

# PHYSIQUE DES PARTICULES



**Arnaud Duperrin (CPPM)**

**Ecole IN2P3 sur les  
techniques de base des  
détecteurs, Cargèse,  
Mars 2009**

## Contenu

- **1** - Panorama de l'infiniment petit
- **2** - Les particules et leurs signatures
- **3** - Les instruments : machines et détecteurs
- **4** - 100 ans d'exploration

# CHAPITRE

Mars 2009, Ch. de la Vaissière, F.Hubaut, O. Leroy, J. Cogan, A. Duperrin

## *Panorama de l'infiniment petit*

### Plan



- 1 - Unités et ordres de grandeur
- 2 - Pourquoi faut-il des hautes énergies ?
- 3 - Plongée dans l'infiniment petit
- 4 - Autres formes de matière
- 5 - Les interactions
- 6 - Les préoccupations des physiciens

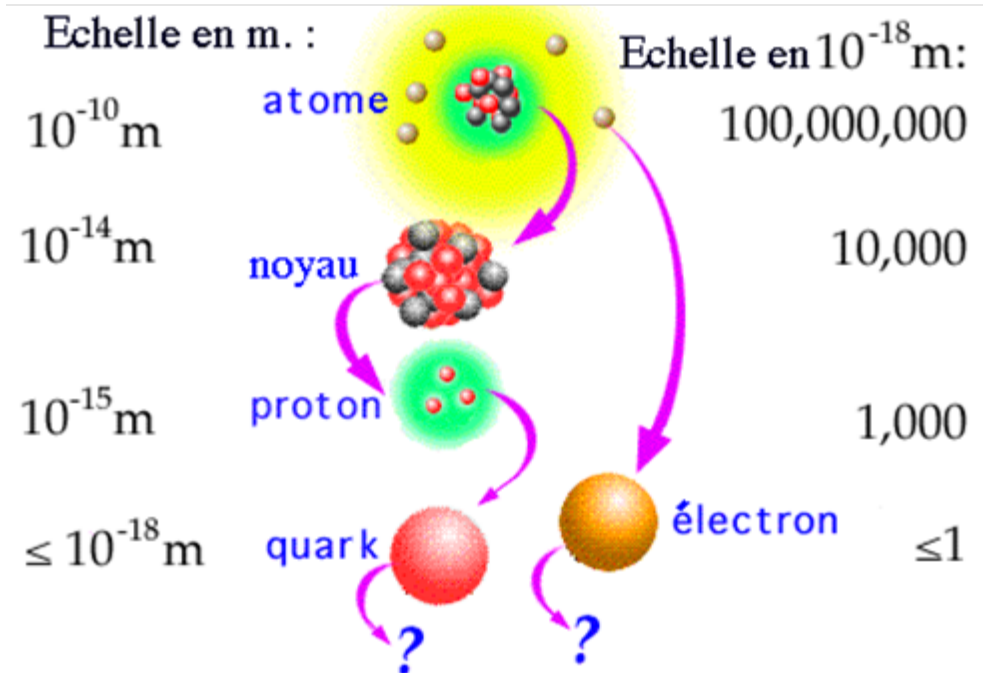
## § 1.1 - Unités et ordres de grandeur

### Un monde extrême

- Avant de plonger dans l'infiniment petit, il convient de fixer des échelles dans le temps et dans l'espace
- Les unités usuelles sont inadaptées
- Il faut changer repères et habitudes

# § 1.1 - Unités et ordres de grandeur

## Longueurs



- Les dimensions des atomes sont de l'ordre de l'**angström**, soit  $10^{-10}$  m ou un dixième de nanomètre ou un dix-millième de micron

➤ Un milliard d'atomes = 10 cm



- La dimension d'un proton, composant du noyau, est de l'ordre du femtomètre ou **fermi**, soit  $10^{-15}$  m

➤ Un milliard de protons = 1  $\mu$ m



# § 1.1 - Unités et ordres de grandeur

## Les vitesses

- Vitesse limite: la vitesse de la lumière dans le vide

- ▶  $c = 299792,458 \text{ km /s}$
- ▶ rien ne peut aller plus vite
- ▶ la lumière met 8 minutes pour venir du Soleil



$c = 300\ 000 \text{ km /s}$

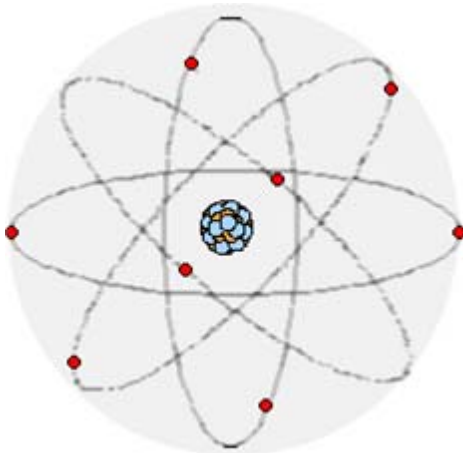
- A l'intérieur des protons, les vitesses des corpuscules comme les quarks s'approchent de la vitesse de la lumière

- ▶ Il en est de même pour toutes les particules produites dans les collisions de haute énergie



$v \text{ entre } 0,1 c \text{ et } c$

- Les électrons d'un atome sont loin d'être aussi rapides, mais leur vitesse reste très grande

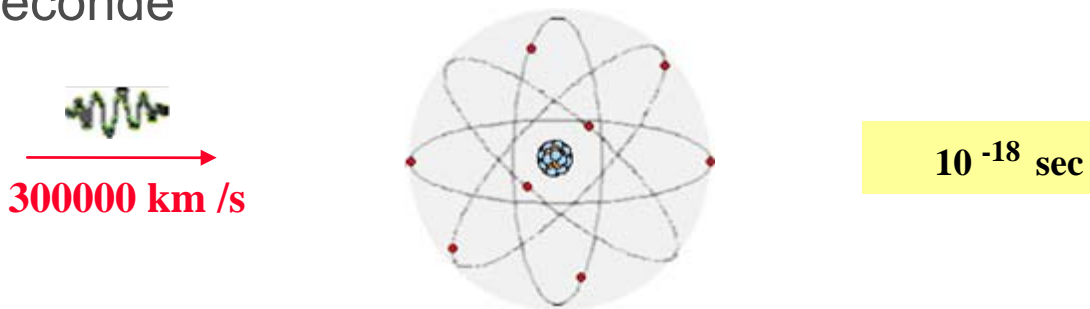


$v \text{ environ } 0,01 c$

## § 1.1 - Unités et ordres de grandeur

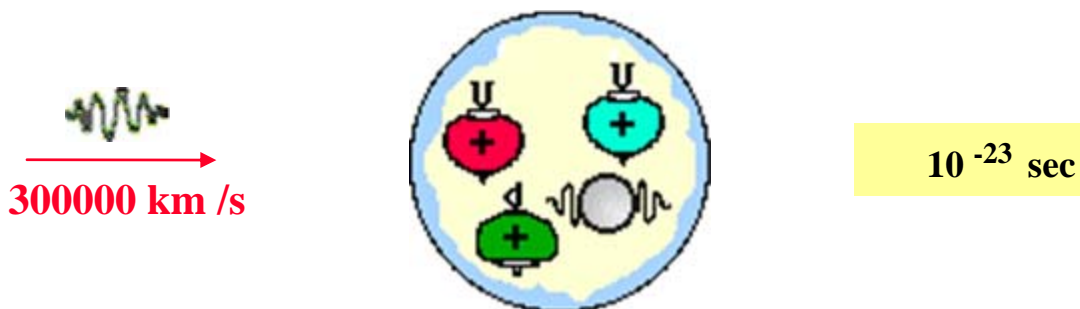
### Les échelles de temps

- Pour traverser un minuscule atome, la lumière met une fraction de milliardième de milliardième de seconde



- En une seconde, un électron animé d'une vitesse de 3000 km /s (le centième de la vitesse de la lumière) fait à peu près autant de tours de son atome qu'un milliard d'hommes auront de battements de cœur pendant un siècle.

- Les fréquences des phénomènes qui agitent les quarks à l'intérieur de la matière nucléaire sont encore beaucoup plus élevées



## § 1.1 - Unités et ordres de grandeur

### La multitude et le nombre d'Avogadro

- La contrepartie de l'extrême petitesse des atomes est leur très grand nombre.
- Dans un centimètre cube d'eau, il y a autant d'atomes d'oxygène et d'hydrogène que de gouttelettes d'eau dans la Méditerranée.
  - Visiter l'atome, c'est en quelque sorte passer de l'échelle de la Méditerranée à celle d'une goutte d'eau



- Nombre d'Avogadro
  - ▶ Nombre d'atome dans 12 g de carbone 12 (def de la mole)

$$N = 6.022 \cdot 10^{23}$$



## § 1.1 - Unités et ordres de grandeur

### Les énergies

- Elles sont à la fois infimes, car elles concernent de minuscules corpuscules ...
- ...et **très importantes à leur échelle**,
  - car ces corpuscules circulent à des vitesses proches de celle de la lumière.
  - ex.: **1 TeV** (Tevatron, LHC) = énergie cinétique d'un moustique en vol. Ici concentrée dans un volume mille milliards de fois ( $10^{12}$ ) inférieur au moustique
- Les énergies en jeu deviennent énormes, dès qu'un grand nombre de corpuscules ou de noyaux sont impliqués :
  - explosion nucléaire
  - réacteurs
- Fission atome uranium 235 : réaction en chaîne
  - Énergie libérée par une fission:  $\Delta mc^2 = 3.2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$
  - Dans 1 gramme d' $\text{U}_{235}$  :  $N = 6.022 \times 10^{23} / 235$  noyaux



**Energie libérée:**

**$8.2 \cdot 10^7 \text{ kJ/g d'U}_{235}$**

**ou 22800 kWh/g**

NB : kJ/g = kilo Joule/gramme



## § 1.1 - Unités et ordres de grandeur

### Unités d'énergie

- L'électronvolt ( **eV** ) est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt

- La charge de l'électron valant  $1.6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb,

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

- Une unité qui marie l'infiniment petit (la charge de l'électron) et la physique usuelle (le Volt)

- Cette minuscule unité est adaptée aux phénomènes moléculaires et chimiques...

- Les énergies de liaisons des électrons externes des atomes sont de l'ordre de l'électronvolt

- ... mais pas aux énergies mises en jeu en physique des particules

- On utilise fréquemment le **GeV**, le milliard d'électron-Volt ou «Giga électronvolt»...

$$1 \text{ GeV} = 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ Joule}$$

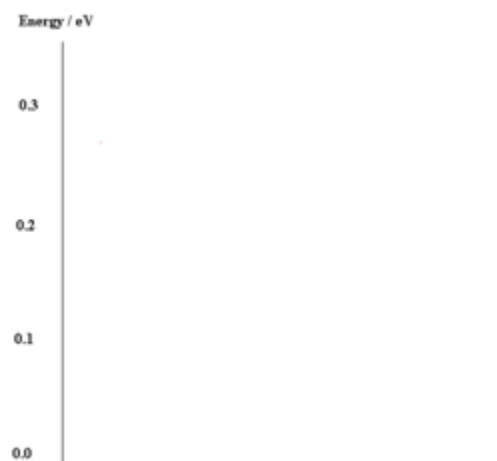
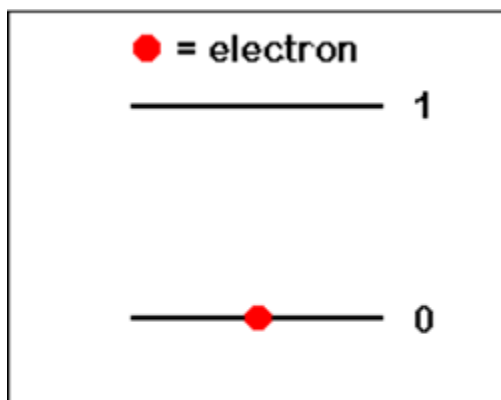
- Le GeV correspond grosso-modo à l'énergie des quarks et gluons présents dans un proton

- ... ou le TeV (Tevatron, LHC) : «Téra électronvolt»

## § 1.1 - Unités et ordres de grandeur

### Les comportements

- Dans l'infiniment petit où les extrêmes se côtoient, les lois de la physique usuelle présentent des aspects inhabituels.
- On étudie des phénomènes où entrent en jeu quelques corpuscules élémentaires ...
- ...alors que les objets de la vie courante sont composés d'une quasi-infinité de corpuscules élémentaires.
  - ▶ Les phénomènes à notre échelle sont collectifs.
- L'étude des interactions de corpuscules «individuels» met en lumière que :
  - ▶ Des **corpuscules** se comportent aussi comme de minuscules **ondes**
  - ▶ Ces ondes-corpuscules sont soumises à des «**quantifications**»
  - **La charge électrique est multiple d'une charge élémentaire**
  - **Les énergies des électrons dans un atome sont discontinues et imposées.**



## § 1.2 - Pourquoi faut-il des hautes énergies ?

### Deux raisons principales

- Sonder la matière à des échelles de plus en plus petites
  - Les accélérateurs jouent le rôle de microscopes



- Produire de nouvelles formes de matière coûteuses en énergie
  - Recréer des particules très instables

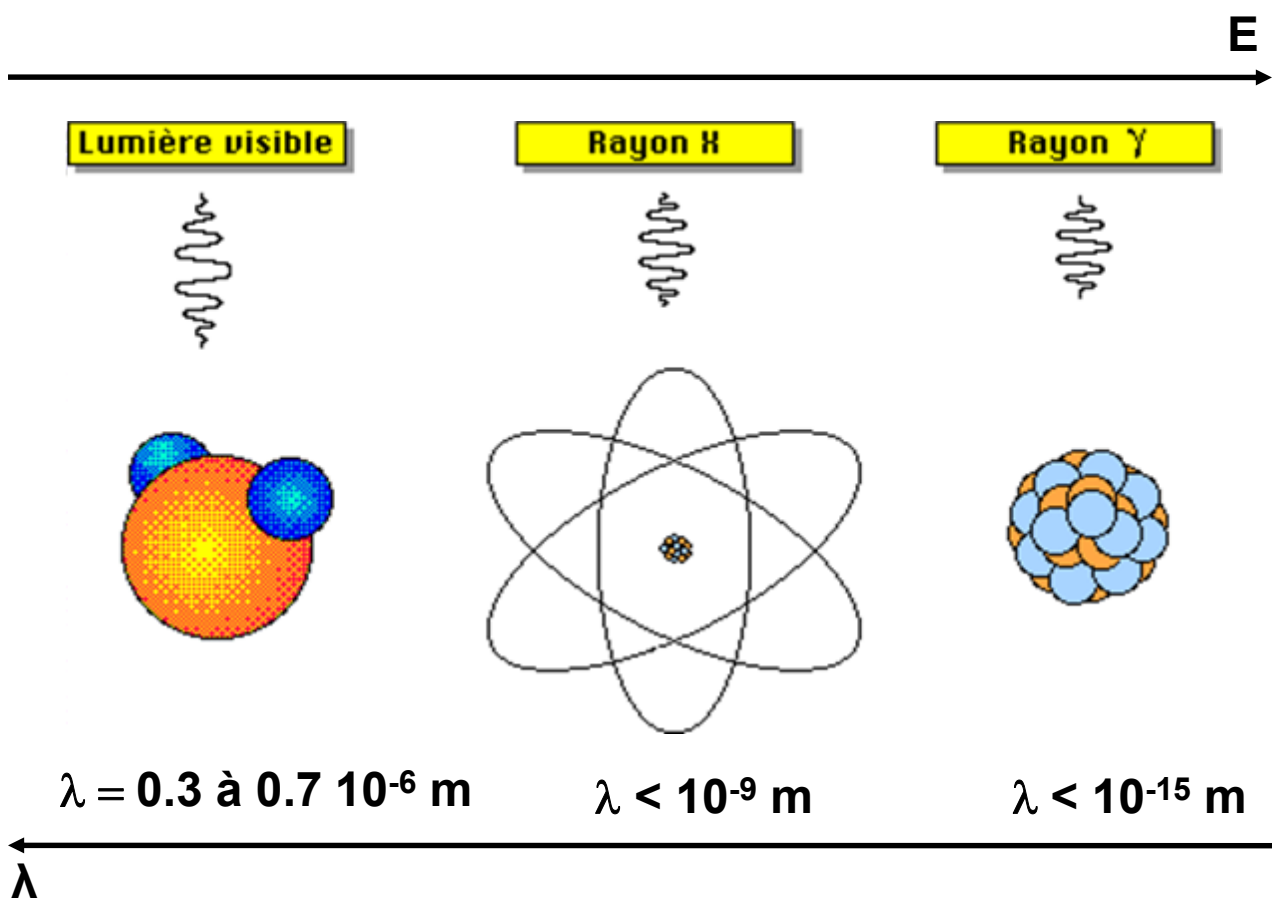
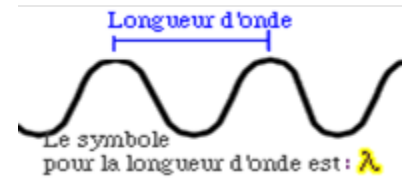


## § 1.2 – Pourquoi faut-il des hautes énergies ?

Voir de plus en plus petit...

- Exemple de la lumière
- Le produit de l'énergie  $E$  par la longueur d'onde  $\lambda$  est une constante

$$E \lambda = 1.24 \cdot 10^{-6} \text{ eV.m}$$



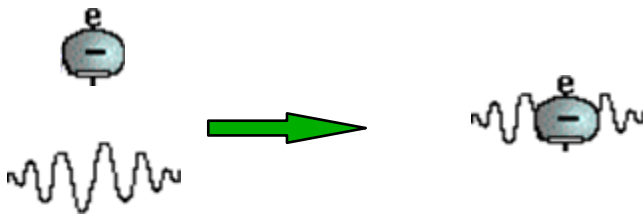
Avec des photons d'énergie donnée on ne peut pas sonder des détails plus petits que  $\lambda$

## § 1.2 – Pourquoi faut-il des hautes énergies ?

### Voir de plus en plus petit... (suite)

#### ■ L'aspect ondulatoire est général

- ▶ Comme la lumière, on peut représenter tout corpuscule comme une onde
- ▶ Découverte de Louis de Broglie



Louis de Broglie (1892-1987)  
Prix Nobel 1929



- ▶ « L'idée fondamentale de [ma thèse de 1924] était la suivante : toute particule, comme l'électron, doit être transportée par une onde dans laquelle elle est incorporée »...

#### ■ Double aspect corpusculaire et ondulatoire

- ▶ Par exemple : On observe des effets d'interférence avec des «particule» comme les électrons

#### ■ Généralisation de la formule du photon :

A une particule d'impulsion  $P$ , est associée une longueur d'onde  $\lambda$

$$\lambda(\text{m}) = 1.24 \cdot 10^{-15} / P(\text{GeV}/c)$$

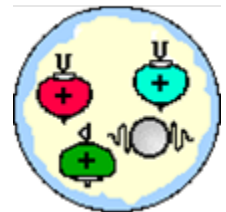
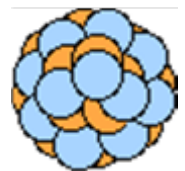
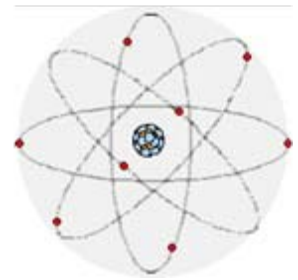
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- On ne peut voir que des détails de l'ordre de  $\lambda$

## § 1.2 – Pourquoi faut-il des hautes énergies ?

### ... pour sonder la matière

- L'électron est un projectile idéal car ...
  - ▶ il peut être dirigée sur une cible
  - ▶ on réduit sa longueur d'onde en l'accélérant
  - ▶ il est « élémentaire »
- Avec un électron ou photon de 10 keV/c
  - $\lambda = 1.24 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
  - ▶ exploration de l'atome
- Avec un électron de 1 GeV/c
  - $\lambda = 1.24 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
  - ▶ L'électron voit un nucléon
- Avec un électron de 100 GeV/c
  - ▶  $\lambda = 1.24 \cdot 10^{-17} \text{ m}$
  - ▶ exploration du proton ou neutron (quarks)



**Plus on grimpe en énergie,  
plus on sonde petit**

## § 1.2 – Pourquoi faut-il des hautes énergies ?

### Produire de nouvelles particules

- Equivalence matière - énergie
- La production d'une particule de masse  $m$  requiert de l'énergie
  - ▶ Méthode simple des anneaux de collisions
  - ▶ Deux particules identiques, de même énergie  $E$ , allant en sens inverse et dont les quantités de mouvement  $P$  sont égales et opposées



- Pour produire  $m$  il faut ...

$$E + E > m c^2$$

- ▶ Il faut 2 fois plus d'énergie quand la particule  $m$  doit être produite par paires.
- Exemples historiques : il a fallu
  - ▶ SPEAR (SLAC, USA, 1974) : 3.1 GeV pour produire une paire de quarks  $c$
  - ▶ CLEO (Cornell U, USA, 1980) : 10.4 GeV pour produire une paire de quarks  $b$
  - ▶ LEP (CERN, 1990) : 92 GeV pour produire le boson  $Z^0$
  - ▶ Tevatron (Fermilab, USA, 1995) : 1.4 TeV pour produire le quark  $top$

## § 1.3 - Plongée dans l'infiniment petit

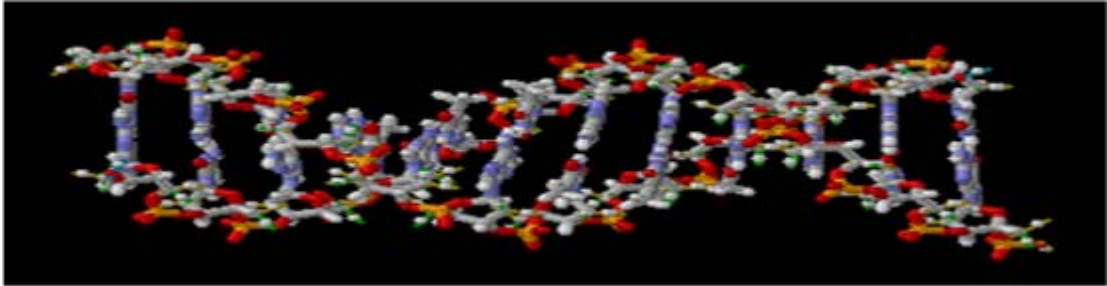
### Brève revue de la matière qui nous entoure et de ses constituants

- **Atomes** : « insécable » en grec  
quelque chose que l'on ne peut  
découper en morceaux
- On est loin du compte ...
- Un jeu de poupées russes
  - Molécules
  - atomes
  - noyaux
  - nucléons ( neutrons et protons)
  - quarks

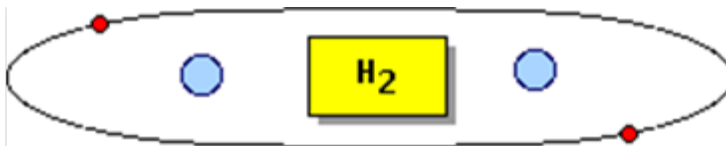


## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Molécules



- Les molécules sont des assemblages d'atomes
  - ▶ Molécule la plus simple:  $H_2$
  - ▶ Molécule la plus complexe (ADN), contient des milliers d'atomes
- La dimension des molécules va de quelques dixièmes de nanomètre à ... un mètre
  - ▶ Un ADN déplié atteint le mètre
- Les atomes tiennent ensemble en partageant des électrons
  - ▶ Liaisons chimiques = mise en commun d'électrons
  - ▶ Exemple de la molécule d'hydrogène  $H_2$  → 2 électrons



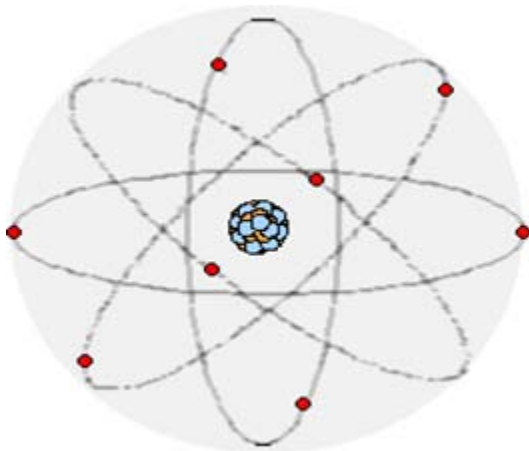
- ▶ Exemple de la molécule d'eau  $H_2O$  → 10 électrons
  - 6 pour l'oxygène (couches internes)
  - 2 partagés entre O et le 1<sup>er</sup> H
  - 2 partagés entre O et le 2<sup>nd</sup> H



## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Atomes

- Atome = insécable en grec (atomos)
- La dimension typique d'un atome est le dixième de nanomètre ( $10^{-10}$  m)
- Mais à cette échelle, ce n'est presque que du vide
  - ▶ "L'atome, c'est comme un pépin de mandarine sur l'obélisque de la Concorde avec des poussières tournant autour de la place" (Frédéric Joliot-Curie).
  - ▶ Toute la matière, ou presque, se retrouve concentrée dans un minuscule **noyau**
    - minuscule: cent mille fois plus petit ( $10^{-15}$  m)
    - dense: comporte presque toute la masse
  - ▶ Le reste, c'est du **vide** où circulent des **électrons** deux mille fois plus légers : 99.97% de la masse d'un atome est dans son noyau.
  - ▶ Si on supprimait le vide qu'il y a autour des noyaux des atomes, la Terre pourrait tenir dans une sphère de seulement 180 m de rayon !



Le modèle planétaire: un système solaire miniature, un sigle trompeur...

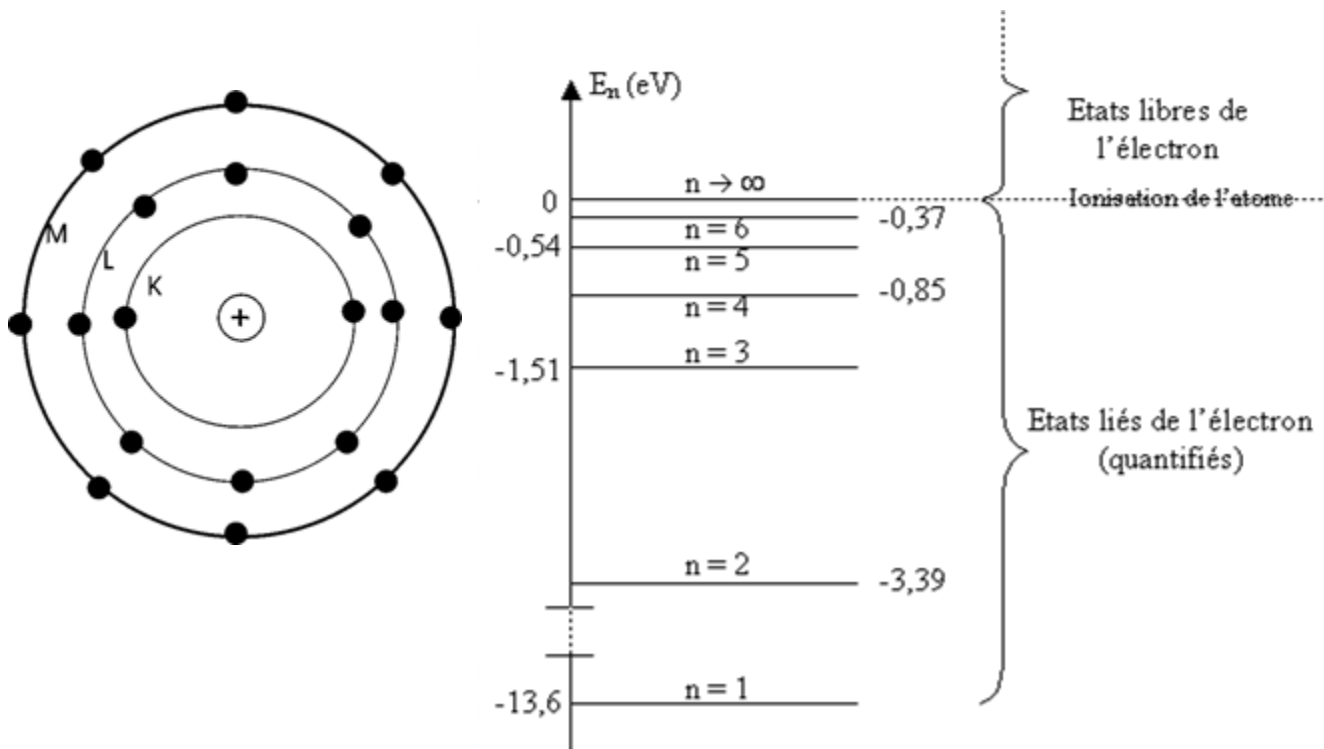
Image due à Rutherford en 1911. Mais les électrons ne décrivent pas des orbites immuables, ils se partagent des territoires.

## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Le cortège électronique des atomes

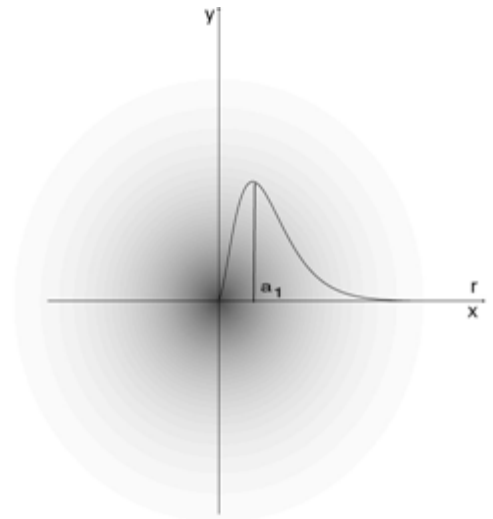
#### ■ Modèle de Bohr

- ▶ seules certaines « orbites » sont permises
- ▶ ces orbites correspondent à des niveaux d'énergie



#### ■ Les électrons sont des objets quantiques

- ▶ à la fois ondes et corpuscules
- ▶ décrit par des fonctions d'onde
- ▶ il ne peuvent pas être localisés infiniment précisément



# § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

## Diversité atomique

- L'atome est électriquement neutre:
  - ▶ le noyau est chargé positivement.
  - ▶ les électrons, chargés négativement, compensent la charge électrique du noyau.
- La charge du noyau détermine:
  - ▶ Le nombre d'électrons
  - ▶ le caractère des liaisons atomiques
  - ▶ le type d'élément chimique

Etat physique du corps simple(25°C, 1 atm)																		
SOLIDE										LIQUIDE				GAZEUX			SYNTHESE	
* Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
# Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			
1																	18	
1	H																He	
2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La'	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									

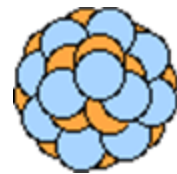
## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Noyaux

- Les noyaux sont constitués de **protons et de neutrons**.
  - ▶ Les protons sont chargés positivement.
  - ▶ Les neutrons sont électriquement neutres.
  - ▶ Protons et neutrons sont appelés **nucléons**.
- Pour maintenir l'ensemble il faut une force très intense, qui l'emporte sur la répulsion électrostatique des protons
  - ▶ Cette « colle » est la **force nucléaire**. Elle ne se fait pas sentir en dehors du noyau.
- Les noyaux varient de 1 à 238 nucléons:
  - ▶ Noyau le plus simple : H = 1 proton
  - ▶ Noyau léger :  $^{16}\text{O}$  = 8 protons, 8 neutrons
  - ▶ Noyau lourd :  $^{238}\text{U}$  = 92 protons, 136 neutrons



**Noyau d'hydrogène**



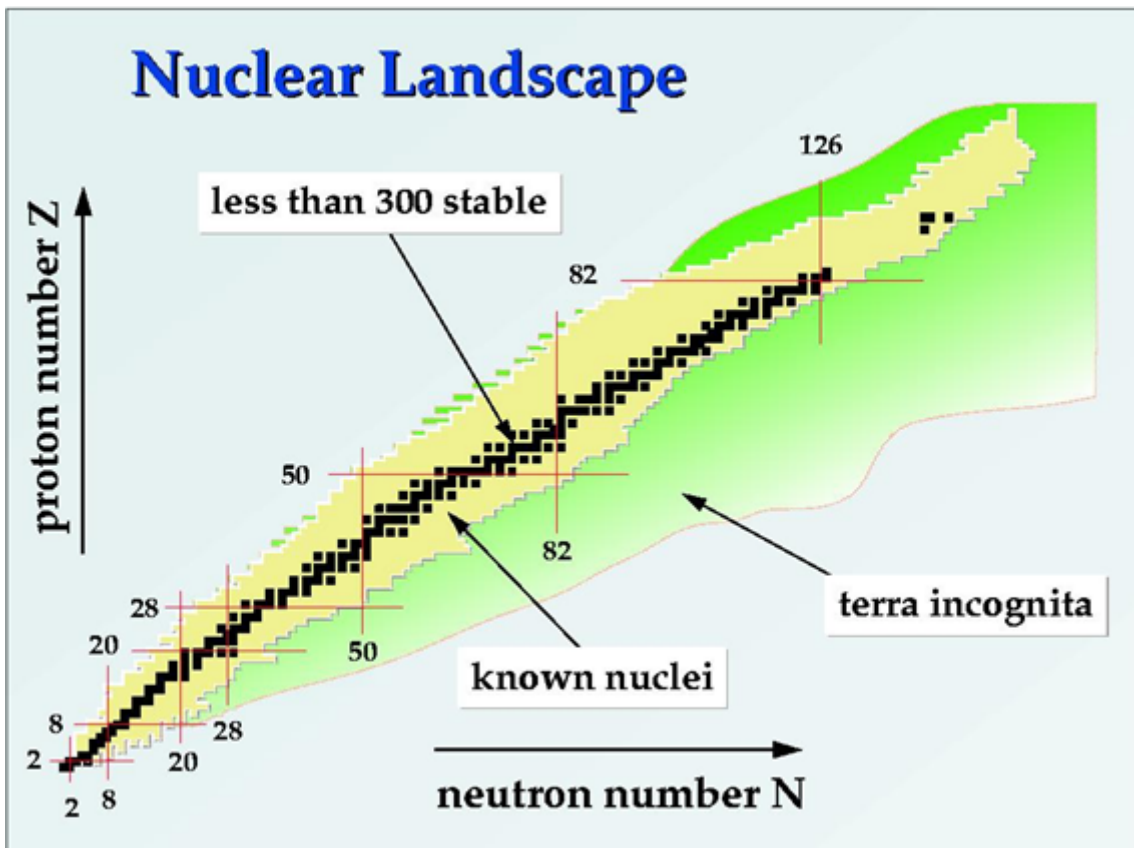
**Noyau lourd**

- Isotopes:
  - ▶ noyau avec le même nombre de protons (et donc d'électrons)
  - ▶ mêmes propriétés chimiques
  - ▶ nombre de neutrons différents
  - ▶ exemple:
    - $^{14}\text{C}$  : isotope radioactif du  $^{12}\text{C}$
    - $^2\text{H}$  : 1 proton + 1 neutron (présent dans l'eau lourde)

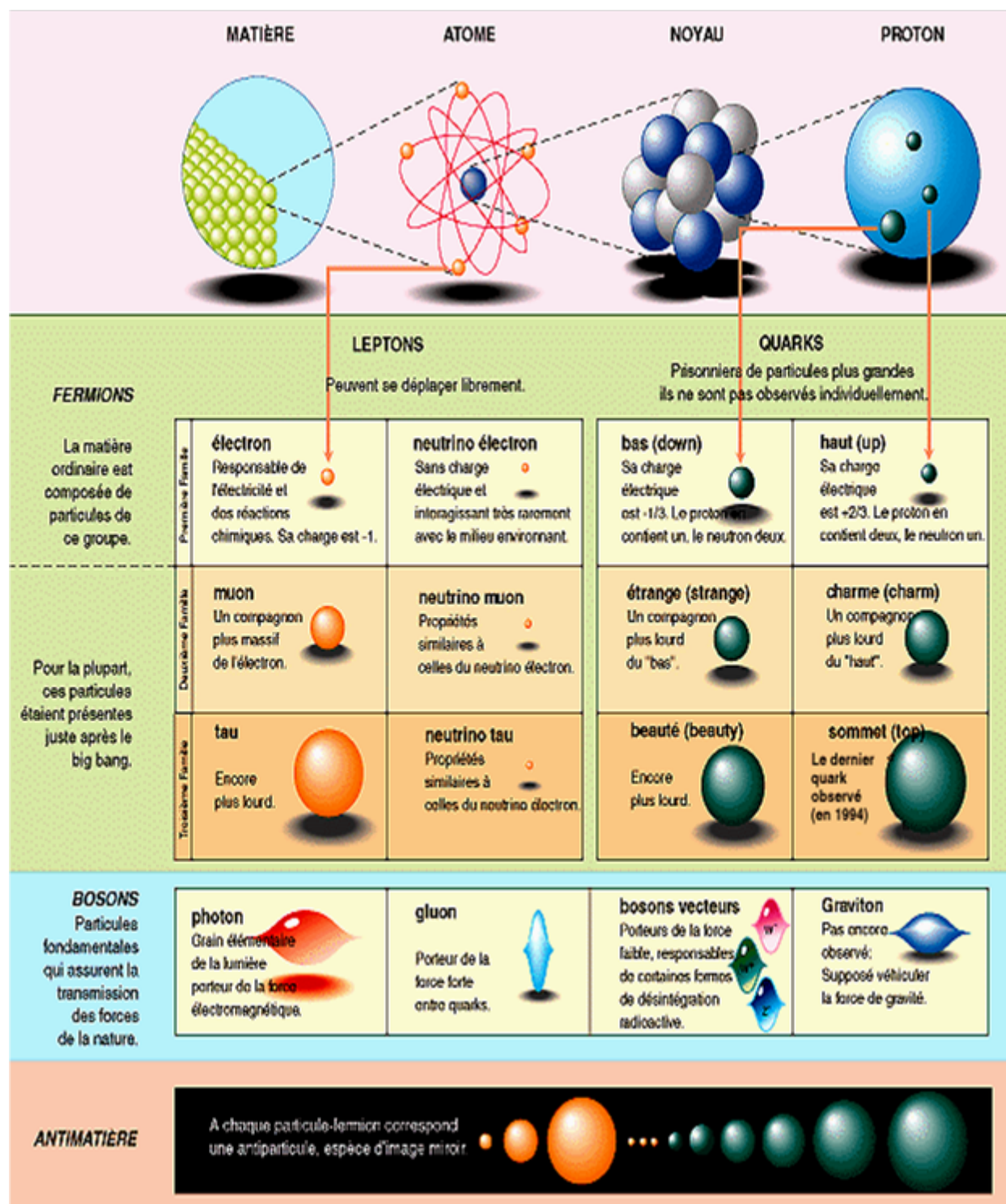
## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Stabilité nucléaire

- Les noyaux stables
  - ▶ comportent à peu près autant de neutrons que de protons
- Certains noyaux sont instables
  - ▶ se désintègrent spontanément
  - ▶ 3 types:
    - $\alpha$  : émission d'un noyau d'hélium
    - $\beta$  : émission d'un électron et d'un neutrino
    - $\gamma$  : rayon gamma (très énergétique)



# Panorama des particules



## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Protons et neutrons

- Proton et neutrons sont les composants du noyau
  - ▶ Ils se ressemblent beaucoup
  - ▶ Protons chargés positivement, neutrons neutres.
  - ▶ Charge du proton = unité de charge élémentaire
- Le proton est stable : sa durée de vie est quasi infinie ( $>10^{34}$  années !!)
- Libre, le neutron est instable
  - ▶ Sa durée de vie est environ de 15 minutes ... une éternité en physique des particules
    - il se désintègre spontanément (désintégration  $\beta$ ):  
neutron  $\rightarrow$  proton + électron + neutrino
  - ▶ A l'intérieur du noyau, le neutron est stable
    - « il n'a pas la place pour se désintégrer »
  - ▶ Il est produit dans les réacteurs nucléaires
  - ▶ C'est un projectile de choix pour briser les noyaux :
    - Il n'est pas repoussé par la charge électrique
    - son intrusion peut rompre l'équilibre délicat des nucléons et rendre le noyau instable

#### PROTON

$$\begin{aligned} Q &= e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ m &= 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ R &= 10^{-15} \text{ m} \end{aligned}$$

$$E = mc^2$$

soit 938 millions d'électronvolts

ou 0.938 GeV

#### NEUTRON

$$\begin{aligned} Q &= 0 \\ m &= 1.68 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ R &= 10^{-15} \text{ m} \end{aligned}$$

$$E = mc^2$$

soit 940 millions d'électronvolts

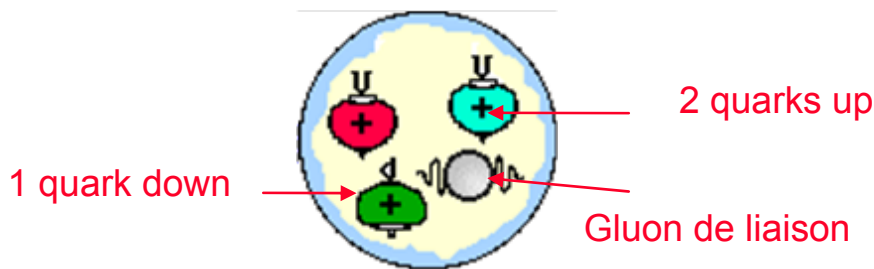
ou 0.940 GeV



## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

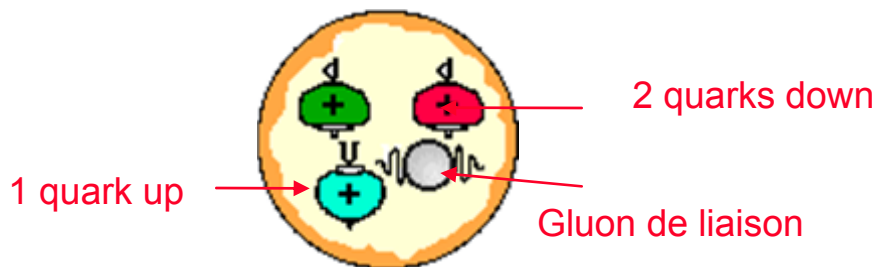
### Protons et neutrons

- Les briques ultimes des protons et neutrons sont des corpuscules appelés **quarks**
- Il y a 2 espèces de quarks dans les nucléons:
  - ▶ **up** (noté u) : charge  $2/3$
  - ▶ **down** (noté d) : charge  $-1/3$
- Proton = 2 quarks up et un quark down



$$Q = 2e/3 + 2e/3 - e/3 = e$$

- Neutron = 2 quarks down et un quark up

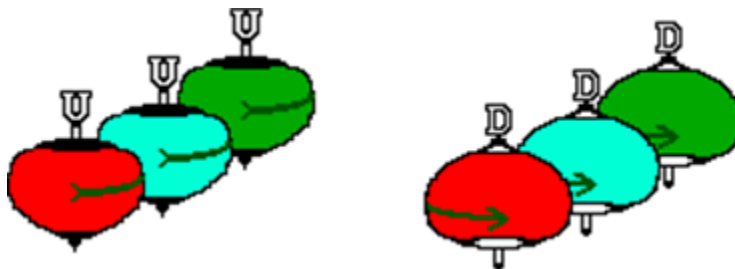


$$Q = 2e/3 - e/3 - e/3 = 0$$

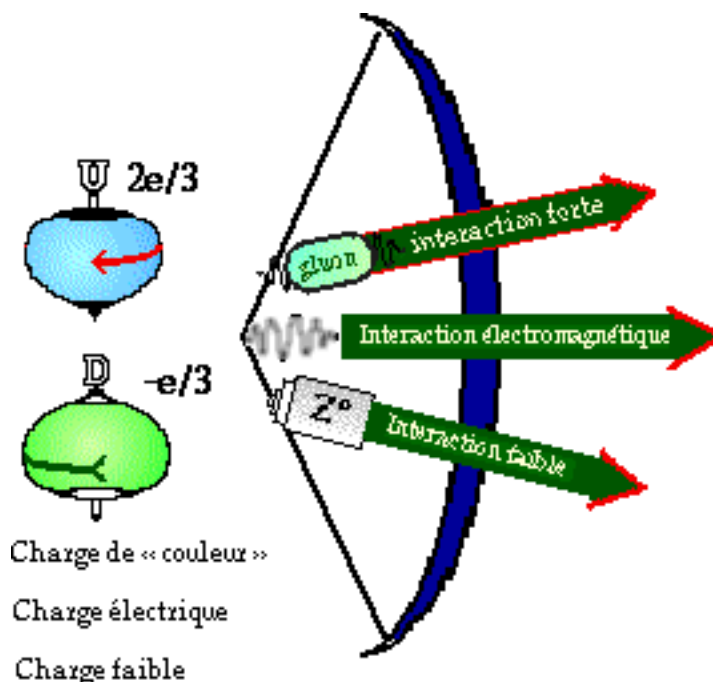
## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Quarks up et down (suite)

- Chaque quark existe sous trois formes différentes, selon sa charge propre à l'interaction forte
  - Cette charge est appelée **charge de couleur**



- Les quarks sont dotés de deux autres charges
  - Charge électrique
  - Charge responsable des **forces faibles**

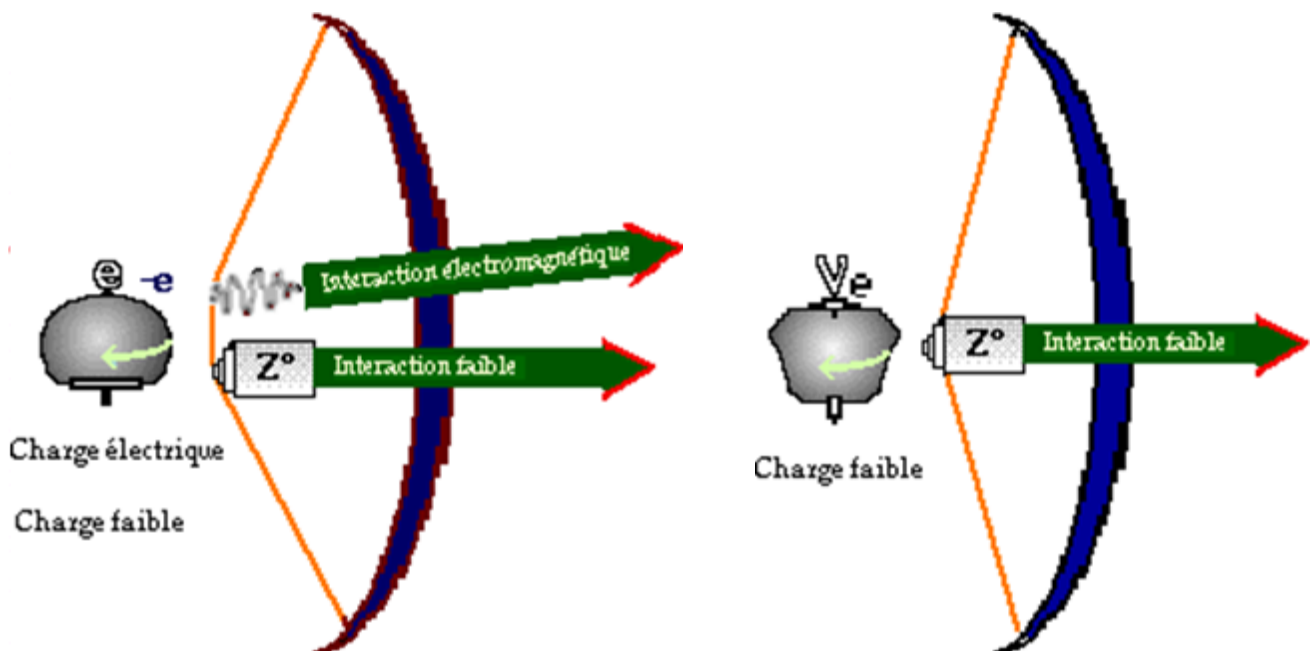


**Les quarks disposent de trois cordes à leur arc (interactions) pour interagir avec d'autres corpuscules**

## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Leptons

- Seuls les quarks sont sensibles à l'interaction forte. Ils forment les « **hadrons** » (fort en grec)
- Par opposition, les autres particules de matière sont des « **leptons** »
  - ▶ Elles ne portent pas de charge de couleur = blanches
- L'électron et son neutrino sont des leptons
- L'**électron** ne dispose que des interactions électromagnétiques et faibles pour interagir.
- Le **neutrino** est un lepton dépourvu de charge électrique : il ne lui reste que la force faible.



Pour interagir avec la matière, l'électron dispose de charges électrique et «faible» et le neutrino d'une charge «faible»

## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Les neutrinos

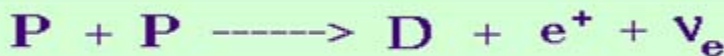
- Les neutrinos sont très différents des autres particules car ils interagissent très peu
  - ▶ Pas de charge électrique
  - ▶ Pas de charge de couleur
- Particules les plus énigmatiques (**fantômes**)
- Très difficiles à détecter
- Leurs masses sont extrêmement petites

$$M(\text{neutrino-e}) c^2 < 0.0000000002 \text{ GeV} = 2\text{eV}$$

- Les accélérateurs, les réacteurs, le soleil sont des sources de neutrinos



Réacteurs



Soleil

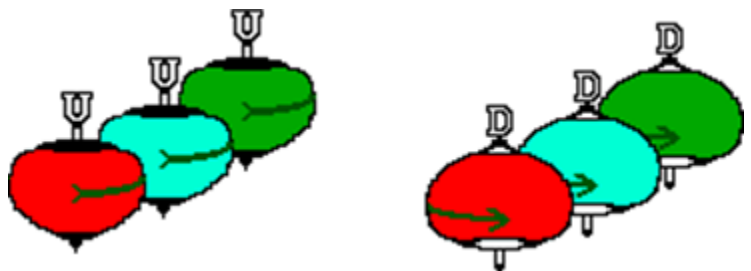
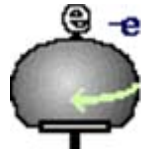


- Les neutrinos sont l'objet de nombreuses expériences, ils intriguent et fascinent beaucoup !

## § 1.3 – Plongée dans l'infiniment petit

### Panorama de la matière ordinaire

- A l'échelle la plus élémentaire, une famille de **quatre** corpuscules constitue la matière qui nous entoure.
- Le membre le plus connu en est **l'électron**, pourvu d'une charge électrique négative, qui tourne autour du noyau des atomes.
- Ensuite, les noyaux sont constitués de protons et de neutrons, dont les briques élémentaires sont des **quarks** « **up** » et « **down** ».



- Le quatrième membre de cette famille est une particule furtive, interagissant très peu, le **neutrino**-électron.



- Ces particules de matière sont appelées **fermions** (elles ont un spin  $\frac{1}{2}$ )

## § 1.3 - Autres formes de matière



**Il existe d'autres formes de matière que celle qui nous entoure**

- Nouvelles espèces de quarks et de leptons
- Antimatière
- Assemblages instables de quarks

## § 1.3 – Autres formes de matière

### Nouveaux quarks et leptons

- Les quarks up et down, l'électron et le neutrino forment une famille
  - ▶ Celle des constituants de la matière «ordinaire»
- **Deux nouvelles familles** de corpuscules élémentaires ont été découvertes.
  - ▶ parentés remarquables et inexplicées avec les quarks up et down, l'électron et le neutrino.
- La seconde famille lourde et instable comprend 4 éléments :
  - ▶ un quark de charge  $2/3$  et un quark de charge  $-1/3$ , parents des quarks up et down
  - ▶ Un lepton de charge  $-1$ , parent de l'électron
  - ▶ Un lepton neutre, parent du neutrino ordinaire
- La troisième famille, encore plus lourde et instable, comprend aussi 4 corpuscules :
  - ▶ 2 quarks de type up et down plus 2 leptons
- Tous ces corpuscules étaient présents lors du big bang.
  - ▶ Les grands accélérateurs de particules font revivre ces dinosaures




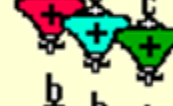




**Au total :**  
**trois familles ou générations**

## § 1.3 – Autres formes de matière

### Familles de quarks...

- Chaque quark a trois variantes équivalentes
  - ▶ Ex: up-rouge, up-bleu et up-vert
- La seconde famille est lourde et instable
  - ▶ Quark « s ou étrange » parent du quark d
  - ▶ Quark « c ou charmé » parent du quark u
- La troisième famille est encore plus lourde et instable
  - ▶ Quark « b ou de beauté » parent du quark d
  - ▶ Quark « t ou top » parent du quark u







	quarks
<i>Up</i>	
<i>Down</i>	
<i>Strange</i>	
<i>charm</i>	
<i>Beauty</i>	
<i>top</i>	



## § 1.3 – Autres formes de matière

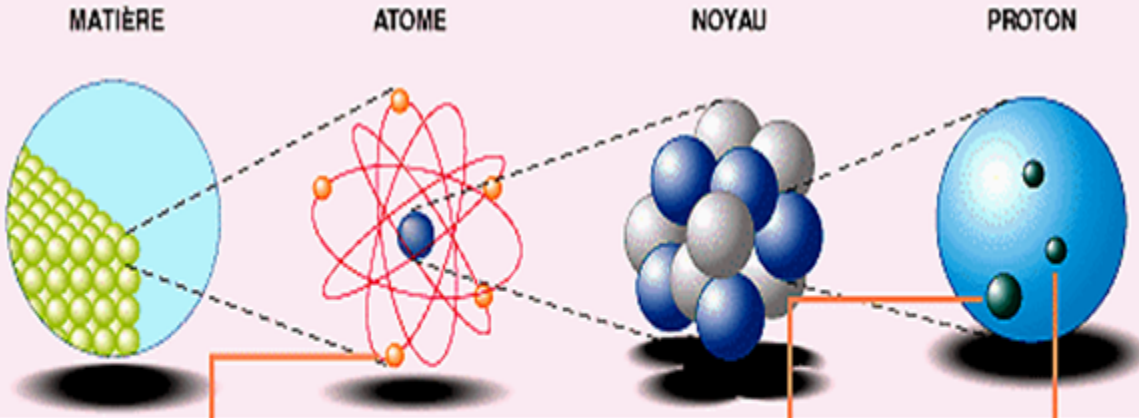
### ... et familles de leptons

- Le **muon** ( $\mu$ ): électron lourd de la seconde famille
  - ▶ interagit comme l'électron
- Le **neutrino- $\mu$** : une seconde espèce de neutrino
  - ▶ Un muon qui a perdu sa charge électrique
- le **tau** ( $\tau$ ): l'électron super-lourd de la troisième famille
  - ▶ interagit comme l'électron
- Le **neutrino- $\tau$** : une troisième espèce de neutrino
  - ▶ Un tau qui a perdu sa charge

	leptons
<i>Electron</i>	
<i>Muon</i>	
<i>Tau</i>	
$\nu_e$	
$\nu_\mu$	
$\nu_\tau$	

# § 1.3 – Autres formes de matière

## Panorama des fermions



		LEPTONS		QUARKS	
		Peuvent se déplacer librement.		Prisonniers de particules plus grandes ils ne sont pas observés individuellement.	
<b>FERMIONS</b>  La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.  <hr/> Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang.	Première Famille <b>électron</b> Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.	<b>neutrino électron</b> Sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant.	<b>bas (down)</b> Sa charge électrique est -1/3. Le proton en contient un, le neutron deux.	<b>haut (up)</b> Sa charge électrique est +2/3. Le proton en contient deux, le neutron un.	
	Deuxième Famille <b>muon</b> Un compagnon plus massif de l'électron.	<b>neutrino muon</b> Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	<b>étrange (strange)</b> Un compagnon plus lourd du "bas".	<b>charme (charm)</b> Un compagnon plus lourd du "haut".	
	Troisième Famille <b>tau</b> Encore plus lourd.	<b>neutrino tau</b> Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	<b>beauté (beauty)</b> Encore plus lourd.	<b>sommet (top)</b> Le dernier quark observé (en 1994)	

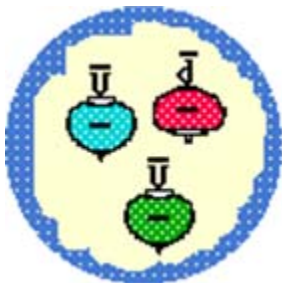
## § 1.3 – Autres formes de matière

### Anti-matière

- L'anti-matière est constituée d'anti-particules
- Une anti-particule a exactement la même masse que la particule correspondante, mais des nombres quantiques (charge électrique, charge de «couleur», charge «faible») opposés.
  - ▶ Par exemple, l'anti-électron ou positron a une charge électrique positive et de même amplitude que l'électron.



- Il existe aussi un antiproton,
  - ▶ Fabriqué avec des anti-quarks
    - portant des « anti-couleurs »
  - ▶ La charge électrique de l'anti-proton est négative



Antiproton

$$Q = -2e/3 - 2e/3 + e/3 = -e$$

- En combinant anti-protons, anti-neutrons et anti-électrons, il est possible de faire des anti-atomes. Des atomes d'anti-hydrogène ont déjà été produits.

## § 1.3 – Autres formes de matière

### Date des découvertes

- Electron : 1897
- Proton : 1919
- Neutron : 1932
- Positron : 1933
- Muon : 1937
- Neutrino-e : 1956
- Neutrino- $\mu$  : 1962
- Quarks up, down et étrange : 1964
  - ▶ Cette date correspond à l'hypothèse de leur existence. Cette existence ne sera vraiment confirmée qu'en 1974.
- Quark -c ou quark charmé : 1974
- Quark-b ou quark de beauté : 1977
- Tau : 1975
- Quark top : 1995
- Neutrino- $\tau$  : 2000

**Des découvertes  
étalées sur un siècle**

## § 1.4 - Les interactions

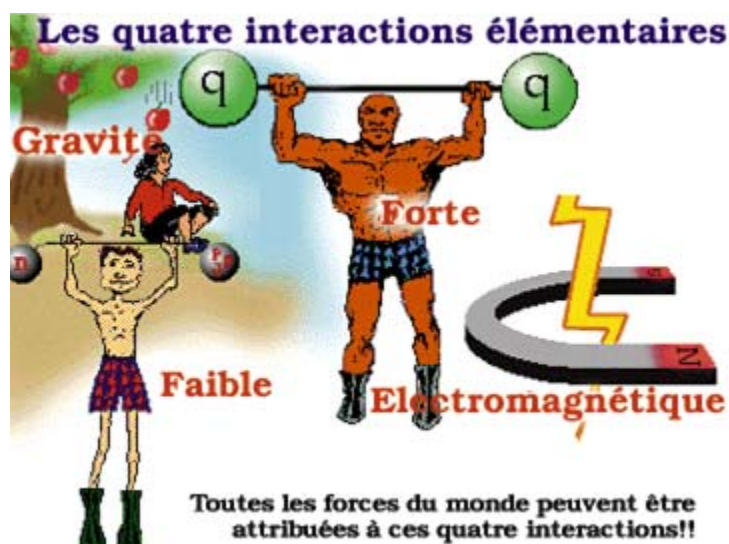
### Quatre grands types de forces sont à l'œuvre dans la nature

- A l'aspect granulaire de la matière, correspond un aspect « granulaire » des forces.
- La compréhension du mécanisme des forces est un des objets de la physique des particules
- Interaction : terme plus général que forces
  - ▶ Attraction/répulsion
  - ▶ Création/annihilation de matière

## § 1.4 – Les interactions

### Les quatre interactions

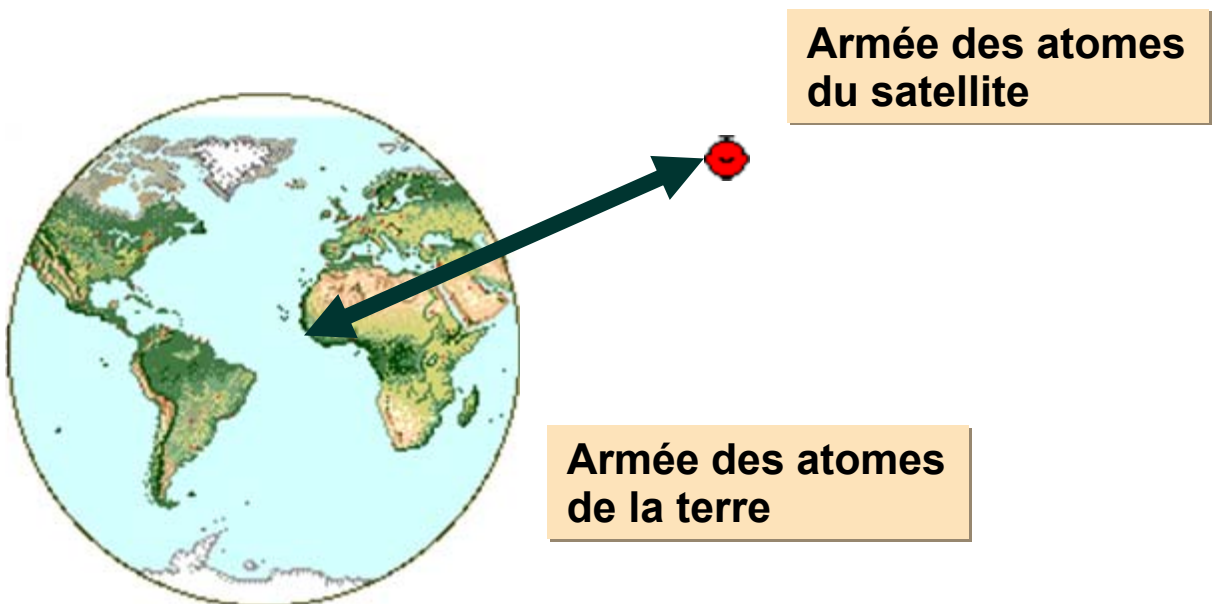
- Tous les processus physiques, chimiques ou biologiques connus peuvent être expliqués à l'aide de seulement quatre interactions fondamentales :
  - l'**interaction gravitationnelle**, responsable de la pesanteur, de la marée ou encore des phénomènes astronomiques,
  - l'**interaction électromagnétique**, responsable de l'électricité, du magnétisme, de la lumière ou encore des réactions chimiques et biologiques,
  - l'**interaction forte**, responsable de la cohésion des noyaux atomiques,
  - l'**interaction faible**, responsable de la radioactivité beta, qui permet au Soleil de briller.



## § 1.4 – Les interactions

### Interactions collectives

- Ce que nous appelons "force" résulte d'une quasi infinité de minuscules interactions



- L'attraction du satellite et de la terre est la somme au cours du temps d'une myriade **d'attractions individuelles** entre les atomes des deux objets

## § 1.5 – Les interactions

### Interactions et messagers

- Principe d'action-réaction : interaction à distance entre les deux barques par échange d'un objet intermédiaire (le ballon). Cet objet est appelé le **vecteur de l'interaction**.



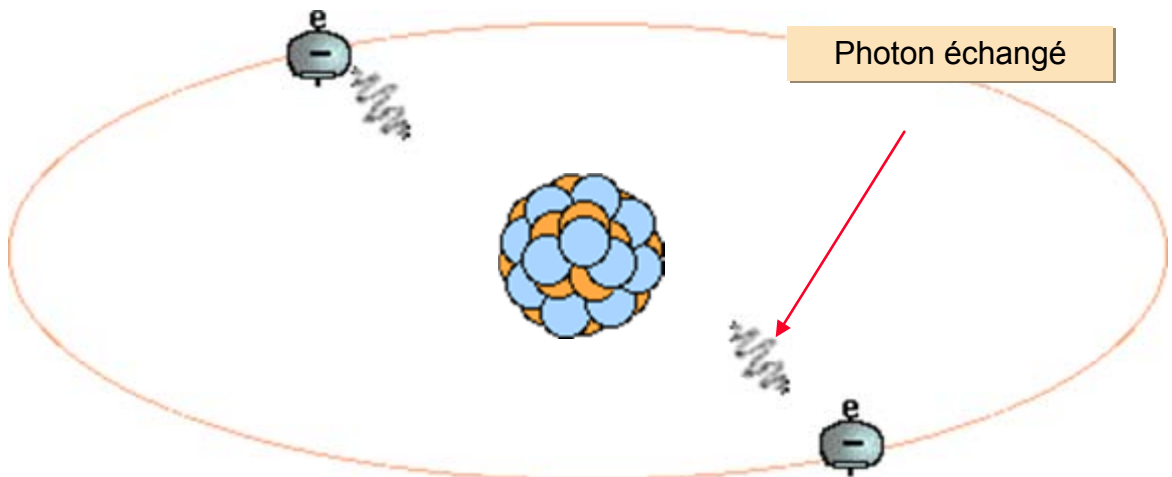
- De même, en physique des particules, toute interaction entre particules est expliquée par l'échange de particules “vecteurs”
- Ces vecteurs sont eux-même des particules. Ce sont des **bosons** (particules de spin entier, par opposition aux fermions)



## § 1.5 – Les interactions

### Les bosons-vecteurs

- Les bosons vecteurs des 4 interactions sont :
  - ▶ Le **photon** pour l'interaction électromagnétique
  - ▶ Les **gluons** pour l'interaction forte
  - ▶ Les bosons  **$W^+$ ,  $Z^0$  et  $W^-$**  pour l'interaction faible.
  - ▶ Le **graviton** pour l'interaction gravitationnelle

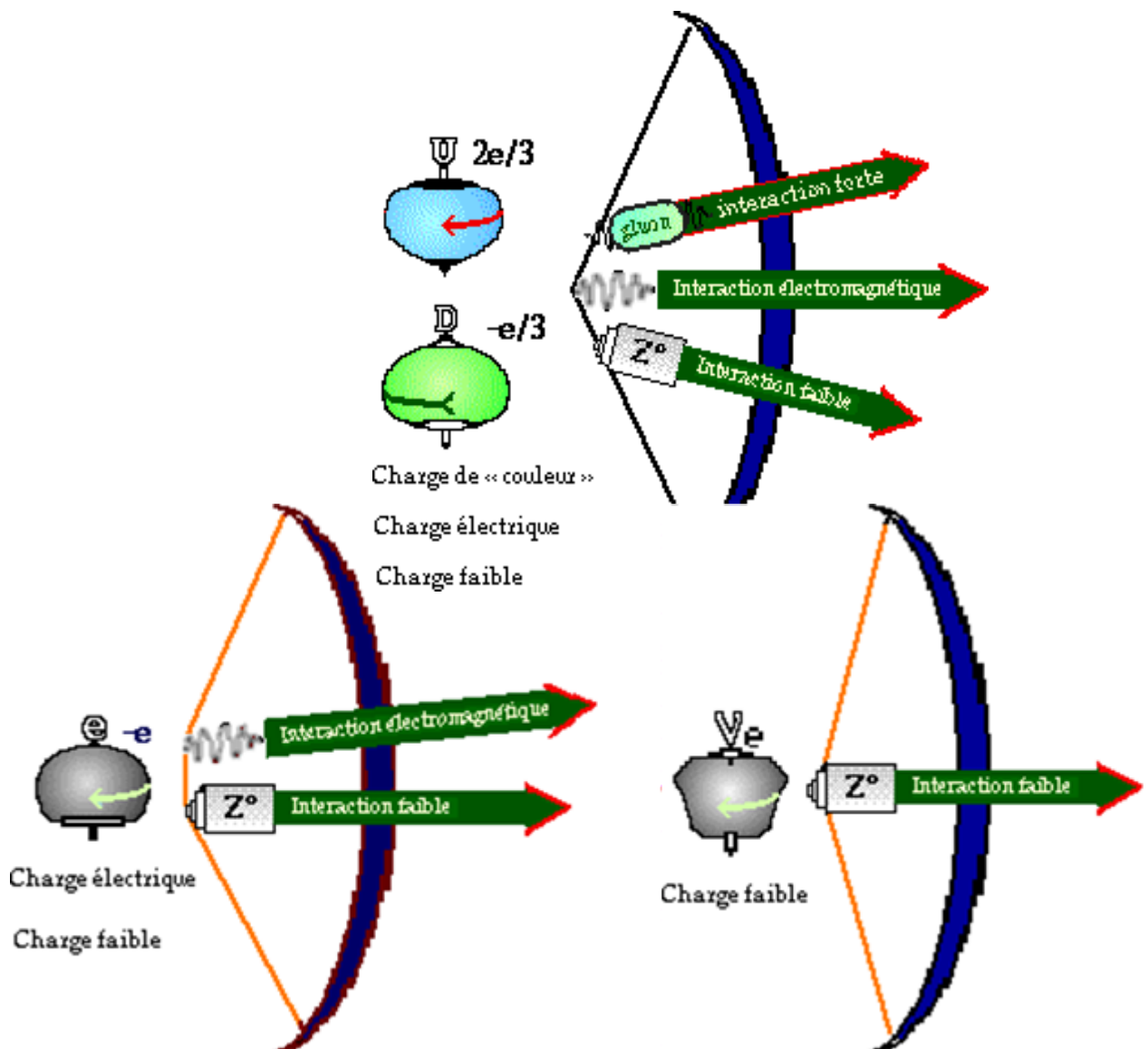


- Plus le ballon est lourd, plus il sera difficile aux occupants du bateau de le lancer loin : les bateaux ne pourront plus interagir au-delà d'une certaine distance.
- De même, en physique des particules, plus la particule vecteur d'une interaction sera lourde, plus cette interaction sera de courte portée.

## § 1.5 – Les interactions

### Charges et messagers

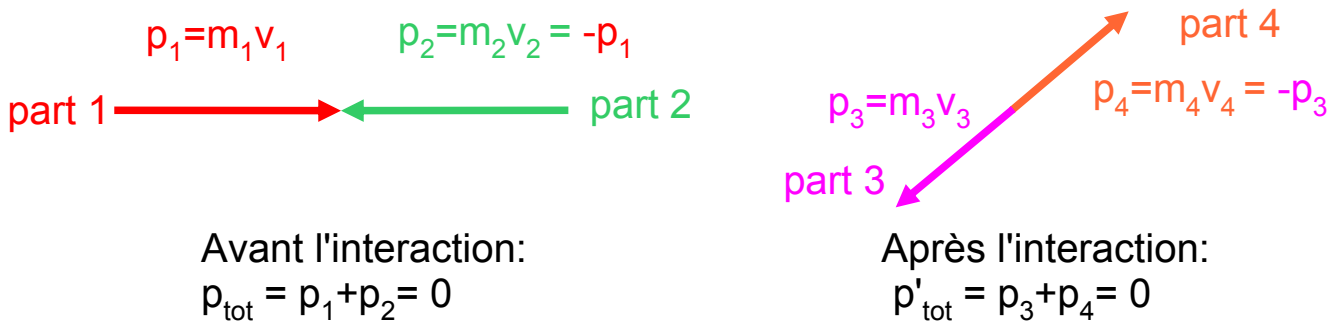
- La capacité d'interaction des particules est représentée par leur "charge" :
  - La charge électrique pour l'interaction électromagnétique
  - La charge de couleur pour l'interaction forte
  - La charge d'isospin pour l'interaction faible.
  - La masse pour l'interaction gravitationnelle



## § 1.5 – Les interactions

### Invariants

- Considérons un système isolé
  - ▶ n'interagit pas (ne reçoit rien, n'envoie rien à l'extérieur)
- Quantités conservées
  - ▶ L'énergie
    - postulat: le temps est homogène
      - le résultat d'une expérience ne dépend pas du moment où elle est faite
  - ▶ La quantité de mouvement
    - postulat: l'espace est homogène
      - le résultat d'une expérience ne dépend pas de l'endroit où elle est faite
  - ▶ Le moment angulaire
    - postulat: l'espace est isotrope (pas de direction privilégiée)
      - le résultat d'une expérience ne varie pas si on effectue une rotation globale
- Exemple: un système de 2 particules en interaction:

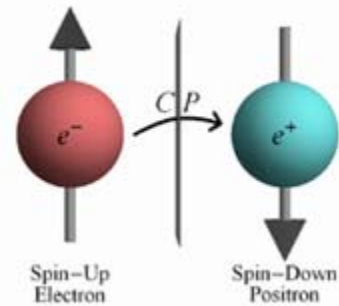


- L'énergie, la quantité de mouvement, le moment angulaire d'un système ne peuvent être modifiés lors des interactions entre ses composants.

## § 1.5 – Les interactions

### Transformations discrètes

- ▶ Vecteurs changent de signe.
- La Parité (P) ↗  $\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x} , \mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$ 
  - ▶ symétrie miroir
  - ▶ Lois de la physique sont-elles invariantes par parité ?
- La conjugaison de charge (C)
  - ▶ renversement des charges
    - charge électrique + devient -
    - couleur devient anti-couleur
    - ...
  - ▶ particule devient son anti-particule
  - ▶ Les lois de la physique sont elles les mêmes pour la matière et l'anti-matière ?
- Le renversement du temps (T)
  - ▶ on inverse le sens du temps
    - on regarde le film à l'envers !
  - ▶ Les lois de la physique sont elles invariante si on inverse T?
- Et les combinaisons ?
  - ▶ CP
    - l'anti-matière vu dans un miroir se comporte-elle comme la matière ?
  - ▶ CPT
    - Principe très fort, lié à la conservation de l'énergie
    - Les lois de la physique doivent-être invariantes lorsqu'on applique la transformation CPT.



# § 1.5 – Les interactions

## Loi de conservation

### ■ Nombres quantiques internes:

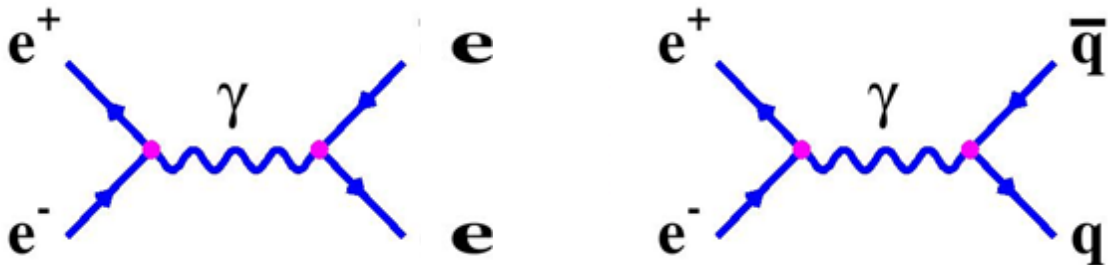
- ▶ Les particules sont caractérisées par leurs propriétés intrinsèques
- ▶ Les particules élémentaire sont des objets quantiques
- ▶ Leurs propriétés internes sont définies par des **nombres quantiques**:
  - les charges (électriques, de couleurs, faibles)
  - le spin (moment angulaire propre =  $\frac{1}{2}$  pour les fermions)
  - la saveur (c.à.d. le type - u,d,s,c,b,t - e, $\mu$ , $\tau$ , $\nu_e$ , $\nu_\mu$ , $\nu_\tau$ )
  - ...

### ■ Les interactions sont caractérisées par:

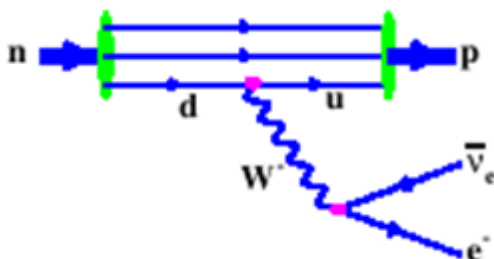
- ▶ leur capacités à modifier (ou non) certains des nombres quantiques internes des particules

### ■ Exemples:

- ▶ interaction où la saveur est conservée:



- ▶ interaction où la saveur est perdue:



désintégration  $\beta$

## § 1.5 – Les interactions

### Caractérisation:

Comment caractériser une interaction ?

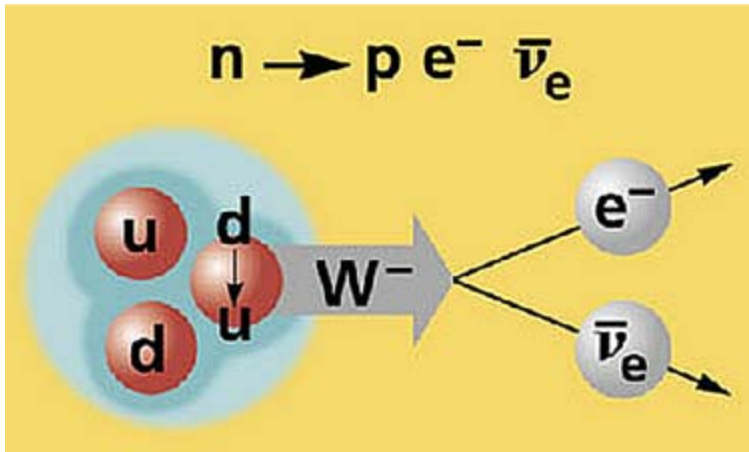
Qu'est-ce qui différencie les différents types d'interaction ?

- Médiateurs:
  - ▶ bosons vecteurs
- Charge:
  - ▶ bosons vecteurs agit sur des charges
- Portée:
  - ▶ donnée par la masse du boson vecteur en jeu
- Intensité:
  - ▶ couplage entre le boson et le fermion
- Transformations discrètes (C,P,T):
  - ▶ symétries pour certaines interactions
- Quantités conservées:
  - ▶ les nombres quantiques respectées ou ignorées

## § 1.5 – Les interactions

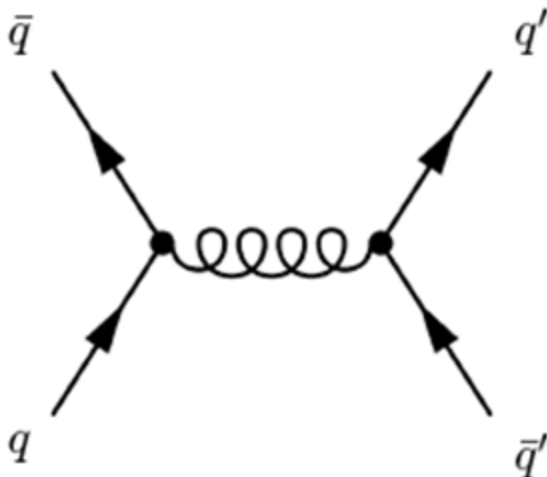
### Les deux types d'interactions élémentaires

- Un premier type d'interaction : l'**échange** de bosons-vecteurs
  - ▶ Lors de l'échange, de l'énergie et un certain nombre de caractéristiques physiques sont transférées d'une particule à l'autre.



Exemple de l'Interaction faible: échange entre un quark up et un neutrino

- Un second type d'interaction : la création ou la destruction de particules,
  - ▶ Ces créations et annihilations passent par l'intermédiaire des mêmes bosons-vecteurs (gluons, photons, bosons W)



Exemple de la matérialisation d'un gluon en un quark et antiquark: la réaction est réversible

## § 1.5 – Les interactions

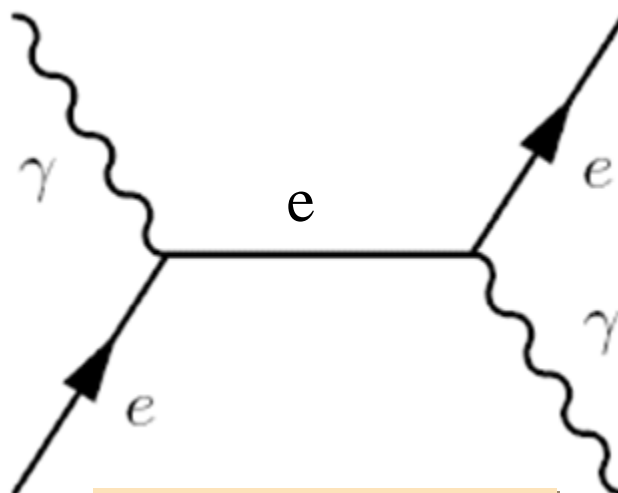
### Matérialisation...

- Avec de l'énergie on peut créer des particules

$$E = mc^2$$



- Le phénomène devient important à hautes énergies
  - ▶ Il explique le grand nombre de particules produites
- La matérialisation la plus économique est celle d'un photon
  - ▶ Le gamma doit avoir une énergie supérieure à 1,022 MeV
    - 1,022 MeV = 2x la masse de l'électron



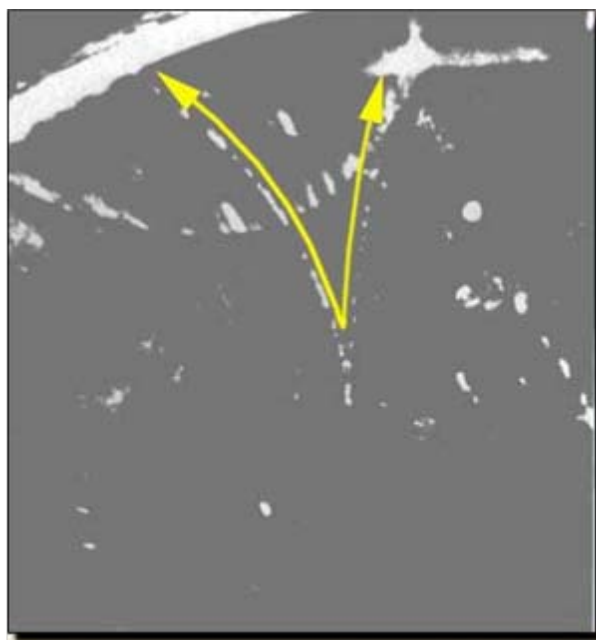
Diffusion compton



## § 1.5 – Les interactions

### ...et annihilation

- Une particule et une antiparticule peuvent s'annihiler en un boson.
  - ▶ Réaction inverse de la matérialisation d'une onde en particule et antiparticule.
- L'annihilation de matière libère beaucoup d'énergie, la formule de l'énergie de masse faisant intervenir le carré de la vitesse de la lumière.
  - ▶ L'énergie se retrouve finalement sous forme d'énergie cinétique
- Annihilation et matérialisation de particules jouent un rôle important en physique des particules.

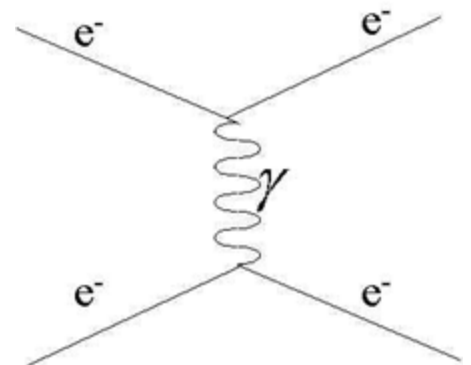


## § 1.5 – Les interactions

### L'interaction électromagnétique



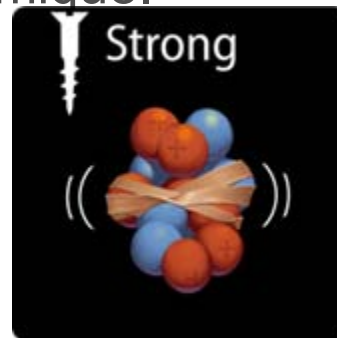
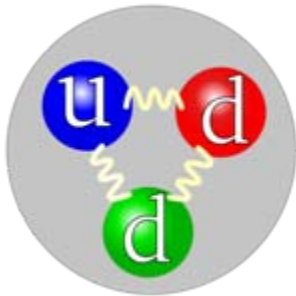
- L'interaction électromagnétique s'exerce sur tous les corpuscule élémentaires, à part les neutrinos et antineutrinos.
- Elle est à longue portée et domine à l'échelle de l'atome.
  - ▶ Ses manifestations dans la vie courante sont les forces électriques et magnétiques.
- La lumière est un type particulier d'onde électromagnétique.
- La **charge électrique** est à l'origine des interactions électromagnétiques.
- Les **photons** en sont les messagers .



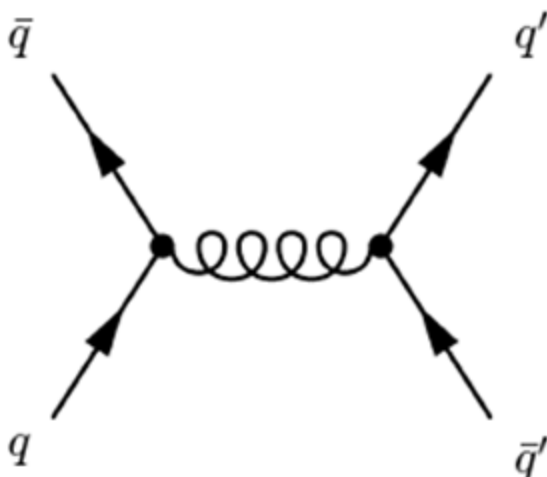
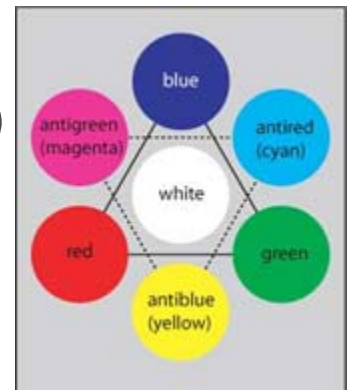
## § 1.5 – Les interactions

### L'interaction forte et nucléaire

- Cette interaction très intense s'exerce sur les quarks et les gluons.
- De courte portée ( $10^{-15}$  m), elle ne s'exerce qu'à l'intérieur des noyaux : elle permet la cohésion atomique.



- Elle se manifeste également par la durée de vie extraordinairement brève de la plupart des «hadrons».
- Une charge spéciale (appelée **couleur**) est à l'origine des interactions fortes.
- Les **gluons** en sont les messagers.



Exemple d'échange d'un gluon entre un quark et antiquark

## § 1.4 – Les interactions



### Assemblages de quarks

- La théorie de l'**interaction forte** (QCD) montre que les quarks ne peuvent jamais être libres : il n'est donc pas possible d'observer un quark seul.

- Les quarks sont donc toujours confinés à l'intérieur de particules composites appelées **hadrons**.

- ▶ « les quarks s'habillent pour sortir »

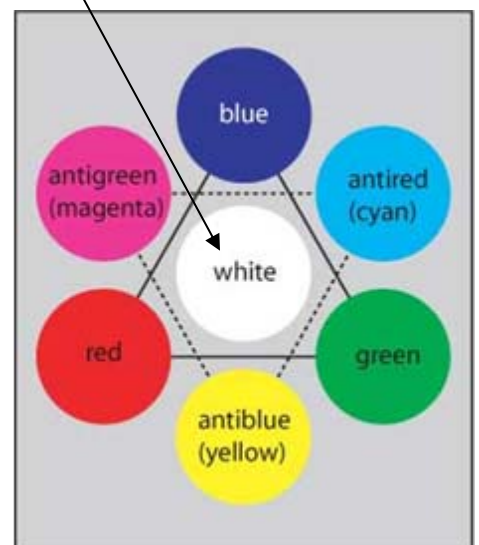


- Comme les quarks sont « colorés » (porteurs d'une charge de couleur), on dit qu'on ne peut pas observer d'objets colorés, mais seulement des objets blancs. Les hadrons sont « blancs ».

- ▶ « le vide est opaque à la couleur »

- On distingue deux catégories de hadrons :

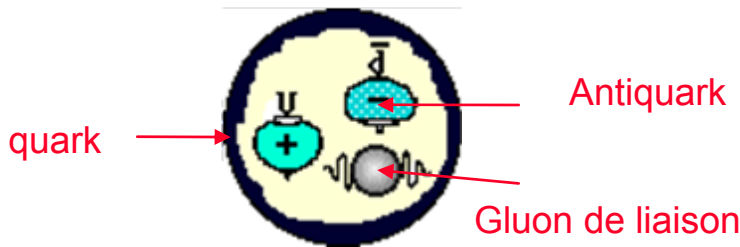
- ▶ Les **mésons**, des hadrons formés d'un quark et d'un anti-quark
  - ex: bleu + anti-bleu = blanc
- ▶ Les **baryons**, des hadrons formés de trois quarks, comme les protons ou les neutrons
  - ex: bleu + vert + rouge = blanc
- ▶ C'est la seule possibilité de faire des assemblages blancs.



## § 1.4 – Les interactions

### Assemblages de quarks et d'antiquarks: Mésons

- Méson : assemblage quark-antiquark

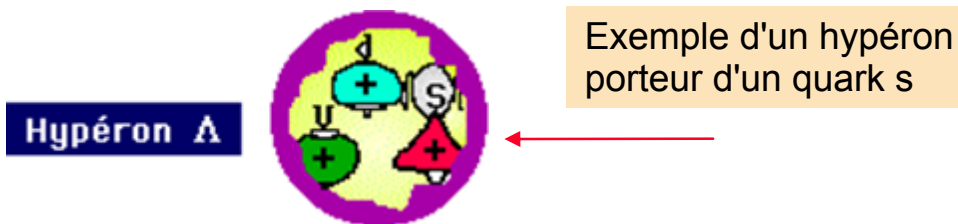


- Liés par interaction forte (gluons)
- Matière et antimatière en présence
  - ▶ Forte instabilité
- Une grande variété de temps de vie
  - ▶ Mort par interaction forte :  $10^{-20}$  à  $10^{-23}$  s
  - ▶ Mort « électromagnétique » :  $10^{-8}$  à  $10^{-15}$  s
  - ▶ Mort par interaction faible :  $10^{-8}$  à  $10^{-13}$  s
- Produits en abondance
  - ▶ Dans les collisions on produit beaucoup plus de mésons que d'électrons ou de protons, mais ils disparaissent en quelques microsecondes
- Mésons les plus fréquents et importants
  - ▶ Pions (chargés et très fréquents)
  - ▶ Pi-zéro ou neutre (Source de  $\gamma$  énergiques)
  - ▶ Kaons chargés
  - ▶ Kaons neutres (désintégrations intéressantes)

## § 1.4 – Les interactions

### baryons ou assemblages de 3 quarks

- On peut assembler aussi trois quarks...
  - ▶ Ils sont de «couleurs» différentes et liés par des gluons
- Une grande variété de temps de vie
  - ▶ Mort par interaction forte :  $10^{-20}$  à  $10^{-23}$  s
  - ▶ Mort « électromagnétique » :  $10^{-8}$  à  $10^{-15}$  s
  - ▶ Mort par interaction faible :  $10^{-8}$  à  $10^{-13}$  s
- Le proton et le neutron sont les baryons les plus stables et **ils sont même stables**...
  - ▶ Nous devons notre existence à cette stabilité
- Quelques baryons relativement stables : les hypérons, porteurs du quark appelé étrange
  - ▶ Lambda ou  $\Lambda$  ( 1 quark s )
  - ▶ Sigma ou  $\Sigma$  ( 1 quark s )
  - ▶ Ksi ou  $\Xi$  ( 2 quark s )
  - ▶ Grand Oméga ou  $\Omega$  ( 3 quark s )

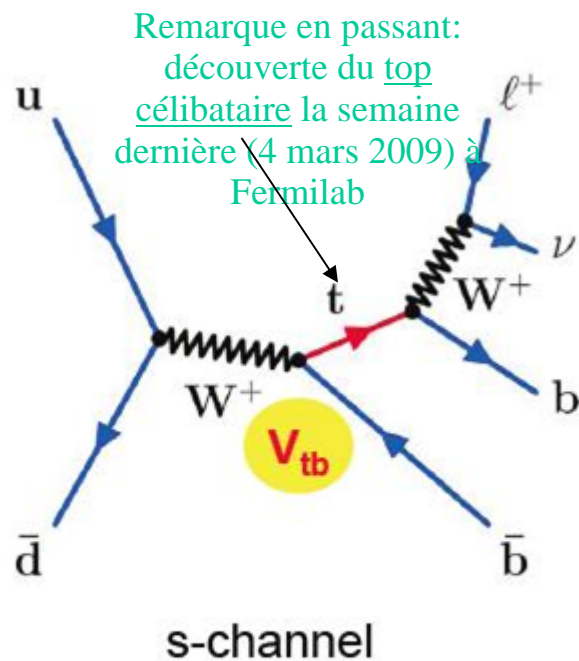
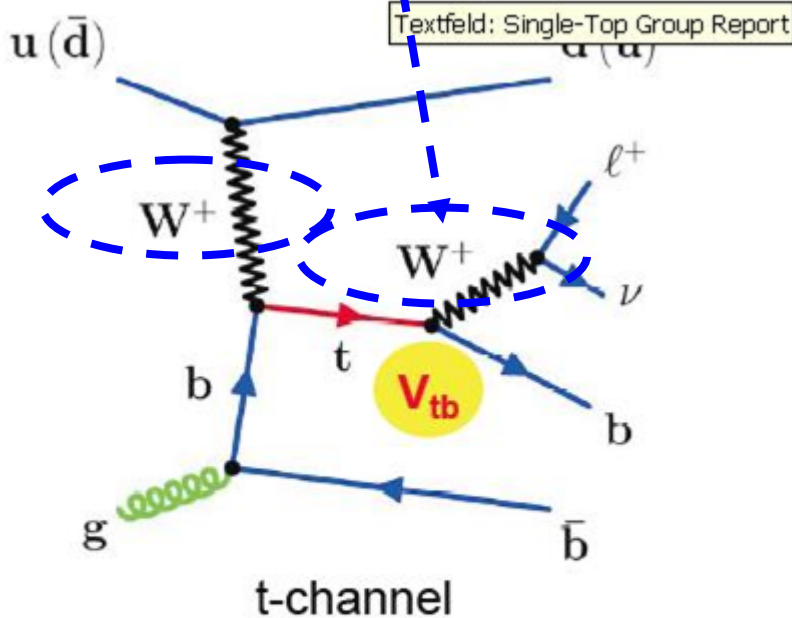


# § 1.5 – Les interactions

## L'interaction faible



- L'interaction faible, la plus difficile à mettre en évidence, se manifeste dans la nature par :
  - ▶ la radioactivité bêta : émission d'électrons ou de positrons par certain noyaux
  - ▶ Elle contribue pour 10% à l'énergie du soleil
- Elle agit sur toutes les particules
- Elle est véhiculée par des messagers extrêmement massifs: **les bosons  $W^+$ ,  $Z^0$  et  $W^-$** .
- Sa portée est donc quasi nulle ( $10^{-18}$  m), ce qui explique sa "faiblesse" apparente.



Theoretical cross section predictions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV

**$1.98 \pm 0.25$  pb**

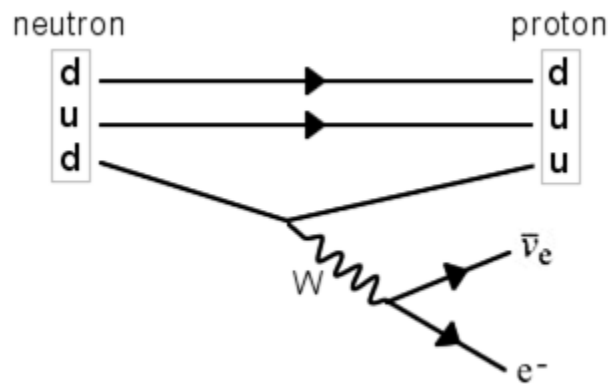
**$0.88 \pm 0.11$  pb**

## § 1.5 – Les interactions

### L'interaction faible (suite)

- L'interaction faible peut **changer la nature** d'un corpuscule.
  - ▶ Elle ne conserve pas le type des particules
  - ▶ Par exemple transformer un quark up en quark down, ou un électron en neutrino

L'échange change le quark up en quark down, l'électron en neutrino



Beta radioactive decay via the weak interaction

- Une force très particulière ....

### Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays : the Magnetic Moment of the Free Muon\*

RICHARD L. GARWIN,† LEON M. LEDERMAN,  
AND MARCEL WEINRICH

*Physics Department, Nevis Cyclotron Laboratories,  
Columbia University, Irvington-on-Hudson,  
New York, New York*

(Received January 15, 1957)

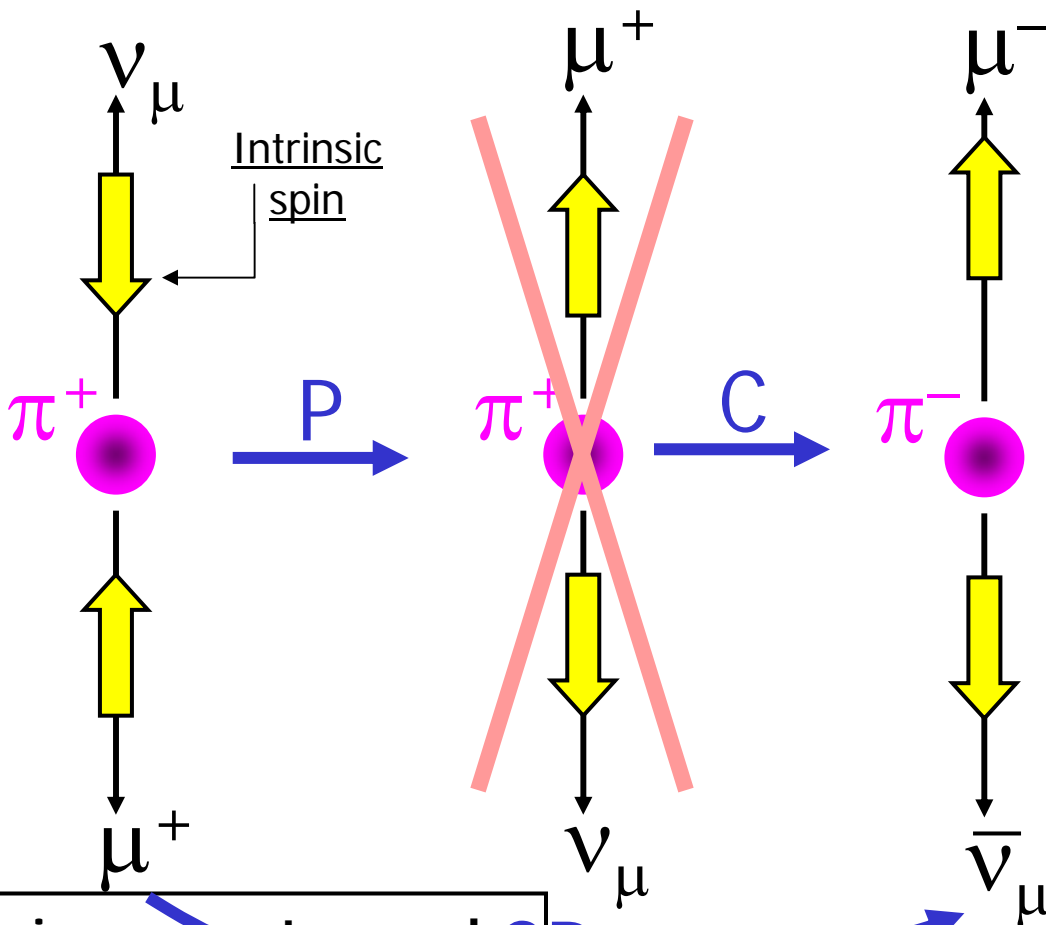




## § 1.5 – Les interactions

### L'interaction faible (suite)

- Une force très particulière ....
  - ▶ Selon qu'un corpuscule "tourne" sur lui même dans un sens et dans un autre, l'interaction n'est pas la même (*parité*)
    - Les autres interactions sont, elles, indifférentes au sens de cette rotation (« **spin** »).
  - ▶ Selon qu'on a affaire à une particule ou une anti-particule son comportement est différent (*conjugaison de charge*)
- L'interaction faible pourrait être à l'origine d'une très petite asymétrie de la matière et de l'antimatière
  - ▶ Ce phénomène est appelé : **Violation de CP**. Il serait à l'origine d'une partie de l'absence d'antimatière dans notre univers



Expérience montre que la configuration transformée par parité n'existe pas!

on restaure la symétrie en utilisant la conjugaison de charge

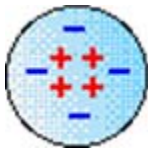
## § 1.5 – Les interactions

### L'interaction gravitationnelle

- Bonne dernière à l'échelle corpusculaire, c'est la force dominante à notre échelle.
- En effet, la masse joue le rôle de la charge. Comme il n'existe pas de masse négative, la gravitation est **toujours attractive**.
- Au contraire, la portée des autres forces est limitée par l'existence de systèmes neutres.



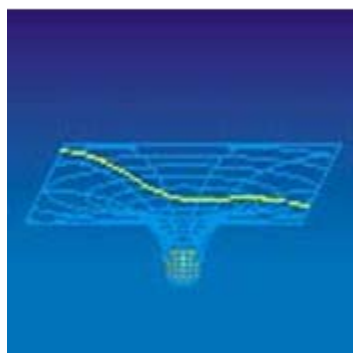
**Dans un atome les charges électriques positives et négatives se compensent. A grande distance attractions attractions et répulsions s'annulent.**



Pas de charge , pas de portée.



- Toutes les attractions élémentaires s'ajoutent, si bien que des forces indécélables à l'échelle de l'infiniment petit l'emportent sur les autres forces à l'échelle cosmique.



# § 1.5 – Les interactions

## Intensité et portée



### Interactions

Nom	Intensité relative	Particules subissant	Portée (m)	Quanta du Champ	Domaine d'action	Charge
Forte	1	Quarks Hadrons	$10^{-15}$	8 Gluons	Baryons, Mésons Nucléons Étoiles à Neutrons	Couleur
Electromagnétique	$10^{-2}$	Particules électriquement chargées	Infinie	Photon	Atomes Optique Electricité	Charge électrique
Faible	$10^{-5}$	Electrons Neutrinos Quarks	$10^{-18}$	$W^+$ $Z^0$ $W^-$	Bêta Mésons $\pi$ Muons	Charge faible
Gravitationnelle	$10^{-39}$	Tout	Infinie	Graviton ???	Orbites Trous Noirs	Masse

#### ■ Interaction forte :

- ▶ Intense mais confinée à l'intérieur des assemblages de quarks (faible portée,  $10^{-15}$  m)

#### ■ Interaction électromagnétique :

- ▶ 100 fois plus faible, portée infinie

#### ■ Interaction faible:

- ▶  $10^7$  fois plus faible, très courte portée ( $10^{-18}$  m).

#### ■ Gravitation

- ▶ A l'échelle corpusculaire,  $10^{36}$  fois plus faible.
- ▶ Mais force dominante à notre échelle.

## § 1.6 - Les préoccupations des physiciens

### Thèmes de recherche actuels

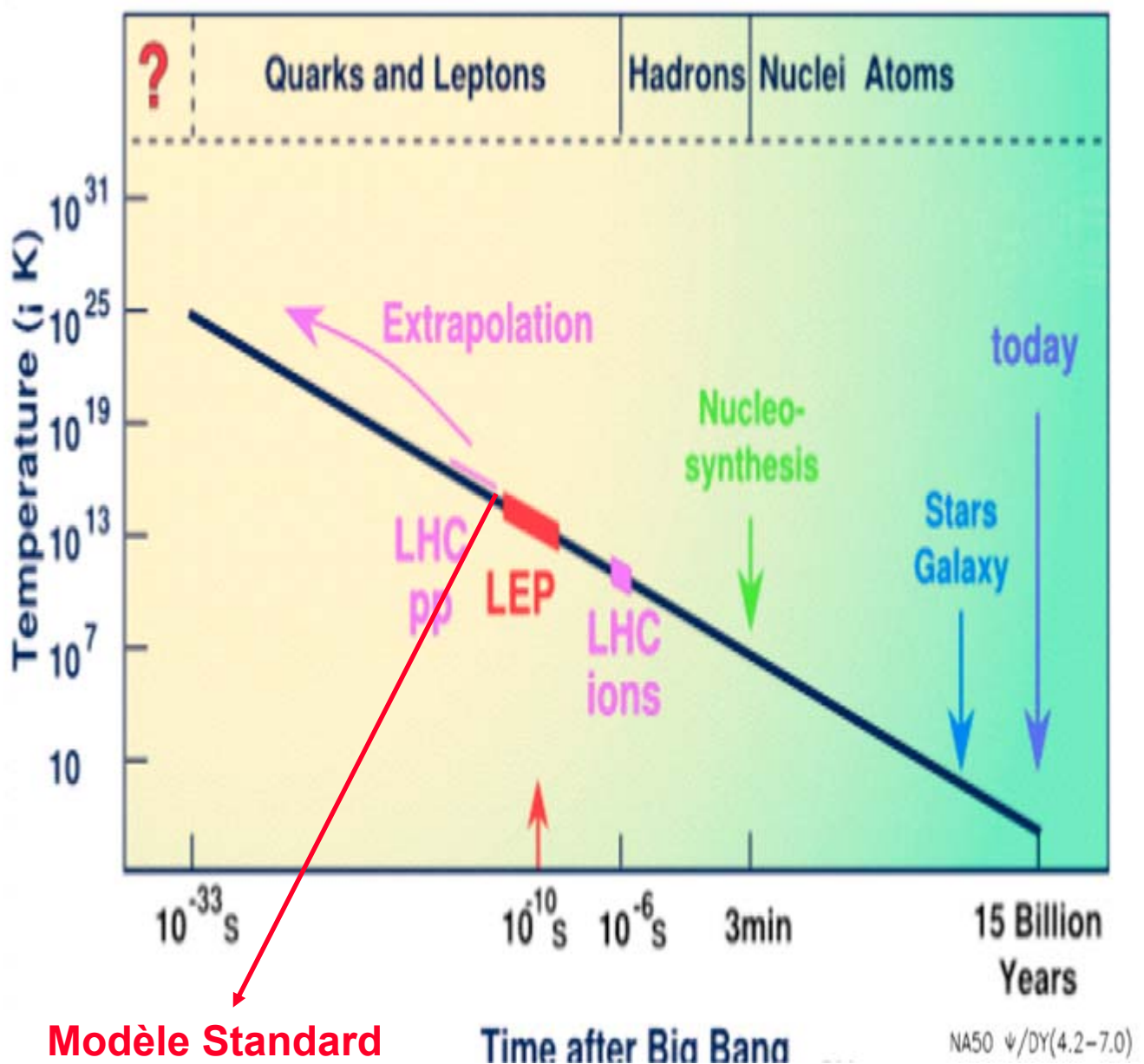
Voir plus petit et monter en énergie pour...

- La compréhension des masses
- Recherche de nouvelles particules et de nouveaux phénomènes
- Le pourquoi des générations
- L'élémentarité des quarks et des leptons
- Où est passée l'antimatière
- L'unification des forces
- Ondes gravitationnelles
- Comprendre la création de l'univers, le soleil, le Big-Bang
- ...

## § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

### Pourquoi faire de la physique des particules ?

- Comprendre comment le mécanisme qui a donné naissance aux **particules**, leur donne une **masse**, les fait **interagir**....



## § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

### Le pourquoi des masses?

#### ■ La hiérarchie impressionnante des masses :

- ▶ Photon, neutrinos :  $\sim 0$
- ▶ Electron : 0.0005111 GeV
- ▶ Quarks up et d : quelques 0.001 GeV
- ▶ Muon : 0.106 GeV
- ▶ Quark charmé :  $\sim 1.2$  GeV
- ▶ Tau : 1.77 GeV
- ▶ Quark b : 4 GeV
- ▶ Boson W : 80 GeV
- ▶ Boson  $Z^0$  : 92 GeV
- ▶ Quark top : 172 GeV



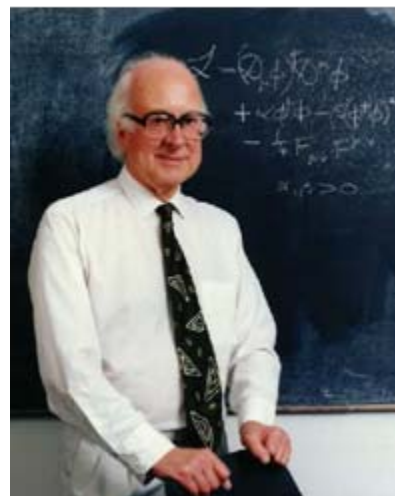
Pourquoi le W est-il très lourd et le photon sans masse ?

#### ■ Pourquoi? En particulier, pourquoi le quark top est-il si lourd? Pourquoi les particules ont-elles une masse?

#### ■ Hypothèse du rôle d'une particule :

- ▶ le **boson de Higgs**

**Mr Higgs**





□ Les résultats expérimentaux obtenus depuis une vingtaine d'années ont confirmé le cadre théorique du **Modèle Standard (MS)**

□ Mais «  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  » n'est pas une **symétrie du vide** (sinon les quarks, les leptons, et les bosons de jauge seraient sans masses...)

□ Le mécanisme de brisure de symétrie, dit de **Higgs** (de Brout, Englert, Higgs et Kibble) fournit:

□ une solution simple et naturelle (en ajoutant un doublet de champs scalaires complexes) au mécanisme de **génération des masses**

□ Note: aucun scalaire élémentaire n'a (encore) été détecté dans la nature

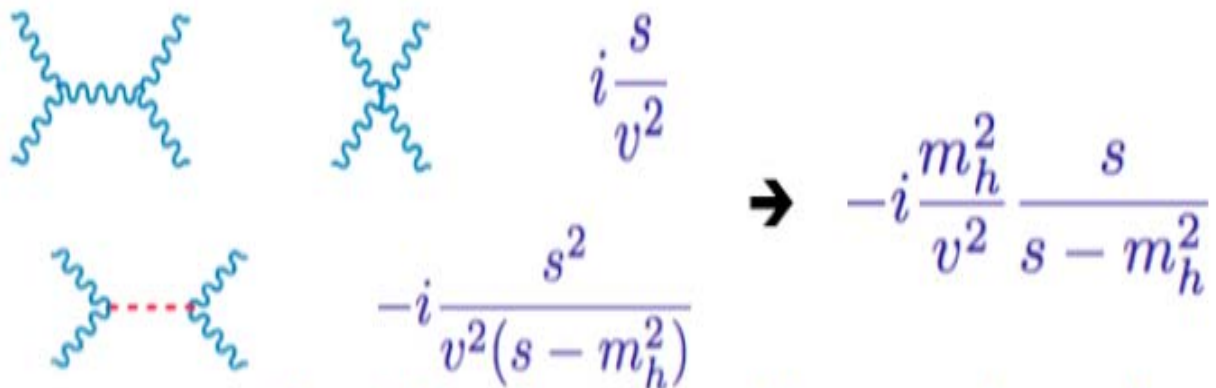


With no Higgs unitarity violations for  $E_{\text{CM}} \sim 1\text{-}3 \text{ TeV}$

**Unitarity** implies that scattering amplitudes cannot grow indefinitely with the centre-of-mass energy  $s$

In the SM, the Higgs particle is essential in ensuring that the scattering amplitudes with longitudinal weak bosons ( $W_L, Z_L$ ) satisfy (tree-level) unitarity constraints [Veltman, 1977; Lee-Quigg-Thacker, 1977; ...] Zwirner

An example:  $\mathcal{A}(W_L^+ W_L^- \rightarrow Z_L Z_L) \quad (s \gg m_W^2)$



$$i \frac{s}{v^2} \rightarrow -i \frac{m_h^2}{v^2} \frac{s}{s - m_h^2}$$

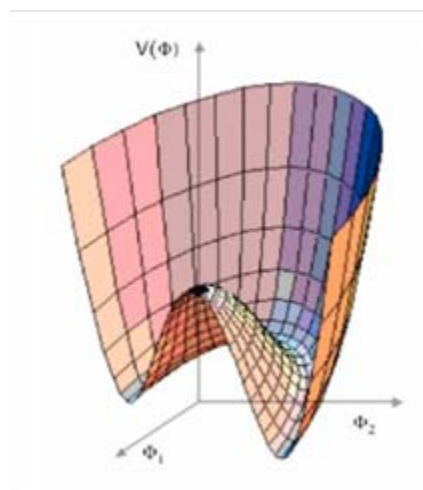
$$-i \frac{s^2}{v^2 (s - m_h^2)}$$

If no Higgs then something must happen!

## § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

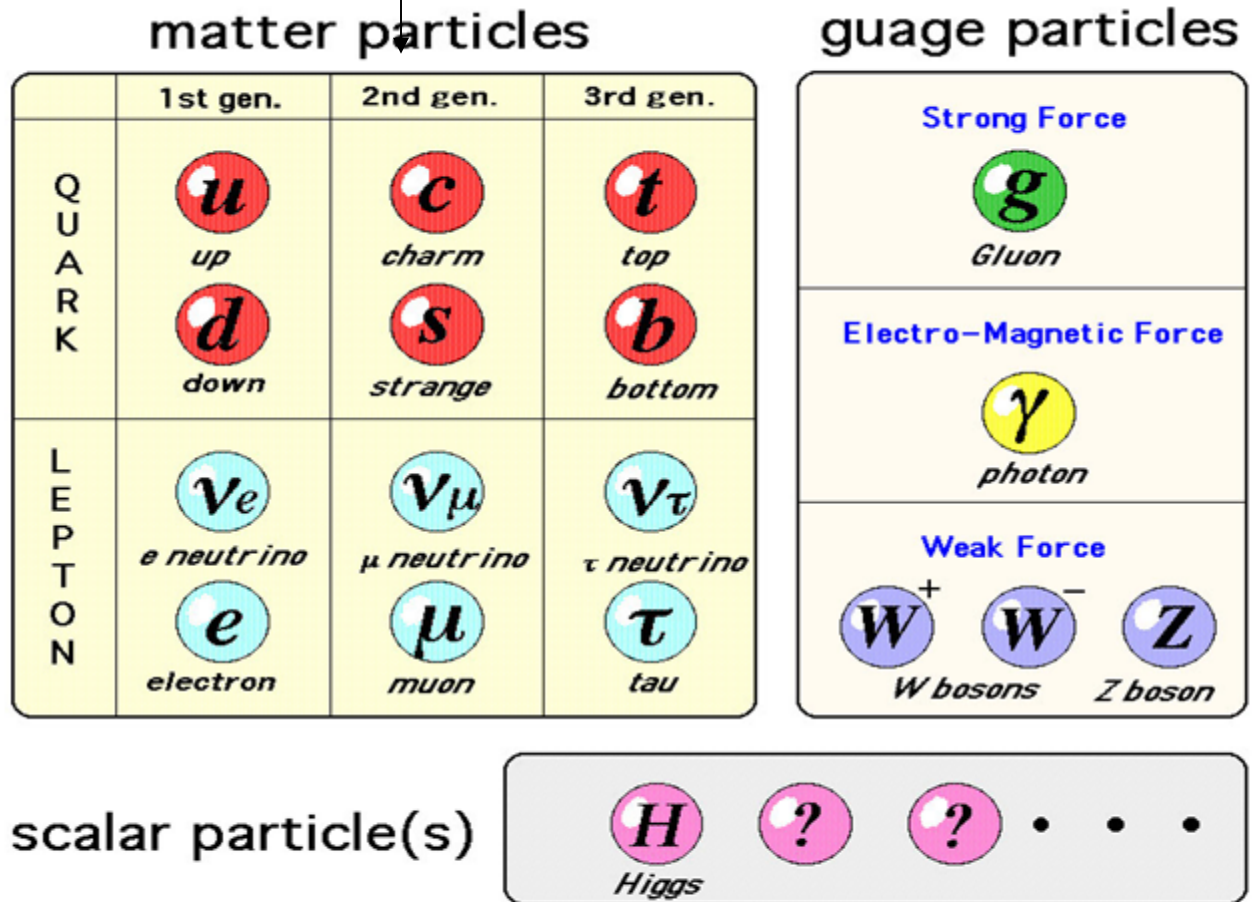
### Le pourquoi des masses?

- Nouvelle particule de spin 0 : **le boson de Higgs**
- Les interactions entre particules élémentaires et boson de Higgs leur donnent une masse
- Double prédiction :
  - ▶ existence d'une nouvelle particule de spin 0,
  - ▶ existence d'une cinquième interaction fondamentale dont le médiateur est le boson de Higgs.
- La recherche du Higgs est encore vaine
  - ▶ Indication éventuelle à 115 GeV suggérée par le LEP en 2000
  - ▶ Recherche actuelle orientée particulièrement vers la vérification de cette double prédiction, au Tevatron et surtout au LHC.
- $M(\text{Higgs})$ : une centaine à quelques centaines de GeV



# Standard Model of Particle Physics

Our picture of the fundamental constituents of nature



## Elements of the Standard Model

Standard Model predicts relationship between these parameters.

There are about 19 (+10) free parameters in the theory to be determined experimentally

# Standard Model Relations

- Standard Model predicts relation between the parameters; W boson mass ( $M_W$ )

and Fermi constant ( $G_F$ ), fine structure constant ( $\alpha$ ), Z boson mass ( $M_Z$ )

$$M_W^2 \left( 1 - \frac{M_W^2}{M_Z^2} \right) = \frac{\pi\alpha}{G_F \sqrt{2}} (1 - \Delta r)$$

$\alpha$  : electron g-2

0.004 ppm

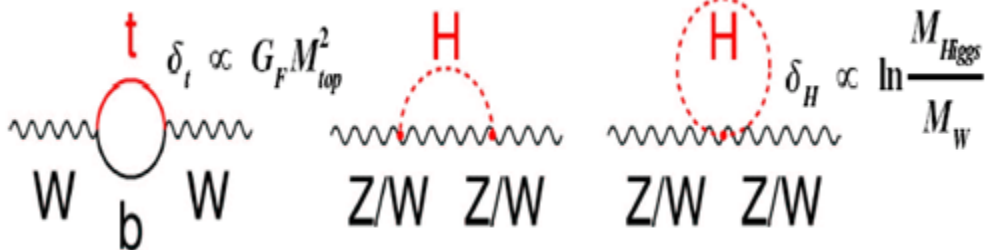
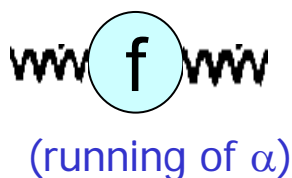
$G_F$  : muon life-time

9 ppm

$M_Z$  : LEP 1 lineshape

23 ppm

$$\Delta r \equiv -\Delta\alpha + \Delta r_{\text{weak}}$$



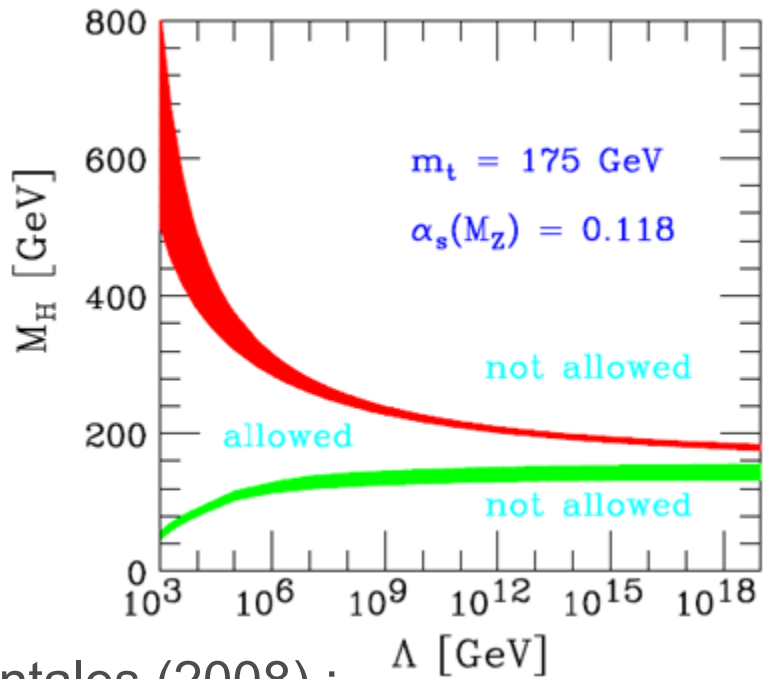
- Precision measurements require higher order terms in the theory and help constraint the unknown pieces.

# § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

## Le boson de Higgs

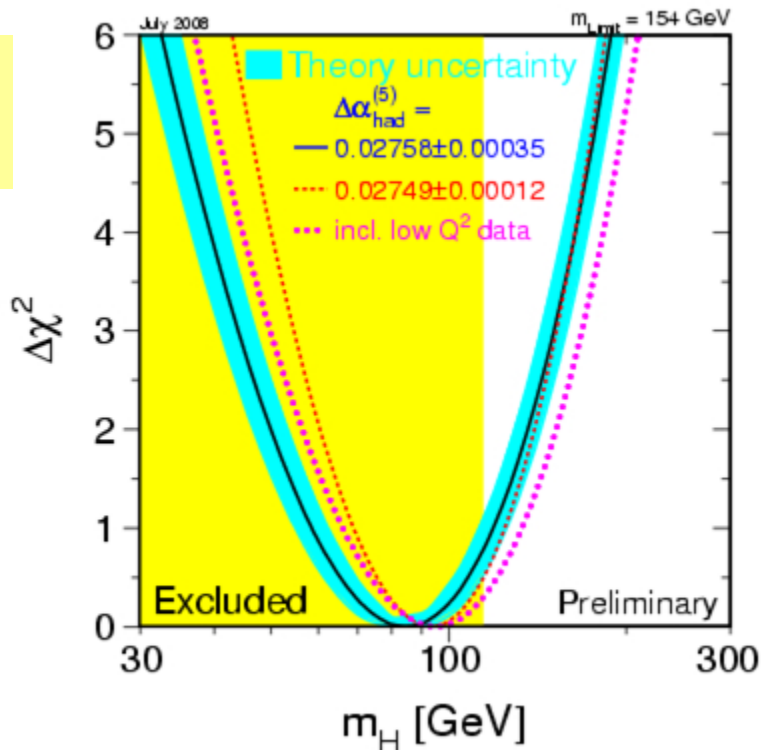
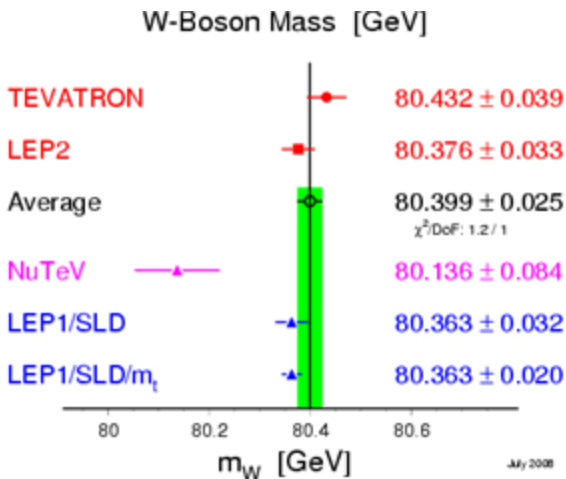
- Sa masse est inconnue mais peut être contrainte par la théorie :

**$70 \text{ GeV} < M_H < 700 \text{ GeV}$**



- Recherches expérimentales (2008) :

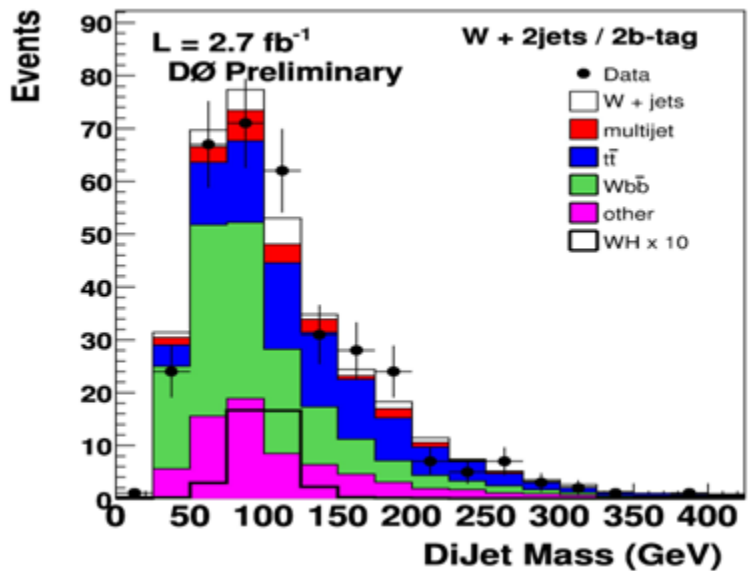
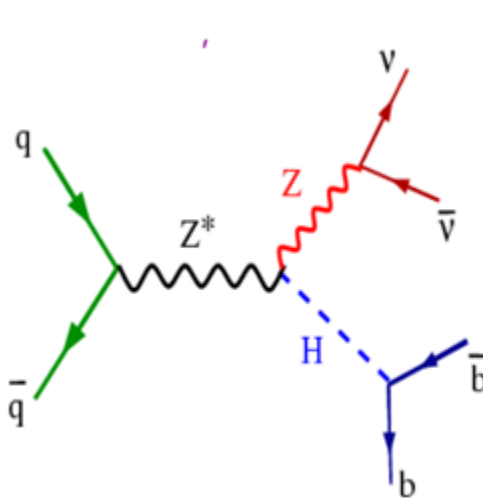
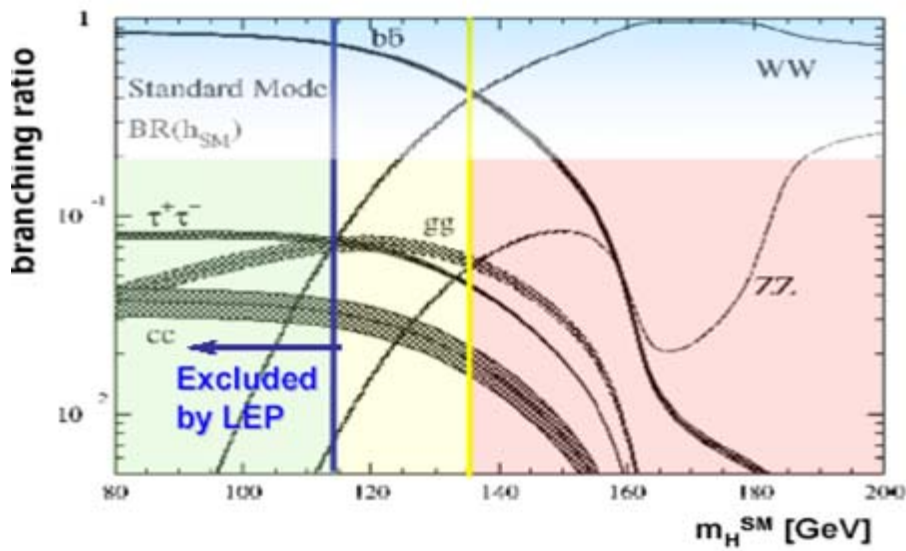
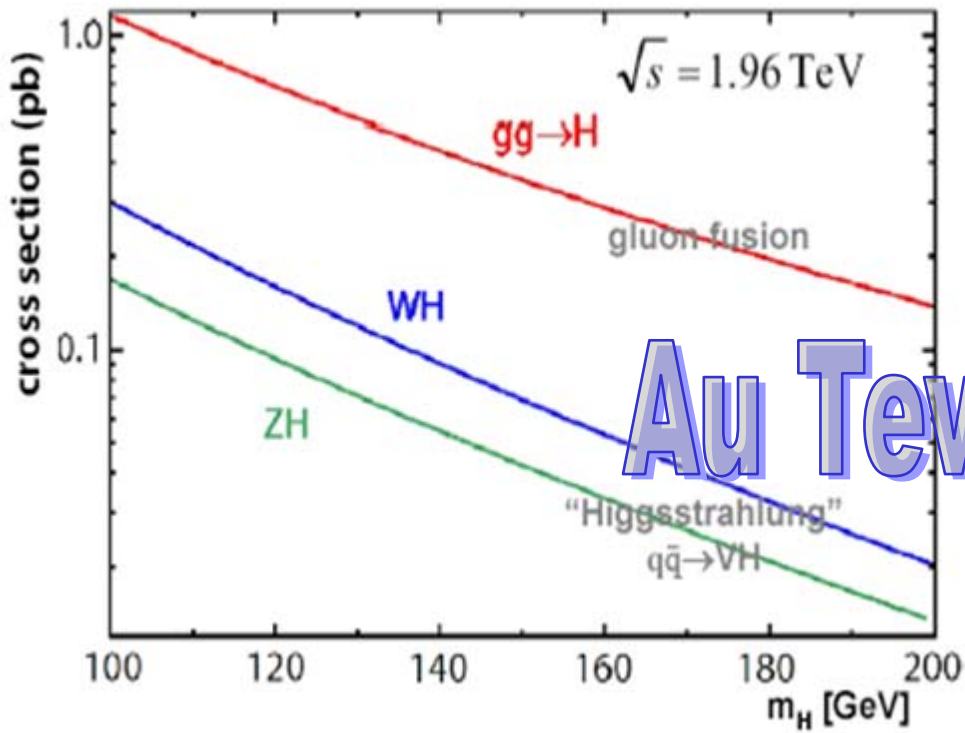
**$m_H = 84^{+34}_{-26} \text{ GeV}/c^2$**   
 **$m_H < 185 \text{ GeV}/c^2 @ 95\%$**



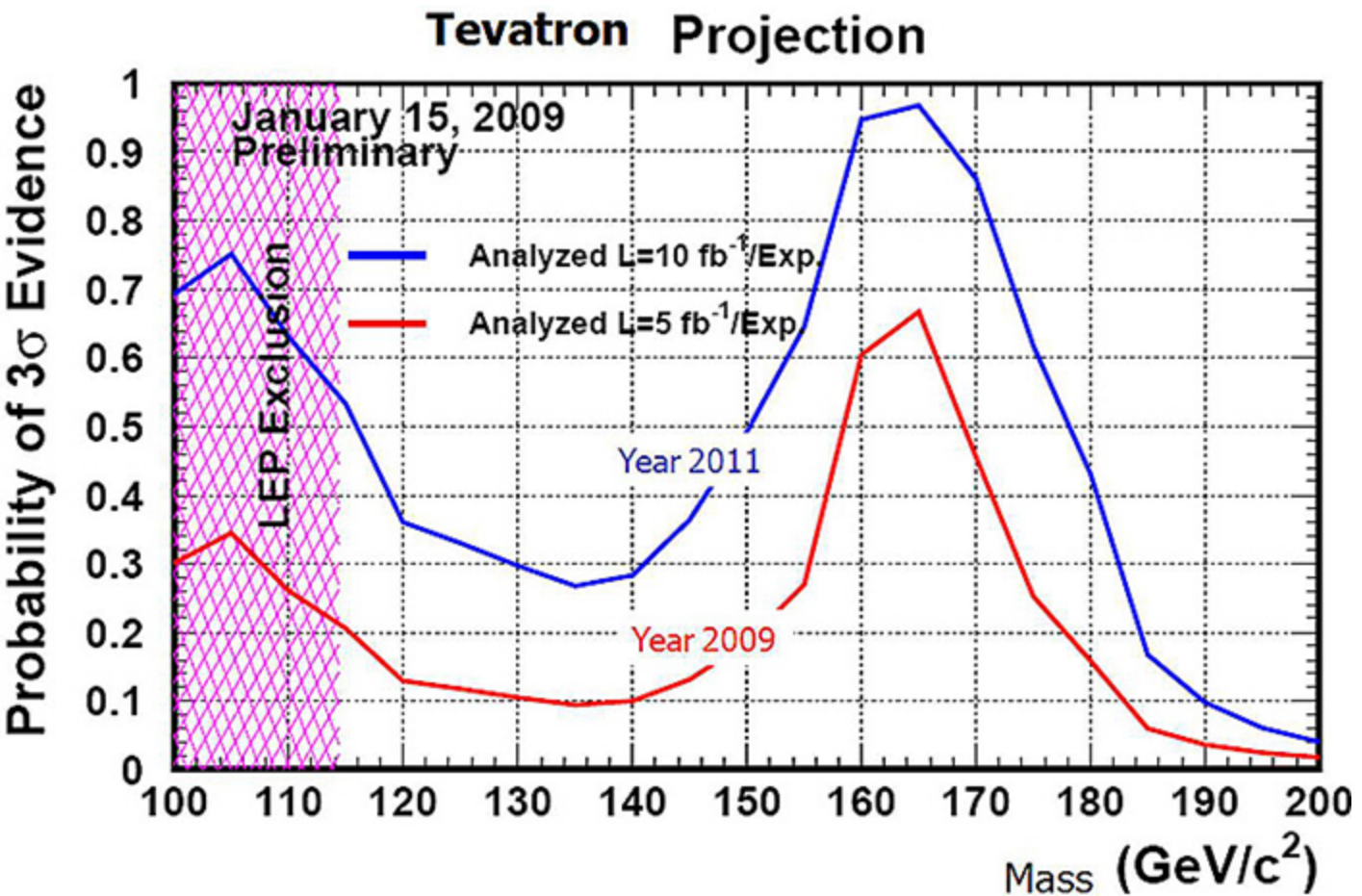
Le boson de Higgs ?



Le Higgs au Tevatron  
Avant le LHC ?



## Le boson de Higgs ?

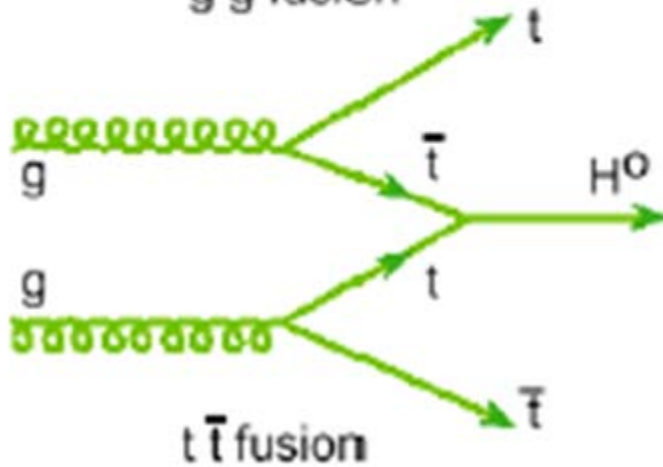
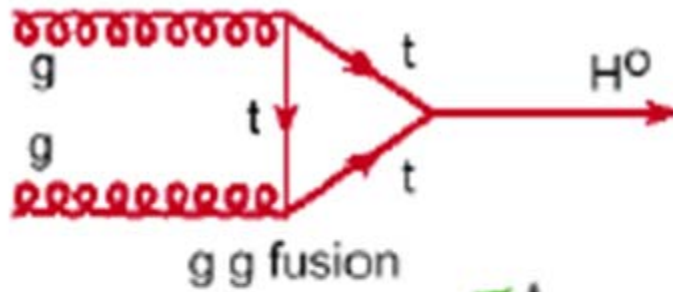


si Fermilab continue jusqu'en 2011, les chances d'une "évidence" ( $3\sigma$ ) sont supérieures à 30%

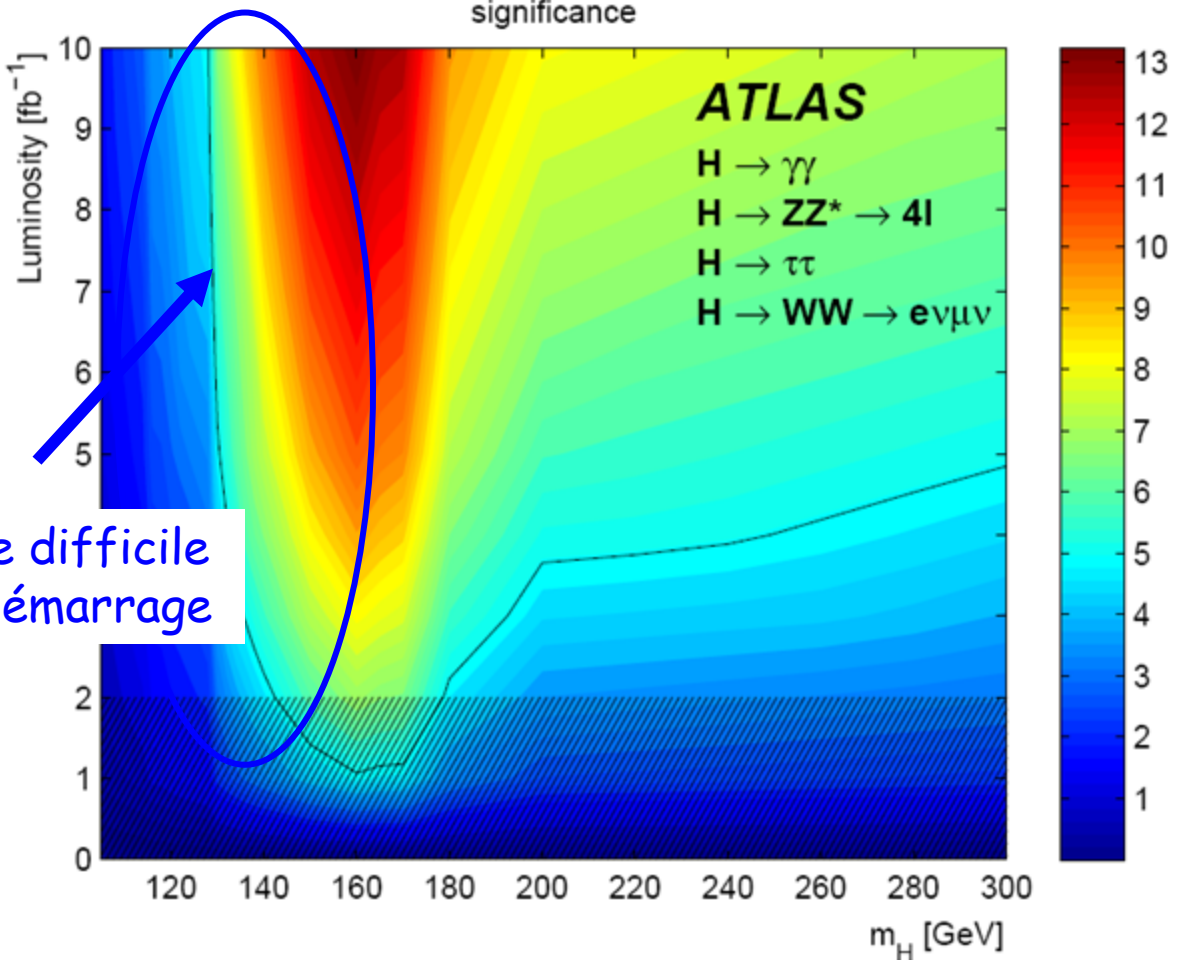
(une masse de 170  $\text{GeV}$  a déjà été exclue en 2008 par les expériences D0 et CDF à Fermilab. Mise à jour de la zone d'exclusion cette semaine)



# Le boson de Higgs au LHC



significance



zone difficile  
au démarrage

## § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

### Le Zoo est-il complet?



#### ■ Zoo des corpuscules connues à ce jour :

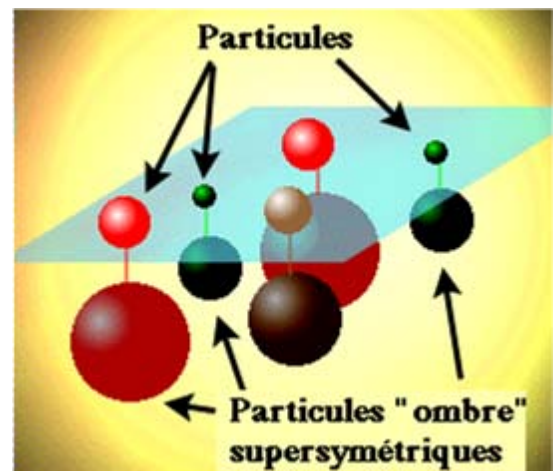
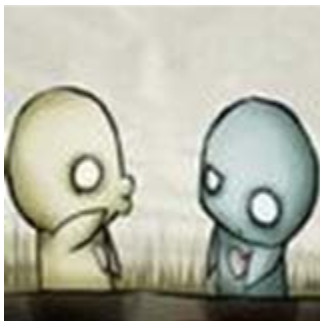
- ▶ 6 quarks (+ anti-particules)
- ▶ 6 leptons (+ anti-particules)
- ▶ 1 photon
- ▶ 8 gluons
- ▶ 3 bosons lourds :  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$



#### ■ Ce Zoo est-il complet?

#### ■ Découvrira-t-on de nouvelles particules lourdes?

- ▶ Zoo théorique:
  - **Bosons de Higgs**
  - **Particules super-symétriques**



#### ■ Découvrir des terres inconnues ?

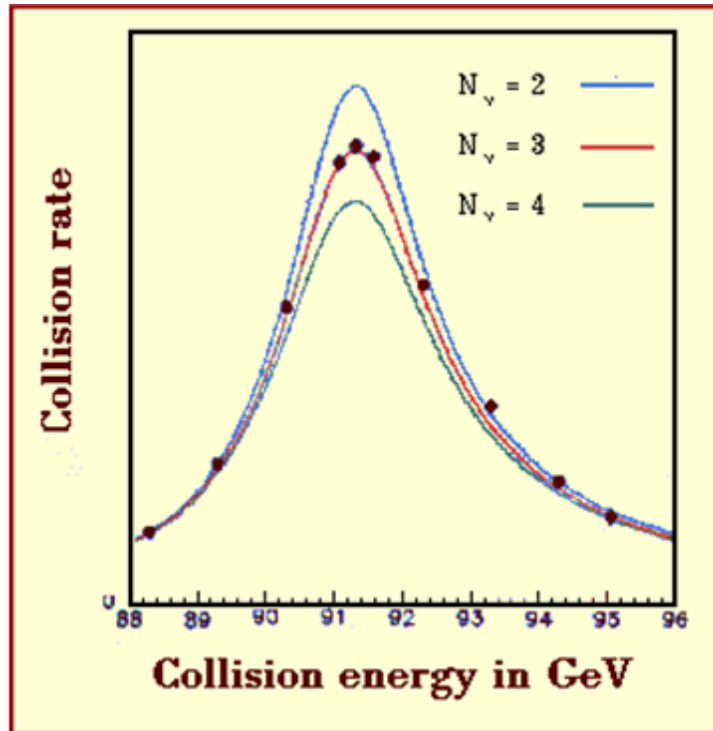
#### ■ Indices de nouveaux phénomènes

➡ **Il faut de l'énergie et de grosses machines**

## § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

### Le pourquoi des générations

- Origine du phénomène de génération ?
- Combien de familles ? Le LEP a répondu: **3**
  - ▶ Hypothèse que les neutrinos sont légers (<45 GeV), ce qui est le cas des trois familles connues.



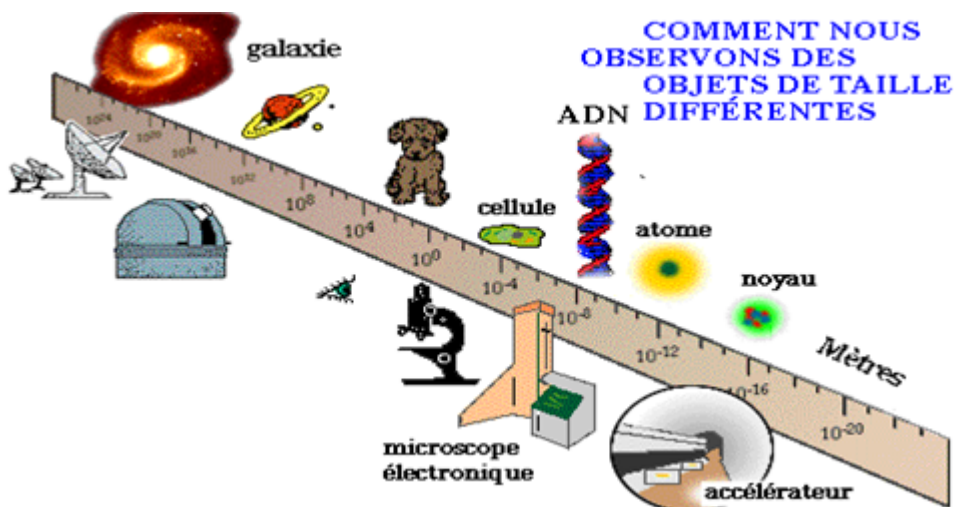
- Pourquoi n'y a-t-il que 3 familles?
  - ▶ Une quatrième famille différente des 3 premières ?

## § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

### Les quarks et les leptons sont-ils élémentaires?

- Poursuite de la quête de l'atome au sens des grecs : quelque chose que l'on ne peut couper
- On a exploré le proton actuellement à  $10^{-18}$  m
  - ▶ C'est à dire que l'on serait capable de voir des détails de l'ordre du millième de sa taille
- De même, rayon de l'électron  $< 10^{-18}$  m
  - **Seule solution : voir plus petit**
  - **Ceci demande des énergies encore plus élevées :**

$$\lambda(\text{m}) = 1.24 \cdot 10^{-15} / P(\text{GeV}/c)$$

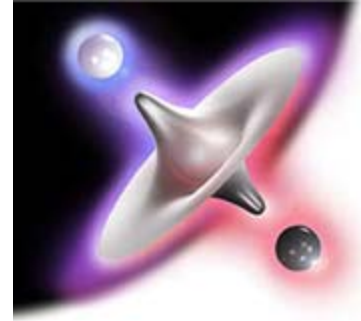


- Verra-t-on aussi des quarks en liberté?

## § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

### Où est passée l'antimatière?

- Où est passée l'antimatière dans l'Univers?
  - ▶ Sakharov (1967) a proposé le mécanisme de la «violation de CP»
- Minuscule différence entre matière et antimatière
  - ▶ Phénomène de la violation de CP
- Usines à B
  - ▶ «Le quark b» et son antiquark joueraient un rôle dans le mécanisme.
  - ▶ On cherche à produire en grande quantité les mésons B porteurs de ce quark pour le vérifier
  - ▶ Confirmation de la « violation de CP » par BaBar et Belle en 2001
- Existe-t-il des astres d'antimatière aux confins de l'univers?
  - ▶ Pas d'indications
  - ▶ Expérience sur satellite (AMS, la Nasa prévoit le lancement en 2010)
- Selon certains modèles, les protons et neutrons devraient se désintégrer dans quelques  $10^{32}$  années
  - ▶ L'excès de matière aurait alors disparu
  - ▶ Pas d'indications à ce jour de ce phénomène



~~CP~~  
pour les  
nouvelles  
particules ?

# § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

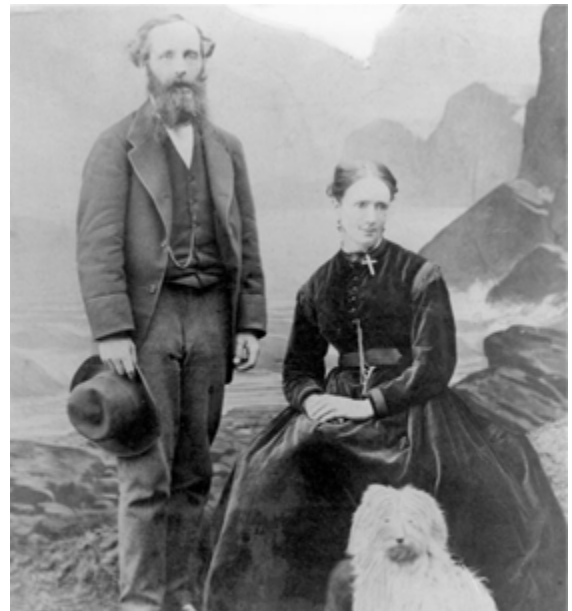
## Forces unifiées?

### ■ Gravitation (Newton)

- ▶ Chute des corps et mouvement des astres = même phénomène, deux facettes d'une seule interaction.

### ■ Electricité et magnétisme

- ▶ En 1868, James Clerk Maxwell réunit l'électricité et le magnétisme.
- ▶ C'est l'électromagnétisme.



**James Clerk Maxwell**  
(1831-1879) et sa femme

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Gauss's Law for Electricity

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Gauss's Law for Magnetism

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Faraday's Law

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \frac{\mu_0 \epsilon_0 d\Phi_E}{dt}$$

Ampere's Law

E = electric field  
A = area  
q = charge  
 $\epsilon_0$  = permittivity of free space (a constant)  
B = magnetic field intensity  
s = path length  
 $\Phi_B$  = magnetic flux  
 $\Phi_E$  = electric flux  
t = time  
 $\mu_0$  = permeability of free space (a constant)  
i = current electric charge  
 $\mu_0 \epsilon_0 = 1/c^2$ , where c = speed of light

### ■ Forces électrofaibles

- ▶ Dans les années 1970, Glashow, Weinberg et Salam proposent une théorie unique des interactions électromagnétiques et faibles (Prix Nobel 1979)
- ▶ Ils prédisent les bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$
- ▶ La découverte de ces derniers a valu le prix Nobel à Carlo Rubbia et Simon Van de Meer (1984)

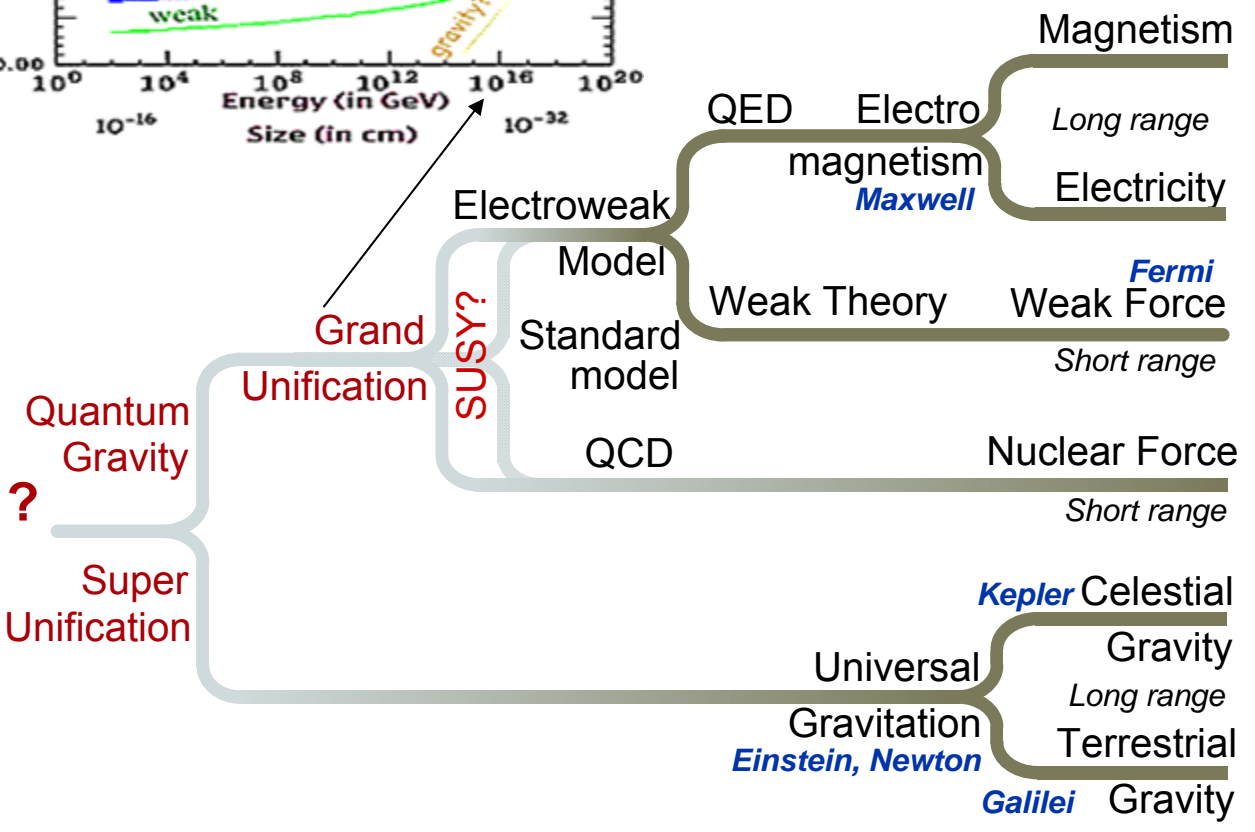
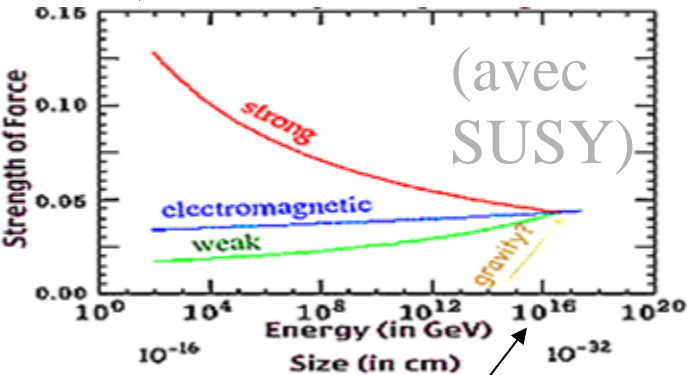


# § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

## Forces unifiées?

- Recherche d'une unification des trois interactions (électromagnétique, faible et forte)

### ➔ Théorie de Grande Unification (GUT)



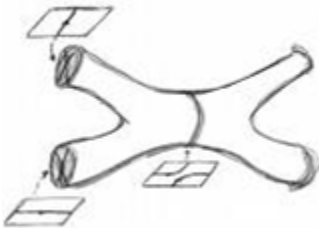
Theories:		
STRINGS?	RELATIVISTIC/QUANTUM	CLASSICAL

# § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

## Et la gravitation ?

- La gravitation n'est pas une théorie quantique : elle n'est pas inclus dans le schéma précédent

- ▶ Super-symétrie + théorie des cordes = super-cordes



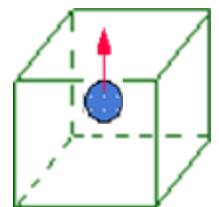
- Le messenger de l'interaction de gravitationnelle serait une particule appelée “ **graviton** ”

- ▶ Il n'a pas encore été mis en évidence.
- ▶ Il se manifesterait sous formes d'ondes gravitationnelles produites par des événements cosmiques violents.

- De telles ondes sont recherchées, mais leurs effets sont extrêmement faibles.

- ▶ Exemple : expérience VIRGO veut détecter au passage d'une onde gravitationnelle une variation relative de longueur de  $10^{-21}$  m = dimension d'un atome pour une distance terre-soleil!

- La gravitation est-elle toujours attractive?  
Quel est le poids d'un antiproton?



- ▶ Masse négative ? Imaginons un antiproton soumis à la seule gravitation terrestre : il tombe ou il monte?



## § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

### Comprendre la création de l'Univers, les étoiles, le soleil...

- L'infiniment petit rejoint l'infiniment grand
- Expériences d'astroparticules
  - ▶ La Terre est bombardée de particules de hautes énergies venant du Cosmos (Noyaux, protons, photons, électrons, neutrinos)
  - ▶ Quelles sont les sources de ces «rayons cosmique»?
- Expériences neutrino:
  - ▶ Aller sous la terre, sous l'océan, aux pôles
- Etudes des gerbes cosmiques
  - ▶ Scruter l'origine des gerbes cosmiques: photon ou noyau
  - ▶ Pointer la direction du ciel d'où elle vient: étoile, galaxie, trou noir...
- Origine de la matière « noire » dans l'Univers
  - ▶ La matière visible ne rend pas compte de toute la matière et l'énergie présentes dans l'Univers. Hypothèse de particules massives.



# § 1.6 – Les préoccupations des physiciens

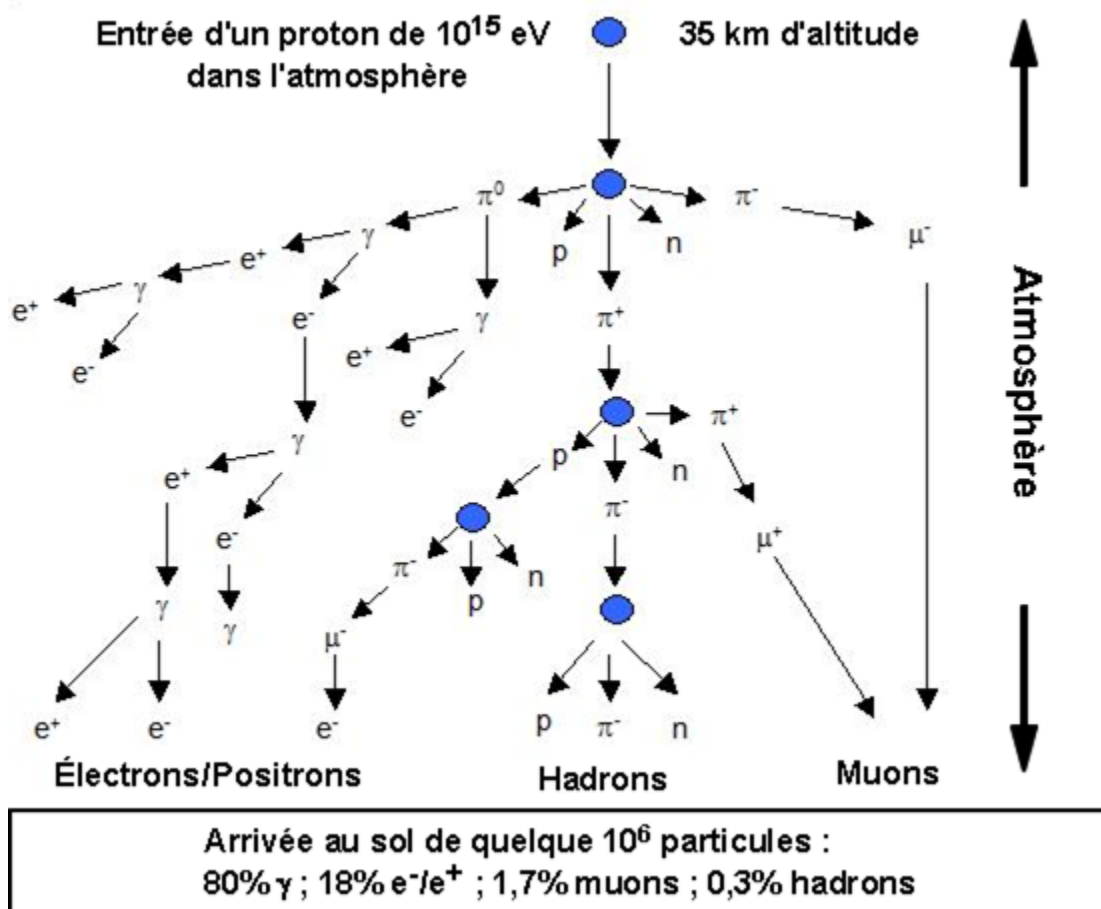
## Défis technologiques

- Défis de machines
  - ▶ Construction de machines « mondiales » gigantesques pour atteindre plusieurs TeV
- Défis de précision
  - ▶ Recherche de phénomènes très ténus
  - ▶ Besoin de hautes luminosités
  - ▶ Besoin de hautes précisions pour détecter de nouveaux phénomènes
- Défis pour les détecteurs
  - ▶ Millions de voies d'électronique
  - ▶ Problèmes d'empilement
  - ▶ Déclenchements extrêmement rapides
- Défis de statistiques
  - ▶ Volumes énormes de données
- Equipes mondiales
  - ▶ Méga-expériences, durant 20 à 30 ans
  - ▶ centaines/milliers de chercheurs et techniciens
- En Astroparticules aussi...
  - ▶ Le projet AUGER couvre la Pampa argentine
  - ▶ Projets d'expérience embarquées sur satellites

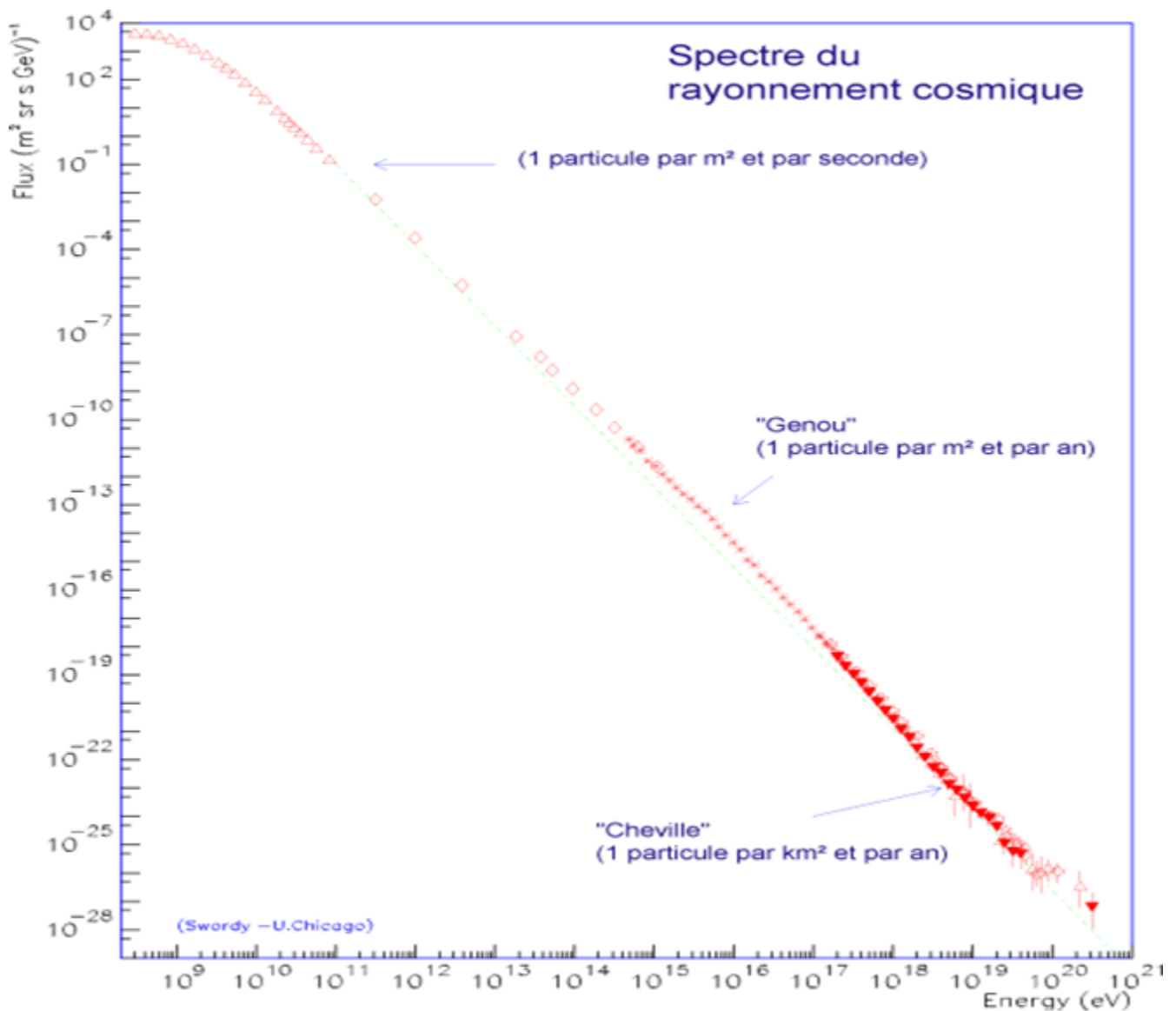


## Question posée pendant le cours: des mini trous noir au LHC?

- Réponse détaillée disponible à :  
<http://public.web.cern.ch/public/en/LHc/Safety-en.html>
- Les rayons cosmiques:
  - ▶ Le **rayonnement cosmique** désigne de manière générale le flux de particules de haute énergie (c'est-à-dire relativistes) présent dans tout l'Univers.
  - ▶ La partie chargée:  $\sim 90\%$  de proton



- ▶ La partie neutre:
  - rayon gamma
  - neutrinos



- L'énergie observée la plus haute  $\sim 10^{21}$  eV
  - ▶ flux avec  $E > 10^{17}$  eV/cm<sup>2</sup>  $\Rightarrow 5 \cdot 10^{-14}$ /s
  - ▶ surface de la terre  $5 \cdot 10^{18}$  cm<sup>2</sup> et âge de la terre 4.5 milliard d'années
  - ▶  $3 \cdot 10^{22}$  rayons cosmiques d'énergie supérieure à  $10^{17}$  eV ont touchés la terre depuis sa formation
- LHC:
  - ▶ 1 milliard de collisions proton-proton par seconde
  - ▶ activité:  $\sim 10$  millions de secondes par an
  - ▶ environ  $10^{17}$  collisions pendant la durée de vie du LHC
- La nature a donc déjà réalisé 100 mille fois le programme du LHC et la terre existe toujours...

# Review of the Safety of LHC Collisions

LHC Safety Assessment Group<sup>(\*)</sup>



Trou noir ?

lsag@cern.ch

## Summary

*The safety of collisions at the Large Hadron Collider (LHC) was studied in 2003 by the LHC Safety Study Group, who concluded that they presented no danger. Here we review their 2003 analysis in light of additional experimental results and theoretical understanding, which enable us to confirm, update and extend the conclusions of the LHC Safety Study Group. The LHC reproduces in the laboratory, under controlled conditions, collisions at centre-of-mass energies less than those reached in the atmosphere by some of the cosmic rays that have been bombarding the Earth for billions of years. We recall the rates for the collisions of cosmic rays with the Earth, Sun, neutron stars, white dwarfs and other astronomical bodies at energies higher than the LHC. The stability of astronomical bodies indicates that such collisions cannot be dangerous. Specifically, we study the possible production at the LHC of hypothetical objects such as vacuum bubbles, magnetic monopoles, microscopic black holes and strangelets, and find no associated risks. Any microscopic black holes produced at the LHC are expected to decay by Hawking radiation before they reach the detector walls. If some microscopic black holes were stable, those produced by cosmic rays would be stopped inside the Earth or other astronomical bodies. The stability of astronomical bodies constrains strongly the possible rate of accretion by any such microscopic black holes, so that they present no conceivable danger. In the case of strangelets, the good agreement of measurements of particle production at RHIC with simple thermodynamic models constrains severely the production of strangelets in heavy-ion collisions at the LHC, which also present no danger.*

<sup>(\*)</sup> John Ellis, Gian Giudice, Michelangelo Mangano, Igor Tkachev<sup>(\*\*)</sup> and Urs Wiedemann

Theory Division, Physics Department, CERN, CH 1211 Geneva 23,  
Switzerland

<sup>(\*\*)</sup> Permanent address: Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia