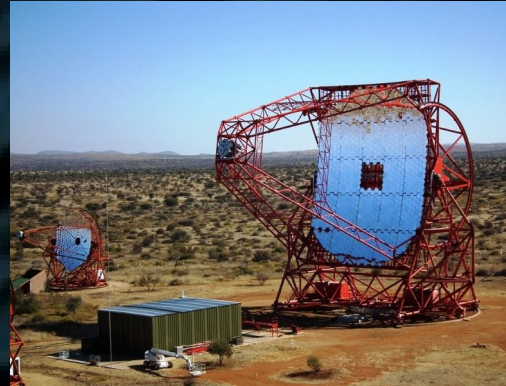
Masse : astéroïde ou étoile ... taille ?

NB : Les trous noirs primordiaux sont une découverte théorique des Russes Zel'dovich & Novikov ('66) et du Britannique Hawking ('71).

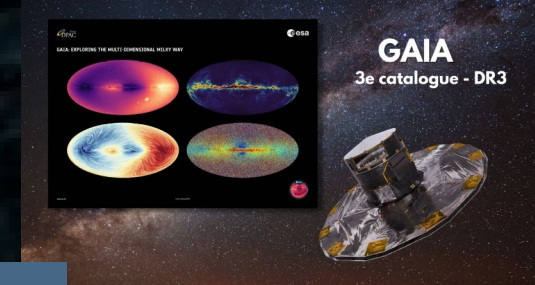
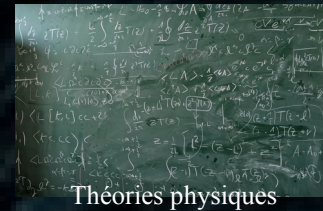
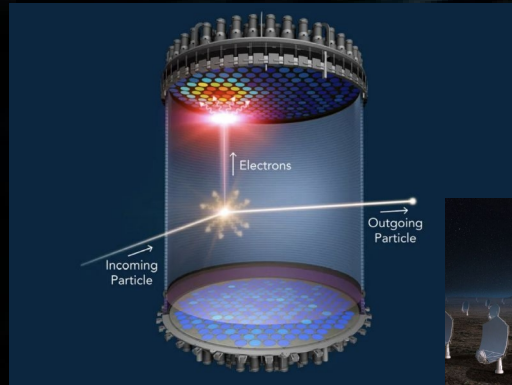
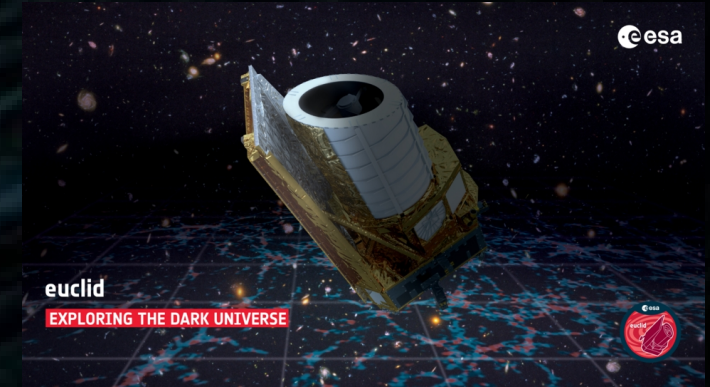
Les recherches expérimentales et observationnelles



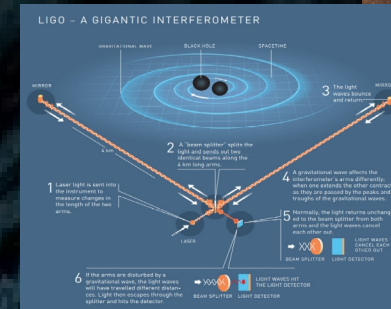
ATLAS@LHC@CERN



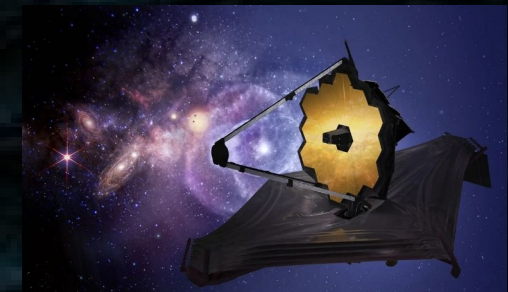
HESS2/CTA



SKA



LIGO/VIRGO



James Webb

Conclusion

La matière noire est observée à toutes les échelles de l'univers par ses effets gravitationnels

**Elle est une brique essentielle du modèle standard cosmologique
(anisotropies du fond diffus, formation des galaxies)**

Plusieurs propositions théoriques co-existent : extensions par-delà la physique standard (par ex. nouvelles particules, trous noirs primordiaux)

**Très fort engouement international dans le but de valider ou falsifier ces pistes expérimentalement ou observationnellement
→ grande complémentarité des différentes approches**

Notre quête de compréhension de l'univers, de son histoire, et de ses constituants se poursuit : les prochaines années s'annoncent passionnantes !

Si cela vous tente ... engagez vous !!!!

(métiers de la recherche + science participative)

La recherche fondamentale



La recherche fondamentale : gestionnaires, technicien.ne.s, ingénieur.e.s, chercheur.se.s ... chacun.e peut trouver sa place !

