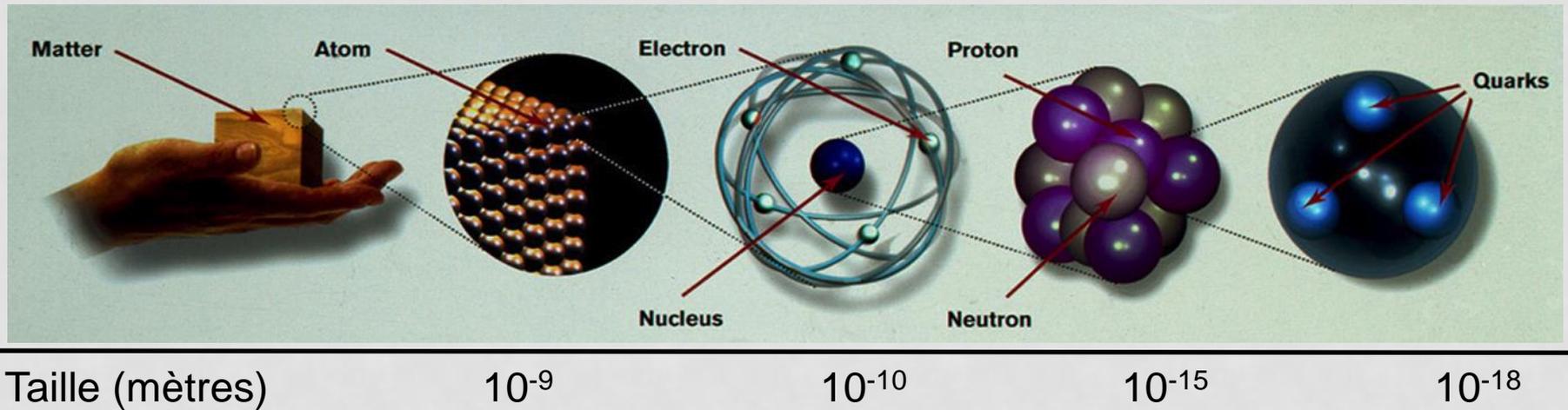


LE MODÈLE STANDARD ... ET AU-DELÀ

MASTERCLASS – 7 AVRIL 2014

1

DE QUOI EST FAIT LE MONDE ?



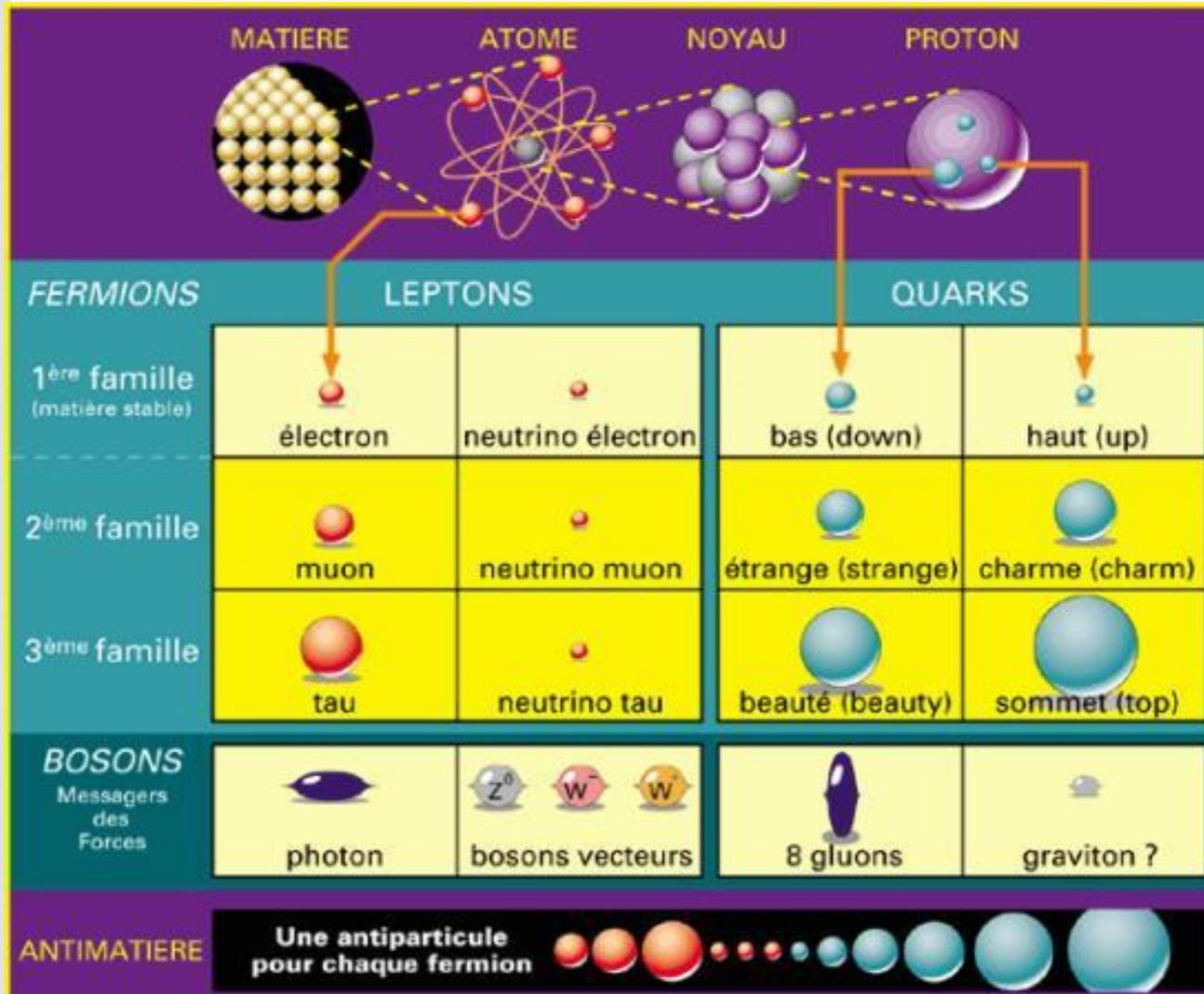
- Particule fondamentale = pas de sous-structure
→ Notion qui varie avec l'époque, en fonction des moyens expérimentaux disponibles
→ Avec plus d'énergie, on sonde la matière à plus petite distance

$$E = \frac{1}{\lambda}$$

- Création de nouvelles particules en les faisant **collisionner**

$$E = mc^2 \text{ ou } E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

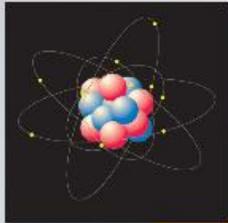
LES PARTICULES DU MODÈLE STANDARD



Les particules de matière

Les "messages des forces"

LES PARTICULES DE MATIÈRE : LEPTONS ET QUARKS



la matière ordinaire

les particules élémentaires
se désintègrent en des
particules élémentaires
plus légères



matière plus lourde
produite dans des collisions
à haute énergie

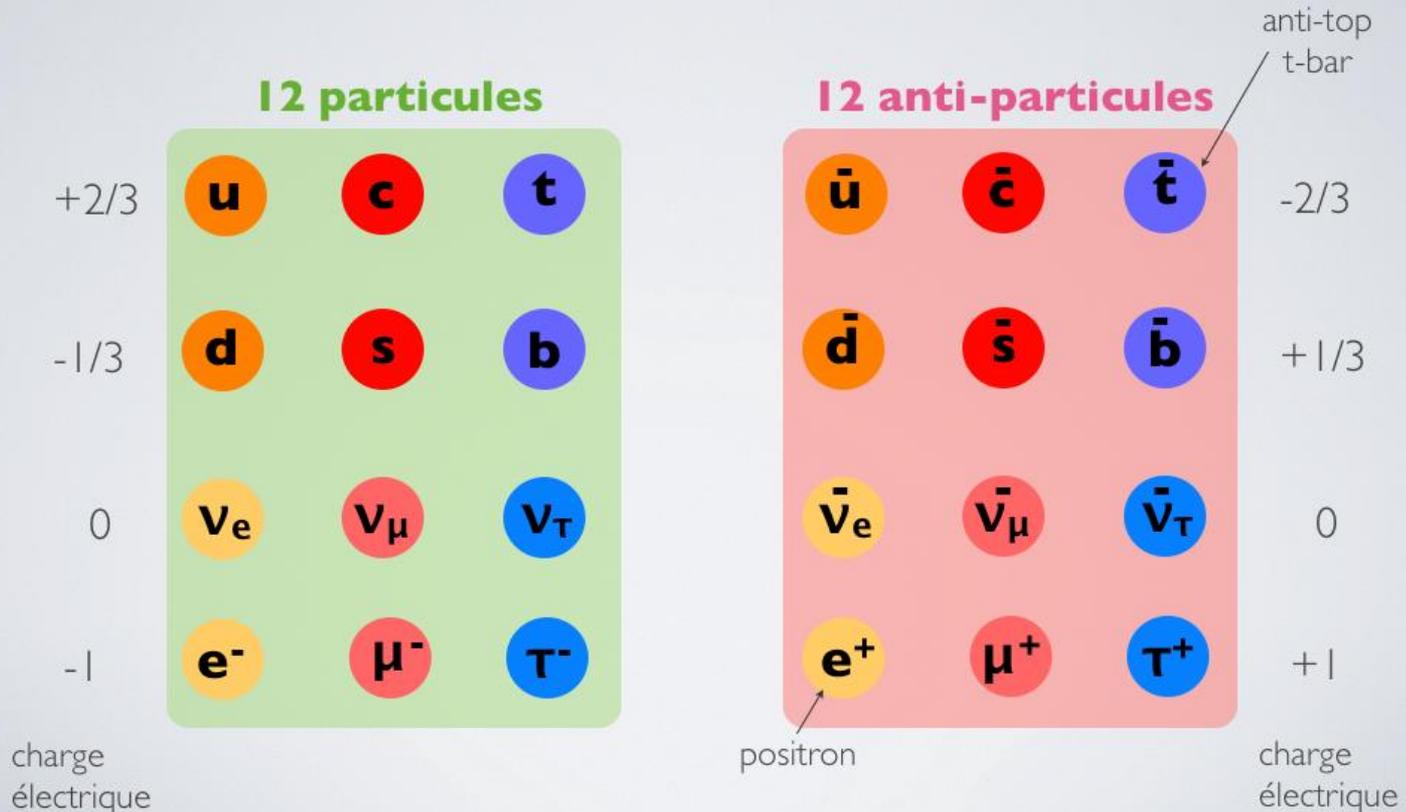


quarks	+2/3	u up (1968)	c charm (1974)	t top (1995)
	-1/3	d down (1968)	s strange (1968)	b beauty (1977)
leptons	0	ν_e neutrino "e" (1956)	ν_μ neutrino "μ" (1962)	ν_τ neutrino "τ" (2000)
	-1	e⁻ électron (1897)	μ^- muon (1936)	τ^- tau (1974)
charge électrique		1^{ère} famille	2^{ème} famille	3^{ème} famille

LES PARTICULES DE MATIÈRE : LEPTONS ET QUARKS

- Et leur 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.



LES PARTICULES DE MATIÈRE : LEPTONS ET QUARKS

- Les neutrinos et muons :

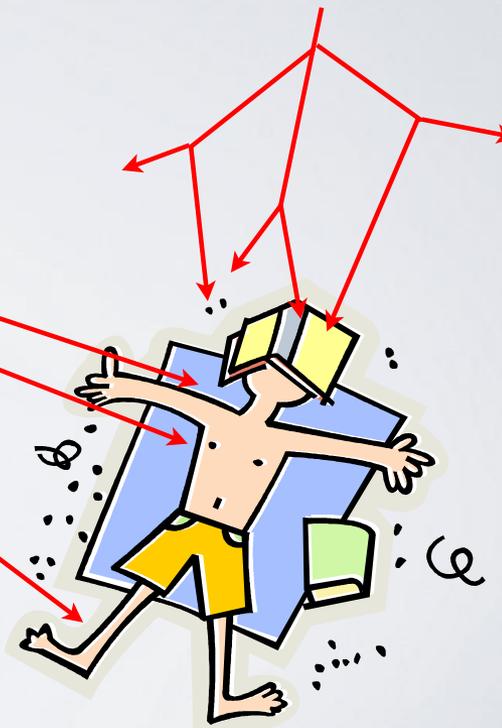
Des neutrinos ν



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

Des muons μ

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

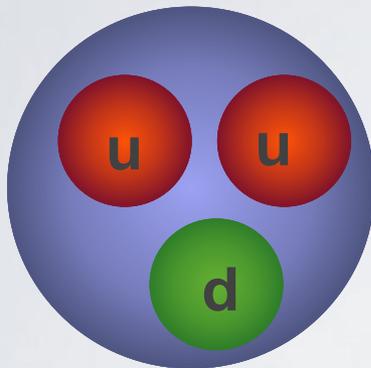


LES PARTICULES DE MATIÈRE : LEPTONS ET QUARKS

- **Les quarks**

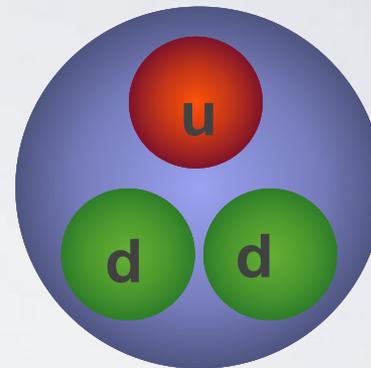
- Les quarks sont toujours regroupés = confinement
- Confinement dans une particule avec une charge entière, qui l'on appelle **hadron**.
- Ce qui les maintient ensemble : **une interaction (forte)**

proton (charge +1)



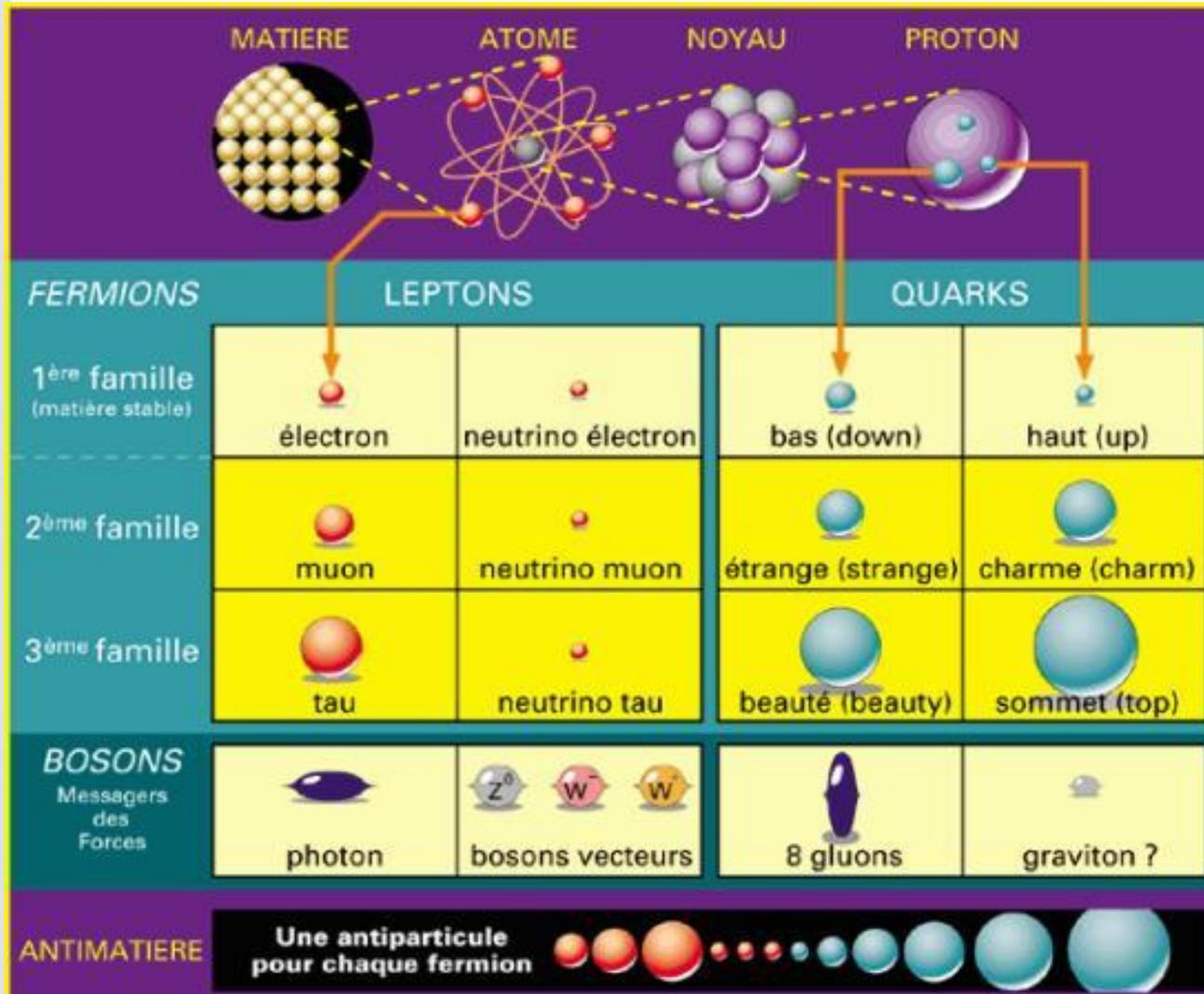
$$u\left(+\frac{2}{3}\right)u\left(+\frac{2}{3}\right)d\left(-\frac{1}{3}\right) = p(+1)$$

neutron (charge 0)



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

LES PARTICULES DU MODÈLE STANDARD



Les particules de matière

Les "messages des forces"

LES INTERACTIONS

- Comment les particules interagissent-elles ?!

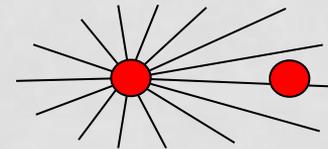
- **Vision classique** : action instantanée à distance

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.

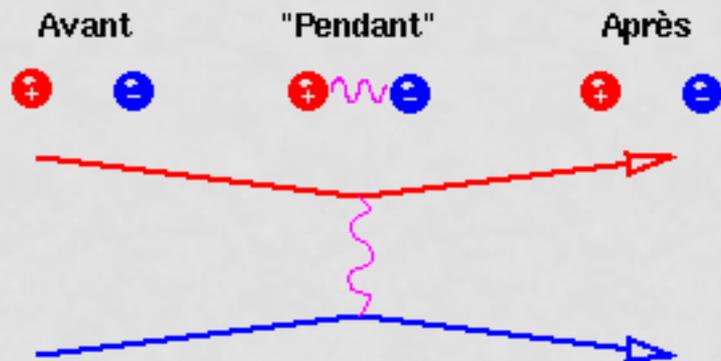


- **Théorie quantique** :

Les particules échangent d'autres particules qui sont les messagers de la force.



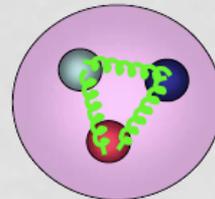
LES INTERACTIONS



LES INTERACTIONS

- 4 forces **fondamentales**
- Interaction = **échange** d'une particule d'interaction

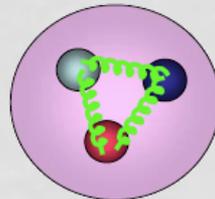
Interaction	Electroma- gnétique	Forte	Faible	Gravitation- nelle
Particule médiatrice = boson	Le photon 	8 gluons 	3 bosons 	<i>Graviton ?</i>
Intensité relative	10^{-2}	1	10^{-14}	10^{-40}



LES INTERACTIONS

- 4 forces **fondamentales**
- Interaction = **échange** d'une particule d'interaction

Interaction	Electroma- gnétique	Forte	Faible	Gravitation- nelle
Particule médiatrice = boson	Le photon 	8 gluons 	3 bosons 	Graviton ?
Intensité relative	10^{-2}	1	10^{-14}	10^{-40}



LES INTERACTIONS : ÉLECTROMAGNÉTISME

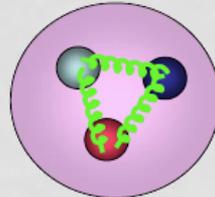
- Sur toutes les particules ayant une charge électrique
- Messenger : Photon
- Interaction à longue portée dépendant de la charge électrique



LES INTERACTIONS

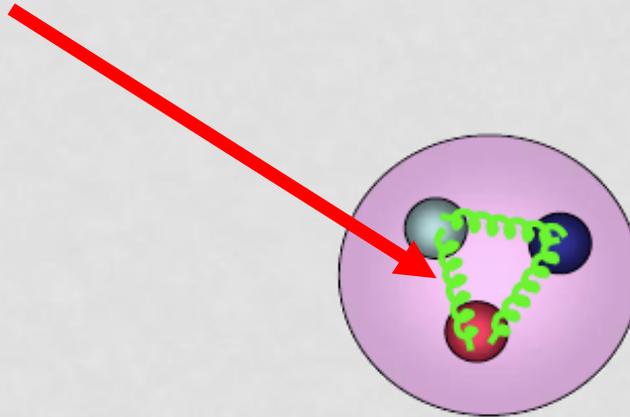
- 4 forces **fondamentales**
- Interaction = **échange** d'une particule d'interaction

Interaction	Electroma- gnétique	Forte	Faible	Gravitation- nelle
Particule médiatrice = boson	Le photon 	8 gluons 	3 bosons 	<i>Graviton ?</i>
Intensité relative	10^{-2}	1	10^{-14}	10^{-40}



LES INTERACTIONS : INTERACTION FORTE

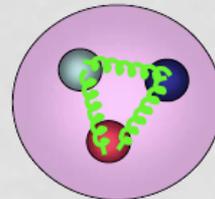
- S'exerce **uniquement** sur les quarks : **cohésion** des quarks dans les nucléons et des protons et neutrons dans le noyau
- Messenger : gluons



LES INTERACTIONS

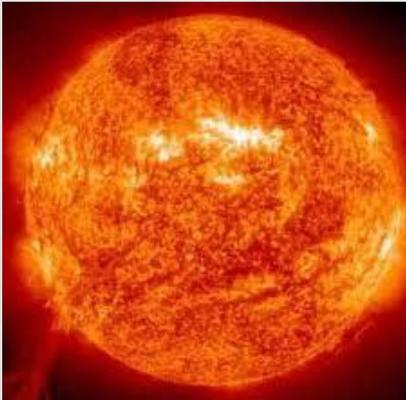
- 4 forces **fondamentales**
- Interaction = **échange** d'une particule d'interaction

Interaction	Electroma- gnétique	Forte	Faible	Gravitation- nelle
Particule médiatrice = boson	Le photon 	8 gluons 	3 bosons 	Graviton ?
Intensité relative	10^{-2}	1	10^{-14}	10^{-40}



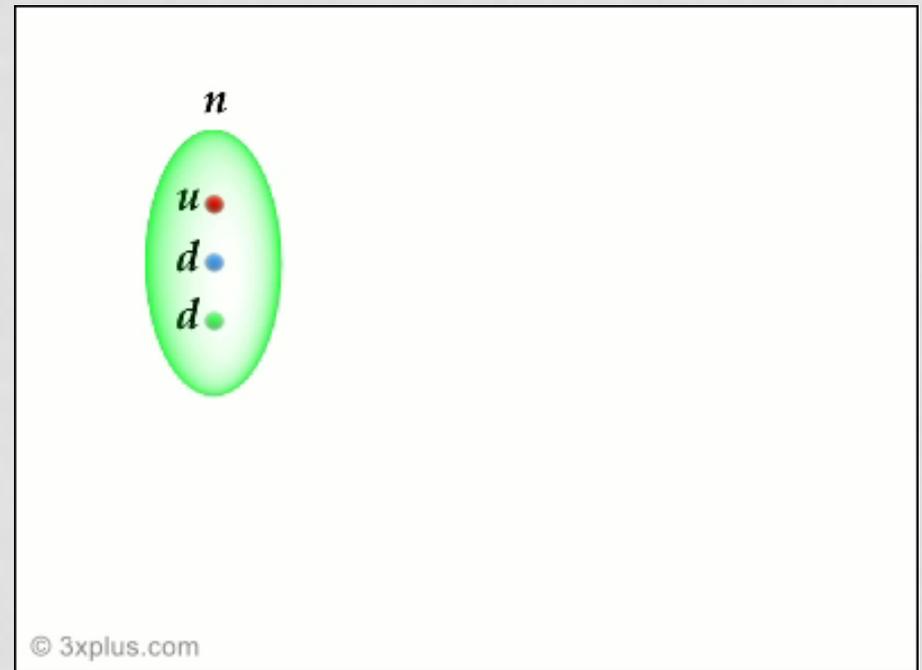
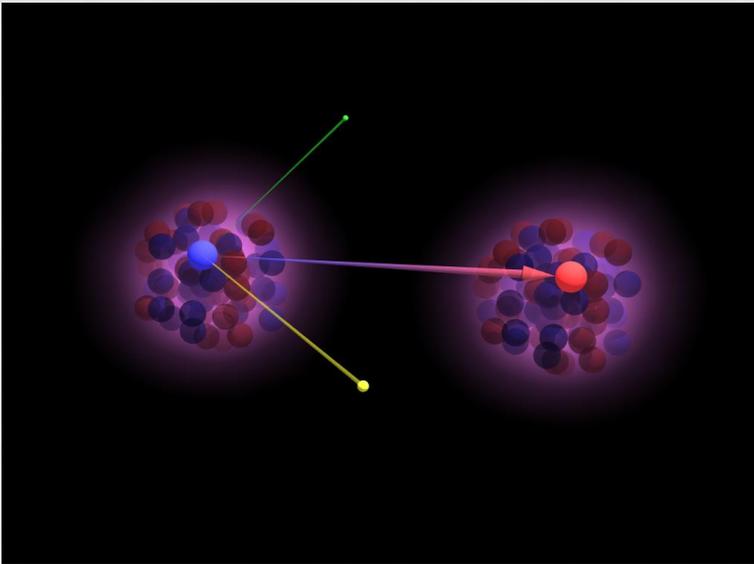
LES INTERACTIONS : INTERACTION FAIBLE

- Sur toutes les particules
- Messagers : W^+ , W^- , Z
- Interaction de courte portée



LES INTERACTIONS : INTERACTION FAIBLE

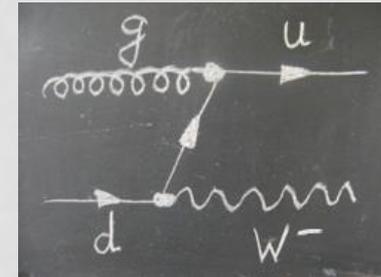
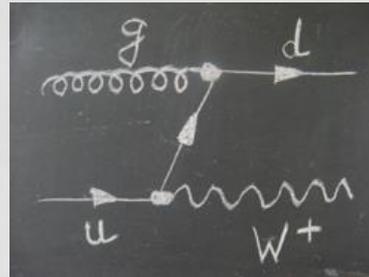
- Désintégration β^- :



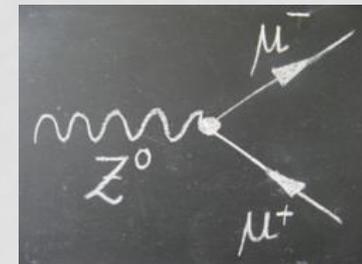
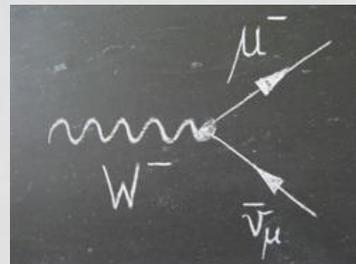
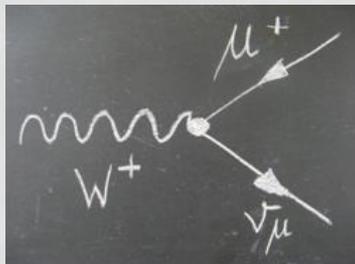
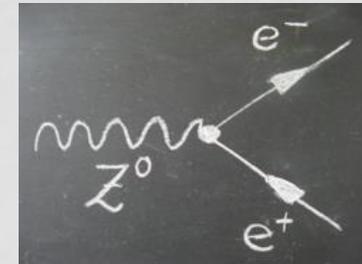
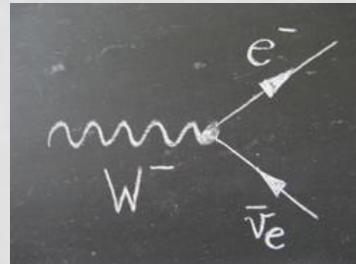
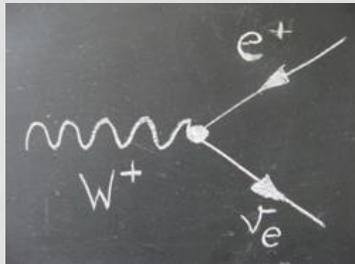
LES INTERACTIONS : INTERACTION FAIBLE

- **Les bosons $W^+/W^-/Z$:**

- Comment sont-ils créés ?



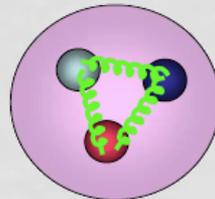
- Comment se désintègrent-ils ?



LES INTERACTIONS

- 4 forces **fondamentales**
- Interaction = **échange** d'une particule d'interaction

Interaction	Electroma- gnétique	Forte	Faible	<i>Gravitation- nelle</i>
Particule médiatrice = boson	Le photon γ	8 gluons g	3 bosons W^+, W^-, Z	<i>Graviton ?</i>
Intensité relative	10^{-2}	1	10^{-14}	10^{-40}



LES INTERACTIONS : FORCE GRAVITATIONNELLE

- Importante à très grande échelle, négligeable à très petite échelle
- S'exerce sur **toutes** les particules
- **Messenger** graviton ?
Hypothétique
- Interaction à **longue portée** dépendant des masses

Non décrite au niveau des particules



LES PARTICULES DU MODÈLE STANDARD

FERMIONS

LEPTONS (*insensibles à la force forte*)

QUARKS (*sensibles à toutes les forces*)

1^{ère} Génération
(matière ordinaire)

Electron



Neutrino



Electronique

Up



Down



2^{ème} Génération

Muon



Neutrino



Muonique

Strange



Charmed



3^{ème} Génération

Tau



Neutrino



Tauonique

Bottom



Top



BOSONS DE GAUGES

Photon

(*électromagnétisme*)



8 Gluons

(*force forte*)



W⁺ W⁻ Z⁰

(*force faible*)



Higgs

(*masse*)



LA MASSE DES PARTICULES ET LE BOSON DE HIGGS

- 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 126 GeV/c²**

LA MASSE DES PARTICULES ET LE BOSON DE HIGGS



Une assemblée de
physiciens : le “vide
quantique”

LA MASSE DES PARTICULES ET LE BOSON DE HIGGS



Une personnalité
arrive

LA MASSE DES PARTICULES ET LE BOSON DE HIGGS



Un amas de physiciens
s'accumulent autour de
lui :
la personnalité a du mal
à se déplacer ~ masse

LA MASSE DES PARTICULES ET LE BOSON DE HIGGS

- Découverte du Higgs :

The Nobel Prize in Physics 2013

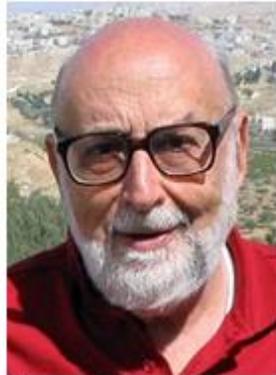


Photo: Pnicolet via
Wikimedia Commons

François Englert

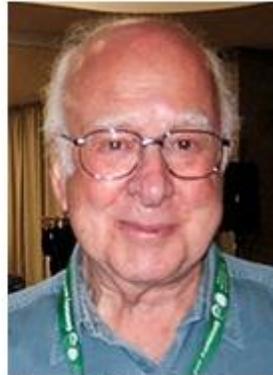
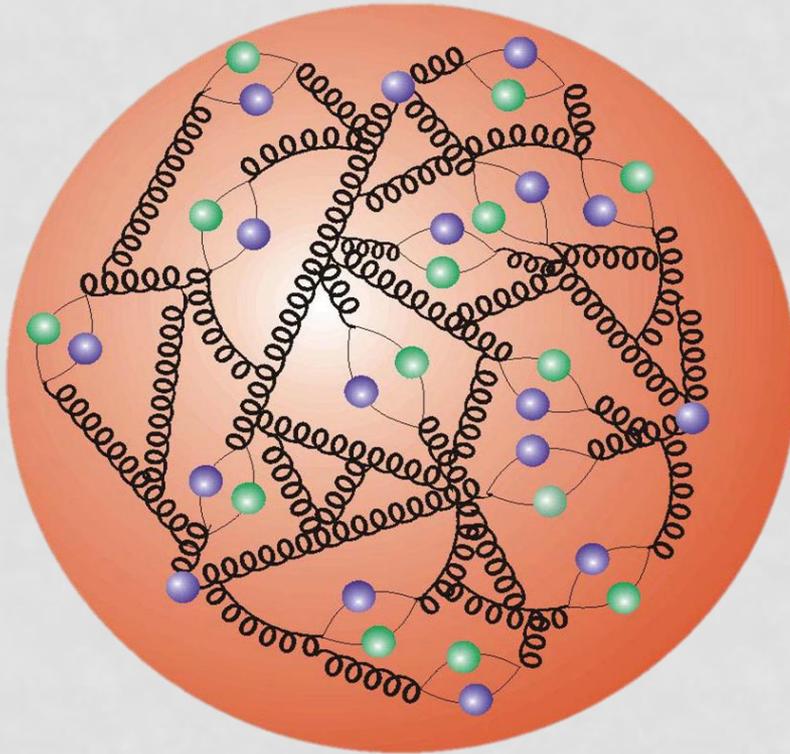


Photo: G-M Greuel via
Wikimedia Commons

Peter W. Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

LA MASSE DE NOTRE MATIÈRE

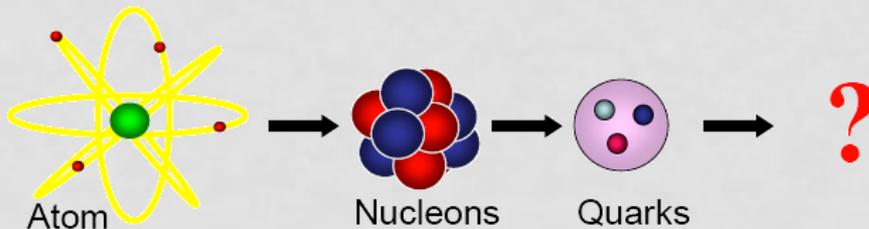


Médiateurs: **gluons**

- 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.

LES LIMITES DE LA THÉORIE ACTUELLE

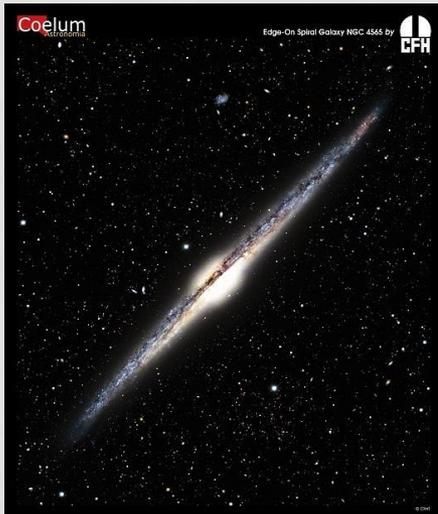
- Encore **beaucoup de questions** avec le modèle actuel (le Modèle Standard) = Le modèle est probablement une théorie **valide seulement à l'échelle d'énergie** que l'on arrive à sonder aujourd'hui.
- Quelques **questions** ...
 - Pourquoi 3 familles ?
 - Pourquoi 4 interactions fondamentales ? et pourquoi 38 ordres de grandeur entre elles ? → Peut-on les unifier ?
 - Qu'est-ce que la matière noire ?
 - Pourquoi l'anti-matière a disparu ?



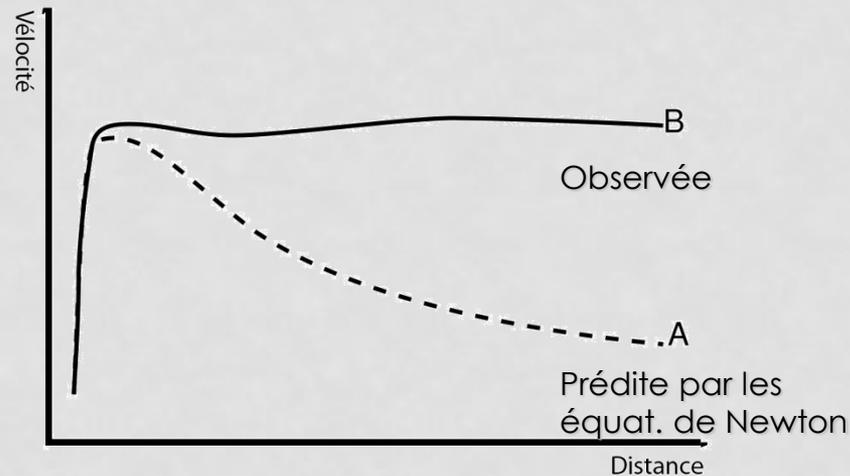
La réponse à certaines de ces questions est probablement cachée dans la région jusqu'alors inexplorée du **TeV** (10^{12} eV)

LIMITES : LES INDICES EXPÉRIMENTAUX

- **L'anti-matière** : quasiment disparue de notre galaxie
- **La matière noire**

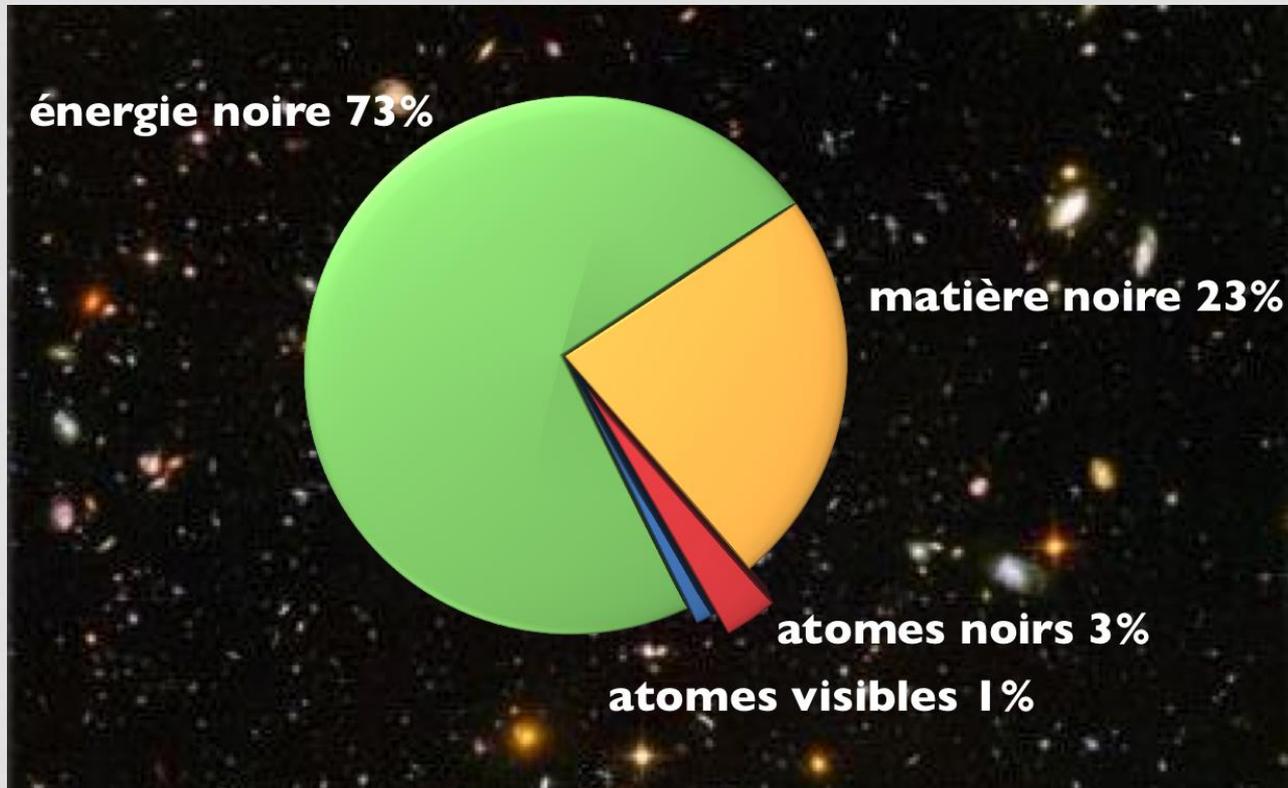


Courbe de rotation prévue par les équations de Newton (A) et la courbe observée (B), en fonction de la distance au centre de la galaxie.



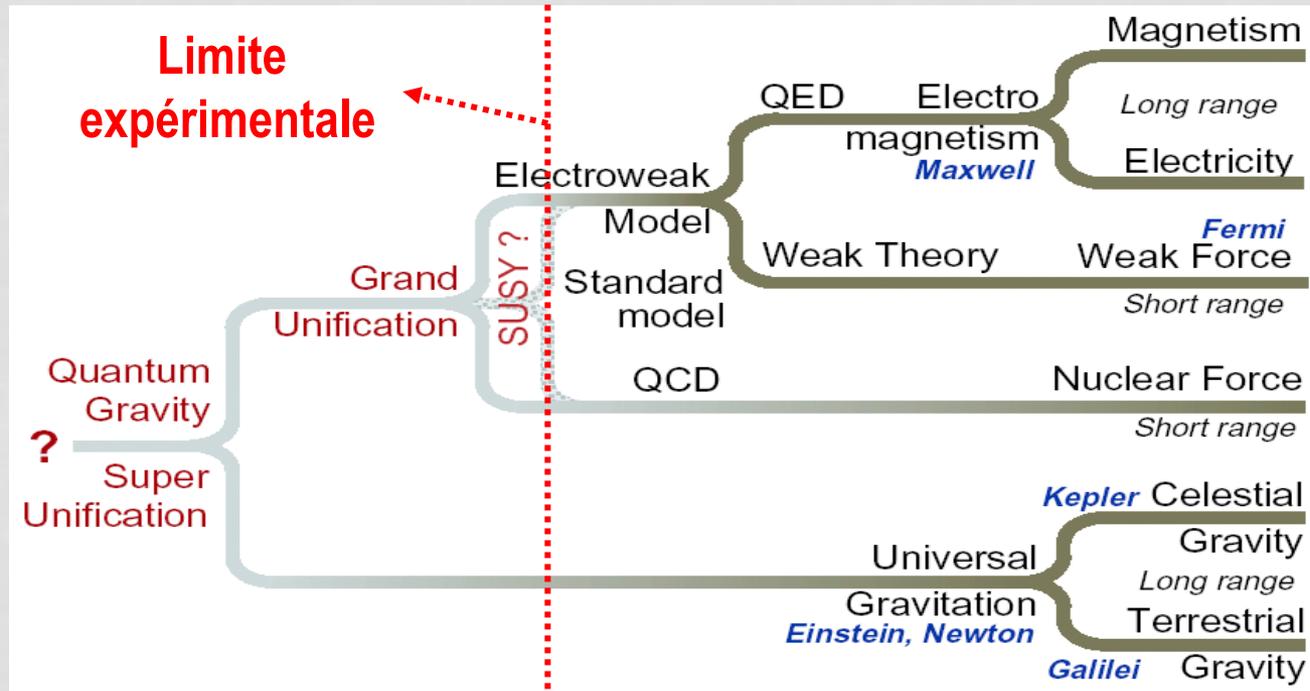
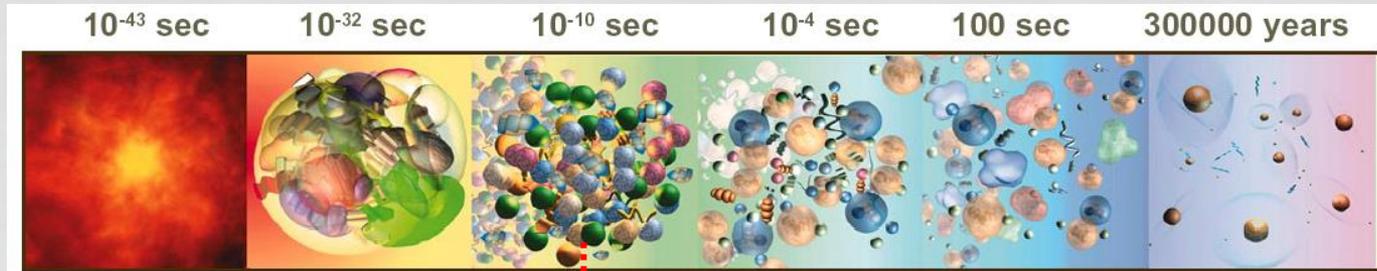
La cinématique des galaxies indique l'existence d'une matière supplémentaire non lumineuse : **la matière noire**

BILAN : QUE CONNAISSONS-NOUS ?

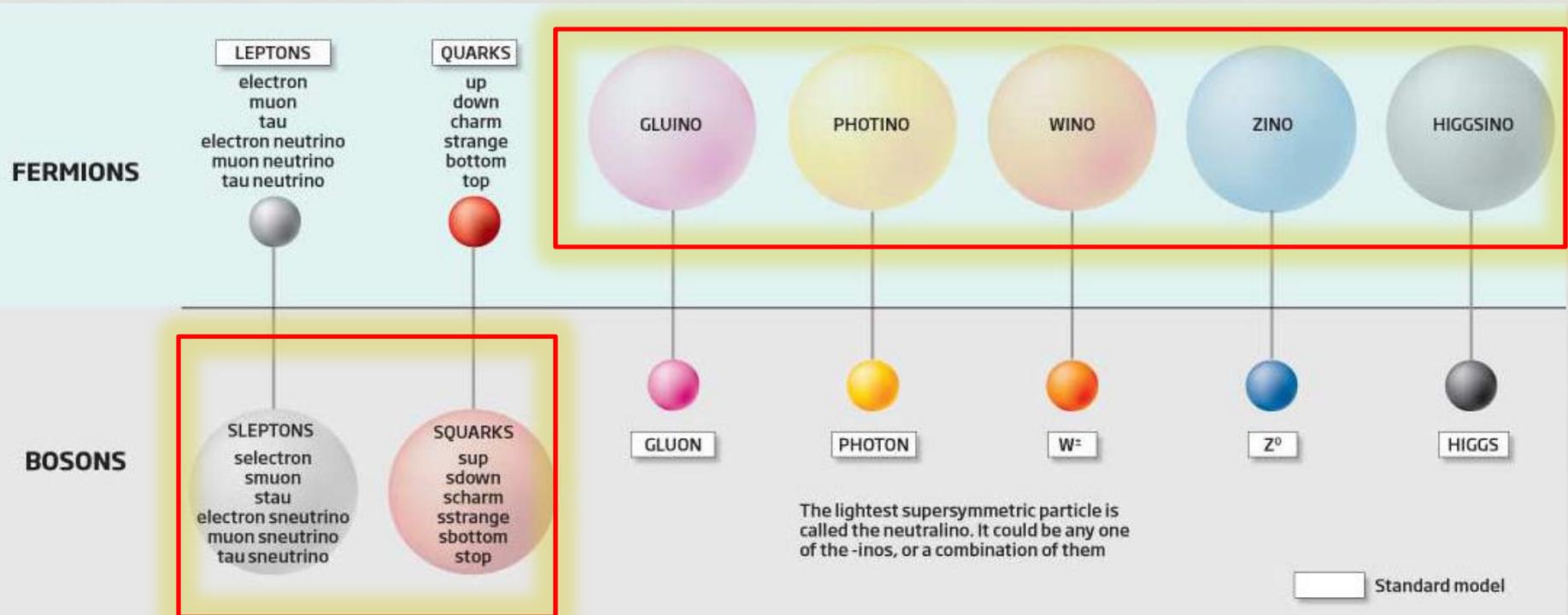


Nous comprenons **seulement 4 %** de l'univers !

UNIFICATION DES FORCES

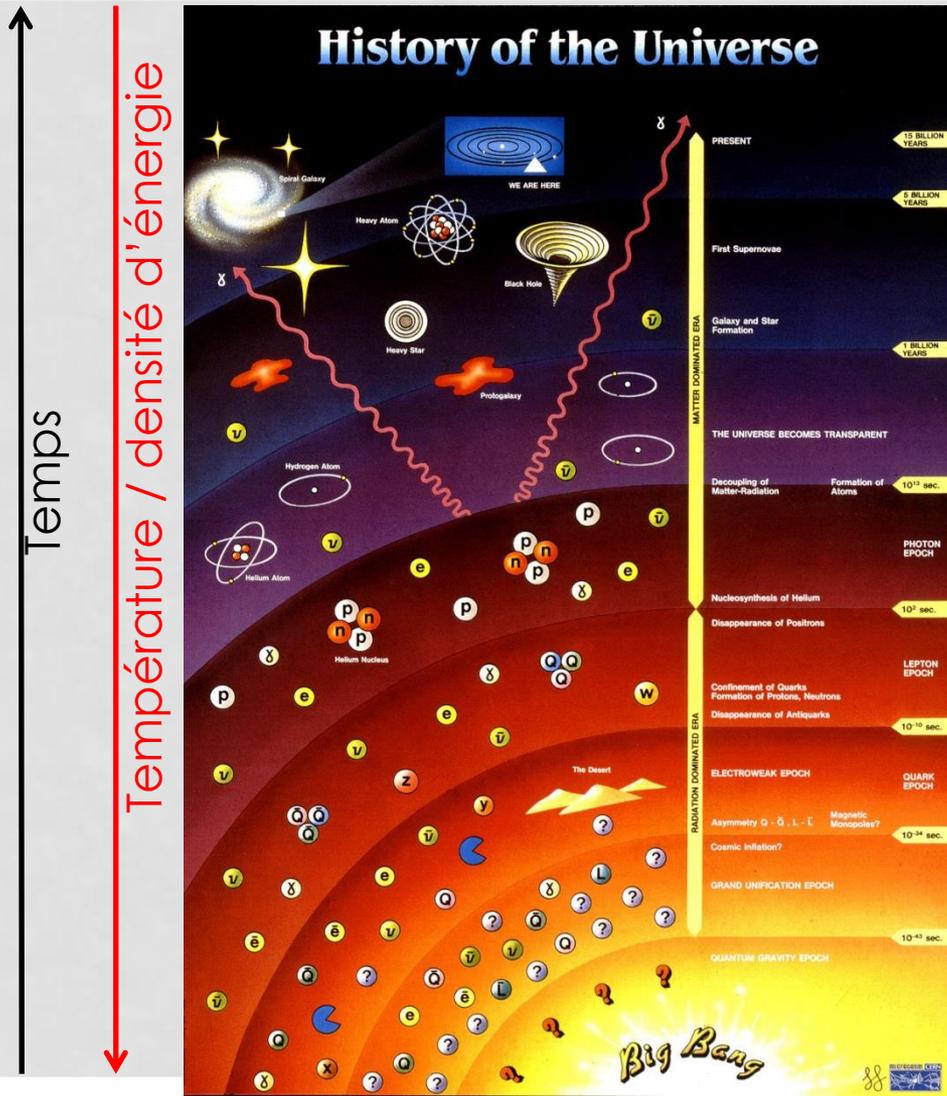


SUPERPARTICLES



Superparticles ?

PARTICULES ET COSMOLOGIE



Aujourd'hui (13,7 milliards d'années, 3 K)

Formation étoiles (1 milliard d'années)

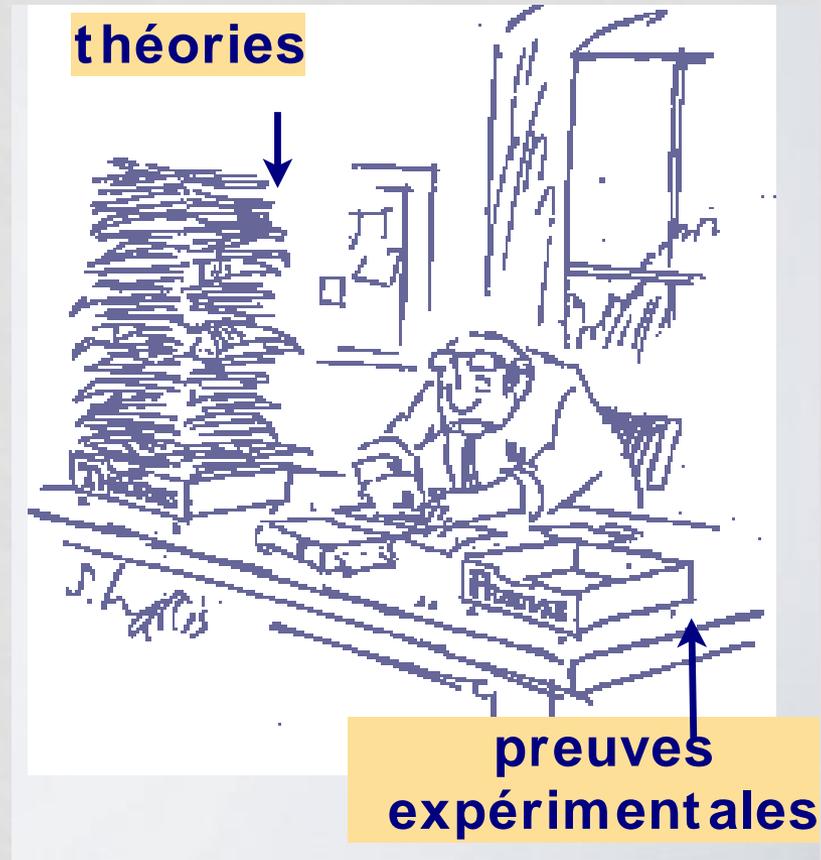
Formation des atomes (300 000 ans)

Formation des noyaux (180 s)

Formation des protons et neutrons (10⁻¹⁰ s)

??? (Avant)

CHERCHER, CHERCHER ET CHERCHER !

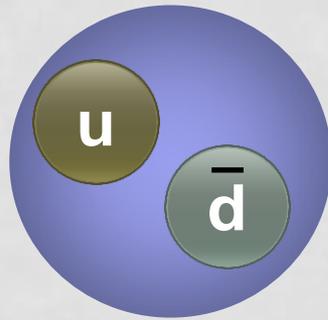


BACK UP

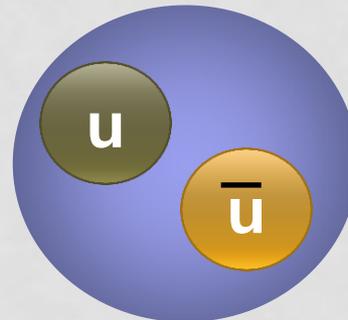
D'AUTRES EXEMPLES DE HADRONS

- Les mésons : paires quarks/antiquarks

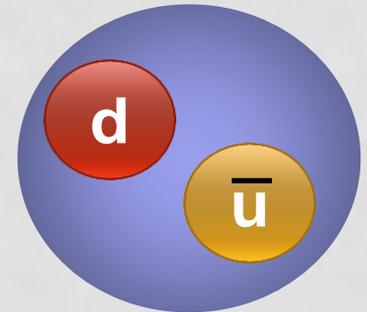
Les pions



π^+



π^0



π^-

Le J/ ψ

