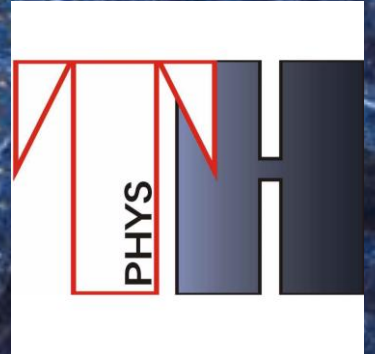




Leçon 2:

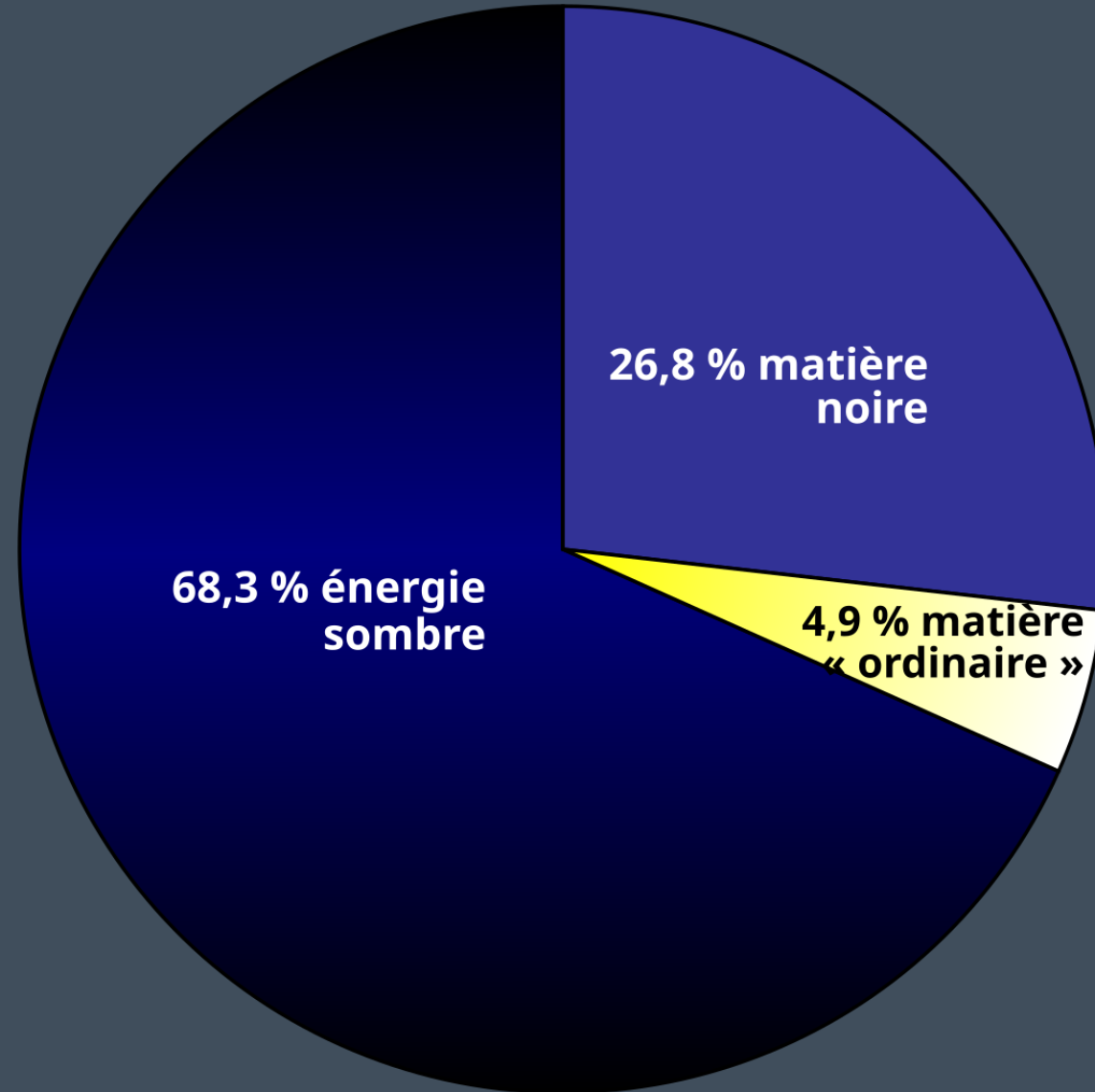
Approche théorique de la matière
noire: principaux candidats

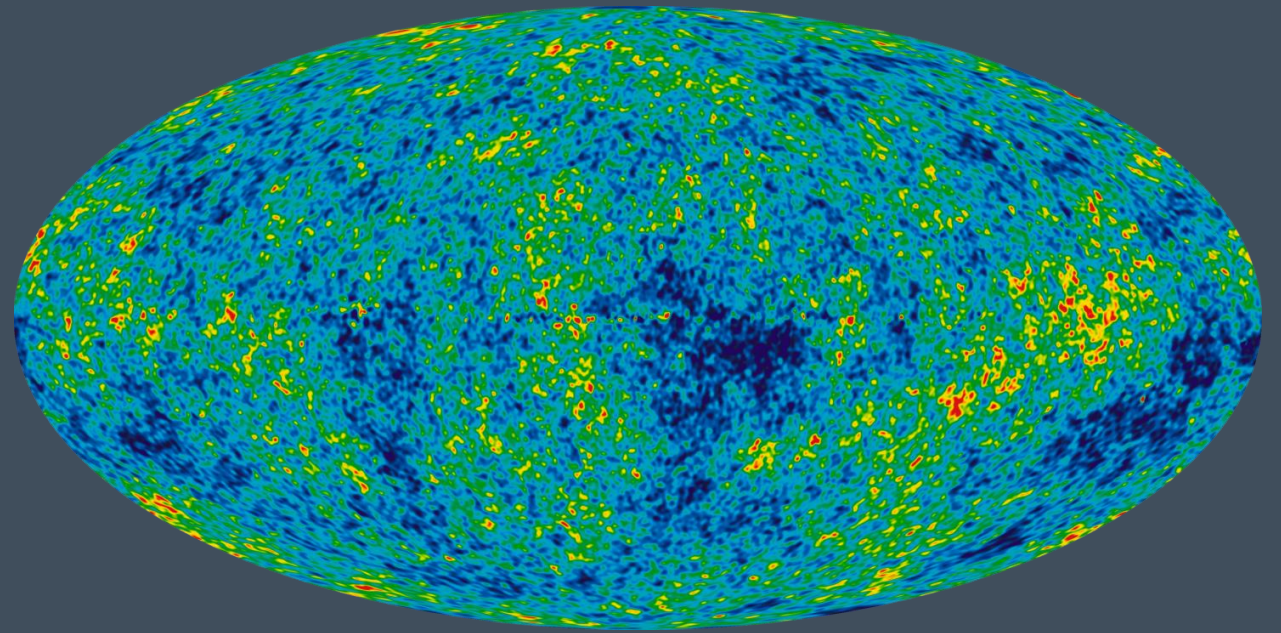
Nicolas Esser

Plan du cours

- 14/01 - Historique et approche observationnelle de la matière noire
- 21/01 - Approche théorique de la matière noire et principaux candidats
- 04/02 - Tests et études modernes de la matière noire: des collisionneurs de particules aux simulations cosmologiques
- 11/02 - Trous noirs primordiaux et matière noire à l'échelle subgalactique

Récapitulatif du cours précédent

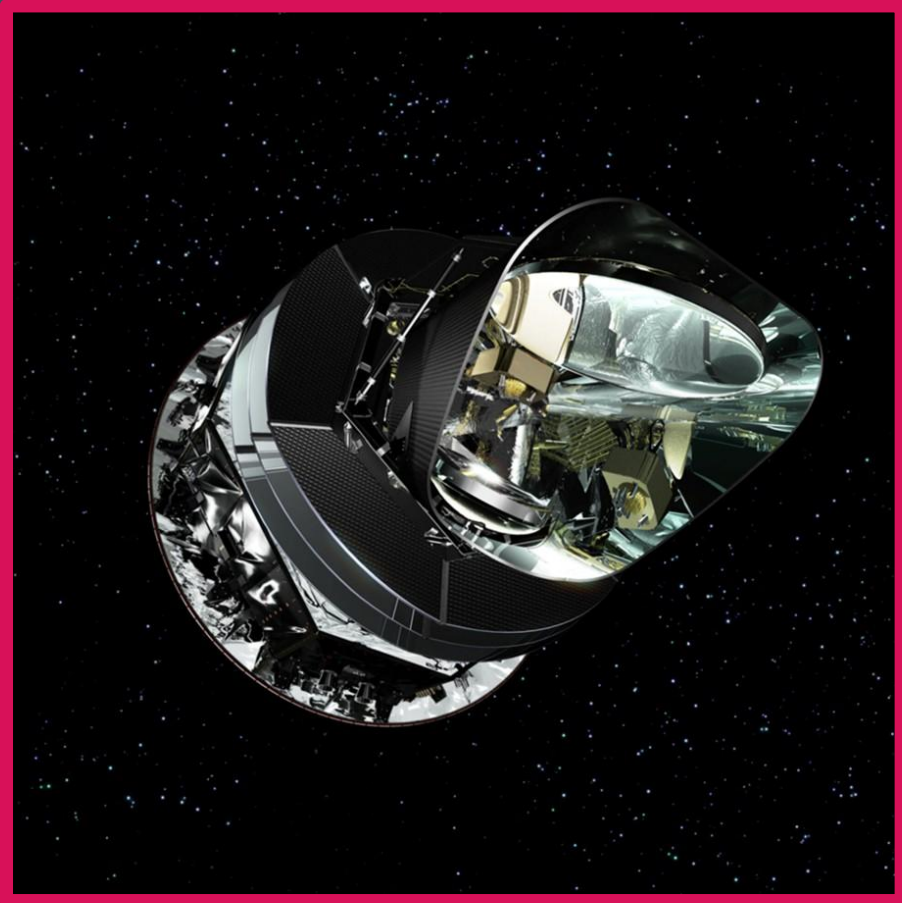




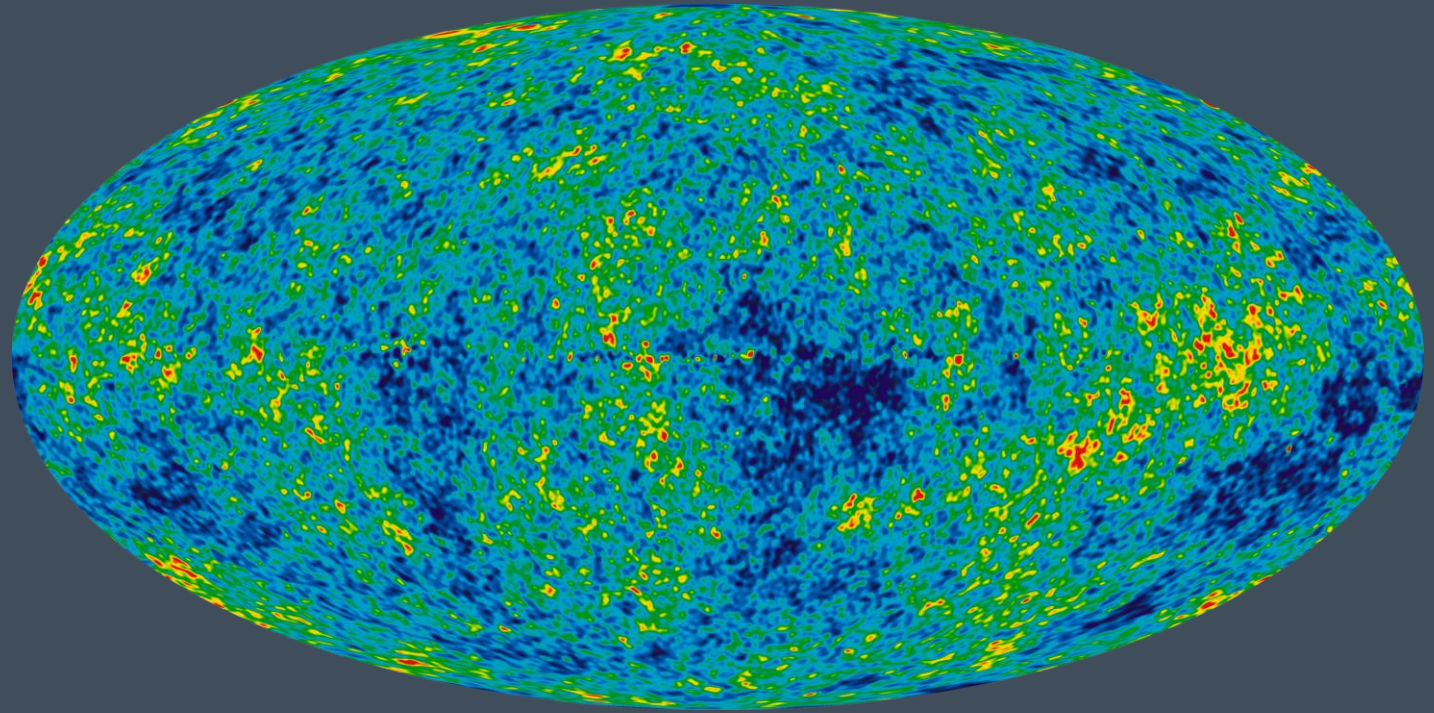


La matière noire est présente
à différentes échelles et
différentes époques !

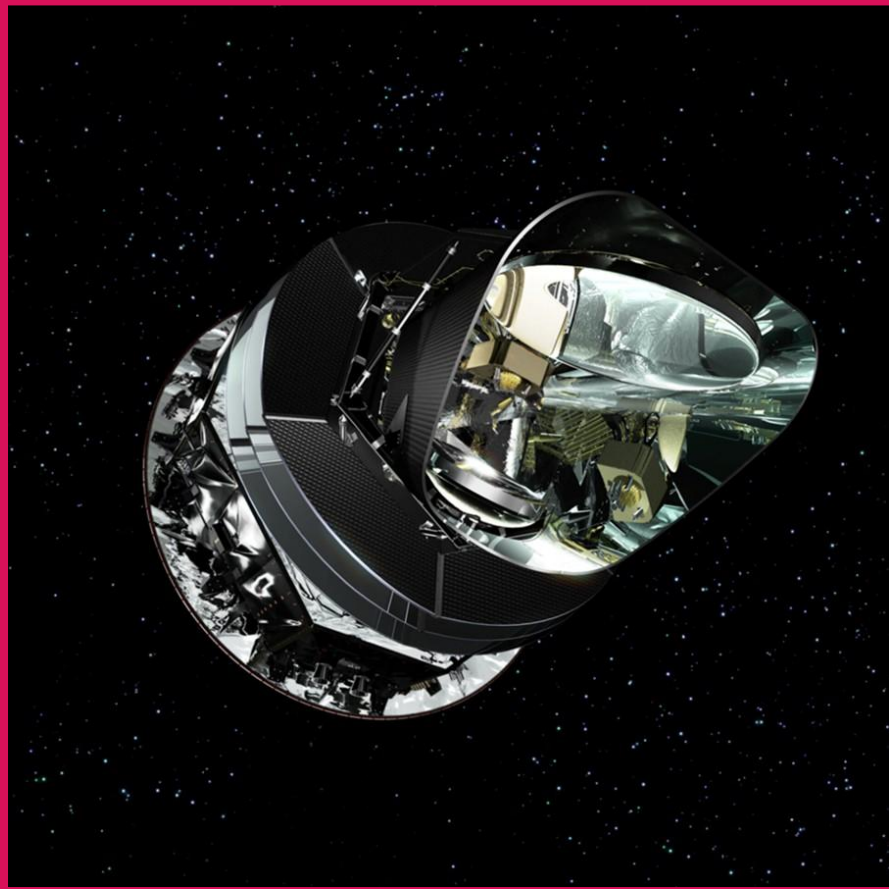
Planck



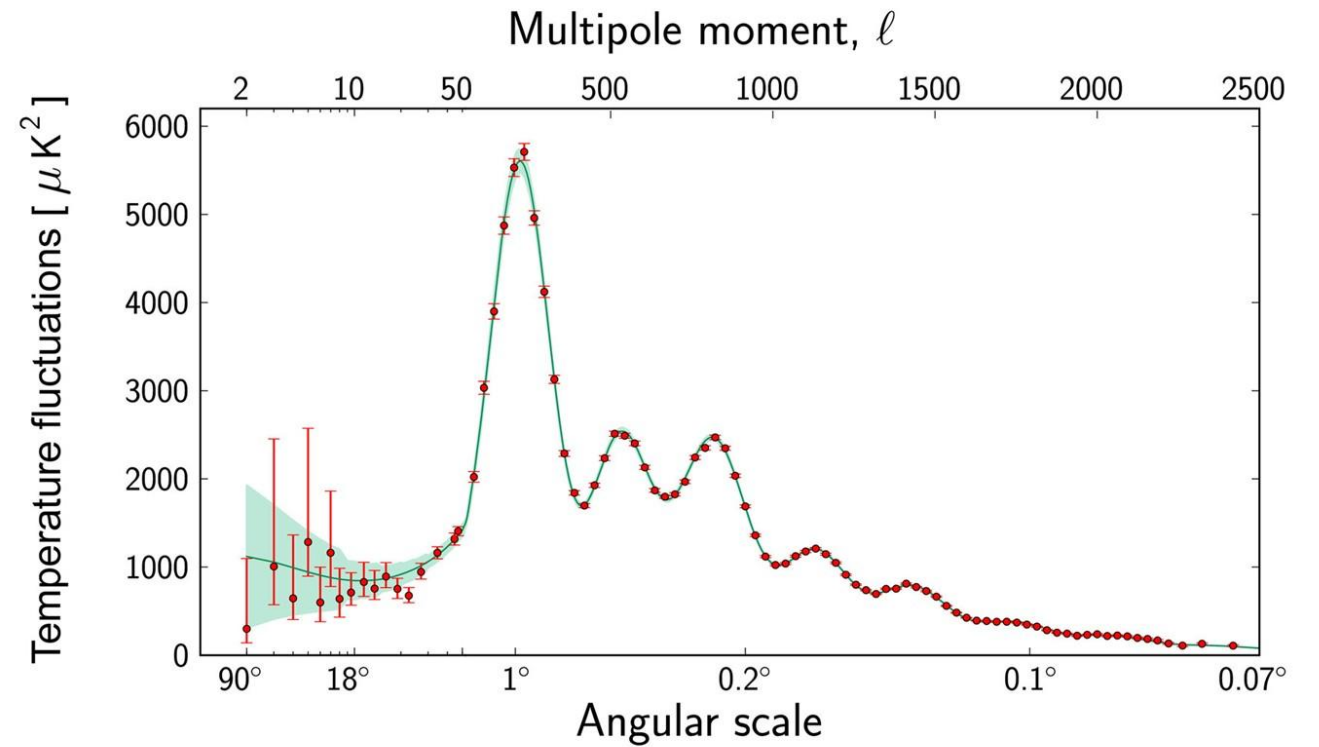
2009



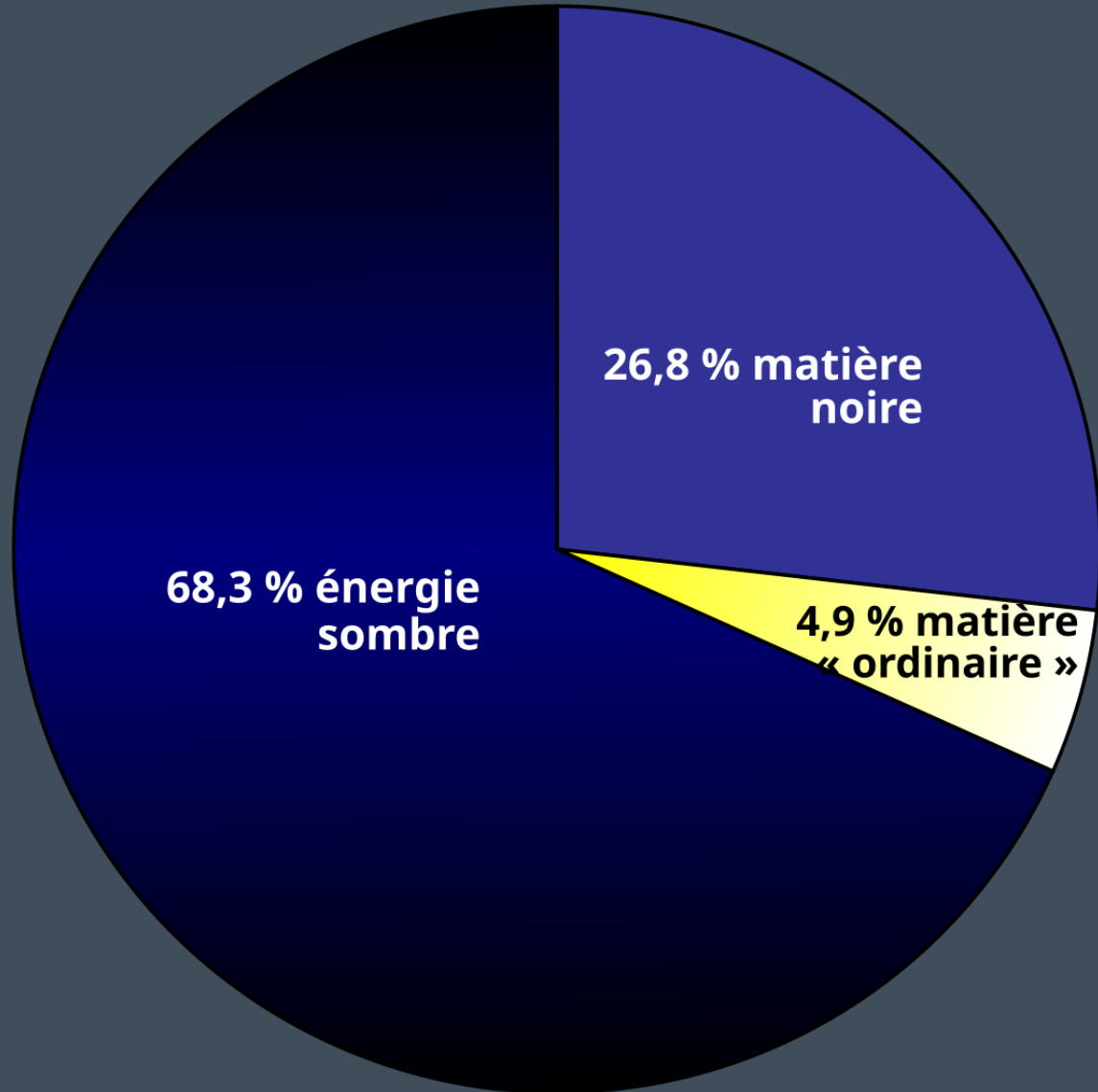
Planck



2009



Récapitulatif du cours précédent



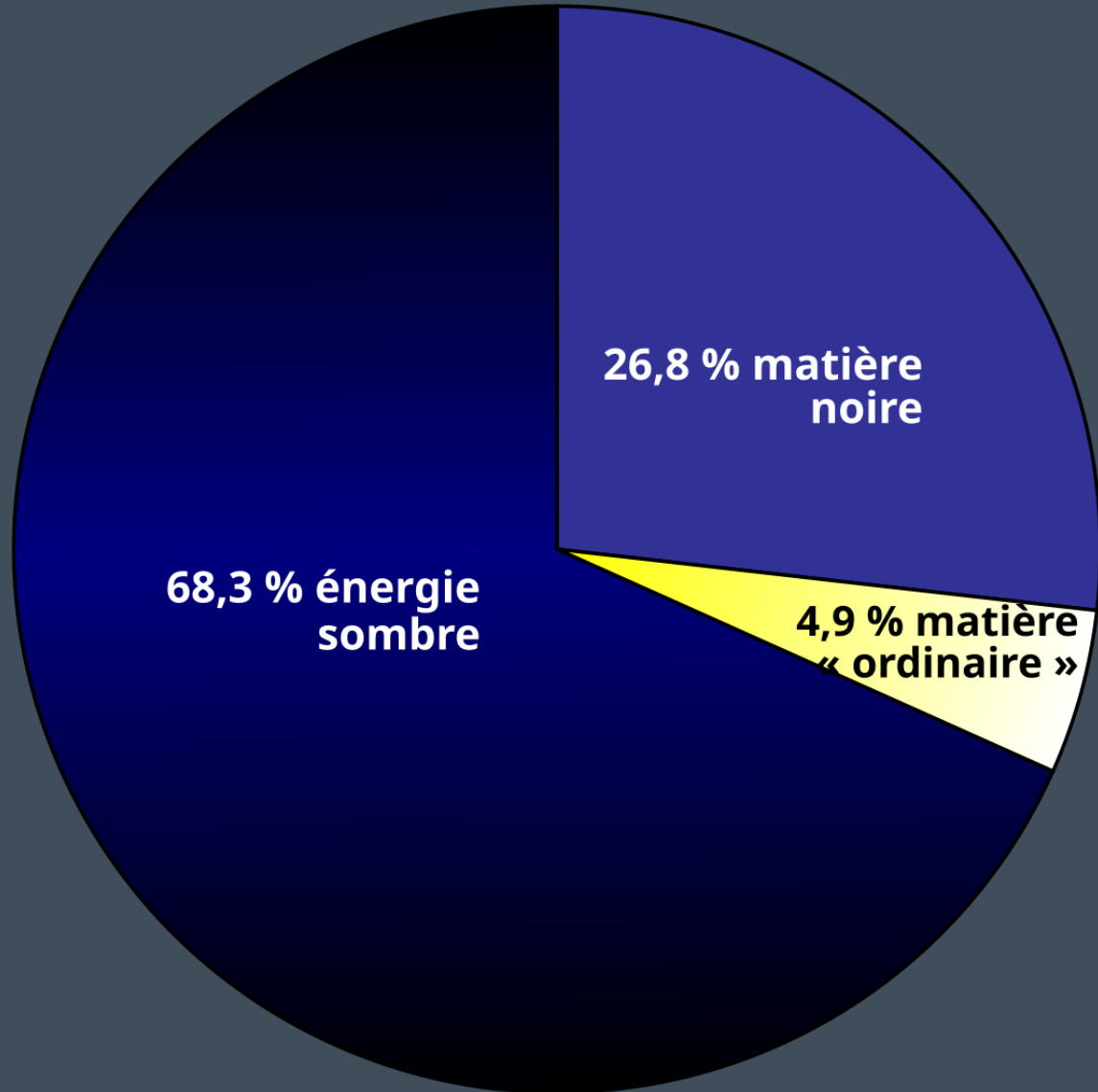
La matière noire
représente ~ 27% de
l'énergie de l'Univers !

Récapitulatif du cours précédent



La matière noire
représente ~ 27% de
l'énergie de l'Univers !

Récapitulatif du cours précédent

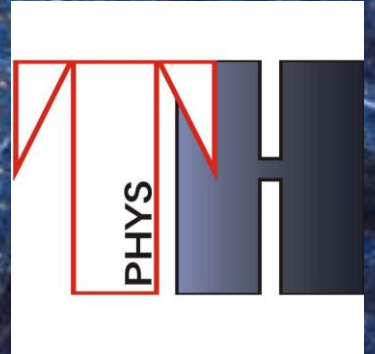


La matière noire représente ~ 27% de l'énergie de l'Univers !

La matière noire représente ~ 85% de la masse de l'Univers !

Propriétés de la matière noire

- La matière noire n'émet pas de lumière, elle **n'interagit que par la gravité** (ou, du moins, très faiblement par les autres interactions fondamentales).
- La matière noire existait au début de l'Univers, et existe encore aujourd'hui, elle a une longue durée de vie et est donc **stable**.



Leçon 2:

Approche théorique de la matière
noire: principaux candidats

Nicolas Esser

A visualization of the cosmic web, showing a complex network of blue filaments and clusters of orange-yellow galaxies against a dark background.

théorique

théorique

Plan de la leçon₅

**Comment expliquer
la matière noire?**

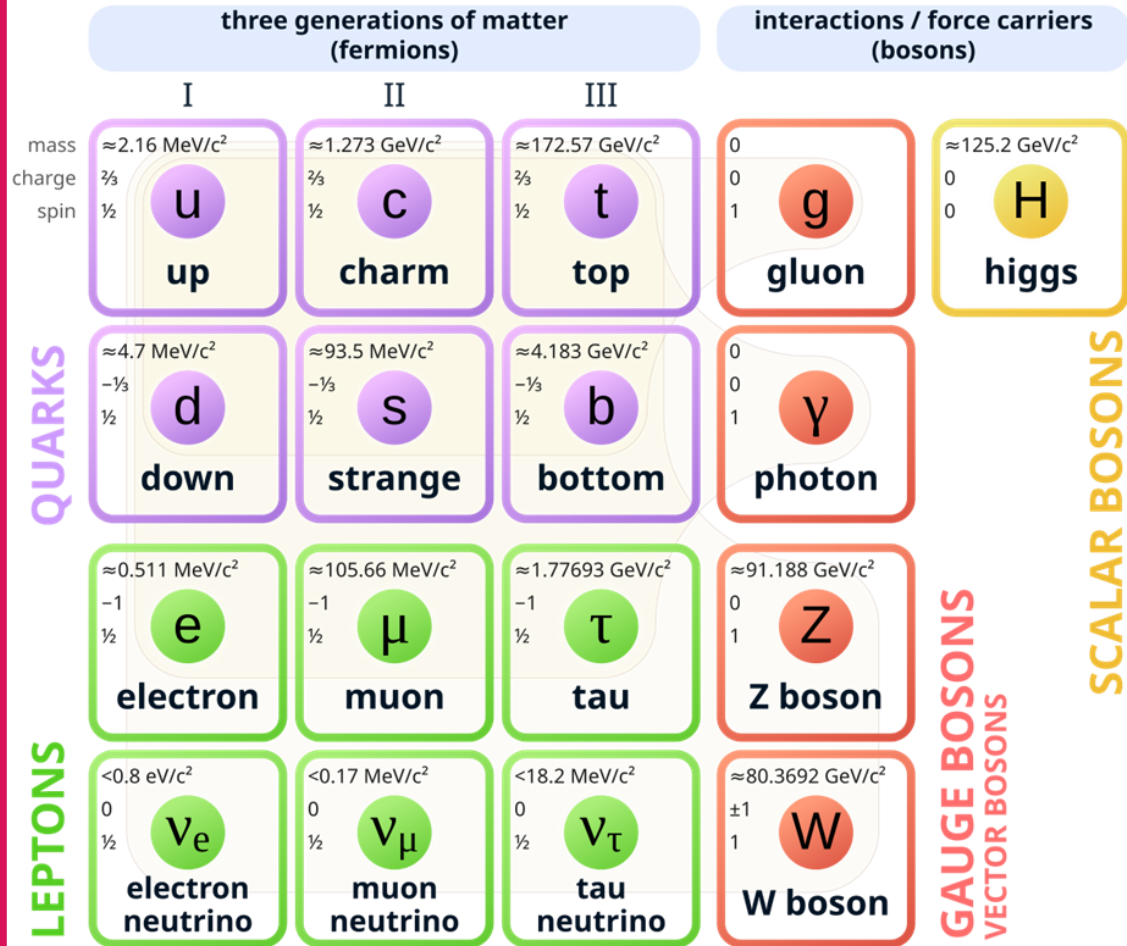
Plan de la leçon₃

Comment expliquer la matière noire?

- Les candidats particules
- Les candidats macroscopiques
- Alternative: la gravité modifiée
- Conclusions

Les candidats particules

Standard Model of Elementary Particles



Groupe →		I A																VIII A									
Période ↓		1																18									
1		Hydrogène 1 H 1,00795																Hélium 2 He 4,002602									
2		Lithium 3 Li 6,9395																Béryllium 4 Be 9,0121831									
3		Sodium 11 Na 22,98976928																Magnésium 12 Mg 24,3055									
4		Potassium 19 K 39,0983 (1)																Calcium 20 Ca 40,078 (4)									
5		Rubidium 37 Rb 85,4678 (3)																Strontium 38 Sr 87,62 (1)									
6		Césium 55 Cs 132,905452																Baryum 56 Ba 137,327 (7)									
7		Francium 87 Fr [223]																Radium 88 Ra [226]									
		Lanthanides 57-71																Actinides 89-103									
		Lanthane 57 La 138,90547																Cérium 58 Ce 140,116 (1)									
		Praséodyme 59 Pr 140,90766																Néodyme 60 Nd 144,242 (3)									
		Prométhium 61 Pm [145]																Samarium 62 Sm 150,36 (2)									
		Europium 63 Eu 151,964 (1)																Gadolinium 64 Gd 157,25 (3)									
		Terbium 65 Tb 158,92535																Dysprosium 66 Dy 162,500 (1)									
		Holmium 67 Ho 164,93033																Erbium 68 Er 167,259 (3)									
		Thulium 69 Tm 168,93422																Ytterbium 70 Yb 173,045									
		Lutéций 71 Lu 174,9668																									
		Actinium 89 Ac [227]																Thorium 90 Th 232,0377									
		Protactinium 91 Pa 231,03588																Uranium 92 U 238,02891									
		Neptunium 93 Np [237]																Plutonium 94 Pu [244]									
		Américium 95 Am [243]																Curium 96 Cm [247]									
		Berkélium 97 Bk [247]																Californium 98 Cf [251]									
		Einsteinium 99 Es [252]																Fermium 100 Fm [257]									
		Mendélévium 101 Md [258]																Nobélium 102 No [259]									
		Lawrencium 103 Lr [266]																									

nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)

numéro atomique

symbole chimique

masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable]

© CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015

Métaux

Non métaux

Alcalins

Alcalino-terreux

Lanthanides

Actinides

Métaux de transition

Métaux pauvres

Métalloïdes

Autres non-métaux

Halogènes

Gaz nobles

Non classés

primordial

désintégration d'autres éléments

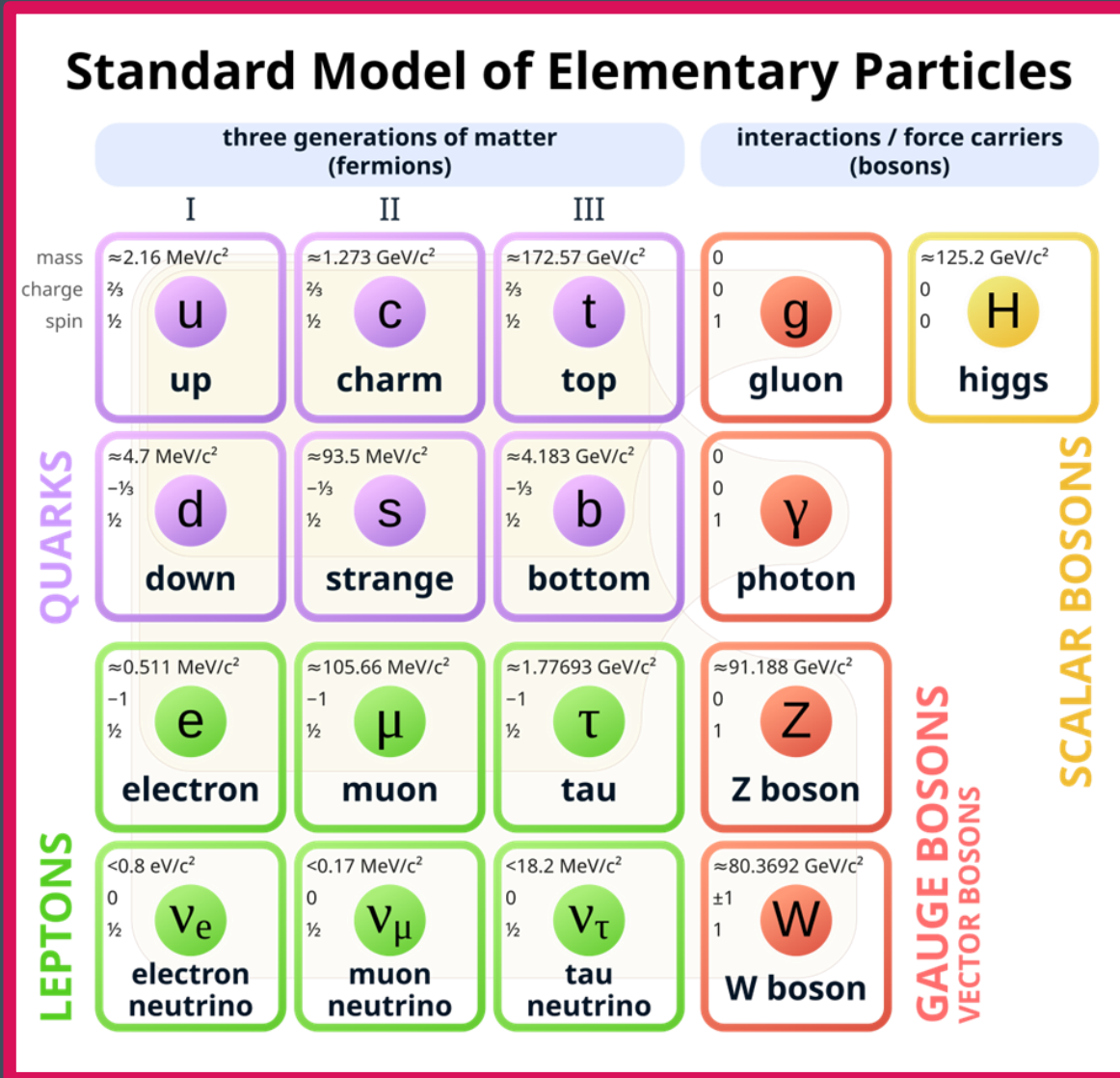
synthétique

Le modèle standard des particules

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)				interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

Le modèle standard des particules



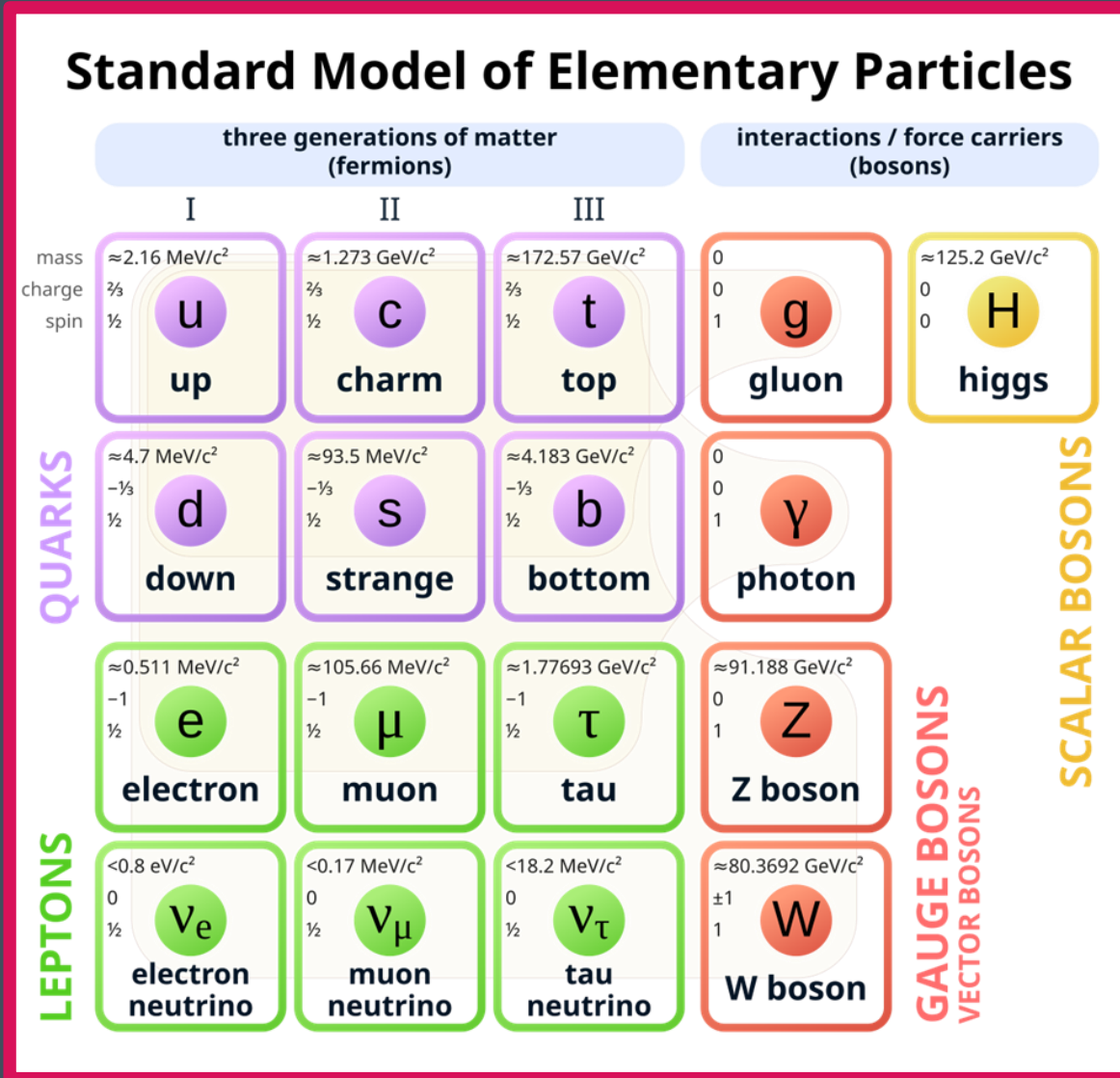
Interaction forte

Interaction
électromagnétique

Interaction faible

(+ interaction
gravitationnelle)

Le modèle standard des particules



Interaction forte

Interaction
électromagnétique

Interaction faible

(+ interaction
gravitationnelle)

Le modèle standard des particules

Stand

mass ≈ 2.16
charge $\frac{2}{3}$
spin $\frac{1}{2}$

QUARKS

mass ≈ 4.7
charge $-\frac{1}{3}$
spin $\frac{1}{2}$

LEPTONS

mass ≈ 0.5
charge -1
spin $\frac{1}{2}$

elec
neutr

Toute les forces de l'Univers découlent de celles-ci! (ex: le sol sur lequel nous tenons avec nos pieds)

Le modèle standard des particules

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
I	II	III		
mass $\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	mass $\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	mass $\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
charge $\frac{2}{3}$	charge $\frac{2}{3}$	charge $\frac{2}{3}$	0	0

Le 'couplage' g : forces plus importantes (plus longue portée) et interactions plus probables

LEPTONS	electron	muon	tau	2 boson
	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ V_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ V_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ V_τ tau neutrino	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson
				GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS

Interaction forte

Interaction
électromagnétique

Interaction faible

(+ interaction
gravitationnelle)

Le modèle standard des particules

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
I	II	III		
mass $\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	mass $\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	mass $\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	mass $\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
charge $\frac{2}{3}$	charge $\frac{2}{3}$	charge $\frac{2}{3}$	0	0

Le 'couplage' g : forces plus importantes (plus longue portée) et interactions plus probables

LEPTONS			GAUGE BOSONS	
electron	muon	tau	2 bosons	
mass $< 0.8 \text{ eV}/c^2$	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	mass $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	mass $\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$	
charge 0	charge 0	charge 0	charge ± 1	
ν_e	ν_μ	ν_τ	W	
electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	W boson	

Interaction forte $g \sim 1$

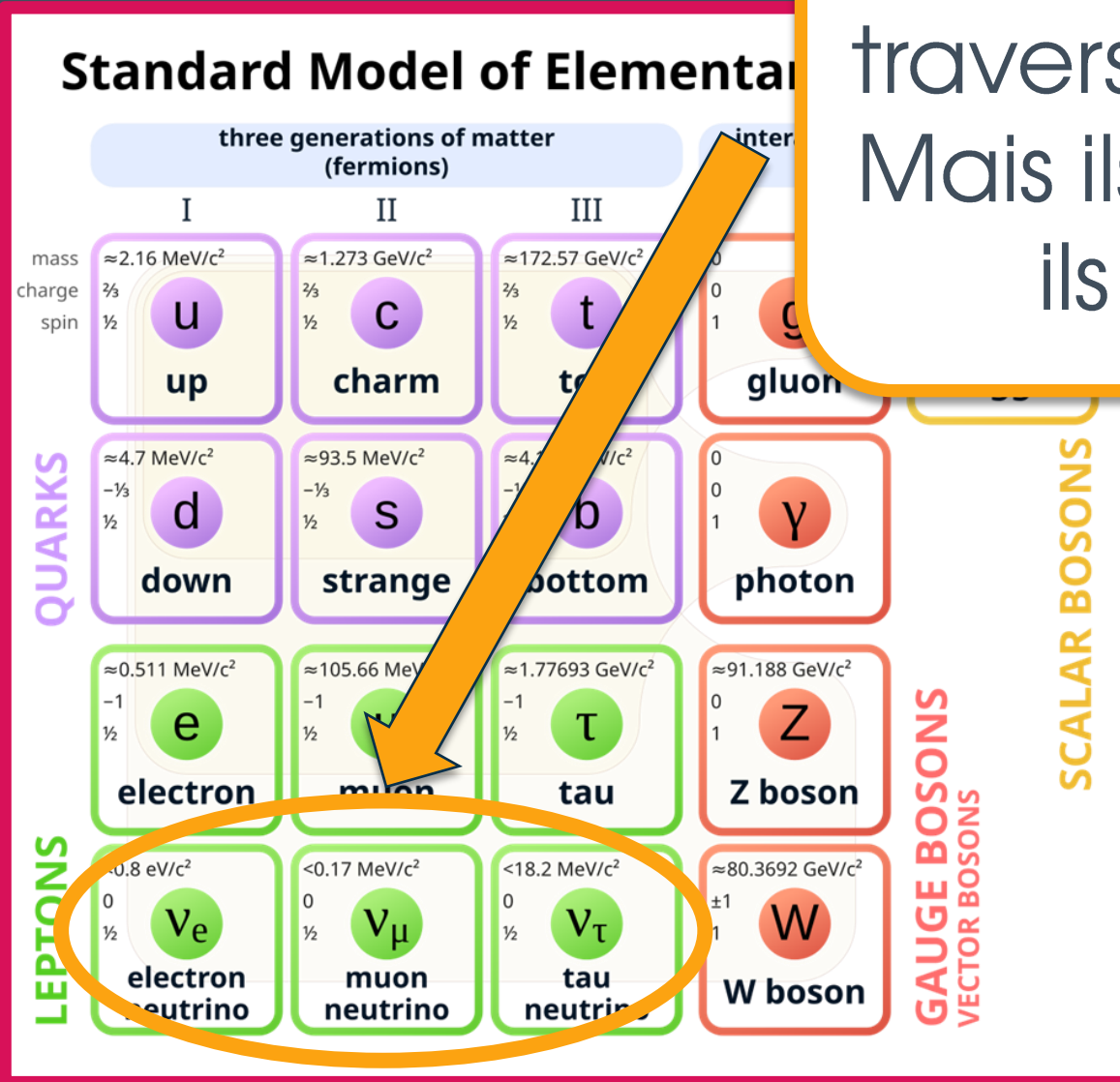
Interaction électromagnétique $g \sim 0.01$

Interaction faible $g \sim 10^{-6}$

(interaction gravitationnelle) $g \sim 10^{-44}$

Le modèle standard des particules

$\sim 10^{14}$ neutrinos nous traversent chaque seconde. Mais ils ont un g faible, donc ils ne nous font rien !



$g \sim 0.01$
électromagnétique

Int $g \sim 10^{-6}$ ble

(interaction
gravitationnelle)
 $g \sim 10^{-44}$

Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
QUARKS	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ mass $\frac{2}{3}$ charge $\frac{1}{2}$ spin u up	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
LEPTONS	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	

SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS

Idée de la matière noire particule

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
mass	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
			SCALAR BOSONS	
			GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	

+

DM

Idée de la matière noire particule

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
mass	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
			GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	SCALAR BOSONS

+

DM

Couplage g_{DM}
Très faible!

Weakly Interacting Massive Particle

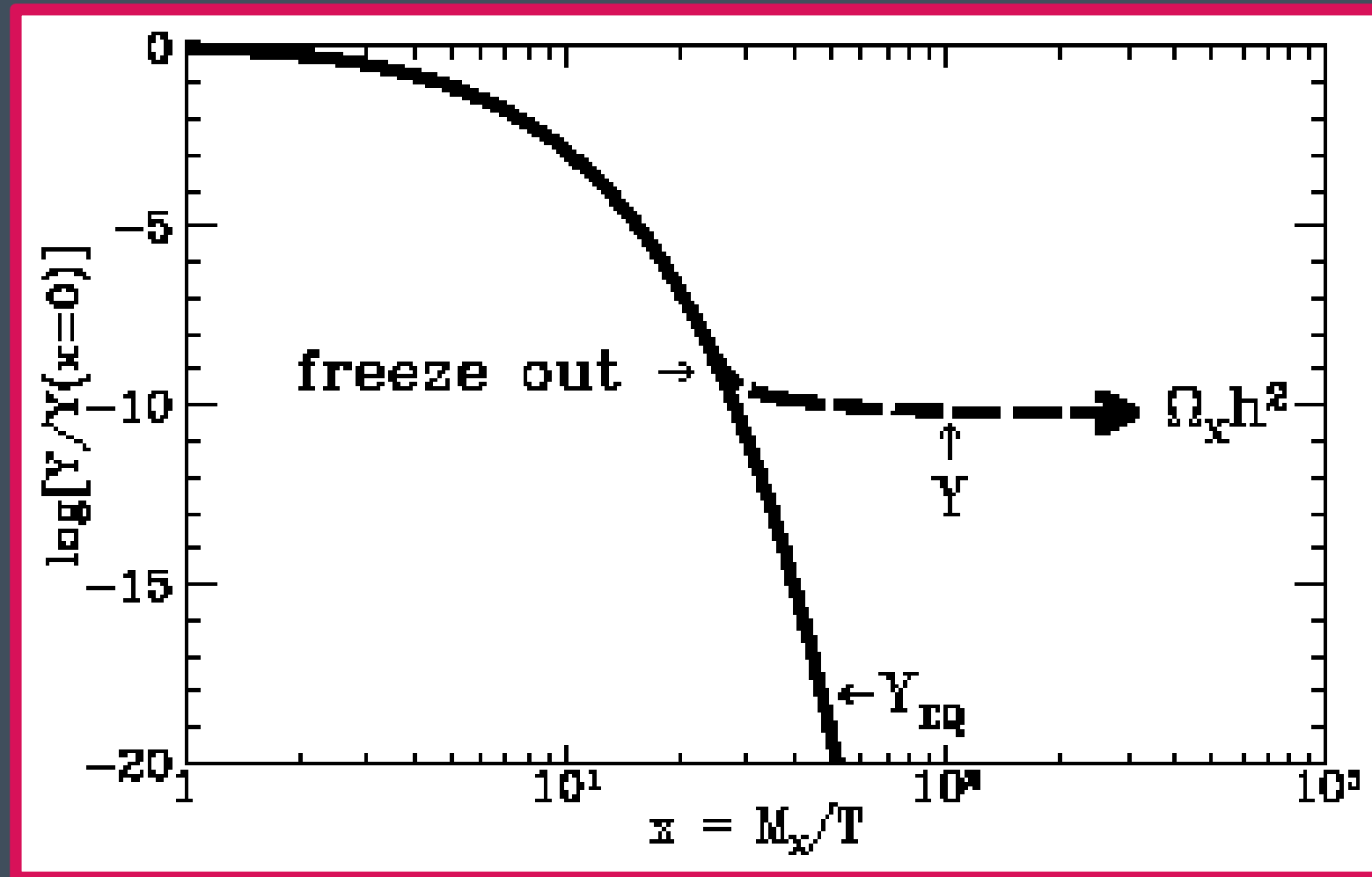


WIMP

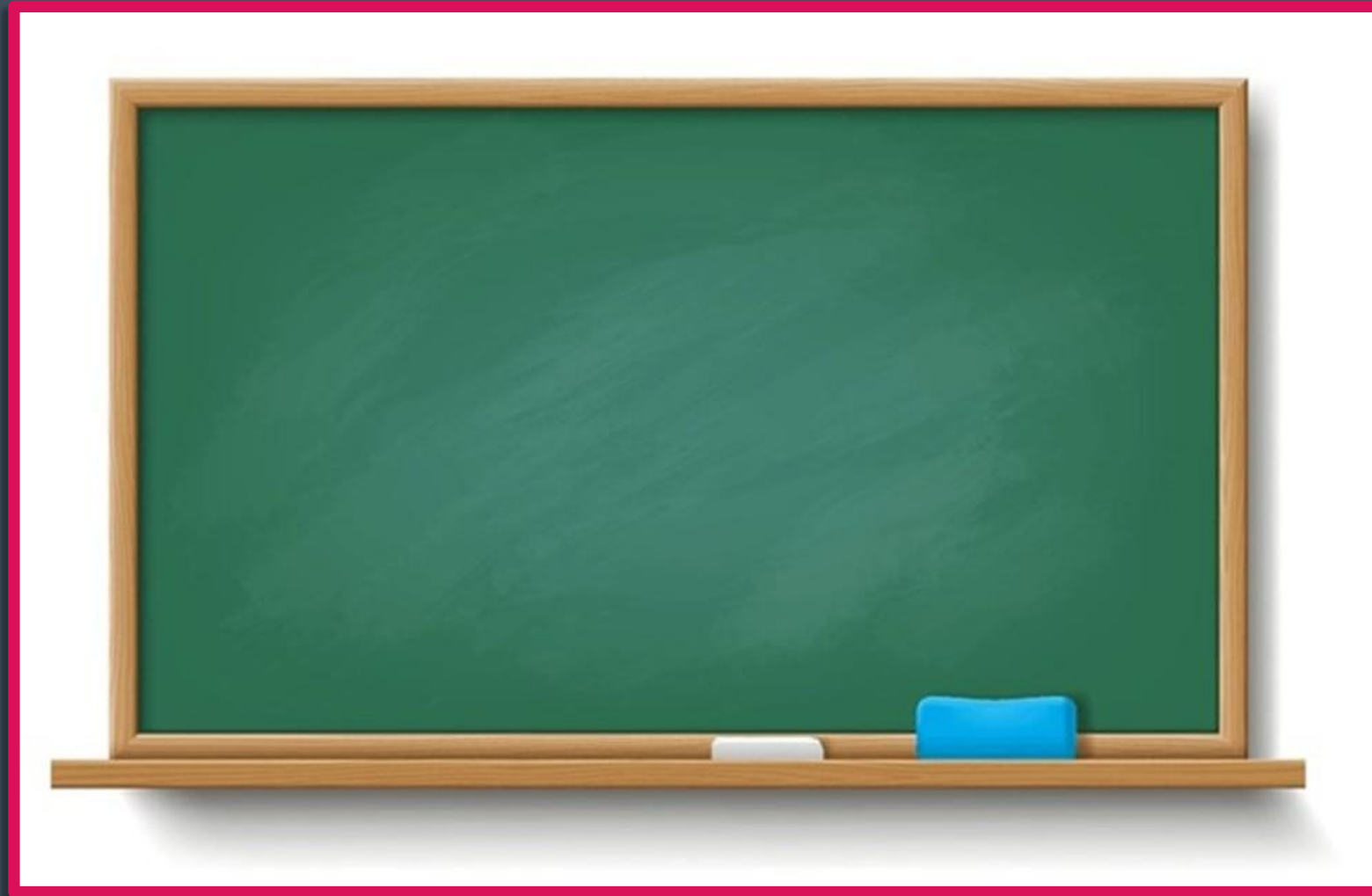
- Particule très massive: 10 - 10000 GeV ($1 \text{ GeV} \simeq 10^{-27} \text{ kg} \simeq m_p$)
- Interagit très faiblement (petit g_{DM} , en plus de g_{grav}).
- C'est tout.
- Plein de sous-modèles existent !

Pourquoi le WIMP ?

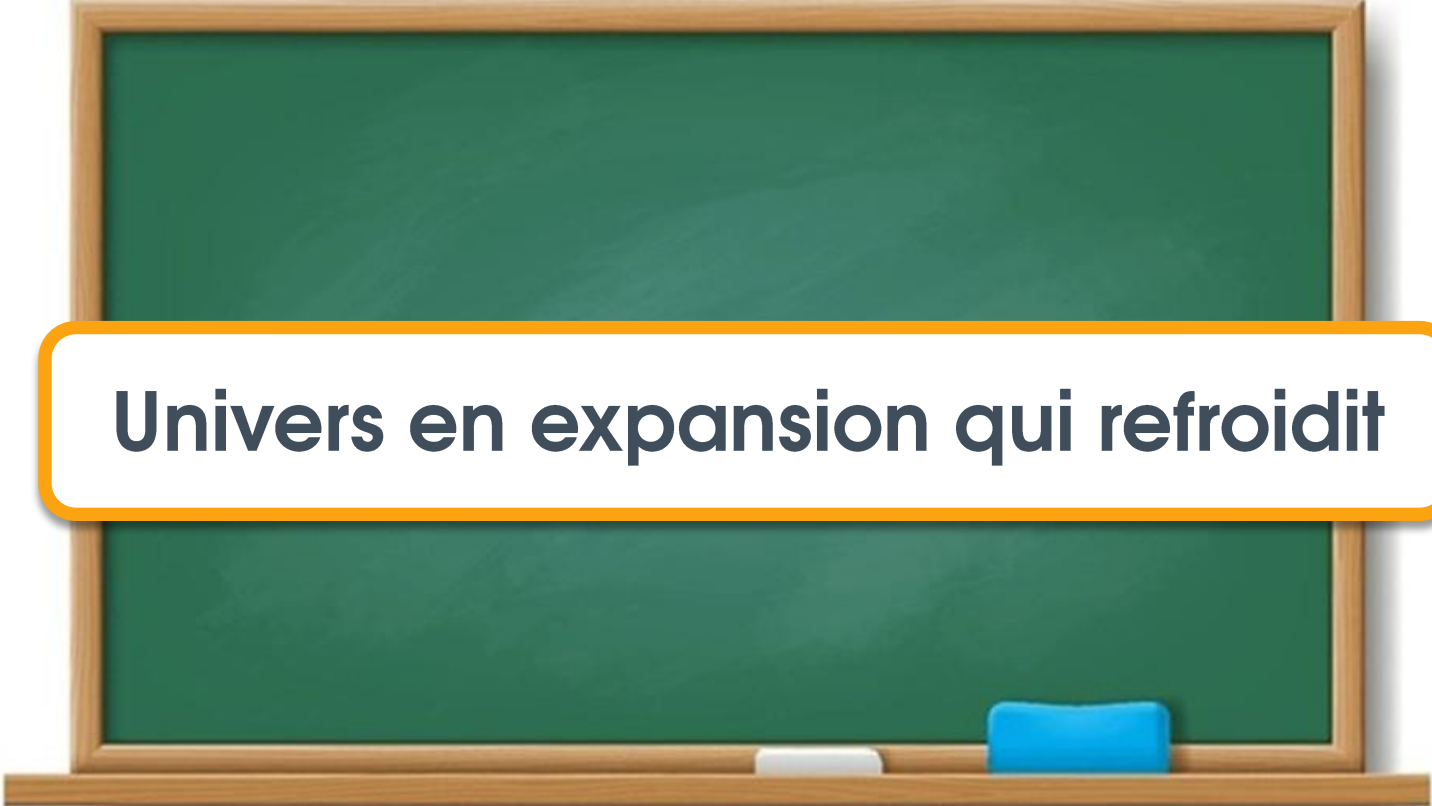
Pourquoi le WIMP ?



Pourquoi le WIMP ?



Pourquoi le WIMP ?



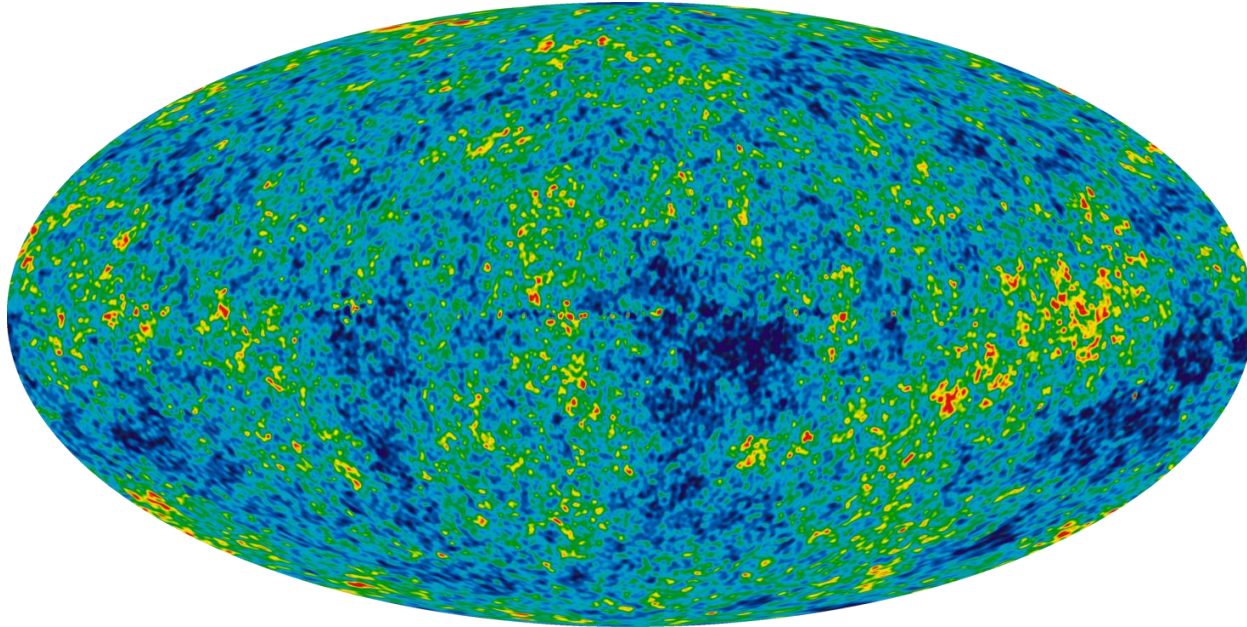
Univers en expansion qui refroidit

Pourquoi le WIMP ?

- Tout début de l'Univers ($\sim 10^{-12}$ s après le Big Bang)

Pourquoi le WIMP ?

- Tout début de l'Univers ($\sim 10^{-12}$ s après le Big Bang)

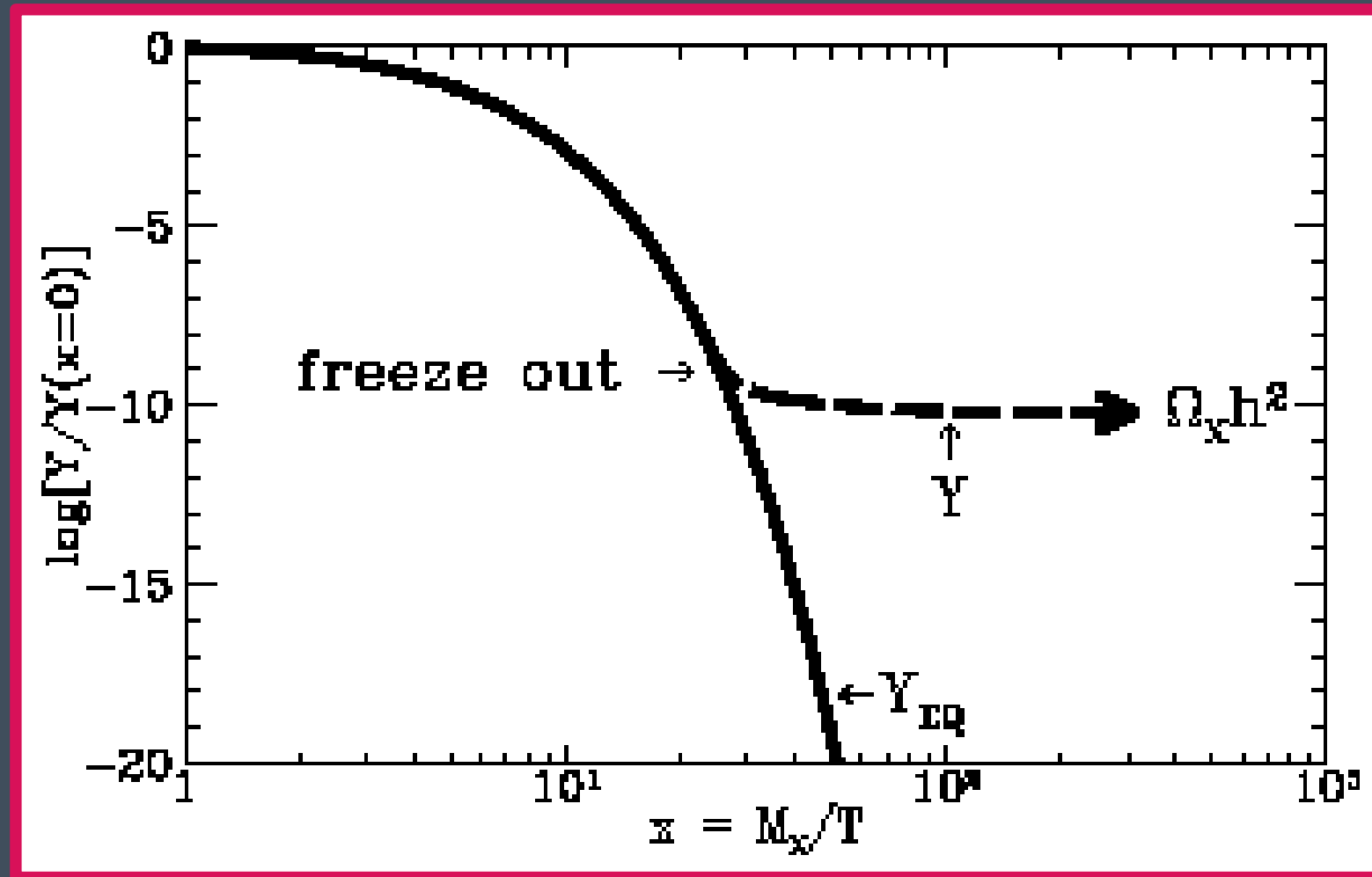


380 000 ans après le Big Bang

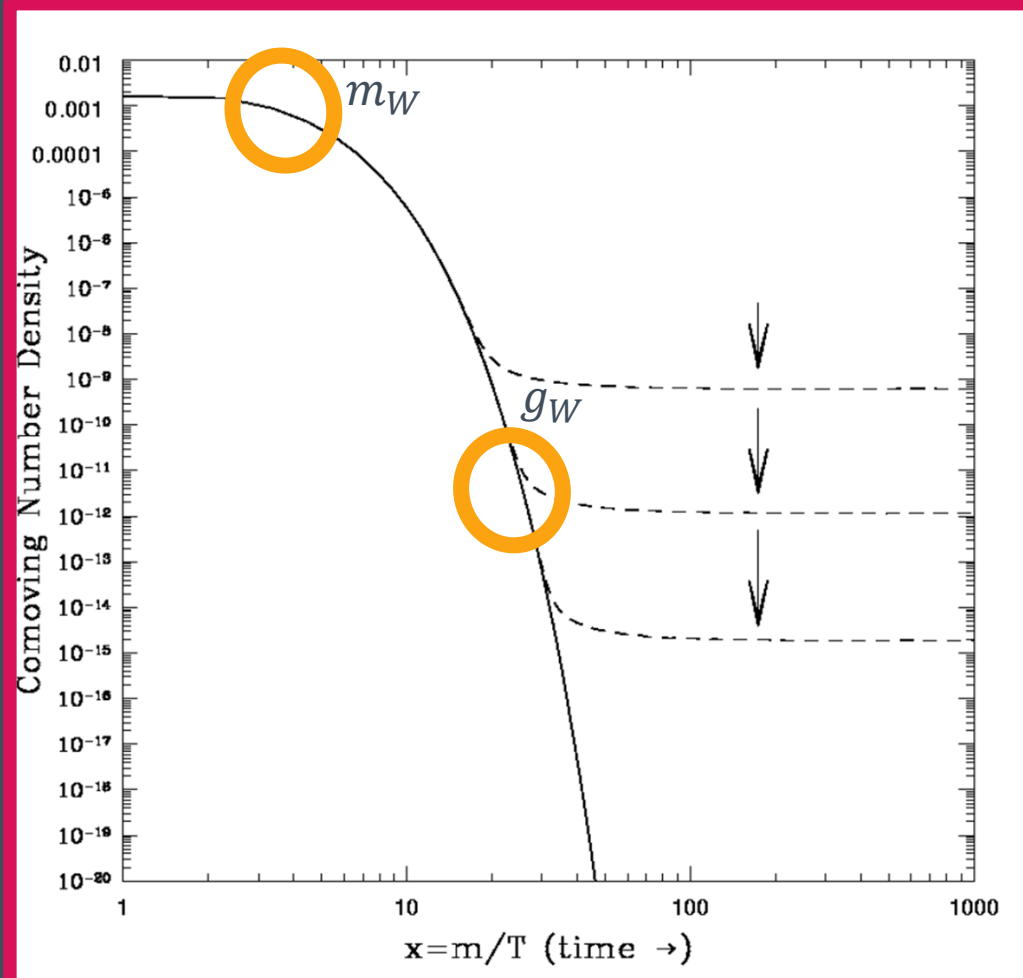
Pourquoi le WIMP ?

- Tout début de l'Univers ($\sim 10^{-12}$ s après le Big Bang)
- Equilibre entre matière noire et matière 'ordinaire'
- L'Univers s'étend, la température diminue, la matière noire disparaît petit à petit
- Disparition stoppée car l'Univers devient trop étendu, la quantité de matière noire se stabilise

Pourquoi le WIMP ?

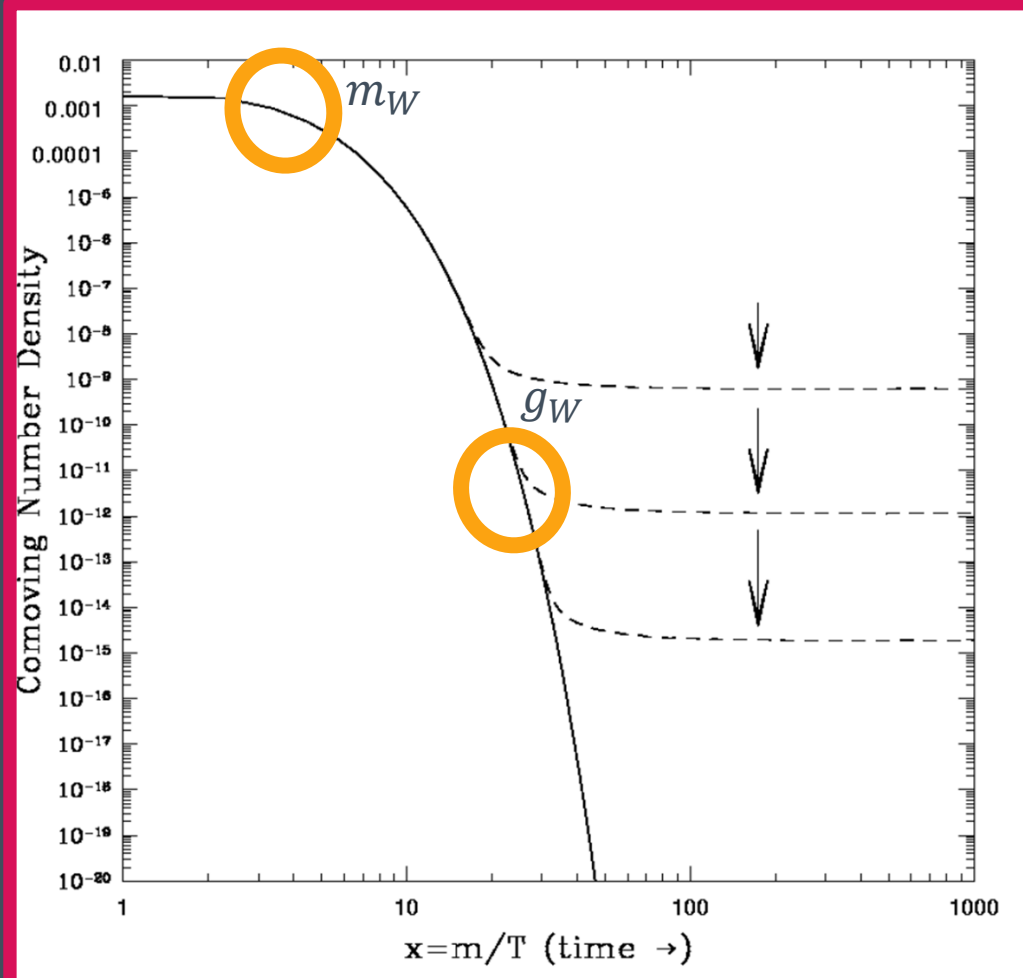


WIMP MIRACLE



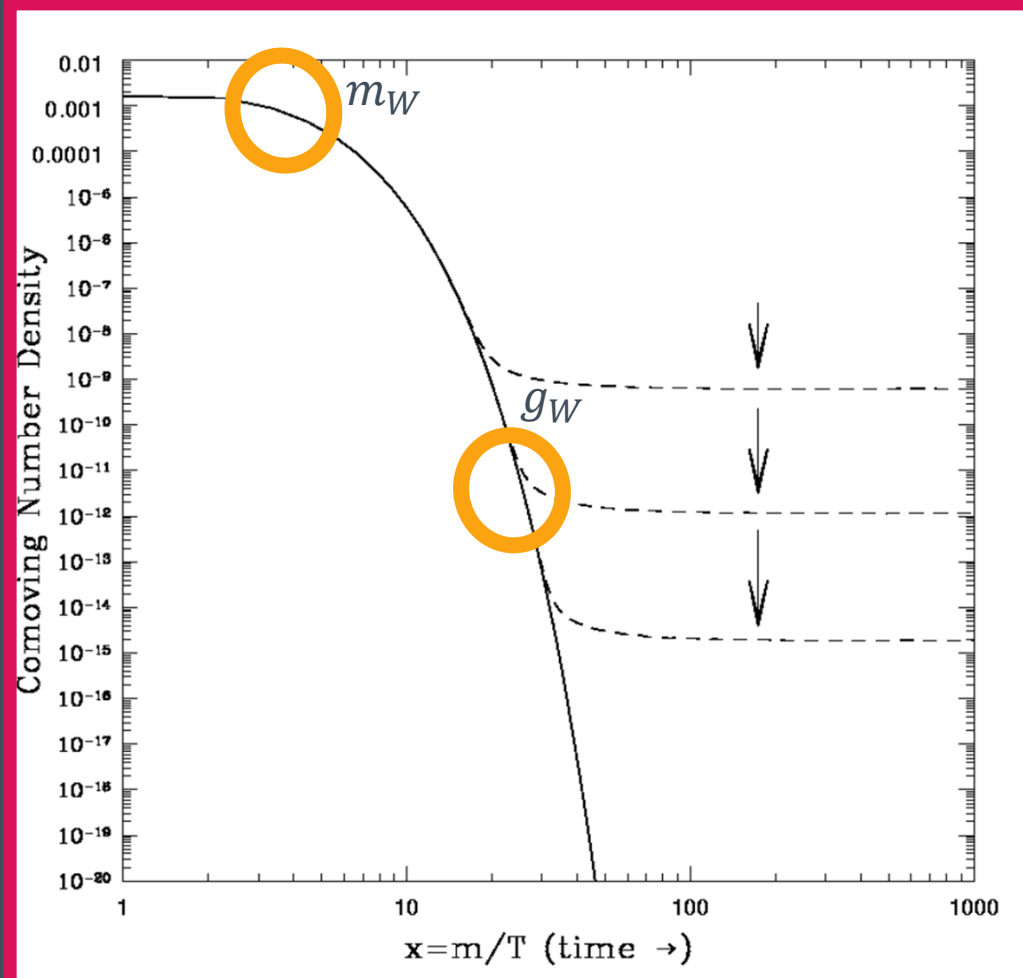
Dépendance en 2 paramètres: la masse du WIMP et son couplage

WIMP MIRACLE



Choix de $g \sim 10^{-6}$ et
 $m \sim 1000$ GeV
(comme l'interaction faible !)

WIMP MIRACLE



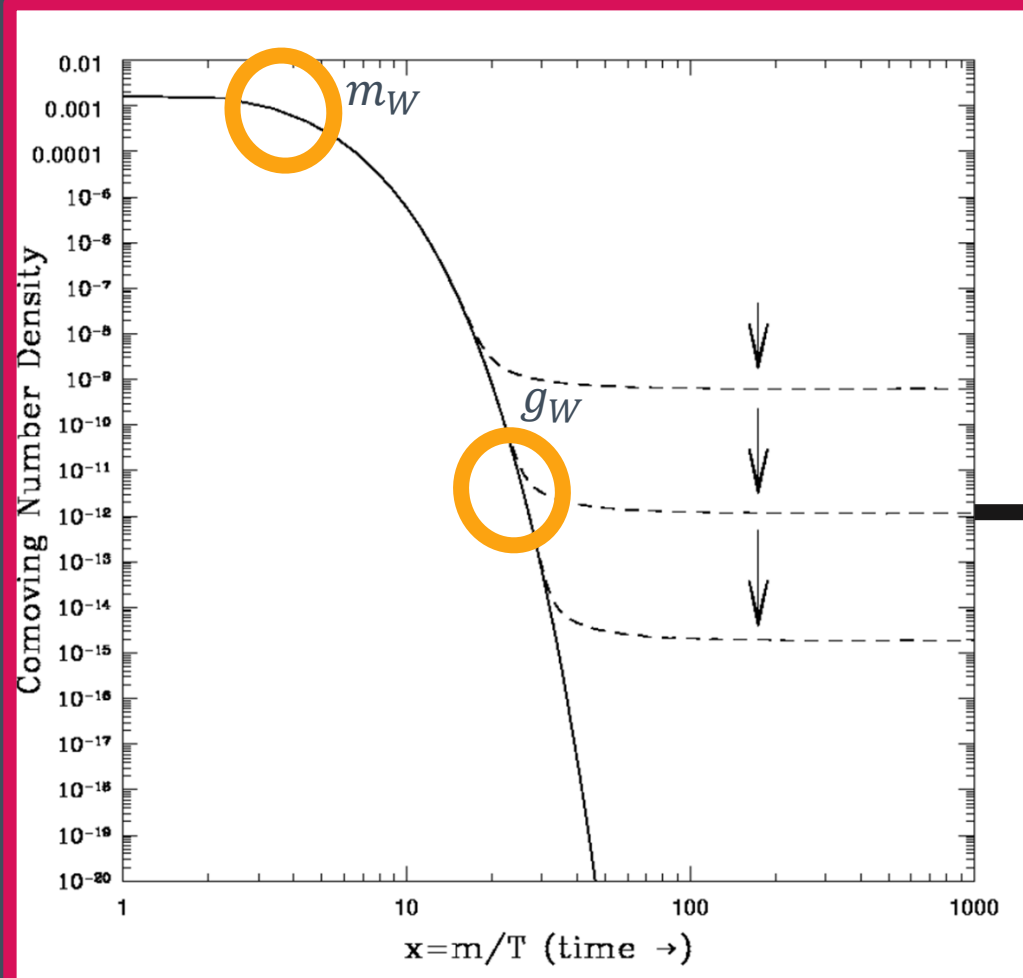
Choix de $g \sim 10^{-6}$ et
 $m \sim 1000 \text{ GeV}$
 (comme l'interaction faible !)

Standard Model of Elementary Particles

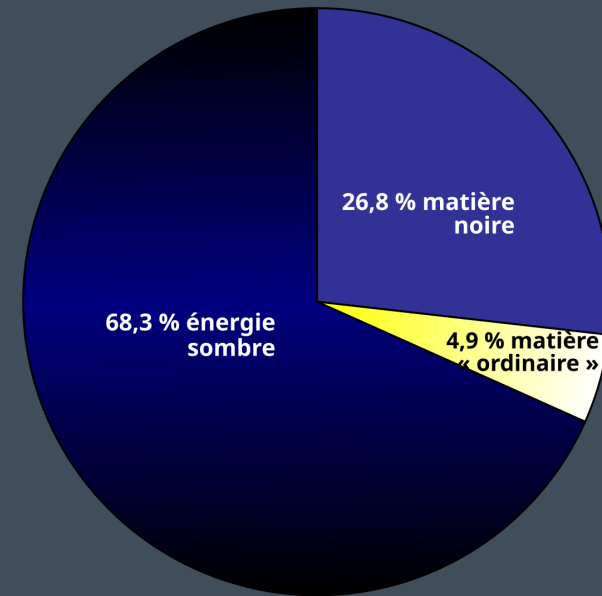
	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
QUARKS	mass $\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ u up	mass $\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ c charm	mass $\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ t top	mass $\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 g gluon	mass $\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 H higgs
	mass $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ d down	mass $\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ s strange	mass $\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ b bottom	mass 0 charge 0 spin 1 γ photon	
	mass $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ e electron	mass $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ μ muon	mass $\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ τ tau	mass $\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 1 Z Z boson	
LEPTONS	mass $< 0.8 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	mass $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	mass $\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$ charge ± 1 spin 1 W W boson	
				mass 0 charge 0 spin 1 SCALAR BOSONS	mass 0 charge 0 spin 1 GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS

Interaction faible:
 $g \sim 10^{-6}$

WIMP MIRACLE



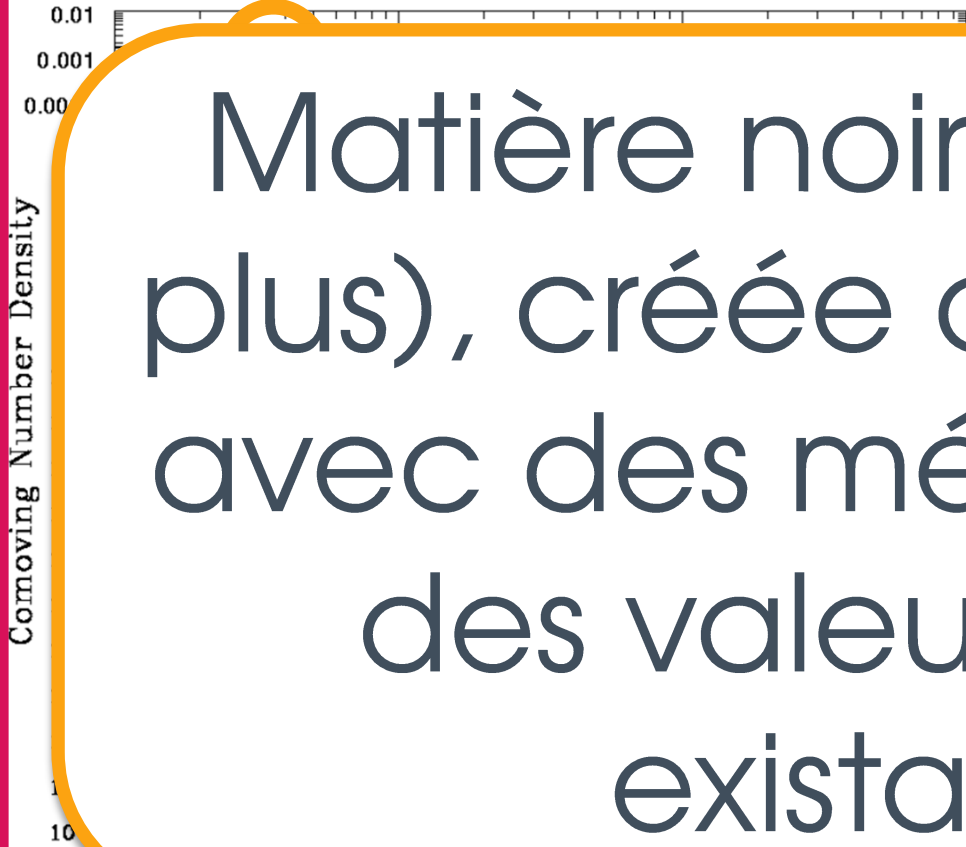
Choix de $g \sim 10^{-6}$ et
 $m \sim 1000$ GeV
(comme l'interaction faible !)



WIMP MIRACLE

Choix de $g \sim 10^{-6}$ et

Matière noire stable (n'interagit plus), créée de manière naturelle avec des mécanismes connus et des valeurs de paramètres existantes. Génial !



Weakly Interacting Massive Particle

PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 39

25 JULY 1977

NUMBER 4

Cosmological Lower Bound on Heavy-Neutrino Masses

Benjamin W. Lee^(a)

Fermi National Accelerator Laboratory,^(b) Batavia, Illinois 60510

and

Steven Weinberg^(c)

Stanford University, Physics Department, Stanford, California 94305

(Received 13 May 1977)

The present cosmic mass density of possible stable neutral heavy leptons is calculated in a standard cosmological model. In order for this density not to exceed the upper limit of 2×10^{-29} g/cm³, the lepton mass would have to be *greater* than a lower bound of the order of 2 GeV.

Weakly Interacting Massive Particle

PHYSICAL REVIEW

Motivation pour le LHC (grand collisionneur de hadrons)

Steven Weinberg^(*)

Stanford University, Physics Department, Stanford, California 94305

(Received 13 May 1977)

The present cosmic mass density of possible stable neutral heavy leptons is calculated in a standard cosmological model. In order for this density not to exceed the upper limit of 2×10^{-29} g/cm³, the lepton mass would have to be *greater* than a lower bound of the order of 2 GeV.

Weakly Interacting Massive Particle

PHYSICAL REVIEW

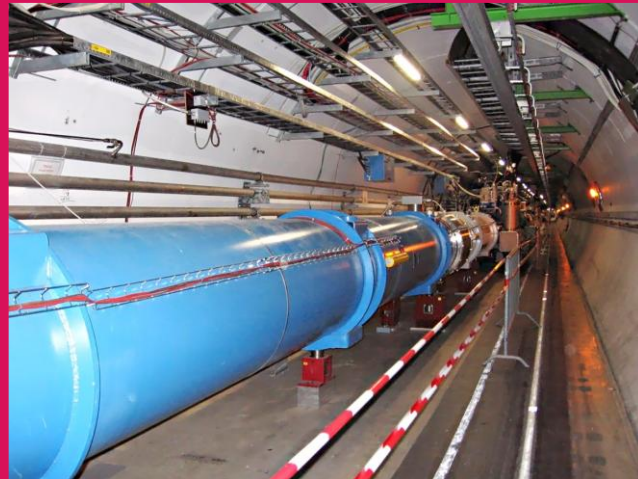
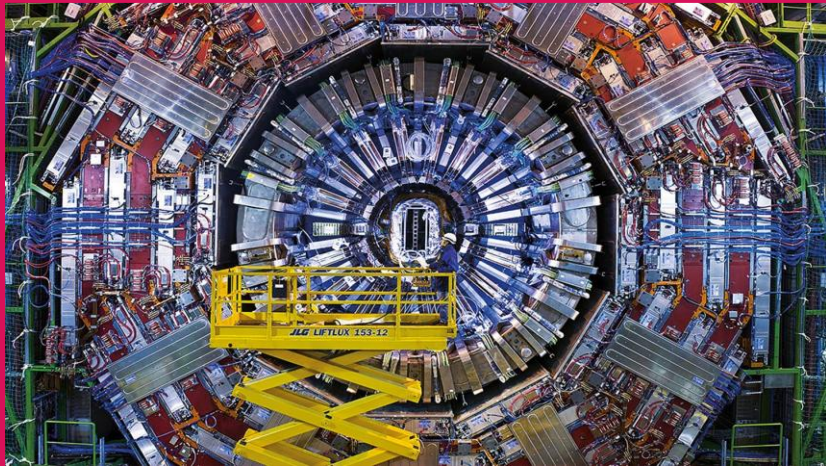
Motivation pour le LHC (grand collisionneur de hadrons)

Steven Weinberg^(c)

Stanford University, Physics Department, Stanford, California 94305

(Received 13 May 1977)

The present cosmic mass density of possible stable neutral heavy leptons is calculated in a standard cosmological model. In order for this density not to exceed the upper limit of 2×10^{-29} g/cm³ at the end of the present epoch, the mass of the heavy lepton must be greater than 2 GeV.

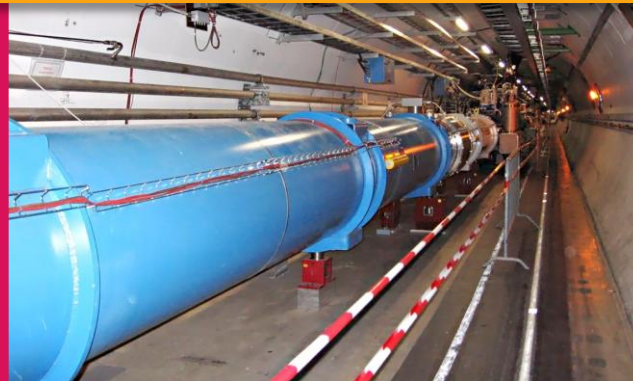


Weakly Interacting Massive Particle

PHYSICAL REVIEW

Motivation pour le LHC (grand collisionneur de hadrons)

SPOILER: ça marche pas.



Axion



Axion

- Particule très légère ($1 \text{ eV} = 10^{-36} \text{ kg}$
 $= 10^{-9} m_p$ ou plus bas)
- Interagit très faiblement avec toutes les particules du modèle standard
- Pas introduit pour expliquer la matière noire à la base !

Pourquoi l'Axion ?

Strong CP problem

Pourquoi l'Axion ?

Strong CP problem

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \theta\frac{g^2}{32\pi^2}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - me^{i\theta'\gamma_5})\psi.$$

Pourquoi l'Axion ?

Strong CP problem

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \theta\frac{g^2}{32\pi^2}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - me^{i\theta'\gamma_5})\psi.$$

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
I		II		III			
mass charge spin	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0		
u up		c charm		t top		g gluon	
d down		s strange		b bottom		γ photon	
e electron		μ muon		τ tau		Z Z boson	
ν_e electron neutrino		ν_μ muon neutrino		ν_τ tau neutrino		W W boson	

QUARKS (vertical label on the left of the quark section)

LEPTONS (vertical label on the left of the lepton section)

GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (vertical label on the right of the gauge boson section)

SCALAR BOSONS (vertical label on the right of the scalar boson section)

Pourquoi l'Axion ?

Strong CP problem

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \theta \frac{g^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - me^{i\theta'\gamma_5})\psi.$$

θ est extrêmement petit ($< 10^{-10}$), ce n'est pas naturel !

Standard Model of Elementary Particles					
three generations of matter (fermions)					
			interactions / force carriers (bosons)		
I	II	III			
mass charge spin			0 0 1	0 0 0	
$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ 1/2 2/3 u up	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ 1/2 2/3 c charm	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$ 1/2 2/3 t top	g gluon	H higgs	
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ -1/2 -1/3 d down	$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$ -1/2 -1/3 s strange	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ -1/2 -1/3 b bottom	γ photon		
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 μ muon	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 τ tau	Z Z boson		
$< 0.8 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_τ tau neutrino	W W boson		
LEPTONS			GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS		
			SCALAR BOSONS		

Pourquoi l'Axion ?

Strong CP problem

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \theta\frac{g^2}{32\pi^2}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - me^{i\theta'\gamma_5})\psi.$$

$$V(\varphi) = \mu^2 \left(|\varphi|^2 - \frac{f_a^2}{2} \right)^2$$

$$V_{\text{eff}} \sim \cos \left(\theta + \xi \frac{\langle a \rangle}{f_a} \right).$$

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
mass charge spin	I		II		III		
	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 0		
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs		
	d down	s strange	b bottom	γ photon			
LEPTONS							
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	0 0 1	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$ 0 1		
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson			
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson			

QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

Axion

Pourquoi l'Axion ?

Strong CP problem

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \theta \frac{g^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - me^{i\theta'\gamma_5})\psi.$$

$$V(\varphi) = \mu^2 \left(|\varphi|^2 - \frac{f_a^2}{2} \right)^2$$

$$V_{\text{eff}} \sim \cos \left(\theta + \xi \frac{\langle a \rangle}{f_a} \right).$$

$$\mathcal{L}_{\text{tot}} = \mathcal{L}_{\text{SM,axions}} + \theta \frac{g_s^2}{32\pi^2} \tilde{G}_b^{\mu\nu} G_{b\mu\nu} - \xi \frac{a}{f_a} \frac{g_s^2}{32\pi^2} \tilde{G}_b^{\mu\nu} G_{b\mu\nu},$$

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
I		II		III			
mass	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$		
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0		
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0		
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs		
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$	0			
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0			
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1			
	d down	s strange	b bottom	γ photon			
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$		
	-1	-1	-1	0	0		
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1		
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson			
	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$			
	0	0	0	± 1			
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1			
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson			

QUARKS

LEPTONS

SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

Axion

Pourquoi l'Axion ?

Strong CP problem

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \theta \frac{g^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - me^{i\theta'\gamma_5})\psi.$$

$$V(\varphi) = \mu^2 \left(|\varphi|^2 - \frac{f_a^2}{2} \right)^2$$

$$V_{\text{eff}} \sim \cos \left(\theta + \xi \frac{\langle a \rangle}{f_a} \right).$$

$$\mathcal{L}_{\text{tot}} = \mathcal{L}_{\text{SM,axions}} + \theta \frac{g_s^2}{32\pi^2} \tilde{G}_b^{\mu\nu} G_{b\mu\nu} - \xi \frac{a}{f_a} \frac{g_s^2}{32\pi^2} \tilde{G}_b^{\mu\nu} G_{b\mu\nu},$$

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
I		II		III			
mass	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$		
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0		
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0		
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs		
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$	0			
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0			
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1			
	d down	s strange	b bottom	γ photon			
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$		
	-1	-1	-1	0	0		
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1		
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson			
	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$			
	0	0	0	± 1			
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1			
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson			

QUARKS

LEPTONS

SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

Axion

Pourquoi l'Axion ?

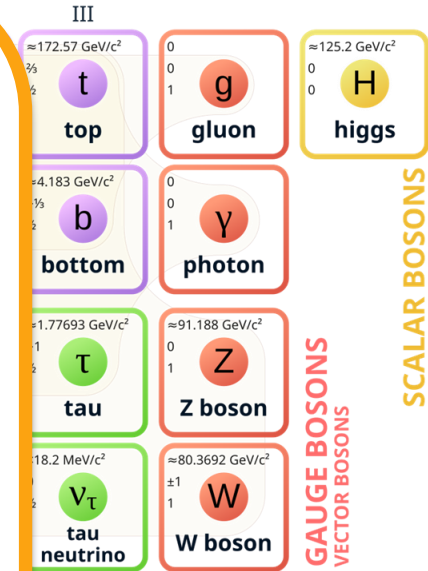
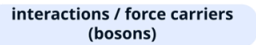
Strong CP problem

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F$$

$$V(\varphi) = \mu^2$$

$$\mathcal{L}_{\text{tot}} = \mathcal{L}_{\text{SM,axions}} + \theta \frac{1}{32\pi^2} G_b^{\mu\nu} G_{b\mu\nu} + \xi \frac{1}{f_a} \frac{1}{32\pi^2} G_b^{\mu\nu} G_{b\mu\nu},$$

L'axion résout le 'strong CP' problem, mais peut aussi être la matière noire car il interagit très faiblement !
D'une pierre deux coups...



Axion

Le papier original

*CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles**

R. D. Peccei and Helen R. Quinn†

Institute of Theoretical Physics, Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 31 March 1977)

We give an explanation of the *CP* conservation of strong interactions which includes the effects of pseudoparticles. We find it is a natural result for any theory where at least one flavor of fermion acquires its mass through a Yukawa coupling to a scalar field which has nonvanishing vacuum expectation value.

Le papier original

*CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles**

R. D. Peccei and Helen R. Quinn†

Institute of Theoretical Physics, Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 31 March 1977)

We give an explanation of the *CP* conservation of strong interactions which includes the effects of pseudoparticles. We find it is a natural result for any theory where at least one flavor of fermion acquires its mass through a Yukawa coupling to a scalar field which has nonvanishing vacuum expectation value.

$$\arg \left\{ \prod_{i=1}^m (G_i \exp[i\beta_{j_i}]) \exp[i\theta] \right\} = 0,$$

Le papier original

*CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles**

R. D. Peccei and Helen R. Quinn†

Institute of Theoretical Physics, Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 31 March 1977)

We give an explanation of the *CP* conservation of strong interactions which includes the effects of pseudoparticles. We find it is a natural result for any theory where at least one flavor of fermion acquires its mass through a Yukawa coupling to a scalar field which has nonvanishing vacuum expectation value.

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} + i \bar{\psi} D_\mu \gamma^\mu \psi + \bar{\psi} [G \varphi \frac{1}{2} (1 + \gamma_5) + G^* \varphi^* \frac{1}{2} (1 - \gamma_5)] \psi - |\partial_\mu \varphi|^2 - \mu^2 |\varphi|^2 - h |\varphi|^4; \quad \mu^2 < 0.$$

Le papier original

*CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles**

R. D. Peccei and Helen R. Quinn†

Institute of Theoretical Physics, Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 31 March 1977)

We give an explanation of the *CP* conservation of strong interactions which includes the effects of pseudoparticles. We find it is a natural result for any theory where at least one flavor of fermion acquires its mass through a Yukawa coupling to a scalar field which has nonvanishing vacuum expectation value.

$$Z(J, J^*) = \int d\rho \int d\sigma \{ A_0(\rho, \sigma^2) + \sum_n A_n(\varphi\varphi^*) [G e^{i\theta} \varphi]^n + A_n^*(\varphi\varphi^*) [G^* e^{-i\theta} \varphi^*]^n \} \\ \times \exp[J e^{i\beta} (\lambda + \rho + i\sigma) + J^* e^{-i\beta} (\lambda + \rho - i\sigma)].$$

Le papier original

*CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles**

R. D. Peccei and Helen R. Quinn†

Institute of Theoretical Physics, Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 31 March 1977)

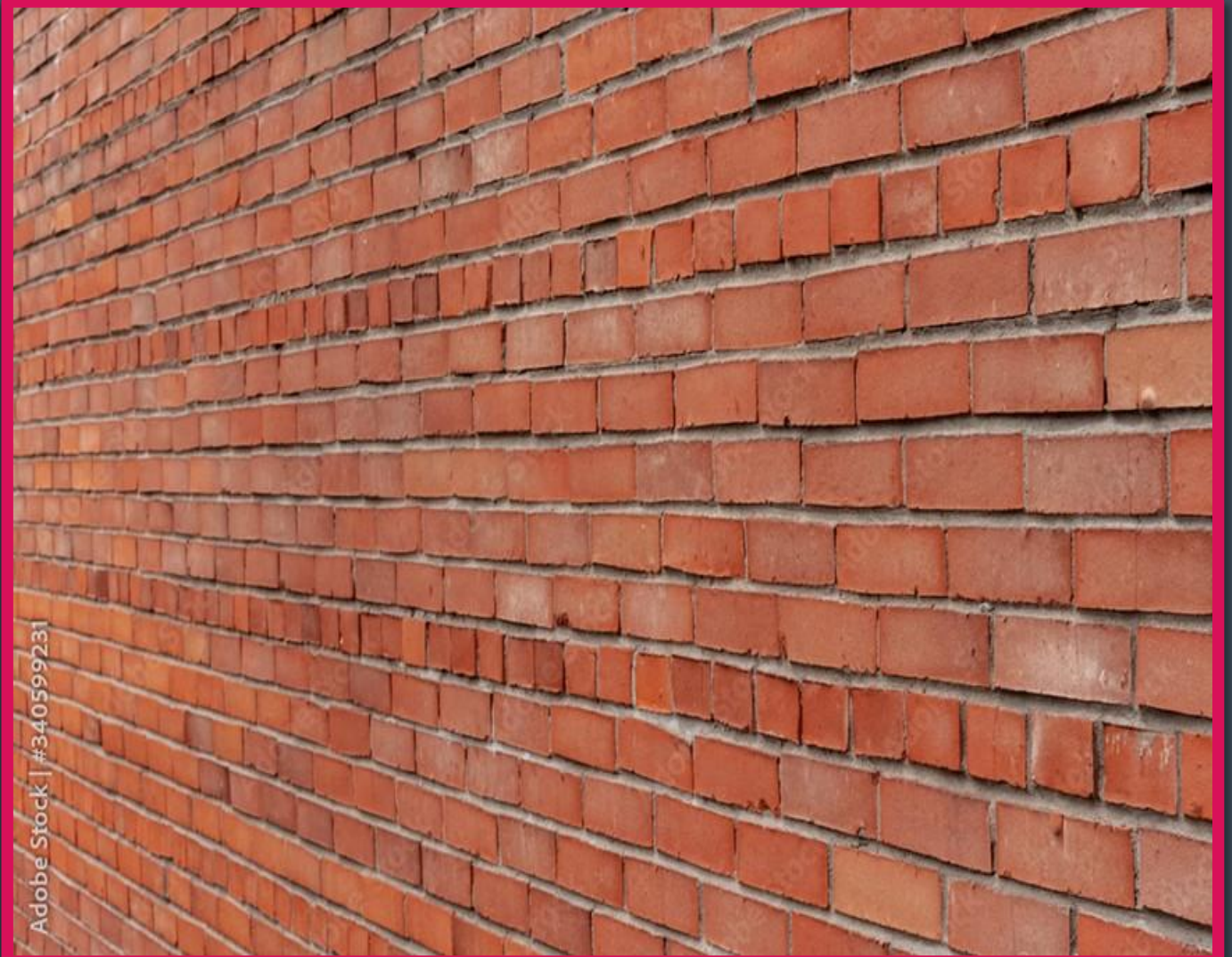
We give an explanation of the *CP* conservation of strong interactions which includes the effects of pseudoparticles. We find it is a natural result for any theory where at least one flavor of fermion acquires its mass through a Yukawa coupling to a scalar field which has nonvanishing vacuum expectation value.

We wish to thank S. Weinberg and J. D. Bjorken for useful discussions.

Pourquoi l'Axion ?



Pourquoi l'Axion ?



Pourquoi l'Axion ?



SPOILER: ça marche pas.



CERN Axion Solar Telescope



CERN Axion Solar Telescope



CERN Axion Solar Telescope



Tube du
LHC
réutilisé

Les candidats macroscopiques

Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI¹

Princeton University Observatory

Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23

Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI¹

Princeton University Observatory

Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23



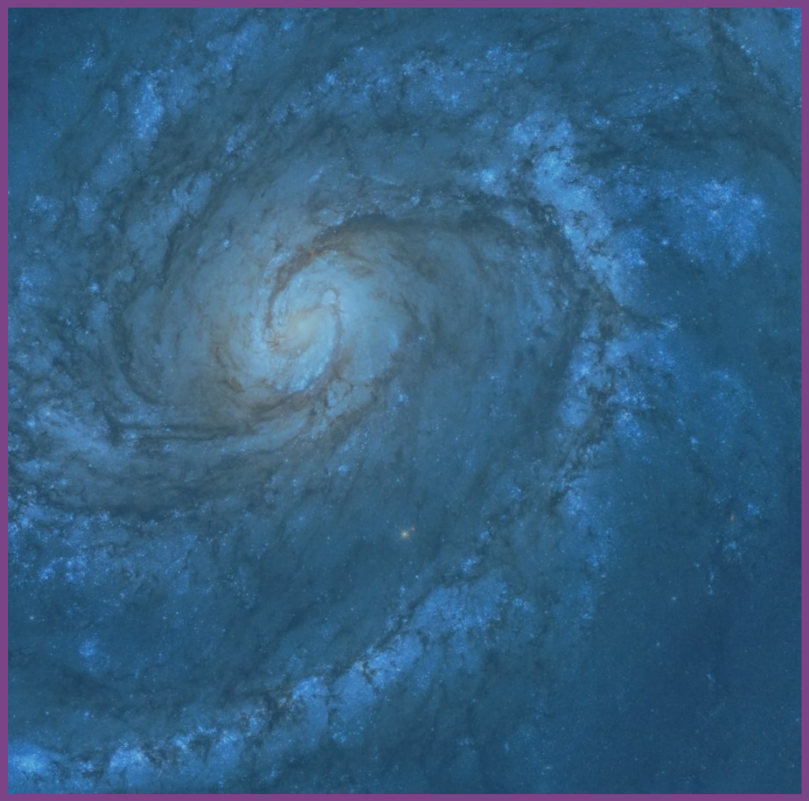
Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI¹

Princeton University Observatory

Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23



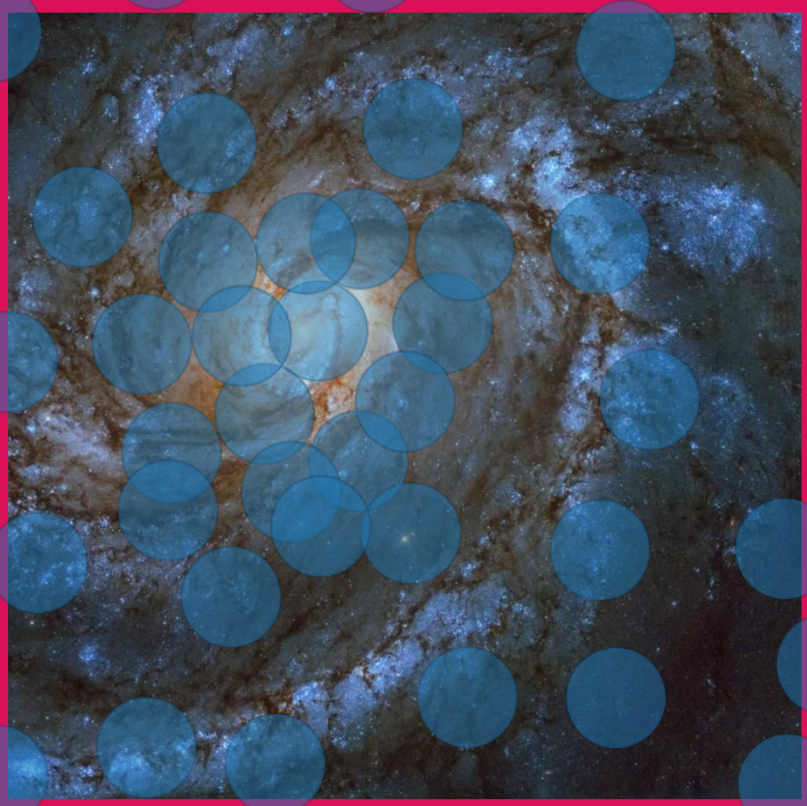
Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI¹

Princeton University Observatory

Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23



Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI¹

Princeton University Observatory

Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23

Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI¹

Princeton University Observatory

Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23

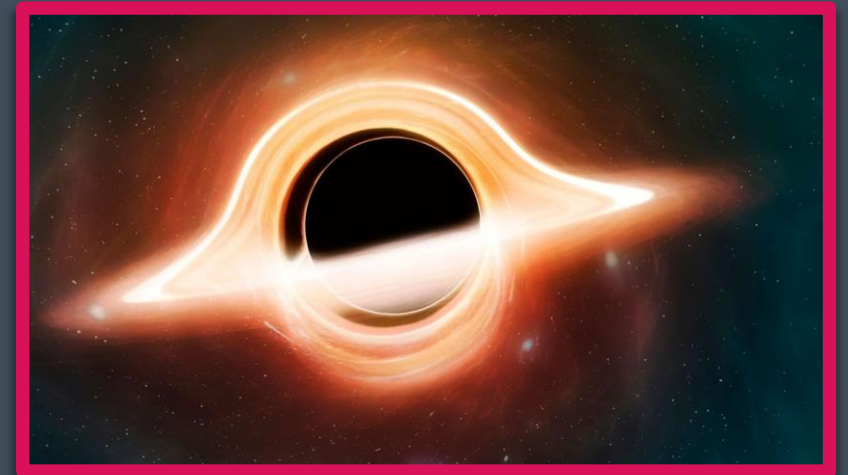


GRAVITATIONALLY COLLAPSED OBJECTS OF VERY LOW MASS

Stephen Hawking

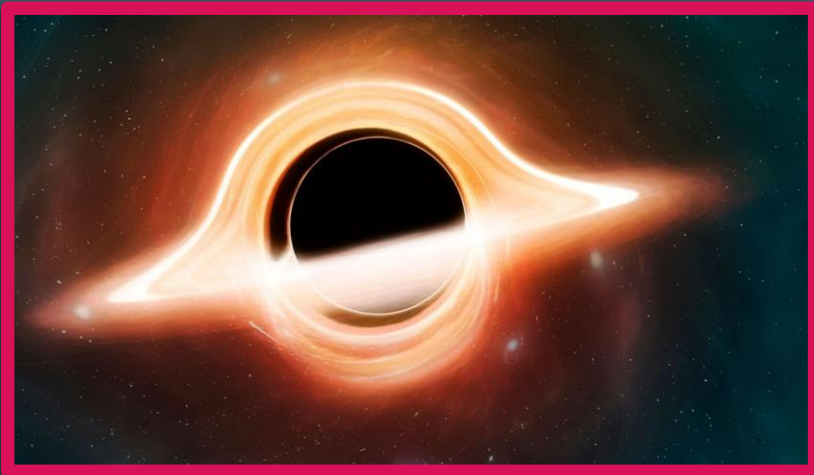
(Communicated by M. J. Rees)

(Received 1970 November 9)



Trous noirs

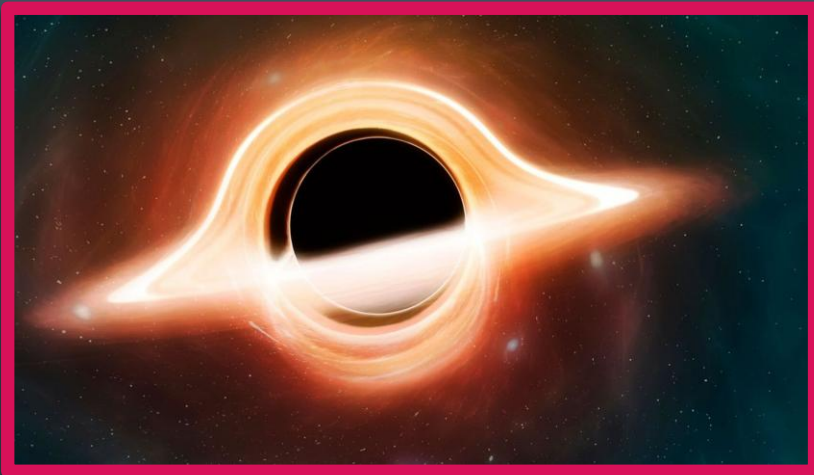
C'est quoi un trou noir ?



Trous noirs

C'est quoi un trou noir ?

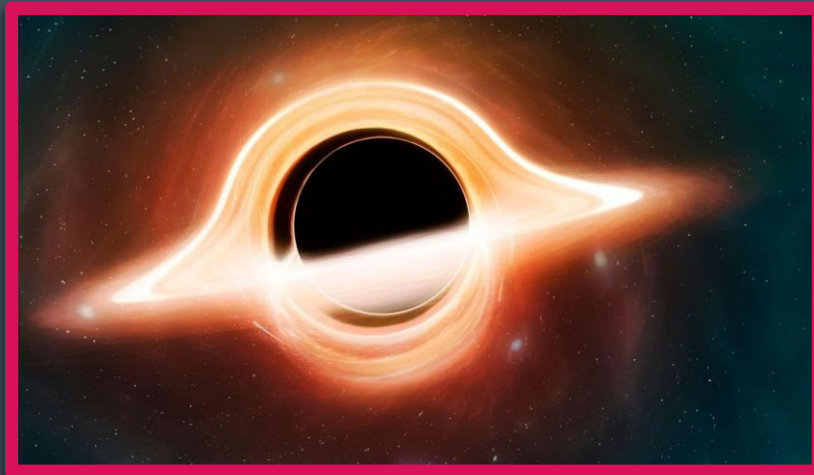
Trou
noir



Particule géante,
stable, n'interagit
que par la gravité.
Parfait candidat !

Trous noirs

Comment former
un trou noir ?



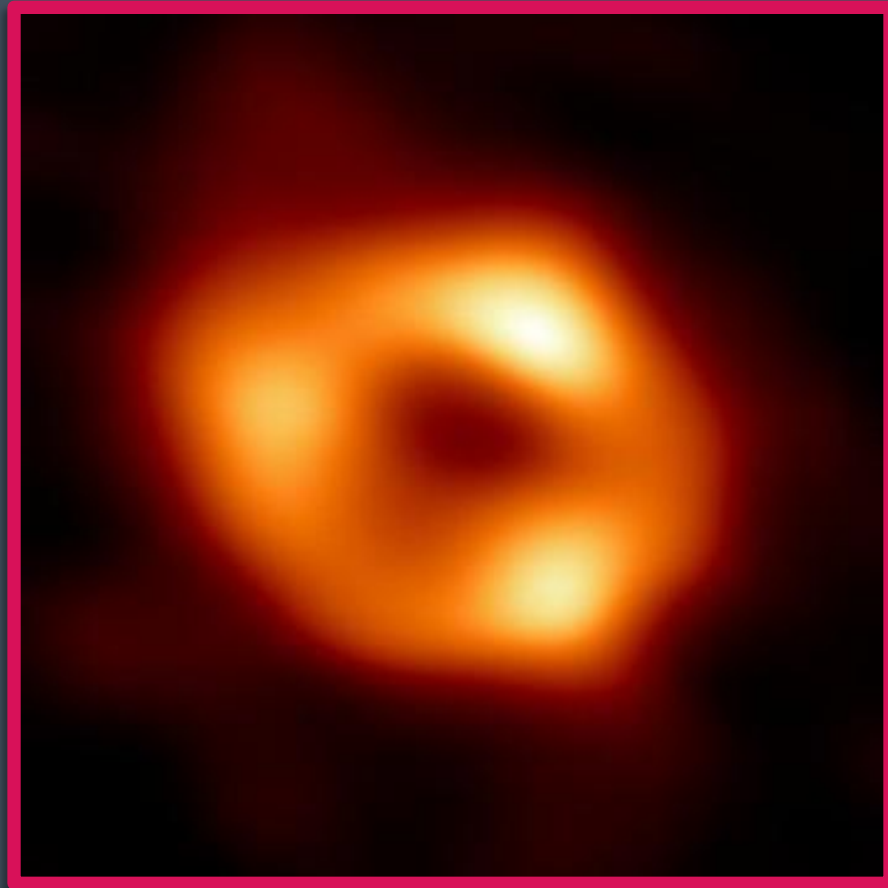
Trous noirs

$$R < R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Pour la Terre: $M = 6 \cdot 10^{24} \text{kg}$
donc $R_s \simeq 1 \text{ cm}$.

Trous noirs

Mais les trous noirs existent déjà ?



Trous noirs

Mais les trous noirs existent déjà ?



2 types: stellaires et supermassifs.
Mais insuffisants pour expliquer la
matière noire...



Trous noirs primordiaux

GRAVITATIONALLY COLLAPSED OBJECTS OF VERY
LOW MASS

Stephen Hawking

(Communicated by M. J. Rees)

(Received 1970 November 9)



Trous noirs primordiaux

GRAVITATIONALLY COLLAPSED OBJECTS OF VERY
LOW MASS

Stephen Hawking

(Communicated by M. J. Rees)

(Received 1970 November 9)

Automatiquement stables et n'interagissent que
par la gravitation: bon candidat à la matière
noire!

Trous noirs primordiaux

GRAVITATIONALLY COLLAPSED OBJECTS OF VERY
LOW MASS

Stephen Hawking

(Communicated by M. J. Rees)

(Received 1970 November 9)

Plus d'infos durant la leçon numéro 4...

La gravité modifiée

Alternative à la matière noire ?

$$F = ma = \frac{GmM}{r^2}$$

Alternative à la matière noire ?

$$F = \cancel{ma} = \frac{\cancel{Gm}M}{r^2}$$

$$a = \frac{GM}{r^2}$$

Alternative à la matière noire ?

$$a = \frac{GM}{r^2} \text{ et } a = \frac{v^2}{r}$$

Alternative à la matière noire ?

$$v = \sqrt{GM/r}$$

$$a = \frac{GM}{r^2} \text{ et } a = \frac{v^2}{r}$$

Alternative à la matière noire ?

$$v = \sqrt{GM/r}$$

Alternative à la matière noire ?

Mesuré,
trop élevé




$$v = \sqrt{GM/r}$$

Alternative à la matière noire ?

Mesuré,
trop élevé




$$v = \sqrt{GM/r}$$

Alternative à la matière noire ?

Mesuré,
trop élevé



$$v = \sqrt{GM/r}$$

Alternative à la matière noire ?

Mesuré,
trop élevé



$$v = \sqrt{GM/r} \times \dots ?$$

La théorie MOND

Modified Newtonian
Dynamics = MOND

La théorie MOND

Modified Newtonian
Dynamics = MOND

On modifie la force, mais
seulement à certaines échelles
pour ne pas créer de problèmes !

La théorie MOND

Modified Newtonian

A MODIFICATION OF THE NEWTONIAN DYNAMICS AS A POSSIBLE
ALTERNATIVE TO THE HIDDEN MASS HYPOTHESIS¹

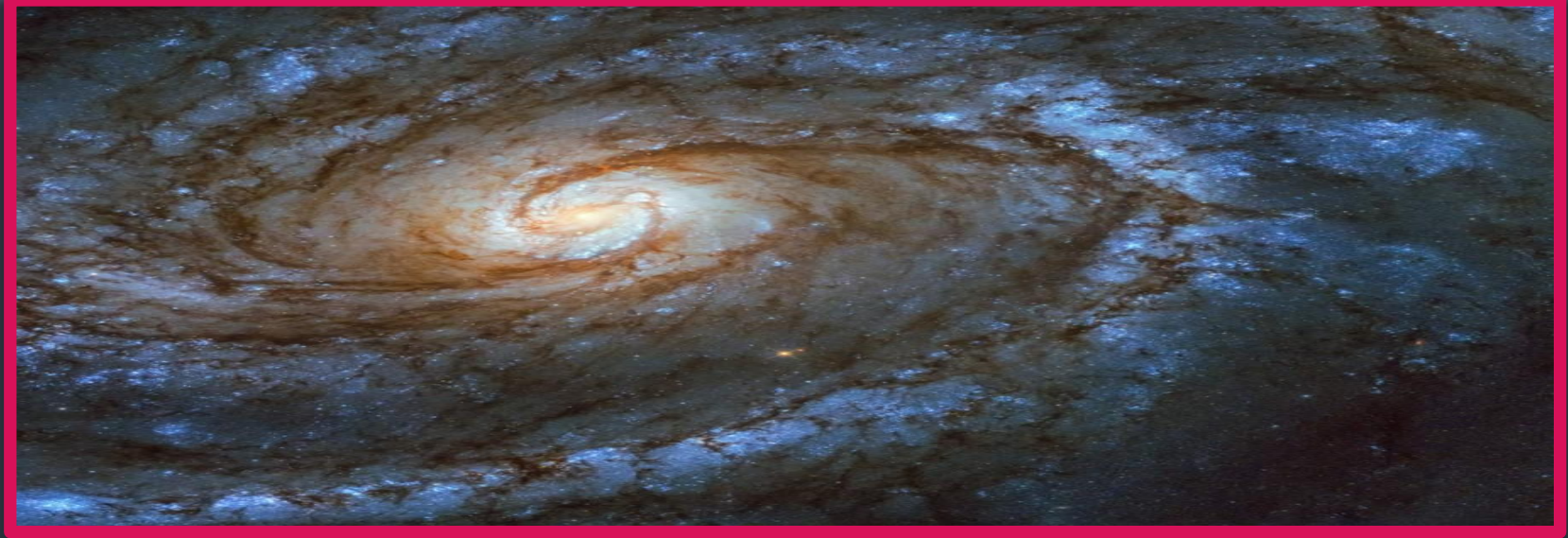
M. MILGROM

Department of Physics, The Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel; and
The Institute for Advanced Study

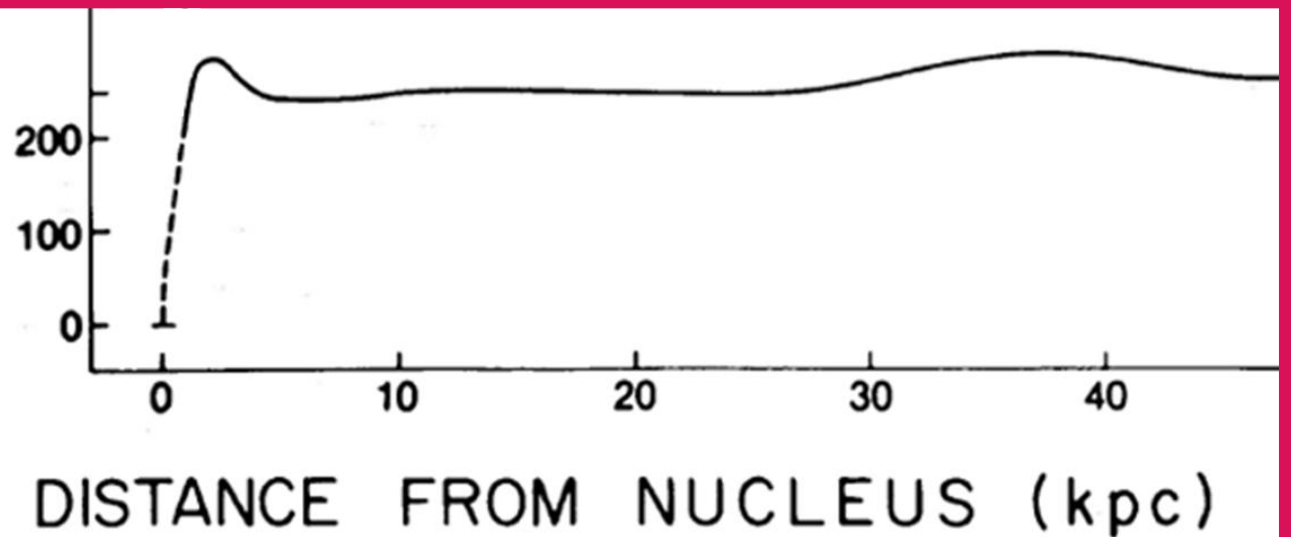
Received 1982 February 4; accepted 1982 December 28

seulement à certaines échelles
pour ne pas créer de problèmes !

La théorie MOND

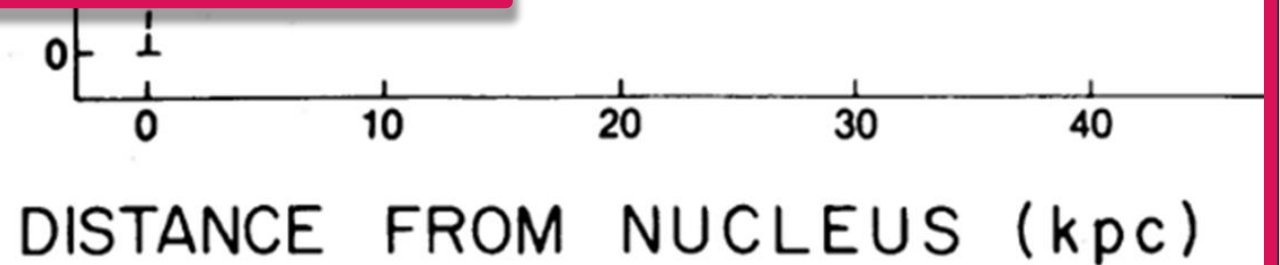
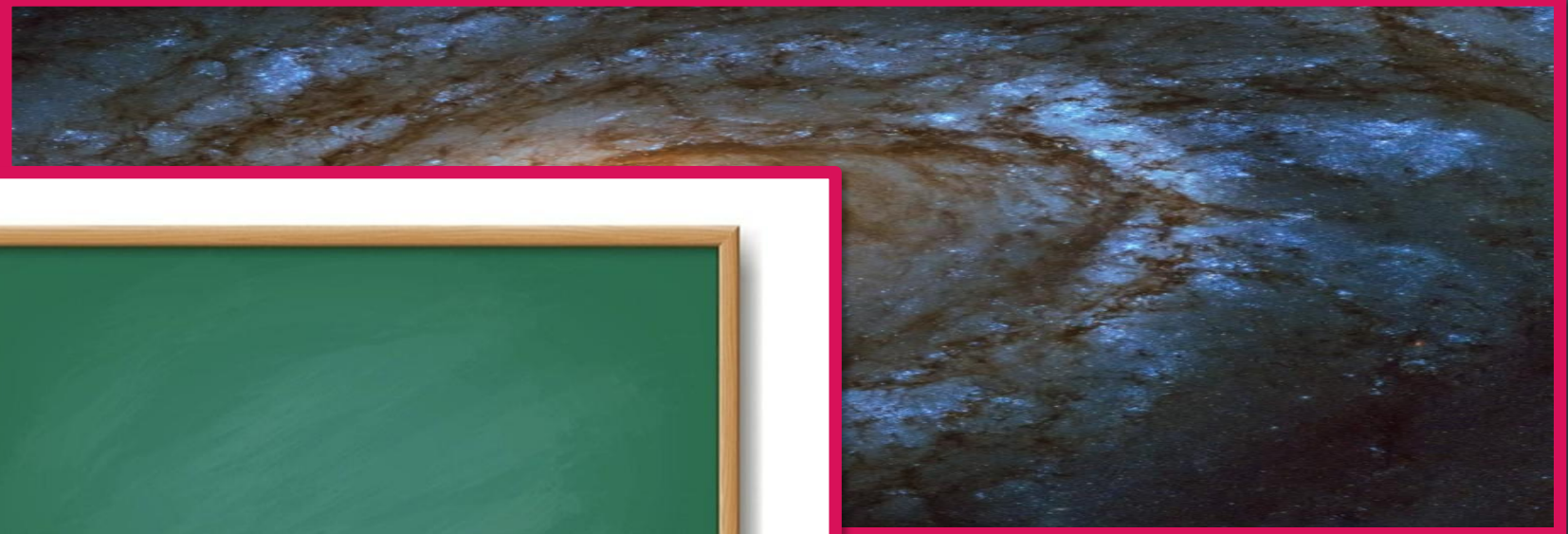


Objectif:

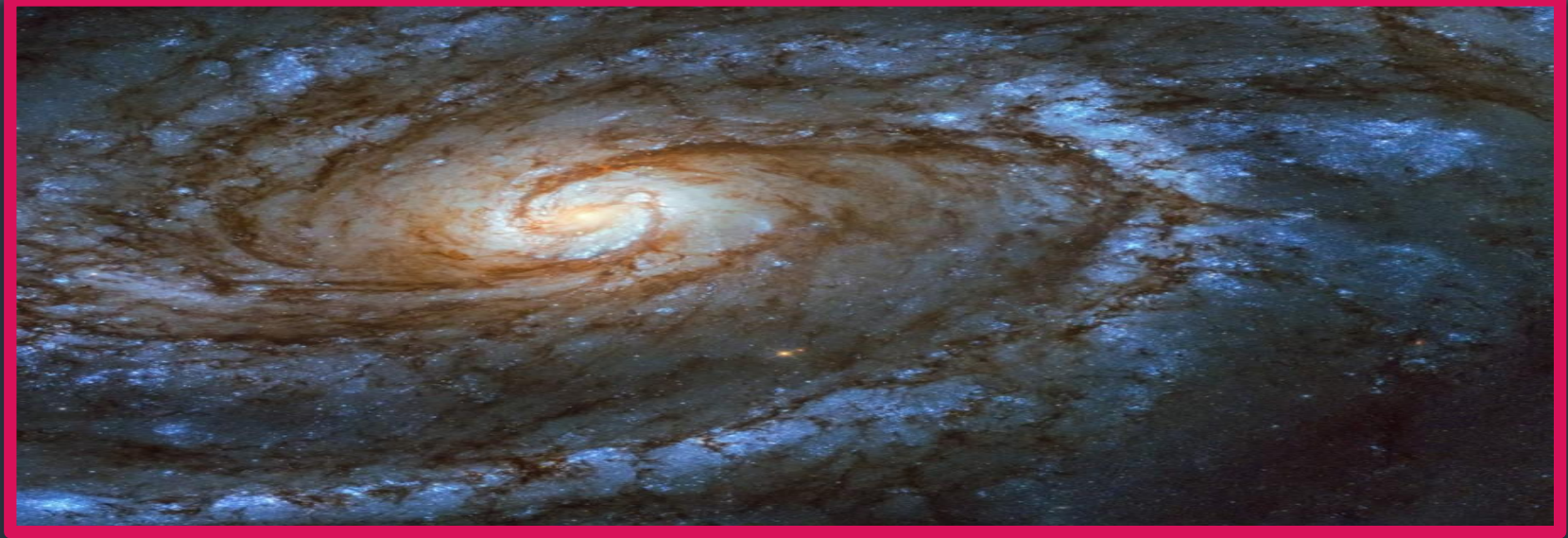


La théorie MOND

Objectif.

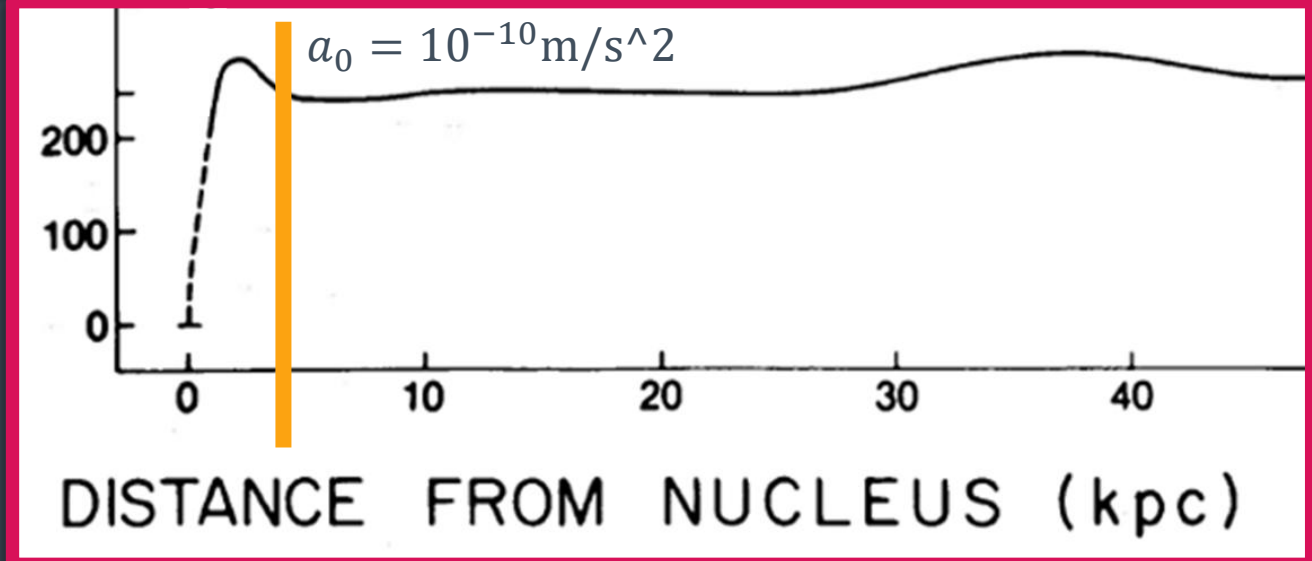


La théorie MOND



$$v = (GMa_0)^{1/4}$$

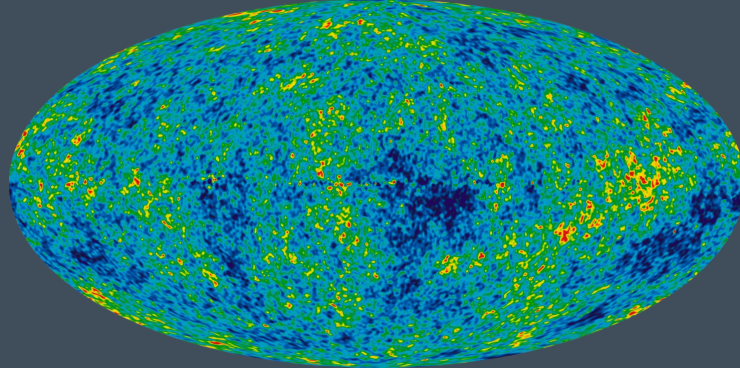
= constante !



Problèmes de la théorie

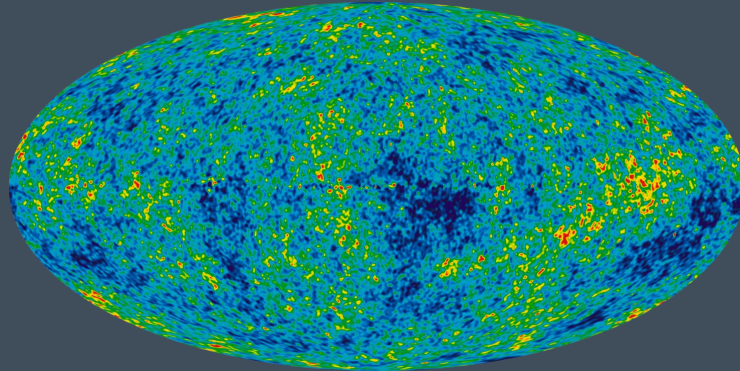
Problèmes de la théorie

- Problème: **on choisit une échelle** a_0 . Donc la MOND ne marche que pour cette échelle. Ne fonctionne pas pour les amas ou le CMB. On a alors besoin de théories plus compliquées (mais celles-ci existent!).



Problèmes de la théorie

- Problème: **on choisit une échelle** a_0 . Donc la MOND ne marche que pour cette échelle. Ne fonctionne pas pour les amas ou le CMB. On a alors besoin de théories plus compliquées (mais celles-ci existent!).

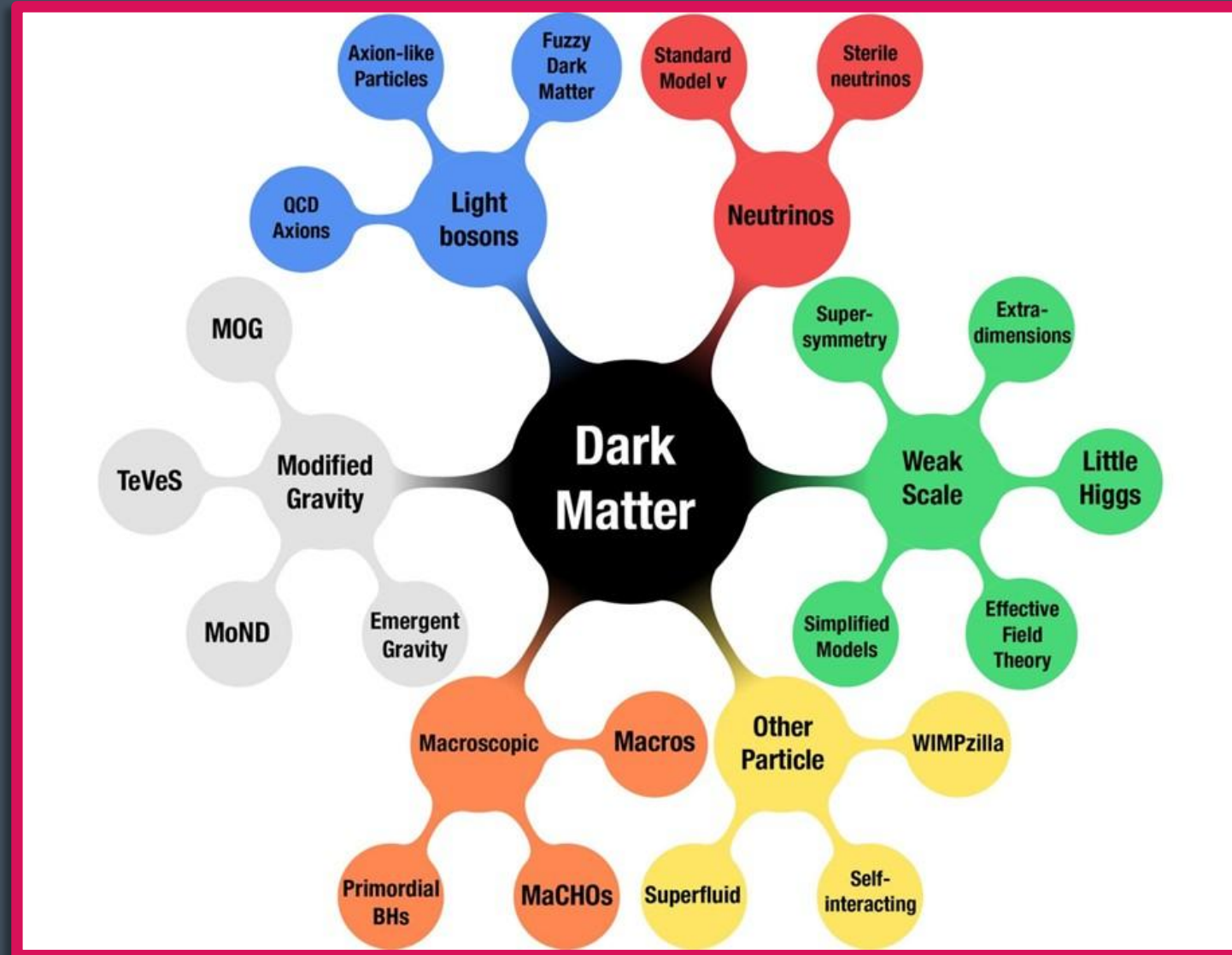


- Le bullet cluster n'est pas expliqué par MOND.

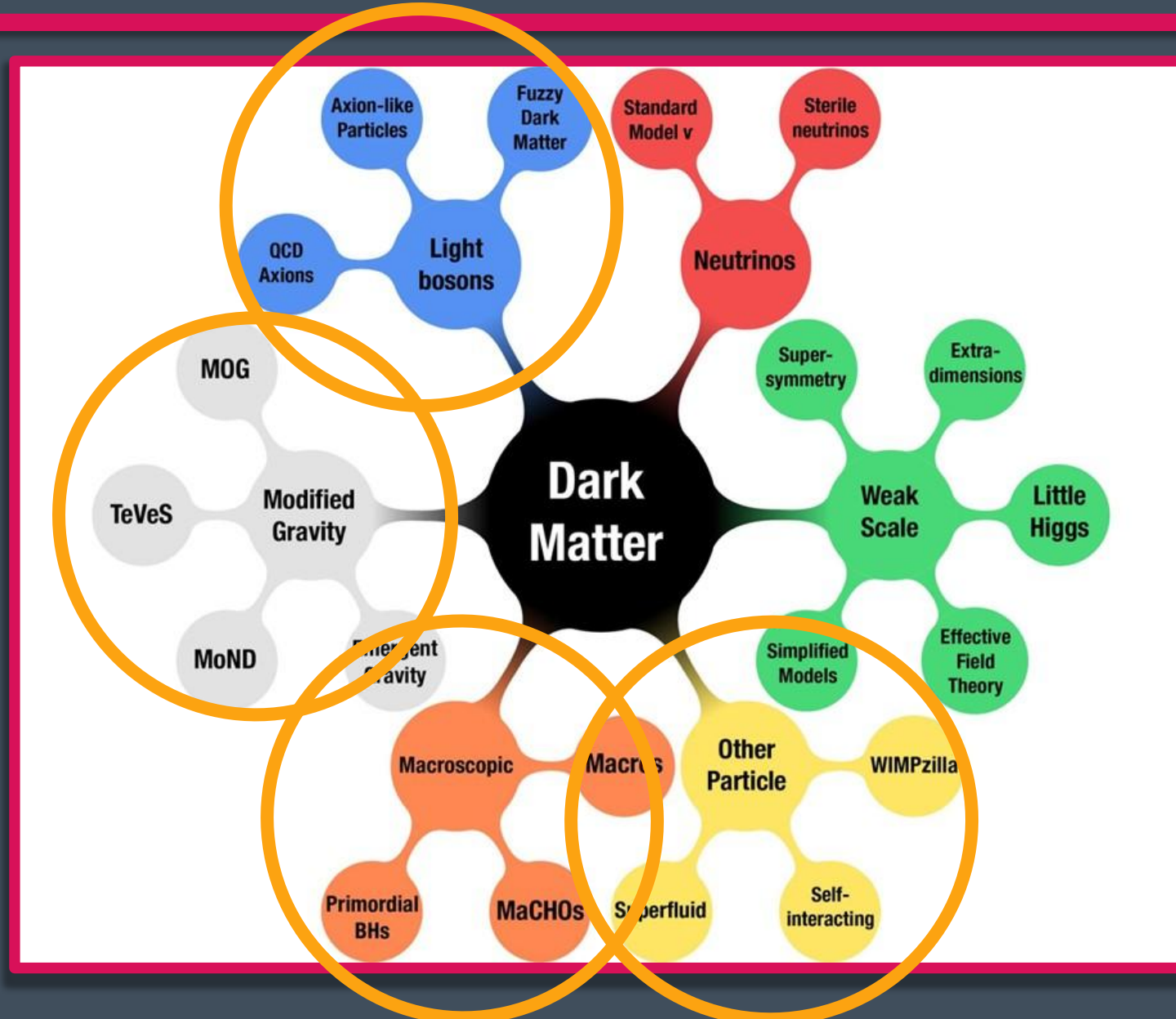


Conclusions

Les nombreux candidats



Les nombreux candidats

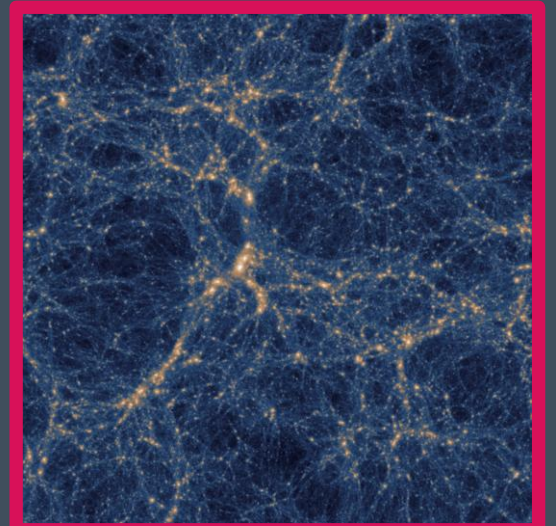
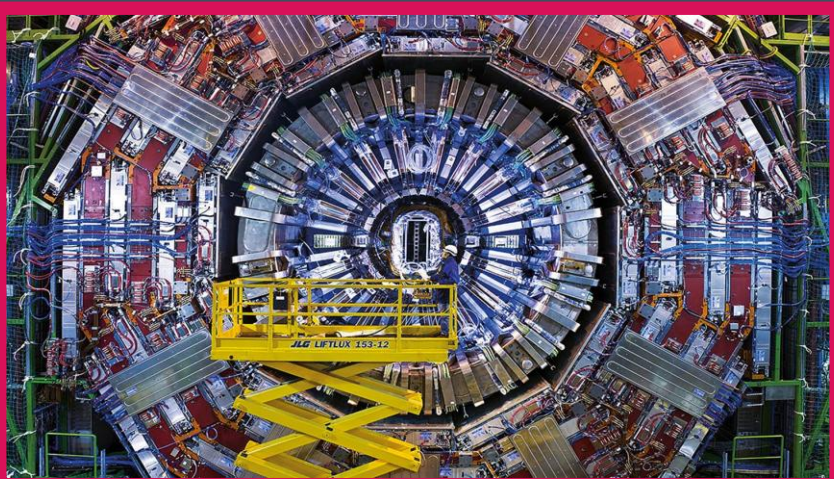


Conclusions

- Nous avons étudié trois candidats et une alternative à la matière noire
- Mais il existe en réalité des dizaines de candidats, avec des modèles plus ou moins compliqués
- Pas encore de détection...
- La solution au problème est possiblement une combinaison de plusieurs candidats et/ou gravités modifiées !

Questions en suspens

- Chaque candidat a ses propres caractéristiques, et potentiellement des effets différents sur l'Univers (en plus de résoudre les problèmes connus).
- C'est ce que testent les physiciens actuellement, via des expériences, des observations et des simulations. L'objectif est de trouver une prédiction théorique que l'on pourra prouver observationnellement...



Questions en suspens

- Chaque candidat a ses propres caractéristiques, et potentiellement des effets différents sur l'Univers.

- C'est des choses préc...

A dans deux semaines...

