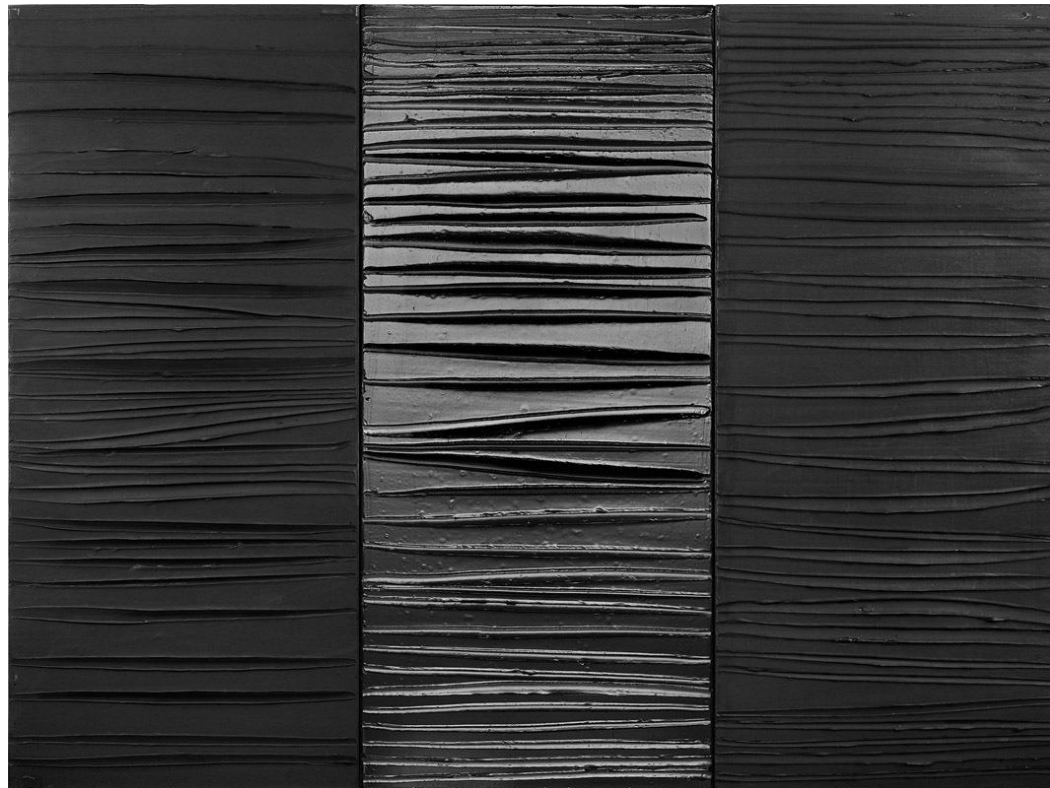


La matière noire

Une énigme de la cosmologie contemporaine

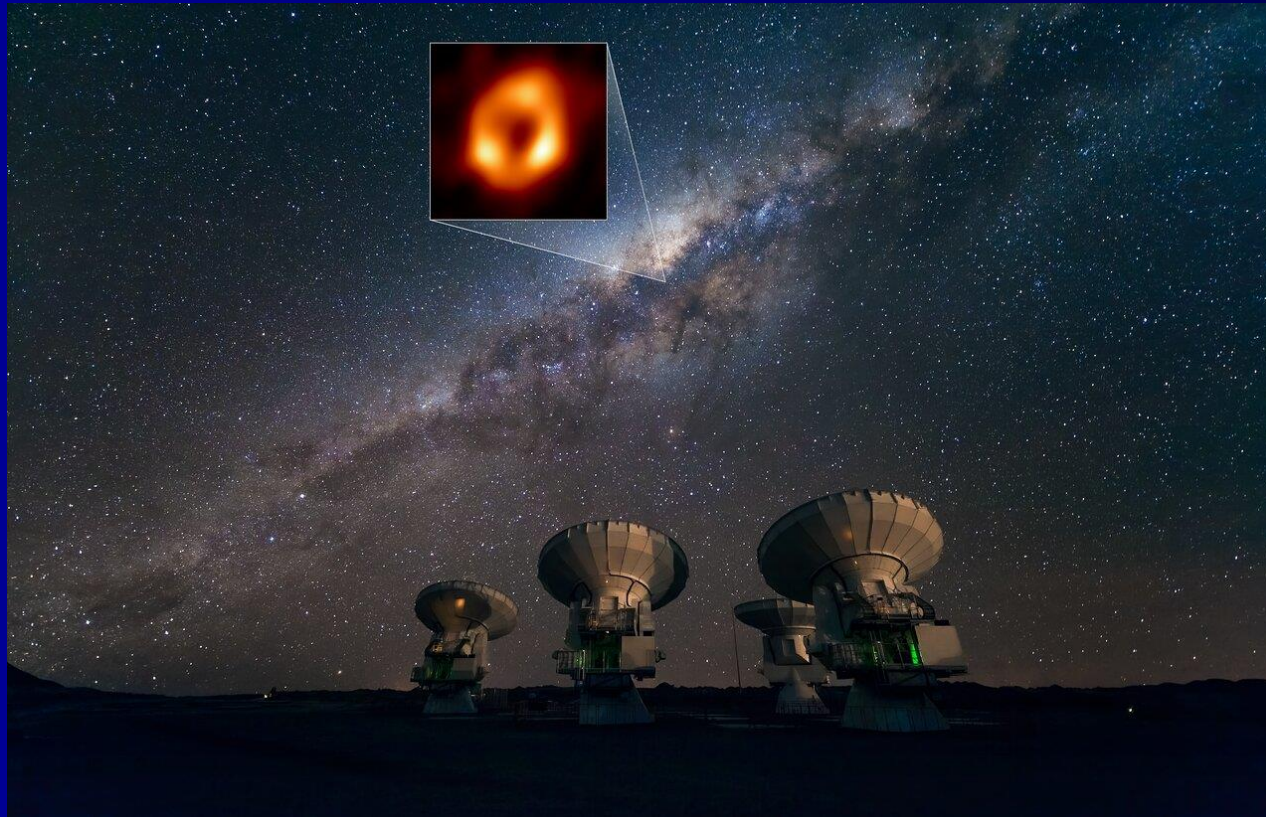


Plan de l'exposé

1. **Un problème de « masse manquante »**
 - a. Les amas galactiques
 - b. Les galaxies spirales
2. **Solution ontologique: la matière noire froide**
 - a. Les MACHOs
 - b. Les WIMPs
 - c. Les axions
3. **Solution législative: la théorie MOND**
 - a. Un précédent: l'orbite de Mercure
 - b. La formule MOND
 - c. Au-delà de MOND

Conclusion

1. Un problème de « masse manquante »



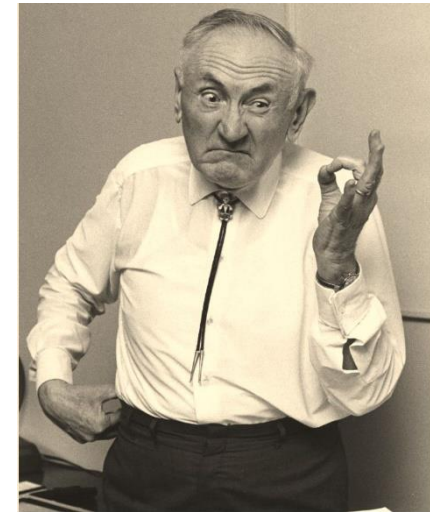
Comment peser un amas ?

- En 1933, Fritz Zwicky étudie le rapport masse-luminosité de l'amas de la Chevelure de Bérénice, situé à 336 millions d'AL. Comme ce sont essentiellement les étoiles (objets lumineux les plus massifs) qui doivent contribuer à ce rapport, on s'attend à:

$$\frac{M}{L} \sim \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$$

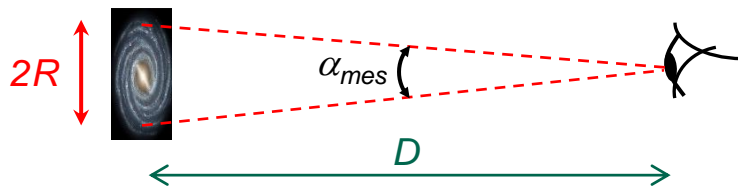
- En considérant que l'amas se comporte comme un « gaz de galaxies » à l'équilibre, Zwicky applique le **théorème du viriel**:

$$2\langle E_c \rangle + \langle E_p \rangle = 0 \Rightarrow M \langle V^2 \rangle - \frac{3GM^2}{5R} = 0 \Rightarrow M = \frac{5R}{3G} \langle V^2 \rangle$$



Fritz Zwicky

- R est obtenu en mesurant le diamètre angulaire α de l'amas:



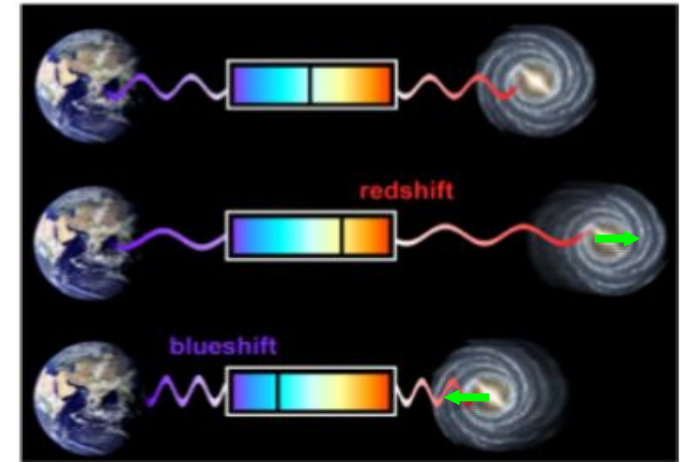
$$\alpha_{mes} \approx \frac{2R}{D} \Rightarrow R = \frac{\alpha_{mes} \times D}{2} \approx 2.10^6 \text{ AL}$$

Parallaxe, loi de Hubble...

La mesure Doppler

- La mesure de $\langle V^2 \rangle$ se fait par voie optique, en déterminant les vitesses des galaxies de l'amas par **effet Doppler**: la longueur d'onde apparente du signal émis par une source en mouvement par rapport à l'observateur dépend de sa vitesse relative selon:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{V}{c}$$



Effet Doppler optique

- Pour la gamme visible, Zwicky trouve: $\langle V^2 \rangle \approx 5.10^5 \text{ km}^2 \cdot \text{s}^{-2} \Rightarrow M \approx 7.10^{13} M_{\odot}$ ($1M_{\odot} = 2.10^{30} \text{ kg}$)
- La luminosité de l'amas est mesurée à $L_{mes} \approx 8,5.10^{10} L_{\odot}$, soit un rapport masse/luminosité:

$$\frac{M}{L_{mes}} \approx 800 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \gg \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \Rightarrow$$

Découverte d'une masse invisible

“If this should be verified, it would lead to the surprising result that dark matter exists in much greater density than luminous matter.” (F Zwicky)

mais...

Year	No. citations
1955-59	2
1960-64	6
1965-69	5
1970-74	2
1975-89	63 ^a
1990-99	71

Nombre de citations de l'article de Zwicky

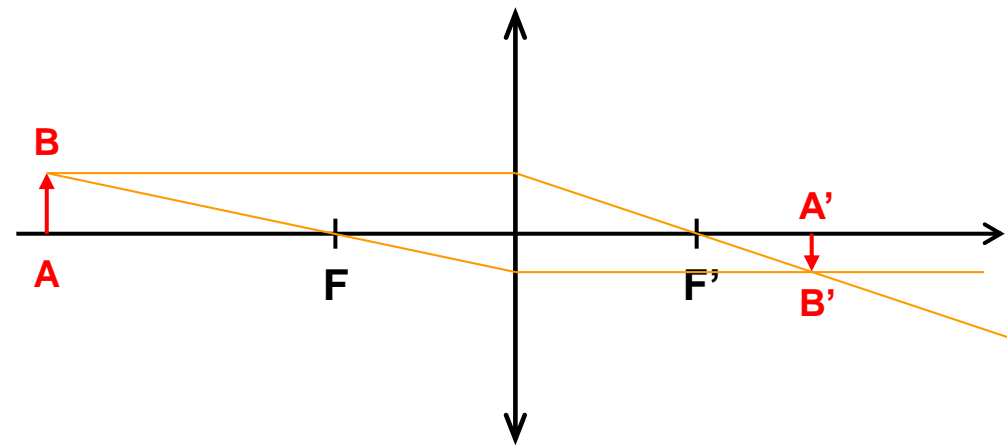
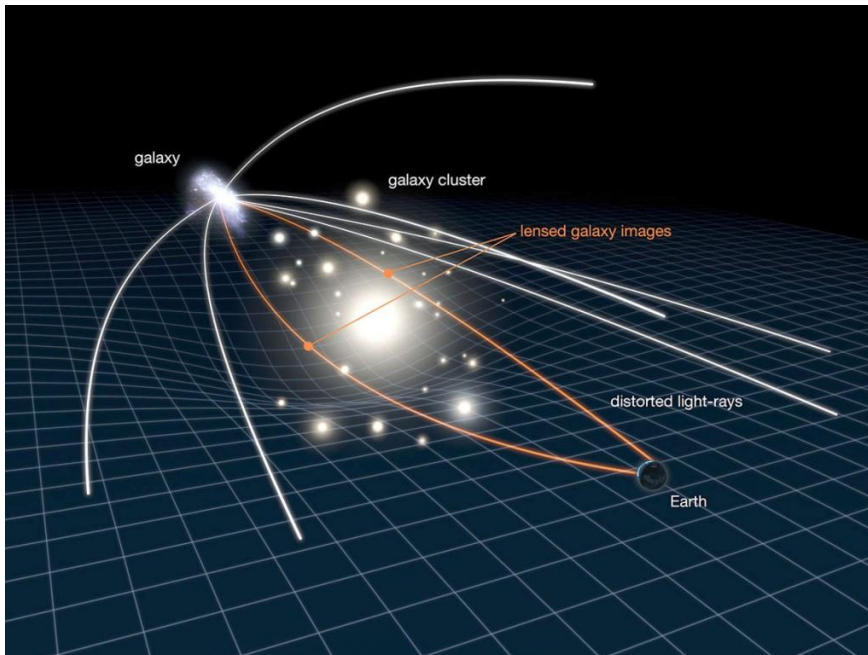
Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
Les galaxies spirales

Les lentilles gravitationnelles

- Relativité générale = tout corps suffisamment massif courbe l'espace-temps. La lumière va aussi ressentir les effets de cette chronogéométrie courbe = effet de lentille gravitationnel.

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$



Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
 Les galaxies spirales

Les lentilles gravitationnelles

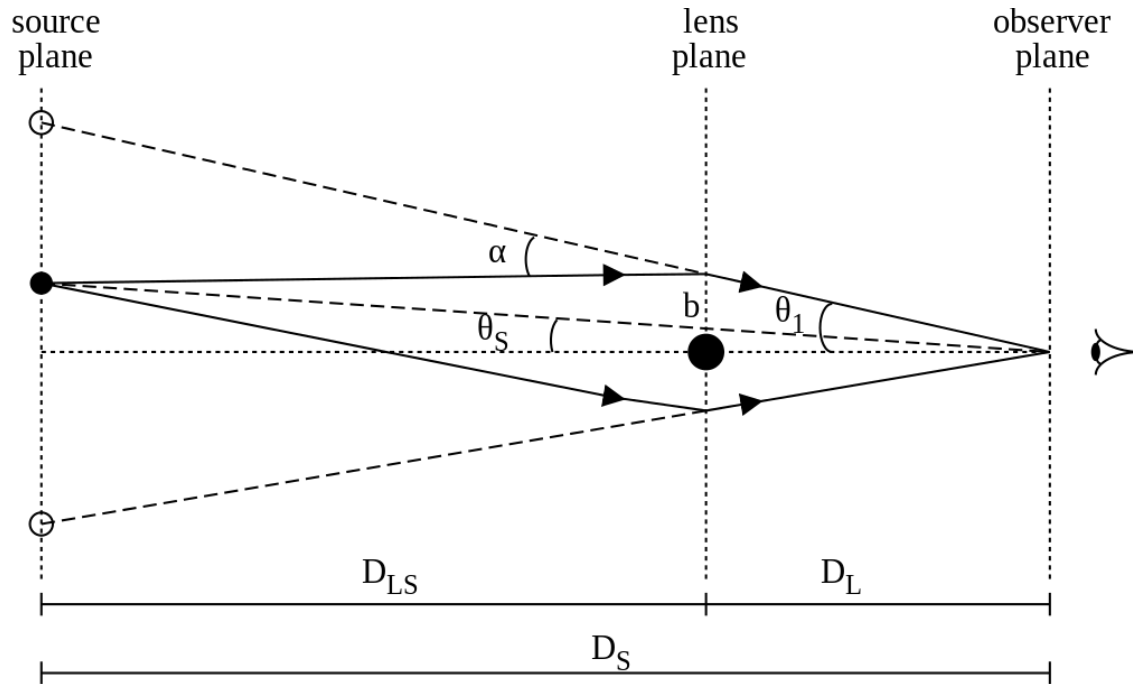
- Relativité générale = tout corps suffisamment massif courbe l'espace-temps. La lumière va aussi ressentir les effets de cette chronogéométrie courbe = effet de lentille gravitationnel.

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma_{\rho\sigma}^\mu \frac{dx^\rho}{d\lambda} \frac{dx^\sigma}{d\lambda} = 0$$

Equation des géodésiques

$$\frac{d\varphi}{dr} = \pm \frac{1}{r^2} \left[\frac{1}{\xi^2} - \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right) \right]^{-1/2}$$

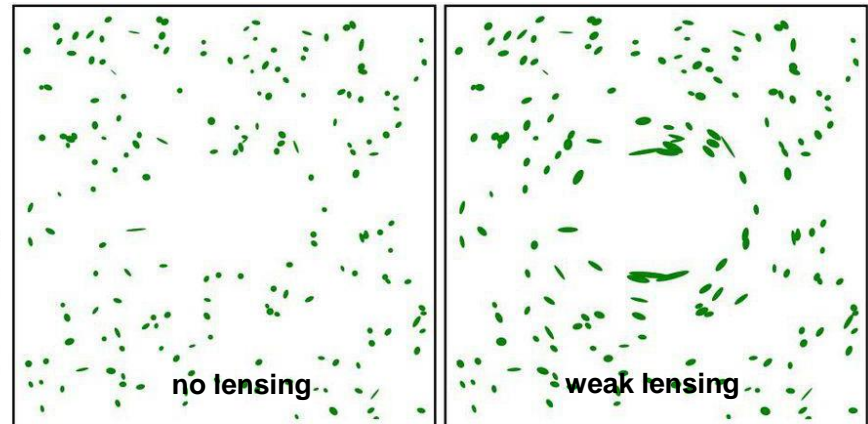
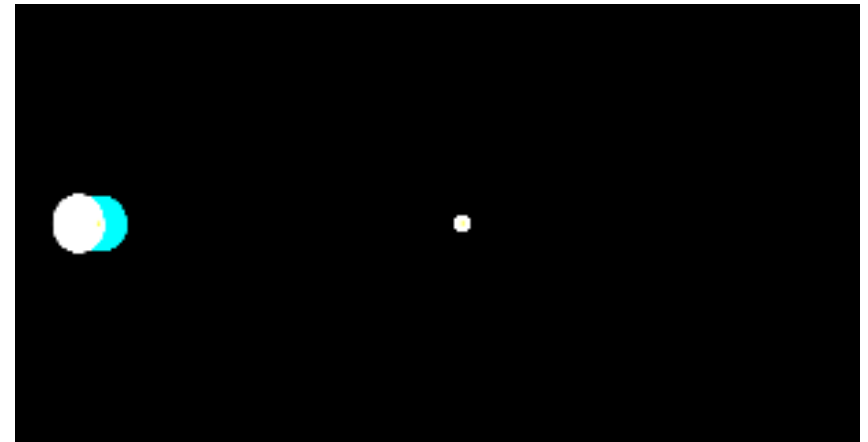
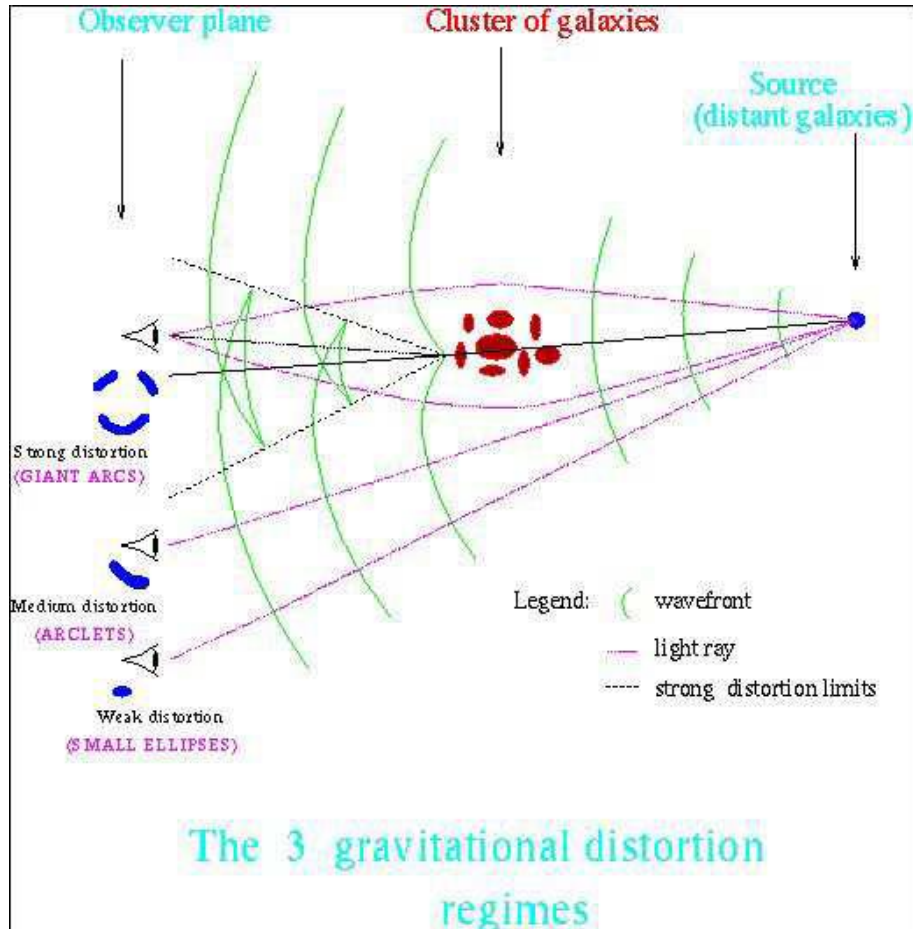


$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GMD_{LS}}{D_L D_S c^2}}$$

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
Les galaxies spirales

Les lentilles gravitationnelles

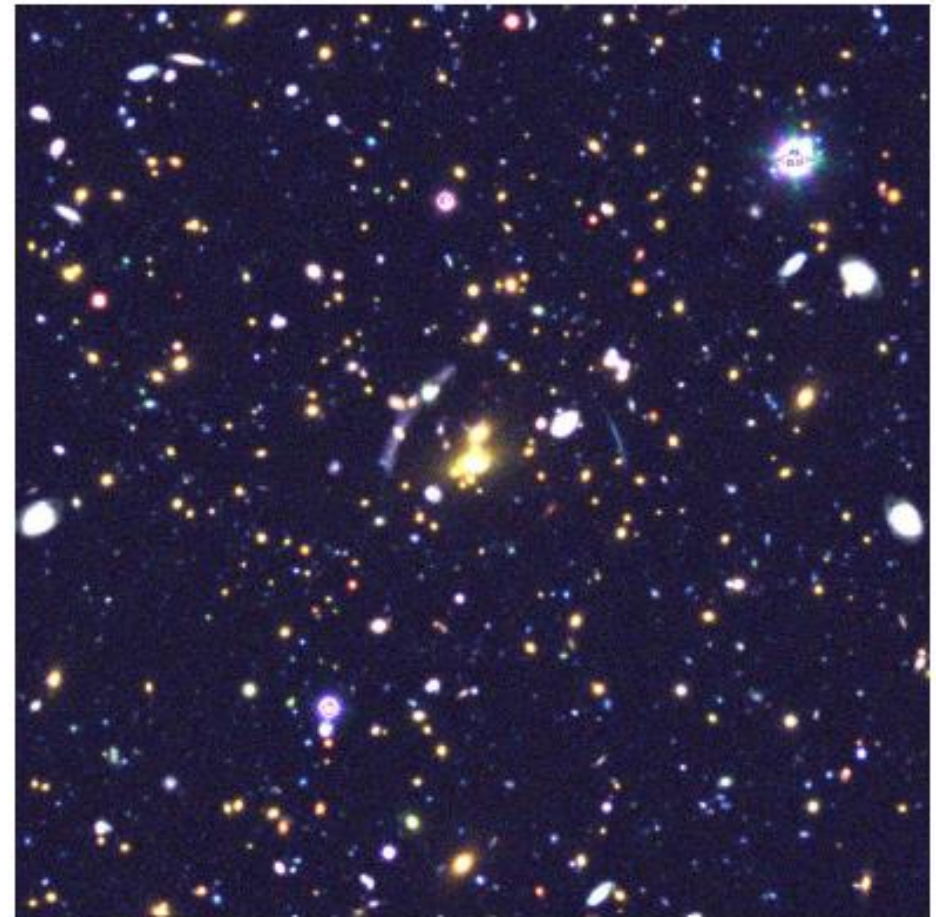
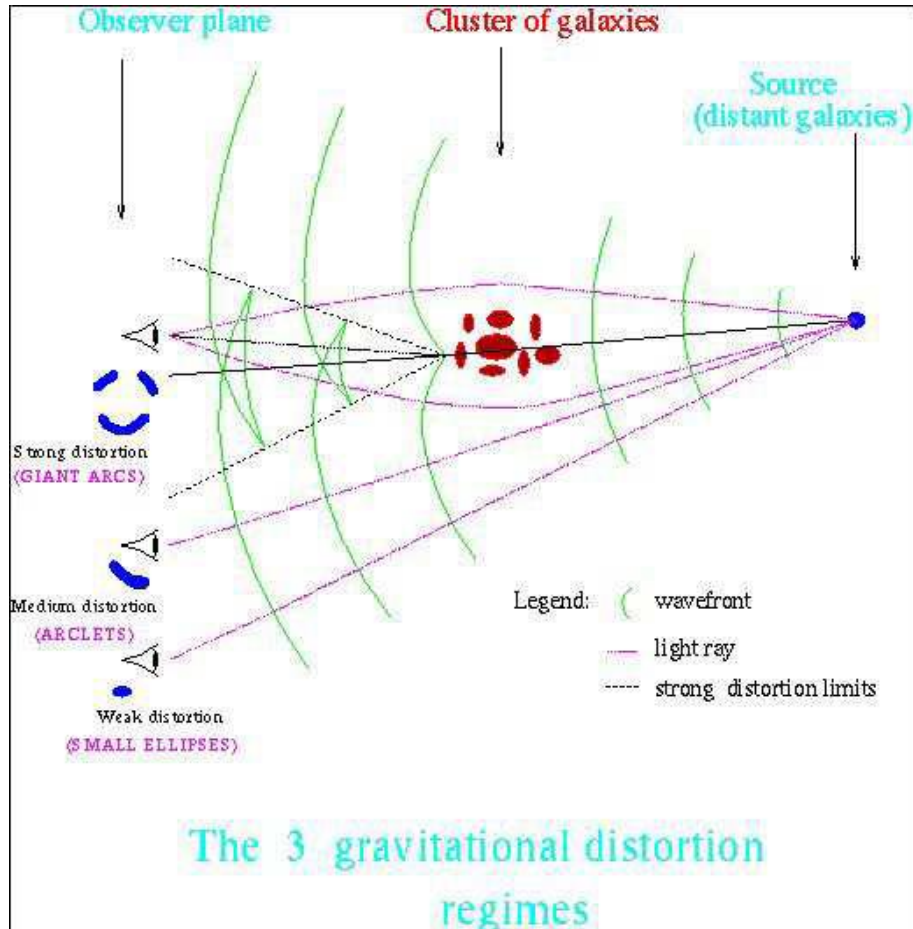


Prédictions de la relativité générale

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
Les galaxies spirales

Les lentilles gravitationnelles

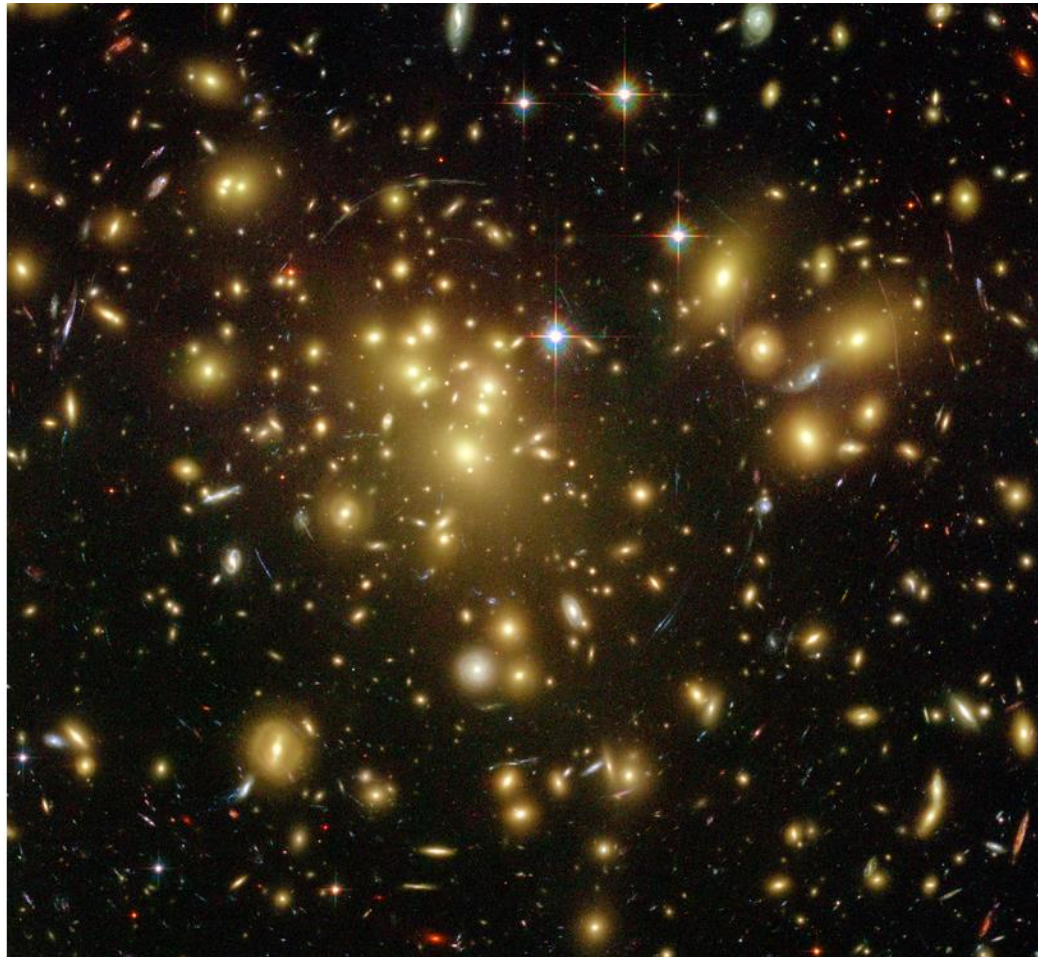


Li, N. et al. *The Astrophysical Journal* 828.1 (2016)

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
Les galaxies spirales

Exemple: l'amas Abell 1689

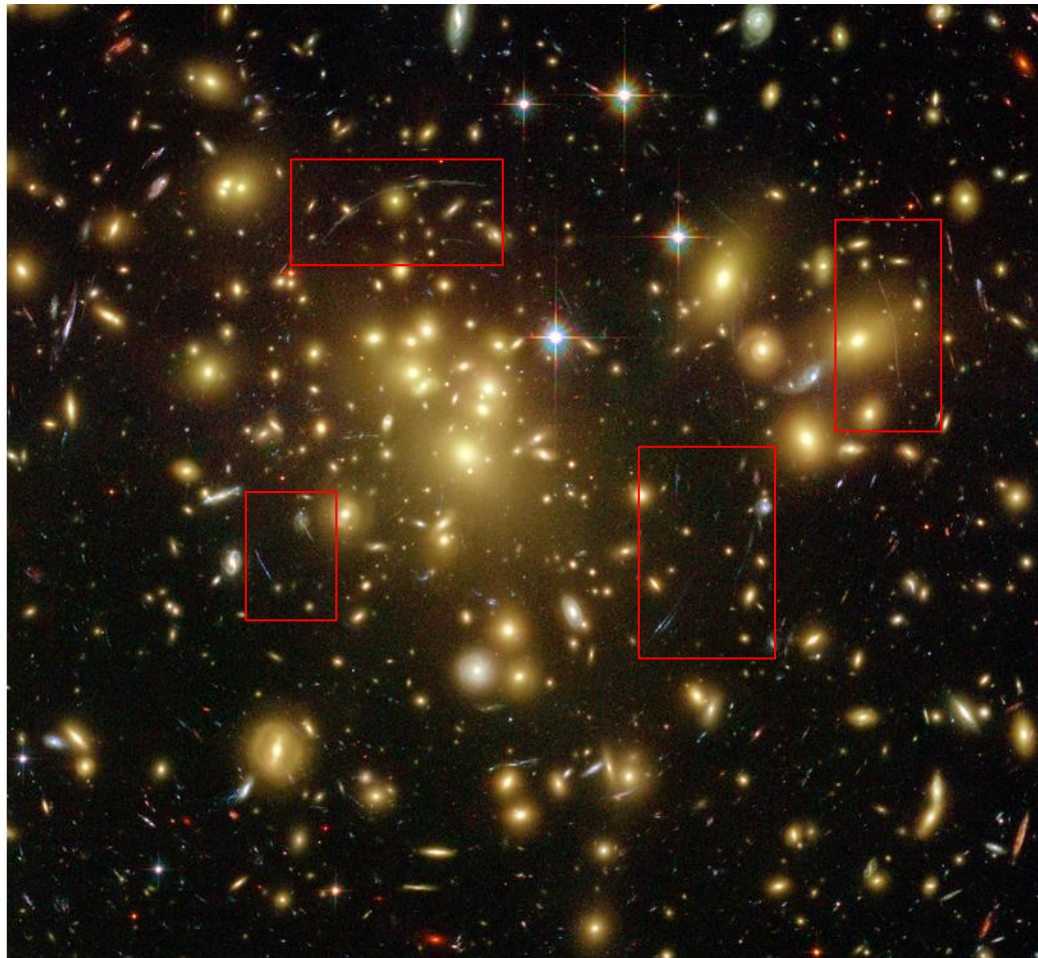


UV +IR (source: NASA)

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
Les galaxies spirales

Exemple: l'amas Abell 1689

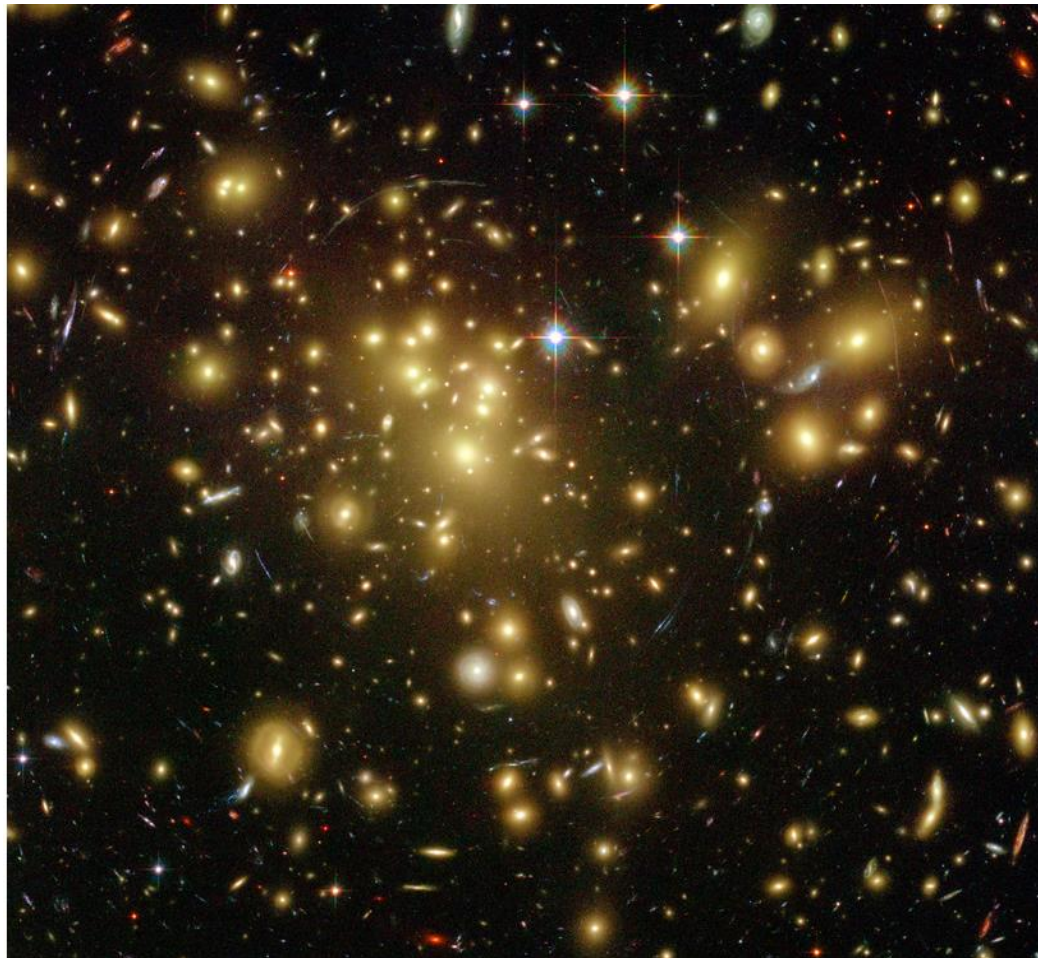


UV +IR (source: NASA)

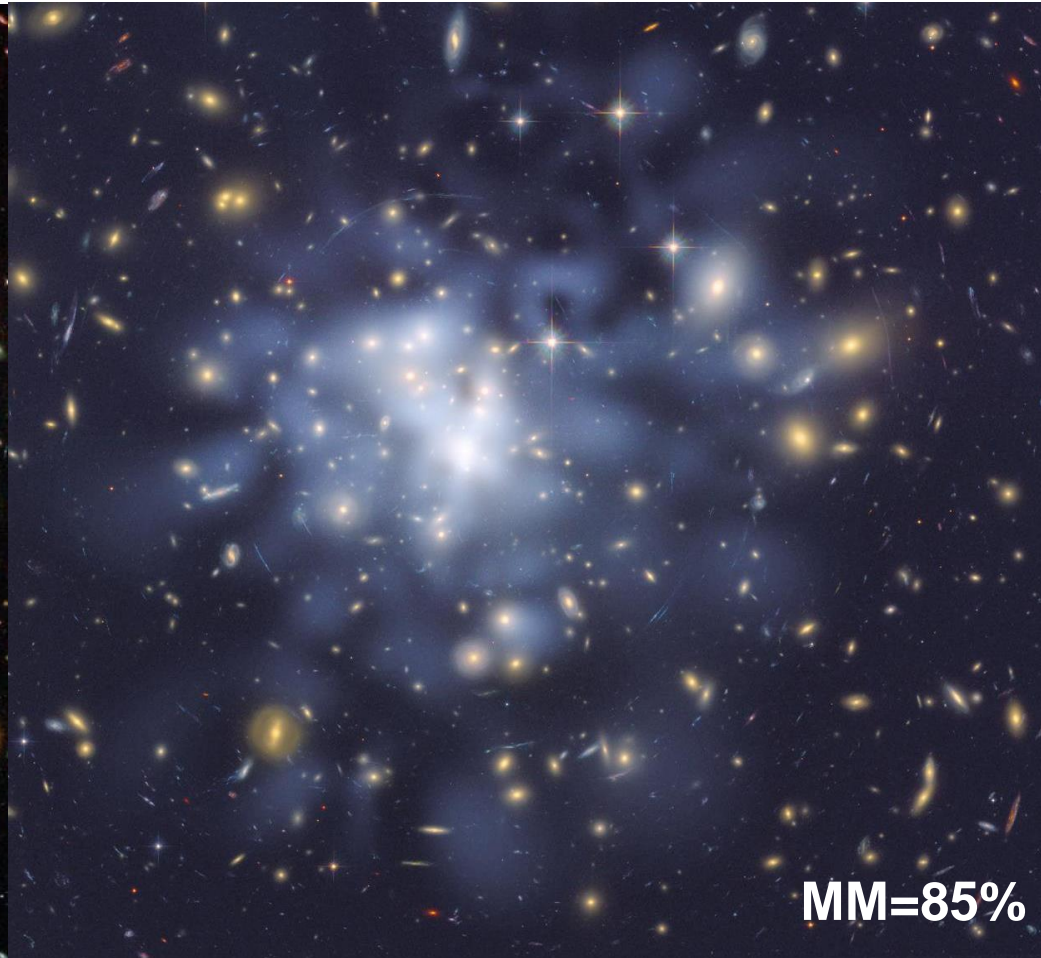
Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
Les galaxies spirales

Exemple: l'amas Abell 1689



UV +IR (source: NASA)

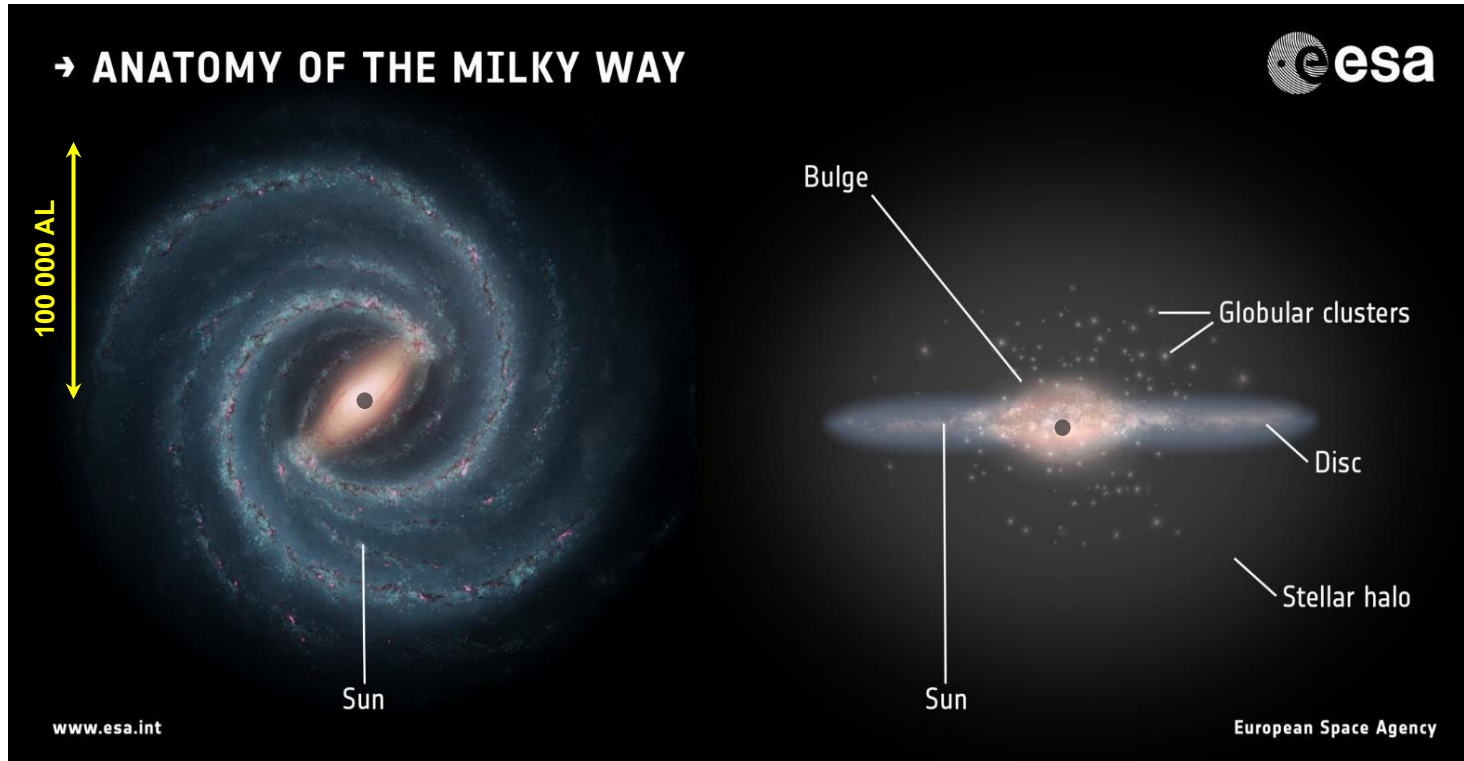


Reconstruction de la distribution de masse manquante (source: NASA)

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
Les galaxies spirales

Qu'est-ce-qu'une galaxie spirale ?



$$M_{st} \approx 10^{12} M_{\odot}$$

$$R = 10^5 AL$$

$$(1M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} kg)$$

$$1AL = 9,461 \cdot 10^9 km = 0.3 pc)$$

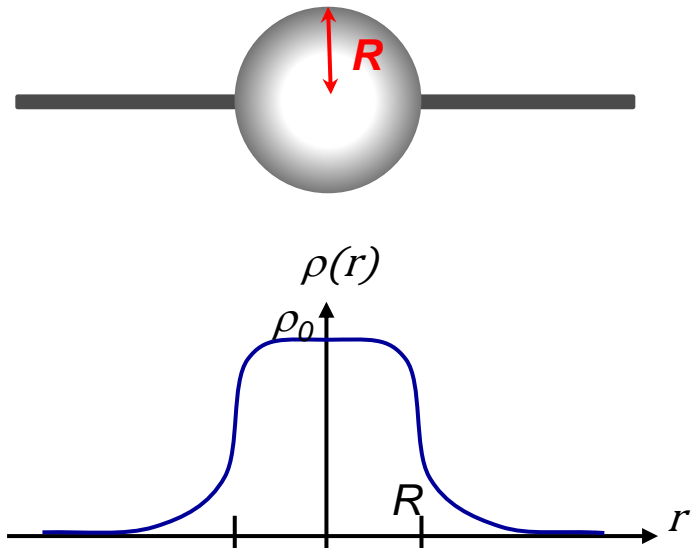
Si le bulbe est important et les bras très peu développés, on aura affaire à une galaxie lenticulaire (ou de type Sa); au contraire, si les bras sont démesurés par rapport au bulbe, on la nommera Sc.

Courbe de rotation théorique

- L'ordre de grandeur de la vitesse de rotation V_1 des étoiles est typiquement la centaine de $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, et par conséquent

$$\frac{V_1}{c} \sim 10^{-3} = 0.1\% \Rightarrow \text{régime newtonien}$$

- On applique le **principe fondamental de la dynamique** à une étoile de la galaxie (référentiel du centre de masse de la galaxie). Pour une trajectoire quasi-circulaire (Kepler), l'équilibre entre la force centrifuge et la force gravitationnelle donne:



$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -G \frac{mM_d(<r)}{r^2} \vec{e}_r \Rightarrow m \frac{V_1^2}{r} = G \frac{mM_d(<r)}{r^2}$$

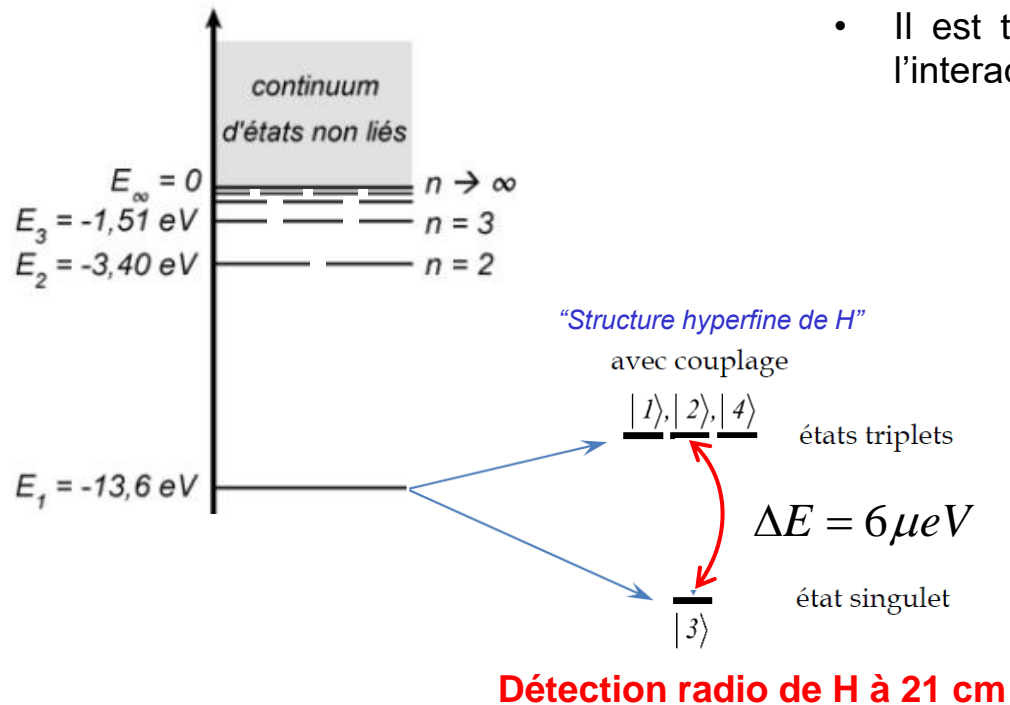
$$\Rightarrow V_1 = \sqrt{\frac{GM_d(<r)}{r}} \quad \text{avec} \quad M_d(<r) = 4\pi \int_0^r r^2 \rho(r) dr$$

- $r < R : M_d(<r) = \frac{4}{3} \pi \rho_0 r^3 \Rightarrow V_1 \sim r$

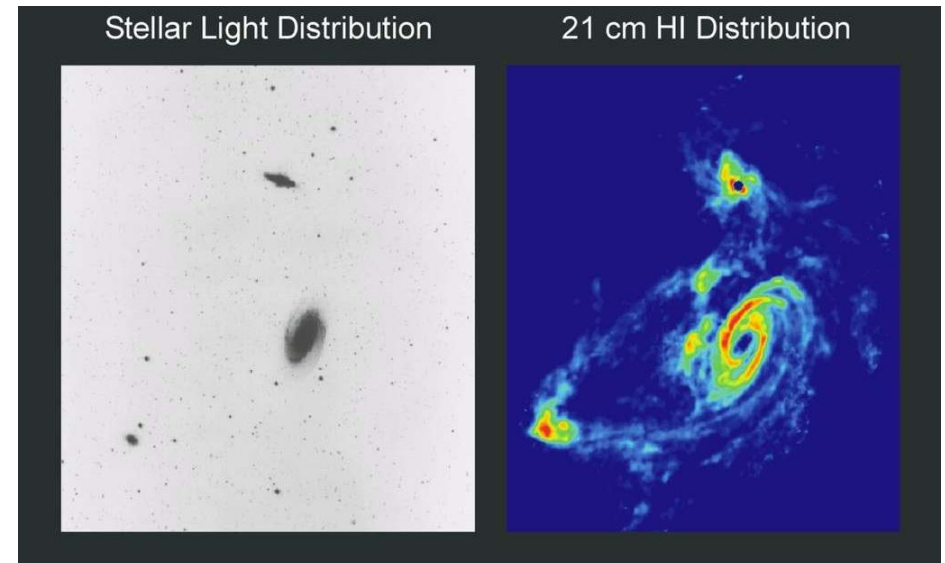
- $r > R : M_d(<r) = C^{ste} \Rightarrow V_1 \sim r^{-1/2}$

La raie HI à 21cm

- Dans l'espace, il y a beaucoup d'hydrogène, dont on détecte le rayonnement lorsqu'il est suffisamment chaud, par exemple au niveau des étoiles. En revanche, dans des milieux interstellaires froids qui bordent les galaxies, les électrons ne sont pas excités sur les niveaux supérieurs à 1s et l'hydrogène est invisible.



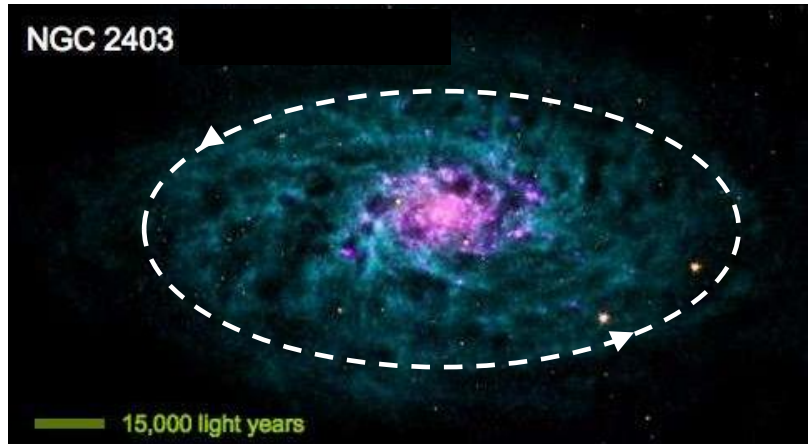
- Il est toutefois possible de le détecter si l'on prend en compte l'interaction spin de l'électron–spin du proton (Van de Hulst, 1944):



Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
Les galaxies spirales

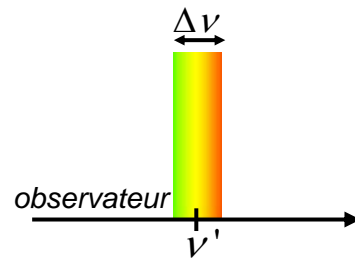
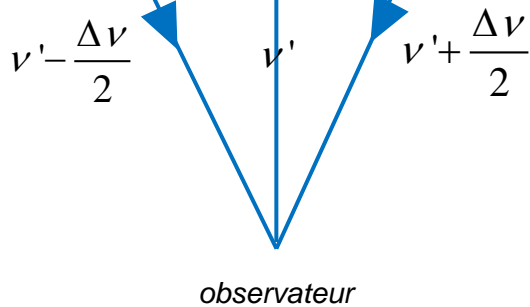
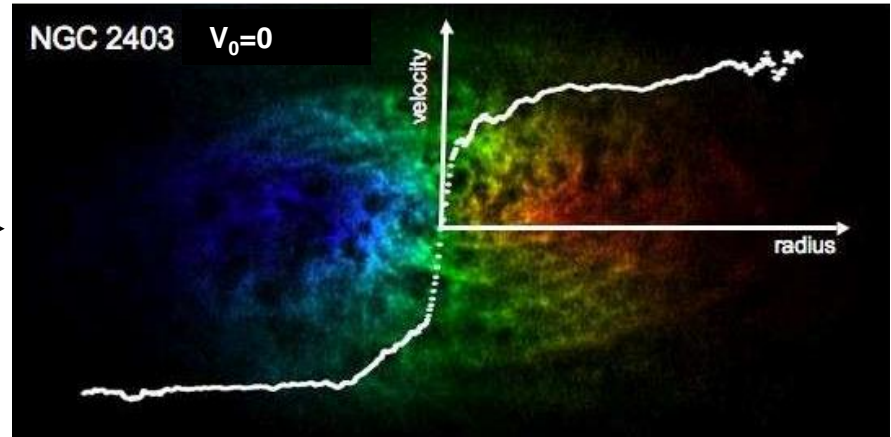
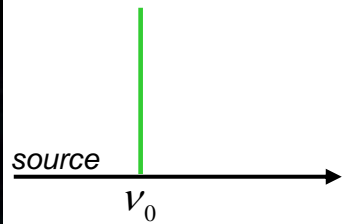
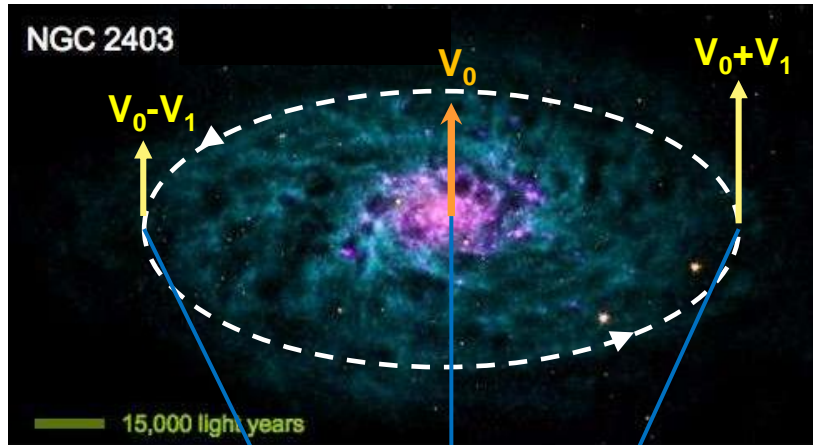
Comment mesurer la vitesse de rotation ?



Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
 Les galaxies spirales

Comment mesurer la vitesse de rotation ?



$$\frac{v' - v_0}{v_0} = -\frac{V_0}{c} \Rightarrow V_0 = c \frac{v_0 - v'}{v_0}$$

$$\left. \frac{\left(v' + \frac{\Delta v}{2}\right) - v_0}{v_0} = -\frac{V_0 - V_1}{c} \right\}$$

$$\left. \frac{\left(v' - \frac{\Delta v}{2}\right) - v_0}{v_0} = -\frac{V_0 + V_1}{c} \right\}$$

$$\Rightarrow V_1 = \frac{c \Delta v}{2v_0}$$

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

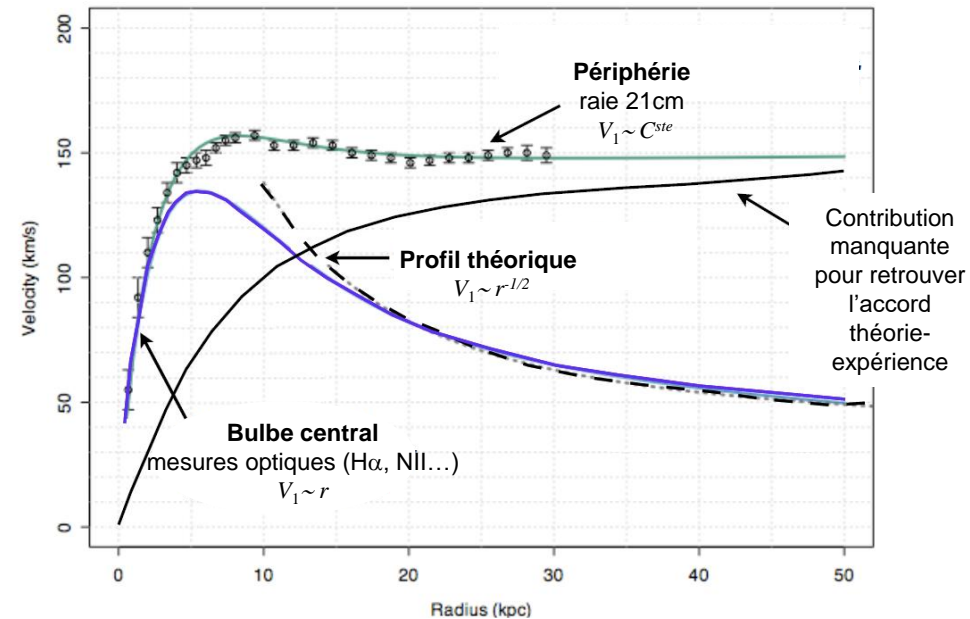
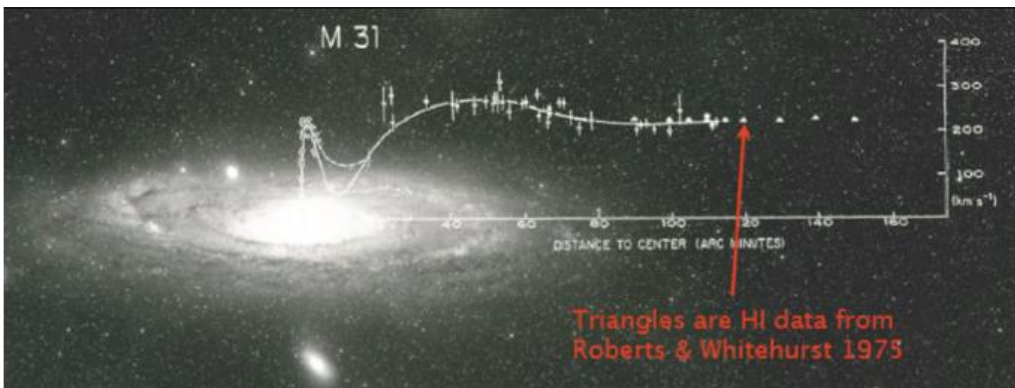
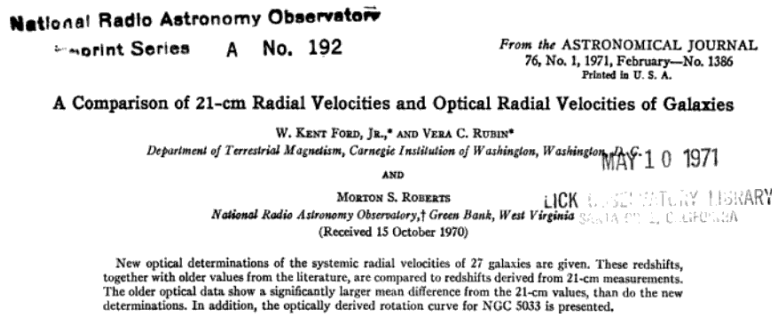
Les amas galactiques
 Les galaxies spirales

Courbes de rotation expérimentales

- Observations: Rubin et Ford (1970), Rubin et al (1971), Ostriker et Peebles (1973), Rubin et al (1978), Bosma (1981), Casertano et van Gorkom (1991), Swaters et al (2012)...



Vera Rubin



Courbe de rotation de NGC2198

Cas particuliers ?

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

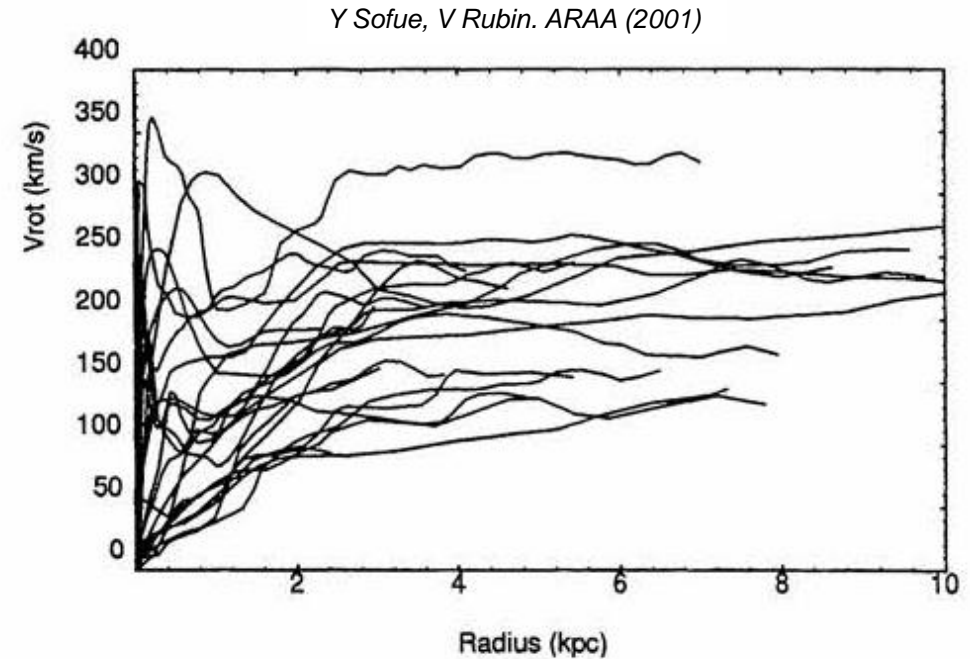
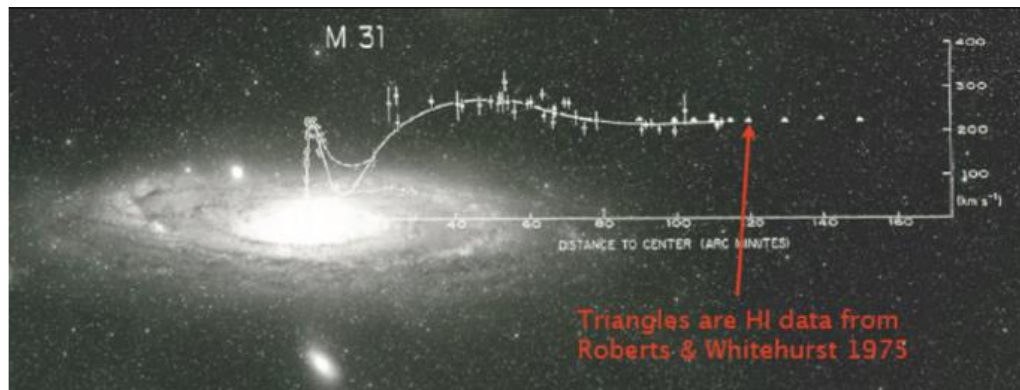
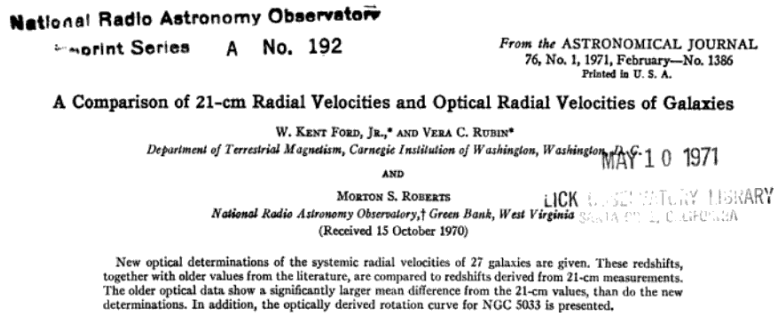
Les amas galactiques
 Les galaxies spirales

Courbes de rotation expérimentales

- Observations: Rubin et Ford (1970), Rubin et al (1971), Ostriker et Peebles (1973), Rubin et al (1978), Bosma (1981), Casertano et van Gorkom (1991), Swaters et al (2012)...



Vera Rubin



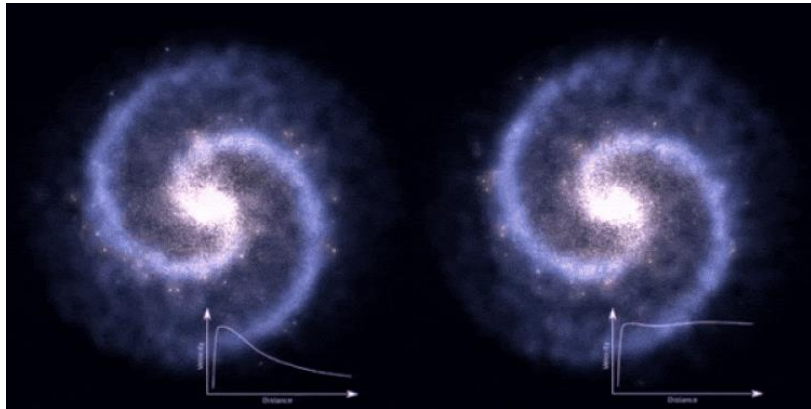
Confirmation précise de la masse manquante

“The conclusion is inescapable: mass, unlike luminosity, is not concentrated near the center of spiral galaxies. Thus the light distribution in a galaxy is not at all a guide to mass distribution.” (V Rubin)

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

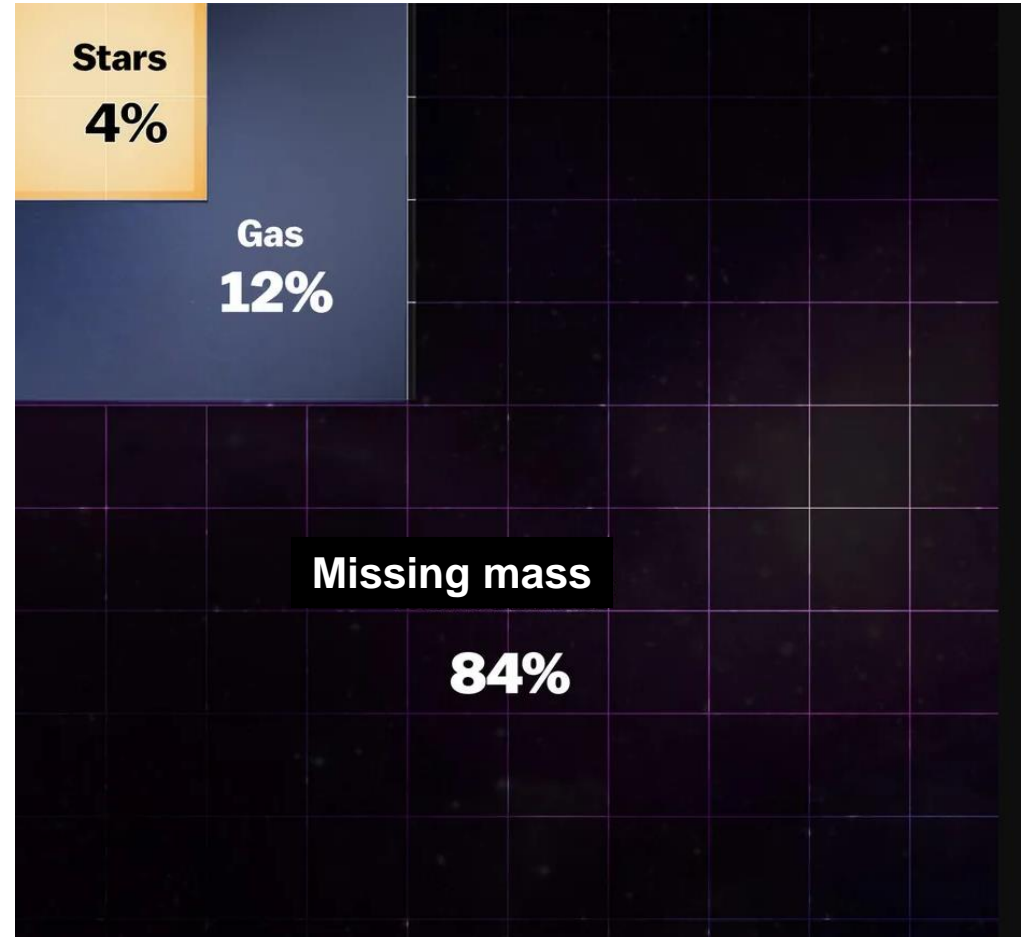
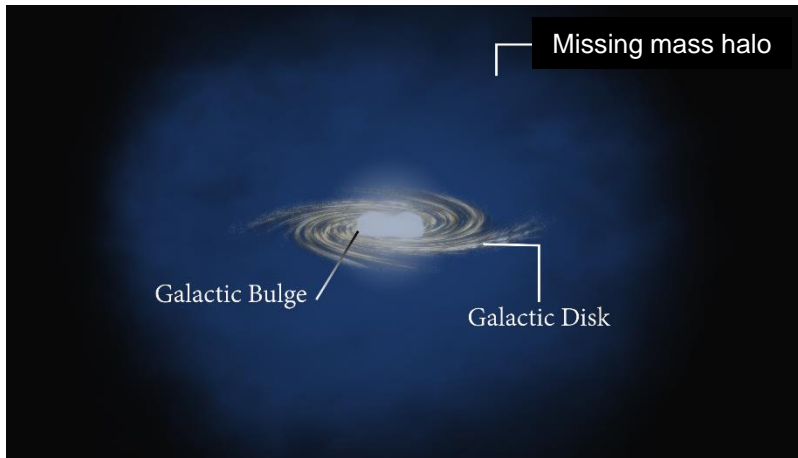
Les amas galactiques
Les galaxies spirales

Structure-type des galaxies spirales

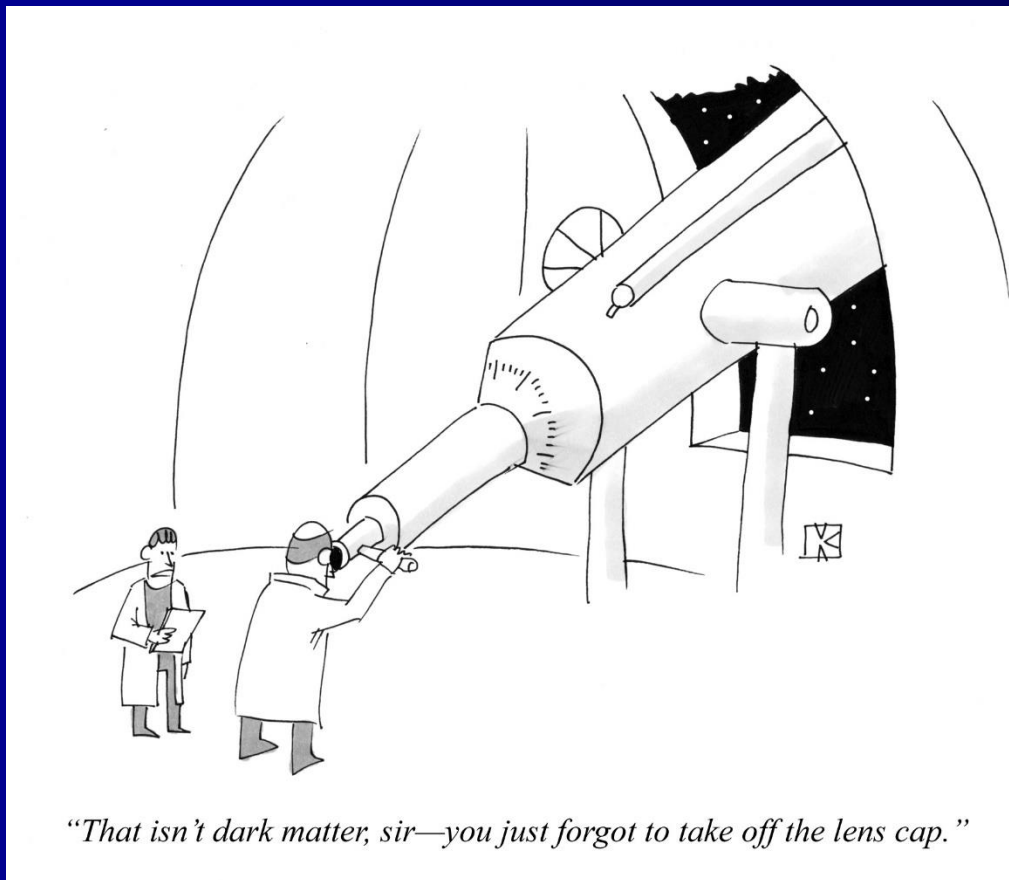


Attendu

Observé



2. Solution ontologique: la matière noire froide



Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

Les MACHOs

- Proposés dans les années 1980, les MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects) sont des objets compacts constitués de matière ordinaire, n'émettant pas suffisamment de lumière pour être détectés et qui pourraient peupler les halos galactiques.



Trous noirs

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

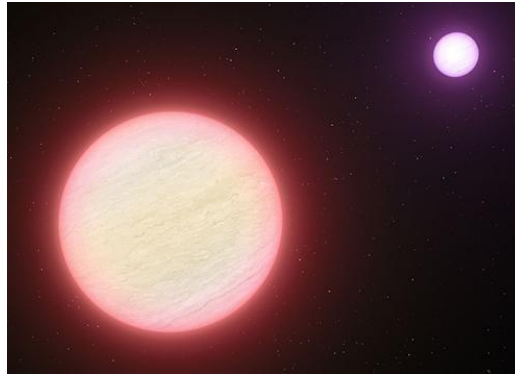
MACHO
WIMP
Axion

Les MACHOs

- Proposés dans les années 1980, les MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects) sont des objets compacts constitués de matière ordinaire, n'émettant pas suffisamment de lumière pour être détectés et qui pourraient peupler les halos galactiques.



Trous noirs



Naines brunes

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

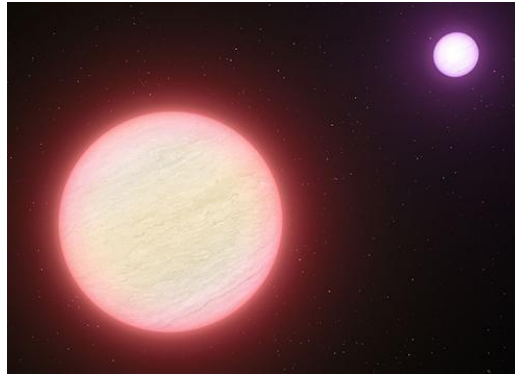
MACHO
WIMP
Axion

Les MACHOs

- Proposés dans les années 1980, les MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects) sont des objets compacts constitués de matière ordinaire, n'émettant pas suffisamment de lumière pour être détectés et qui pourraient peupler les halos galactiques.



Trous noirs



Naines brunes

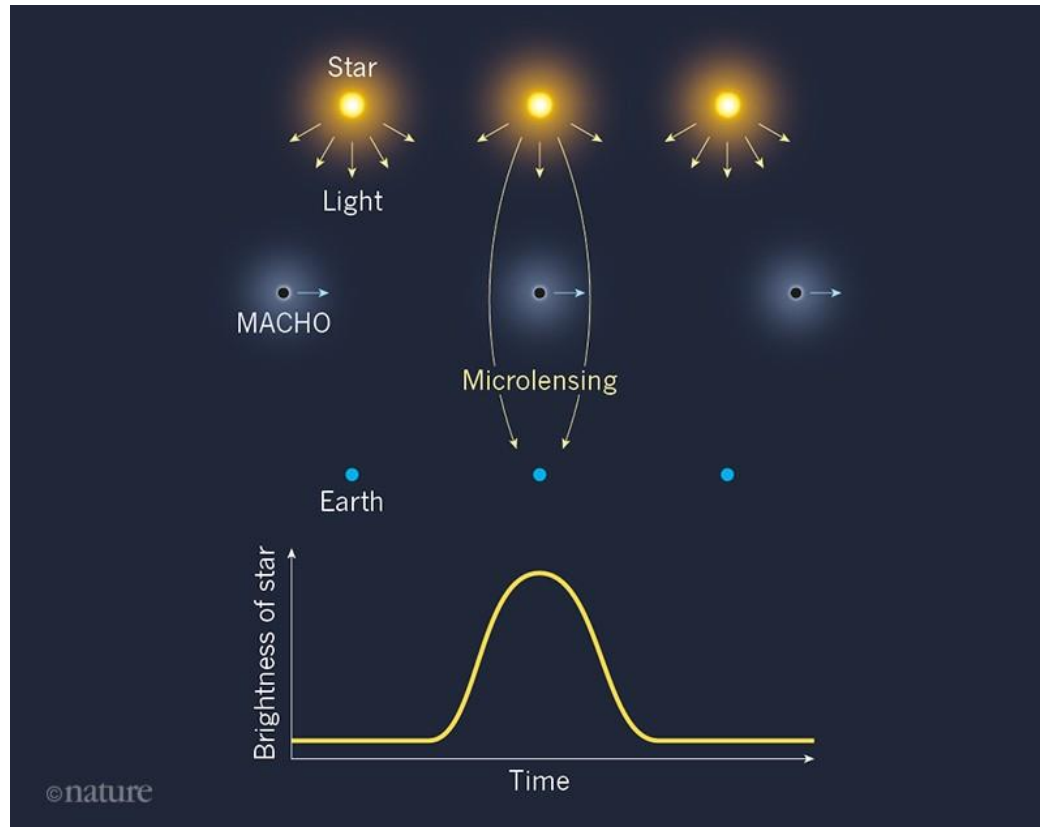


Planètes géantes errantes

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

Les microlentilles gravitationnelles

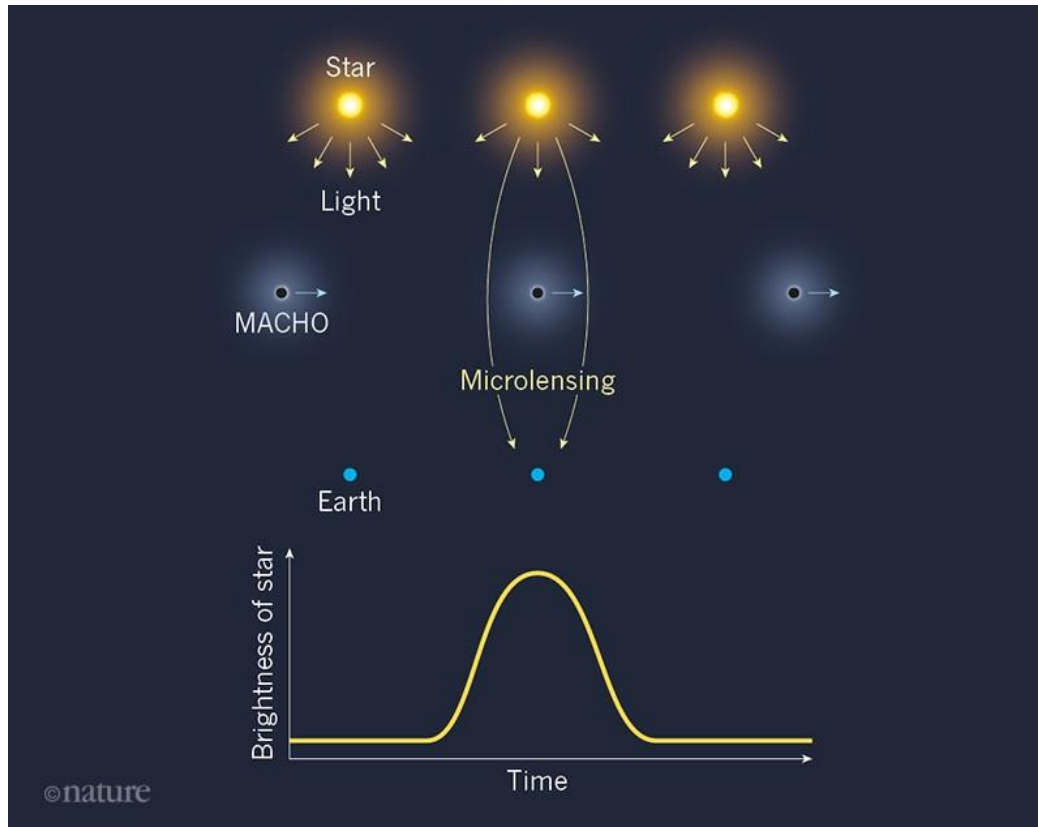


Modulation de l'intensité lumineuse

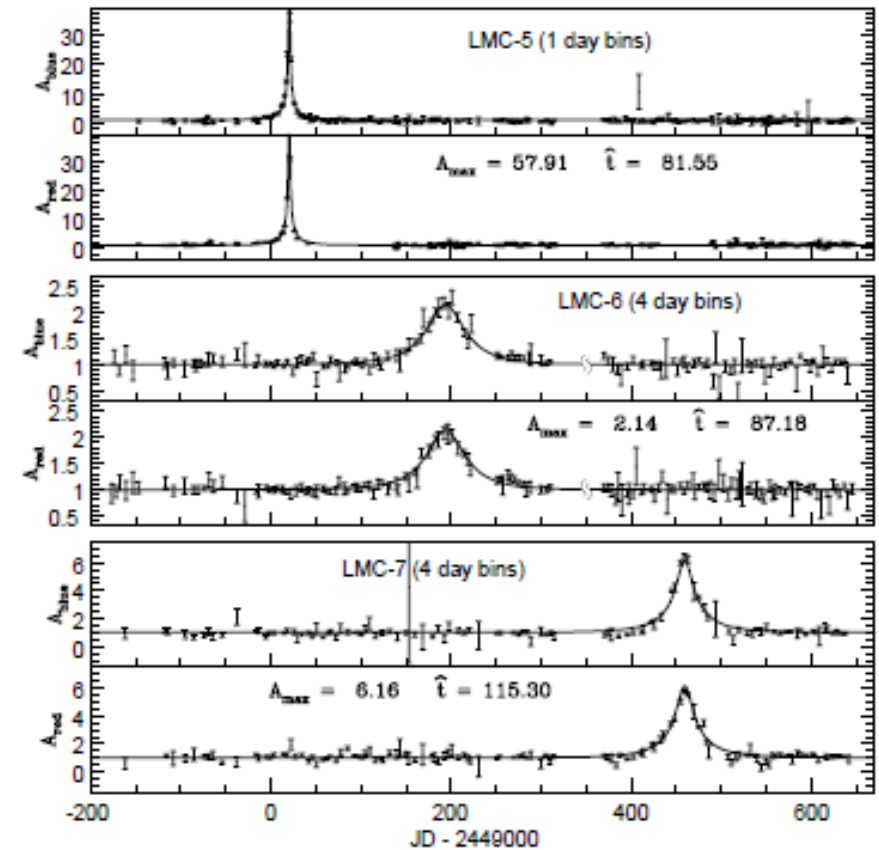
Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

Les microlentilles gravitationnelles



Modulation de l'intensité lumineuse



Observation: Nuage de Magellan (C Alcock et al. 1997)

Bilan

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 824:L31 (5pp), 2016 June 20
© 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/2041-8205/824/2/L31



CONSTRAINTS ON MACHO DARK MATTER FROM COMPACT STELLAR SYSTEMS IN ULTRA-FAINT DWARF GALAXIES

TIMOTHY D. BRANDT¹

Institute for Advanced Study, Einstein Dr., Princeton, NJ, USA

Received 2016 May 11; revised 2016 June 8; accepted 2016 June 9; published 2016 June 22

ABSTRACT

I show that a recently discovered star cluster near the center of the ultra-faint dwarf galaxy Eridanus II provides strong constraints on massive compact halo objects (MACHOs) of $\gtrsim 5 M_{\odot}$ as the main component of dark matter. MACHO dark matter will dynamically heat the cluster, driving it to larger sizes and higher velocity dispersions until it dissolves into its host galaxy. The stars in compact ultra-faint dwarf galaxies themselves will be subject to the same dynamical heating; the survival of at least 10 such galaxies places independent limits on MACHO dark matter of masses $\gtrsim 10 M_{\odot}$. Both Eri II's cluster and the compact ultra-faint dwarfs are characterized by stellar masses of just a few thousand M_{\odot} and half-light radii of 13 pc (for the cluster) and ~ 30 pc (for the ultra-faint dwarfs). These systems close the ~ 20 – $100 M_{\odot}$ window of allowed MACHO dark matter and combine with existing constraints from microlensing, wide binaries, and disk kinematics to **rule out dark matter composed entirely of MACHOs from $\sim 10^{-7} M_{\odot}$ up to arbitrarily high masses.**

Key words: dark matter – galaxies: dwarf – galaxies: kinematics and dynamics – stars: kinematics and dynamics



Trous noirs primordiaux

- Des MACHOs ont été détectés (a priori des trous noirs, primordiaux ?), mais leur contribution en masse ne représente au mieux que 10% de la masse manquante.

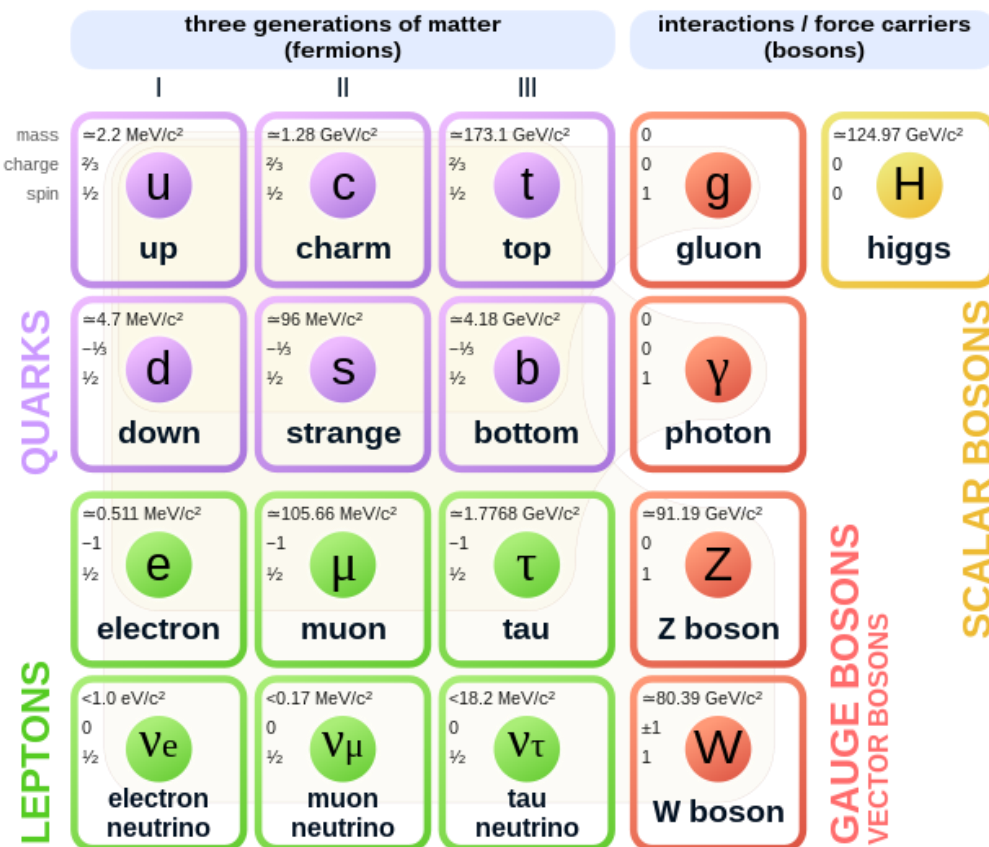
Pas suffisant... ⇒ Candidat disponible en physique des particules ?

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Position du problème

Standard Model of Elementary Particles



- Les observations imposent des contraintes sur le type de particules élémentaires constituant la matière noire. Celles-ci doivent être nécessairement :

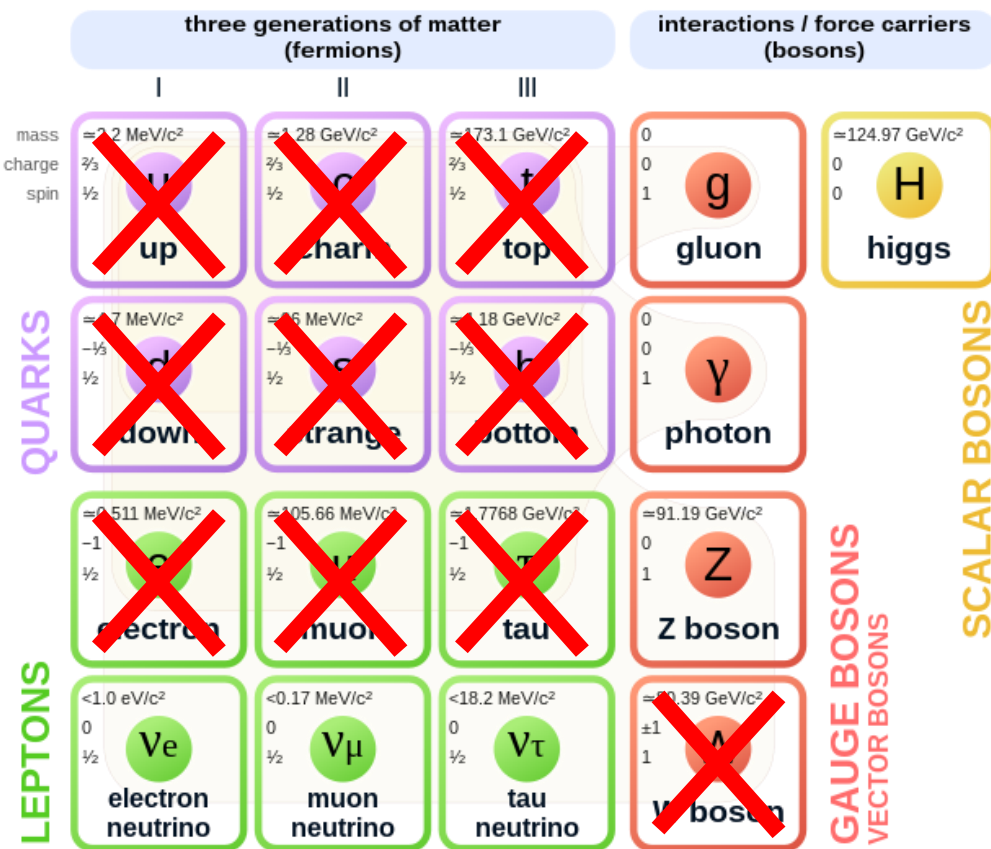
① *électriquement neutres*

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Position du problème

Standard Model of Elementary Particles



- Les observations imposent des contraintes sur le type de particules élémentaires constituant la matière noire. Celles-ci doivent être nécessairement :

① *électriquement neutres*

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Position du problème

Standard Model of Elementary Particles

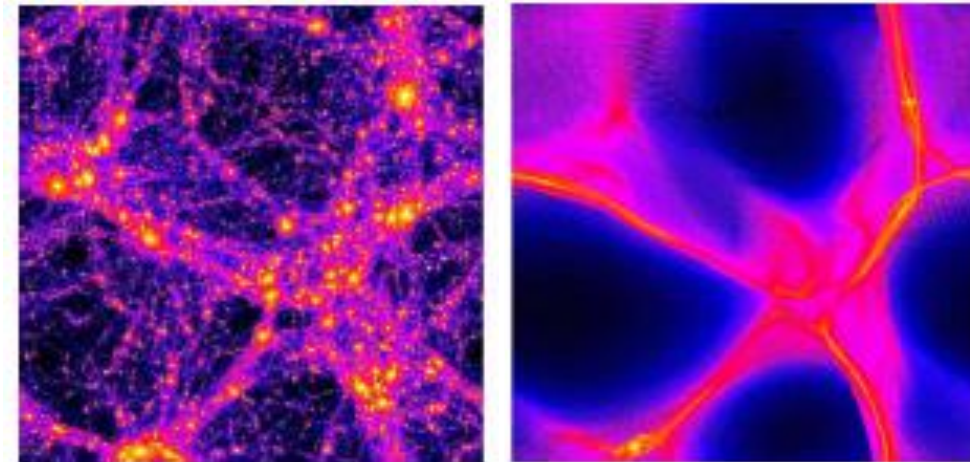
three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
mass	$=2 \text{ MeV}/c^2$	$=128 \text{ GeV}/c^2$	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$=124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$<1.0 \text{ eV}/c^2$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$	W W boson	
	0	0	0		
	$1/2$	$1/2$	$1/2$		
	Ve electron neutrino	Vμ muon neutrino	Vτ tau neutrino		

QUARKS
LEPTONS
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS
SCALAR BOSONS

- Les observations imposent des contraintes sur le type de particules élémentaires constituant la matière noire. Celles-ci doivent être nécessairement :

❶ *électriquement neutres*

❷ « froids » = lourds ($\approx 100 \times m_p$)



Source: F. Combes, CDF (2015)

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Position du problème

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
mass	$=2.2 \text{ MeV}/c^2$	$=1.28 \text{ GeV}/c^2$	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$	$=124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	0
	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	γ photon
				H higgs

QUARKS
LEPTONS
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS
SCALAR BOSONS

- Les observations imposent des contraintes sur le type de particules élémentaires constituant la matière noire. Celles-ci doivent être nécessairement :

① *électriquement neutres*

② « froids » = lourds ($\approx 100 \times m_p$)

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Position du problème

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
mass	$=2 \text{ MeV}/c^2$	$=1.28 \text{ GeV}/c^2$	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$	$=124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	0
	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	γ photon
				H higgs

QUARKS
LEPTONS
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS
SCALAR BOSONS

- Les observations imposent des contraintes sur le type de particules élémentaires constituant la matière noire. Celles-ci doivent être nécessairement :

- ① *électriquement neutres*
- ② « froids » = lourds ($\approx 100 \times m_p$)
- ③ *stables* ($> 10^{10}$ années)

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Position du problème

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
mass	$= 2 \text{ MeV}/c^2$	$= 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$= 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$= 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	up	charm	top	gluon
	down	strange	bottom	photon
	electron	muon	tau	Z boson
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	W boson

QUARKS (left side)
 LEPTONS (left side)
 GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (bottom center)
 SCALAR BOSONS (right side)

- Les observations imposent des contraintes sur le type de particules élémentaires constituant la matière noire. Celles-ci doivent être nécessairement :

- ① électriquement neutres
- ② « froids » = lourds ($\approx 100 \times m_p$)
- ③ stables ($> 10^{10}$ années)

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Position du problème

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
mass	$= 2 \text{ MeV}/c^2$	$= 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$= 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$= 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	up	charm	top	gluon
	down	strange	bottom	photon
	electron	muon	tau	Z boson
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	W boson

QUARKS (left side)
 LEPTONS (left side)
 GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (bottom center)
 SCALAR BOSONS (right side)

• Les observations imposent des contraintes sur le type de particules élémentaires constituant la matière noire. Celles-ci doivent être nécessairement :

- ❶ *électriquement neutres*
- ❷ « froids » = lourds ($\approx 100 \times m_p$)
- ❸ *stables* ($> 10^{10}$ années)

⇒ La matière noire doit donc être formée de particules élémentaires nouvelles, non prévues par le modèle standard. Ces candidats ne doivent pas être ad hoc.

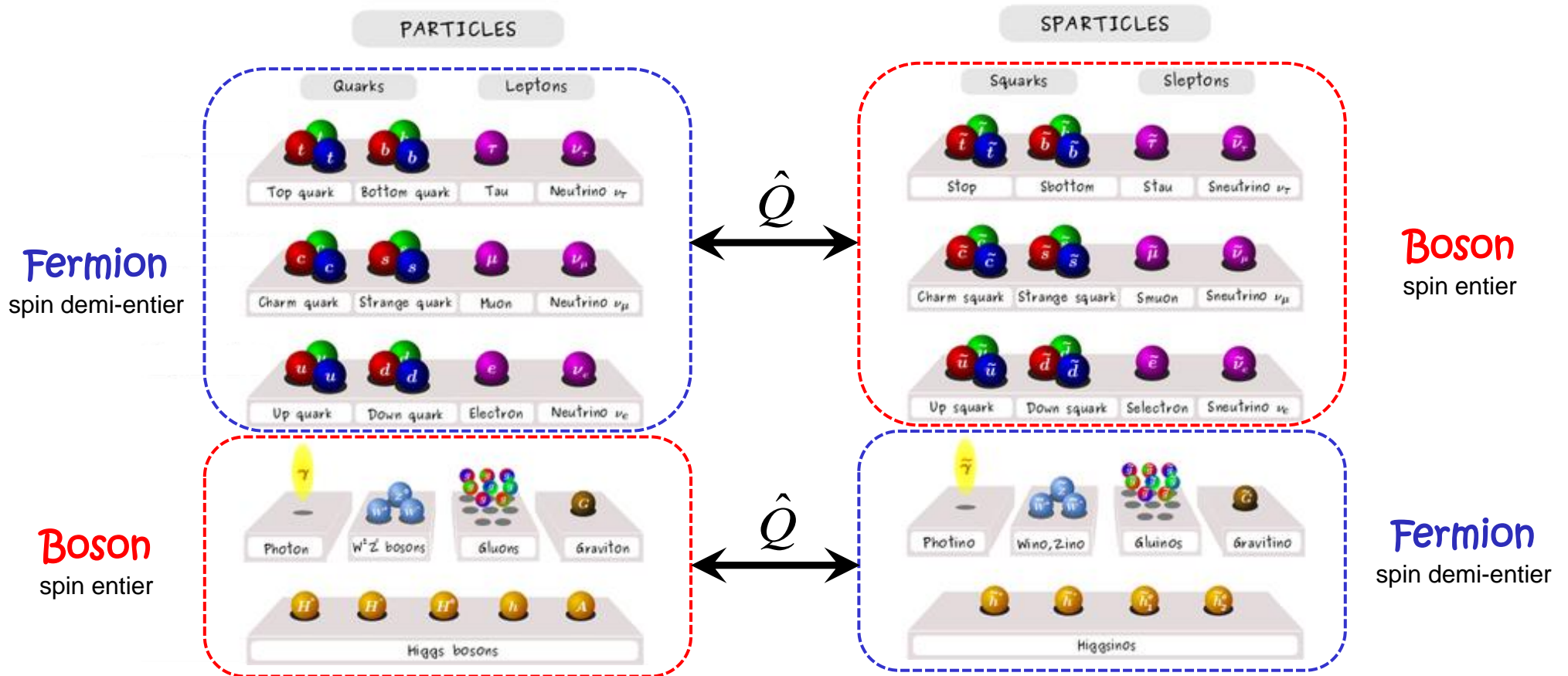
⇒ Quelle physique au-delà du modèle standard ?

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

La supersymétrie (SUSY)

Problème de la hiérarchie + GU → Chaque particule possède un superpartenaire $\hat{Q}|\text{boson}\rangle = |\text{fermion}\rangle$ et $\hat{Q}|\text{fermion}\rangle = |\text{boson}\rangle$

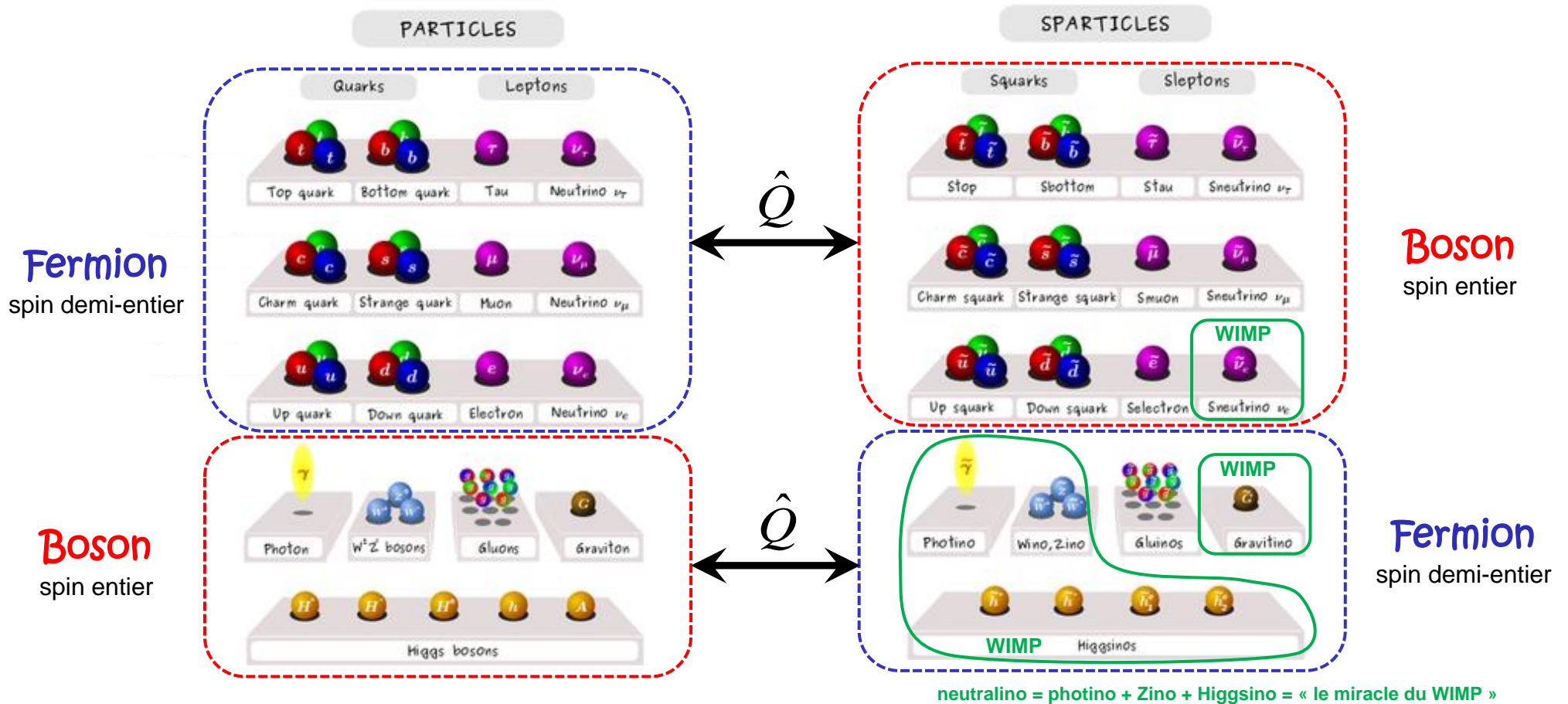


Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Weakly Interacting Massive Particles (WIMP)

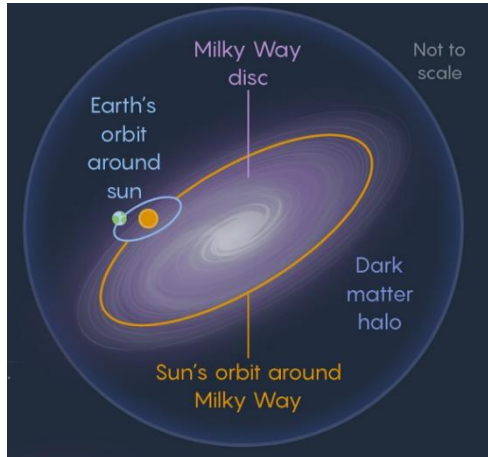
Problème de la hiérarchie + GU → Chaque particule possède un superpartenaire $\hat{Q}|\text{boson}\rangle = |\text{fermion}\rangle$ et $\hat{Q}|\text{fermion}\rangle = |\text{boson}\rangle$



Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

Détection directe des WIMPs

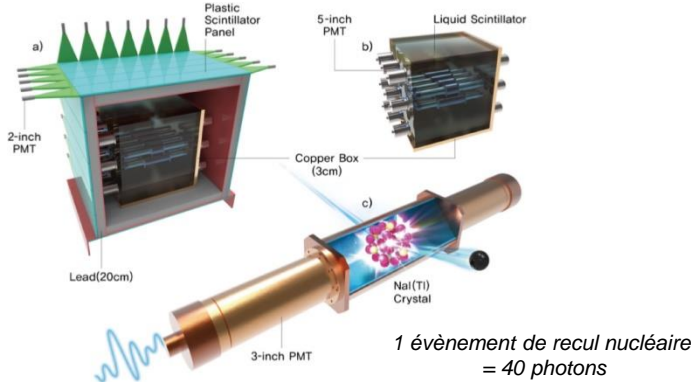


$$V_{T/W} \approx 230 \text{ km.s}^{-1} \Rightarrow E_w \approx 50 \text{ keV}$$

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

Détection directe des WIMPs

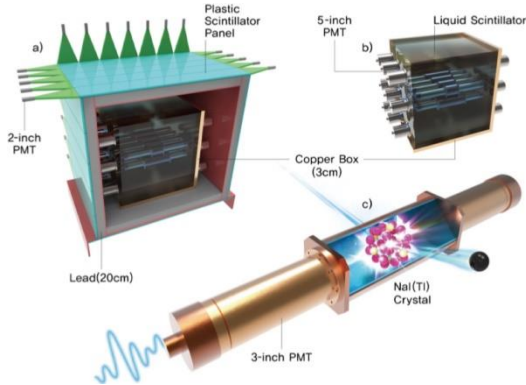


Système de détection

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

Détection directe des WIMPs



Système de détection

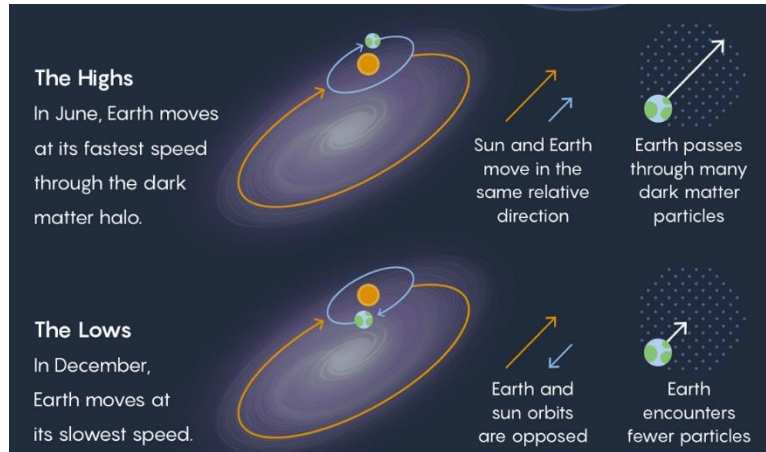
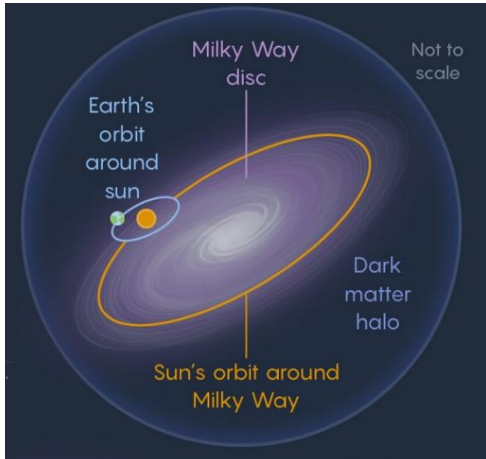


Laboratoire souterrain (DAMA/LIBRA)

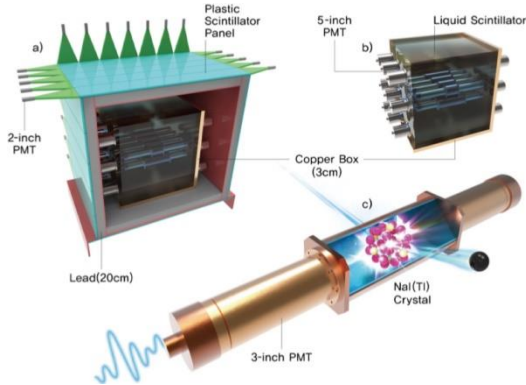
Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

Détection directe des WIMPs



Saisonnalité = variation de 10% de $V_{T/W}$



Système de détection

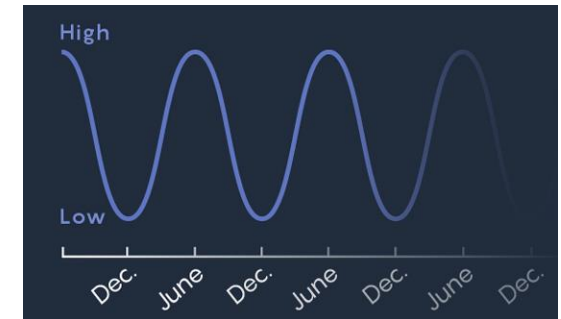
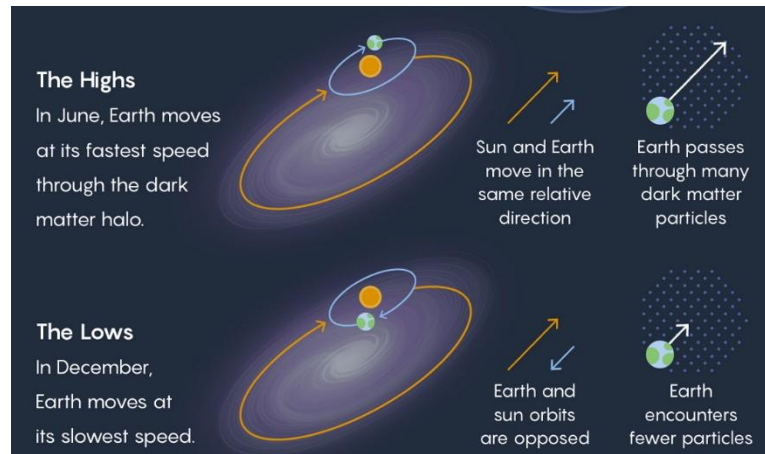
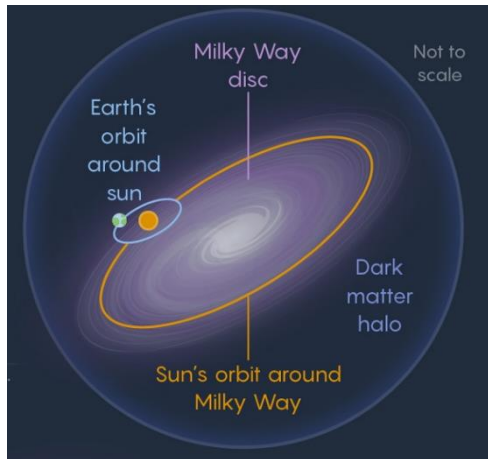


Laboratoire souterrain (DAMA/LIBRA)

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

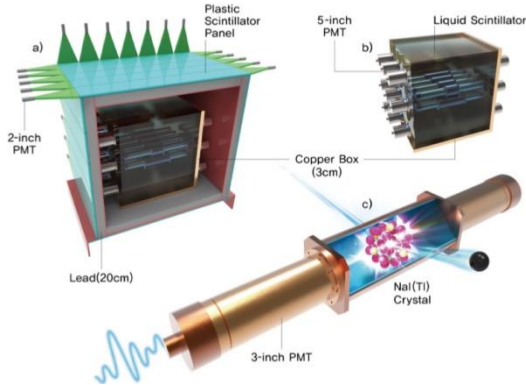
MACHO
 WIMP
 Axion

Détection directe des WIMPs



Saisonnalité = variation de 10% de $V_{T/W}$

Signal attendu



Système de détection

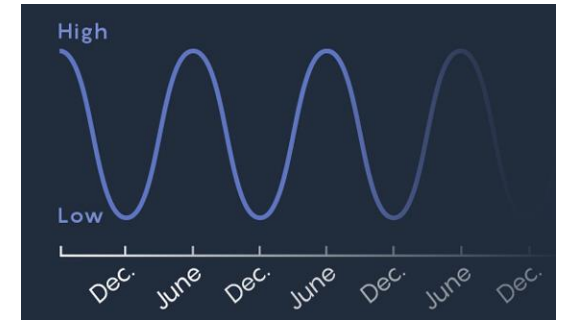
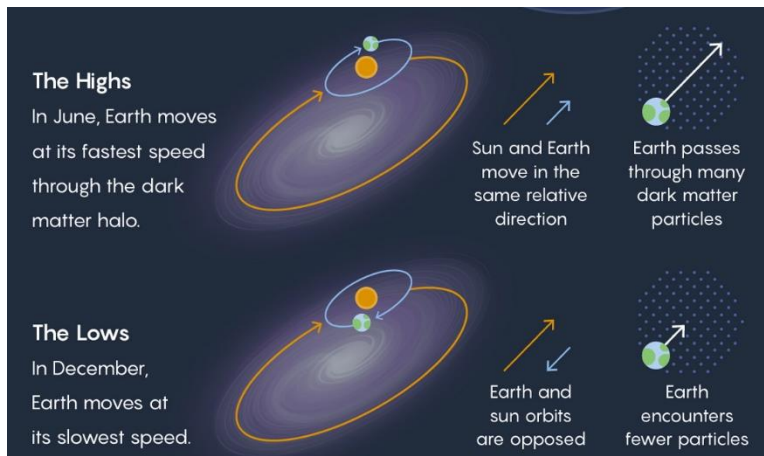


Laboratoire souterrain (DAMA/LIBRA)

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

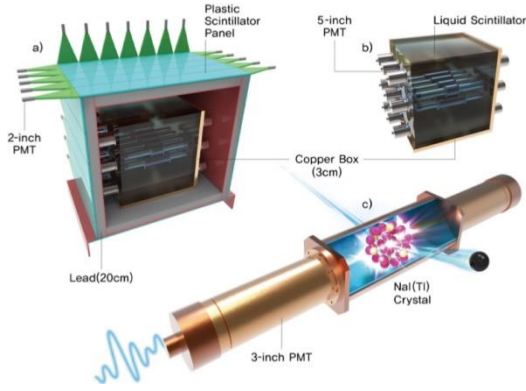
MACHO
 WIMP
 Axion

Détection directe des WIMPs



Saisonnalité = variation de 10% de $V_{T/W}$

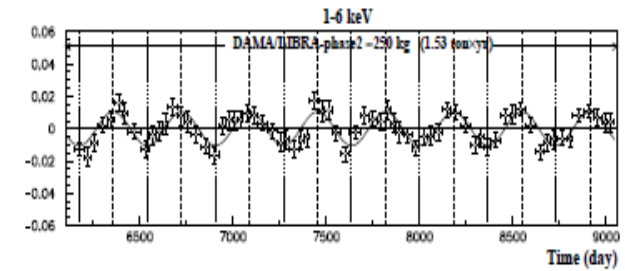
Signal attendu



Système de détection



Laboratoire souterrain (DAMA/LIBRA)



Bernabei et al (2021)

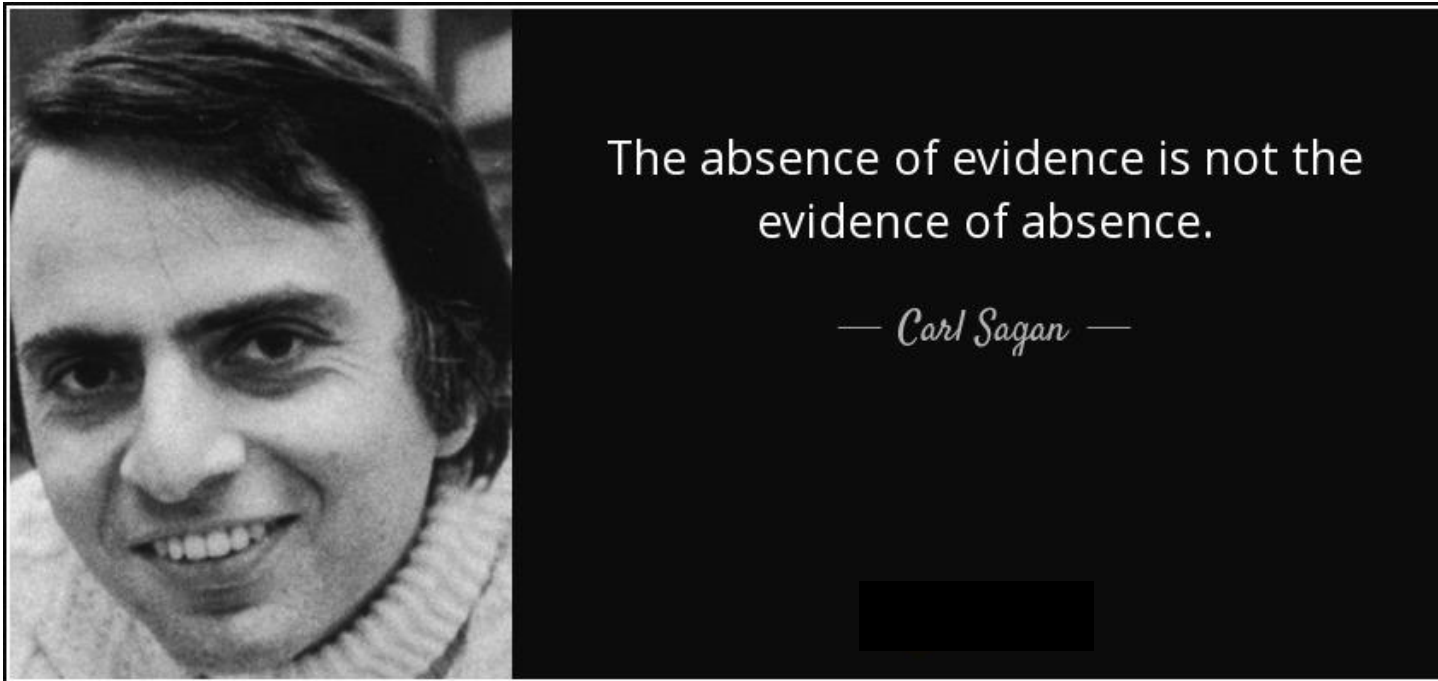
Signal observé

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

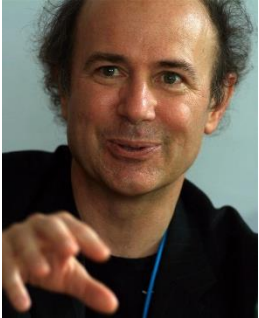
Détection directe des WIMPs

Mais les observations de DAMA/LIBRA n'ont pu être reproduites ni par les systèmes de détection directe (CDMS-II, Edelweiss, ZEPLIN, CRESST...), ni par les systèmes de détection indirecte (FGST, Chandra, ICECUBE, ANTARES, PAMELA...), le LHC n'est pas non plus parvenu à mettre en évidence de superpartenaires...



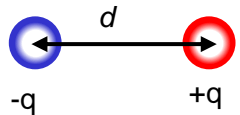
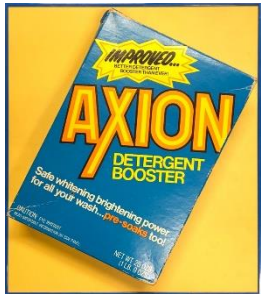
Contexte: la violation CP forte

- Initialement, les axions ont été introduits dans le contexte de la QCD pour expliquer la valeur anormalement faible (nulle ?) obtenue en mesurant le moment dipolaire électrique du neutron:

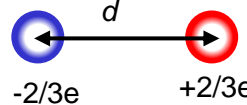
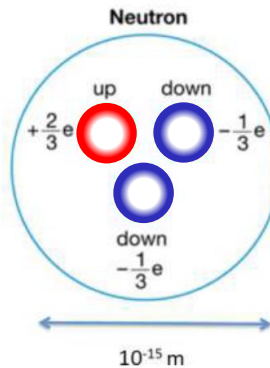


Frank Wilczek
 Nobel 2004

"I named them after a laundry detergent, since they clean up a long standing problem in theoretical physics."



Moment dipolaire $|\vec{p}| = qd$



$$\frac{|\vec{p}_n|_{mes}}{|\vec{p}_n|_{th}} \leq \frac{3 \cdot 10^{-26}}{4 \cdot 10^{-14}} \approx 0,75 \cdot 10^{-12}$$

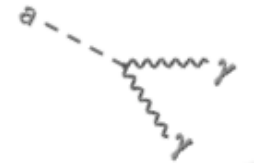
→ Une solution proposée par Weinberg et Wilczek en 1978 est d'introduire un nouveau terme dans le $L_{QCD} \Rightarrow$ nouvelle particule : l'axion.

Axions et électromagnétisme

- Les axions sont également prévus par l'électrodynamique prémétrique (Obukhov et Hehl, 2003). Ce sont des bosons de charge nulle, très stables, très légers ($m_a < 10^{-4} \text{eV}$) mais qui condensent très facilement (BEC). Une fois condensés, les axions répondent aux contraintes observationnelles pour la matière noire. Ils se couplent très faiblement au champ électromagnétique.

Effet Primakoff

$$\mathcal{L}_{a\gamma} = g_{a\gamma} \vec{E} \times \vec{B} \theta$$



Les 4 équations de Maxwell (sans axions)

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

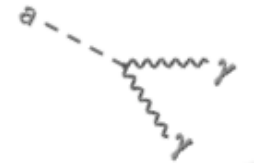
$$\text{div } \vec{B} = 0$$

Axions et électromagnétisme

- Les axions sont également prévus par l'électrodynamique prémétrique (Obukhov et Hehl, 2003). Ce sont des bosons de charge nulle, très stables, très légers ($m_a < 10^{-4} \text{eV}$) mais qui condensent très facilement (BEC). Une fois condensés, les axions répondent aux contraintes observationnelles pour la matière noire. Ils se couplent très faiblement au champ électromagnétique.

Effet Primakoff

$$\mathcal{L}_{a\gamma} = g_{a\gamma} \vec{E} \times \vec{B} \cdot \vec{\theta}$$



Les 4 équations de Maxwell (sans axions)

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

Les 4 équations de Maxwell avec axions

$$\text{rot } \left(\vec{E} - c\kappa\theta\vec{B} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{B} + \frac{\kappa}{c}\theta\vec{E} \right)$$

$$\text{div } \left(\vec{E} - c\kappa\theta\vec{B} \right) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{rot } \left(\vec{B} + \frac{\kappa}{c}\theta\vec{E} \right) = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{E} - c\kappa\theta\vec{B} \right)$$

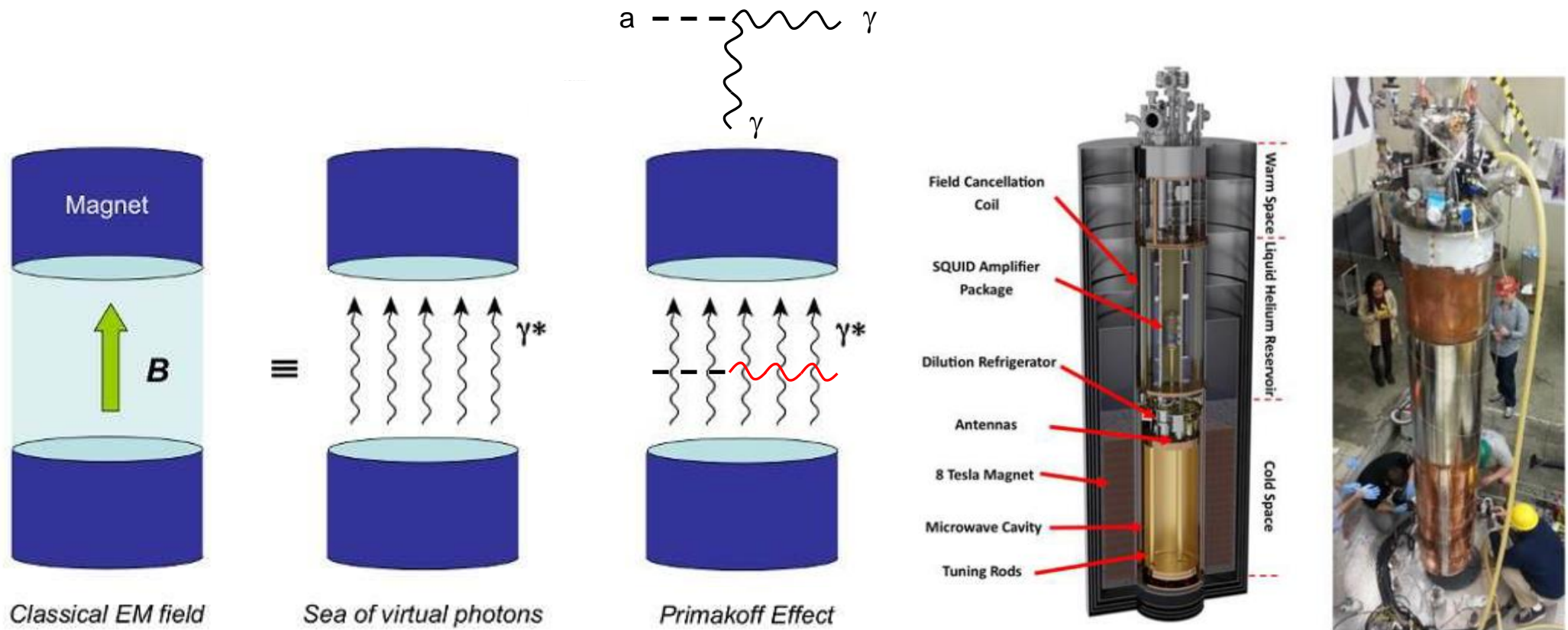
$$\text{div } \left(\vec{B} + \frac{\kappa}{c}\theta\vec{E} \right) = 0$$

$$\left(\square + m^2 \right) \theta = -\kappa \vec{E} \cdot \vec{B}$$

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

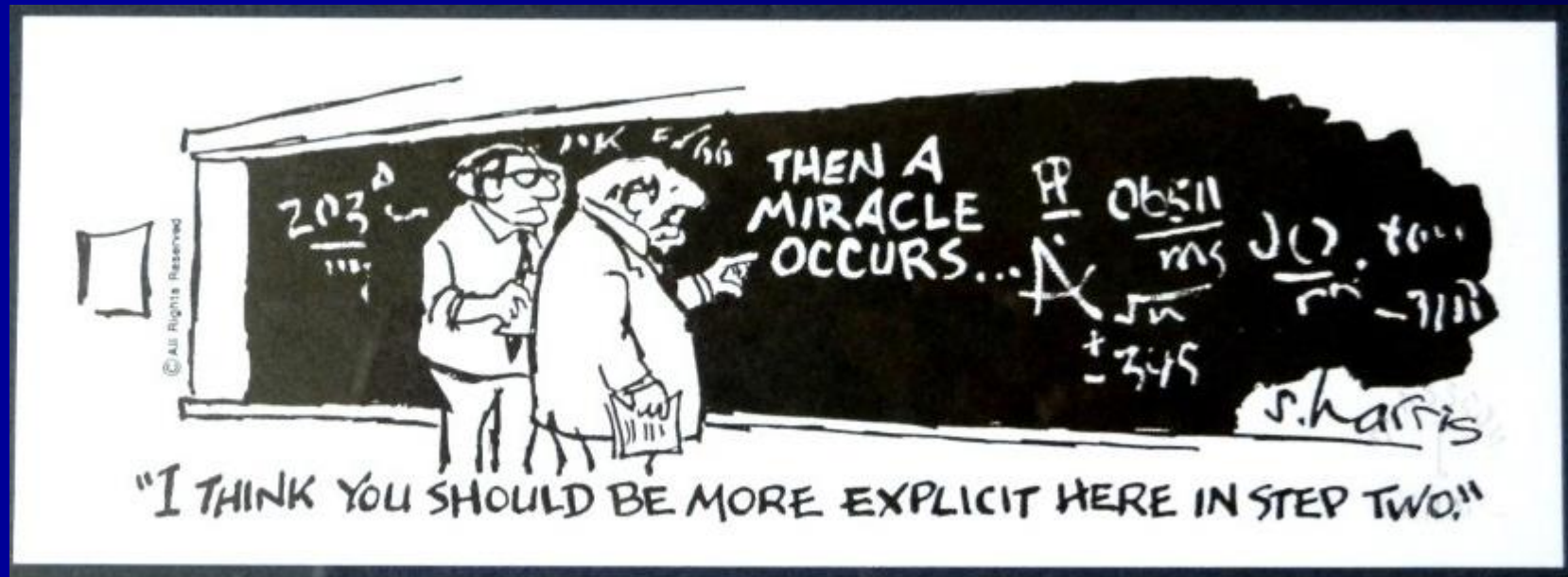
Détection directe des axions



Expérience Axion Dark Matter eXperiment (CENPA, University of Washington)

Mais aussi CAST (CERN), SOLAX, COSME, DAMA, OSQAR (CERN), PVLAS, IPSS, ALPS...

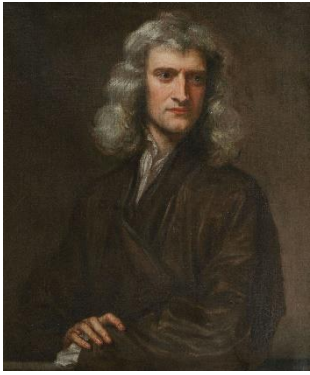
3. Solution législative: la théorie MOND



Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Un précédent: l'orbite de Mercure
La formule MOND
Au-delà de MOND

Position du problème



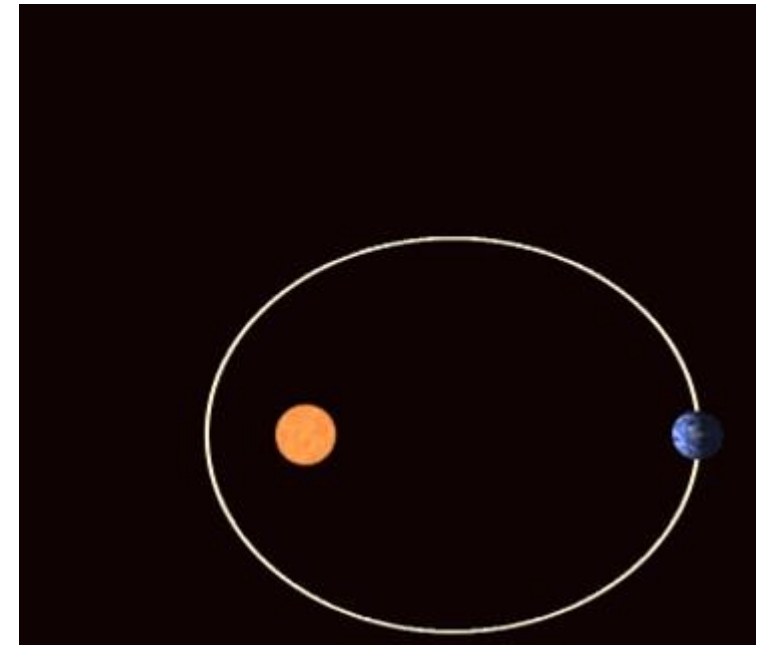
Isaac Newton

La gravitation selon Newton

$$\Delta U = 4\pi G\rho \quad \text{Équation de Poisson}$$

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\overrightarrow{\text{grad}} U \quad \text{Principe fondamental de la dynamique}$$

prévu

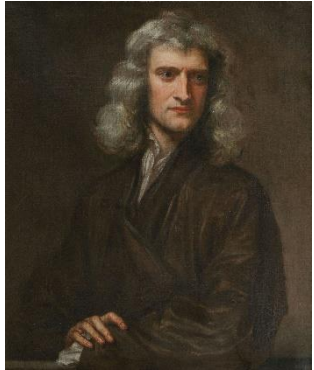


$$\|\vec{F}_G\| = \frac{GMm}{r^2}$$

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Un précédent: l'orbite de Mercure
La formule MOND
Au-delà de MOND

Position du problème

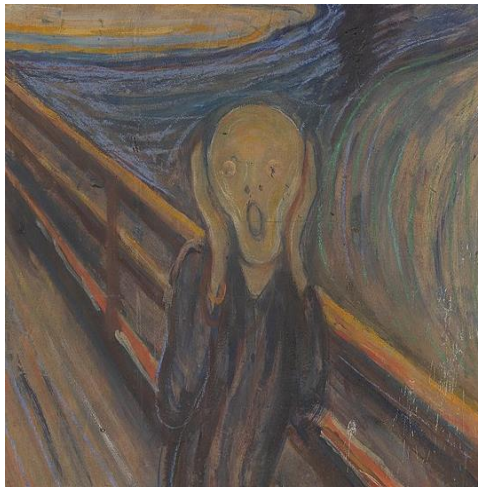


Isaac Newton

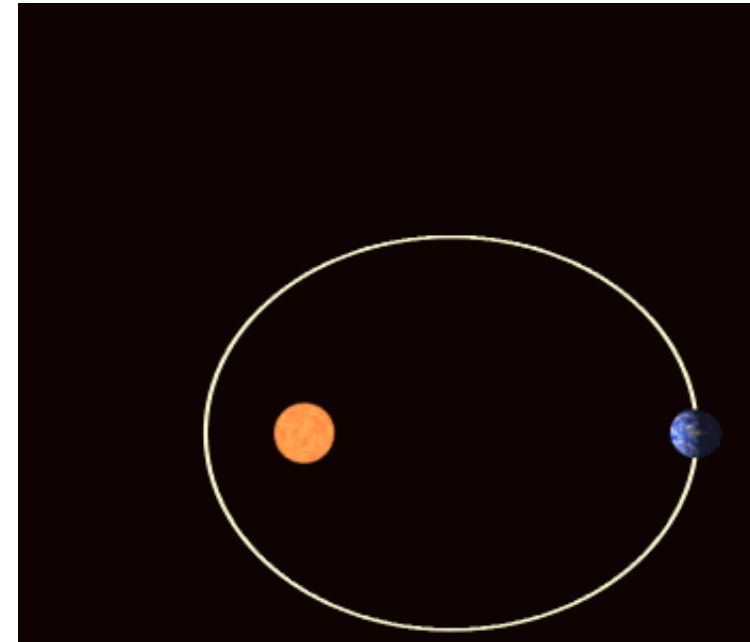
La gravitation selon Newton

$$\Delta U = 4\pi G\rho \quad \text{Équation de Poisson}$$

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\overrightarrow{\text{grad}} U \quad \text{Principe fondamental de la dynamique}$$



observé

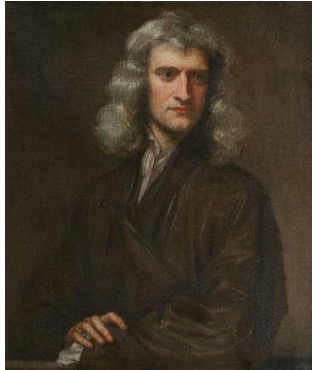


$$\|\vec{F}_G\| = \frac{GMm}{r^2}$$

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Un précédent: l'orbite de Mercure
La formule MOND
Au-delà de MOND

Solution: la relativité générale



Isaac Newton

La gravitation selon Newton

$$\Delta U = 4\pi G\rho \quad \text{Équation de Poisson}$$

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\overrightarrow{\text{grad}} U \quad \text{Principe fondamental de la dynamique}$$

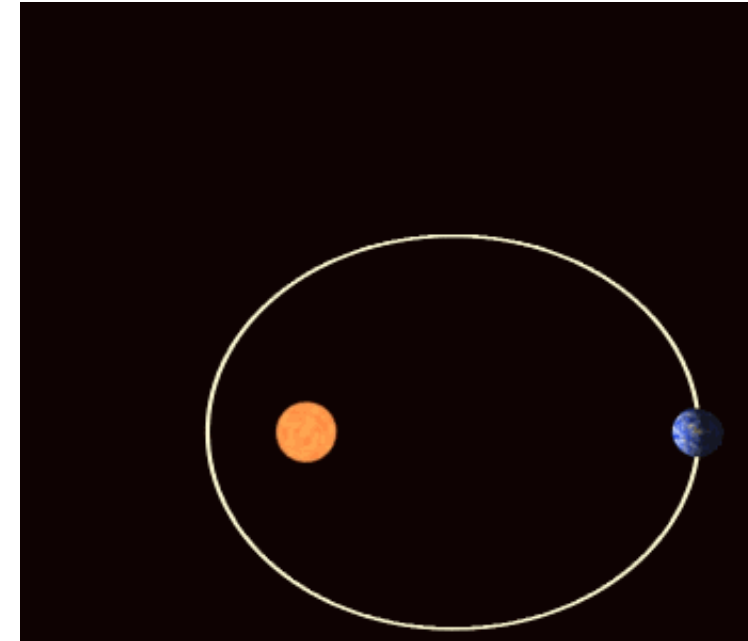


La gravitation selon Einstein

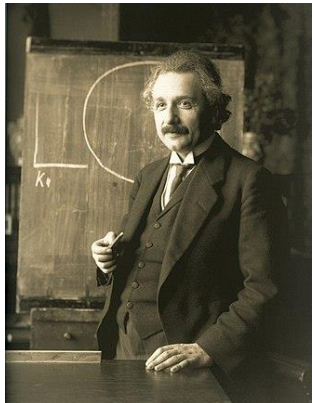
$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad \text{Équation d'Einstein}$$

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} = -\Gamma_{\rho\sigma}^\mu \frac{dx^\rho}{d\lambda} \frac{dx^\sigma}{d\lambda} \quad \text{Équation des géodésiques}$$

observé



$$\|\vec{F}_G\| = \frac{GMm}{r^2} - \frac{4(GM)^2 m}{c^2 r^3} + \dots$$



Albert Einstein
Nobel 1921

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Un précédent: l'orbite de Mercure
La formule MOND
Au-delà de MOND

Modified Newtonian Dynamics

M Milgrom. Astrophysical Journal, 270 (1983)

- Le problème des courbes de rotation galactiques a suscité très tôt des tentatives visant à corriger la loi de la gravitation (Finzi, 1963). En 1983, Mordehai Milgrom propose une modification de la théorie de Newton pour les très faibles accélérations:

La gravitation selon Newton

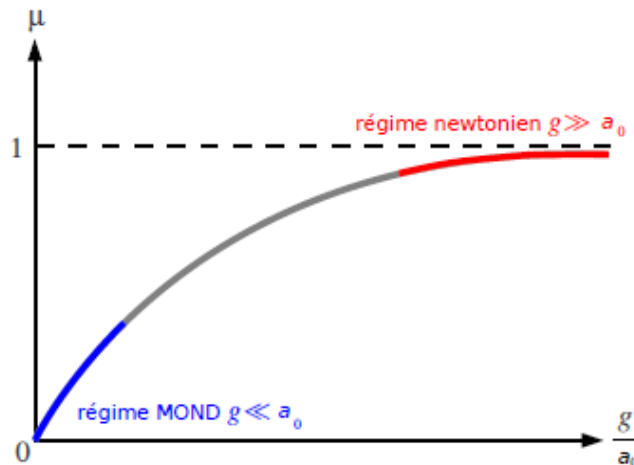
$$\Delta U_N = -4\pi G\rho \quad \text{Équation de Poisson}$$

$$\vec{a}_N = -\vec{\nabla}U_N \quad \text{Principe fondamental de la dynamique}$$

La gravitation selon Milgrom

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\mu \left(\frac{\|\vec{\nabla}U\|}{a_0} \right) \vec{\nabla}U \right] = -4\pi G\rho \quad \text{Équation de Poisson}$$

$$\vec{a} = -\vec{\nabla}U \quad \text{Principe fondamental de la dynamique}$$



$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \gg 1 \\ x & \text{si } x \ll 1 \end{cases}$$

$$a_0 = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

nouvelle constante
fondamentale de la physique !



Mordehai Milgrom

Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

Un précédent: l'orbite de Mercure
La formule MOND
 Au-delà de MOND

Modified Newtonian Dynamics

B Famaey et al. Living Reviews in relativity, 15 (2012)

- Pourquoi MOND résout le problème posé par les courbes de rotation des galaxies ?

$$\vec{a} = -\vec{\nabla}U \Leftrightarrow \mu(a/a_0)\vec{a} = -\vec{\nabla}U_N = -\frac{GM}{r^2}\vec{e}_r$$

Pour les faibles accélérations, $\mu(a/a_0) \rightarrow a/a_0$

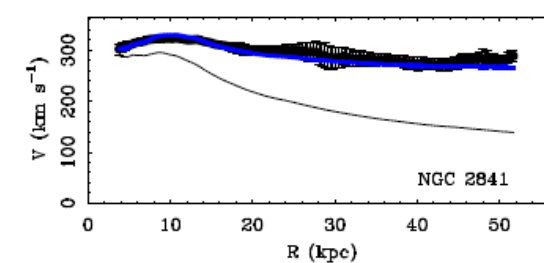
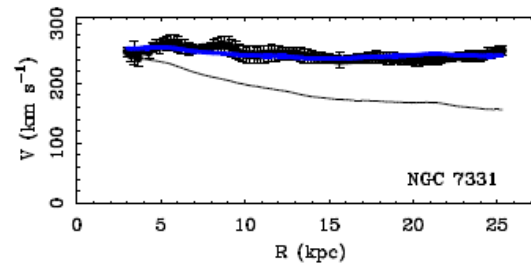
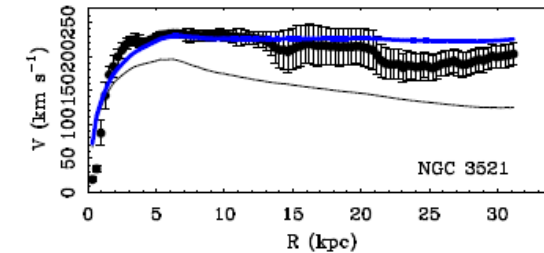
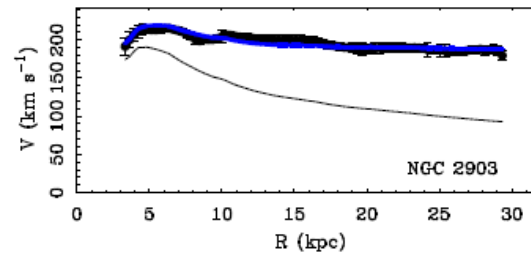
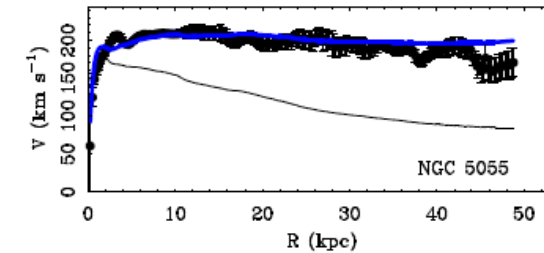
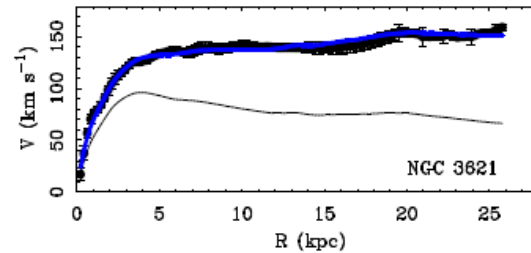
et donc

$$\frac{a^2}{a_0} = \frac{GM}{r^2} \Rightarrow a = \frac{\sqrt{GMa_0}}{r}$$

En égalant l'accélération due à la gravitation modifiée avec la force centrifuge, on obtient:

$$a = \frac{V^2}{r} = \frac{\sqrt{GMa_0}}{r} \Rightarrow V = (GMa_0)^{1/4} = C^{ste}$$

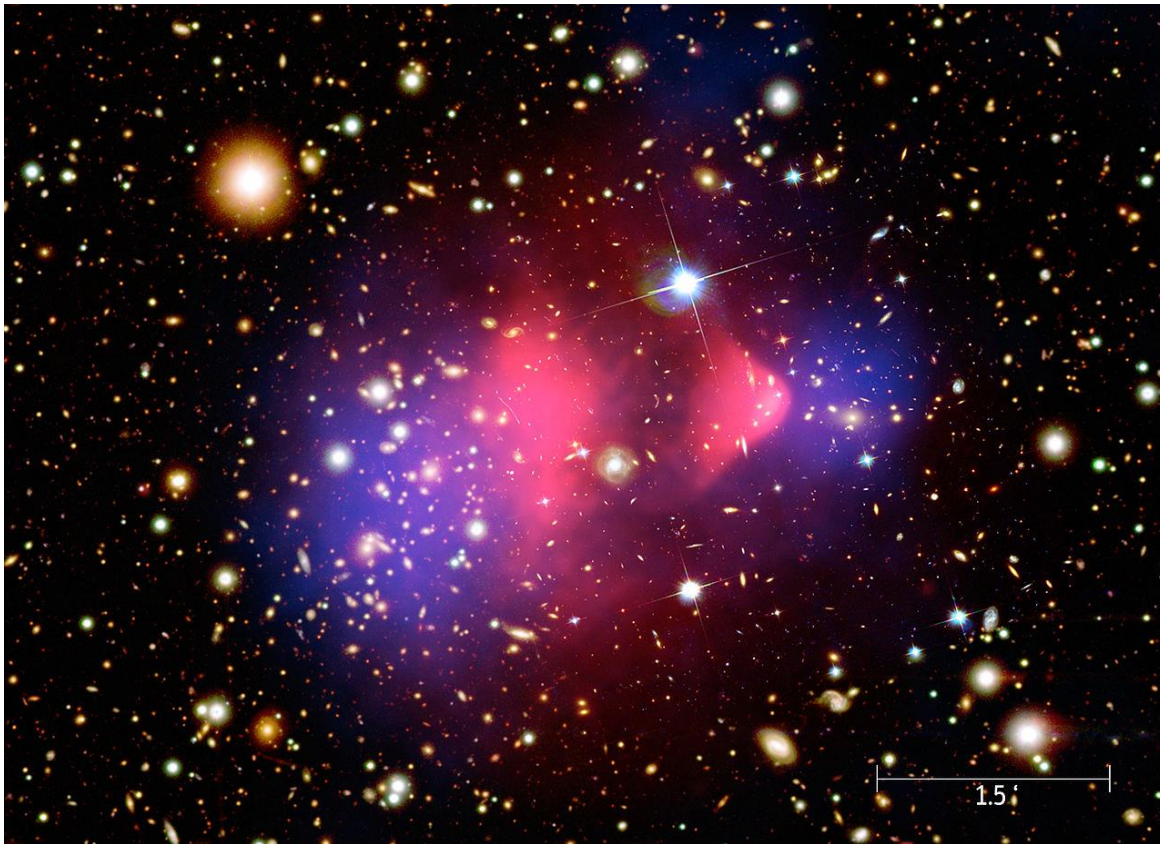
(et en bonus $M \sim V^4 =$ loi de Tully-Fisher !)



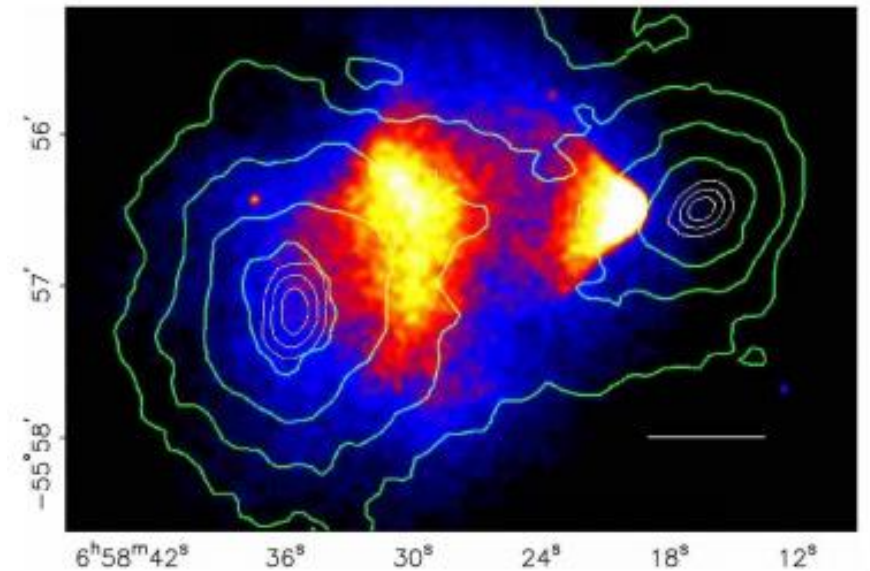
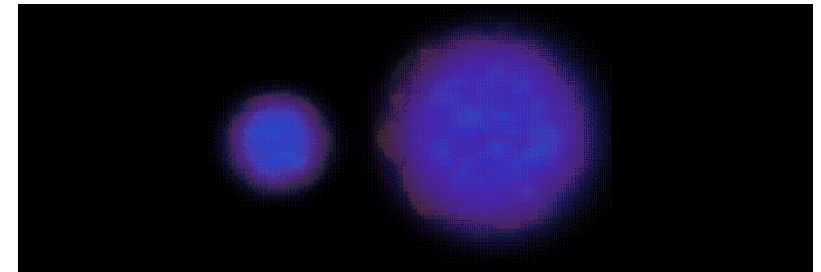
Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Un précédent: l'orbite de Mercure
La formule MOND
Au-delà de MOND

Problèmes de MOND



Amas 1E 0657-56 ou « de la balle de fusil » (Cowe et al, 2006)



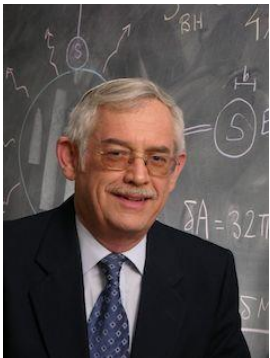
Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

Un précédent: l'orbite de Mercure
La formule MOND
Au-delà de MOND

RMOND

J Bekenstein. *Astrophysical Journal*, 270 (1983)
T Clifton et al. *Physics Reports* 513 (2012)

- Les prédictions de MOND sont incorrectes aux grandes échelles (amas, CMB...). MOND implique des actions à distance et échoue à décrire les effets de lentille \Rightarrow Nécessité d'inclure les effets relativistes = Relativistic MOND:



Jakob Bekenstein

- La théorie **Tenseur-Vecteur-Scalaire** (TeVeS) a été formulée par Bekenstein en 2004 et elle constitue l'extension relativiste la plus naturelle de la théorie MOND pour les situations à faibles courbures. Elle introduit des champs supplémentaires:

$$\tilde{g}_{\mu\nu} = e^{-2\phi} g_{\mu\nu} - 2 \sinh(2\phi) A_\mu A_\nu$$

Elle préserve le principe d'équivalence faible $m_I = m_g$. Elle reproduit correctement tous les effets déjà prévus par MOND plus les effets de lentille... mais TeVeS a des problèmes: instabilités, difficultés aux grandes échelles, introduction de champs *ad hoc*...

- Développements toujours en cours (Skordis, C., & Złośnik, T. (2021). New relativistic theory for modified Newtonian dynamics. *Physical Review Letters*, 127(16), 161302).

- D'autres familles de solutions avec champs supplémentaires sont à l'étude (bimétrique, Einstein-Cartan...)... mais aussi des théories non locales ($f(R)$...), des théories à plus haute dimensionnalité (branes, Einstein-Gauss-Bonnet...)

Conclusion

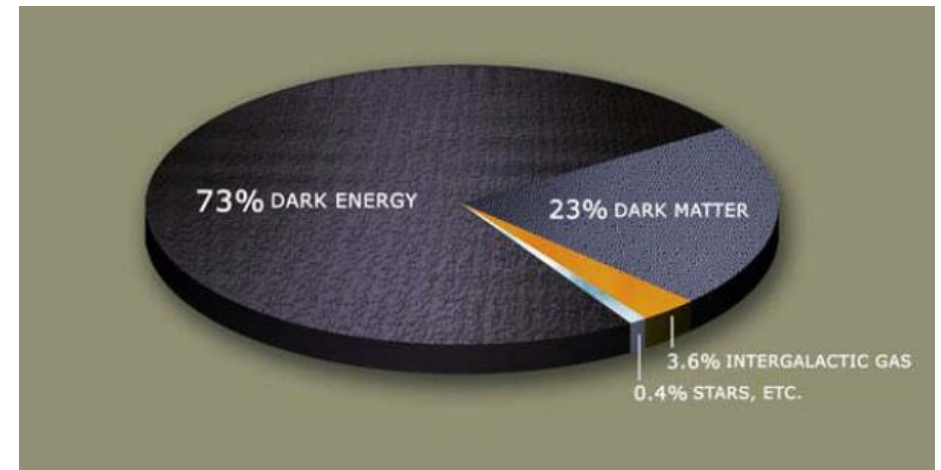
Que savons nous en 2023 ?

- Des anomalies gravitationnelles sont observées à diverses échelles de notre univers (galaxies, amas de galaxies, CMB...). Ces anomalies ne peuvent pas être expliquées à partir des lois physiques connues et des particules du modèle standard.

- Une première famille de solution consiste à postuler l'existence de nouvelles particules non détectables par voie optique = « matière noire ».

👍 Satisfaisant pour les grandes structures.

👎 Pas de détection des particules candidates, anomalie « core-cusp », relation de Tully-Fischer baryonique...



- Une seconde famille de solutions consiste à modifier les lois de la gravitation = MOND, RMOND.
 - 👍 Satisfaisant pour les « petites » structures (galaxies).
 - 👎 Introduction de champs/paramètres *ad hoc* (pas d'explication physique pour l'origine de l'effet MOND), problème pour les amas, CMB...

Candidats actuellement à l'étude

- Axions
- Neutralinos (WIMP)
- Gravitinos (WIMP)
- Sneutrinos (WIMP)
- Théorie MOND
- Théorie TeVeS
- Défauts cosmiques
- Théorie d'Einstein-Cartan
- Partenaires de Kaluza-Klein
- Champs de Kalb-Ramond
- Gaz de Chaplygin
- Théorie $f(R)$
- Matière miroir
- Théorie bimétrique
- Wimpzillas
- Extension Z_2 du secteur de Higgs
- Axinos
- Cryptons
- D-matter
- Galileons
- GMSB
- Branons
- Neutrinos lourds
- Neutrinos stériles
- Photons noirs
- Q-balls
- Théories Khronométrique, Einstein-Ether
- ...



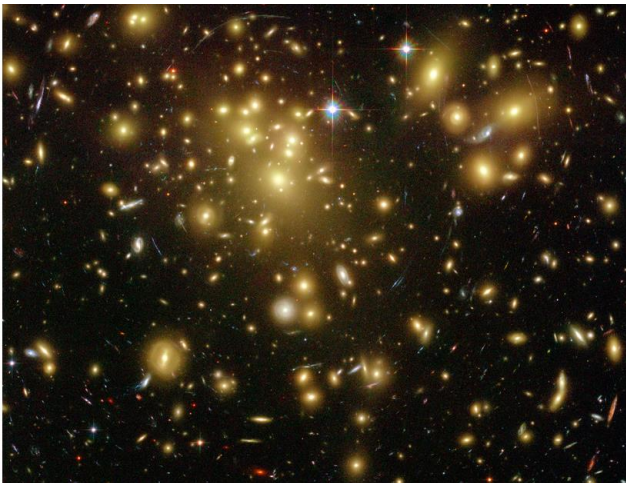
Thomas Kuhn

“The proliferation of competing articulations, the willingness to try anything, the expression of explicit discontent, the recourse to philosophy and to debate over fundamentals, all these are symptoms of a transition from normal to extraordinary research.”



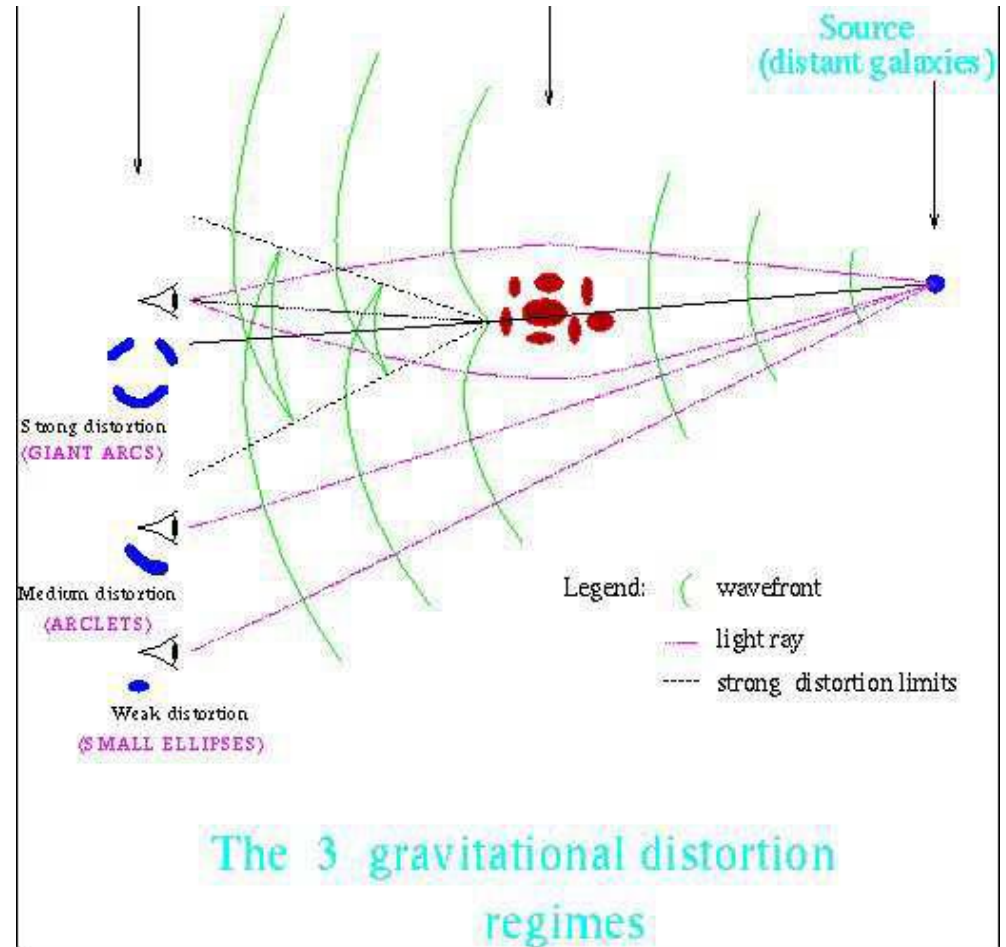
Cheshire cat, amas SDSS J1038+4849

Effet de lentille fort



Abell 1698

Effet de lentille faible

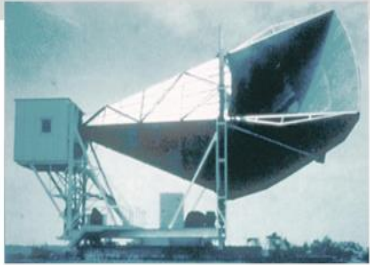


Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

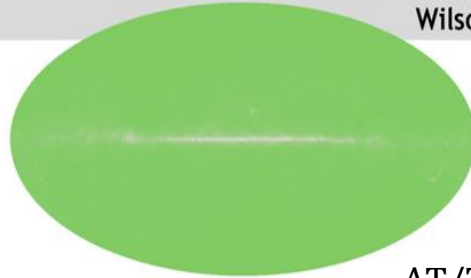
Les amas galactiques
Les galaxies spirales
Le rayonnement fossile

Cartographie du CMB

1965



Penzias and
Wilson

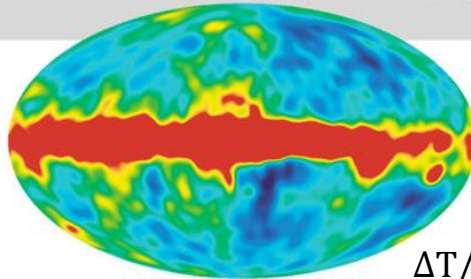


$$\Delta T/T = 10^{-2}$$

1992

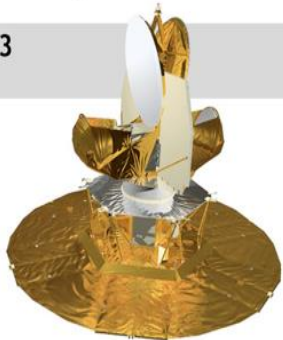


COBE

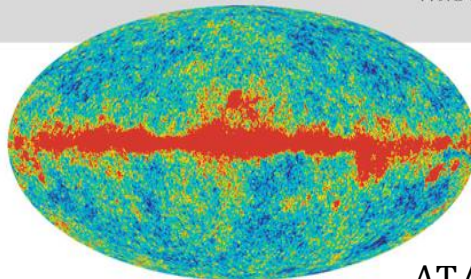


$$\Delta T/T = 10^{-4}$$

2003



WMAP



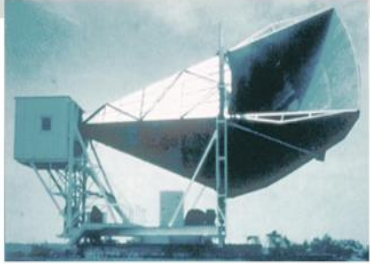
$$\Delta T/T = 10^{-5}$$

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

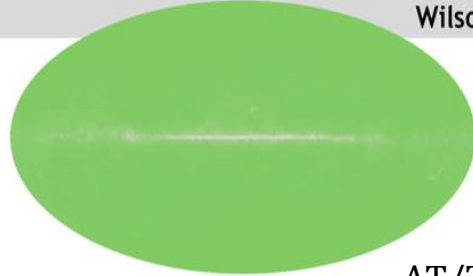
Les amas galactiques
Les galaxies spirales
Le rayonnement fossile

Cartographie du CMB

1965



Penzias and
Wilson

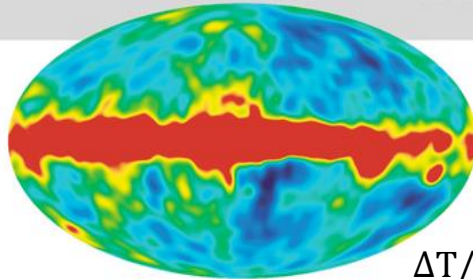


$$\Delta T/T = 10^{-2}$$

1992

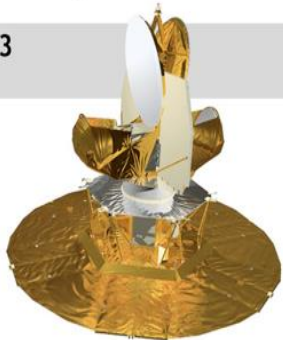


COBE

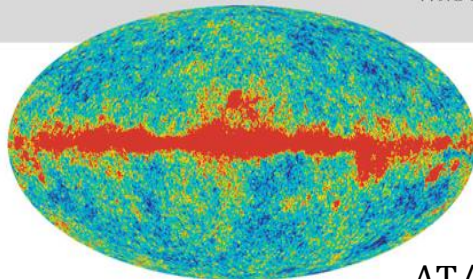


$$\Delta T/T = 10^{-4}$$

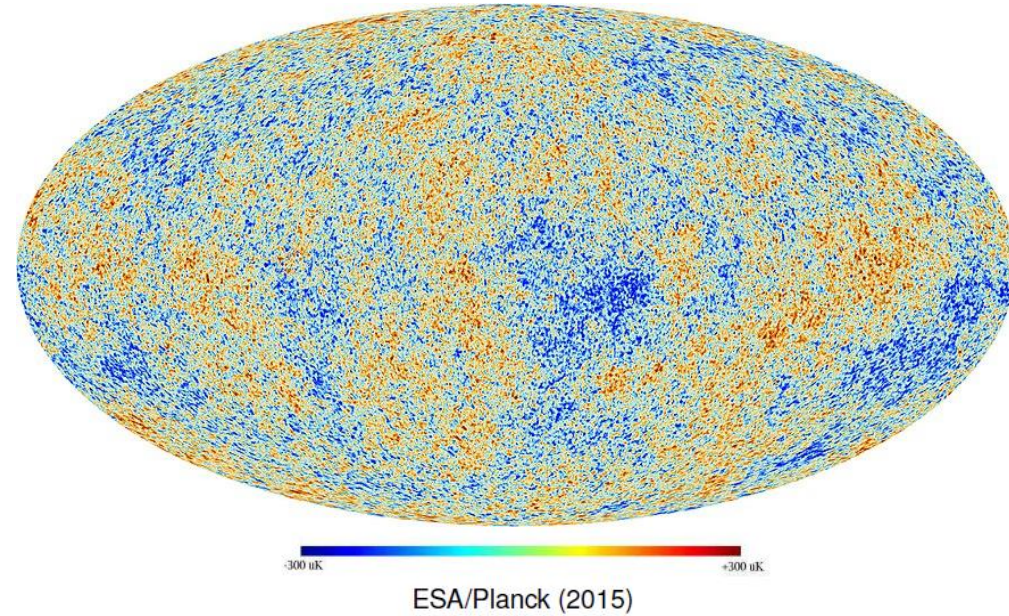
2003



WMAP



$$\Delta T/T = 10^{-5}$$

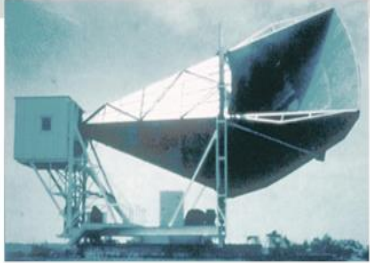


Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

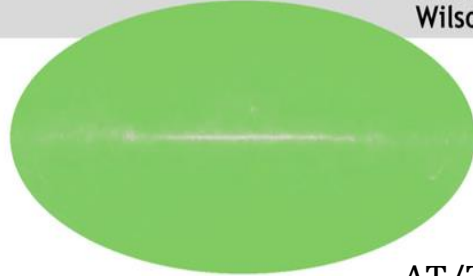
Les amas galactiques
 Les galaxies spirales
 Le rayonnement fossile

Cartographie du CMB

1965



Penzias and Wilson

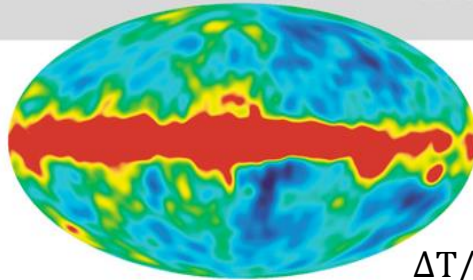


$$\Delta T/T = 10^{-2}$$

1992

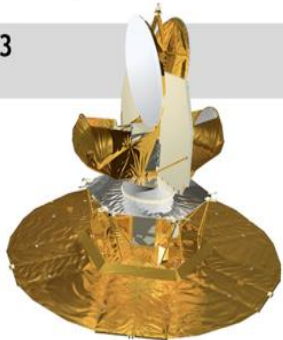


COBE

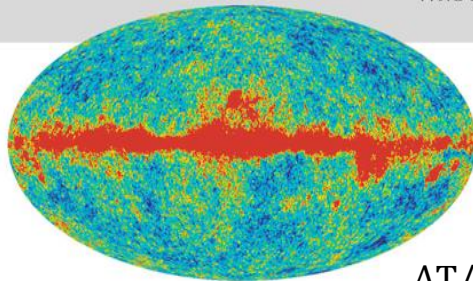


$$\Delta T/T = 10^{-4}$$

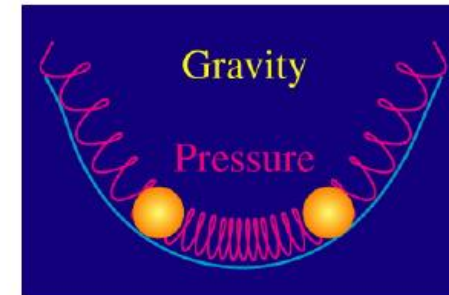
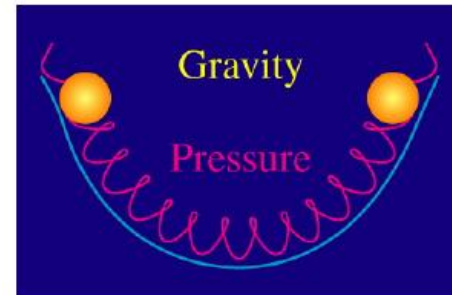
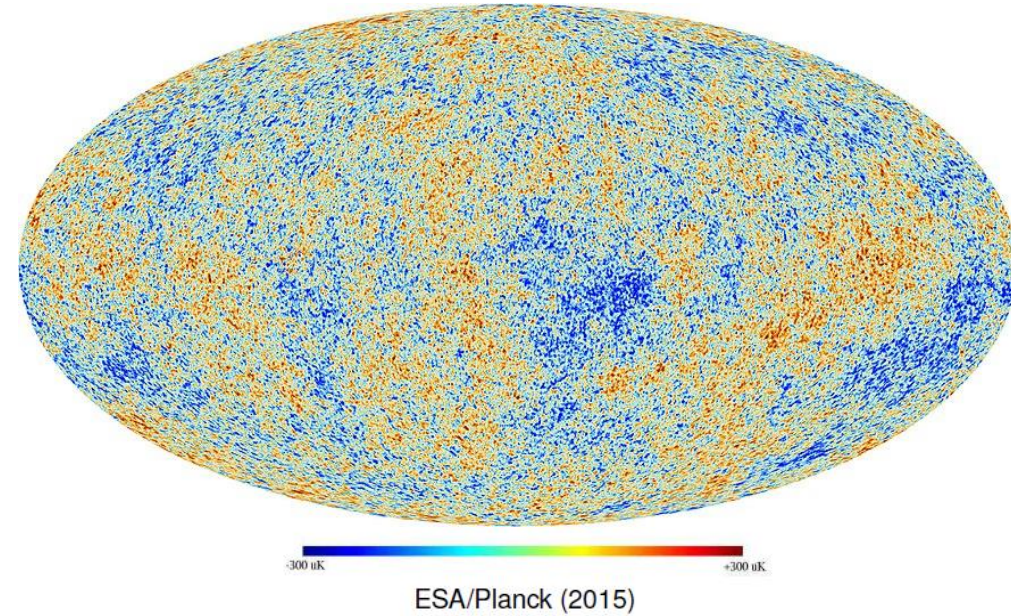
2003



WMAP



$$\Delta T/T = 10^{-5}$$

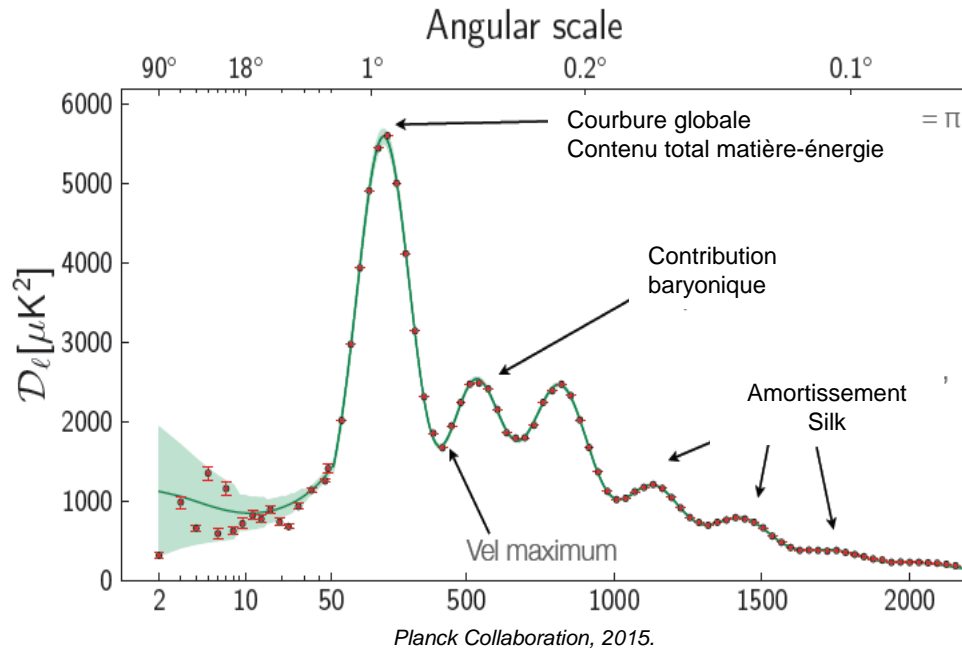


Mécanisme des oscillations acoustiques photon-baryon

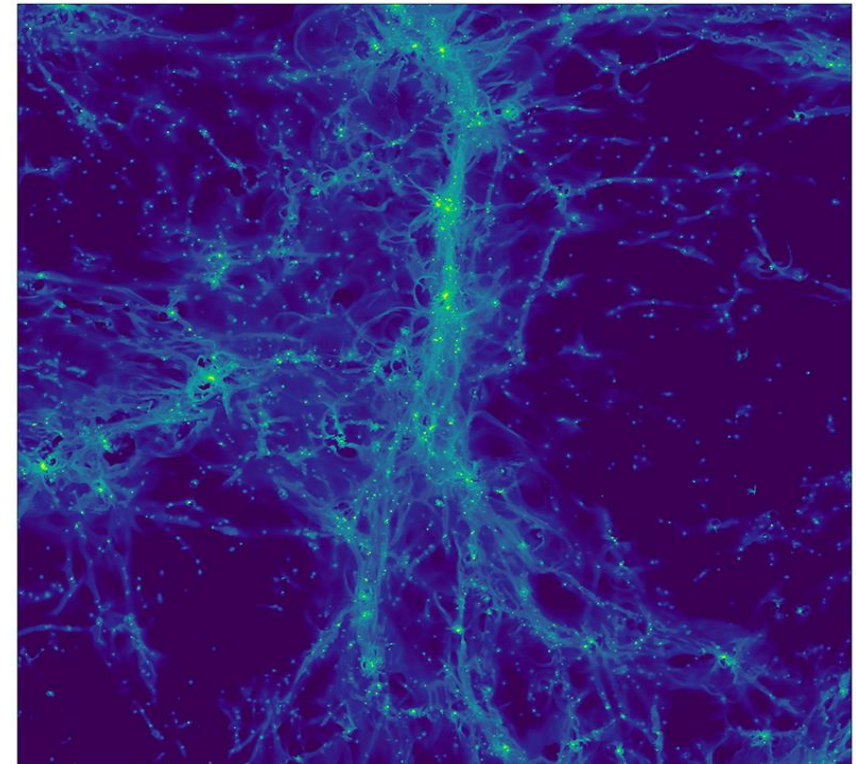
Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

Les amas galactiques
 Les galaxies spirales
 Le rayonnement fossile

Spectre acoustique du CMB



Pour rendre compte des oscillations observées, le puit doit être suffisamment profond. La matière baryonique ne suffit pas \Rightarrow masse manquante

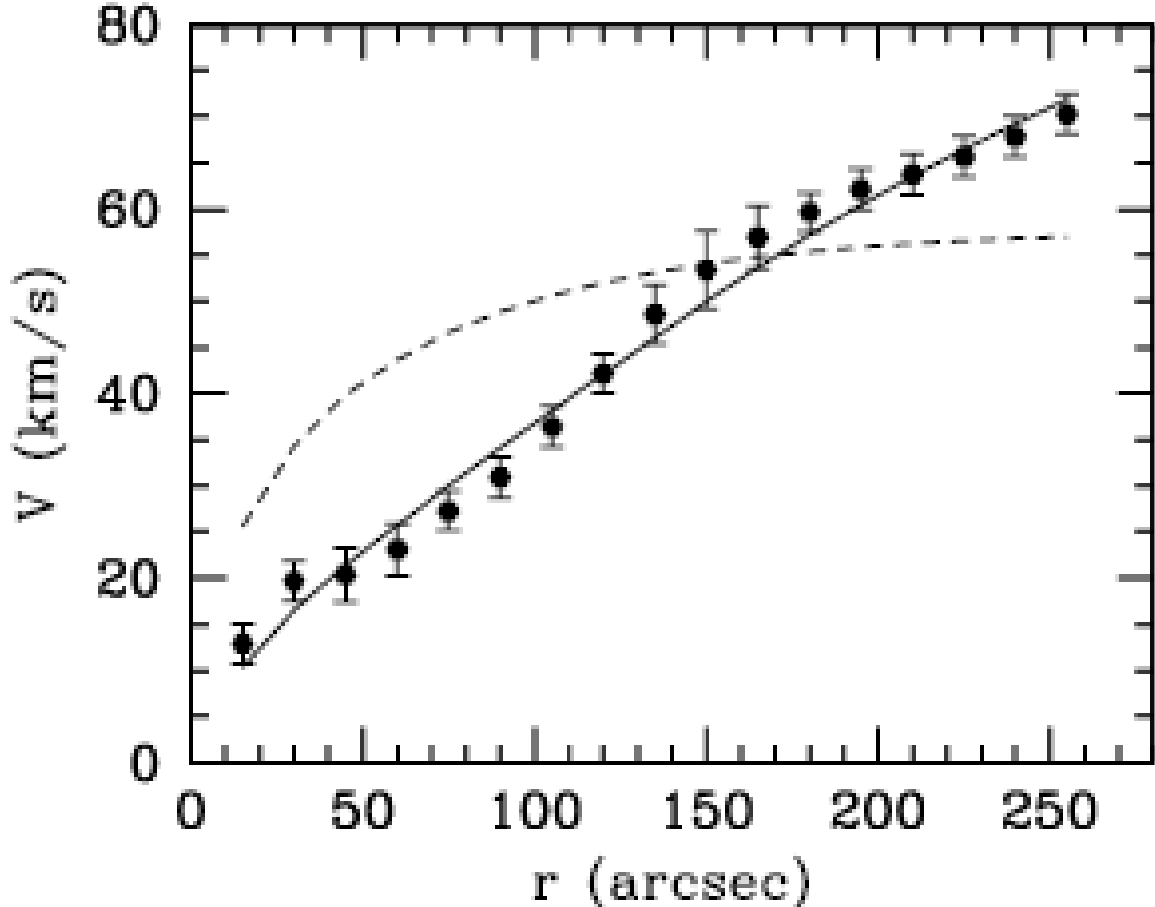


Cosmic web

- Amplitude des oscillations = effet Sachs-Wolfe (1967) :

$$\left. \frac{\delta T}{T} \right)_{SW} = \frac{1}{3} \frac{\delta \Phi}{c^2}$$

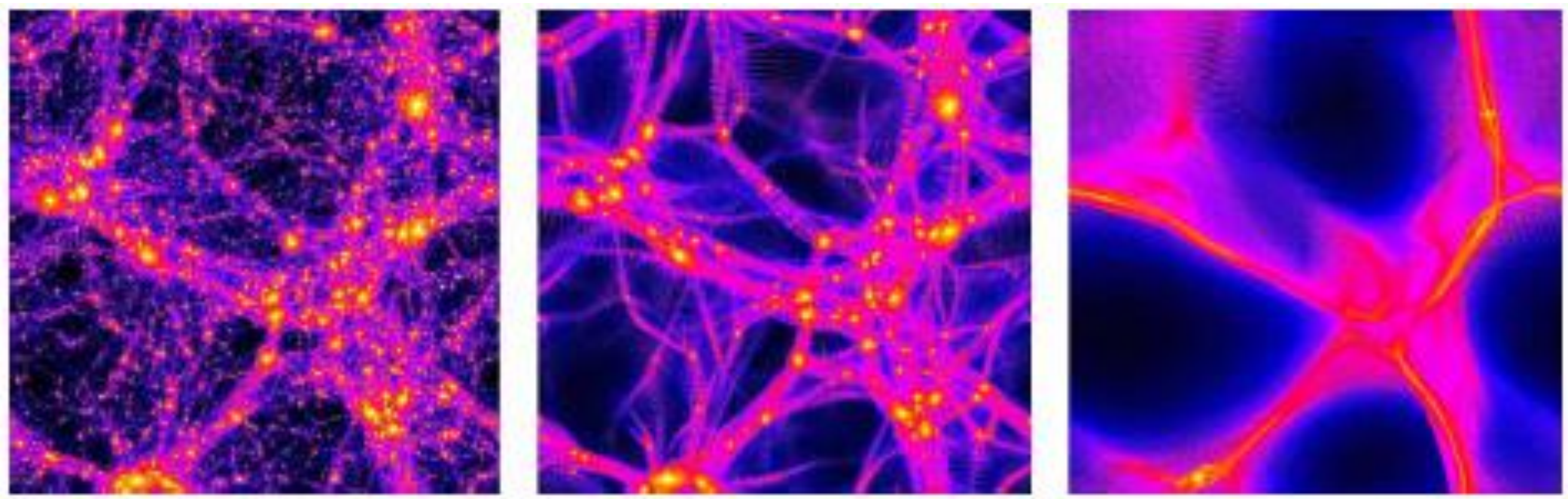
Problème core-cusp



Dwarf Galaxy
DDO 47

P. Salucci. Foundations of Physics 48.10 (2018).

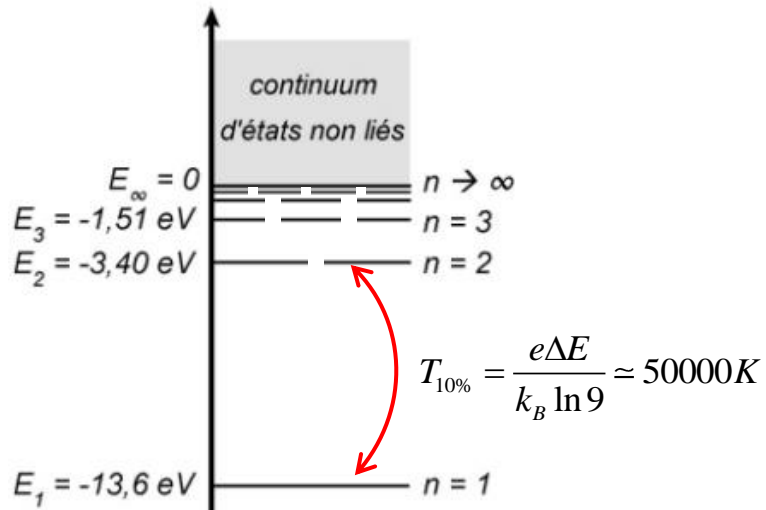
CDM vs WDM vs HDM



Source: F. Combes, *Les grands problèmes du modèle standard*, CDF (2015)

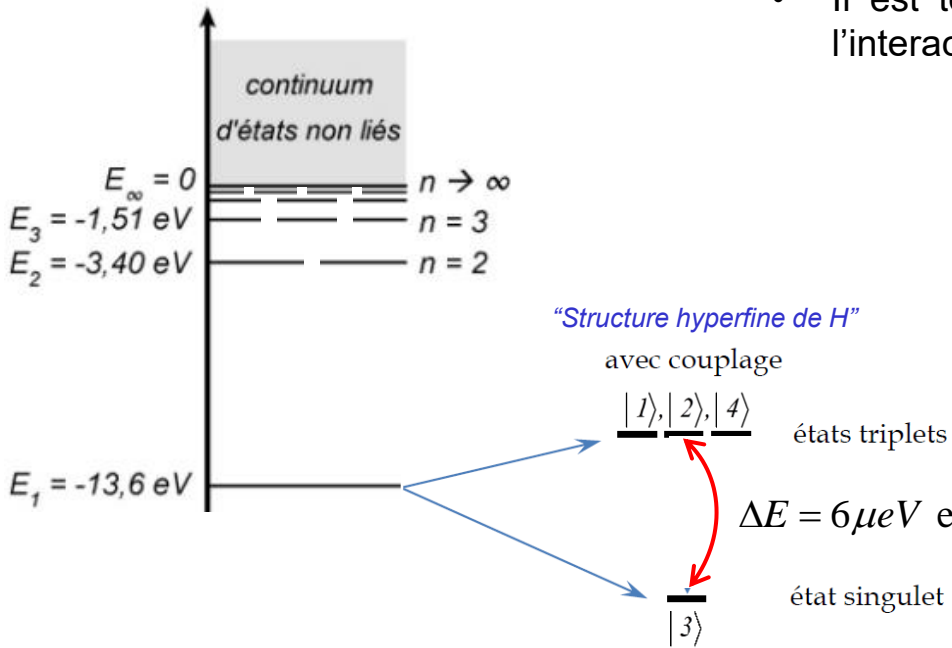
La raie HI à 21cm

- Dans l'espace, il y a beaucoup d'hydrogène, dont on détecte le rayonnement lorsqu'il est suffisamment chaud, par exemple au niveau des étoiles. En revanche, dans des milieux interstellaires froids qui bordent les galaxies, les électrons ne sont pas excités sur les niveaux supérieurs à 1s et l'hydrogène est invisible.



La raie HI à 21cm

- Dans l'espace, il y a beaucoup d'hydrogène, dont on détecte le rayonnement lorsqu'il est suffisamment chaud, par exemple au niveau des étoiles. En revanche, dans des milieux interstellaires froids qui bordent les galaxies, les électrons ne sont pas excités sur les niveaux supérieurs à 1s et l'hydrogène est invisible.



- Il est toutefois possible de le détecter si l'on prend en compte l'interaction spin de l'électron–spin du proton (Van de Hulst, 1944):

$$H = H_0 + H_{\text{int}} = H_0 + A \vec{S}_e \cdot \vec{S}_p$$

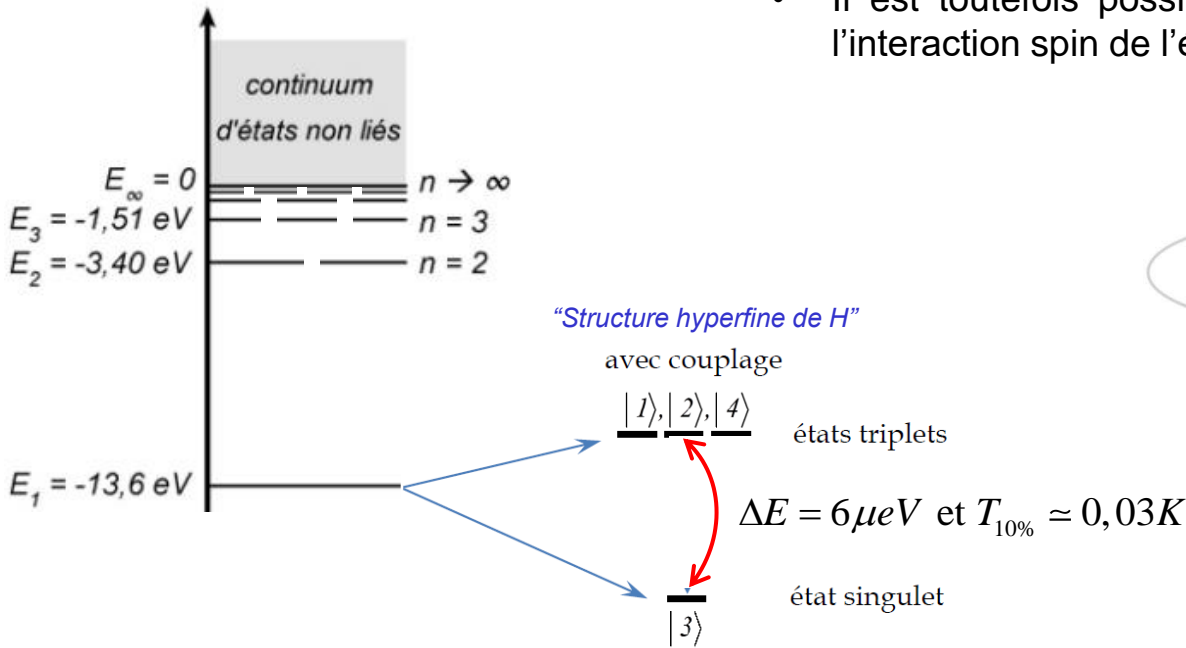
$$= \begin{bmatrix} E_0 + \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_0 + \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_0 - 3\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_0 + \alpha \end{bmatrix}_{\{\delta\}}$$

$$\alpha = \frac{A\hbar^2}{4}$$

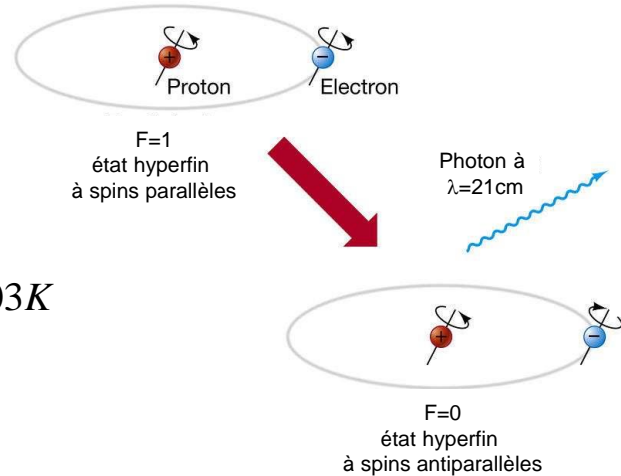
Détection radio de H

La raie HI à 21cm

- Dans l'espace, il y a beaucoup d'hydrogène, dont on détecte le rayonnement lorsqu'il est suffisamment chaud, par exemple au niveau des étoiles. En revanche, dans des milieux interstellaires froids qui bordent les galaxies, les électrons ne sont pas excités sur les niveaux supérieurs à 1s et l'hydrogène est invisible.



- Il est toutefois possible de le détecter si l'on prend en compte l'interaction spin de l'électron–spin du proton (Van de Hulst, 1944):



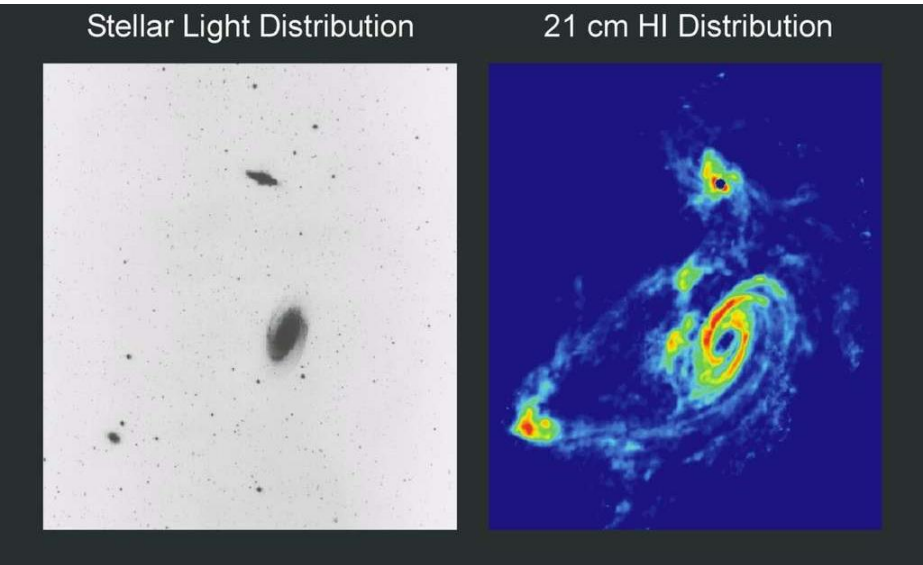
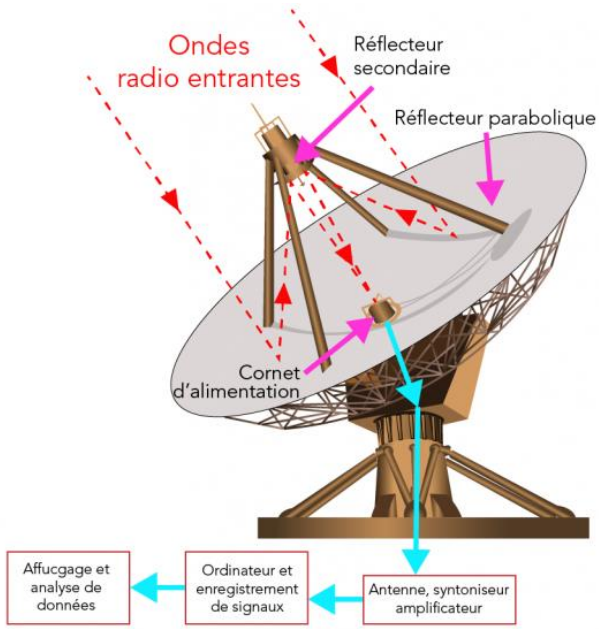
Détection radio de H

La radioastronomie

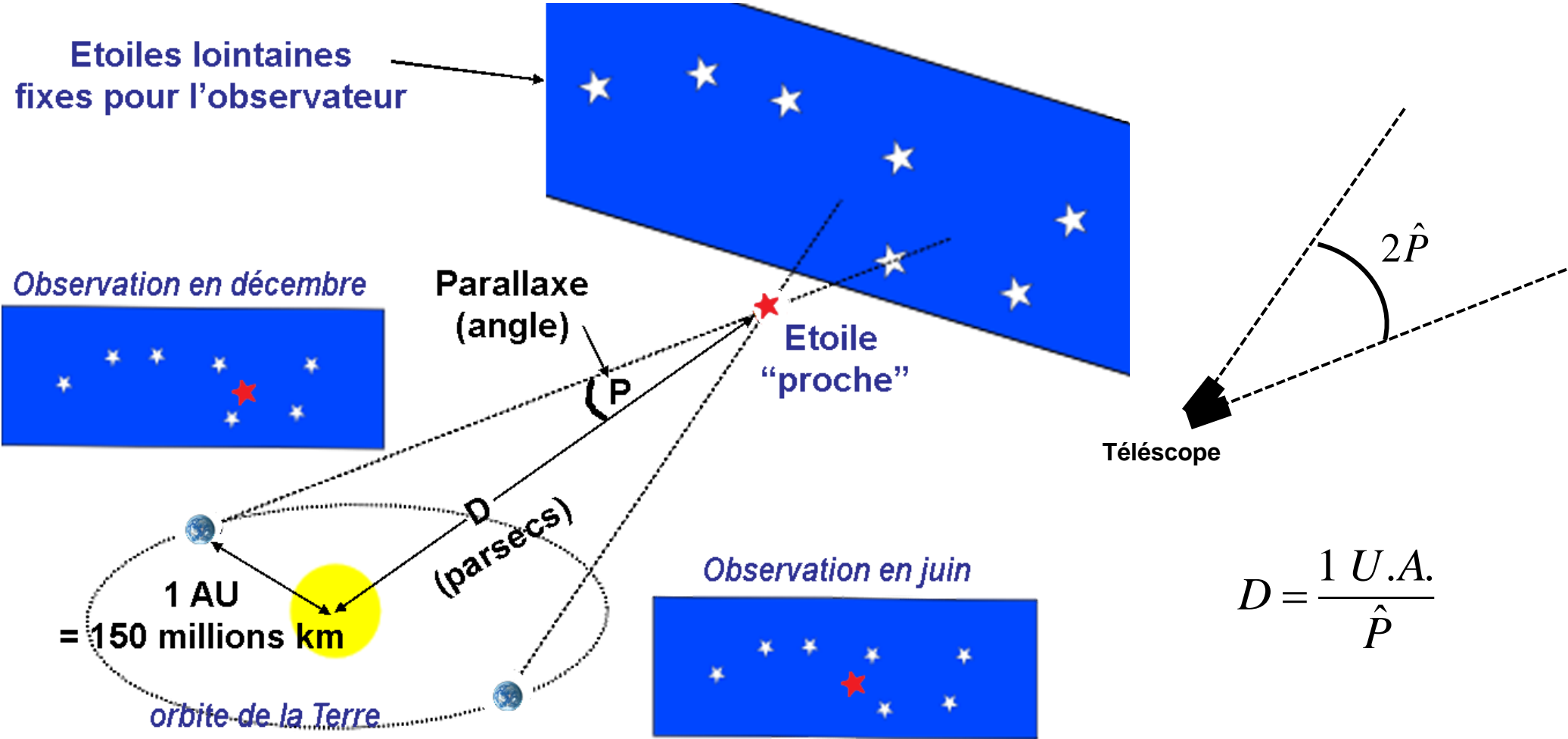


Harold Purcell
Nobel 1952

- Comme la différence en énergie est très petite, l'excitation thermique devient possible même pour des températures très basses. Cette différence d'énergie correspond à un rayonnement radio de longueur d'onde 21cm, détecté par Ewen et Purcell en 1951. Il figure sur les plaques de Pioneer.
- Cette découverte combinée au développement des technologies RADAR (ondes centimétriques) conduit dans les années 1970 à la naissance de la radioastronomie.



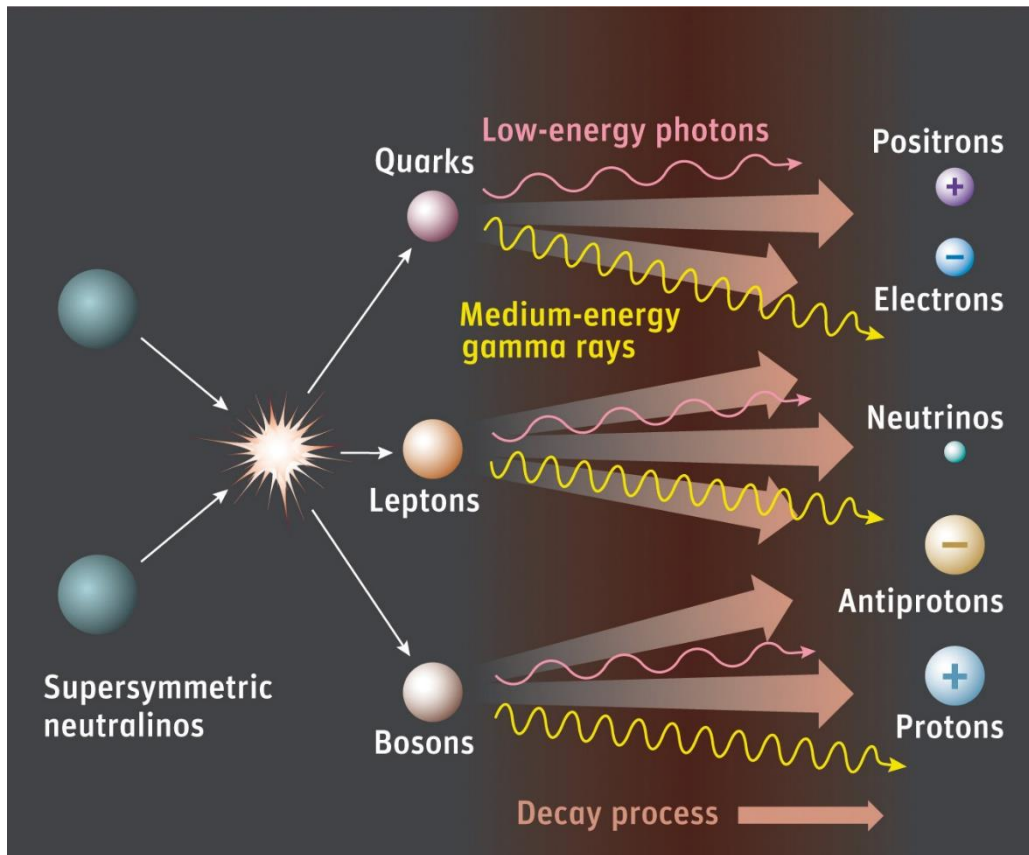
Méthode de la parallaxe



Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

Détection indirecte des WIMP



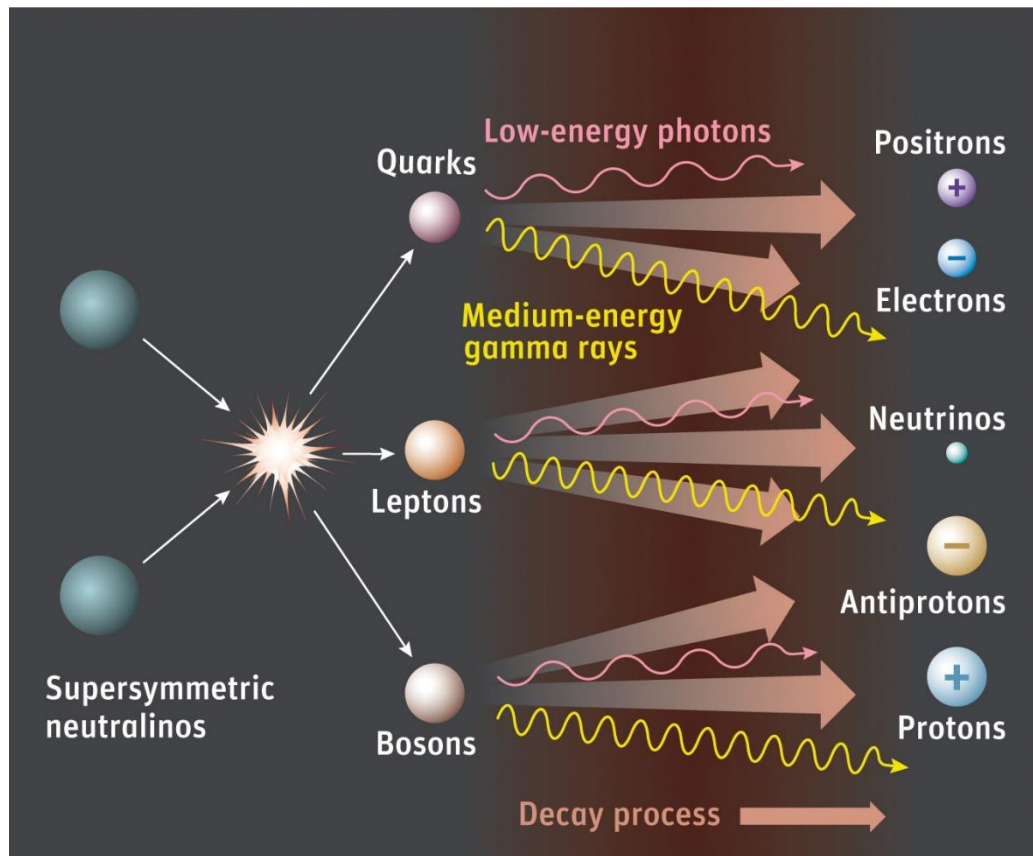
Un WIMP est sa propre antiparticule

$$\rho_W \approx 5 \cdot 10^{-34} \text{ g / cm}^3$$

Un problème de « masse manquante »
Solution ontologique: la matière noire
Solution législative: la théorie MOND

MACHO
WIMP
Axion

Détection indirecte des WIMP



Télescopes à rayons gamma $v_\gamma = \frac{m_w c^2}{h}$



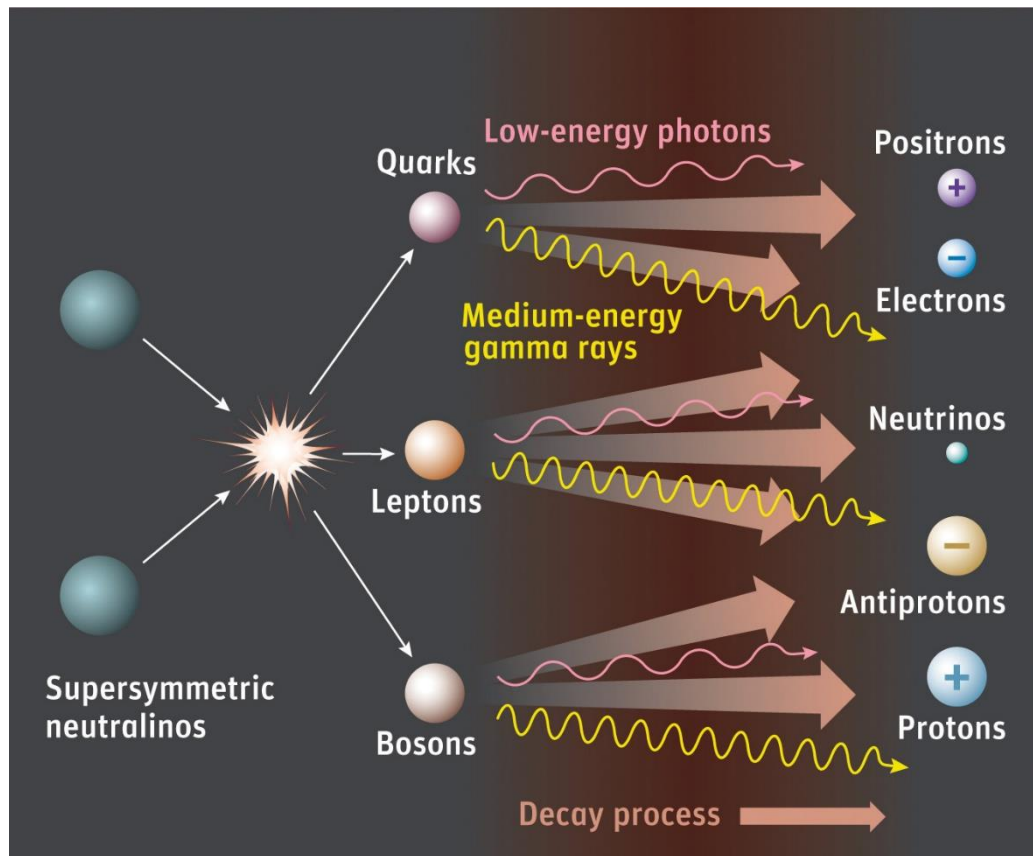
Un WIMP est sa propre antiparticule

$$\rho_w \approx 5 \cdot 10^{-34} \text{ g / cm}^3$$

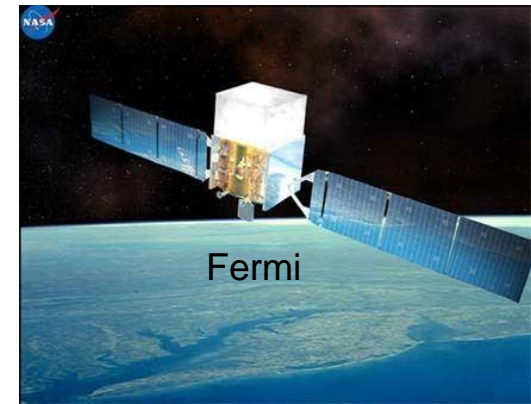
Un problème de « masse manquante »
 Solution ontologique: la matière noire
 Solution législative: la théorie MOND

MACHO
 WIMP
 Axion

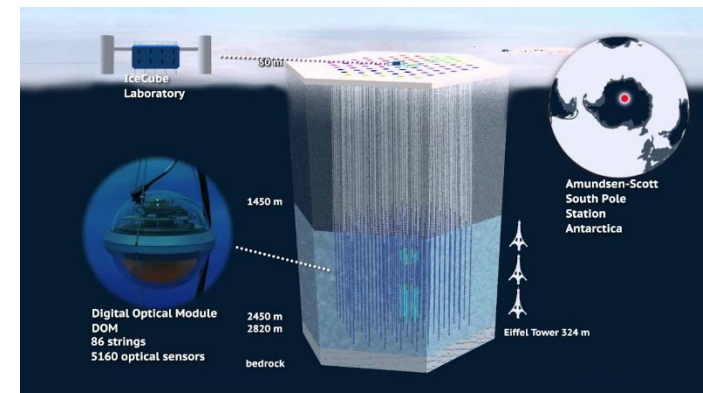
Détection indirecte des WIMP



Télescopes à rayons gamma $v_\gamma = \frac{m_W c^2}{h}$



Télescopes à neutrinos (effet Cerenkov)



Un WIMP est sa propre antiparticule

$$\rho_W \approx 5.10^{-34} \text{ g / cm}^3$$