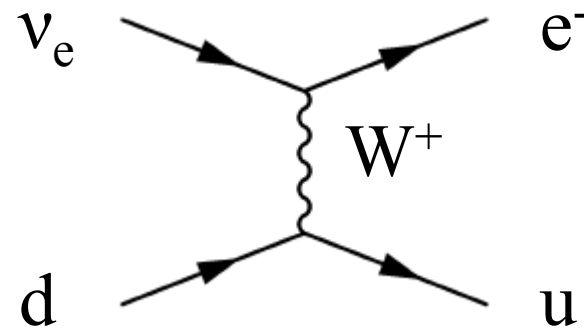
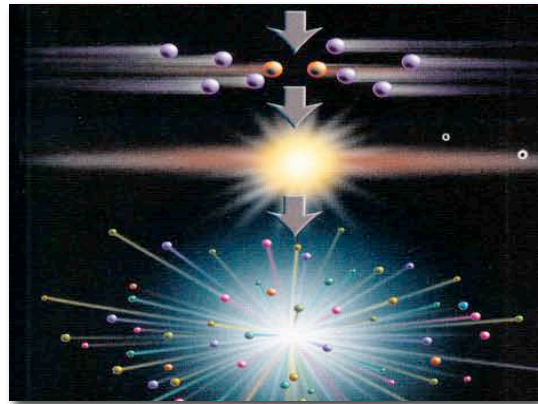


Particules et interactions



La physique des particules recherche et étudie les particules élémentaires qui composent la matière et la manière dont elles interagissent entre elles.

"élémentaire" = qui n'a pas de structure interne connue.

Plan du cours

- L'atome
 - Du concept à sa structure
- Des particules...
 - ...comme s'il en pleuvait
- Particules élémentaires
 - Les briques de la matière
- Interactions fondamentales
 - Forces et formalisme
- Energie, mouvement et masse
 - Fabrication de particules
- Le modèle standard
 - de la physique des particules
- Les questions ouvertes

L'atome

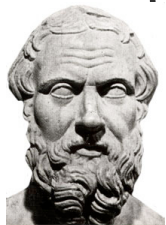
Du concept



A la structure

L'atome : un peu d'histoire

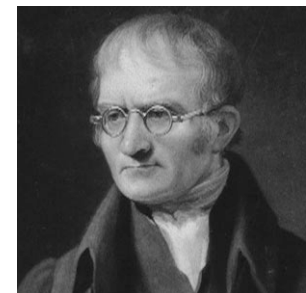
- Concept d'atome chez des philosophes grecs (-400, Démocrite)



- matière faite de particules éternelles et indestructibles : « atomes ».



- Anglais John DALTON (1766-1844) : père de la théorie atomique.
 - Hypothèses liées aux observations sur les pressions partielles des gaz
 - Éléments composés d'atomes (tous identiques)
 - Les composés : molécules obtenues en combinant les atomes

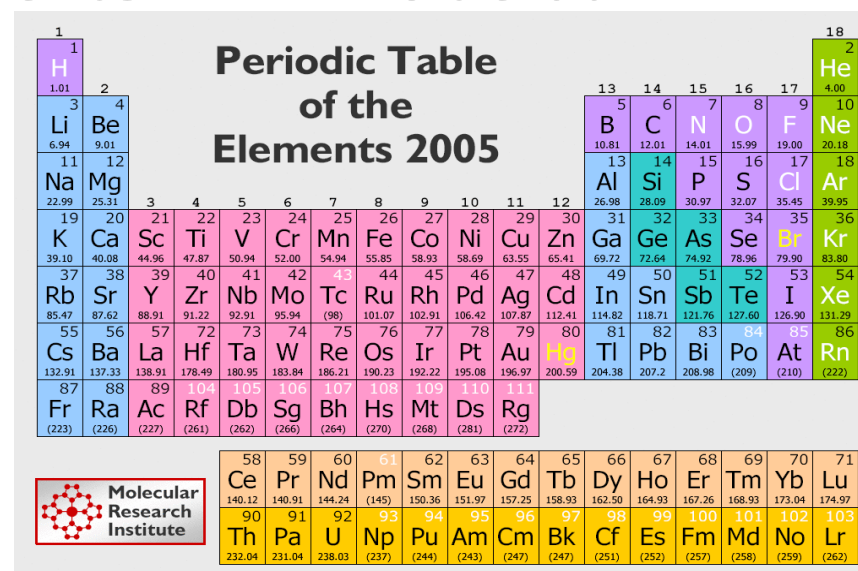


L'atome : un peu d'histoire

- Classification des éléments : 1^{ère} moitié du 19^{ème} siècle

- Classement périodique suggère déjà une structure interne aux atomes

Periodic Table of the Elements 2005



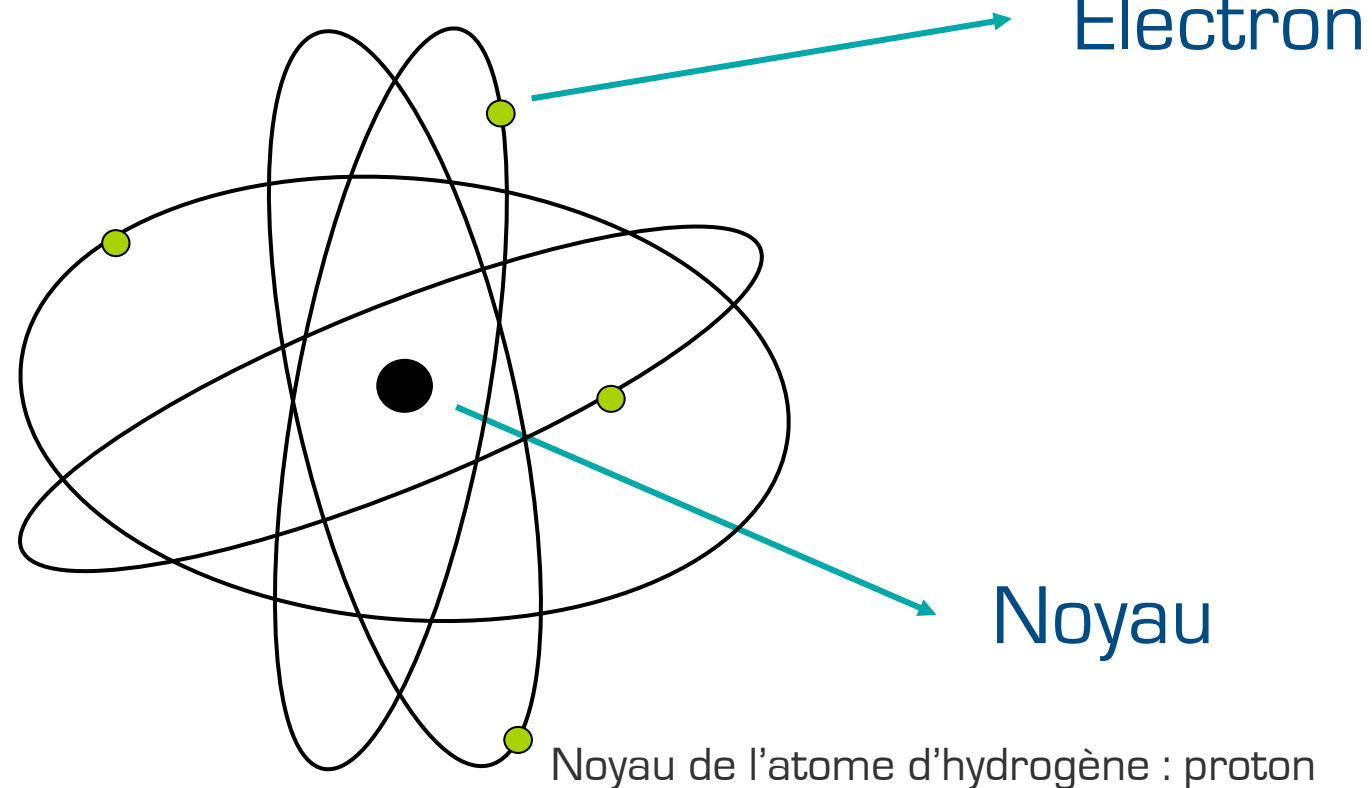
The image shows a standard periodic table of elements. It is color-coded by groups: alkali metals (blue), alkaline earth metals (orange), transition metals (green), metalloids (yellow), nonmetals (pink), and noble gases (purple). Each element cell contains its atomic number, symbol, and name. The table is titled 'Periodic Table of the Elements 2005'. At the bottom left, there is a logo for the 'Molecular Research Institute'.

- Fin du 19^{ème} siècle: découverte de divers rayons
 - Rayons cathodiques, rayons X, radioactivité α , β , γ

⇒ l'atome a une structure (modèle de Thomson)

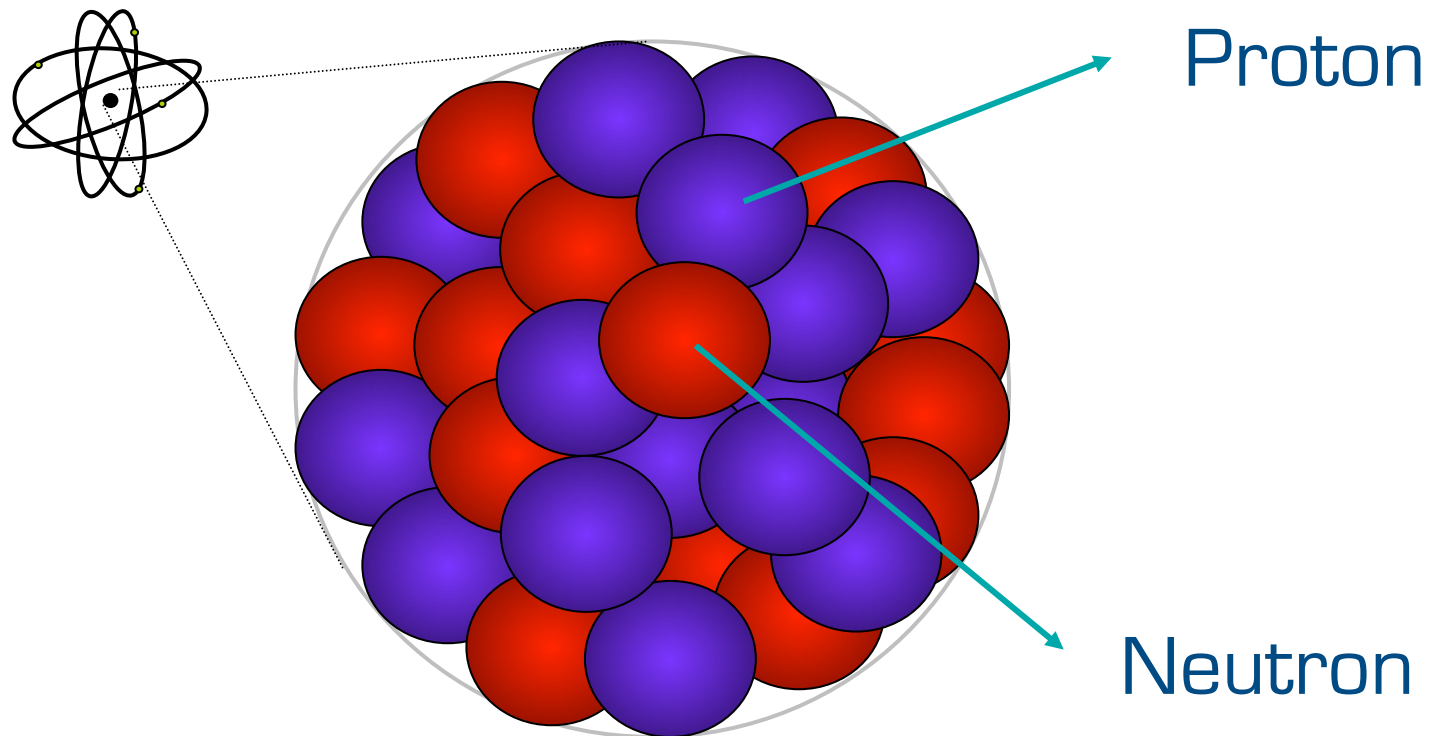
La structure de l'atome

- Modèle « planétaire » de l'atome
 - Rutherford, 1911



La structure de l'atome

- Protons et neutrons
 - Chadwick, 1930 (découverte des neutrons)



Taille, volume, masse de l'atome

- Taille de l'atome et du noyau
 - pour atteindre 1 centimètre, il faudrait aligner... cent millions d'atomes d'hydrogène !
 - Le noyau est 100 000 fois plus petit que l'atome
- Masse
 - Proton : $1,7 \cdot 10^{-27}$ kg – électron : 1836 fois moins
 - 99,97% de la masse d'un atome est dans son noyau !
- Volume
 - Le volume de l'atome : volume dans lequel on a une chance non négligeable de trouver un des électrons de cet atome.
 - Le volume du noyau : un million de milliards de fois plus petit que celui de l'atome.
 - Le volume de l'atome : au moins 99,999999% de vide !

L'atome, 1^{ere} brique de la matière

- La Terre, l'air, l'eau, les êtres vivants...,
 - tous les corps de la nature sont constitués d'atomes (ou d'assemblages d'atomes : les molécules).

Il existe beaucoup d'atomes différents (hydrogène, oxygène, plomb, cuivre...) mais tous sont fabriqués à partir des mêmes neutrons, protons et électrons !

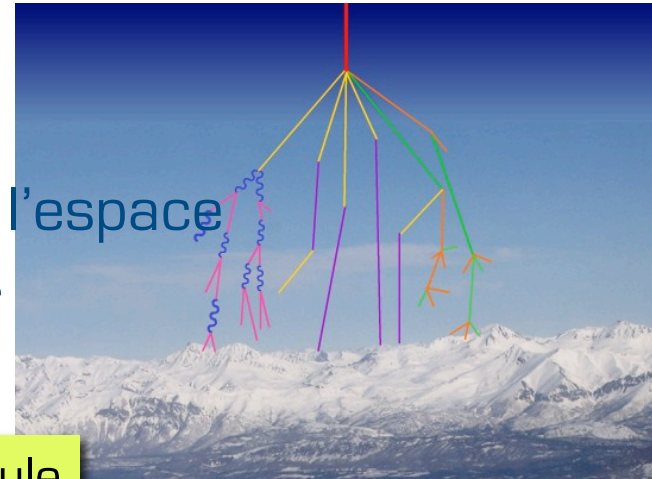
Des particules...



...comme s'il en pleuvait !

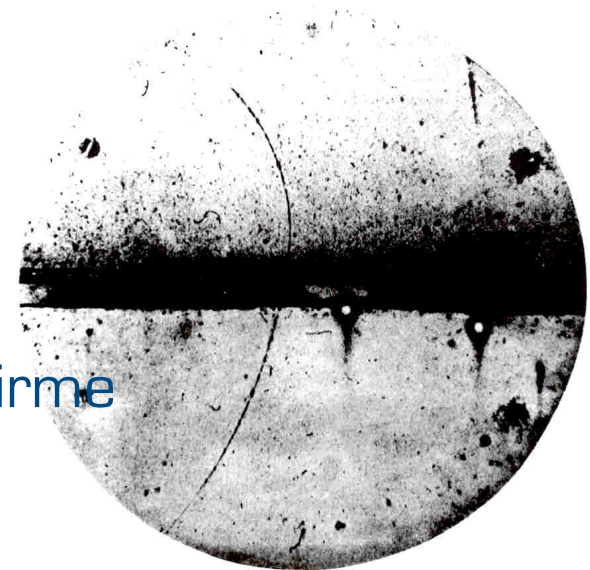
Observation de nouvelles particules

- Etude des rayons cosmiques
 - noyaux d'atomes qui arrivent de l'espace
 - collision avec les molécules d'air
 - production de particules



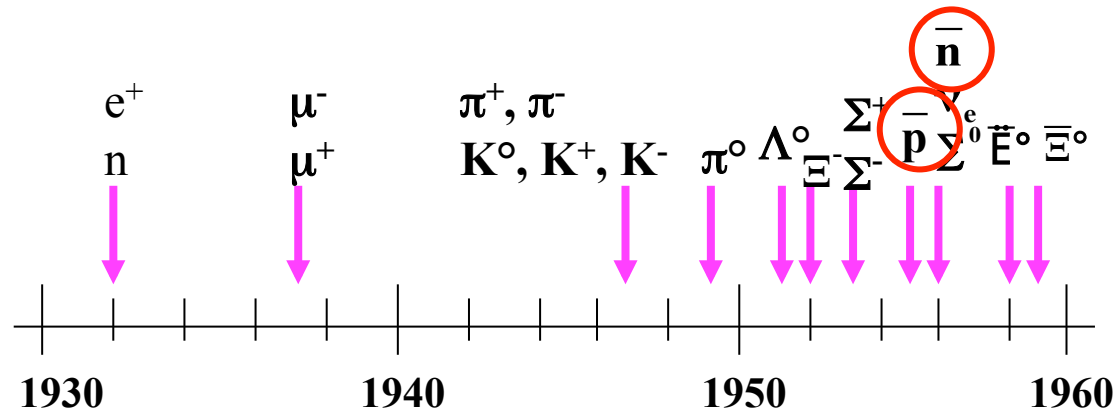
Les rayons cosmiques : à cette époque, seule source de particules

- Découverte des « antiparticules »
 - anti-électron e^+ (positron) découvert en 1932 par C. Anderson
 - l'interprétation des observations confirme la prédiction théorique de P. Dirac



Le bestiaire s'agrandit

- Tout un « zoo » de nouvelles particules et antiparticules



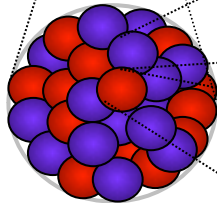
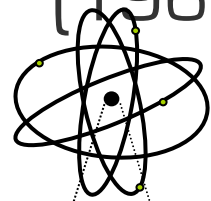
- Besoin de classification
 - Gell-Mann (1960) - hypothèse : ces particules sont composées de particules plus élémentaires qu'il appelle **quarks**



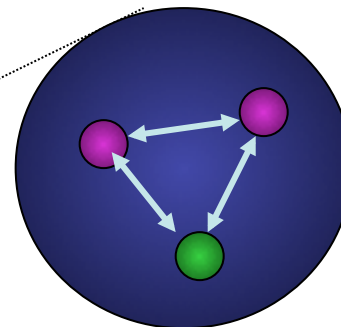
Structure des nucléons

- Neutrons et protons constitués de quarks

(1969)



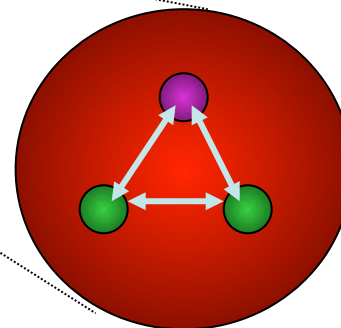
10^{-15} m



Proton :

2 quarks haut (*up*)

1 quark bas (*down*)



Neutron :

1 quark haut (*up*)

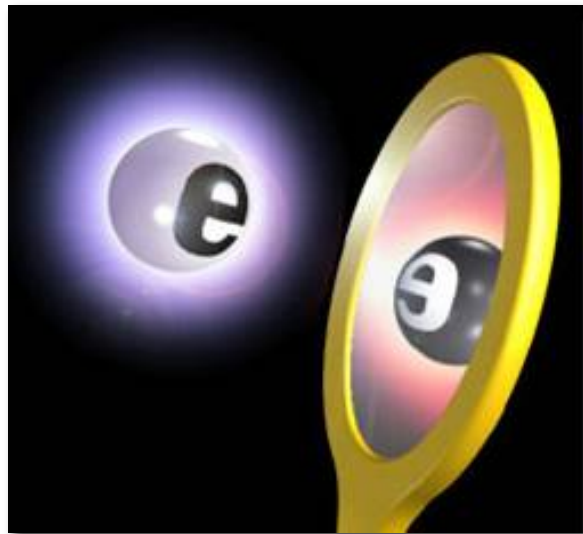
2 quarks bas (*down*)

Caractéristiques d'une particule

- Masse
 - Ex : proton $1,672 \times 10^{-27}$ kg
- Charge électrique
 - Charge $|e|$ de l'électron = unité de charge élémentaire
 - Électron $q=-1$, proton $q=+1$, neutron $q=0$
- Durée [ou temps] de vie τ
 - Particules stables / instables
 - Instable \Rightarrow « désintégration » (processus aléatoire)
 - Ex : un noyau radioactif peut se désintégrer en donnant un noyau plus léger et d'autres particules

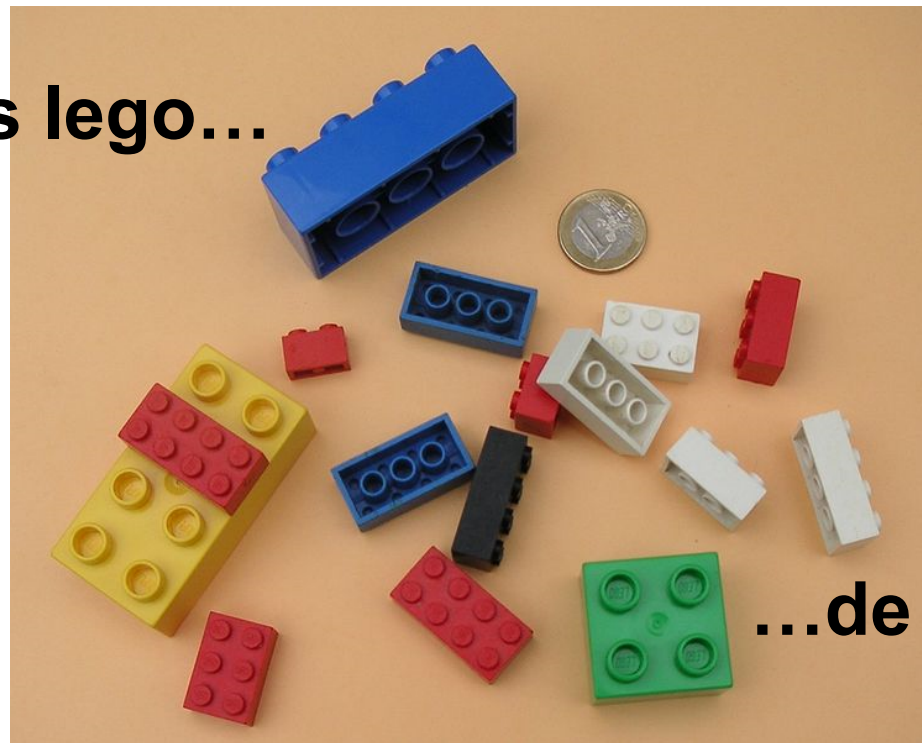
Particules et antiparticules

- Antimatière
 - Il existe une antiparticule pour chaque particule e^- e^+ , p \bar{p} , n \bar{n} ,
 - antimatière, qui peut être créée en même temps que la matière
- Matière et antimatière très semblable



Particules élémentaires

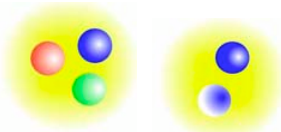
Les blocs lego...



...de la nature !

Les quarks

- Constituants élémentaires (sans structure interne connue)
 - des protons, des neutrons
 - de centaines d'autres particules
 - « hadrons »
- 6 « saveurs »
- Chargés et massifs
 - charge électrique $q = \pm 1/3, \pm 2/3$
 - Masses très différentes !



bas (down) Sa charge électrique est $-1/3$. Le proton en contient un, le neutron deux.	haut (up) Sa charge électrique est $+2/3$. Le proton en contient deux, le neutron un.
étrange (strange) Un compagnon plus lourd du "bas".	charme (charm) Un compagnon plus lourd du "haut".
beauté (beauty) Encore plus lourd.	sommet (top) Le dernier quark observé (en 1994)







+ 6 antiquarks

Les leptons

- Il existe 6 leptons différents :
 - 3 avec une charge électrique entière : l'électron et ses deux compères (le muon et le tau)
 - 3 neutrinos, chacun correspondant à une des 3 saveurs de leptons

- Les neutrinos ?
 - des particules « fantômes » qui interagissent pratiquement pas et qui ont une masse très très faible

+ 6 antileptons

Première Famille	électron Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1. 	neutrino électron Sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant. 
	muon Un compagnon plus massif de l'électron. 	neutrino muon Propriétés similaires à celles du neutrino électron. 
	tau Encore plus lourd. 	neutrino tau Propriétés similaires à celles du neutrino électron. 

Interactions fondamentales



Les 4 forces

qui régissent l'univers

Forces et interactions

- Forces
 - Intensité
 - attraction ou répulsion
 - nature des objets

Nombreuses forces dans notre environnement
mais pouvant être expliquées par 4 interactions
fondamentales

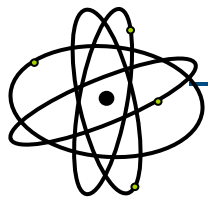
Interactions fondamentales

- Gravitation
 - phénomène de **pesanteur** (chute des corps)
 - orbites des planètes du **Système Solaire...**



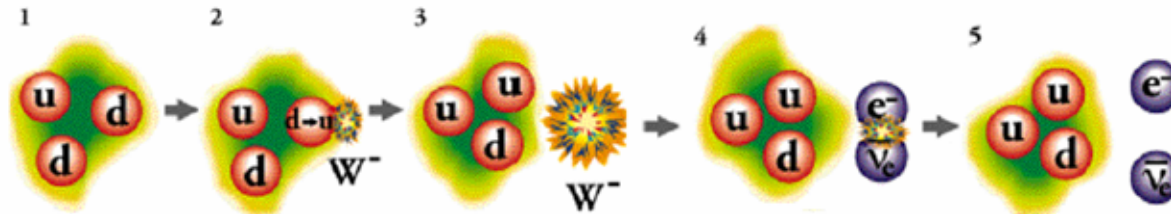
mais aussi les galaxies
l'évolution de l'Univers

- Electromagnétisme
 - Responsable des phénomènes **électriques et magnétiques**
 - Lumière, réactions chimiques et biologiques, cohésion des atomes...



Interactions fondamentales

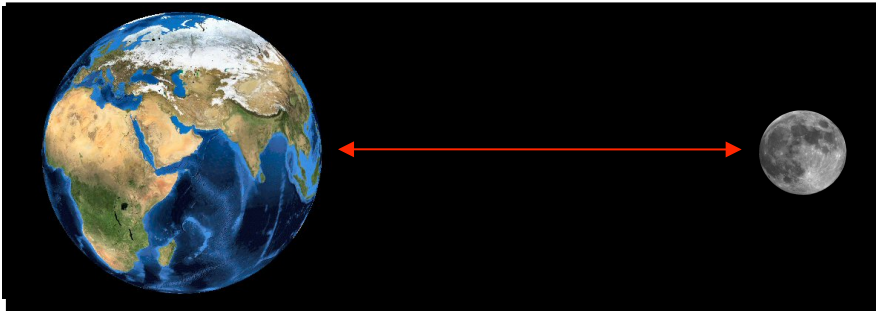
- Interaction faible
 - Responsable de la radioactivité « bêta »
 - Ex: désintégration du neutron



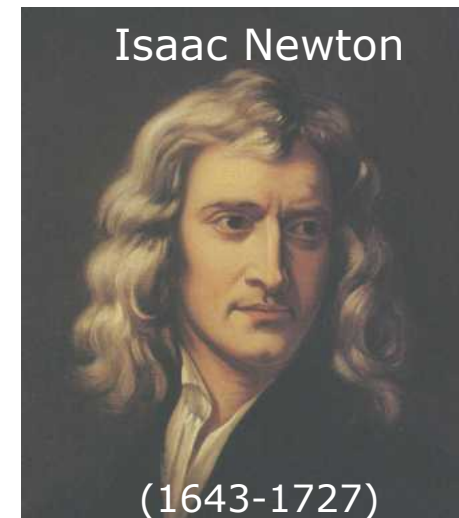
- Interaction forte
 - Elle est responsable de la cohésion
 - des nucléons dans le noyau atomique (explique l'existence de la matière que nous connaissons)
 - des quarks et anti-quarks dans les hadrons

Description classique

- Mécanique classique



- Action instantanée à distance

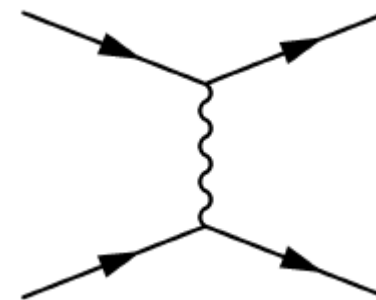
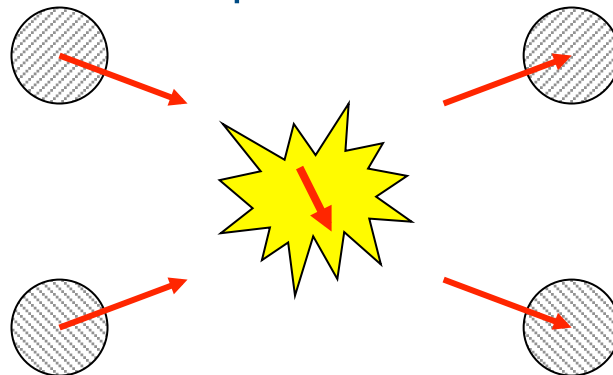


Description « moderne »

- Interaction entre particules = échange

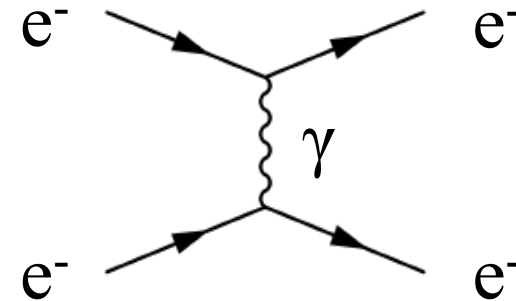


- Echange d'énergie et de quantité de mouvement entre deux particules via une particule médiatrice



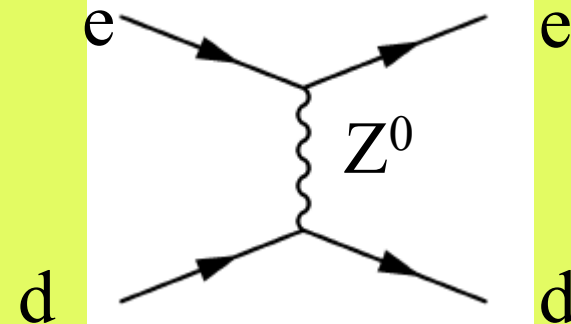
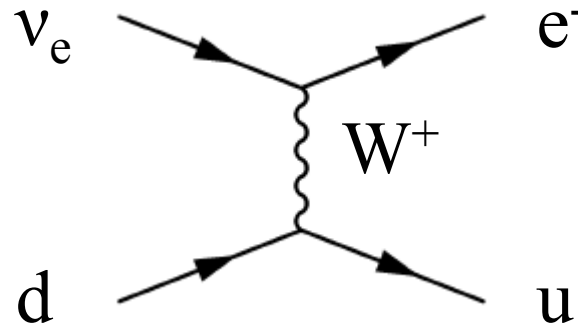
Interaction électromagnétique

- Échange de photons entre particules chargées
 - Photon, « grain de lumière »
 - Portée infinie



Interaction faible

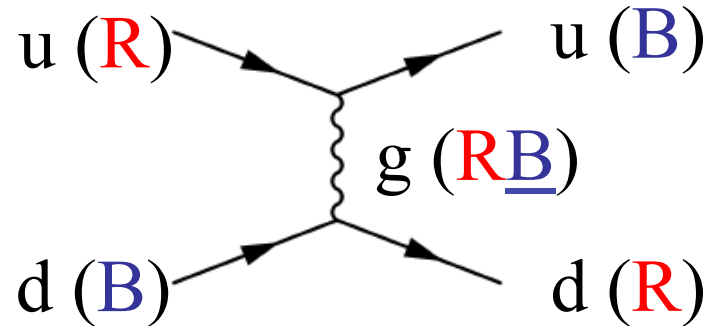
- Echange de bosons W^+ , W^- et Z^0
 - très massifs (80-90 GeV) !



- La portée de l'interaction faible est très limitée

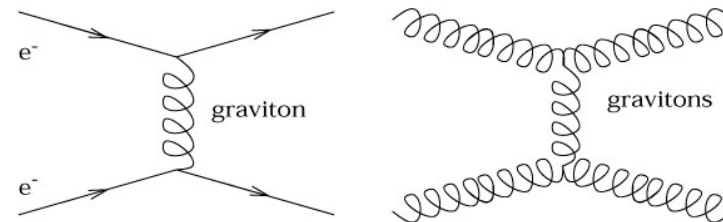
Interaction forte et gravité

- Echange de *gluons* entre particules colorées
 - Portée limitée par le confinement

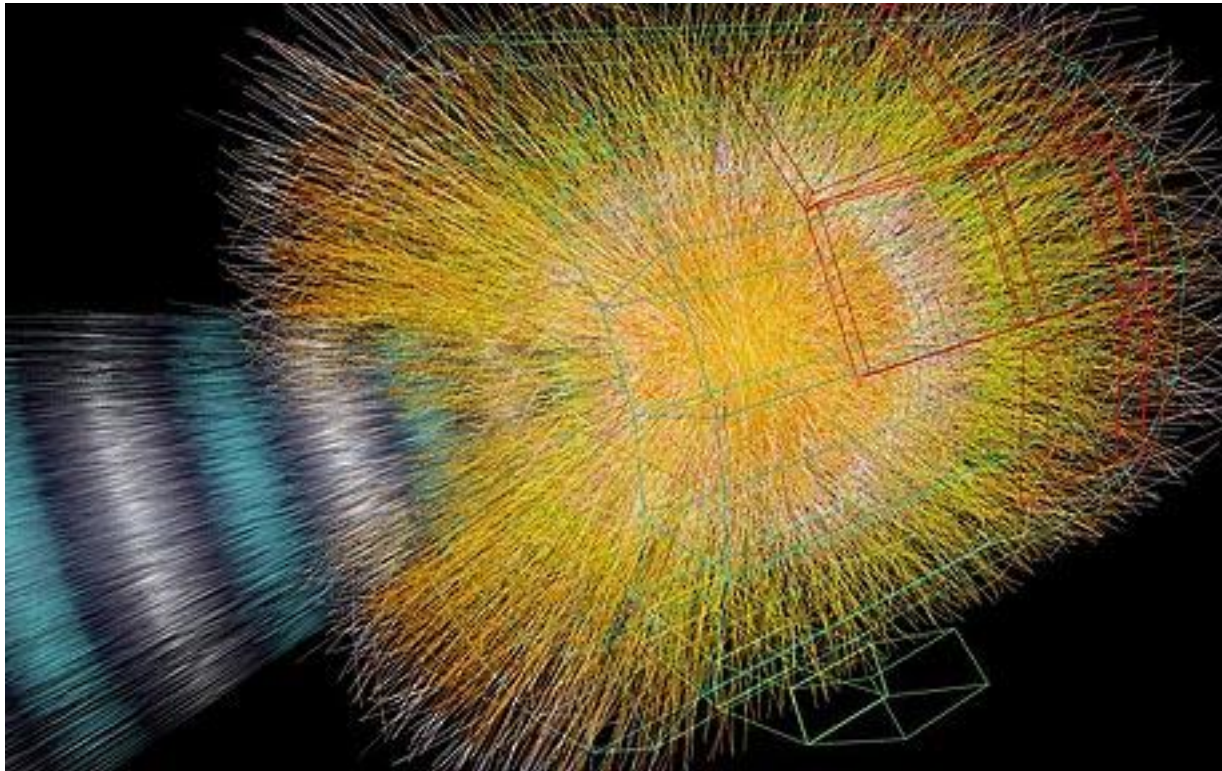


Interaction gravitationnelle

- Echange d'un ???
 - Graviton ?
 - Portée infinie



Energie et masse

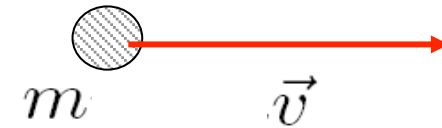


Energie - quantité de mouvement

- Mécanique classique

- Énergie cinétique : $E = 1/2 m v^2$

- Quantité de mouvement : $\vec{p} = m\vec{v}$



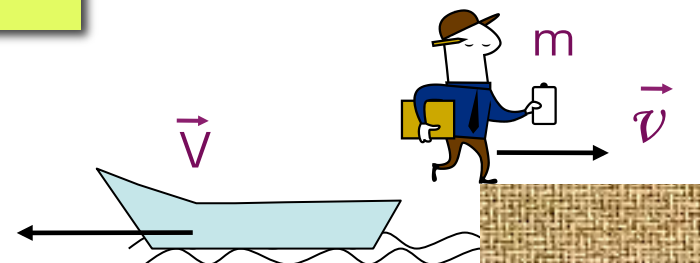
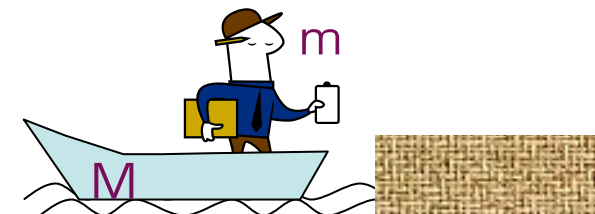
- Lois de conservation

1. Conservation de l'énergie
2. Si aucune force extérieure ne s'applique sur un système, la quantité de mouvement **totale** est conservée

- Ex : système homme+bateau

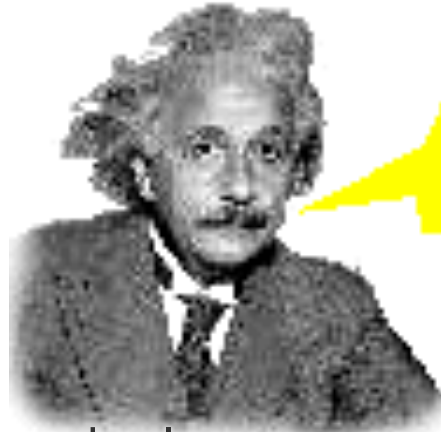
- $\vec{P} = 0$

- $m\vec{v} + M\vec{V} = 0 \Rightarrow \vec{V} = -m/M \vec{v}$



Equivalence masse – énergie

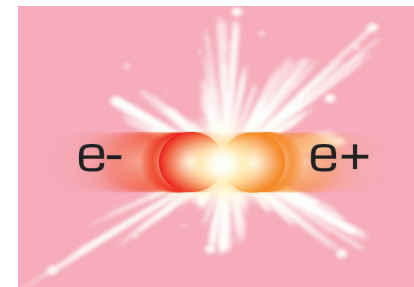
- Energie d'une particule au repos : $E_0 = mc^2$



La masse est juste
une forme d'énergie

- L'énergie d'une particule en mouvement dans le référentiel du laboratoire dépend
 - De sa masse
 - De sa quantité de mouvement

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$



© DESY, www.atelierchose.com

Annihilation matière-antimatière

- Antimatière + matière \rightarrow énergie



Si une particule « rencontre » son antiparticule, elles s'annihilent et leurs masses se transforment en une bouffée d'énergie.

C'est pour cela que l'antimatière survit très peu de temps dans un monde de matière !

- énergie \rightarrow antimatière + matière

Désintégration

C'est ce qui arrive aux particules « instables »

- Ex : noyaux radioactifs, neutron s'il est hors du noyau
- Plus la durée de vie de la particule est petite, plus elle a de chance de se désintégrer rapidement
- Une particule peut se désintégrer de différentes façons : « voies » de désintégration
 - Ex : $A \rightarrow b + c$, $A \rightarrow d + e$,
- Plus il y a de « voies » possibles, plus la durée de vie est courte

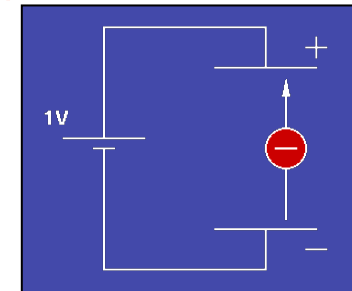
Les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement permettent de « reconstruire » (avec des équations) la masse de la particule A



Unités d'énergie

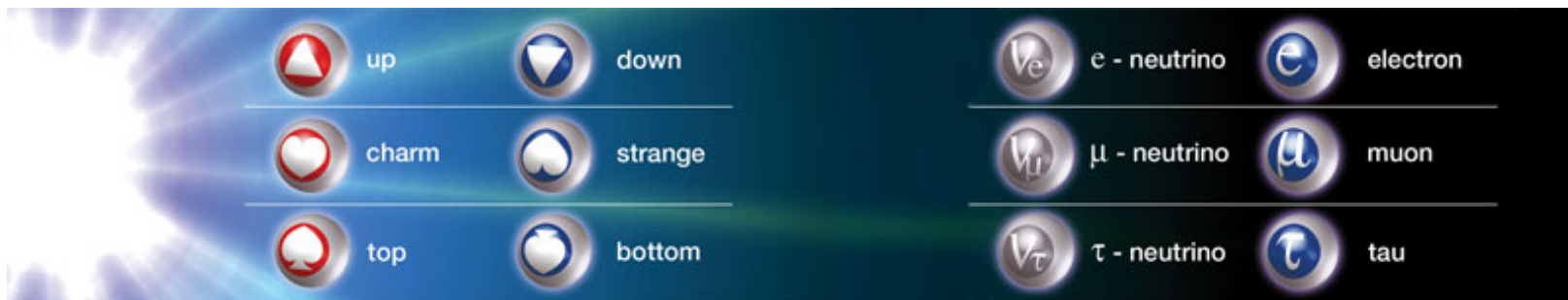
- électron-Volt
 - C'est l'énergie gagnée par un électron traversant un potentiel d'un Volt : $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ Joules}$
 - 1 MeV [mega-eV] : 1 million d'électron-Volts
 - 1 GeV [giga-eV] : 1 milliard d'électron-Volts

Électron
 $q = 1,602 \times 10^{-19}\text{C}$



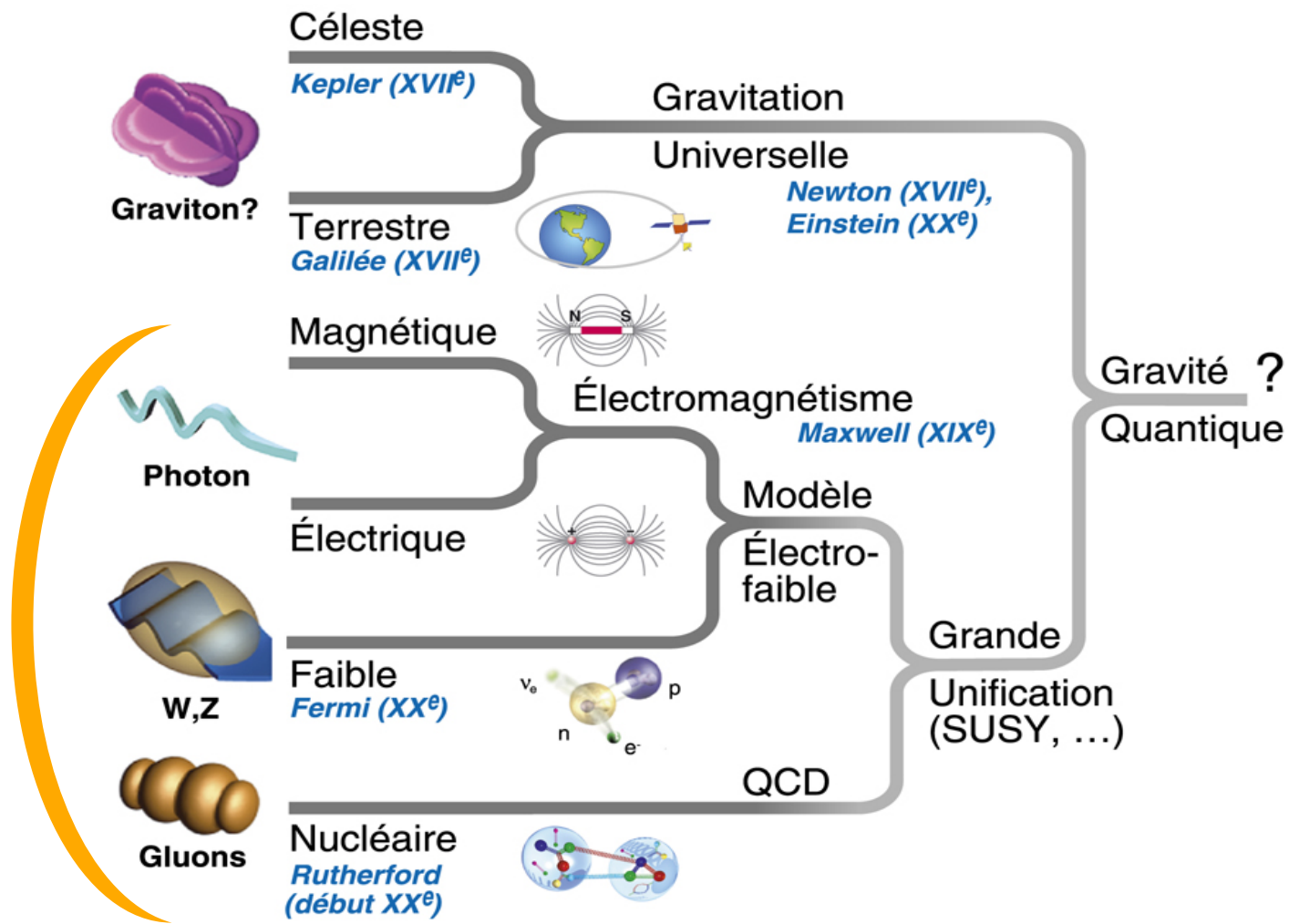
- Conséquence pratique de l'équivalence énergie-matière
 - on peut mesurer la masse dans des unités d'énergie divisées par c^2 , par exemple, en MeV/c^2 , ou GeV/c^2
 $1\text{GeV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-27}\text{kg}$
 - directement en unités d'énergie [MeV ou GeV].

Le modèle standard





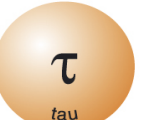




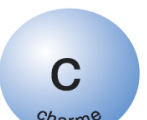




de la physique des particules

Unification des interactions ?

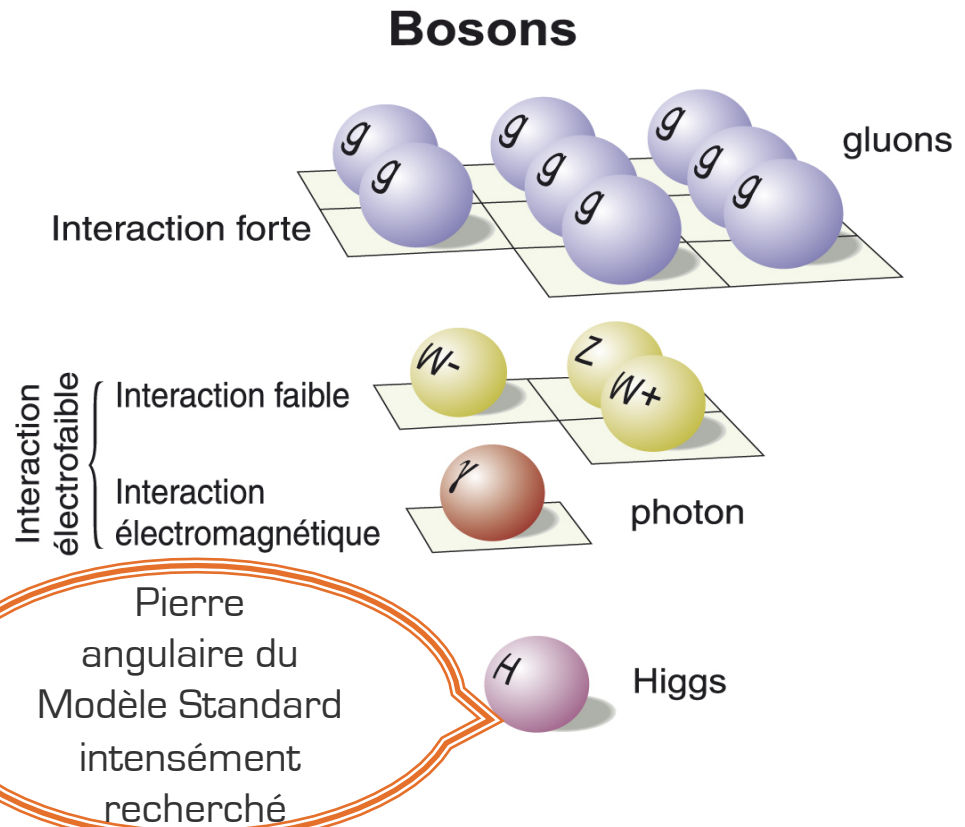


Le modèle standard

- Les particules
 - de matière

	Fermions		
Leptons	 e électron	 μ muon	 τ tau
	 ν_e neutrino électron	 ν_μ neutrino muon	 ν_τ neutrino tau
Quarks	 u up	 c charme	 t top
	 d down	 s étrangeté	 b beauté
	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}
	familles		

- des interactions



Le boson de Higgs

- Pourquoi des particules avec des masses ?
 - Ex : le photon a une masse nulle
les bosons W^- , W^+ et Z^0 sont massifs
- Le « mécanisme de Higgs »
 - **Masse** : caractéristique d'un corps à résister aux accélérations
 - Plus un corps est massif plus il est difficile de le mettre en mouvement
 - Une particule de **masse nulle** voyage à la **vitesse de la lumière**:
 - Ex : le photon
 - Une **particule massive** voyage à une vitesse **inférieure** à la vitesse de la lumière
 - Qu'est ce qui ralentit cette particule?
 - Interaction avec un autre type de particule
 - entraîne l'existence d'une particule mystérieuse : **le boson de Higgs**.
- La chasse au boson de Higgs est ouverte au LHC !!!



Les questions ouvertes

Bosons de Higgs ?

Supersymétrie ?

Théorie des cordes ?

Matière noire ?

Grande unification ?

Energie noire ?

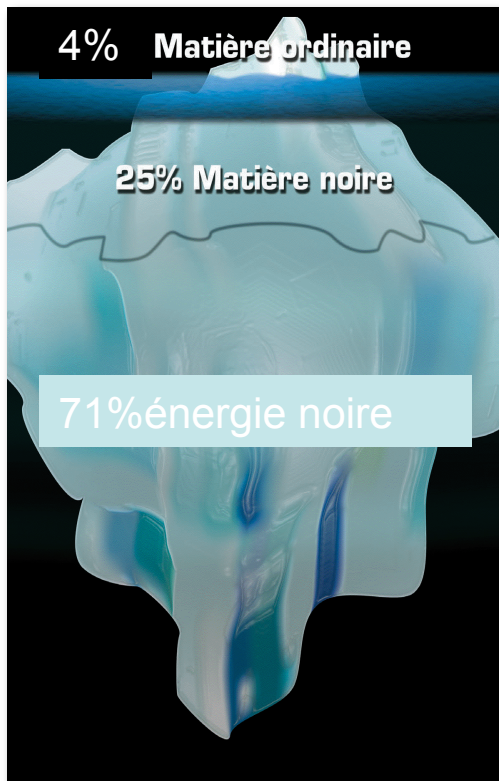
Dimensions supplémentaires ?

Les questions ouvertes

- Quel mécanisme donne leur masse aux particules?
 - Le boson de Higgs existe t'il?
- Pourquoi 3 familles ?
- Pourquoi l'antimatière est-elle si rare ?
 - L'univers semble n'être fait que de matière
où est l'antimatière ? Pourquoi et comment a-t-elle disparu ?
- Les forces de la nature ont-elles une origine commune?
- Comment introduire la gravité dans le modèle standard ?
- Notre espace-temps a-t-il plus de quatre dimensions ?
- Les théories « au-delà du Modèle Standard » telles que la « supersymétrie » ou la « théorie des cordes » seront-elles un jour vérifiées ?

Les questions ouvertes

- La matière connue ne représente que 4% de l'univers



© SLAC

- L'observation du mouvement des galaxies et la mesure de l'expansion de l'Univers amènent à penser que $\sim 96\%$ de l'Univers est de nature inconnue.
- Les 4% identifiables englobent masse (étoiles, planètes, gaz) et énergie (lumière).
- Les 96% restants font l'objet de deux hypothèses majeures : matière noire et énergie noire ...

Conclusions

Bien des questions attendent les générations de physiciens à venir

Mais en attendant, nous allons prendre la route des expériences