

# Le Modèle Standard

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

Laboratoire de Physique Théorique  
CNRS & Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

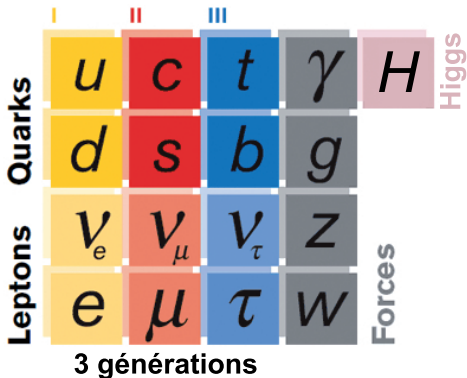
Formation académies de Créteil et Versailles, Janvier/Février 2015



# D'une démarche analytique...

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

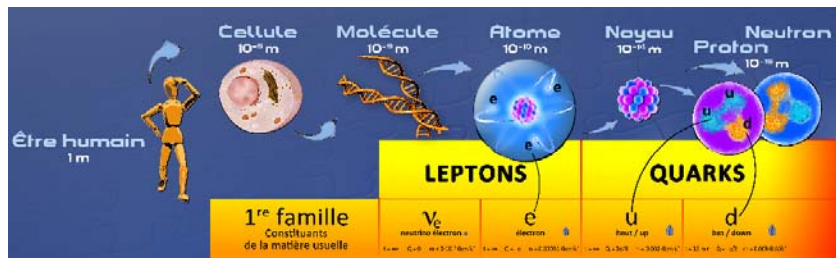
... à une autre, un siècle plus tard



# Les constituants de la matière



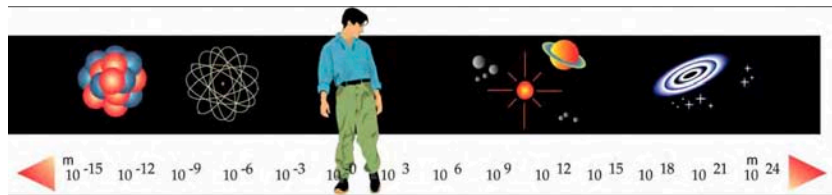
# La matière ordinaire



- Quarks: constituants des protons (uud) et neutrons (udd)
- Électrons: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives:  $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$  (15 min)

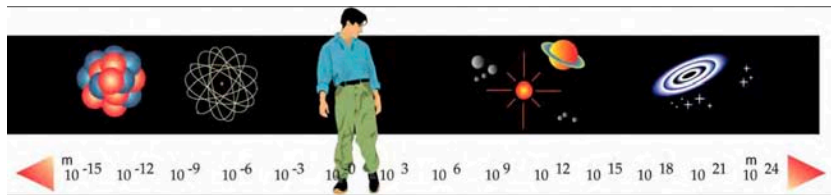
	I	II	III			
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Z	Forces	
	e	$\mu$	$\tau$	W		
Quarks	u	c	t	$\gamma$		Higgs
	d	s	b	g		
3 générations						

# Monter en énergie, diminuer en taille

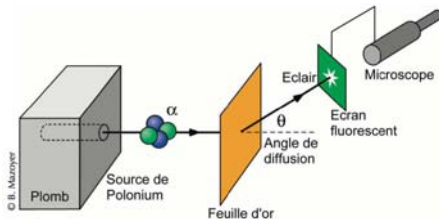


- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' $E$  de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X,  $\gamma$ )

# Monter en énergie, diminuer en taille



- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' $E$  de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X,  $\gamma$ )
- ou d'autres projectiles déviés par constituants [en 1909, Geiger, Marsden, Rutherford "voient" le noyau avec  $\alpha$  sur atome d'or]



# Quelques ordres de grandeur

$E$ : accélération d'un électron soumis à 1 volt de différence de potentiel

1 electron-volt:  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

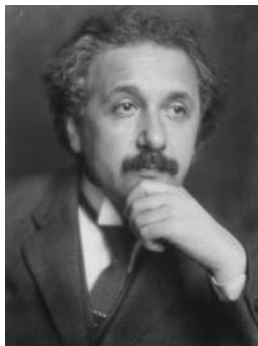
Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )	1-10 MeV
Energie de masse d'un proton	1 GeV
Énergie de collision au LHC	7-14 TeV
Rayons cosmiques	1 MeV à 1000 TeV

$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

Une montée en énergie avec des conséquences inattendues...

# Un champ de bataille théorique

Albert Einstein



Relativité restreinte  
(Poincaré, Lorentz...)  
 $c$  vitesse de la lumière ( $v$  max)  
objets rapides

Niels Bohr



Mécanique quantique  
(Schrödinger, Heisenberg...)  
 $h$  quantum d'action ( $E \cdot t$  min)  
temps courts

Une cohabitation qui fait des étincelles en physique des particules !

# La relativité

- **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
- dilatation des temps, contraction des longueurs
- notion de référentiel propre (au repos) de la particule

- **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
  - dilatation des temps, contraction des longueurs
  - notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- **Energie, impulsion et vitesse**

$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

- masse: identique dans tout référentiel
- représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée

- **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
  - dilatation des temps, contraction des longueurs
  - notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- **Energie, impulsion et vitesse**

$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

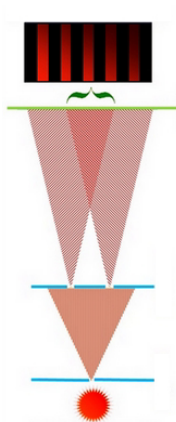
- masse: identique dans tout référentiel
  - représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée
- **Equivalence entre masse et énergie**  $E = Mc^2$ 
    - Possible de convertir de la matière en énergie et vice-versa



# La mécanique quantique

- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique



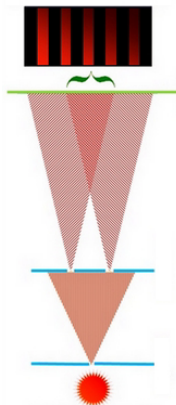
# La mécanique quantique

- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

- Probabilités

- Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$



# La mécanique quantique

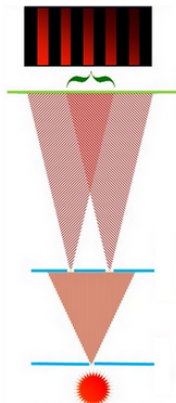
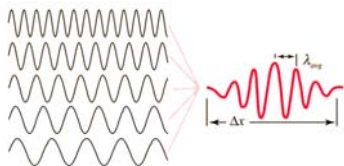
## ● Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

## ● Probabilités

- Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$

- Toute particule décrite par une **superposition** d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



# La mécanique quantique

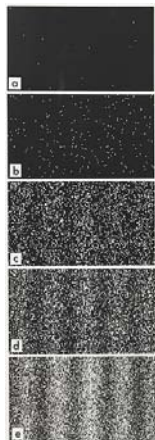
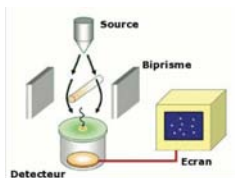
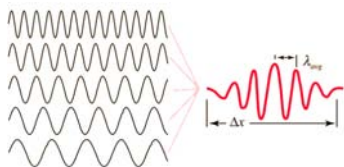
- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

- Probabilités

- Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_C \text{chemin } X \rightarrow Y A(C)|^2$   
avec  $A(C)$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_C$

- Toute particule décrite par une **superposition** d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



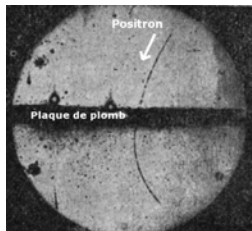
# Les adversaires réconciliés

- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant,  $E$  suffisamment élevée pour des effets
  - Relativiste:  $E = mc^2$ , équivalence entre énergie et masse
  - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



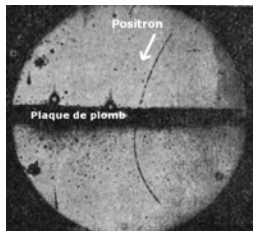
# Une nouvelle vision de la matière

- A chaque particule son antiparticule:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule
- On ne casse plus la matière en sous-constituants. . .
- . . . on crée de **nouvelles particules** lors de collisions violentes



# Une nouvelle vision de la matière

- A chaque particule son antiparticule:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule
- On ne casse plus la matière en sous-constituants. . .
- . . . on crée de **nouvelles particules** lors de collisions violentes

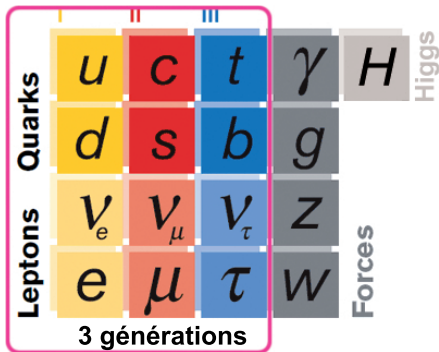


## Théorie Quantique des Champs

- une particule est vue comme l'excitation d'un champ
- qui se propage comme une vague se déplaçant sur la mer
- et qui subit des interactions ponctuelles (locales) qui modifient
  - l'état des particules (impulsion, énergie. . .)
  - leur nature et leur nombre  
(désintégration, création/annihilation paires particule/antiparticule)

# Les trois générations

- Dans les rayons cosmiques, puis accélérateurs de particules, des collisions de haute énergie créant de nouvelles particules



- Copies de la 1ere famille (charge électrique...) hormis la masse: top  $t$  60 000 fois plus lourd que up  $u$  (aussi massif qu'atome d'or)
- Instables:  $t$  se désintègre en quelques  $10^{-25}$  secondes



# Carte d'identité d'une particule

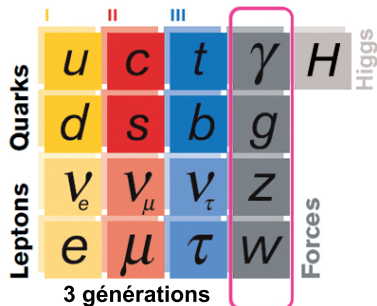
- Nom
- Constitution (si particule composite)
- Masse
- Spin (moment angulaire intrinsèque, d'origine quantique)
- Sensibilité aux interactions (charge électrique, couleur...)
- Durée de vie
- Modes de désintégration (dans des particules plus légères), et probabilités associées
  - $t \rightarrow be^+ \nu$  (99.8%)
  - $t \rightarrow se^+ \nu$  (0.15%)
  - $t \rightarrow de^+ \nu$  ( $6 \times 10^{-5}$ )

<b><math>c\bar{c}</math> MESONS</b>			
<b><math>\eta_c(1S)</math></b>		$J^G(J^{PC}) = 0^+(0^{-+})$	
Mass $m = 2980.5 \pm 1.2$ MeV ( $S = 1.7$ )		Full width $\Gamma = 27.4 \pm 2.9$ MeV ( $S = 2.0$ )	
<b><math>\eta_c(1S)</math> DECAY MODES</b>	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Confidence level	$\Gamma$ (MeV/c)
<b>Decays involving hadronic resonances</b>			
$\eta'(958)\pi$	(4.1 $\pm$ 1.7) %		1321
$\rho\rho$	(2.0 $\pm$ 0.7) %		1273
$K^*(892)^0 K^- \pi^+ + c.c.$	(2.0 $\pm$ 0.7) %		1276
$K^*(892) \bar{K}^*(892)$	(0.2 $\pm$ 3.4) $\times 10^{-3}$		1194
$K^{*0} \bar{K}^{*0} \pi^+ \pi^-$	(1.1 $\pm$ 0.5) %		1071
$\phi K^+ K^-$	(2.0 $\pm$ 1.4) $\times 10^{-3}$		1102
$\phi\phi$	(2.7 $\pm$ 0.0) $\times 10^{-3}$		1087
$\phi 2(\pi^+ \pi^-)$	< 3.5 % $\times 10^{-3}$	90%	1240
$a_0(980)\pi$	< 2 %	90%	1325
$a_0(1320)\pi$	< 2 %	90%	1194
$K^*(892) \bar{K}^+ + c.c.$	< 1.20 %	90%	1308
$f_0(1270)\eta$	< 1.1 %	90%	1143
$\omega\omega$	< 3.1 % $\times 10^{-3}$	90%	1266
$\omega\phi$	< 1.7 % $\times 10^{-3}$	90%	1183
$f_0(1270)f_0(1270)$	(7.6 $\pm$ $\frac{3.1}{1.4}$ ) $\times 10^{-3}$		771
$f_0(1270)f_0'(1525)$	(1.0 $\pm$ $\frac{0.5}{0.5}$ ) %		509
<b>Decays into stable hadrons</b>			
$K \bar{K} \pi$	(7.0 $\pm$ 1.2) %		1379
$\eta\pi\pi$	(4.0 $\pm$ 1.0) %		1437
$\pi^+ \pi^- K^+ K^-$	(1.5 $\pm$ 0.6) %		1343
$K^+ K^- 2(\pi^+ \pi^-)$	(7.0 $\pm$ 2.0) $\times 10^{-3}$		1252
$2(K^+ K^-)$	(1.5 $\pm$ 0.7) $\times 10^{-3}$		1053
$2(\pi^+ \pi^-)$	(1.20 $\pm$ 0.30) %		1457
$3(\pi^+ \pi^-)$	(1.5 $\pm$ 0.5) %		1405
$\rho\rho$	(1.3 $\pm$ 0.4) $\times 10^{-3}$		1158
$A \bar{A}$	(1.04 $\pm$ 0.31) $\times 10^{-3}$		988
$K \bar{K} \eta$	< 3.1 %	90%	1263
$\pi^+ \pi^- \rho\rho$	< 1.2 %	90%	1025
<b>Radiative decays</b>			
$\gamma\gamma$	(1.0 $\pm$ $\frac{0.6}{0.6}$ ) $\times 10^{-4}$		1490

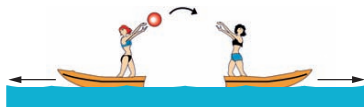
résumé dans le Particle Data Book

# Compléter le Modèle Standard

# Les interactions fondamentales



- Gravitation  
étoiles, galaxies. . .  $[10^{-38}]$
- Force faible (bosons  $W, Z$ )  
radioactivité  $\beta$   $[10^{-5}]$
- Electromagnétisme (photon  $\gamma$ )  
électricité, chimie. . .  $[10^{-3}]$
- Force forte (gluons  $g$ )  
cohésion des noyaux  $[1]$

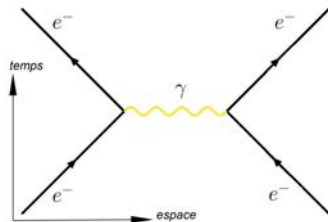
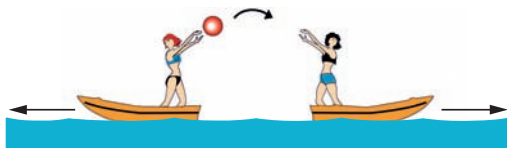


- 3 interactions sur 4 en termes d'échanges de particules (boson médiateurs)
- gravitation négligeable [**intensité relative** subatomique]

Les interactions ne “parlent” pas toutes aux mêmes particules !

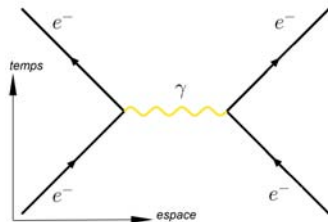
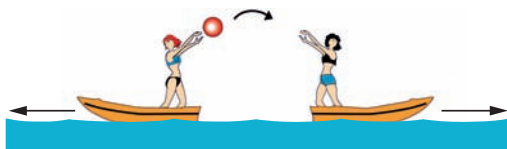
# Interaction électromagnétique

- Boson médiateur : **photon**
- Interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand  $r$ , potentiel  $V(r) \sim 1/r$  de portée infinie



# Interaction électromagnétique

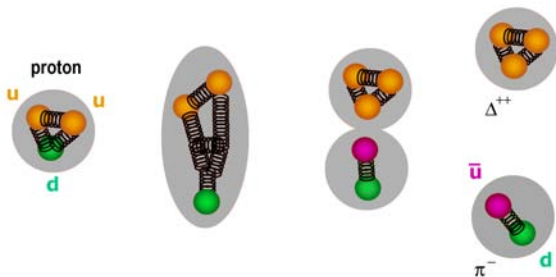
- Boson médiateur : **photon**
- Interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand  $r$ , potentiel  $V(r) \sim 1/r$  de portée infinie



- atomes (états liés électrons-noyau), chimie...
- interaction lumière-matière (laser, effet photoélectrique)

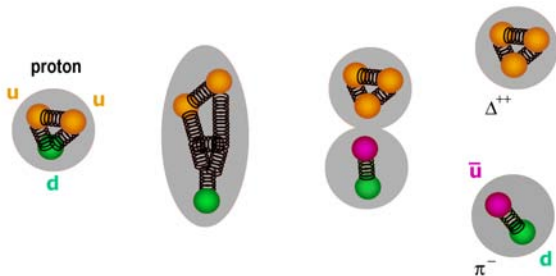
# Interaction forte

- Bosons médiateurs : **8 gluons**
- Interagit avec les particules portant une charge de “couleur” (vert, rouge, bleu) à savoir les quarks. . . et les gluons eux-mêmes (!)
- A grand  $r$ , potentiel  $V(r) \sim r$



# Interaction forte

- Bosons médiateurs : **8 gluons**
- Interagit avec les particules portant une charge de “couleur” (vert, rouge, bleu) à savoir les quarks. . . et les gluons eux-mêmes (!)
- A grand  $r$ , potentiel  $V(r) \sim r$



- Les quarks restent **confinés** dans de objets de rayon  $O(1 \text{ fm})$
- . . . des hadrons, états liés de trois quarks (proton, neutron. . .) ou d'un quark et d'un anti-quark (pion, kaon. . .), observés
- Interaction forte aussi nécessaire pour la stabilité des noyaux

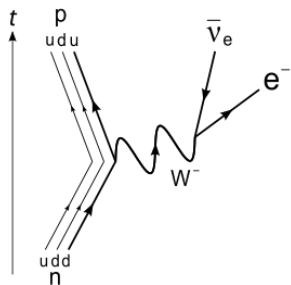
# Interaction faible

- Bosons médiateurs : 2 bosons chargés électriquement  $W^\pm$  et un boson neutre  $Z^0$ , massifs (80 à 90 GeV)
- Interagit avec tout le monde, hormis les gluons
- $V(r) \propto e^{-Mr}/r$  avec  $M = M_{W,Z}$  GeV, portée d'ordre  $10^{-18}m$



# Interaction faible

- Bosons médiateurs : 2 bosons chargés électriquement  $W^\pm$  et un boson neutre  $Z^0$ , massifs (80 à 90 GeV)
- Interagit avec tout le monde, hormis les gluons
- $V(r) \propto e^{-Mr}/r$  avec  $M = M_{W,Z}$  GeV, portée d'ordre  $10^{-18}m$



- Portée **subatomique**, pas d'état lié
- Désintégrations, en particulier désintégration nucléaire  $\beta$
- ... via un boson  $W^\pm$  impliquant ( $u, d$ ) et/ou ( $e, \nu_e$ )
- ... ou leurs copies plus lourdes des autres familles
- Certains bosons médiateurs ( $W^\pm$ ) chargés électriquement

# Le boson de Higgs

Vision actuelle de la physique des particules, très bien testée

- depuis plus d'un siècle: électromagnétisme, électron, photon
- 1960-70: interaction forte, quarks
- 1990-2010: interaction faible, neutrinos

	I	II	III		
Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$	$H$ Higgs
	$d$	$s$	$b$	$g$	
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$	
	$e$	$\mu$	$\tau$	$W$	

3 générations

Un dernier ingrédient  
du Modèle Standard

le boson de Higgs

- pour unifier interactions électromagnétique et faible
- pour donner une masse aux particules

# Le mécanisme de Higgs

## Analogie avec la lumière dans un milieu

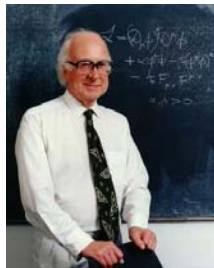
- Indice de réfraction  $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité  $c_{\text{vide}}$
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement !



# Le mécanisme de Higgs

## Analogie avec la lumière dans un milieu

- Indice de réfraction  $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité  $c_{\text{vide}}$
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement !



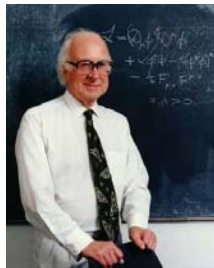
## Problème similaire dans le Modèle Standard

- Eqs. (origine géométrique):  $m = 0$  pour toutes les particules
- Milieu (champ de Higgs) qui interagit et les "freine" plus ou moins
- ... ce qui les rend (pour nous) plus ou moins massives

# Le mécanisme de Higgs

## Analogie avec la lumière dans un milieu

- Indice de réfraction  $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité  $c_{\text{vide}}$
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement !

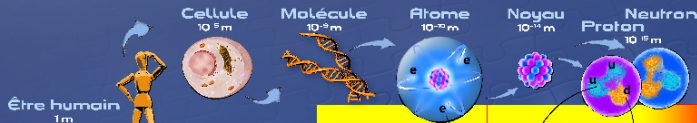


## Problème similaire dans le Modèle Standard

- Eqs. (origine géométrique):  $m = 0$  pour toutes les particules
- Milieu (champ de Higgs) qui interagit et les "freine" plus ou moins
- ... ce qui les rend (pour nous) plus ou moins massives

Témoin de ce **Mécanisme de Higgs** dans le Modèle Standard :  
une particule, **le boson de Higgs** (excitation du champ de Higgs)

# Composants élémentaires de la matière



Être humain  
1m

Terre  
10<sup>7</sup>m

Soleil  
10<sup>9</sup>m

Galaxie  
10<sup>21</sup>m



**1<sup>re</sup> famille**  
Constituants de la matière usuelle

**2<sup>e</sup> famille**  
Réplique plus massive de la 1<sup>re</sup> famille

**3<sup>e</sup> famille**  
Réplique plus massive des 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> familles

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b>	$\nu_e$ neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il participe aussi la séparation entre interactions électrofaible et forte.
<b>2<sup>e</sup> famille</b>	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charm / charm	s strange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b>	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	t top	b bottom / bottom / bottom	

## INTERACTIONS FONDAMENTALES



Champ de Higgs	
<b>Bosons Z, W<sup>±</sup></b>	Déjà découverts radiativement (Z <sup>0</sup> et W <sup>±</sup> ) certains neufs, ils sont stables
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Électromagnétisme, cohésion des atomes et des molécules, lumière
<b>Gluons g</b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chaque des quatre interactions fondamentales pour se réaliser dans le monde macroscopique nécessite des médiateurs qui interagissent en particulier avec les photons.

à grande échelle : la gravité est la seule à agir sur l'ensemble de la matière, c'est pourquoi elle est la plus dominante à grande échelle ;  
à petite échelle : les interactions électrofaibles et fortes sont dominantes car elles sont les plus puissantes ;  
l'interaction électrofaible est responsable de la production de lumière.



Antiproton

## ANTIMATIÈRE

À chaque particule de matière correspond une antiparticule. Les antiparticules ont la même masse mais des charges opposées.

Voir les constituants de la matière

# “Voir” les particules élémentaires



- Voir, en science, c'est utiliser un outil plus ou moins complexe. . .
- Dont nous devons interpréter les signaux



# “Voir” les particules élémentaires



- Voir, en science, c'est utiliser un outil plus ou moins complexe. . .
- Dont nous devons interpréter les signaux
  
- En physique des particules, il s'agit d'un détecteur
- Il peut identifier les particules et déterminer leurs propriétés (masse, charge, désintégrations. . .)
- Encore faut-il avoir des particules à observer !

# Accélérateur de particules



*Le CERN près de Genève avec  
le LHC [Large Hadron Collider]*

# Accélérateur de particules

- un vrai periph' pour particules

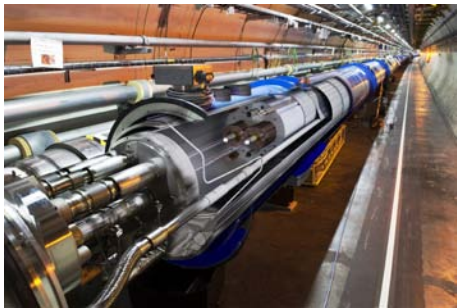


# Accélérateur de particules

- un vrai périph' pour particules
- accélérées dans des tunnels

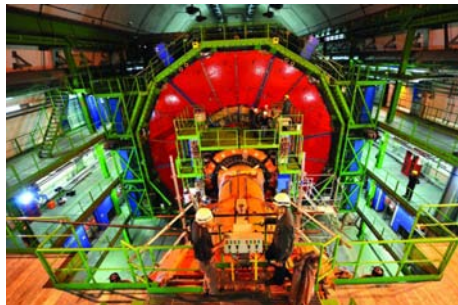


# Accélérateur de particules



- un vrai périph' pour particules
- accélérées dans des tunnels

# Accélérateur de particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux

# Accélérateur de particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

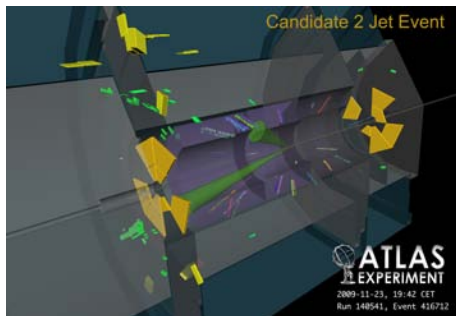
# Accélérateur de particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

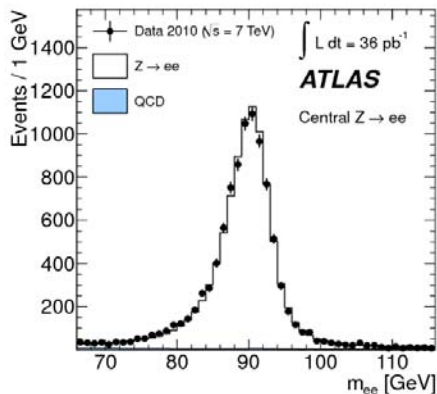


# Accélérateur de particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

# Accélérateur de particules



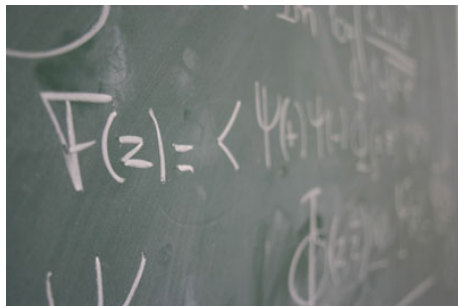
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

# Accélérateur de particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision
- reste à interpréter ces données !

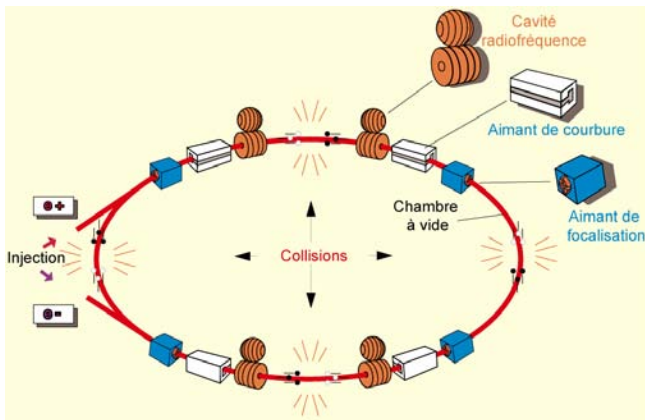
# Accélérateur de particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision
- reste à interpréter ces données !

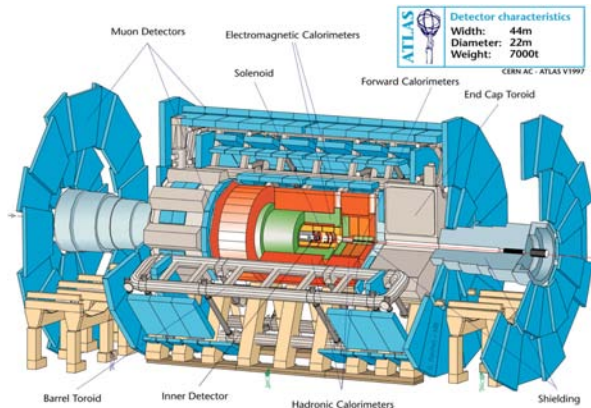
*Exemple: ATLAS au LHC*

# Accélérer



- projectiles chargés (électron, proton) gardés sur une trajectoire "circulaire" par  $\vec{B}$  (aimants dipolaires, quadrupolaires...)
- à chaque tour, gagnent de l'énergie par  $\vec{E}$  (cavités radiofréquence)
- mise en paquets séparés les uns des autres

# Détecter

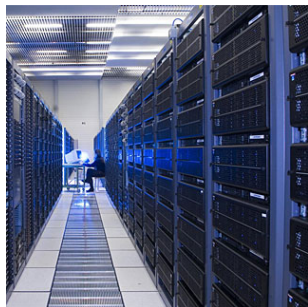
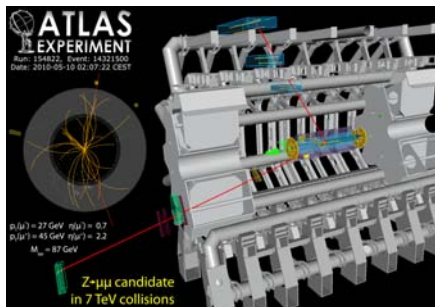


- Plusieurs couches, spécialisées selon le type de particules
- Liquide ou solide perturbé par le passage de particules
  - Trajectoire: perturbation du milieu (ionisation. . .) avec courbure  $\vec{B}$
  - Energie: dépôt d'énergie par interaction avec le détecteur

# Enregistrer

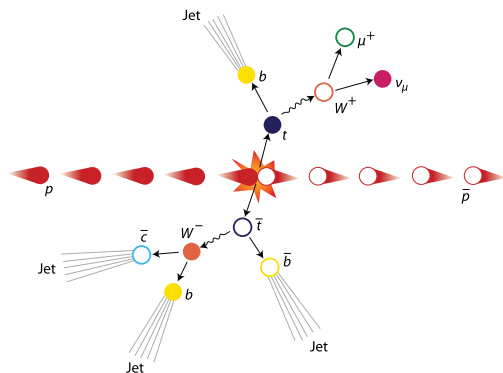
Près de **600 millions** de collisions par seconde dans les détecteurs

- Informations converties en signaux par cartes électroniques
- Évènements intéressants (100 /s) enregistrés et analysés plus tard (prenant 100 mégaoctets/s)
- Fonctionnement en réseau au niveau des équipes, mais aussi des ordinateurs (connectés par une grille de calcul)



# Analyser

- Des processus peu fréquents
- Particules créées étudiées via une cascade de désintégrations



- Théorie: seulement la probabilité pour chaque processus
- Expérience: signal en compétition avec des bruits de fond

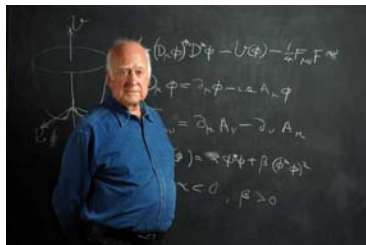
**Statistique** : Indispensable de répéter (très souvent) l'expérience



# Interpréter

Spécialisation importante entre théoriciens et expérimentateurs

- Exp: chacun maîtrise un aspect d'un détecteur (big science)
- Théo: concepts mathématiques et physiques avancés



Chez les théoriciens

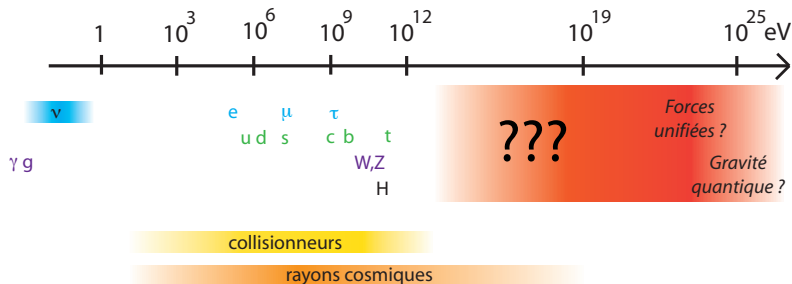
- Surtout moyens humains (petites équipes)
- Mais pas seulement papier crayon (beaucoup de résolution numérique par réseaux de PC et superordinateurs)
- Pas seulement interpréter, mais aussi proposer de nouvelles idées

# Quelques questions en suspens

# Les limites du Modèle Standard

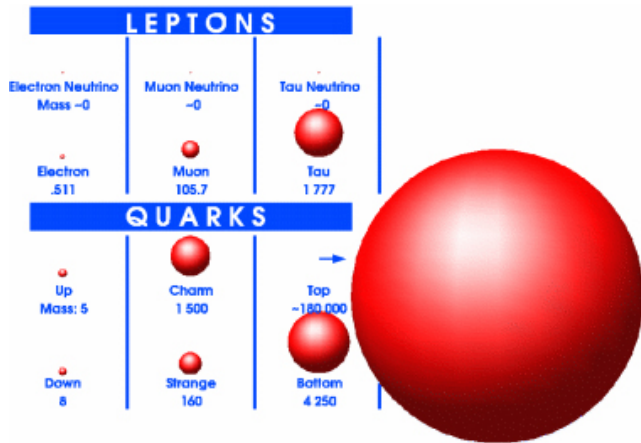
Modèle Standard reproduit très bien l'expérience (y compris pour le boson de Higgs), mais pas parfaitement satisfaisant

- Nombreux paramètres (19 !) fixés à des valeurs arbitraires
- Pourquoi trois familles, avec la même structure d'interactions ?
- Pourquoi trois interactions très différentes ? Et la gravitation ?



Chaque montée en énergie a donné lieu à des découvertes :  
sous-structure, nouvelle interaction, nouvelles particules

# L'énigme de la masse



- Masses viennent de l'interaction avec champ de Higgs
- Prennent des valeurs très différentes : pourquoi ?

# De la masse oui, mais pas de toute la masse

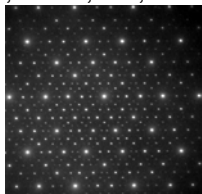
*Boson de Higgs responsable de la masse des particules*

# De la masse oui, mais pas de toute la masse

*Boson de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires*

## Élémentaire

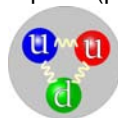
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

## Composite

3 quarks (proton, neutron...)  
ou quark+antiquark (pion, kaon...)



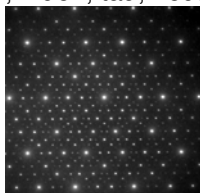
Masse des quarks (Higgs,  $\sim 1\%$ ) + E  
de "liaison" (inter. forte,  $\sim 99\%$ )

# De la masse oui, mais pas de toute la masse

*Boson de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires*

## Élémentaire

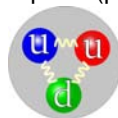
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

## Composite

3 quarks (proton, neutron...)  
ou quark+antiquark (pion, kaon...)



Masse des quarks (Higgs,  $\sim 1\%$ ) + E  
de "liaison" (inter. forte,  $\sim 99\%$ )

Energie de liaison :  $M_{\text{composite}} = \sum m_{\text{constituants}} - E_{\text{liaison}}$

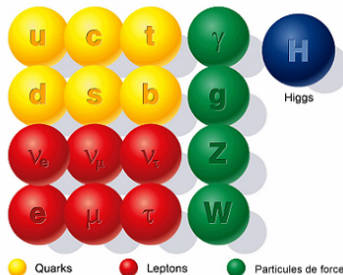
- Atome:  $M_H = m_p + m_e - 13.6 \text{ eV}/c^2$  (1/100 000 000 du tout)
- Noyau:  $M_D = m_p + m_n - 2.2 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$  (1/1000 du tout)
- Proton:  $M_p = 2m_u + m_d + 0.93 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2$  (99% du tout)

Expliquer la masse des particules composites est aussi un défi !

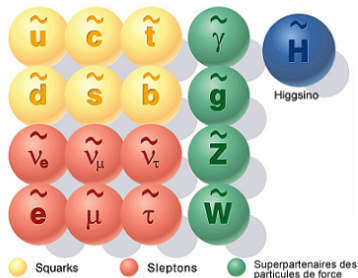
# Au-delà du Modèle Standard

- De nouvelles symétries (limiter le nombre de paramètres ?),
- De nouvelles interactions (cadre plus cohérent ?),
- De nouvelles dimensions (accomoder la gravitation ?)...

**Particules du Modèle Standard**



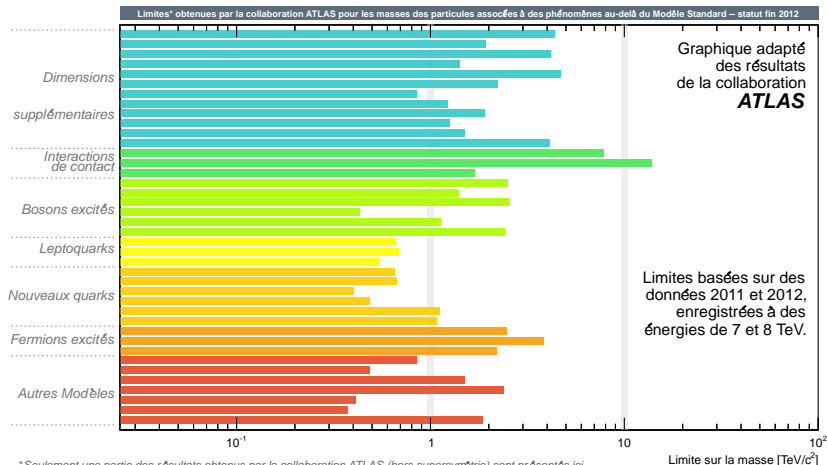
**Particules supersymétriques**



- Ne pas être en désaccord avec les observations antérieures
- Avoir des conséquences observables...



# Ne rien voir, c'est déjà apprendre quelque chose



\* Seulement une partie des résultats obtenus par la collaboration ATLAS (hors supersymétrie) sont présentés ici.

- Collisions au LHC 8 → 14 TeV en 2015
- Mieux mesurer les propriétés des particules du Modèle Standard
- Chercher (les effets) de nouvelles particules

## De nouveaux alliés

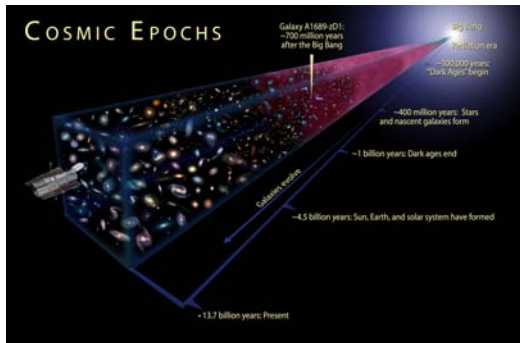
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- production directe particule-antiparticule ( $E = 2m_{\chi}c^2$ ) [haute  $E$ ]
- effets indirects dans des processus déjà étudiés [basse  $E$ ]

# De nouveaux alliés

Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- production directe particule-antiparticule ( $E = 2m_X c^2$ ) [haute  $E$ ]
- effets indirects dans des processus déjà étudiés [basse  $E$ ]



D'autres voies vers les très hautes énergies ?

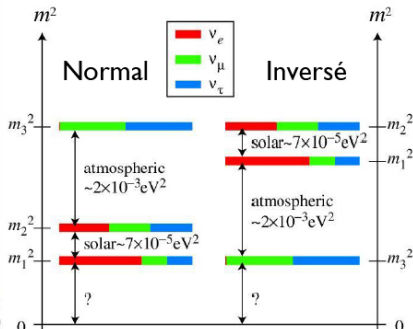
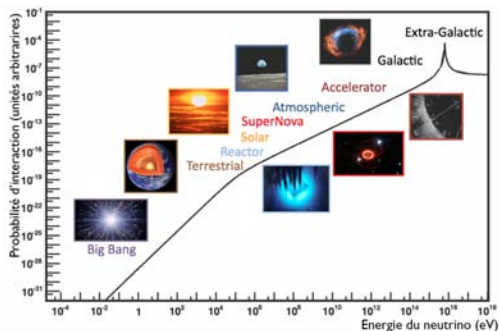
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

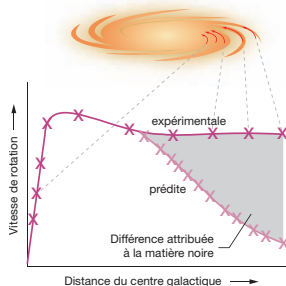
# Les neutrinos

## Particules encore mal connues du Modèle Standard

- Neutrinos venant de supernovae, Soleil, rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère, réacteurs nucléaires, accélérateurs
- Echelle de masse des neutrinos ? Sont-ils leurs propres antiparticules ? Y a-t-il plus de 3 neutrinos ?



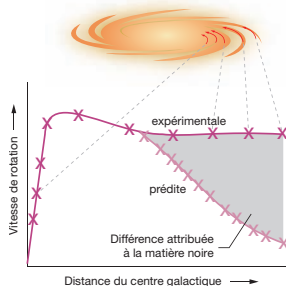
# La matière noire



En se basant sur les lois de la gravitation, pas assez de matière visible

- Pour expliquer la dynamique des grandes structures (galaxies...)
- Pour décrire l'évolution de l'Univers (ray. de fond cosmologique)

# La matière noire



En se basant sur les lois de la gravitation, pas assez de matière visible

- Pour expliquer la dynamique des grandes structures (galaxies...)
- Pour décrire l'évolution de l'Univers (ray. de fond cosmologique)

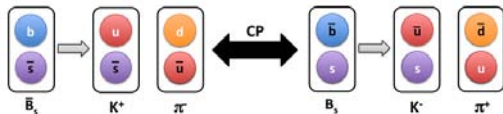
## Matière "noire"

- lourde, stable, neutre, interagissant peu avec son environnement, hormis par interaction gravitationnelle (halos ? filaments ?)
- particule nouvelle  $\chi$ , hors du Modèle Standard ?

# Asymétrie matière-antimatière

## Collisionneurs

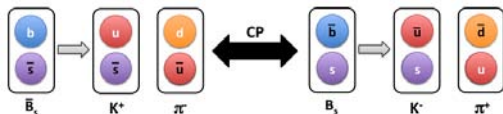
- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



# Asymétrie matière-antimatière

## Collisionneurs

- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



## Cosmologie

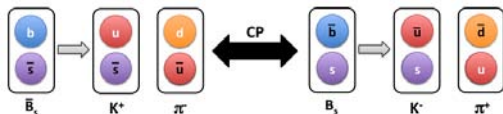
- Big bang:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule
- Disparition de l'un au détriment de l'autre
- Asymétrie bien trop large pour Modèle Standard !



# Asymétrie matière-antimatière

## Collisionneurs

- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible

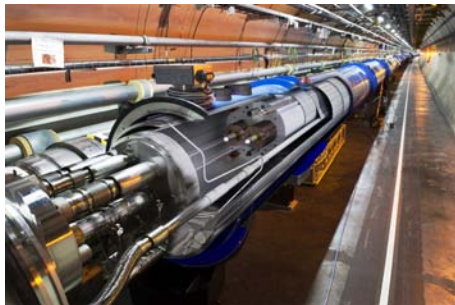


## Cosmologie

- Big bang:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule
- Disparition de l'un au détriment de l'autre
- Asymétrie bien trop large pour Modèle Standard !

Nouveaux mécanismes d'asymétrie à des énergies plus élevées ?

En 2015...



Plus d'informations sur le Modèle Standard, et ses limites,  
lors de la prochaine collecte de données du LHC,  
pour les expérimentateurs comme pour les théoriciens !