

## Leçon 2: Approche théorique de la matière noire: principaux candidats

Nicolas Esser

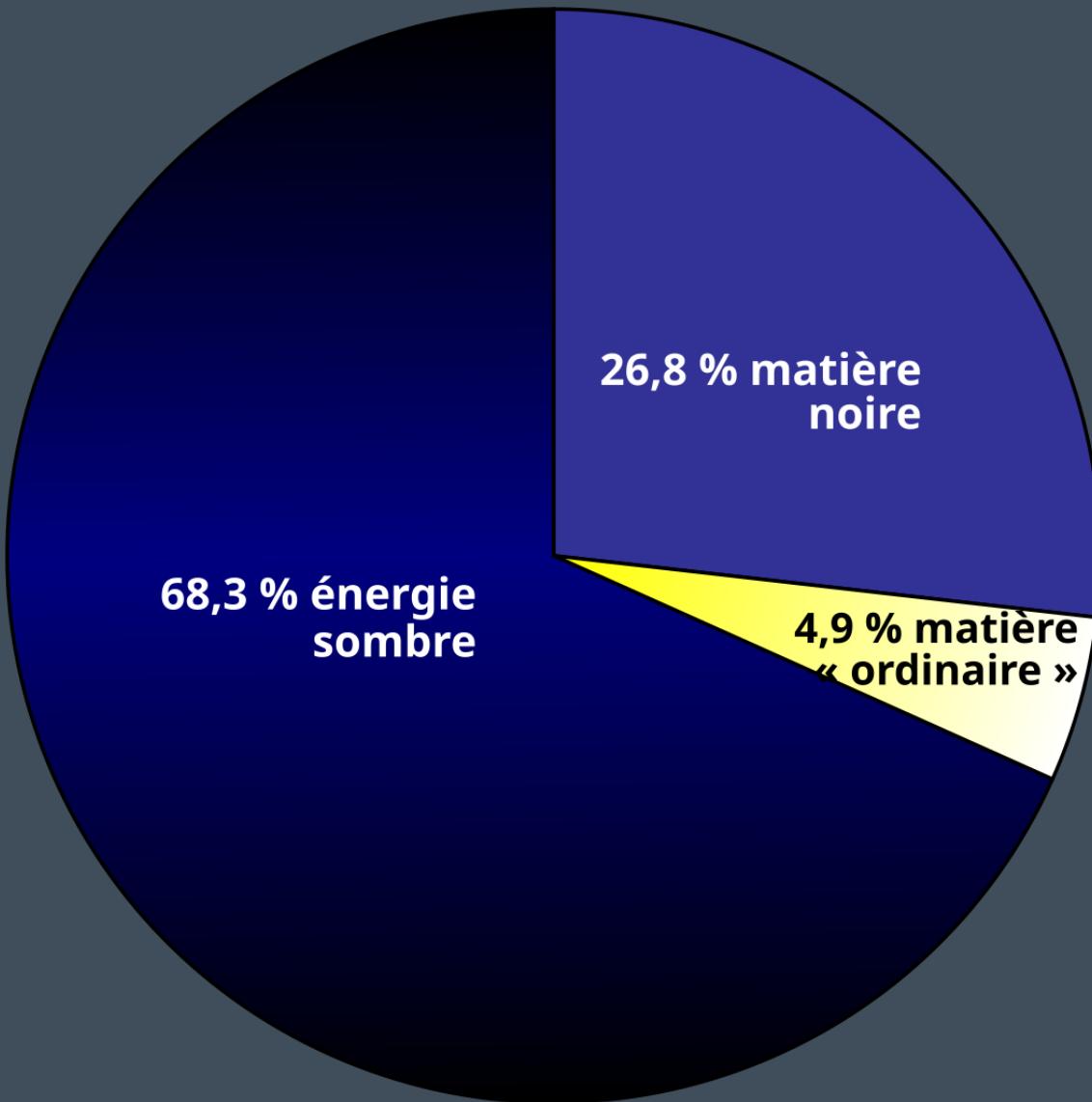
# Plan du cours

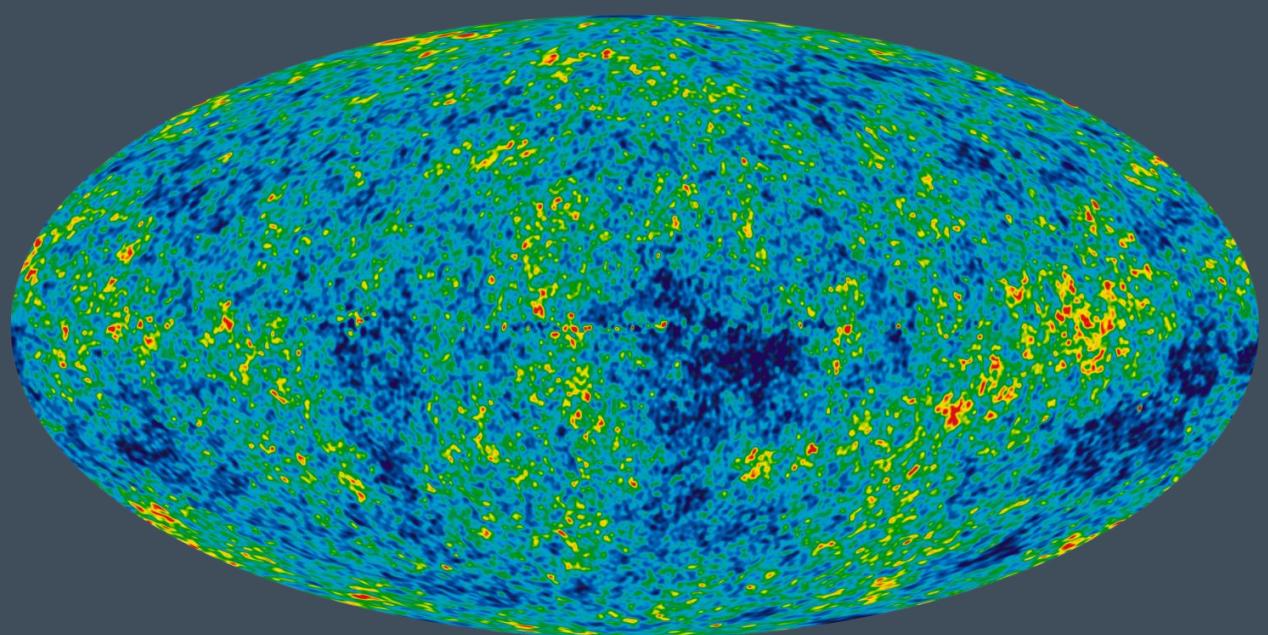
---

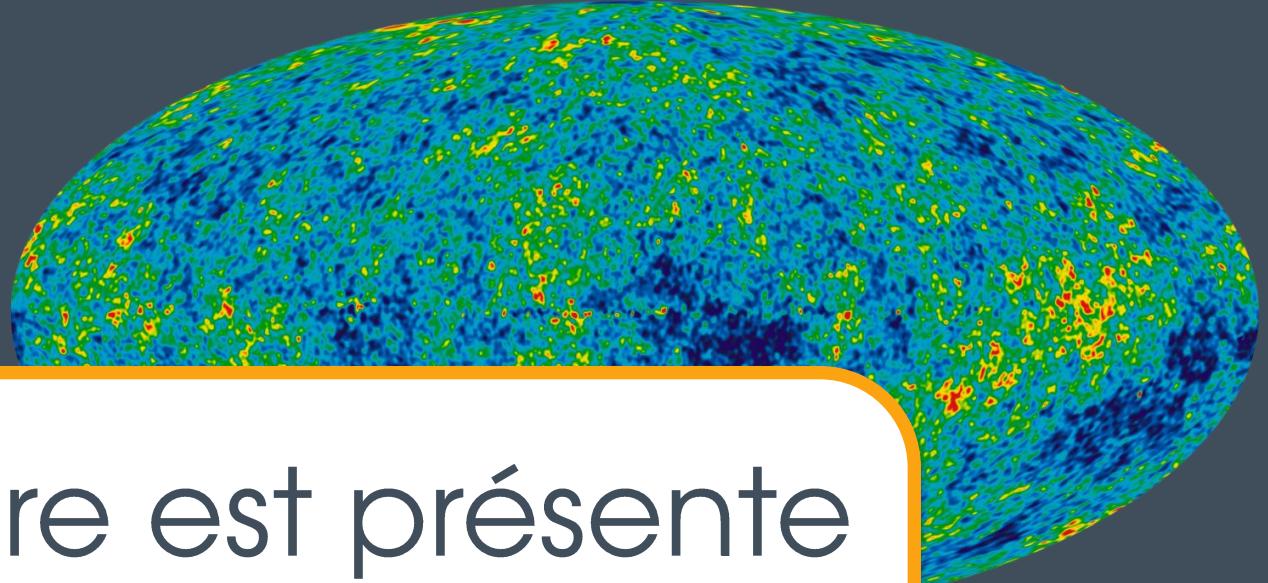
- 14/01 - Historique et approche observationnelle de la matière noire
- 21/01 - Approche théorique de la matière noire et principaux candidats
- 04/02 - Tests et études modernes de la matière noire: des collisionneurs de particules aux simulations cosmologiques
- 11/02 - Trous noirs primordiaux et matière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

# Récapitulatif du cours précédent

---





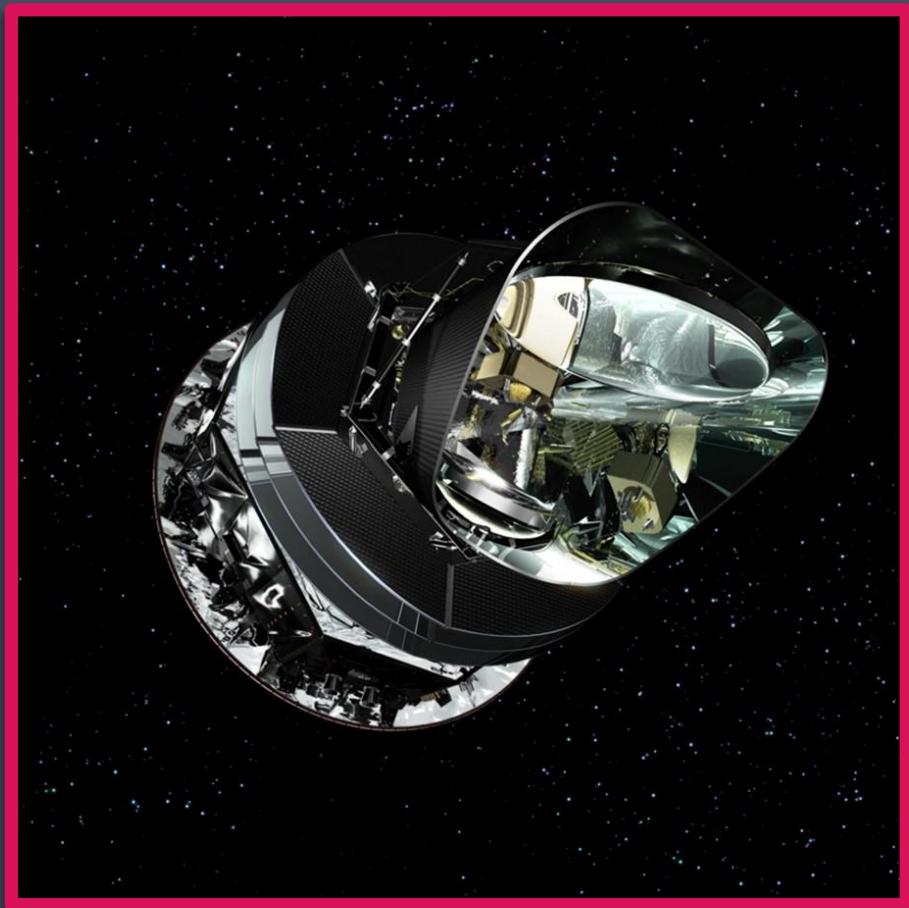


La matière noire est présente  
à différentes échelles et  
différentes époques !

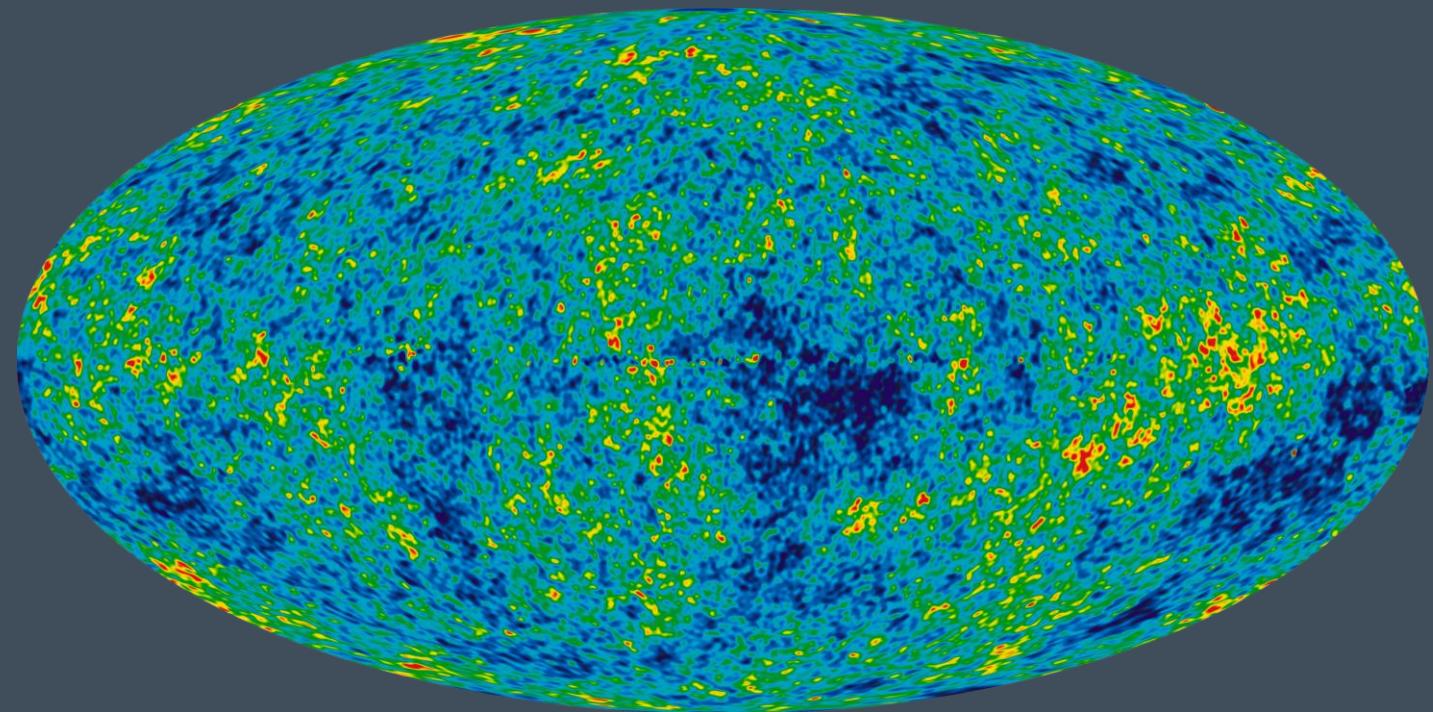


# Planck

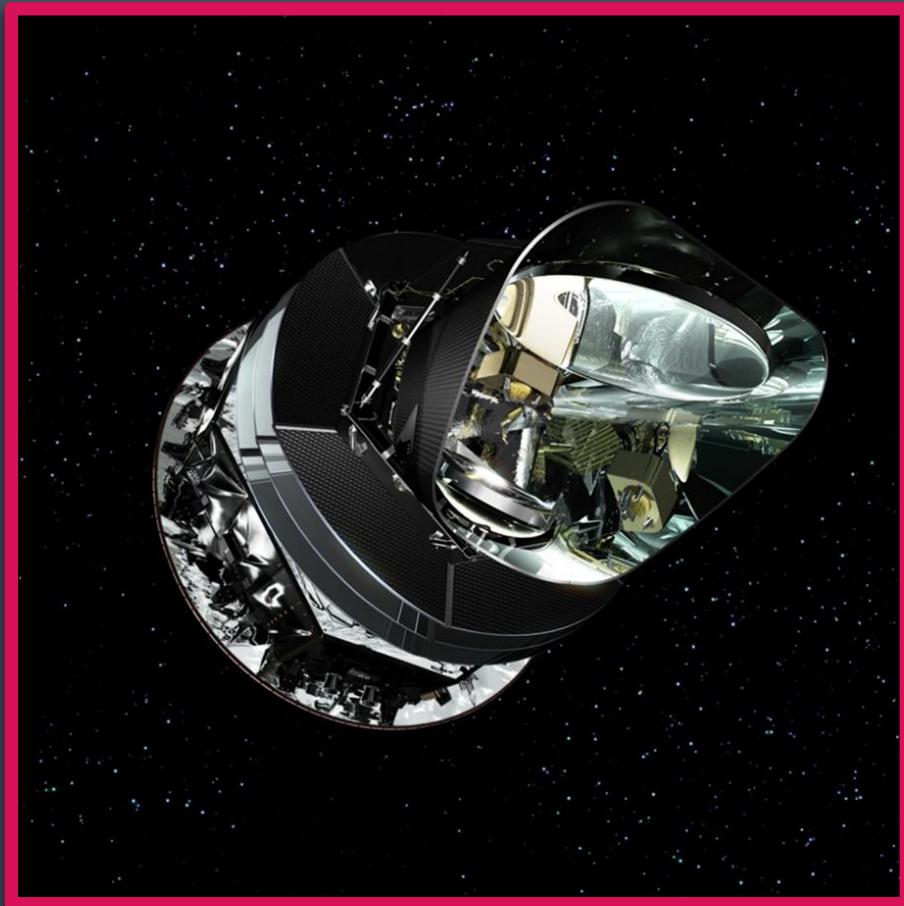
---



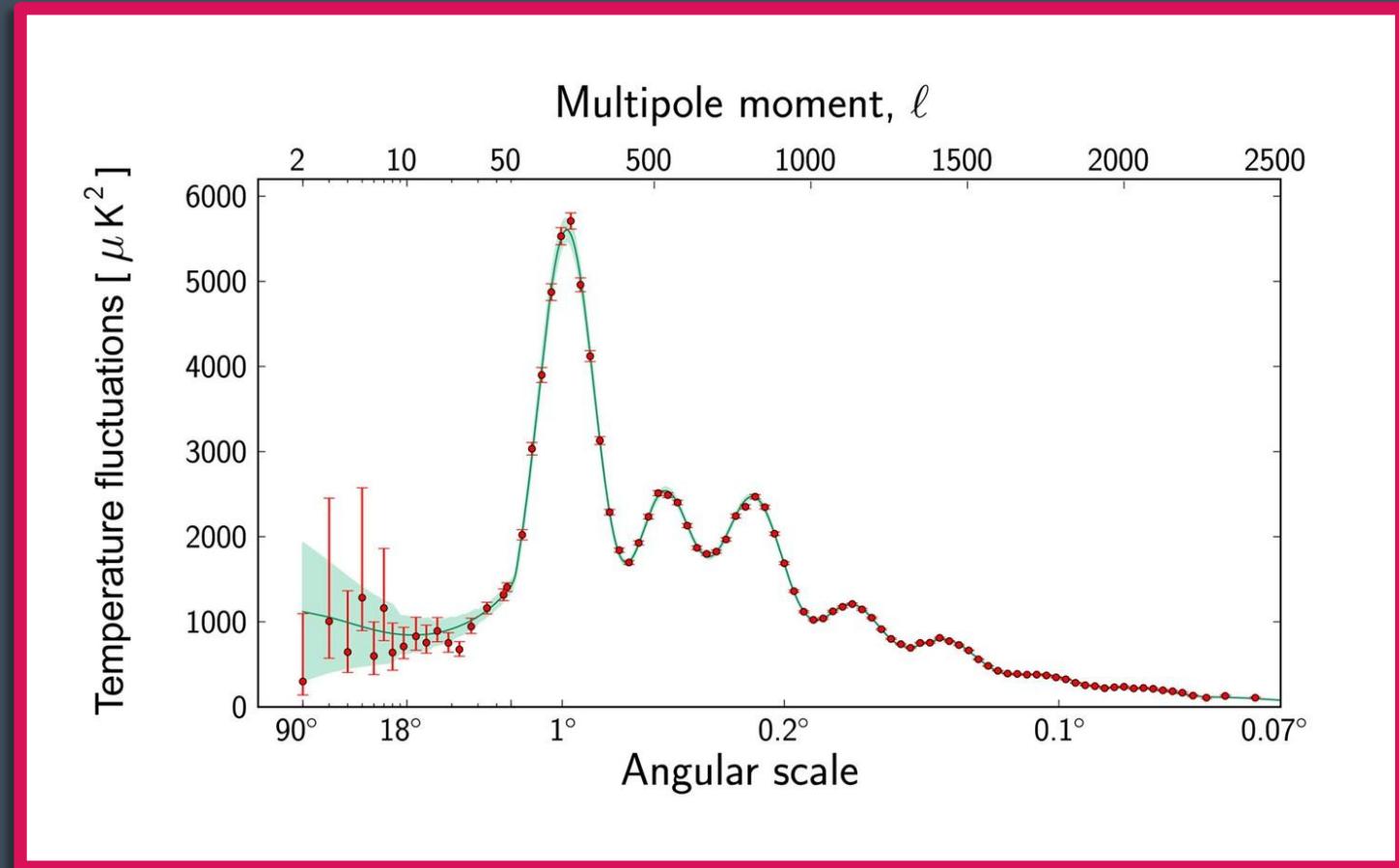
2009



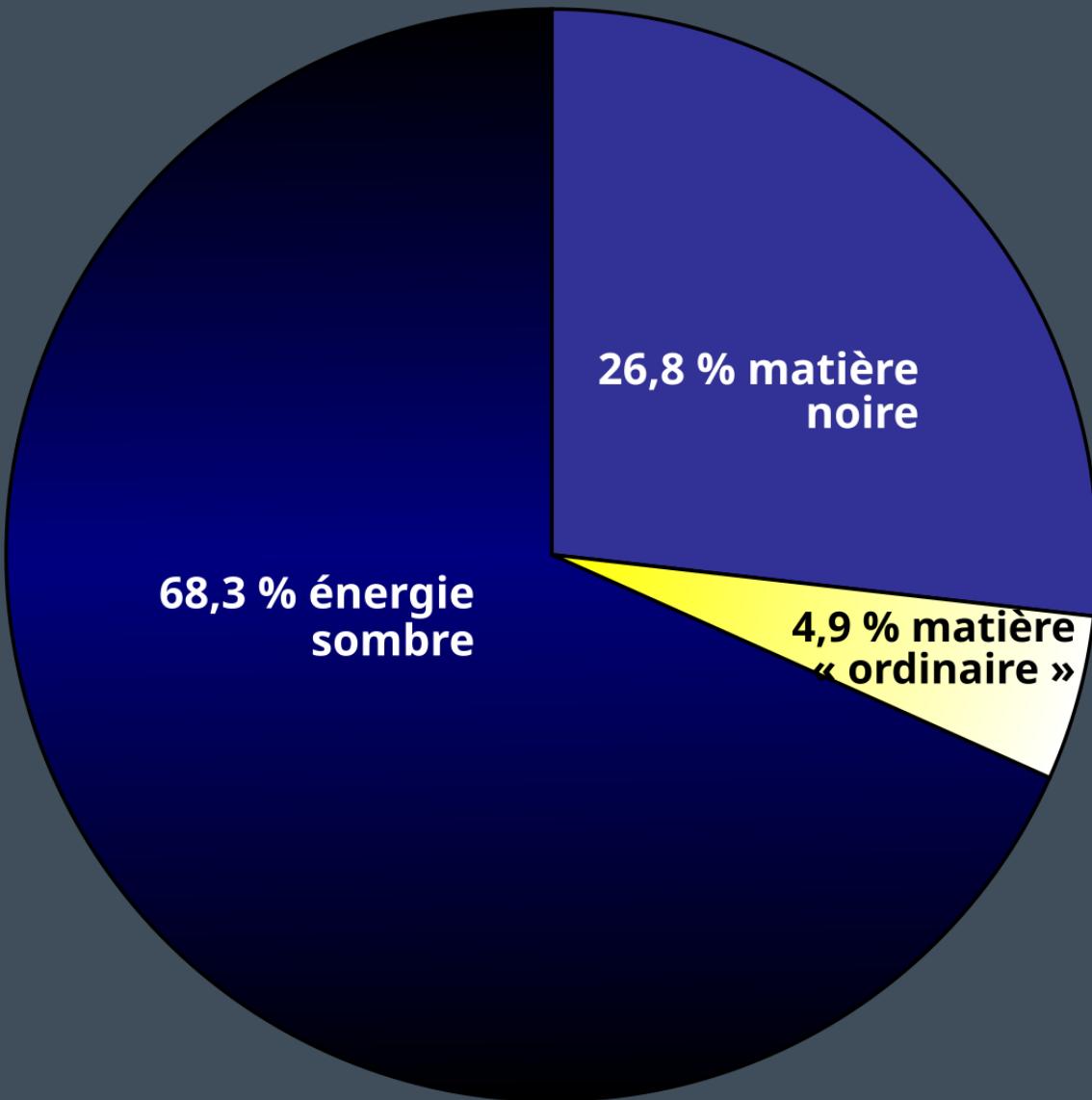
# Planck



2009



# Récapitulatif du cours précédent



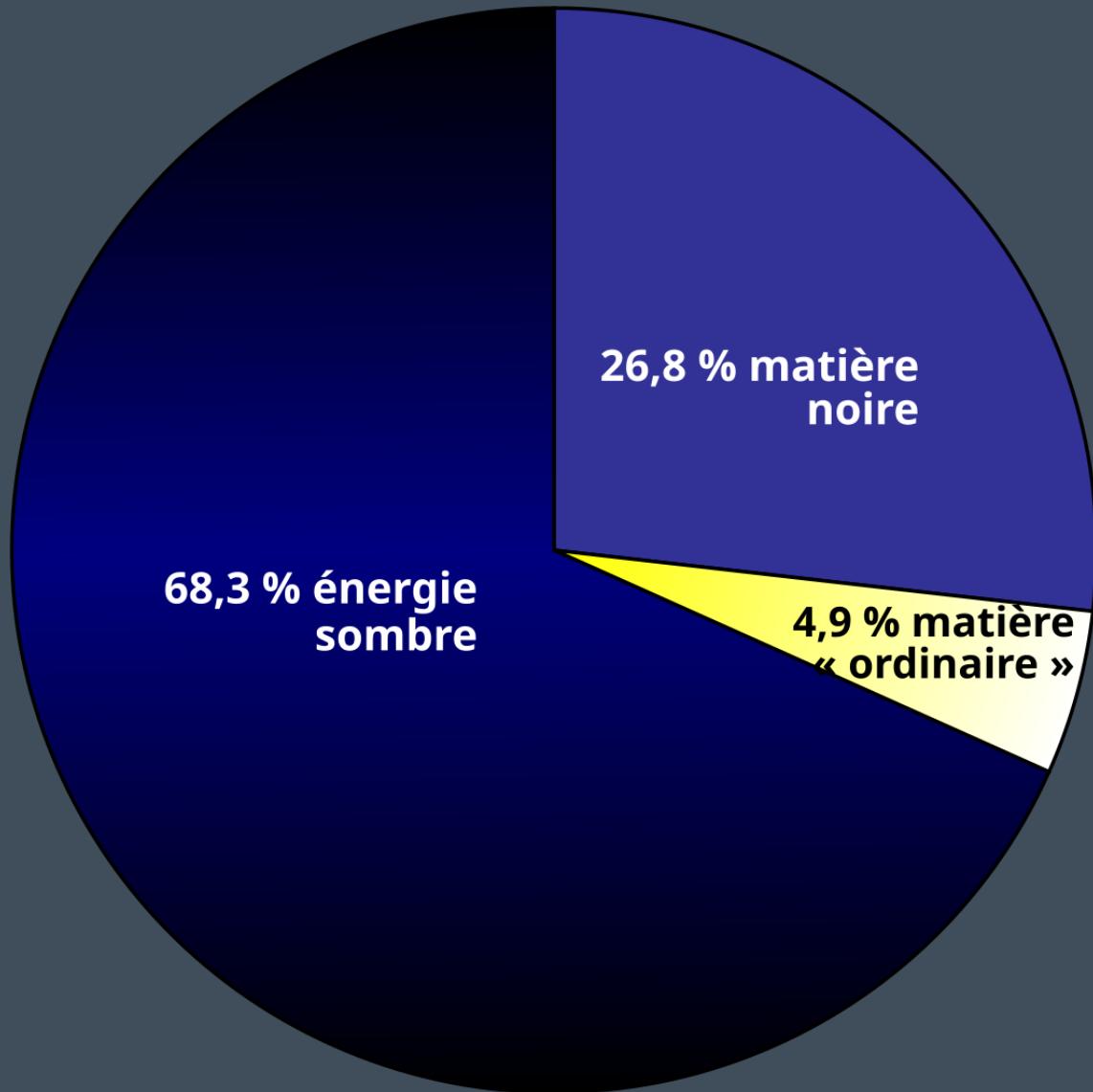
La matière noire  
représente ~ 27% de  
l'énergie de l'Univers !

# 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



théorique

théorique

# Plan de la leçon

---

**Comment expliquer  
la matière noire?**

# Plan de la leçon

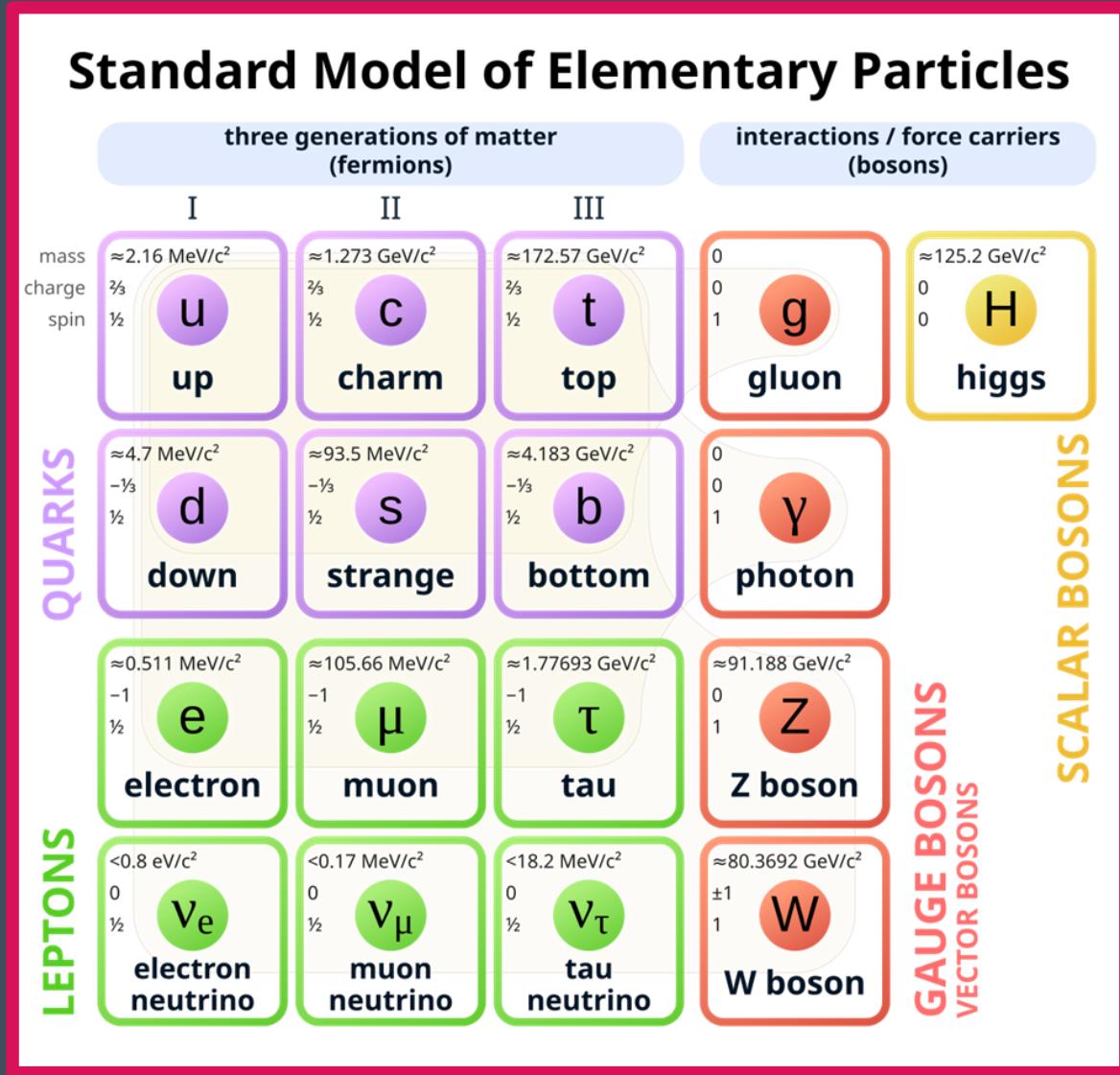
---

## Comment expliquer la matière noire?

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

# Les candidats particules

# Le modèle standard des particules



# Le modèle standard des particules

**Tableau périodique des éléments chimiques**

The periodic table is organized into groups and periods. Groups are labeled at the top: IA, II A, III A, IV A, VA, VI A, VII A, VIII A, IB, II B, III B, IV B, V B, VI B, VII B. Periods are numbered 1 through 7 along the left side.

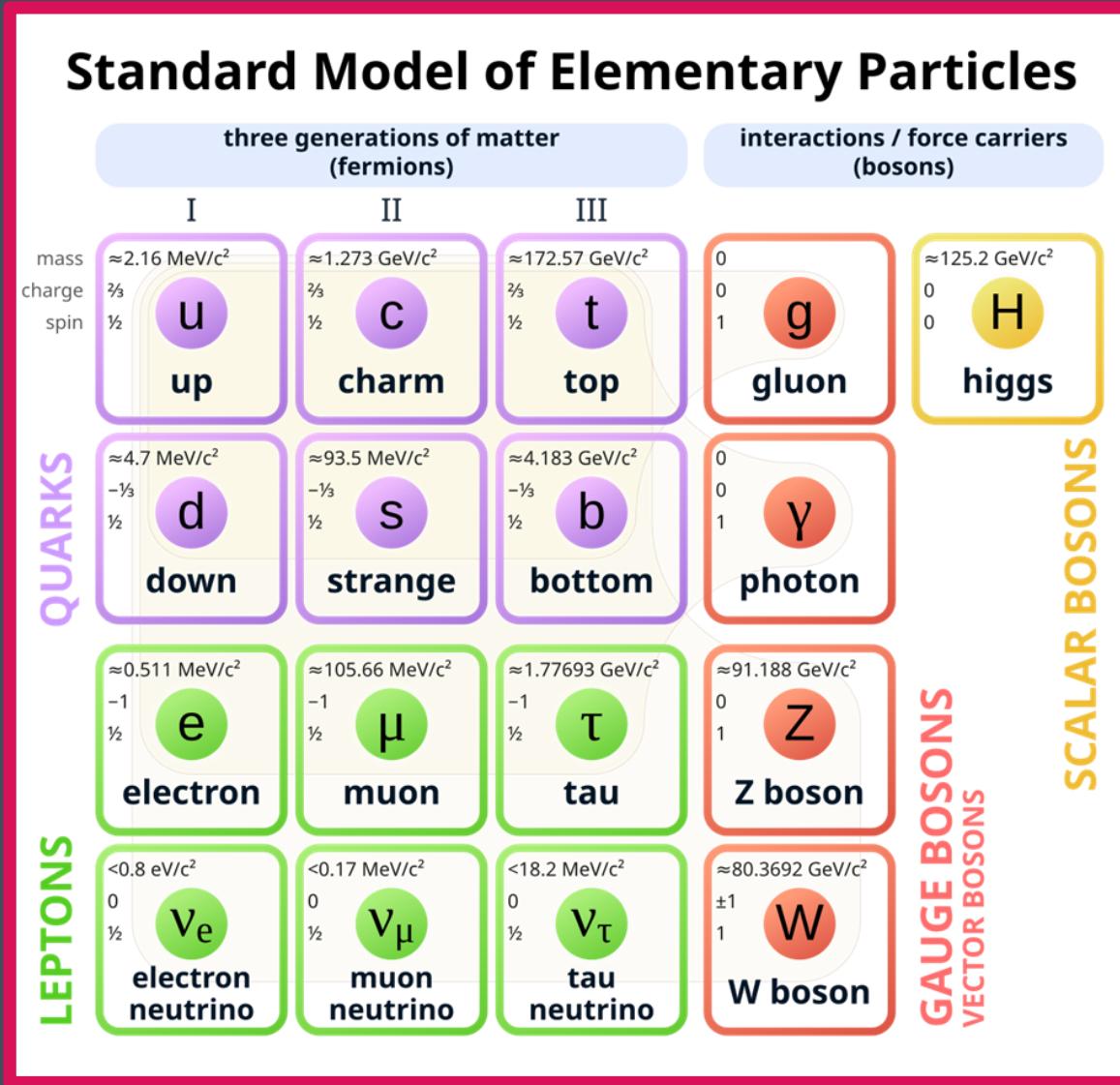
**Legend for element categories:**

- Métaux (Metals):** Red (Alcalins), Orange (Alcalino-terreux), Yellow (Lanthanides), Pink (Actinides), Light Blue (Métaux de transition), Light Green (Métaux pauvres).
- Non métallos (Non-metals):** Light Green (Métalloïdes), Green (Autres non-métaux), Yellow (Halogènes), Light Blue (Gaz nobles), Grey (Non classés).
- Other categories:** Light Blue (primordial), Light Blue (désintégration d'autres éléments), Dashed box (synthétique).

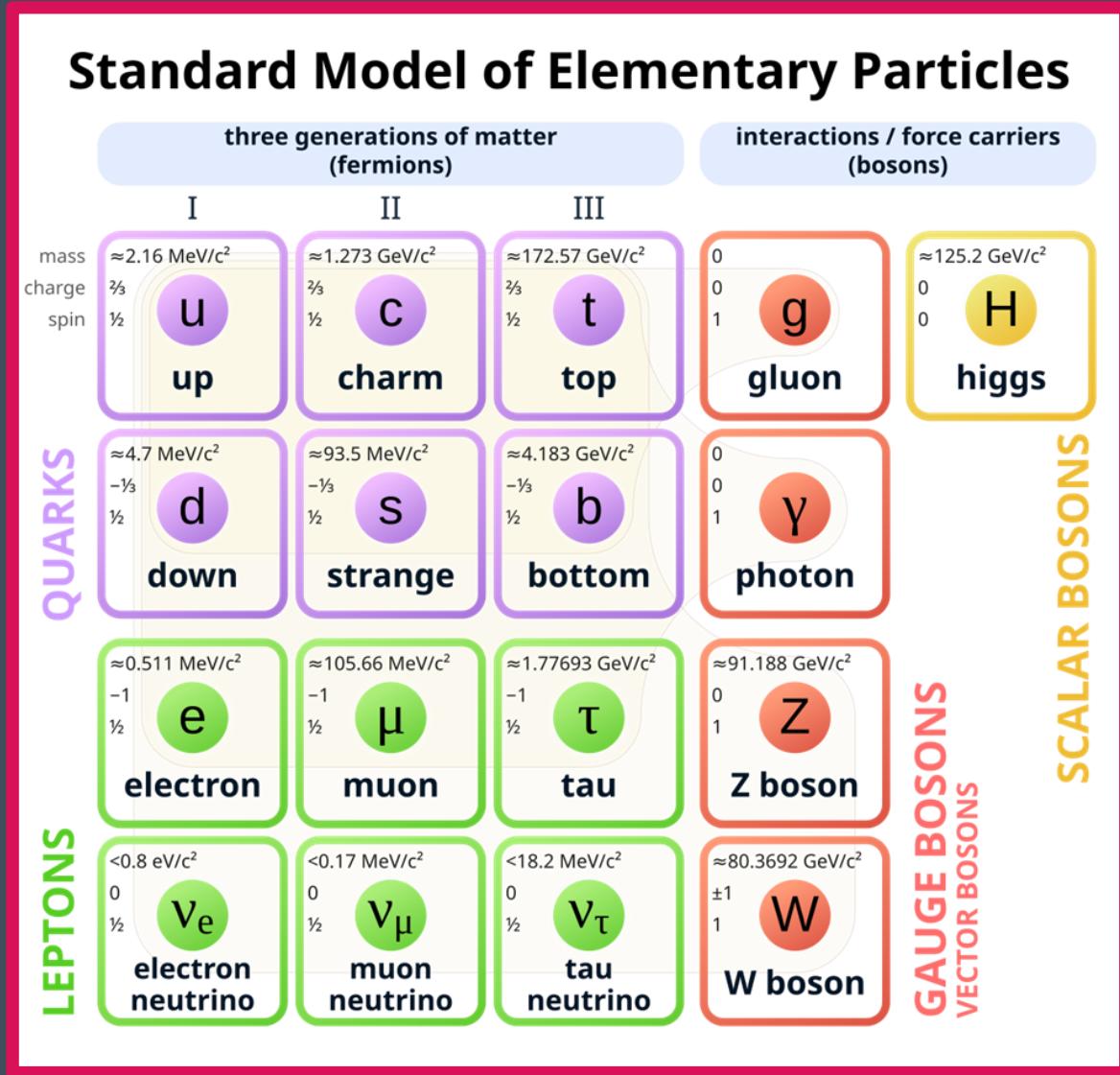
**Annotations:**

- Groups:** Hydrogène (H), Béryllium (Be), Lithium (Li), Sodium (Na), Potassium (K), Rubidium (Rb), Césium (Cs), Francium (Fr), Baryum (Ba), Lanthanides (57-71), Actinides (89-103).
- Periods:** 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.
- Properties:** nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa), numéro atomique, symbole chimique, masse atomique relative [ CAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015 ].
- Notes:** [ CAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015 ]

# Le modèle standard des particules

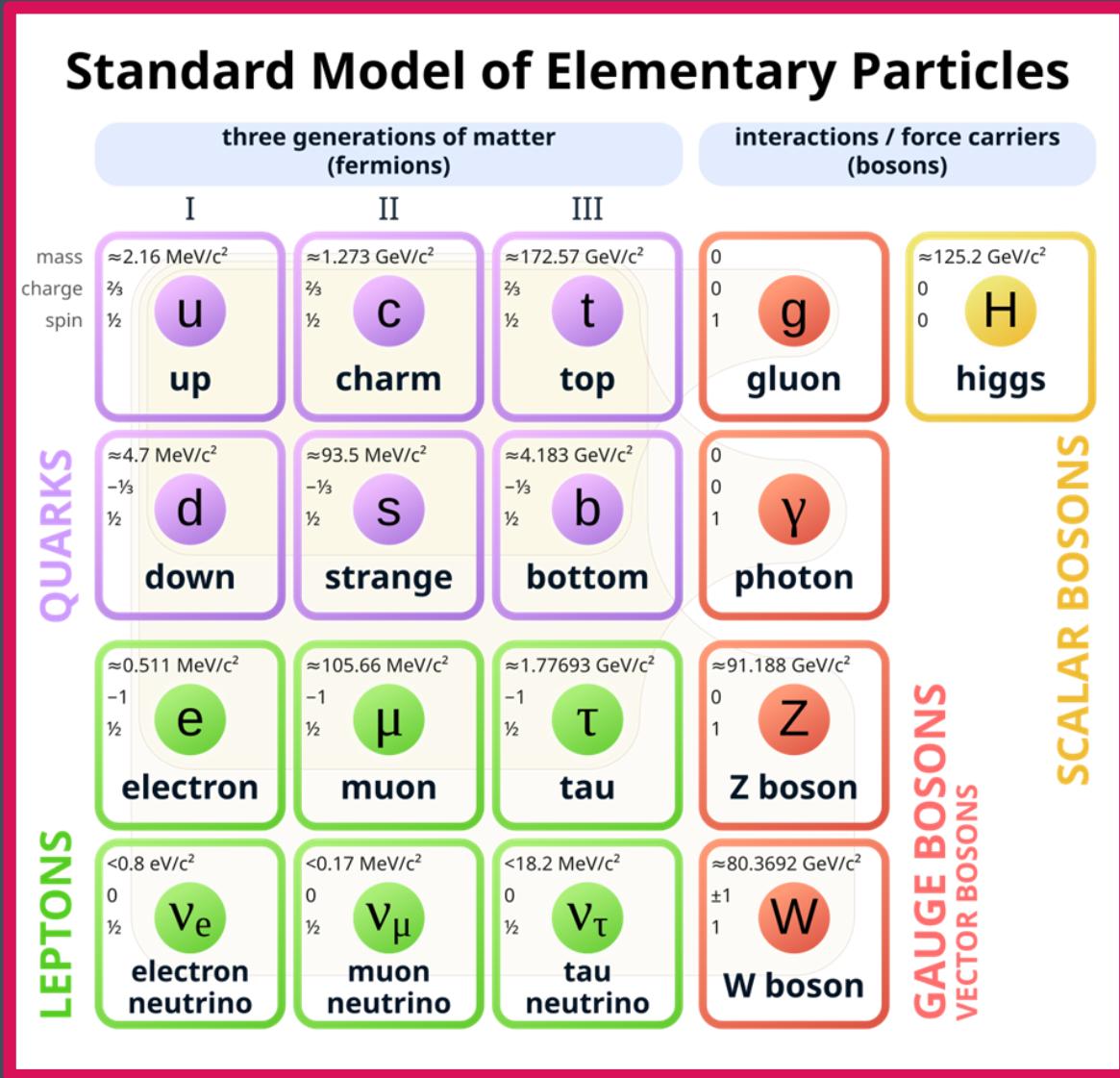


# Le modèle standard des particules



Interaction forte  
Interaction électromagnétique  
Interaction faible  
(+ interaction gravitationnelle)

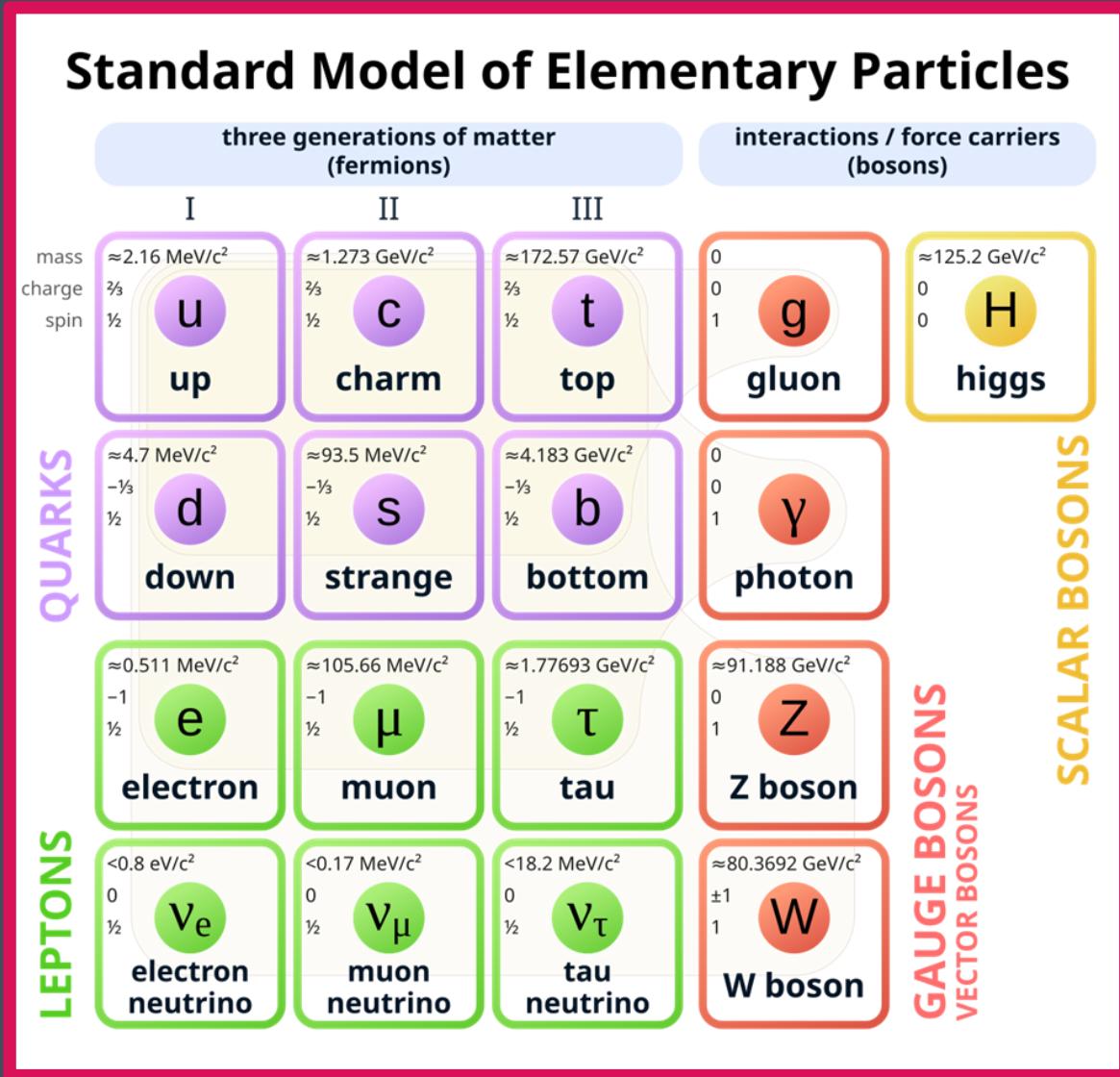
# Le modèle standard des particules



Exemple: proton



# Le modèle standard des particules



Interaction forte  
Interaction électromagnétique  
Interaction faible  
(+ interaction gravitationnelle)

# Le modèle standard des particules

Stand

mass	$\approx 2.16 \text{ GeV}$
charge	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$

mass	$\approx 4.7 \text{ GeV}$
charge	$-\frac{1}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$

mass	$\approx 0.5 \text{ GeV}$
charge	-1
spin	$\frac{1}{2}$

mass	$< 0.8 \text{ eV}$
charge	0
spin	$\frac{1}{2}$

mass	$< 0.8 \text{ eV}$
charge	electroneutral
spin	

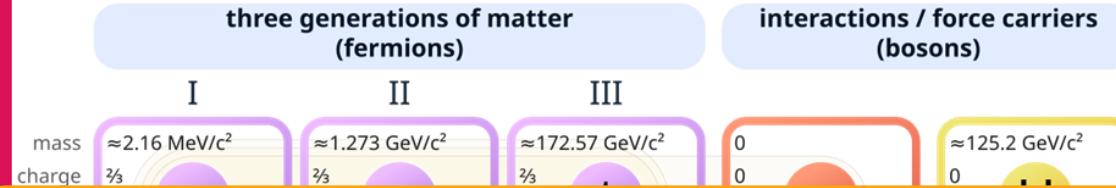
QUARKS

LEPTONS

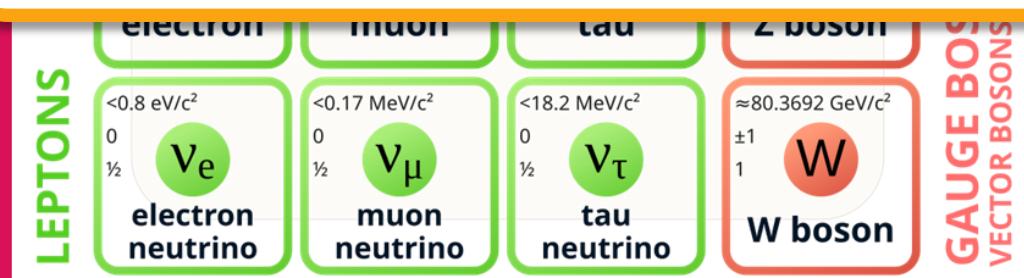
Toute les forces de l'Univers découlent de celles-ci! (ex: le sol sur lequel nous tenons avec nos pieds)

# Le modèle standard des particules

## Standard Model of Elementary Particles



Le ‘couplage’  $g$ : forces plus importantes (plus longue portée) et interactions plus probables



Interaction forte

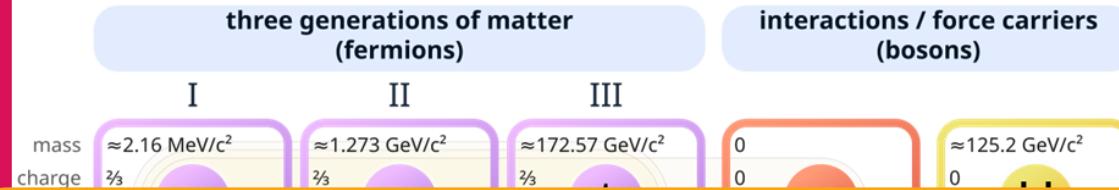
Interaction  
électromagnétique

Interaction faible

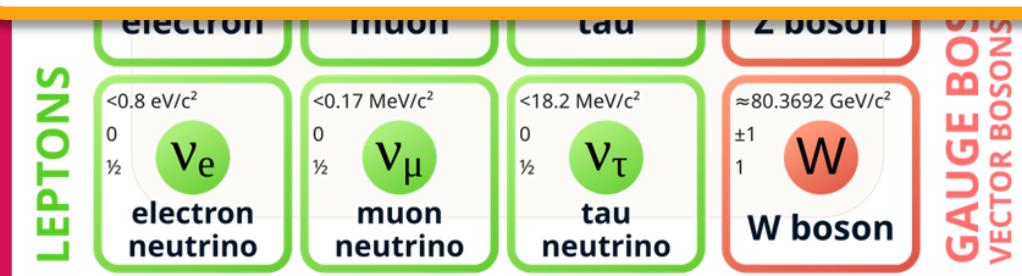
(+ interaction  
gravitationnelle)

# Le modèle standard des particules

## Standard Model of Elementary Particles



Le ‘couplage’  $g$ : forces plus importantes (plus longue portée) et interactions plus probables



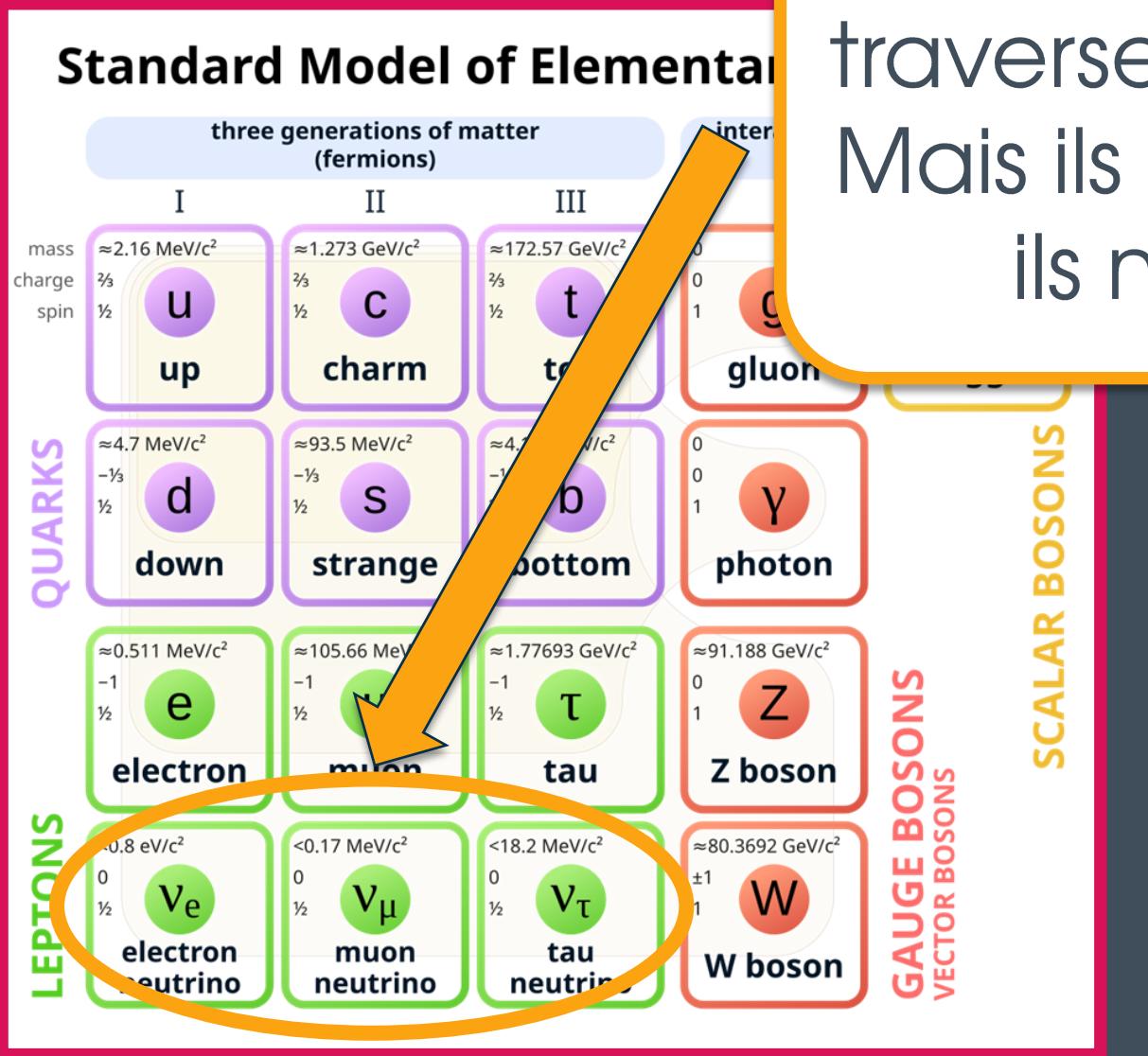
Interaction forte

Interaction électromagnétique

Interaction faible

(interaction gravitationnelle)

# 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 !

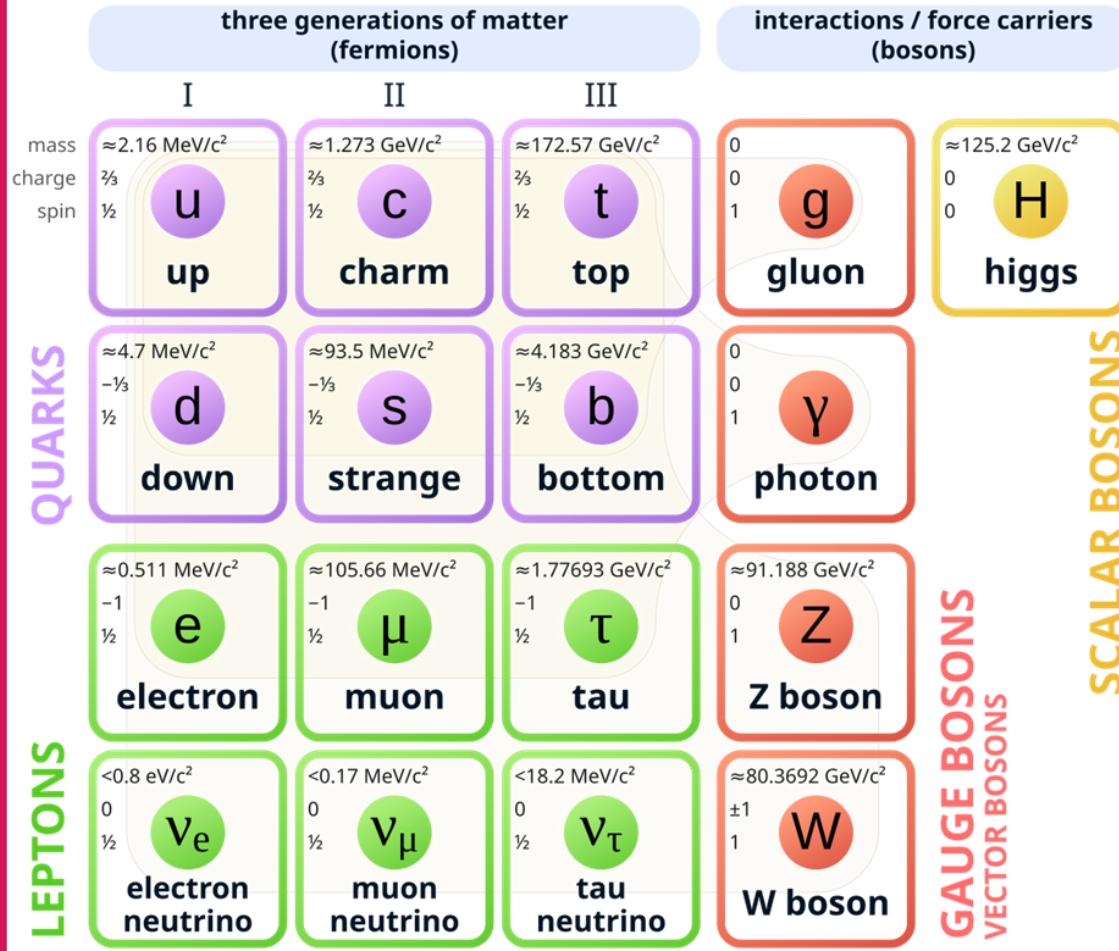
$g \sim 0.01$   
électromagnétique

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

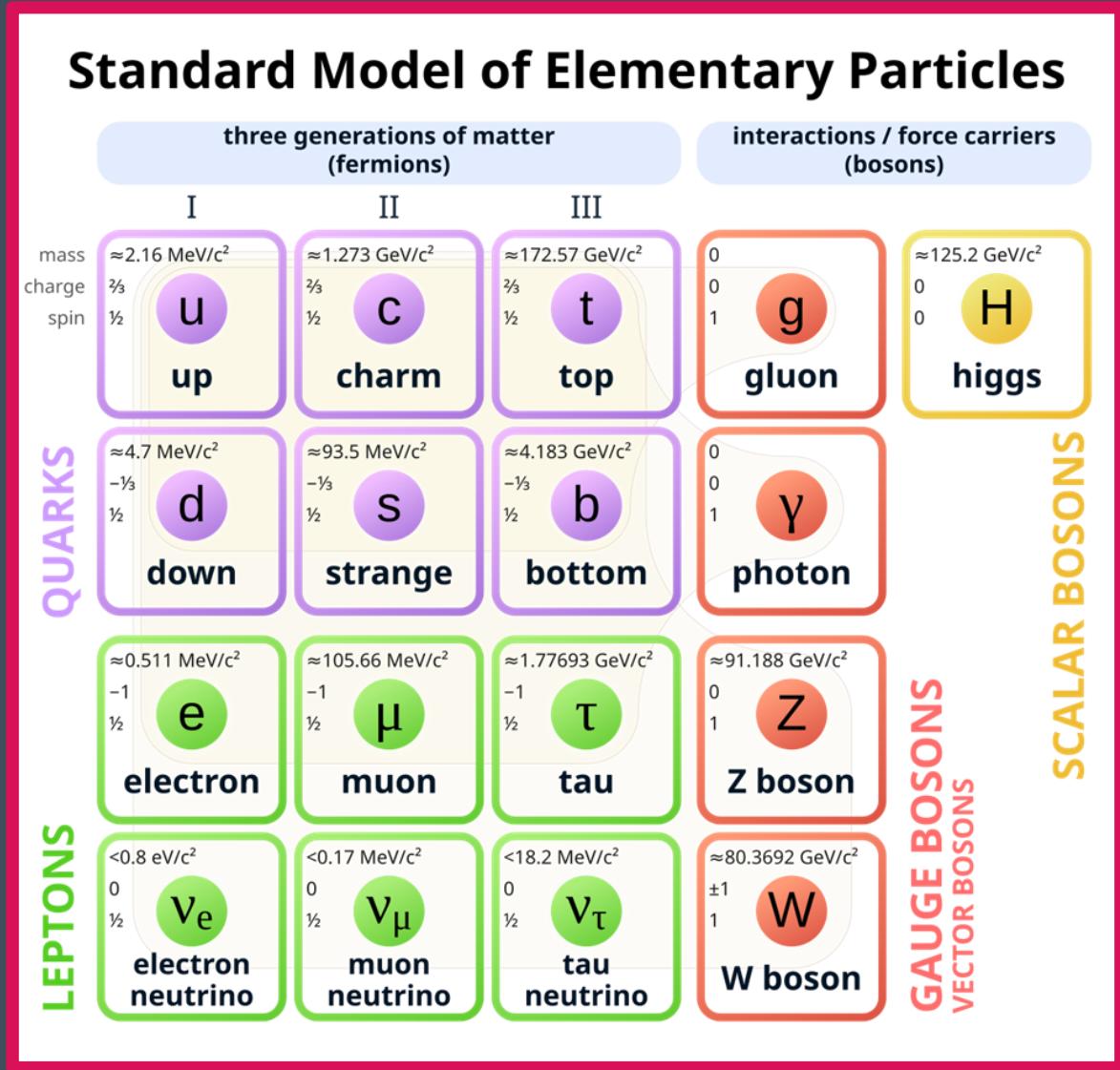
(interaction gravitationnelle)  
 $g \sim 10^{-44}$

# Idée de la matière noire particule

## Standard Model of Elementary Particles



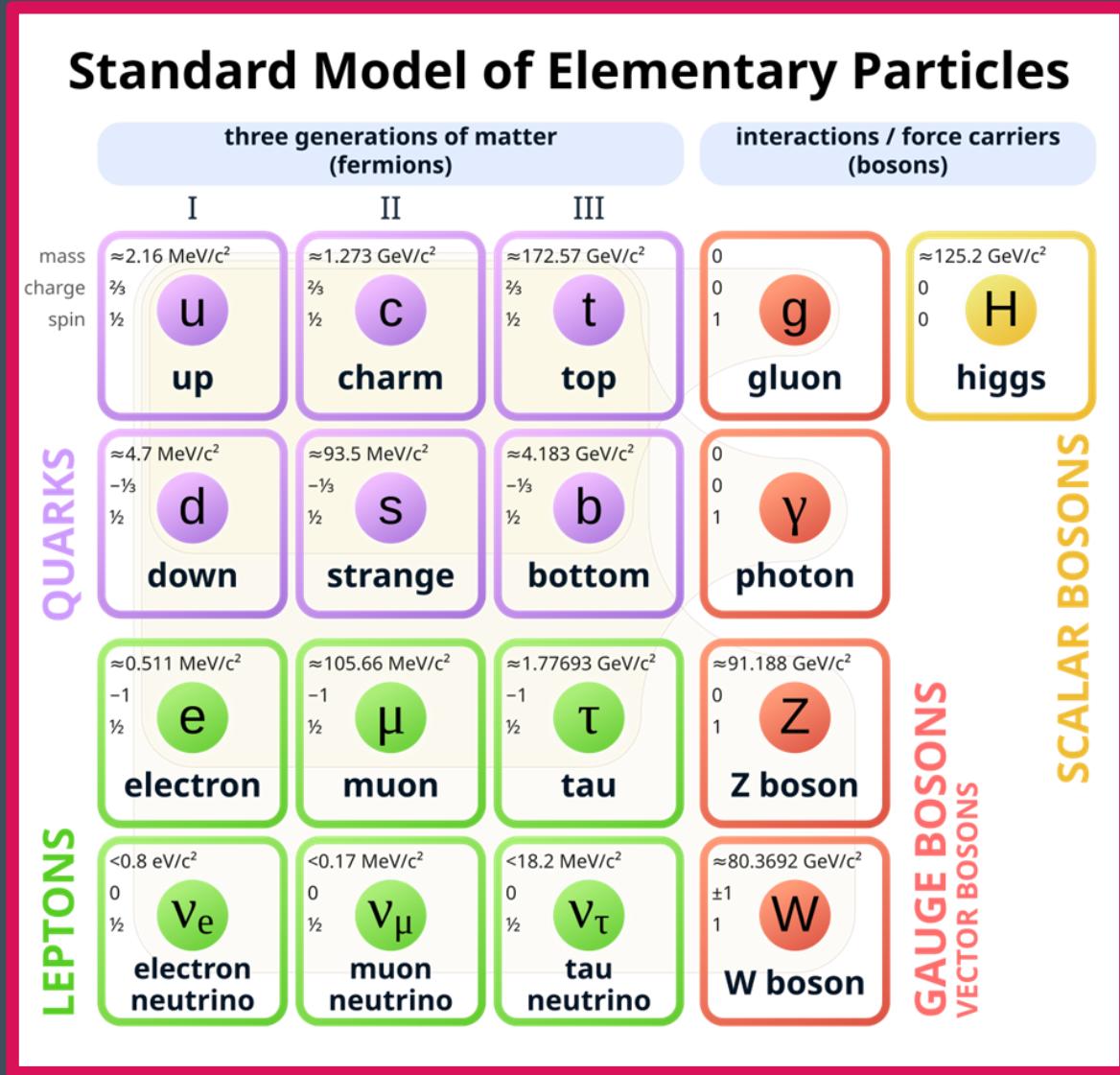
# Idée de la matière noire particule



+



# Idée de la matière noire particule



# Weakly Interacting Massive Particle

---



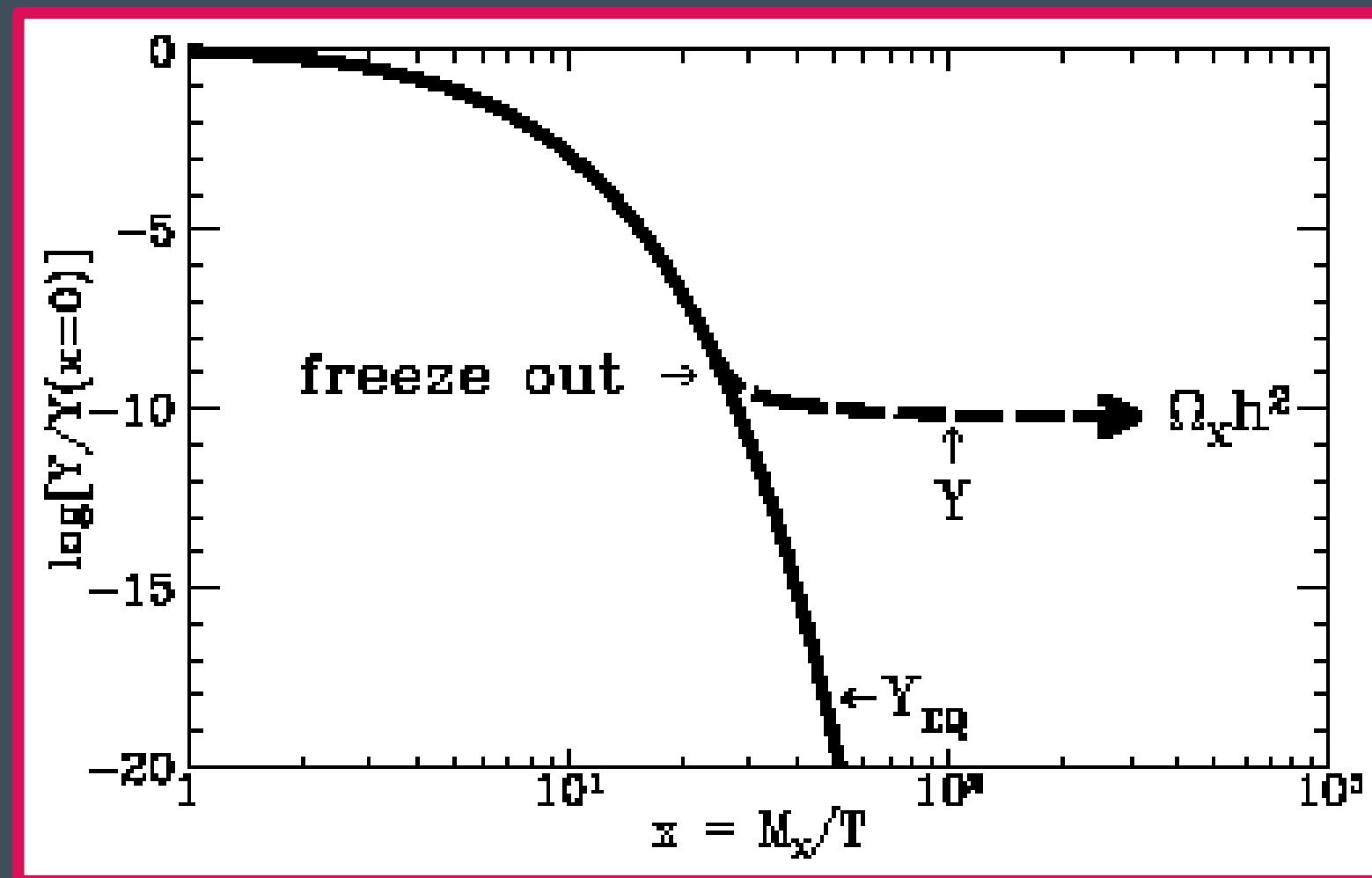
WIMP

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

# Pourquoi le WIMP ?

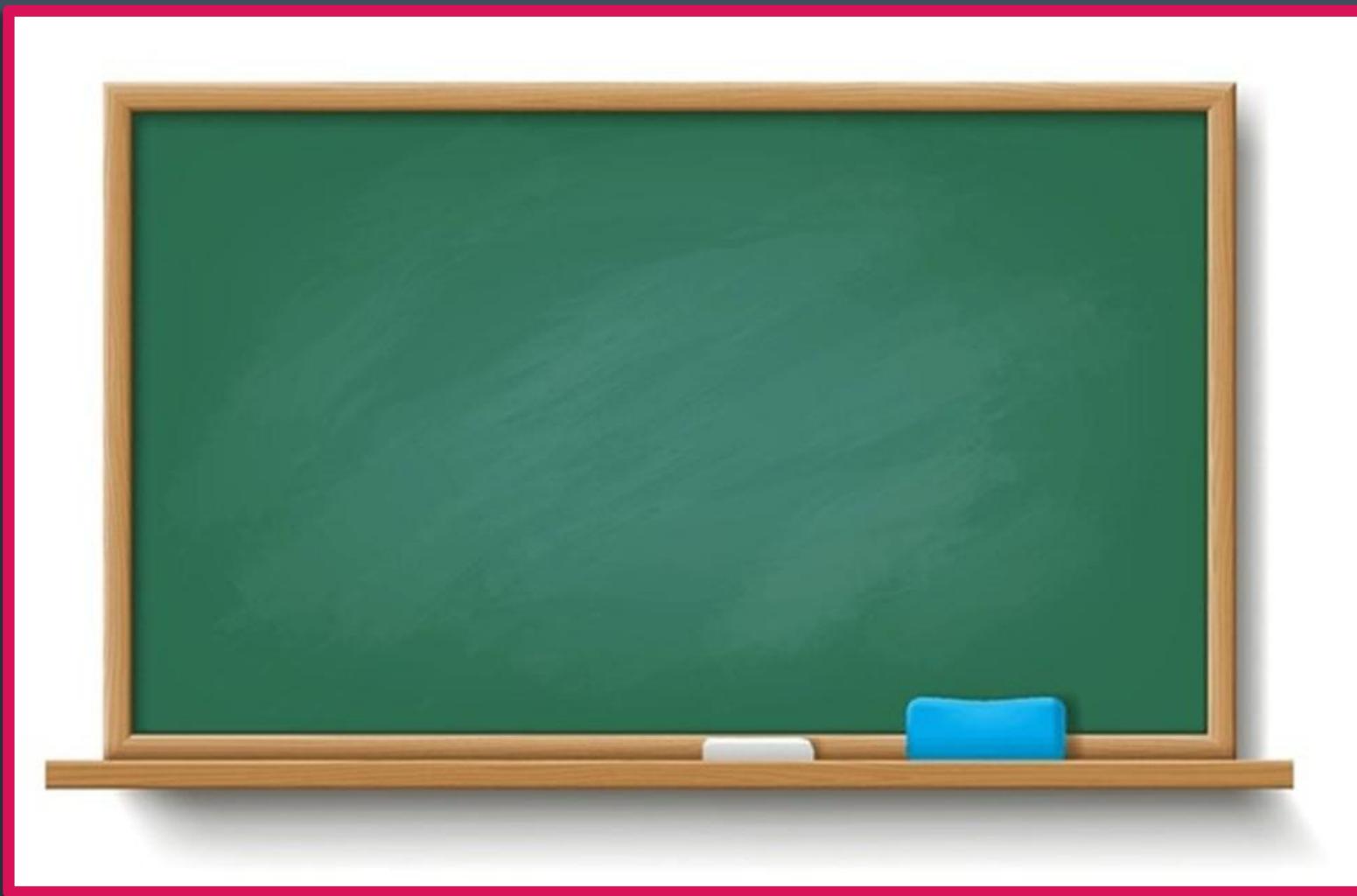
---

# Pourquoi le WIMP ?



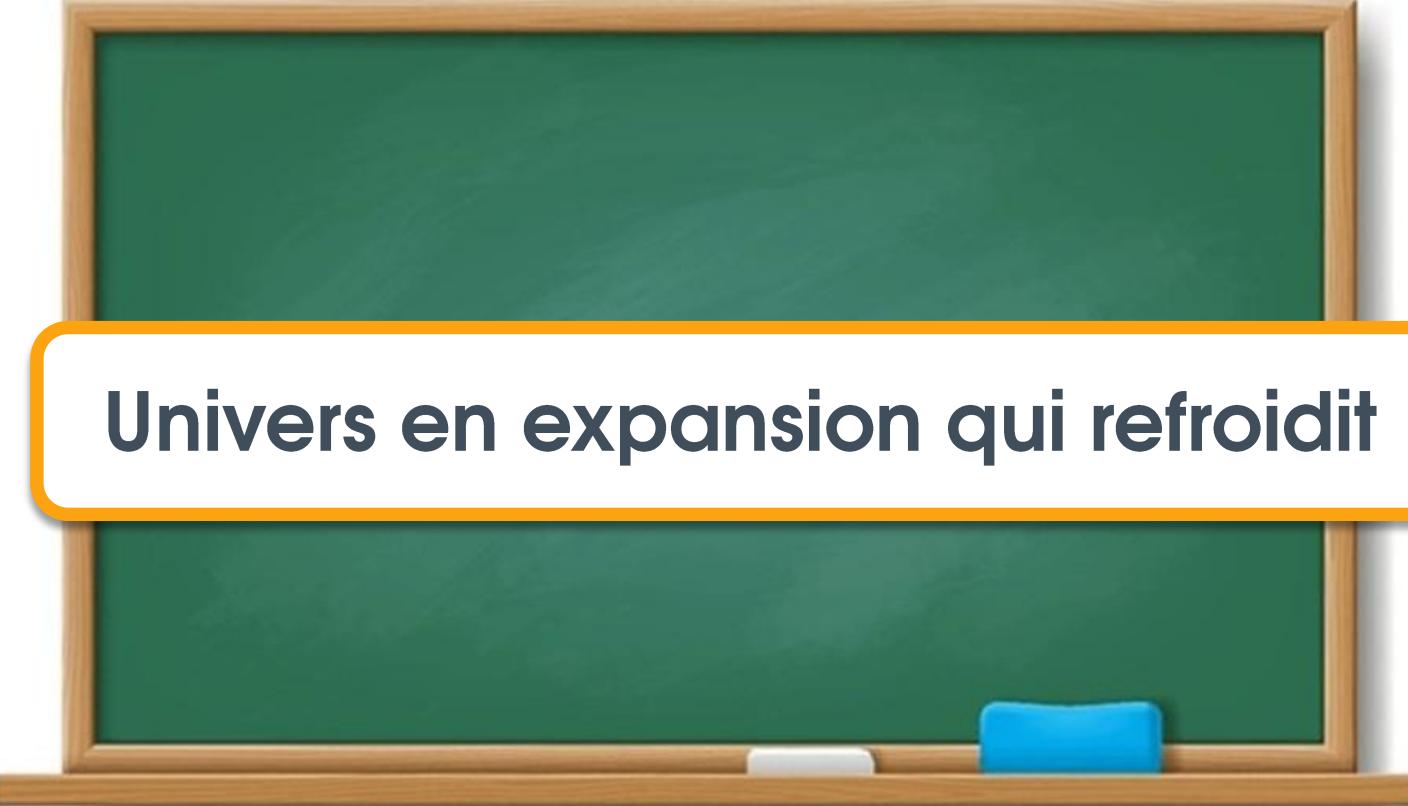
# Pourquoi le WIMP ?

---



# Pourquoi le WIMP ?

---



Univers en expansion qui refroidit

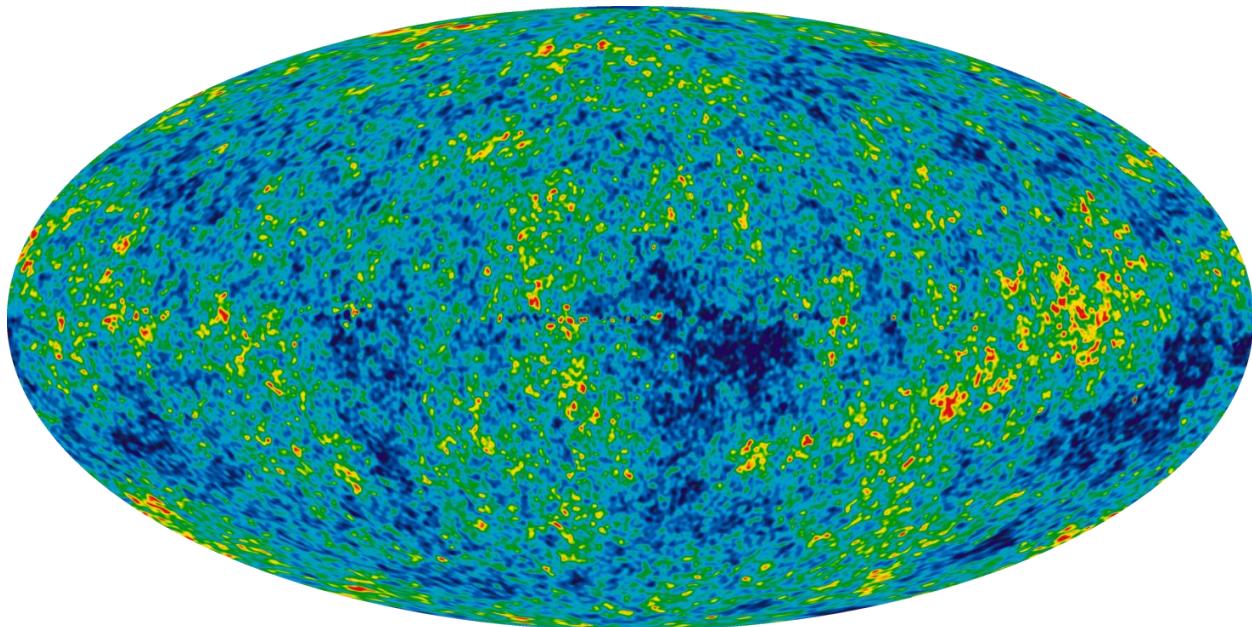
# Pourquoi le WIMP ?

---

- 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)



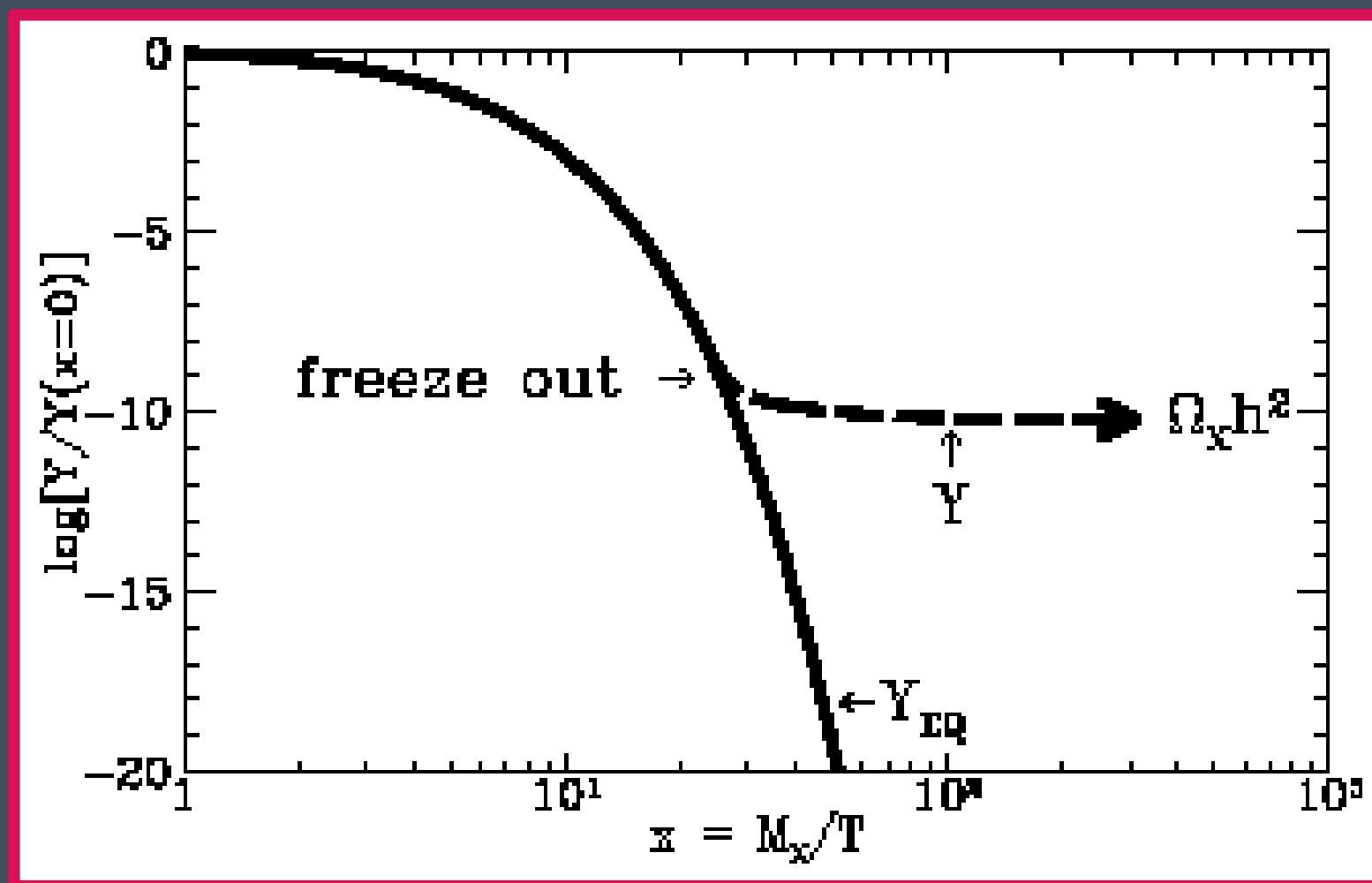
380 000 ans après le Big Bang

# Pourquoi le WIMP ?

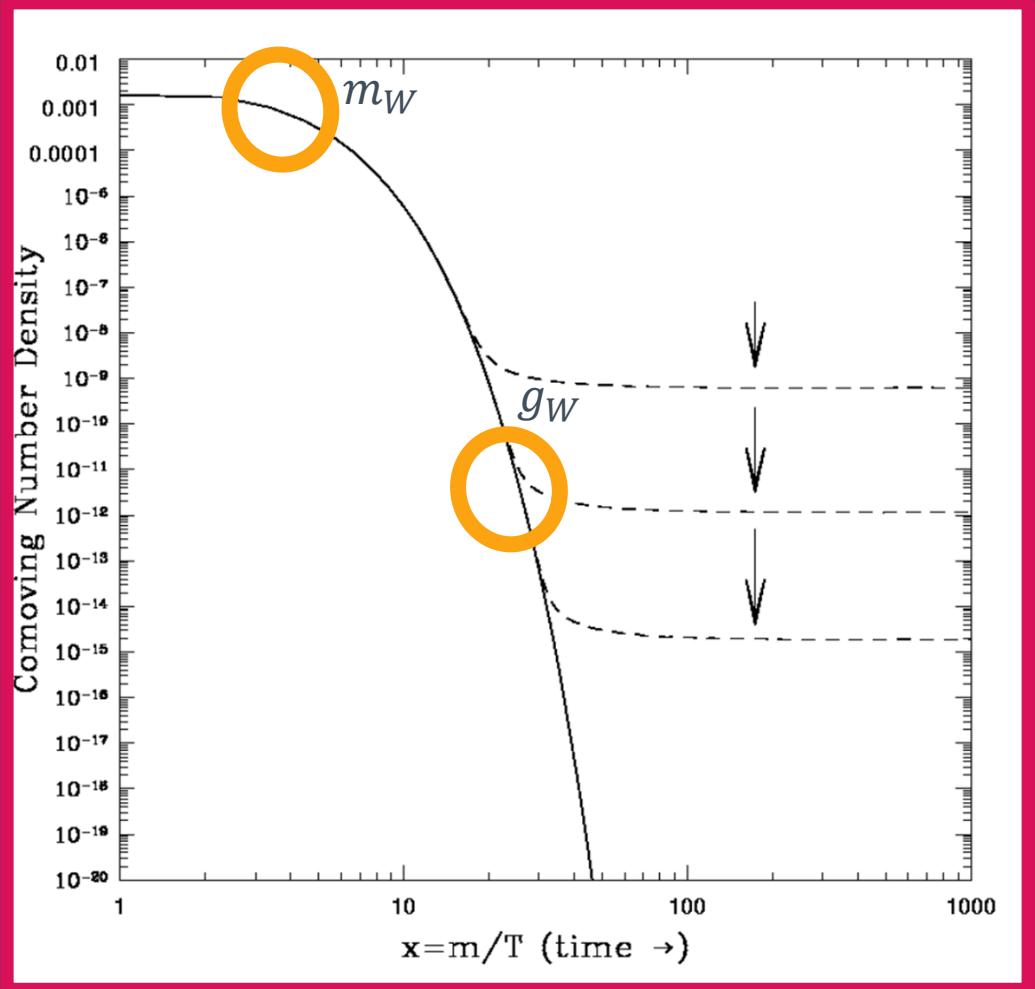
---

- 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 ?

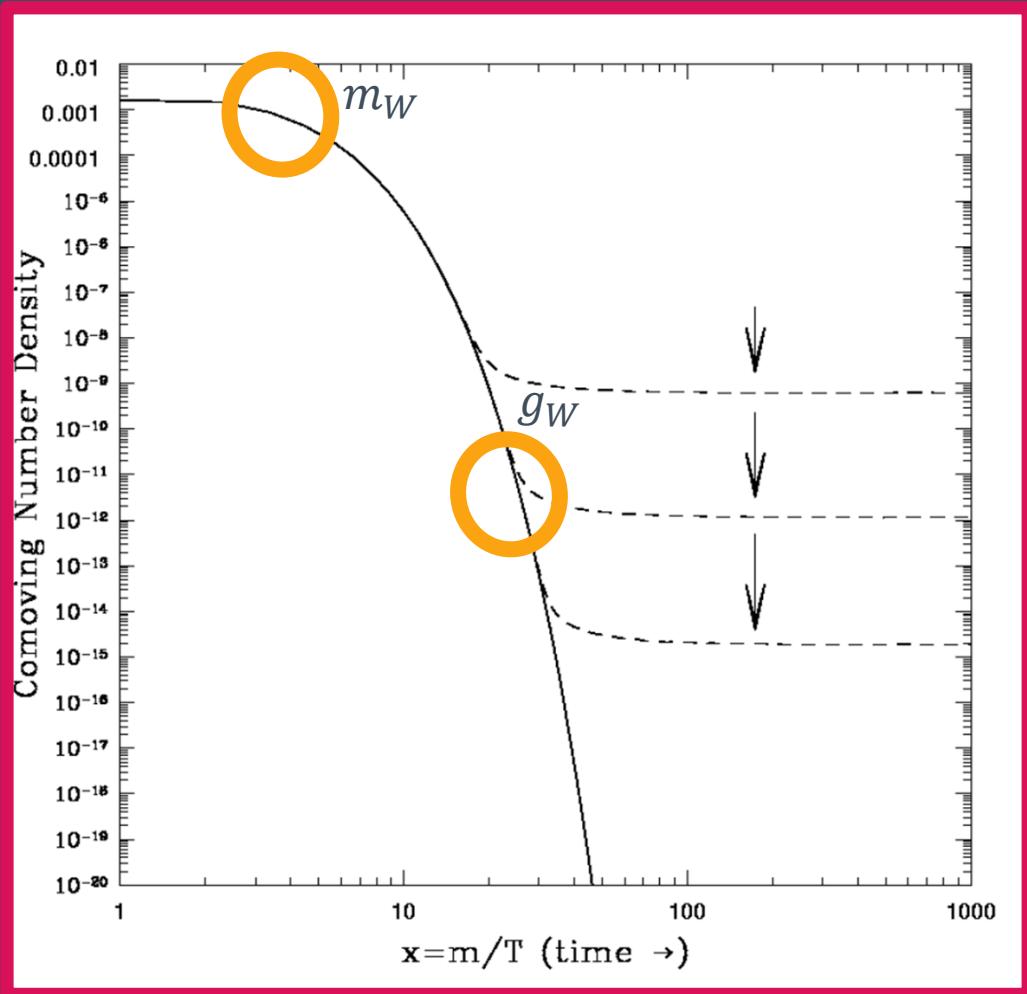


# WIMP MIRACLE



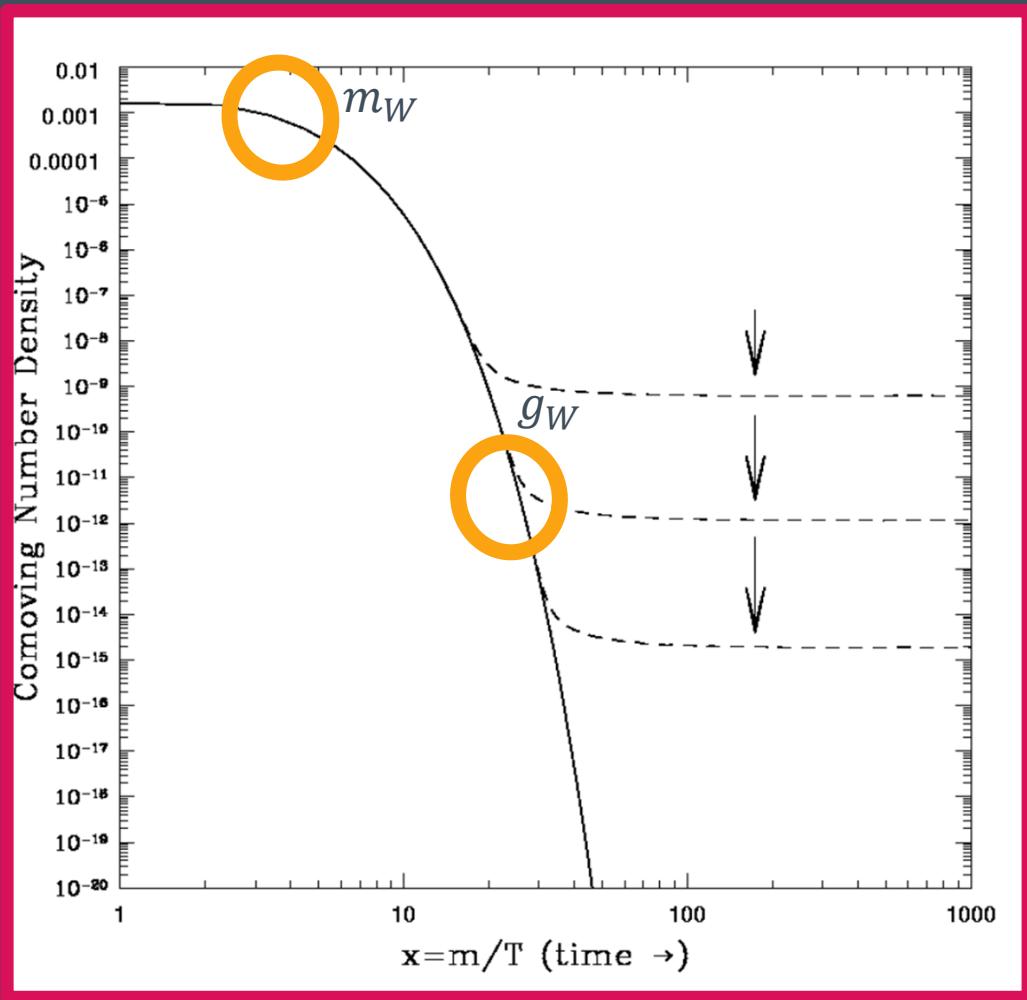
Dépendance en 2 paramètres: la masse du WIMP et son couplage

# WIMP MIRACLE

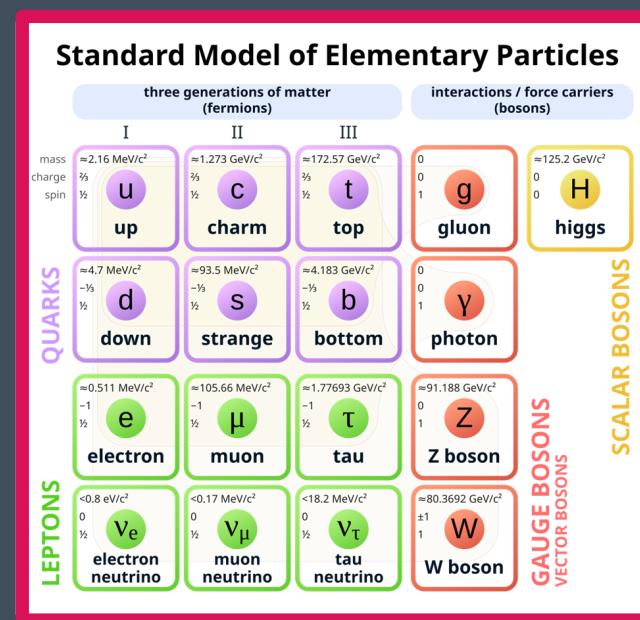


Choix de  $g \sim 10^{-6}$  et  
 $m \sim 1000$  GeV  
(comme l'interaction faible !)

# WIMP MIRACLE

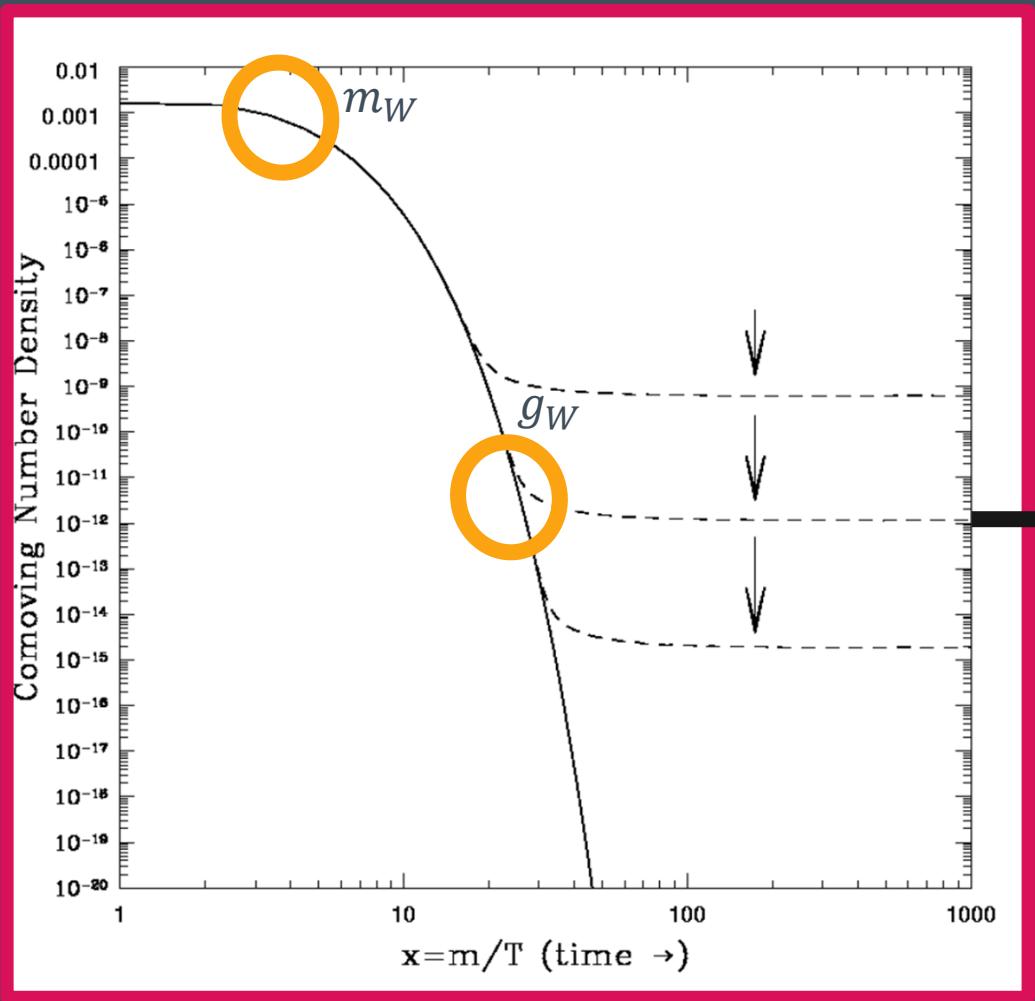


Choix de  $g \sim 10^{-6}$  et  
 $m \sim 1000 \text{ GeV}$   
(comme l'interaction faible !)

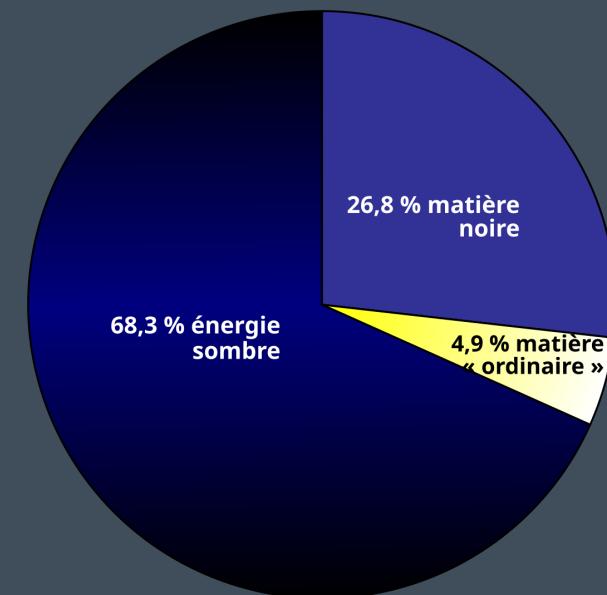


Interaction faible:  
 $g \sim 10^{-6}$

# WIMP MIRACLE



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

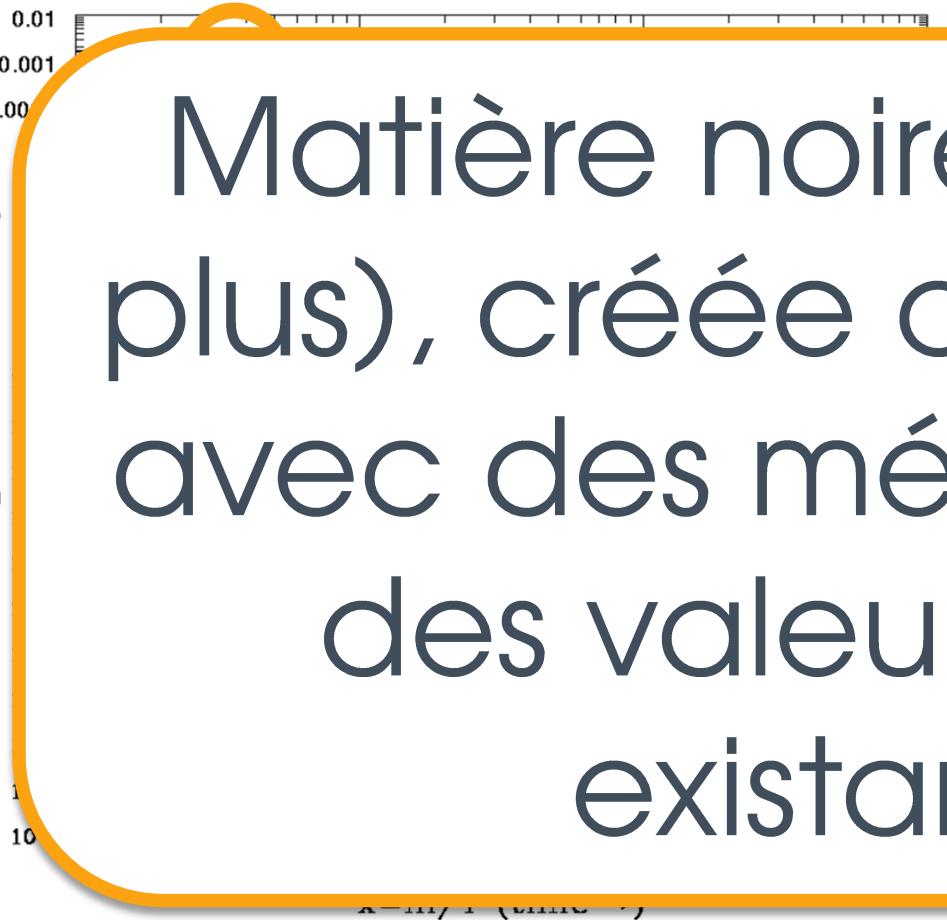


# WIMP MIRACLE

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 !

Comoving Number Density



# Weakly Interacting Massive Particle

## PHYSICAL REVIEW LETTERS

---

---

VOLUME 39

25 JULY 1977

NUMBER 4

---

---

### Cosmological Lower Bound on Heavy-Neutrino Masses

Benjamin W. Lee<sup>(a)</sup>

*Fermi National Accelerator Laboratory,<sup>(b)</sup> Batavia, Illinois 60510*

and

Steven Weinberg<sup>(c)</sup>

*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  $2 \times 10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>, the lepton mass would have to be *greater* than a lower bound of the order of 2 GeV.

# Weakly Interacting Massive Particle

PHYSICAL REVIEW

LETTERS

## Motivation pour le LHC (grand collisionneur de hadrons)

Steven Weinberg<sup>(c)</sup>  
*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  $2 \times 10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>, the lepton mass would have to be *greater* than a lower bound of the order of 2 GeV.

# Weakly Interacting Massive Particle

PHYSICAL REVIEW

LETTERS

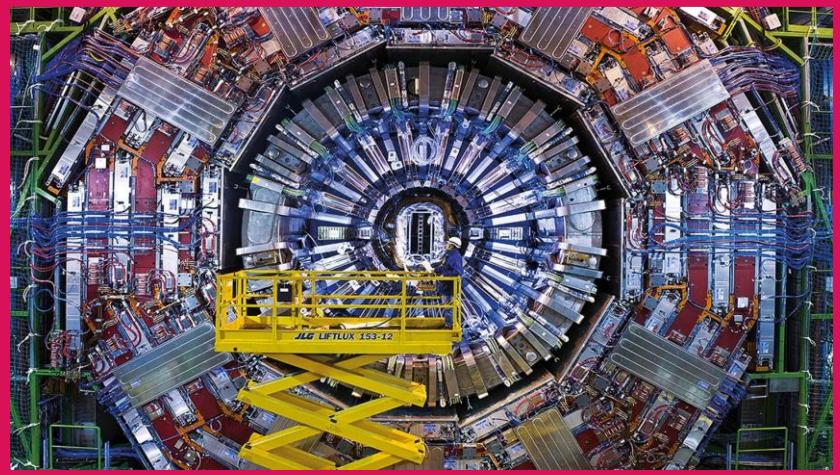
## Motivation pour le LHC (grand collisionneur de hadrons)

Steven Weinberg<sup>(c)</sup>

*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  $2 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ , the mass of the lepton must be less than about 2 GeV.

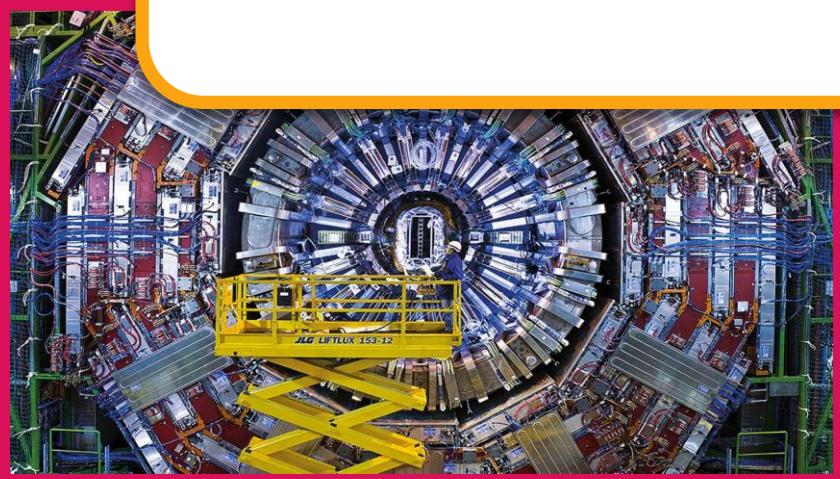


# Weakly Interacting Massive Particle

PHYSICAL REVIEW  
LETTERS

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

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

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

# Pourquoi l'Axion ?

## Strong CP problem

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

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

Standard Model of Elementary Particles		
three generations of matter (fermions)		
I	II	III
mass charge spin $\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	mass charge spin $\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	mass charge spin $\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
mass charge spin $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	mass charge spin $\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	mass charge spin $\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
mass charge spin $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ e electron	mass charge spin $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ $\mu$ muon	mass charge spin $\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ $\tau$ tau
mass charge spin $< 0.8 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_e$ electron neutrino	mass charge spin $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\mu$ muon neutrino	mass charge spin $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\tau$ tau neutrino
interactions / force carriers (bosons)		
0 0 1 g gluon	0 0 1 H higgs	0 0 1 $\gamma$ photon
QUARKS		
LEPTONS		
SCALAR BOSONS		
GAUGE BOSONS		
VECTOR 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)			
I	II	III	
mass charge spin u up	≈2.16 MeV/c² 2/3 1/2	≈1.273 GeV/c² 2/3 1/2	≈172.57 GeV/c² 2/3 1/2
d down	≈4.7 MeV/c² -1/3 1/2	≈93.5 MeV/c² -1/3 1/2	≈4.183 GeV/c² -1/3 1/2
s strange			
b bottom			
e electron	≈0.511 MeV/c² -1 1/2	≈105.66 MeV/c² -1 1/2	≈1.77693 GeV/c² -1 1/2
v <sub>e</sub> electron neutrino	<0.8 eV/c² 0 1/2	<0.17 MeV/c² 0 1/2	<18.2 MeV/c² 0 1/2
v <sub>μ</sub> muon neutrino			
v <sub>τ</sub> tau neutrino			
g gluon	0 0 1	0 0 1	≈125.2 GeV/c² 0 0 1
h higgs			
interactions / force carriers (bosons)			
QUARKS			
LEPTONS			
SCALAR BOSONS			
GAUGE BOSONS			
VECTOR BOSONS			

Axion

# Pourquoi l'Axion ?

## Strong CP problem

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

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

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

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

Standard Model of Elementary Particles			
three generations of matter (fermions)			
	interactions / force carriers (bosons)		
I	mass ≈2.16 MeV/c <sup>2</sup> charge 2/3 spin 1/2 u up	II mass ≈1.273 GeV/c <sup>2</sup> charge 2/3 spin 1/2 c charm	III mass ≈172.57 GeV/c <sup>2</sup> charge 2/3 spin 1/2 t top
	≈4.7 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 d down	≈93.5 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 s strange	≈4.183 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 b bottom
	≈0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 e electron	≈105.66 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 μ muon	≈1.77693 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 τ tau
	<0.8 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>e</sub> electron neutrino	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>μ</sub> muon neutrino	<18.2 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>τ</sub> tau neutrino
			≈91.188 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 Z Z boson
			≈80.3692 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 W W boson
QUARKS			
LEPTONS			
SCALAR BOSONS			
GAUGE BOSONS			
VECTOR BOSONS			

Axion

# Pourquoi l'Axion ?

## Strong CP problem

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

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

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

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

Standard Model of Elementary Particles			
three generations of matter (fermions)			
	interactions / force carriers (bosons)		
I	mass ≈2.16 MeV/c <sup>2</sup> charge 2/3 spin 1/2 <b>u</b> up	II mass ≈1.273 GeV/c <sup>2</sup> charge 2/3 spin 1/2 <b>c</b> charm	III mass ≈172.57 GeV/c <sup>2</sup> charge 2/3 spin 1/2 <b>t</b> top
	mass ≈4.7 MeV/c <sup>2</sup> charge -1/3 spin 1/2 <b>d</b> down	mass ≈93.5 MeV/c <sup>2</sup> charge -1/3 spin 1/2 <b>s</b> strange	mass ≈4.183 GeV/c <sup>2</sup> charge -1/3 spin 1/2 <b>b</b> bottom
	mass ≈0.511 MeV/c <sup>2</sup> charge -1 spin 1/2 <b>e</b> electron	mass ≈105.66 MeV/c <sup>2</sup> charge -1 spin 1/2 <b>μ</b> muon	mass ≈1.77693 GeV/c <sup>2</sup> charge -1 spin 1/2 <b>τ</b> tau
	mass <0.8 eV/c <sup>2</sup> charge 0 spin 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	mass <0.17 MeV/c <sup>2</sup> charge 0 spin 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	mass <18.2 MeV/c <sup>2</sup> charge 0 spin 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino
			mass ≈91.188 GeV/c <sup>2</sup> charge 0 spin 1 <b>Z</b> Z boson
			mass ≈80.3692 GeV/c <sup>2</sup> charge ±1 spin 1 <b>W</b> W boson
QUARKS			
LEPTONS			
SCALAR BOSONS			
GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS			

Axion

# Pourquoi l'Axion ?

## Strong CP problem

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

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

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

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

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter  
(fermions)

interactions / force carriers  
(bosons)

III	0 0 1	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	t top
II	0 0 1	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$	b bottom
I	0 0 1	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$	$\tau$ tau
	0 0 1	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$	Z Z boson
	0 0 1	$\approx 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\nu_\tau$ tau neutrino
	0 0 1	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$	W W boson

SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

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.

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

# 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.

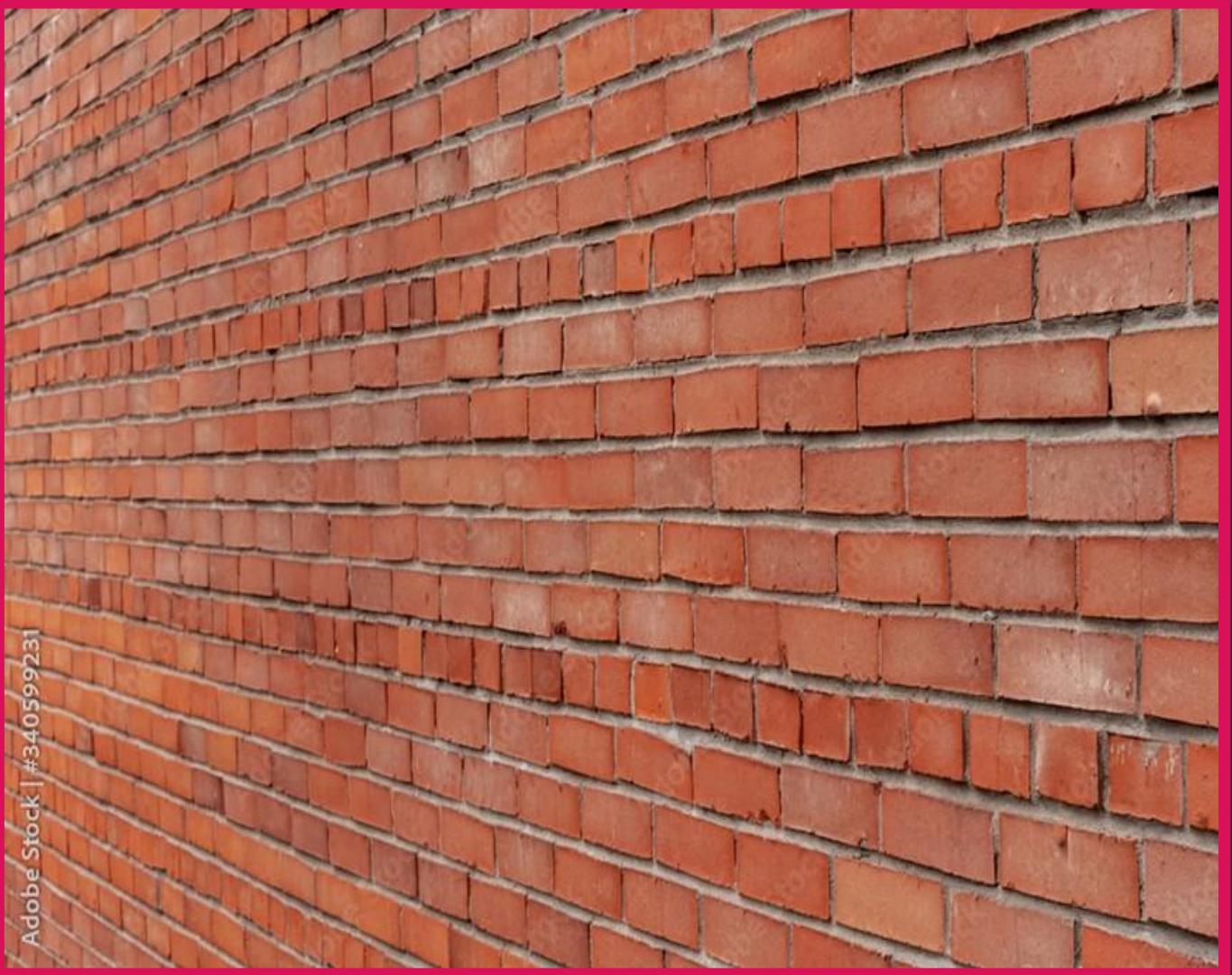
We wish to thank S. Weinberg and J. D. Bjorken  
for useful discussions.

# Pourquoi l'Axion ?

---



# Pourquoi l'Axion ?



Adobe Stock | #340599231

# Pourquoi l'Axion ?



**SPOILER: ça marche pas.**

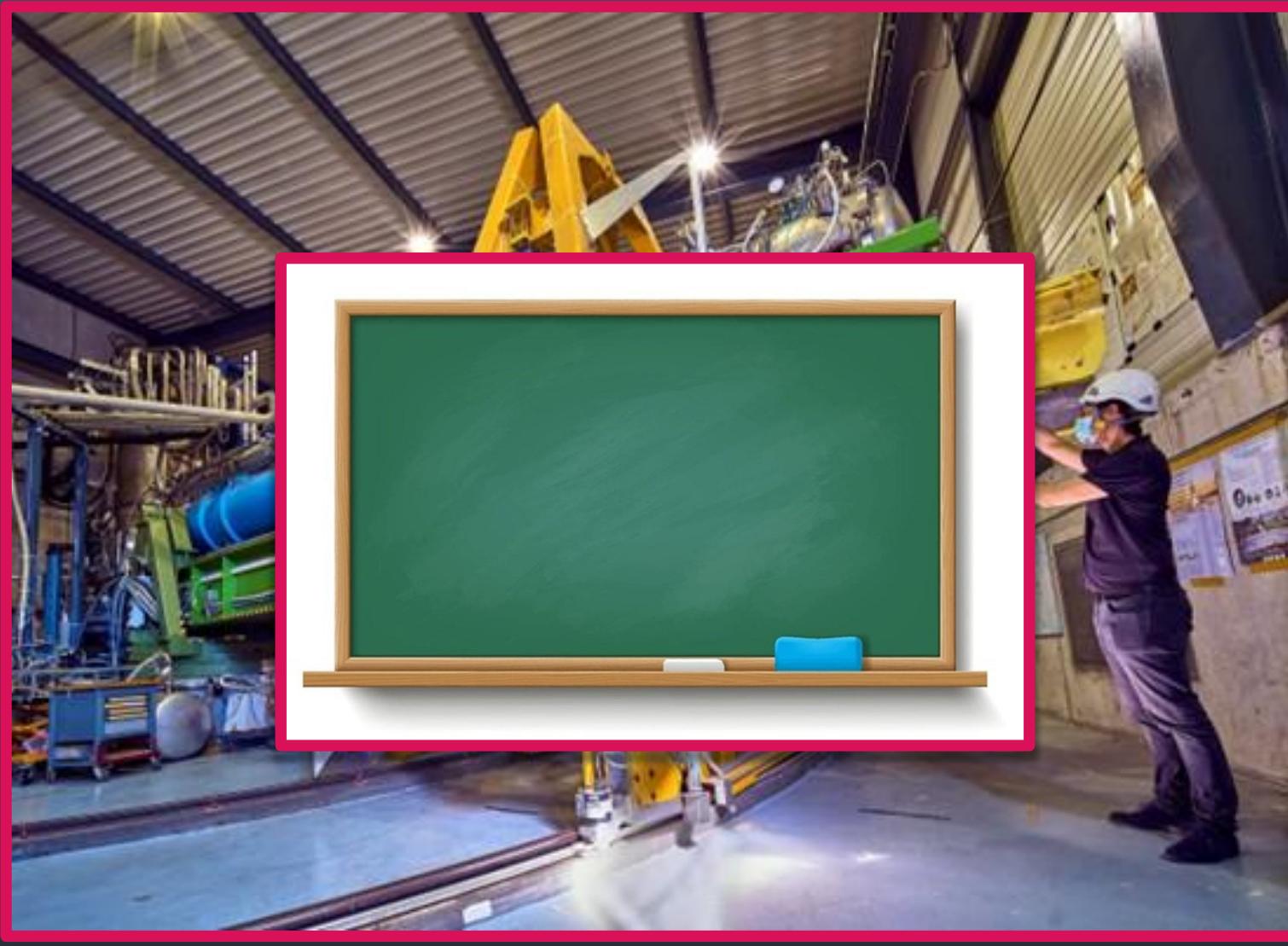


Adobe Stock | #340599

# 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 PACZYŃSKI<sup>1</sup>

Princeton University Observatory

*Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23*

# Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI<sup>1</sup>

Princeton University Observatory

*Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23*



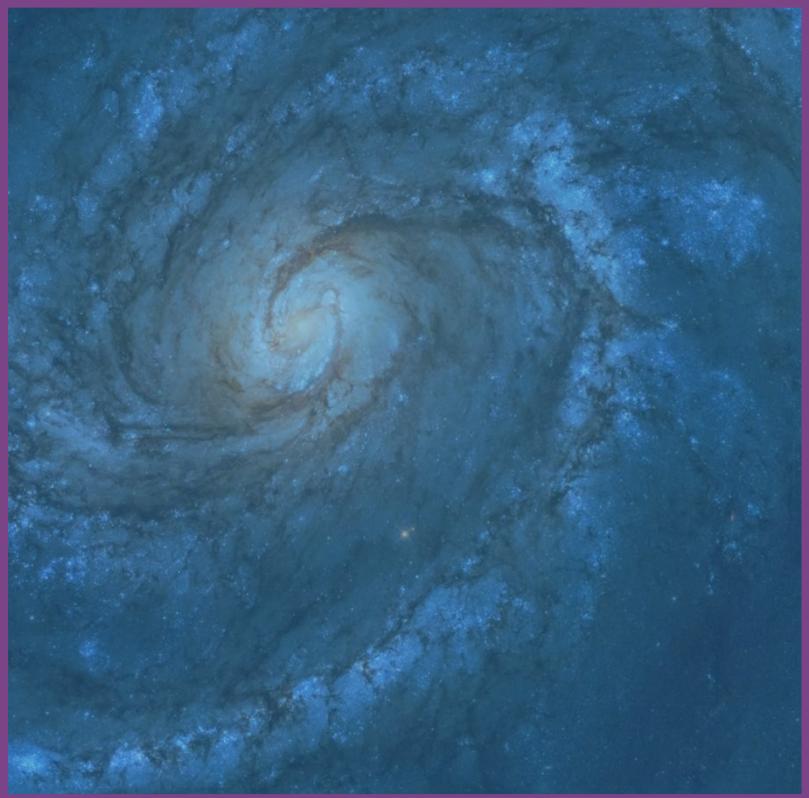
# Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI<sup>1</sup>

Princeton University Observatory

*Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23*



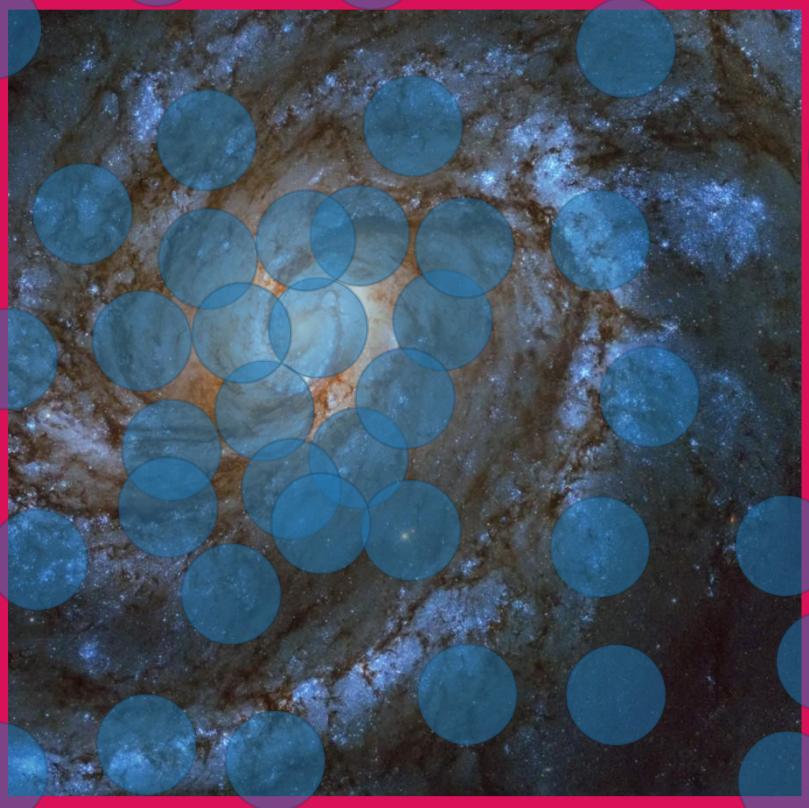
# Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI<sup>1</sup>

Princeton University Observatory

*Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23*



# Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI<sup>1</sup>

Princeton University Observatory

*Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23*



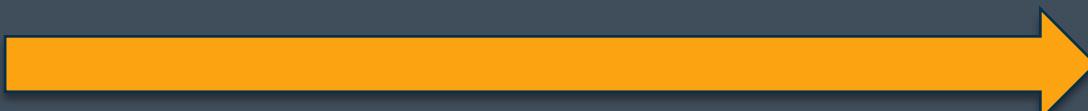
# Massive Compact Halo Object

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI<sup>1</sup>

Princeton University Observatory

*Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23*

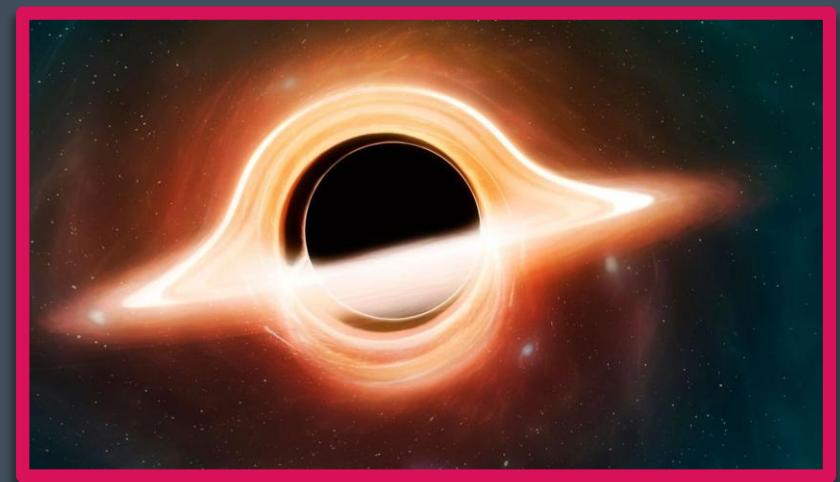


GRAVITATIONALLY COLLAPSED OBJECTS OF VERY  
LOW MASS

*Stephen Hawking*

(Communicated by M. J. Rees)

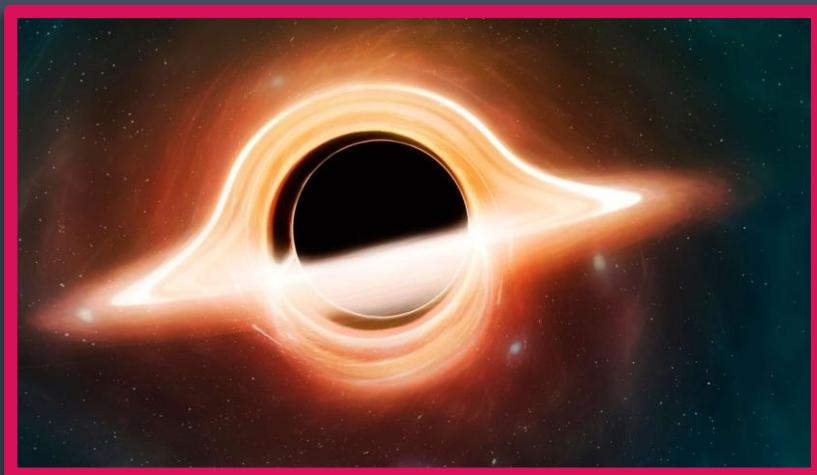
(Received 1970 November 9)



# Trous noirs

---

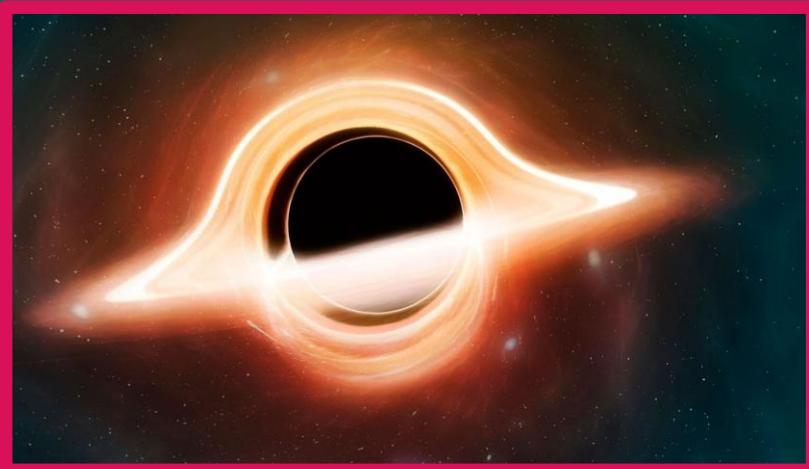
C'est quoi un  
trou noir ?



# Trous noirs

C'est quoi un  
trou noir ?

Trou  
noir

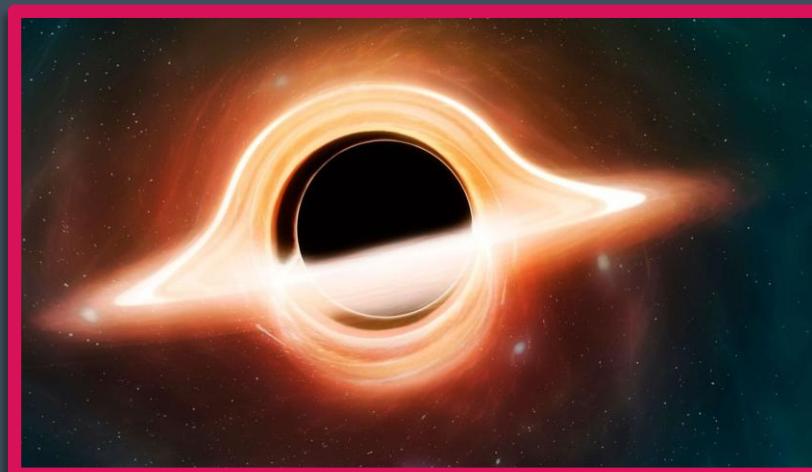


Particule géante,  
stable, n'interagit  
que par la gravité.  
Parfait candidat !

# Trous noirs

---

Comment former  
un trou noir ?



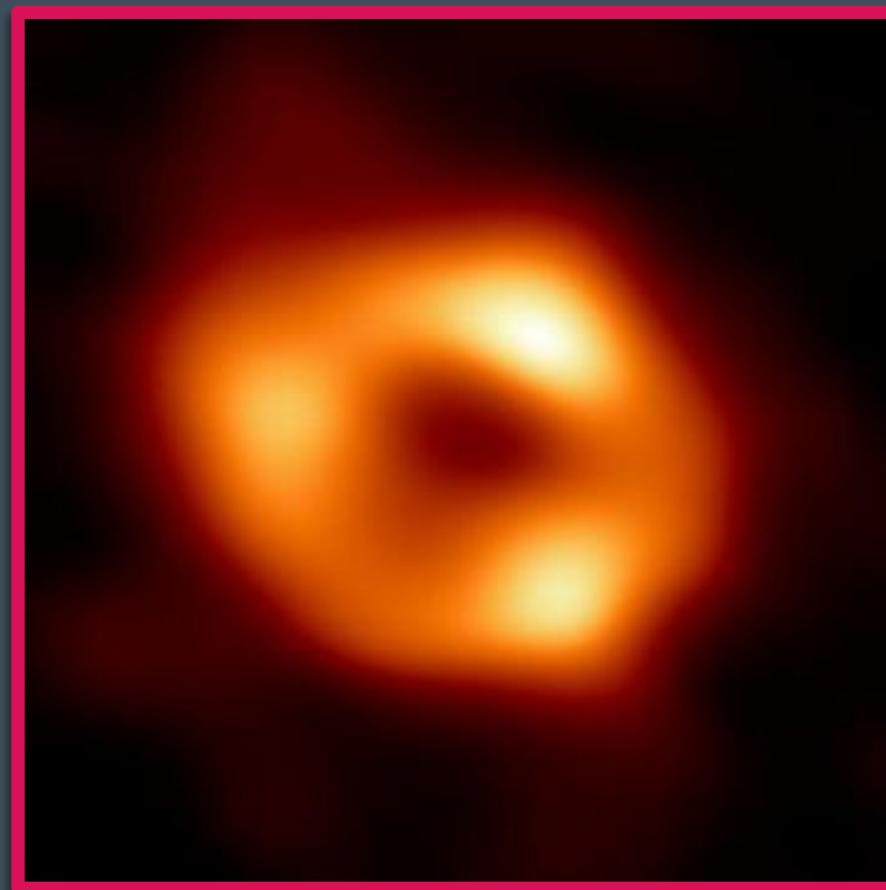
# Trous noirs

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

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 ?

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

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

# 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 HYPOTHESIS<sup>1</sup>

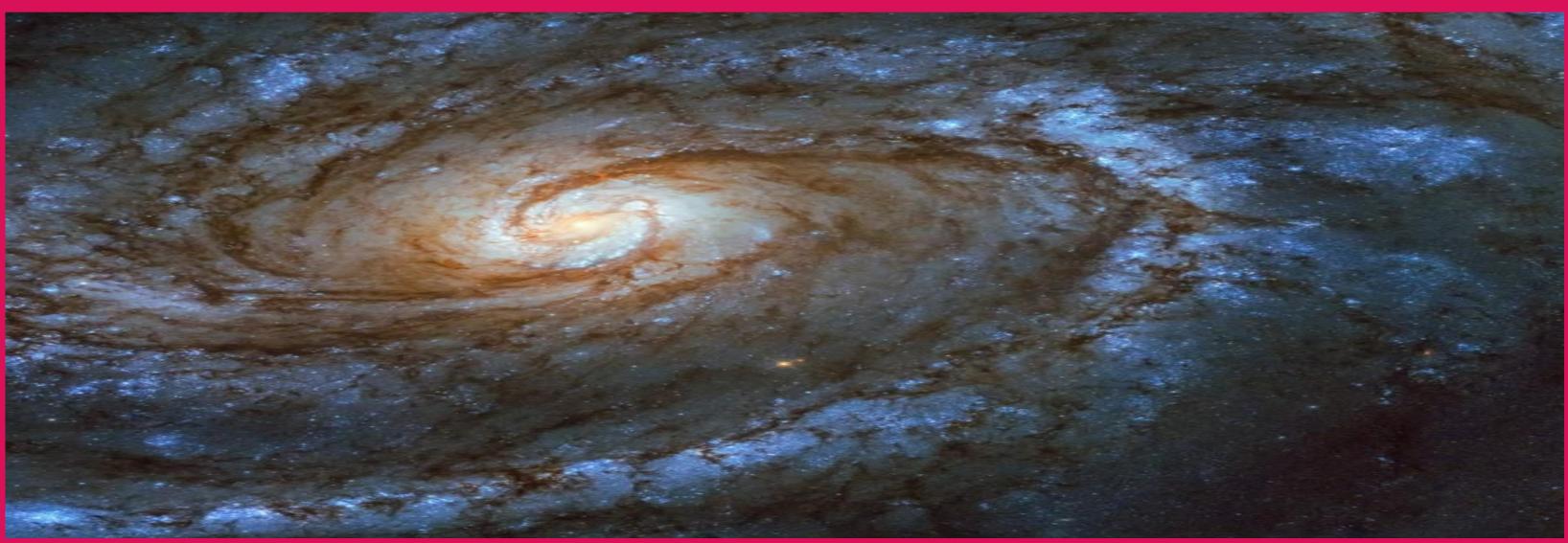
M. MILGROM

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

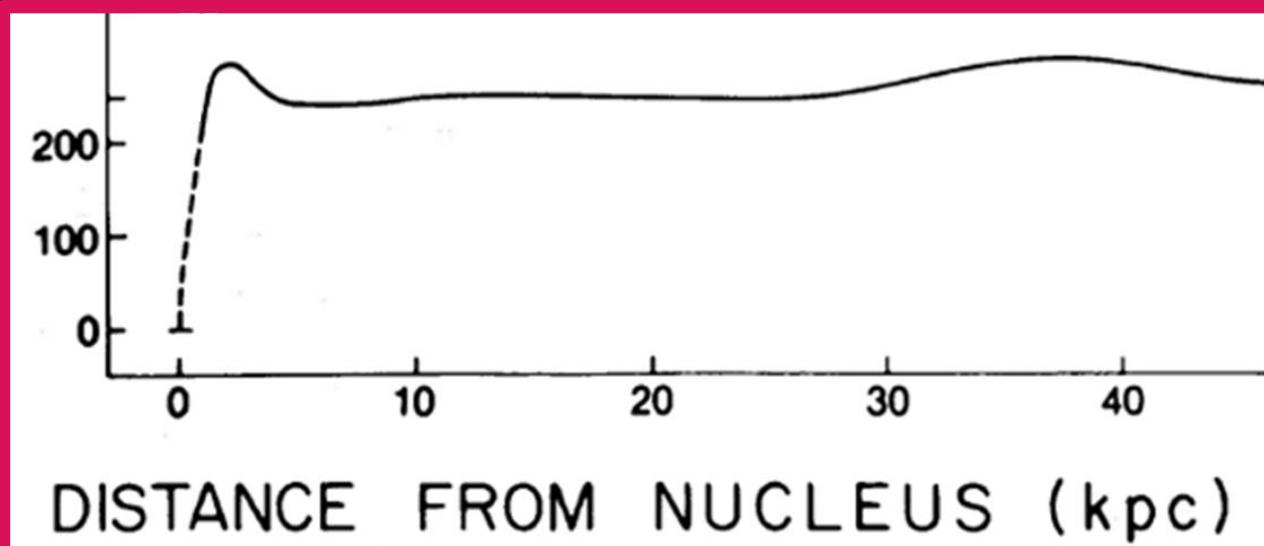
*Received 1982 February 4; accepted 1982 December 28*

seulement à certaines échelles  
pour ne pas créer de problèmes !

# La théorie MOND

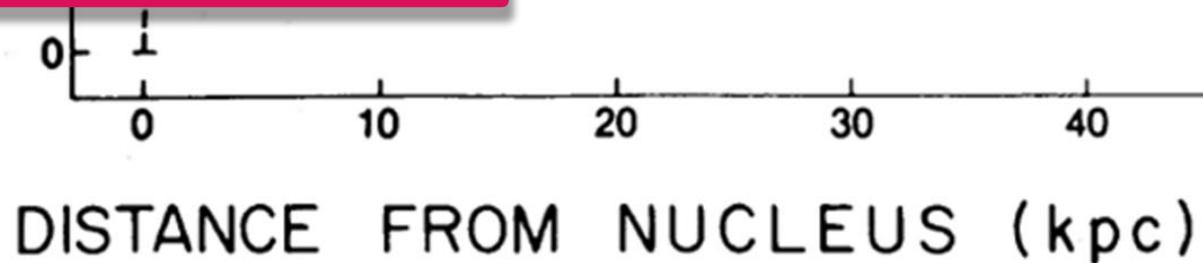
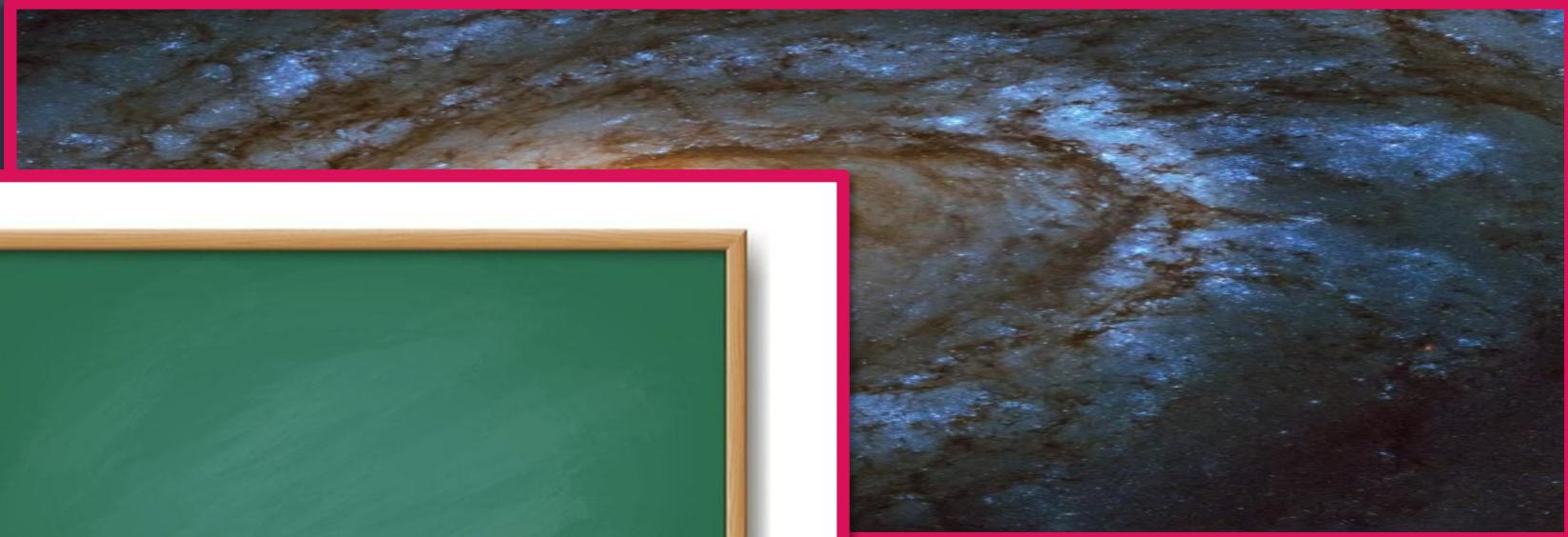


Objectif:

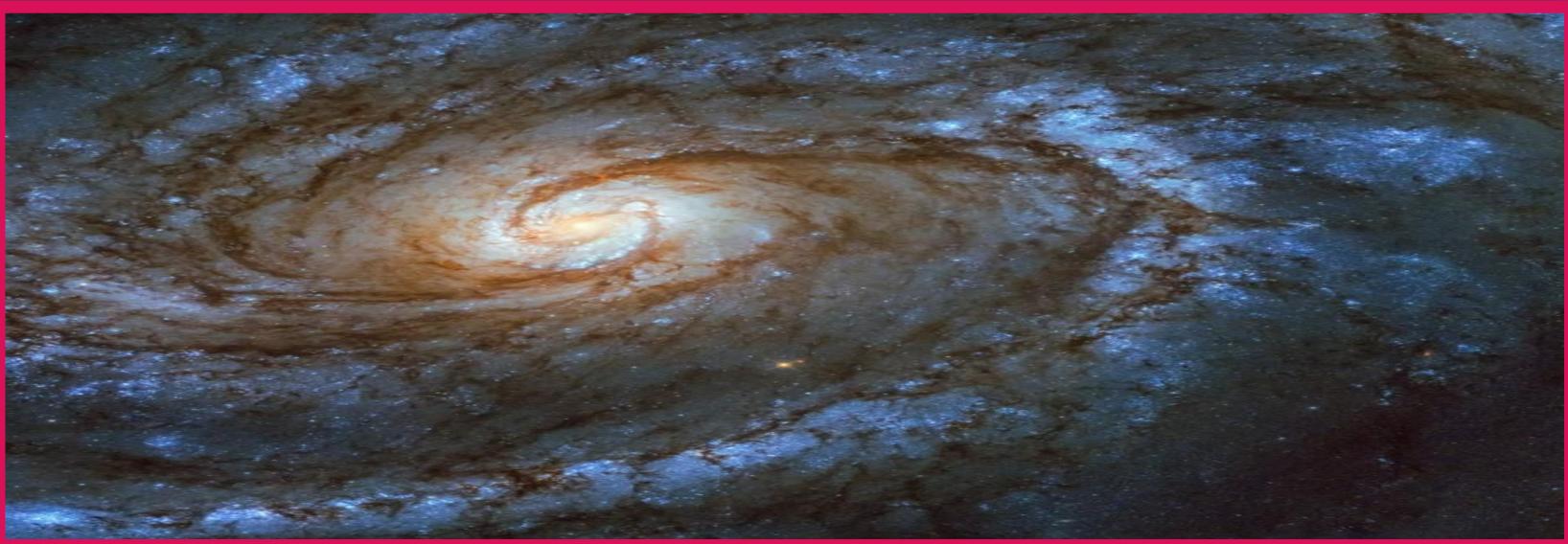


# La théorie MOND

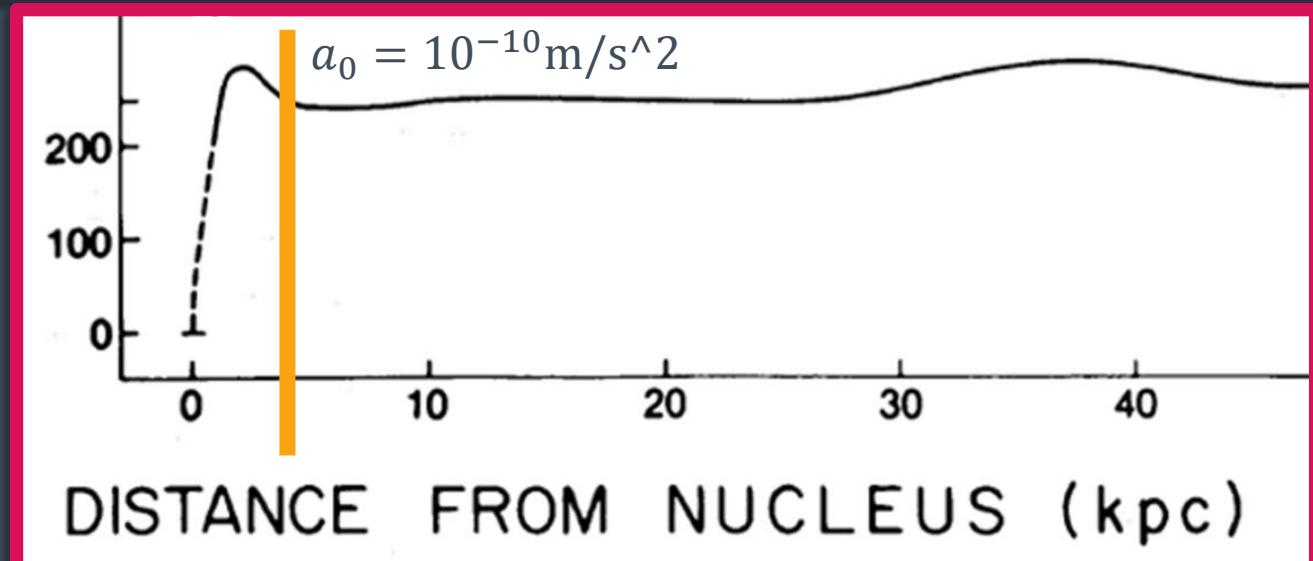
Objectif.



# La théorie MOND



$$\nu = (GMa_0)^{1/4}$$
$$= \text{constante !}$$



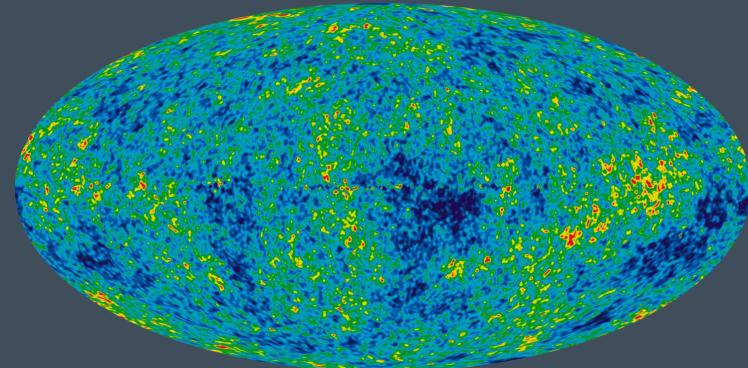
# Problèmes de la théorie

---

# Problèmes de la théorie

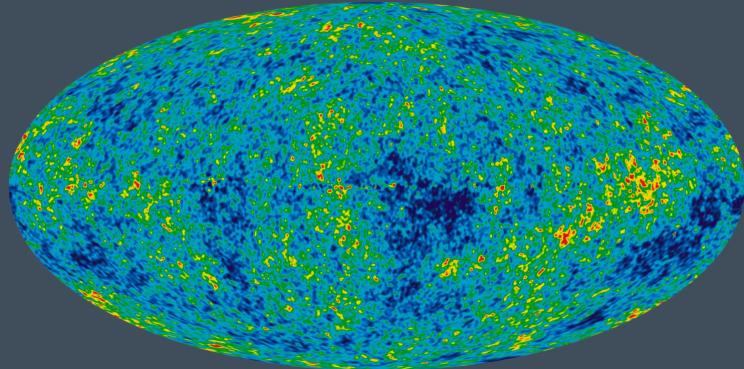
---

- 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



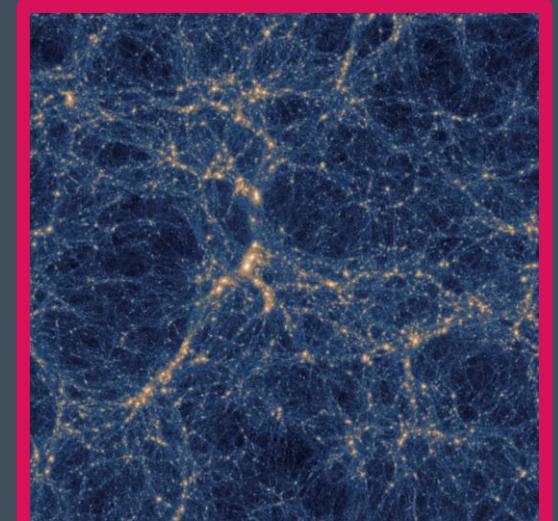
# Conclusions

---

- 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 c  
préo

A dans deux  
semaines...

