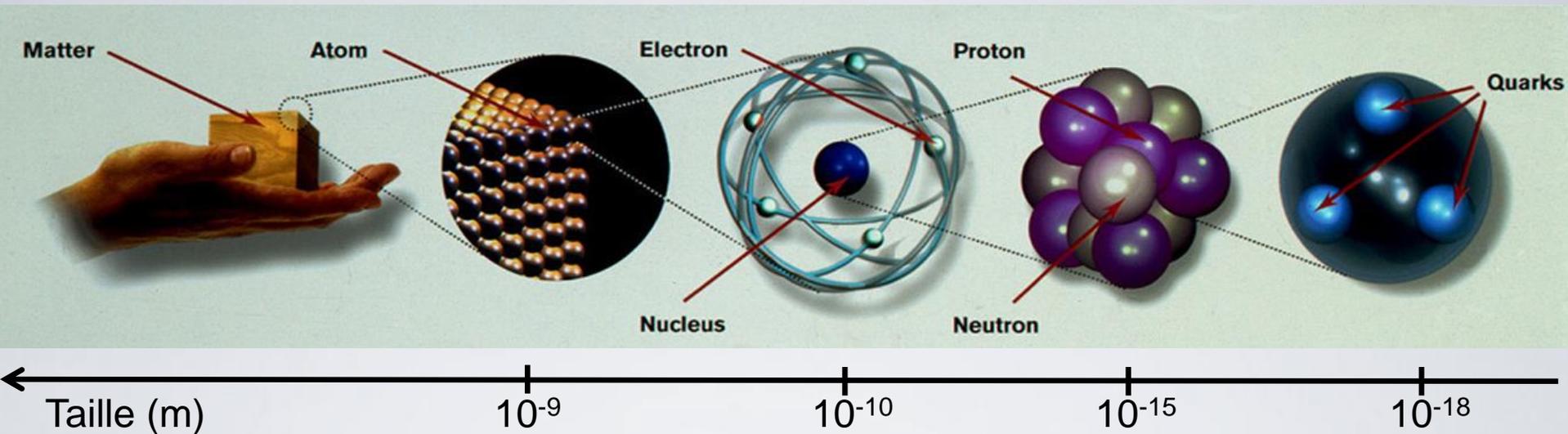


Le modèle standard de la physique des particules et au-delà ...

Des particules élémentaires ?



- ✦ Notion qui varie avec l'époque : dépend des moyens expérimentaux pour les regarder

$$E = h \nu = h c / \lambda \rightarrow E \propto 1/\lambda$$

- ✦ Création de nouvelles particules en faisant des collisions de particules : $E = mc^2$
- ✦ Objets non composites à l'échelle de 10^{-18} m.
- ✦ Masses de l'ordre de 10^{-30} kg.
- ✦ Les électrons et quarks sont des particules élémentaires.

les particules de matière



les particules élémentaires se désintègrent en des particules élémentaires plus légères

la matière ordinaire

matière plus lourde produite dans des collisions à haute énergie



quarks

+2/3



up (1968)



charm (1974)



top (1995)

-1/3



down (1968)



strange (1968)



beauty (1977)

leptons

0



neutrino "e"
(1956)



neutrino "μ"
(1962)



neutrino "τ"
(2000)

-1



électron (1897)



muon (1936)



tau (1974)

charge électrique

1^{ère} famille

2^{ème} famille

3^{ème} famille

et aussi les anti-particules

Pour chaque type de particule élémentaire il existe une particule qui possède les mêmes propriétés et la même masse mais dont la charge électrique est opposée.

12 particules

+2/3	u	c	t
-1/3	d	s	b
0	ν_e	ν_μ	ν_τ
-1	e^-	μ^-	τ^-

charge
électrique

12 anti-particules

	\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}	anti-top t-bar
-2/3				
+1/3	\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}	
0	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	
+1	e^+	μ^+	τ^+	positron

charge
électrique

des particules élémentaires vous traversent !

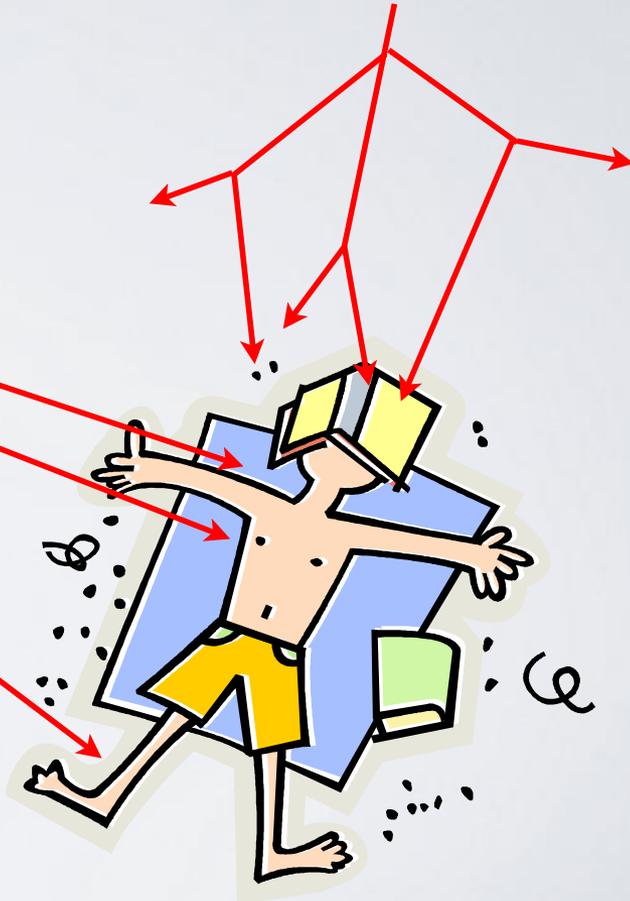
Des neutrinos ν



10^{14} neutrinos du soleil
vous traversent chaque seconde !

Des muons μ

ainsi qu'environ **100 muons** produits
par des rayons cosmiques



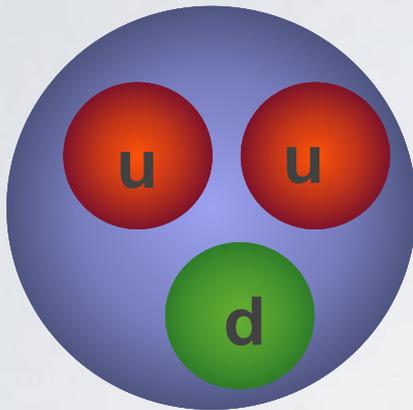
les quarks forment des hadrons

Les quarks ne se promènent jamais seuls.

Ils sont confinés dans des particules, qui ont une charge électrique entière, appelées des **hadrons**.

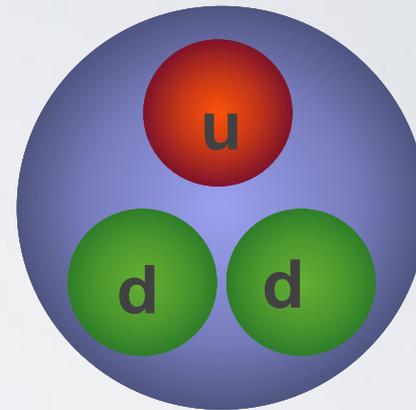
Deux exemples bien connus :

proton (charge +1)



$$u\left(+\frac{2}{3}\right)u\left(+\frac{2}{3}\right)d\left(-\frac{1}{3}\right) = p(+1)$$

neutron (charge 0)



$$u\left(+\frac{2}{3}\right)d\left(-\frac{1}{3}\right)d\left(-\frac{1}{3}\right) = n(0)$$

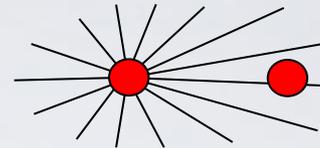
baryons

Ce qui colle les quarks ensemble : une **interaction** (une force).

Comment les particules fondamentales interagissent-elles ?

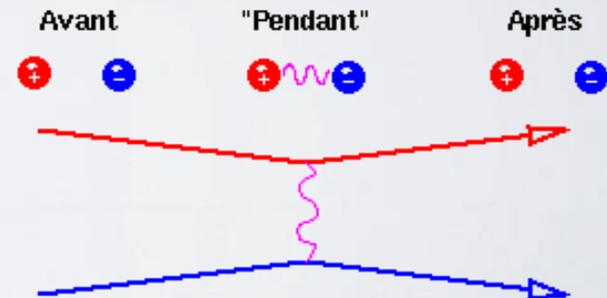
- Vision classique : action instantanée à distance 
La force dépend de la position relative des particules. Mais comment font elles pour « savoir » ?

- Interaction via un champ :



Chaque particule crée un champ dans tout l'espace. Elle interagit avec le champ créé par l'autre particule.

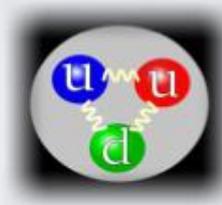
- Théorie quantique : les particules échangent d'autres particules qui sont les messagers de la force. 



les interactions

Toutes les forces observées dans la nature sont dues à **4 interactions fondamentales**.

Ces interactions résultent de l'échange de **particules d'interaction**.



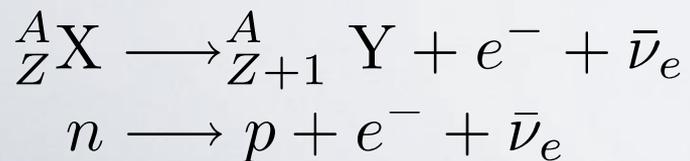
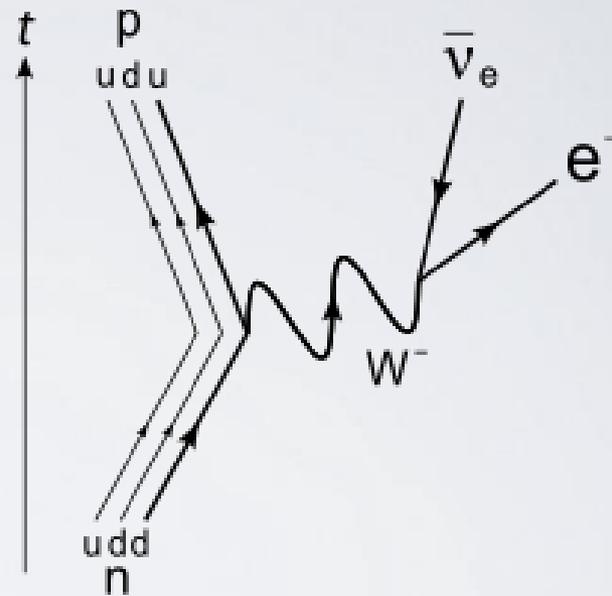
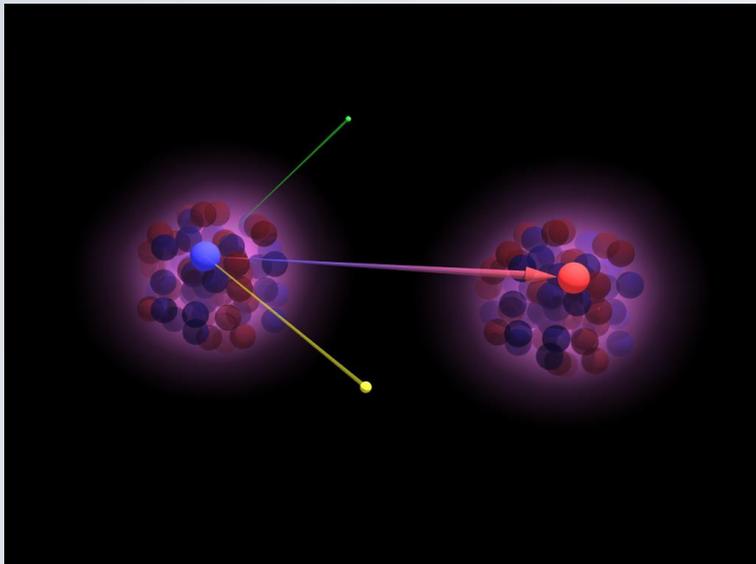
interaction	électromagnétique	forte	faible	gravitationnelle
particule médiatrice	photon (1905) γ	8 gluons (1979) g	3 bosons (1983) W^+ W^- Z	graviton ? $g_{\mu\nu}$
amplitude relative (au niveau des particules)	10^{-2}	1	10^{-14}	10^{-40}

non décrite au niveau des particules

hypothétique

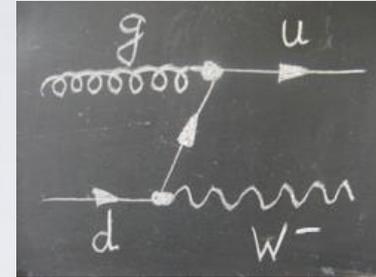
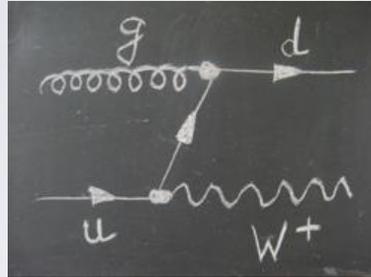
Zoom sur l'interaction faible : bosons $W^+/W^-/Z$

Désintégration β^- :

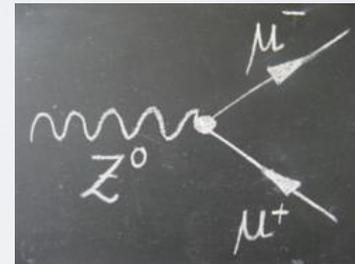
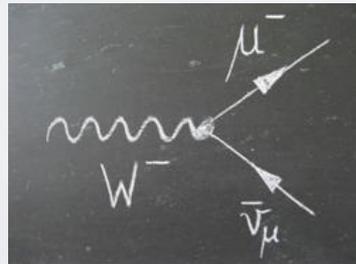
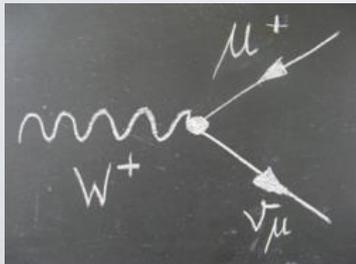
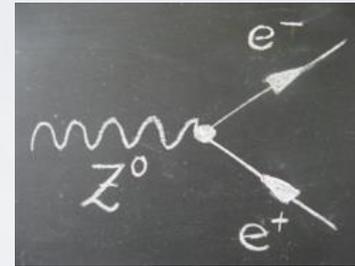
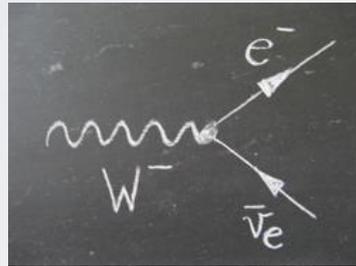
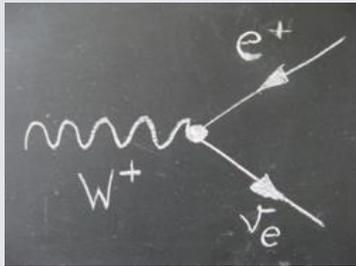


Zoom sur l'interaction faible : bosons $W^+/W^-/Z$

Comment sont-ils créés ?

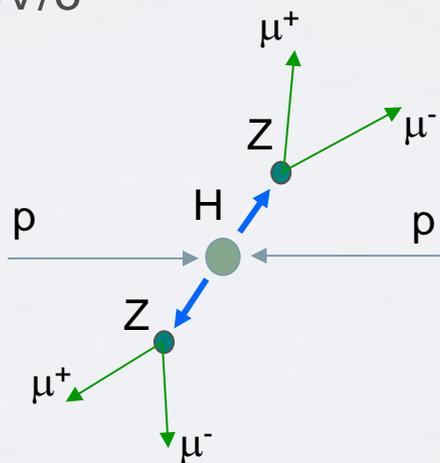


Comment se désintègrent-ils ?

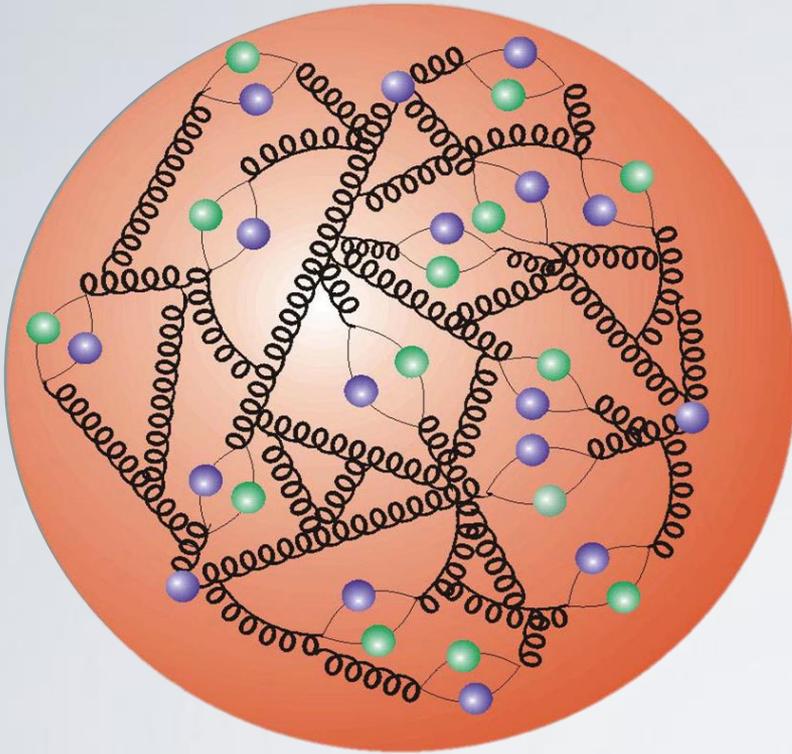


La masse des particules

- Avec les ingrédients précédents, le modèle standard ne permet de décrire que des particules de masse nulle
- Peter Higgs (et d'autres) ont postulé l'existence d'un nouveau champ de force (champ de Higgs) qui remplit tout l'espace. C'est l'interaction des particules élémentaires avec ce champ qui génère la masse
- Ce champ de Higgs est associé à une particule, le **boson de Higgs** (dont la masse est un paramètre libre de la théorie).
- Ce boson de Higgs a été observé en 2012 au LHC, à une masse de $125 \text{ GeV}/c^2$



La masse de notre matière

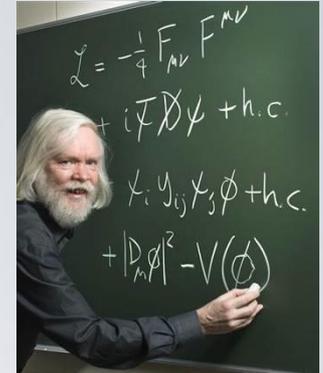


Médiateurs: **gluons**

- Elle correspond essentiellement à celle des noyaux atomiques
- Or la masse d'un noyau est principalement la somme des masses des neutrons et des protons qu'il contient (un peu moins).
- $m_u = 2.3 \text{ MeV}/c^2$, $m_d = 4.8 \text{ MeV}/c^2$
 $m_{uud} = 9.4 \text{ MeV}/c^2 \ll m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$
- Conclusion : l'essentiel de la masse de notre matière provient de l'énergie portée par les gluons piégés dans nos protons et nos neutrons.

L'expérience et la théorie

Différents processus décrits par une loi commune : une **théorie**.
→ **explication** et **prédiction**.



Il faut **tester** les théories par l'**expérience**. On peut démontrer qu'une théorie est fausse, c'est beaucoup plus difficile de montrer qu'elle est vraie !

Théorie actuelle de la physique des particules : le **modèle standard**. Elle est basée sur :

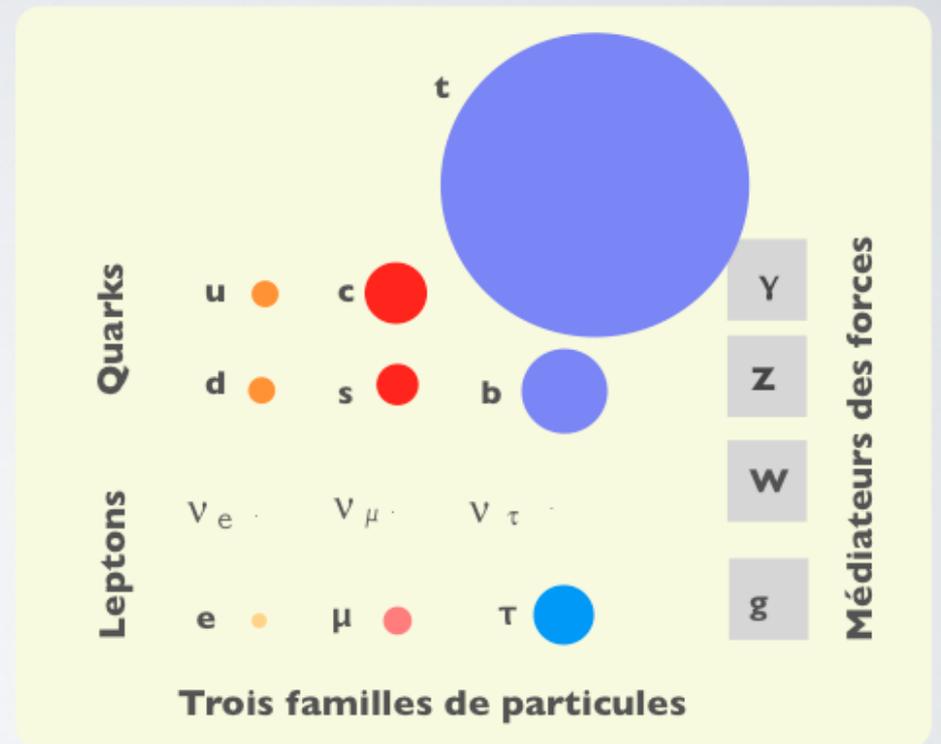
- la **mécanique quantique** (infiniment petit)
- la **relativité restreinte** (vitesses $\sim c$, hautes énergies)



Les limites de la théorie : des questions ouvertes

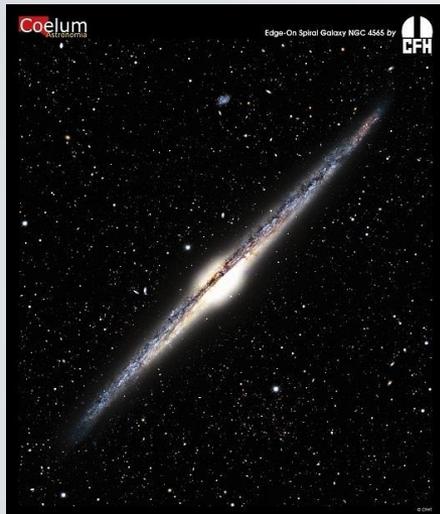
Les questions fondamentales en physique des hautes énergies sont trop nombreuses pour croire que le Modèle Standard soit la théorie ultime. Le modèle est probablement une théorie valide seulement à l'échelle d'énergie que l'on arrive à sonder aujourd'hui.

- 🌐 Pourquoi 3 familles ?
- 🌐 Pourquoi des valeurs de masses si différentes ?
- 🌐 Pourquoi quatre interactions fondamentales ?
- 🌐 Pourquoi 38 ordres de grandeur entre elles ?
- 🌐 Peut-on les unifier ?

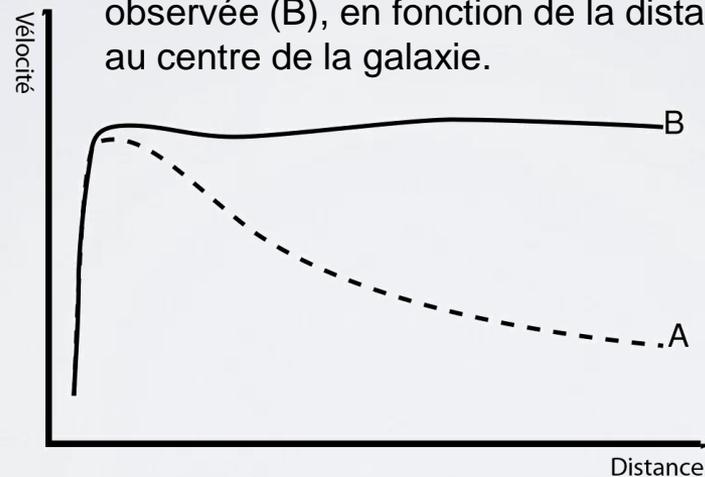


Les limites de la théorie : des indices expérimentaux venus de l'univers

L'**anti-matière** a quasiment disparu de notre galaxie

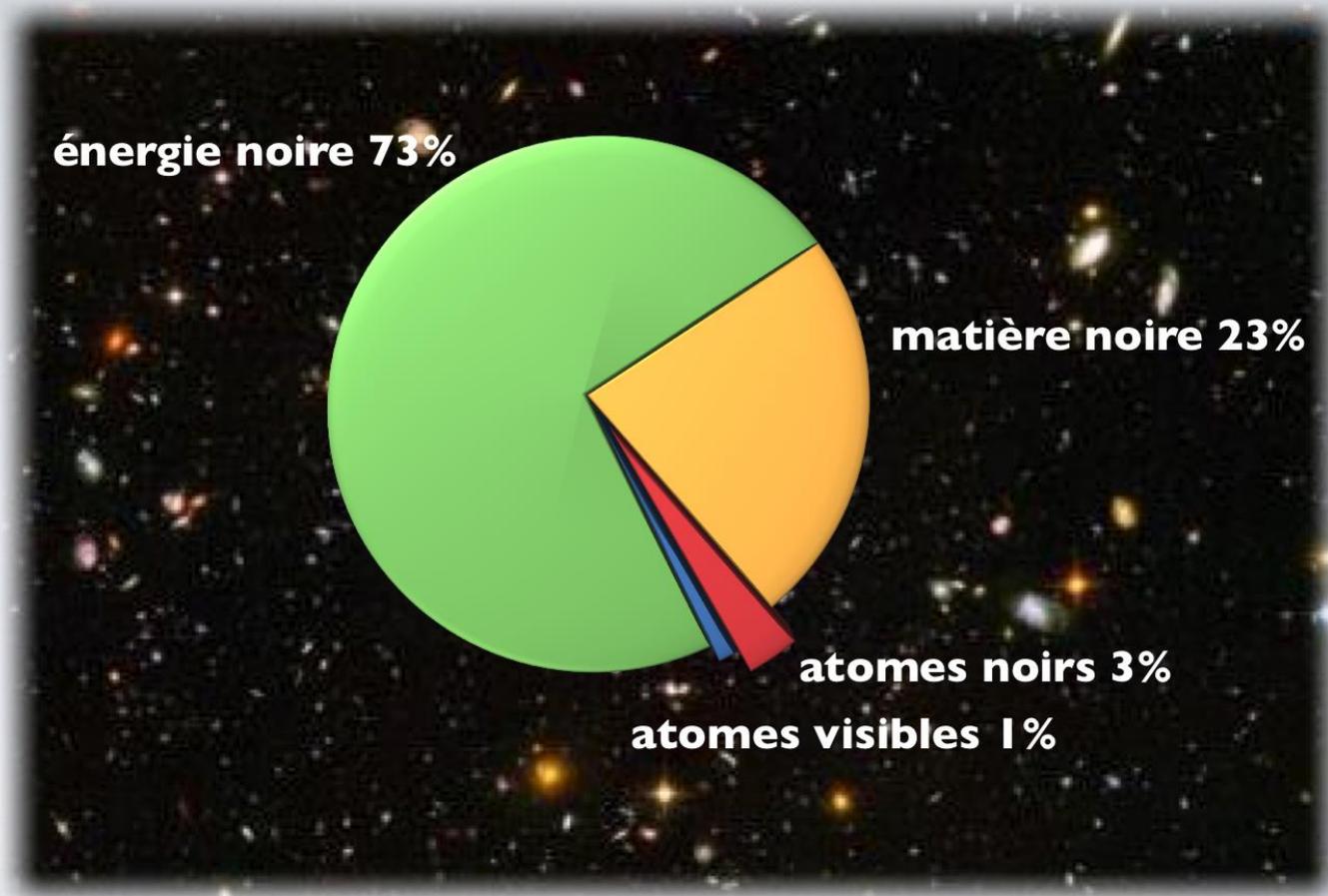


Courbe de rotation prévue par les équations de Newton (A) et la courbe observée (B), en fonction de la distance au centre de la galaxie.



La cinématique des galaxies indique l'existence d'une matière supplémentaire non lumineuse : **la matière noire**

bilan : que connaissons-nous ?



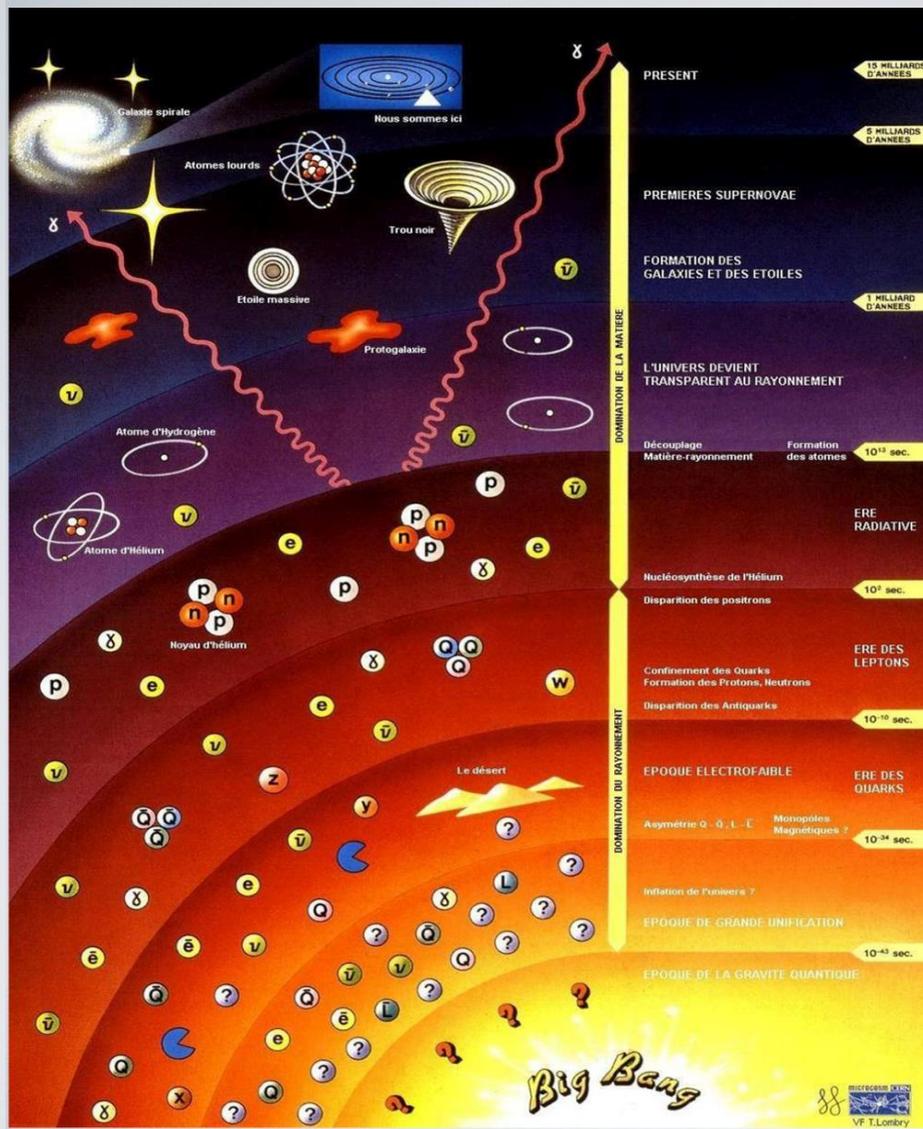
Energie noire + matière noire > 96 %.

Nous ne comprenons que 4 % de l'Univers !

Lien entre physique des particules et cosmologie

Temps

Température / densité d'énergie



l'histoire de notre univers

10^{13} s

premiers atomes

1 s

hadrons

10^{-6} s

quarks
leptons

10^{-10} s

10^{-34} s

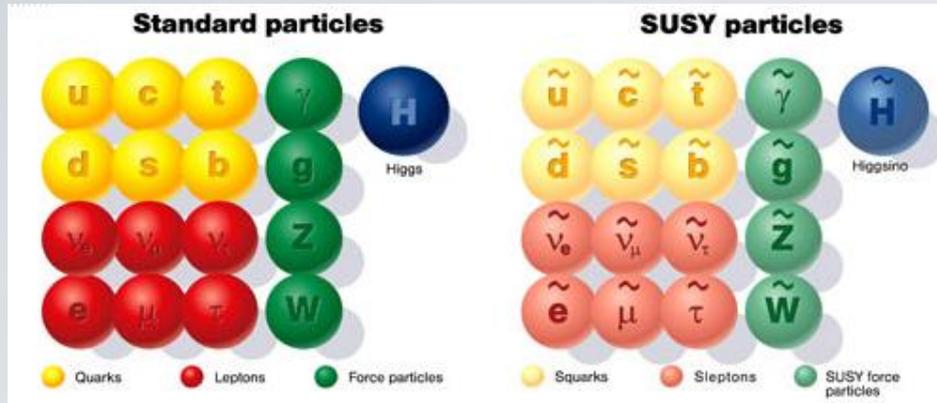
??

10^{-44} s

gravitation
quantique

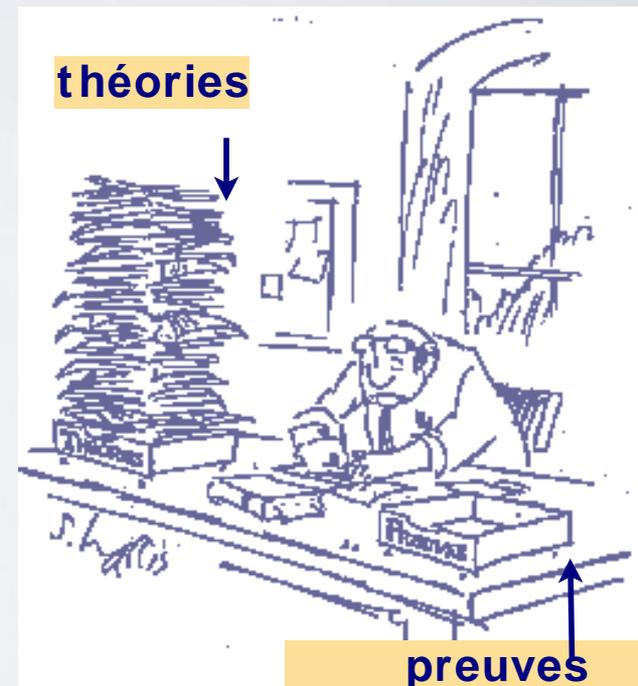
$E = kT$

la recherche en physique des particules aujourd'hui



Le boson de Higgs !
Des nouvelles particules ?
Des dimensions supplémentaires ?

Le LHC a déjà mis en évidence une nouvelle particule.
Il va peut-être en découvrir d'autres, et ainsi valider de nouvelles théories



preuves expérimentales

Backup

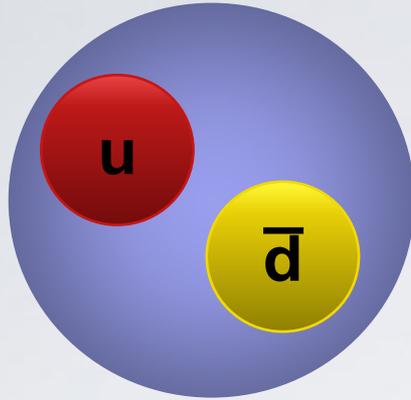
Le paradigme de l'unification

-  **Newton** (XVII^{ème} siècle) :
Unification de la mécanique terrestre et céleste
Théorie de la gravitation universelle
-  **Maxwell** (XIX^{ème} siècle) :
Unification de l'électricité et du magnétisme
Théorie de l'électromagnétisme
-  **Glashow-Weinberg-Salam** (vers 1970) :
Unification de l'électromagnétisme et de la force faible
Théorie électrofaible
-  Prochaine étape ? Unification avec l'interaction forte ?
Théorie(s) de Grande Unification ?

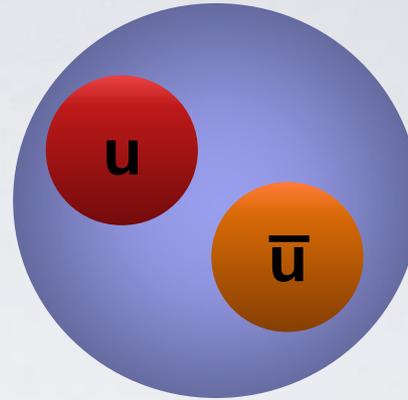
D'autres exemples de hadrons

🌐 Les mésons : paires quarks/antiquarks

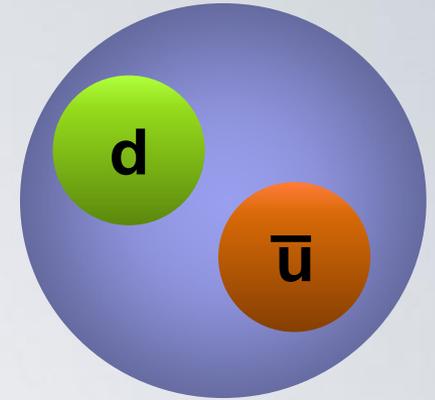
Les pions



π^+

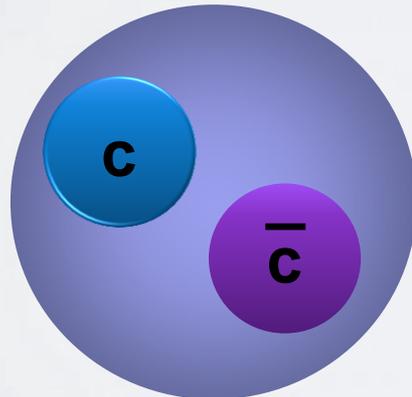


π^0



π^-

Le J/ψ



Une particule que vous verrez cet après-midi