

Le Modèle Standard

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

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

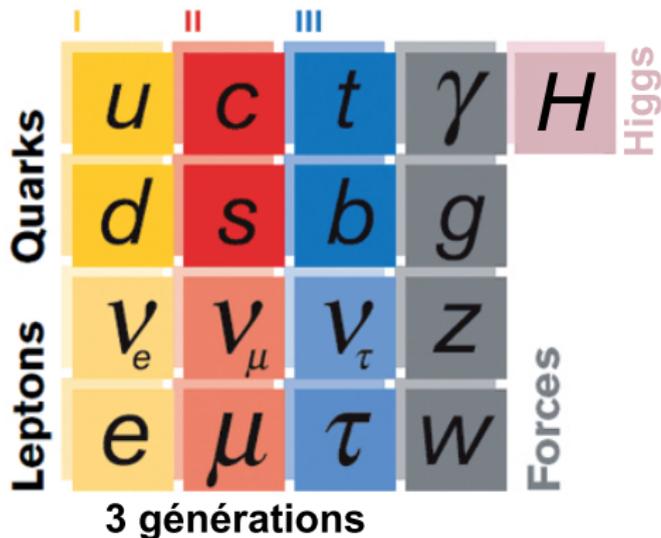
Formation académies de Créteil et Versailles, Janvier/Février 2015



D'une démarche analytique...

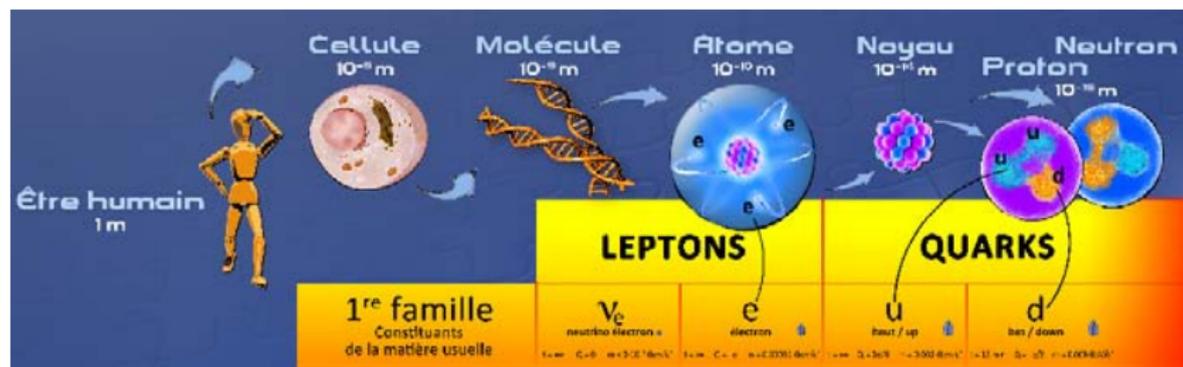
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 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

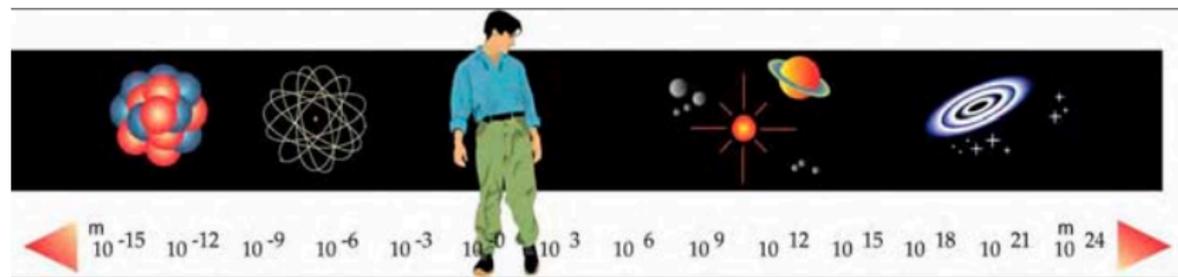
La matière ordinaire



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

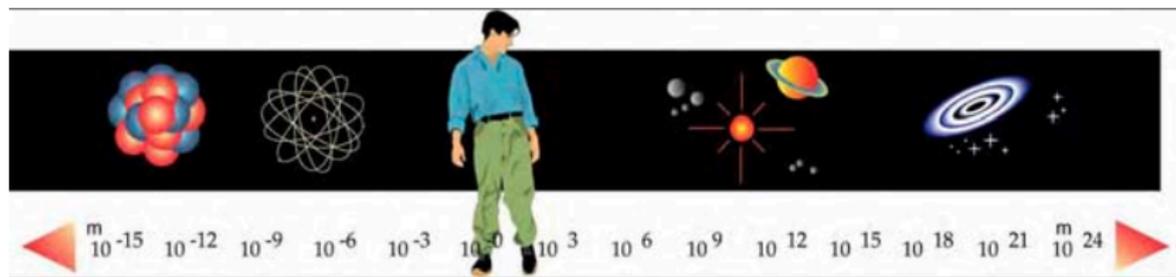
	I	II	III		
Leptons Quarks	u	c	t	γ	H
	d	s	b	g	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	
	e	μ	τ	W	
	3 générations			Forces	Higgs

Monter en énergie, diminuer en taille

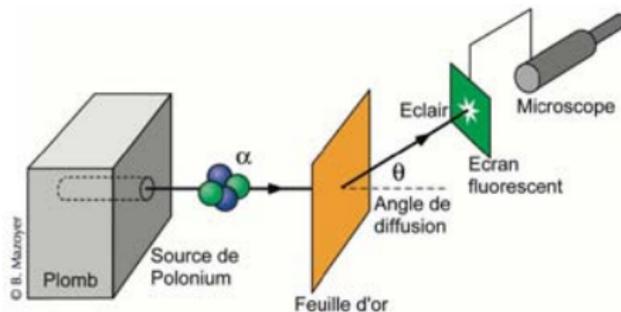


- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' E de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X, γ)

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, γ)
- ou d'autres projectiles déviés par constituants [en 1909, Geiger, Marsden, Rutherford "voient" le noyau avec α sur atome d'or]



Quelques ordres de grandeur

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

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

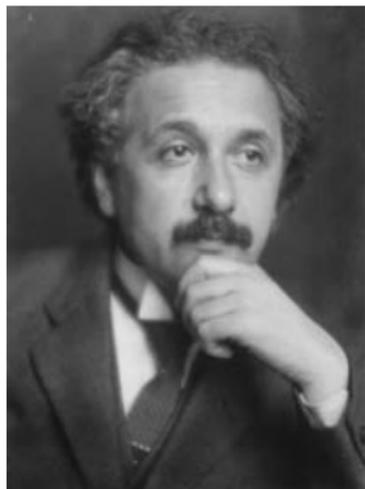
Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires (α , β , γ)	1-10 MeV
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**

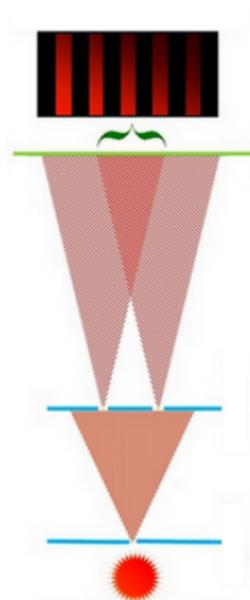
$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

- 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



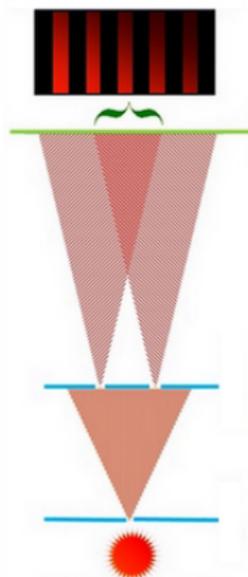
La mécanique quantique

- 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

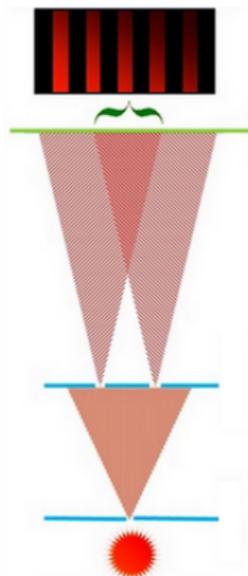
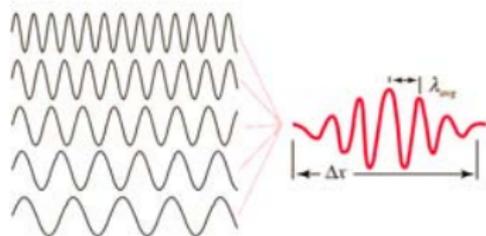
● Lumière

- 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

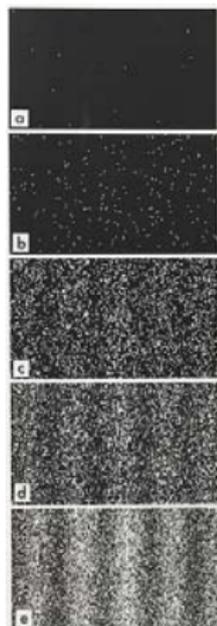
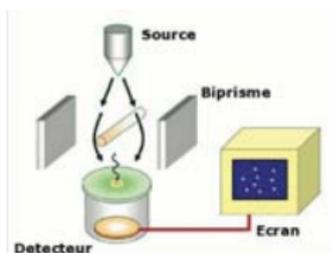
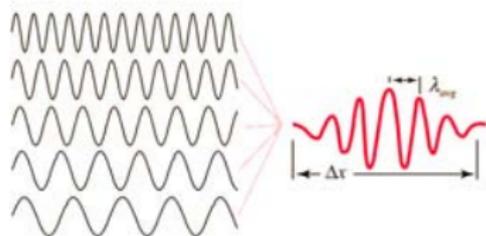
● Lumière

- 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

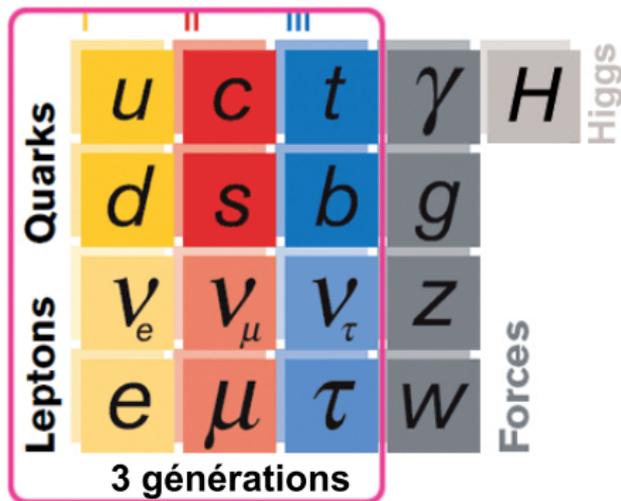
- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant, E suffisamment élevée pour des effets
 - Relativiste: $E = mc^2$, équivalence entre énergie et masse
 - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



- 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

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

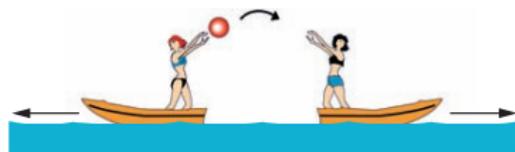
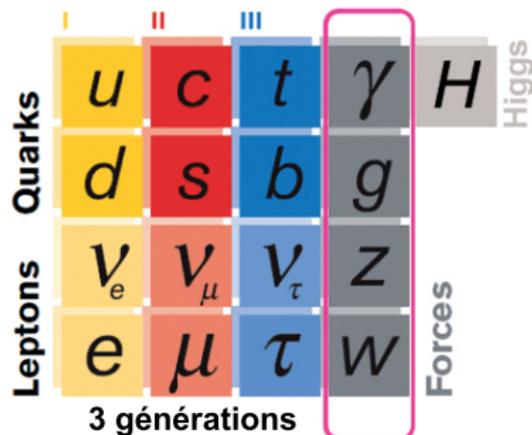
- Nom
- Constitution (si particule composite)
- Masse
- Spin (moment angulaire intrinsèque, d'origine quantique)
- Sensibilité aux interactions (charge électrique, couleur...)
- Durée de vie
- Modes de désintégration (dans des particules plus légères), et probabilités associées
 - $t \rightarrow be^+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

$c\bar{c}$ MESONS		
$\eta_c(1S)$		$J^G(J^{PC}) = 0^+(0^{-+})$
Mass $m = 2980.5 \pm 1.2$ MeV ($S = 1.7$)		Full width $\Gamma = 27.4 \pm 2.9$ MeV ($S = 2.0$)
$\eta_c(1S)$ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level (MeV/c)
Decays involving hadronic resonances		
$\eta'(958) \rightarrow \pi$	(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% 1260
$\omega\phi$	< 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 $\frac{0.5}{0.2}$) %	509
Decays into stable hadrons		
$K \bar{K} \pi$	(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) $\times 10^{-3}$	980
$K \bar{K} \eta$	< 3.1 %	90% 1263
$\pi^+ \pi^- \rho\rho$	< 1.2 %	90% 1025
Radiative decays		
77	(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

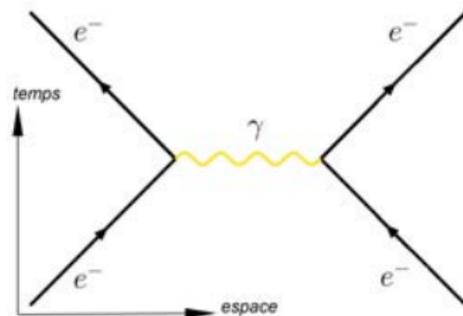
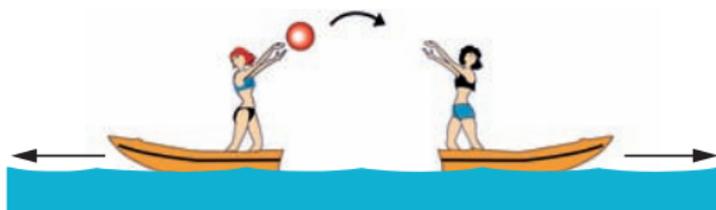


- Gravitation
étoiles, galaxies... [10⁻³⁸]
 - Force faible (bosons W, Z)
radioactivité β [10⁻⁵]
 - Electromagnétisme (photon γ)
électricité, chimie... [10⁻³]
 - Force forte (gluons g)
cohésion des noyaux [1]
-
- 3 interactions sur 4 en termes d'échanges de particules (boson médiateurs)
 - gravitation négligeable [intensité relative subatomique]

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

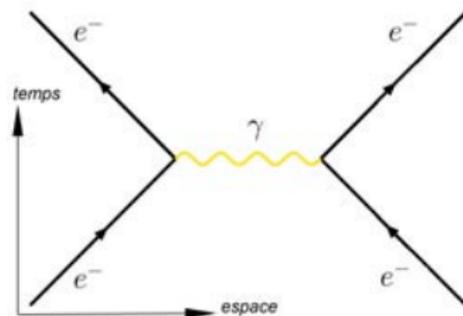
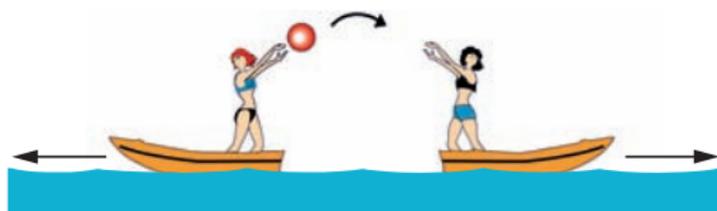
Interaction électromagnétique

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



Interaction électromagnétique

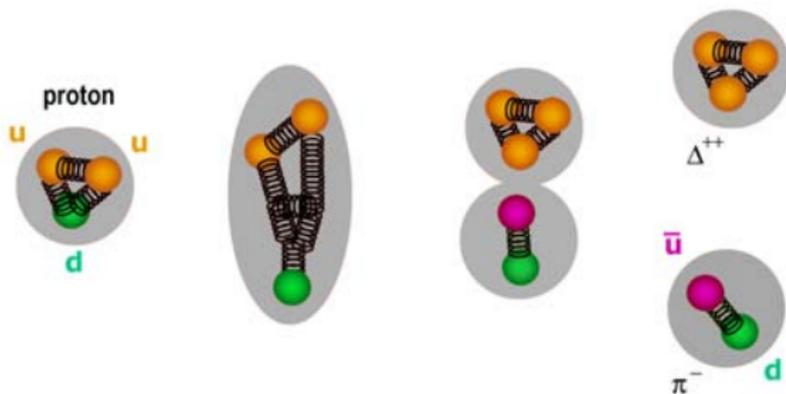
- Boson médiateur : **photon**
- Interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand r , potentiel $V(r) \sim 1/r$ de portée infinie



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

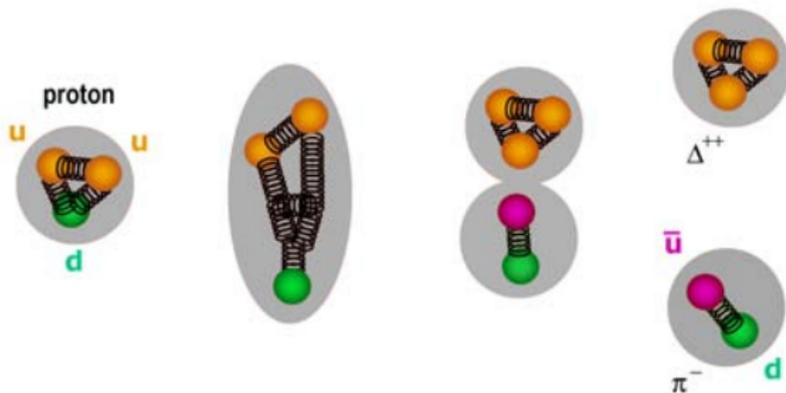
Interaction forte

- 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 $V(r) \sim r$



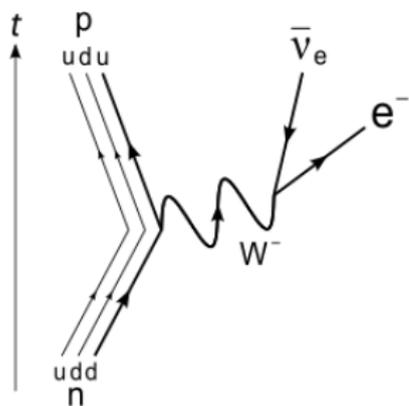
- Les quarks restent **confinés** dans de objets de rayon $O(1 \text{ fm})$
- . . . des hadrons, états liés de trois quarks (proton, neutron. . .) ou d'un quark et d'un anti-quark (pion, kaon. . .), observés
- Interaction forte aussi nécessaire pour la stabilité des noyaux

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 $M = M_{W,Z}$, 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 $M = M_{W,Z}$, portée d'ordre $10^{-18}m$



- Portée **subatomique**, pas d'état lié
- Désintégrations, en particulier désintégration nucléaire β
- ... via un boson W^\pm impliquant (u, d) et/ou (e, ν_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	γ	H Higgs
	d	s	b	g	
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	
	e	μ	τ	W	

3 générations

Un dernier ingrédient
du Modèle Standard

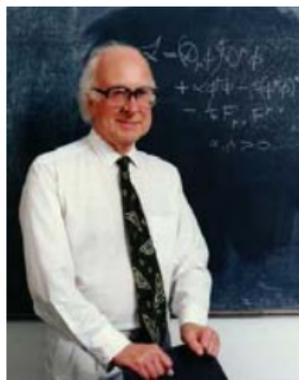
le boson de Higgs

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

Le mécanisme de Higgs

Théorie quantique des champs

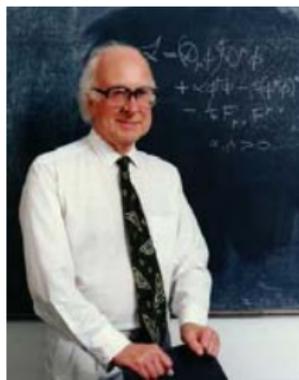
- Chaque particule est associée à un champ
- Les particules sont des excitations de ces champs
- ... comme une vague est une excitation particulière de la mer



Le mécanisme de Higgs

Théorie quantique des champs

- Chaque particule est associée à un champ
- Les particules sont des excitations de ces champs
- ... comme une vague est une excitation particulière de la mer



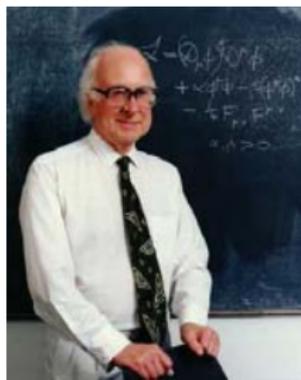
Dans le Modèle Standard

- 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

Théorie quantique des champs

- Chaque particule est associée à un champ
- Les particules sont des excitations de ces champs
- ... comme une vague est une excitation particulière de la mer

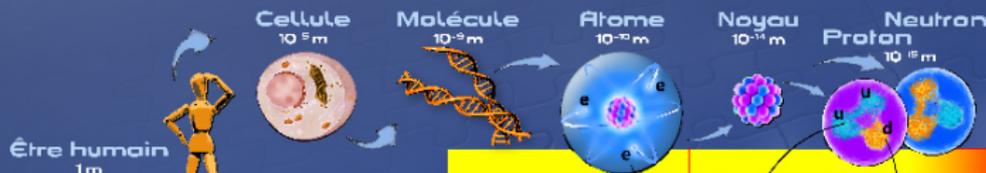


Dans le Modèle Standard

- 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
10⁷ m

Soleil
10⁹ m

Galaxie
10²¹ m



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_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 permet aussi la séparation entre interactions électrofaible et forte.
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charm / charm	s strange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b bottom / heavy / bottom	



INTERACTIONS FONDAMENTALES



Bosons Z, W[±]	Déjà mentionnés dans les p ⁺ et K ⁰ certains ne sont pas stables
Photon γ	Force électro, magnétique, cohésion des atomes et des molécules, lumière
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

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

Chaque des quatre interactions fondamentales peut se manifester de façon non réciproque, c'est-à-dire que si elle agit sur un objet, elle n'est pas forcément agissante sur cet objet. Par exemple, la gravitation agit sur tout ce qui a une masse, mais elle n'est pas agissante sur la lumière.



Antiproton

ANTIMATIÈRE

A chaque particule est associée 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 periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels

Accélérateur de particules



- un vrai periph' 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



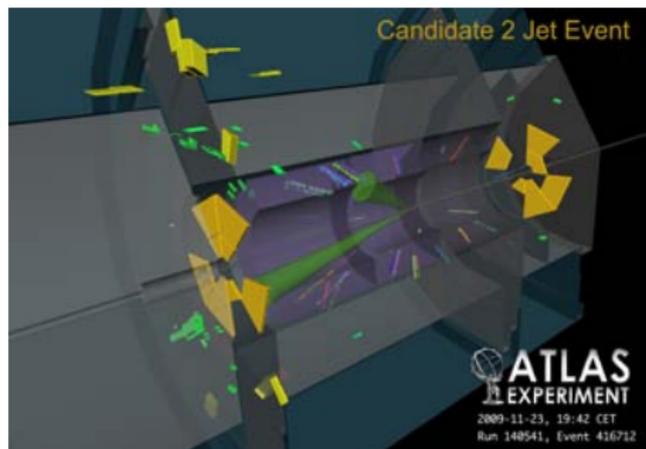
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

Accélérateur de particules



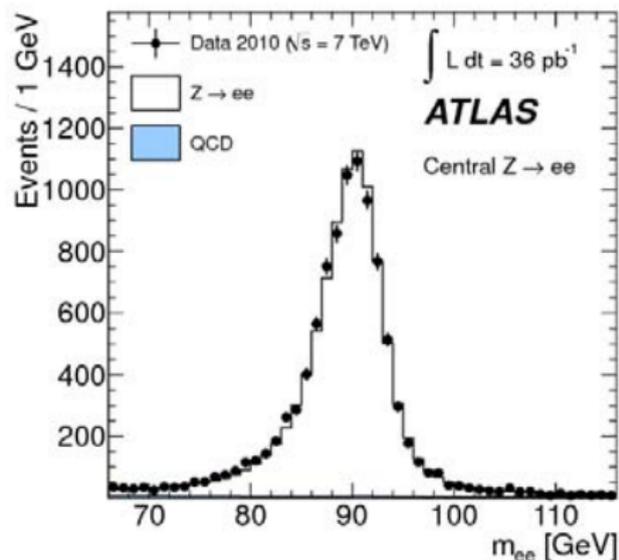
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

Accélérateur de particules



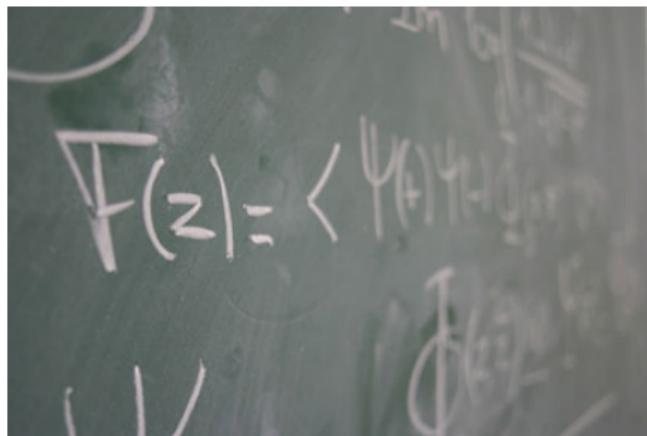
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

Accélérateur de particules



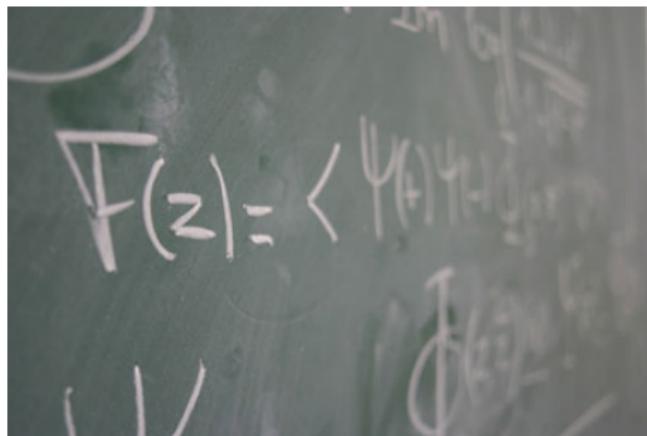
- un vrai périph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

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 !

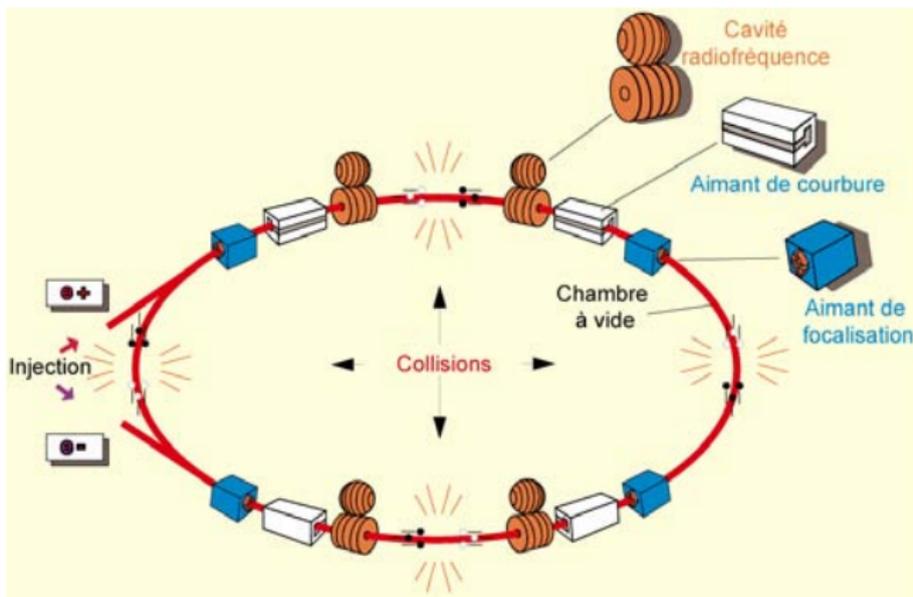
Accélérateur de particules



- 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 !

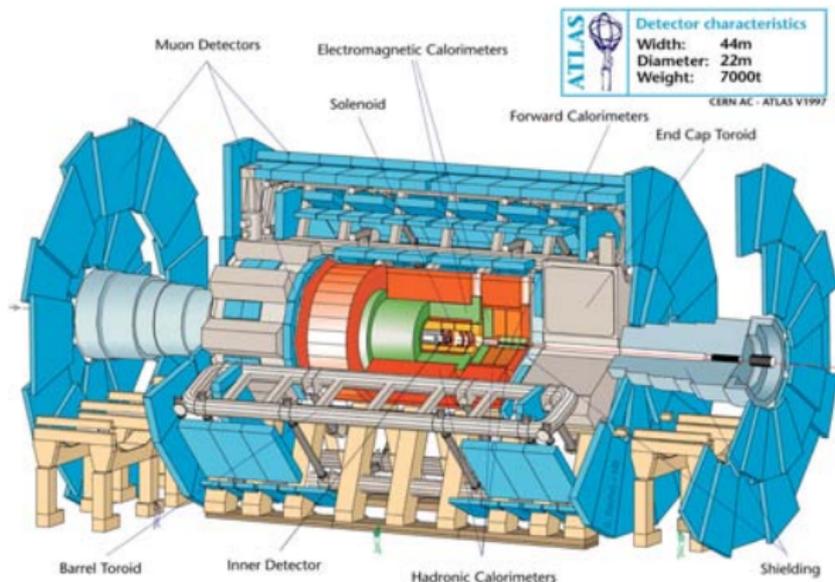
Exemple: ATLAS au LHC

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

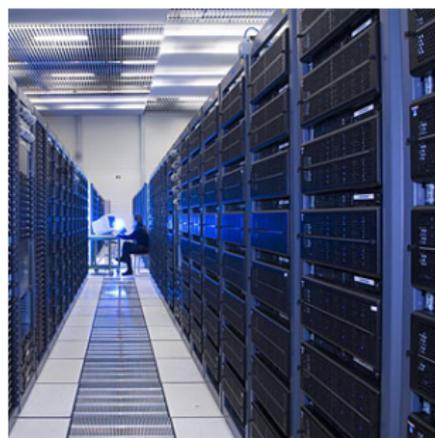
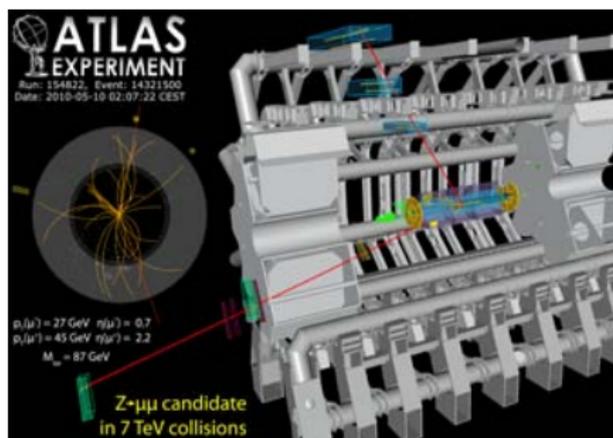


- Plusieurs couches, spécialisées selon le type de particules
- Liquide ou solide perturbé par le passage de particules
 - Trajectoire: perturbation du milieu (ionisation. . .) avec courbure \vec{B}
 - Energie: dépôt d'énergie par interaction avec le détecteur

Enregistrer

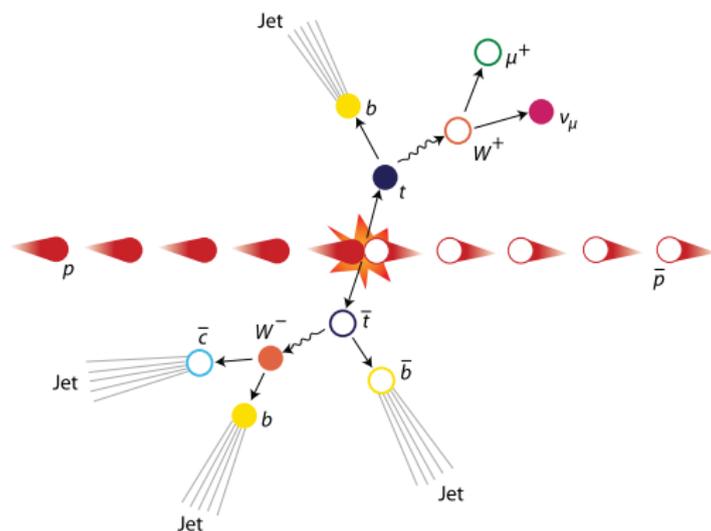
Près de **600 millions** de collisions par seconde dans les détecteurs

- 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



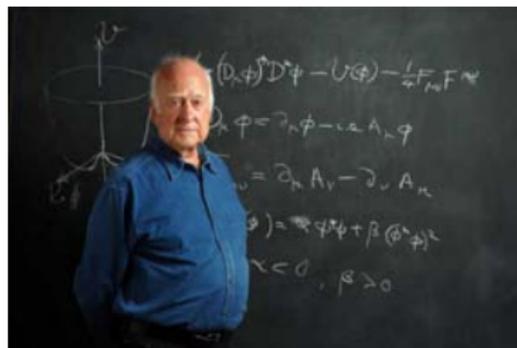
- Théorie: seulement la probabilité pour chaque processus
- Expérience: signal en compétition avec des bruits de fond

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

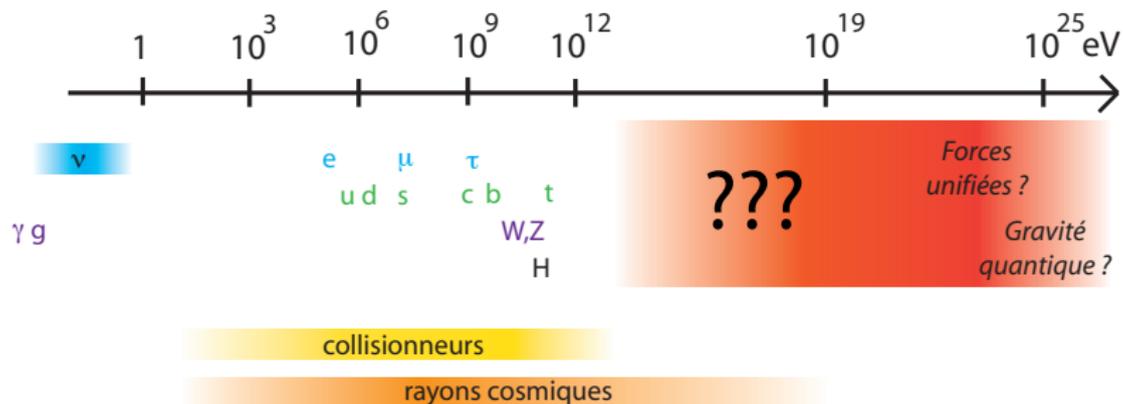
- Surtout moyens humains (petites équipes)
- Mais pas seulement papier crayon (beaucoup de résolution numérique par réseaux de PC et superordinateurs)
- Pas seulement interpréter, mais aussi proposer de nouvelles idées

Quelques questions en suspens

Les limites du Modèle Standard

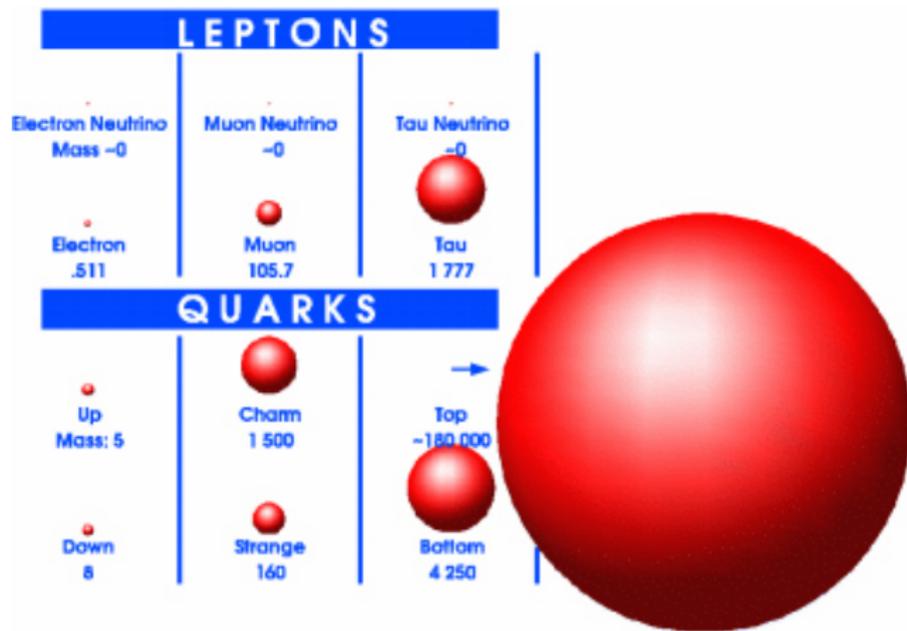
Modèle Standard reproduit très bien l'expérience (y compris pour le boson de Higgs), mais pas parfaitement satisfaisant

- 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

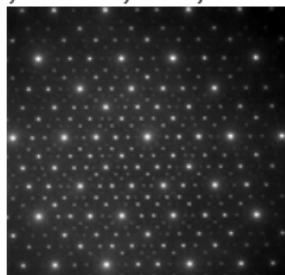
Boson de Higgs responsable de la masse des particules

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Boson de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

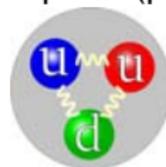
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

Composite

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



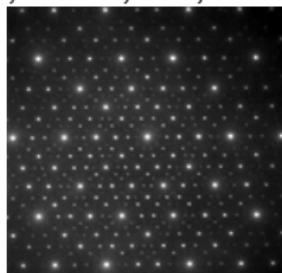
Masse des quarks (Higgs, $\sim 1\%$) + E
de "liaison" (inter. forte, $\sim 99\%$)

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Boson de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

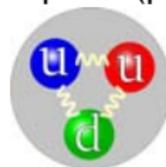
électron, muon, tau, neutrinos...



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

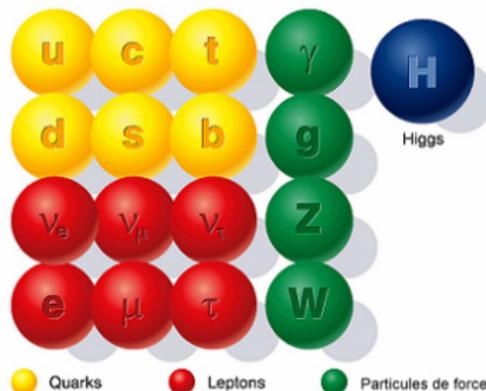
- Atome: $M_H = m_p + m_e - 13.6 \text{ eV}/c^2$ (1/100 000 000 du tout)
- Noyau: $M_D = m_p + m_n - 2.2 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$ (1/1000 du tout)
- Proton: $M_p = 2m_u + m_d + 0.93 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2$ (99% du tout)

Expliquer la masse des particules composites est aussi un défi !

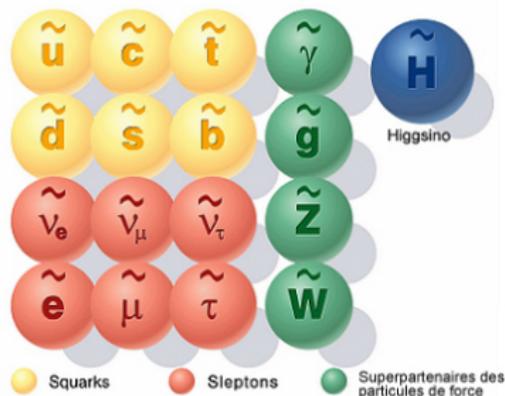
Au-delà du Modèle Standard

- 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...

De nouveaux alliés

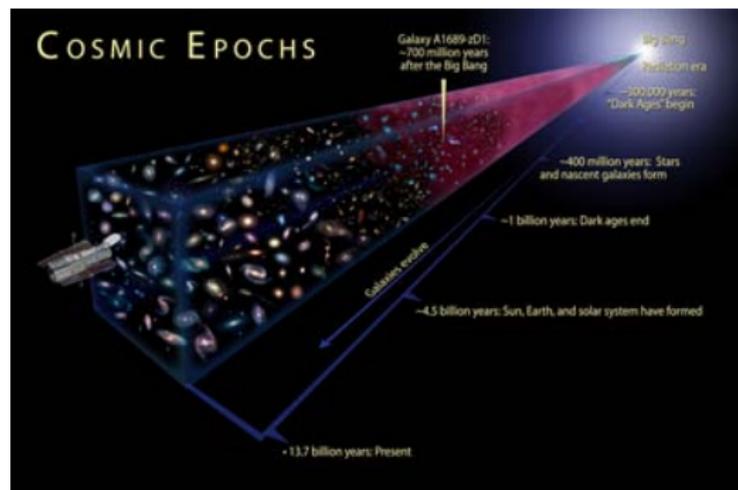
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- 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 ?

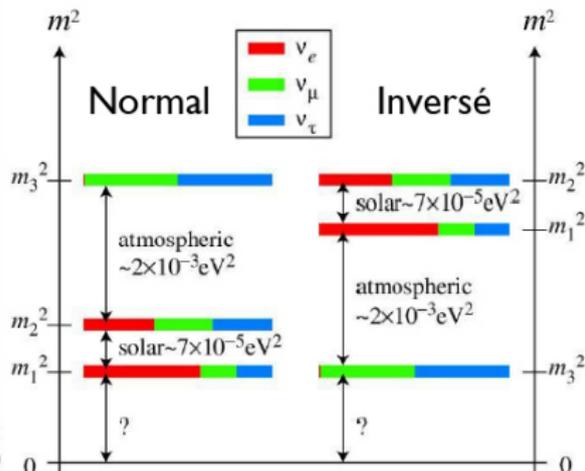
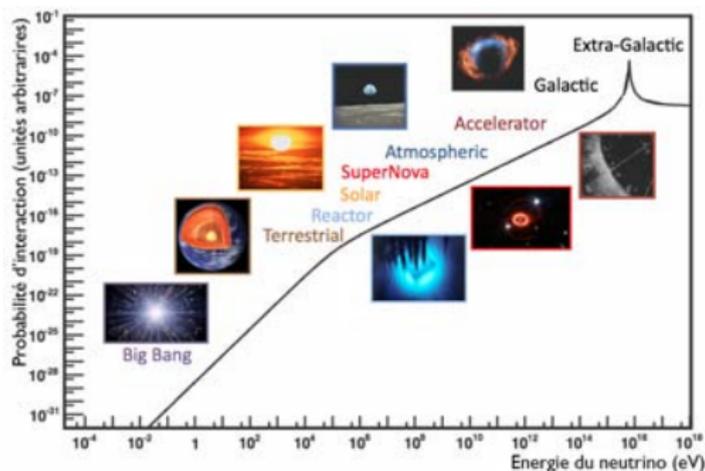
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

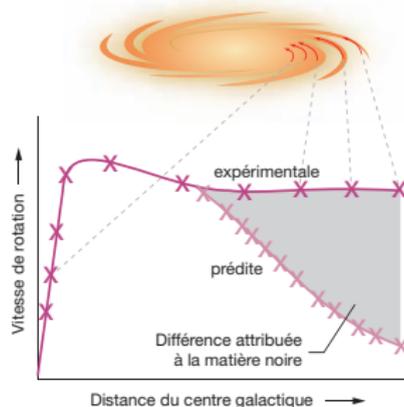
Les neutrinos

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 ?



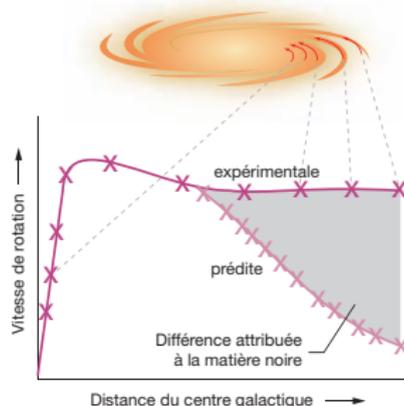
La matière noire



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 χ , hors du Modèle Standard ?

Asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

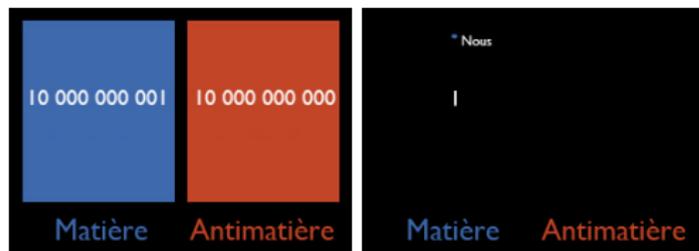
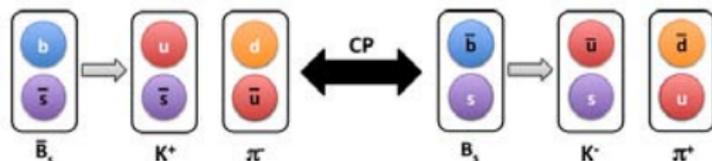
- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



Asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

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



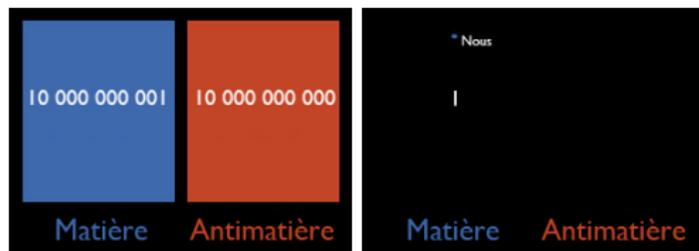
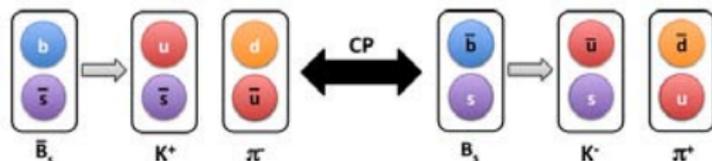
Cosmologie

- 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 !