

Le Modèle Standard

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

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

PAF Académie de Versailles, Orsay, 20 Février 2017



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	
73 Fr	74 Ra	75 Ac	76 Uq	77 G	78 H	79 I	80 J	81 K	82 L	83 M	84 N	85 O	86 P	87 Q	88 R	89 S	90 T
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Uq	91 G	92 H	93 I	94 J	95 K	96 L	97 M	98 N	99 O	100 P	101 Q	102 R	103 S	104 T
101 Th	102 Pa	103 U	104 Np	105 Pu	106 Am	107 Cm	108 Bk	109 Cf	110 Es	111 Fm	112 Md	113 No	114 Lw				

... à une autre, un siècle plus tard

Composants élémentaires de la matière

Cellule
 10^{-6} m

Molécule
 10^{-9} m

Atome
 10^{-10} m

Noyau
 10^{-14} m

Proton
 10^{-16} m

Neutron
 10^{-16} m

Être humain
1 m

Terre
 10^7 m

Soleil
 10^9 m

Galaxie
 10^{21} m

	LEPTONS	QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Consituants de la matière usuelle	ν_e <small>neutrino électronique</small>	e <small>électron</small>	u <small>haut / up</small>	d <small>bas / down</small>
2^e famille Rapide plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ <small>neutrino muon</small>	μ <small>muon</small>	c <small>charm / charme</small>	s <small>strange / étrange</small>
3^e famille Relique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ <small>neutrino tau</small>	τ <small>tau</small>	t <small>top</small>	b <small>bottom / bas / bottom</small>

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par ses interactions avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il percolle dans l'univers entier interagissant électromagnétique et faible.

Champ de Higgs

Description
radiation électromagnétique et ondes gravitationnelles

Photon γ

Cohésion des atomes et des molécules, chaleur

Gluons g

Cohésion des noyaux, des nucléons et des neutrons, énergie nucléaire

Graviton (?)

Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

INTERACTIONS FONDAMENTALES

P O U V E S

10⁻¹⁷ m

Interaction faible

10⁻¹⁶ m

Interaction électromagnétique

Interaction forte

Gravitation

infinie

infinie

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

Une des quatre interactions fondamentales que se rattache le photon est la force électromagnétique qui agit sur les particules chargées.

La production primaire de la lumière est due à la combustion, la fission nucléaire, la fusion nucléaire et la radioactivité.

Les photons sont émis et absorbés lors de la production de lumière.

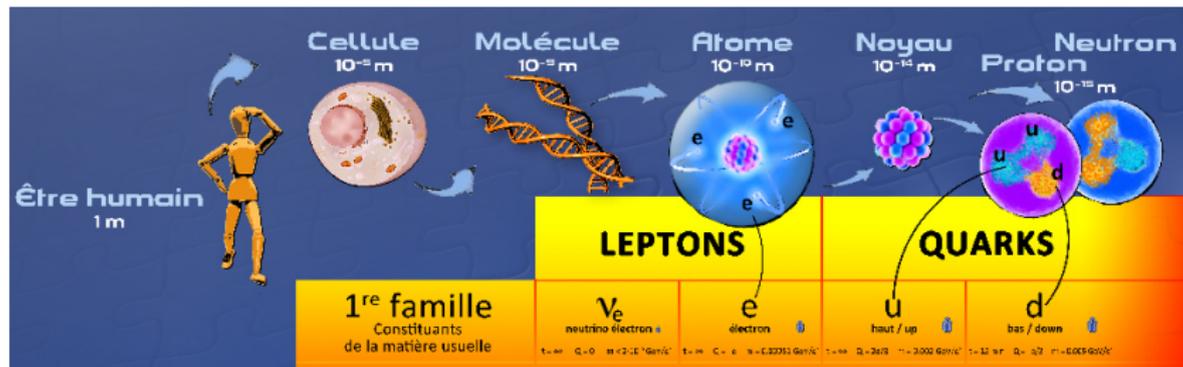
ANTIMATIÈRE

Antiproton

Ainsi que pour les électrons, il existe une antiparticule : le positron. Les électrons et les positrons sont appelés leptons. Les quarks et les antiquarks sont appelés quarks. Les gluons et les antigluons sont appelés gluons.

Le Modèle Standard

La matière ordinaire

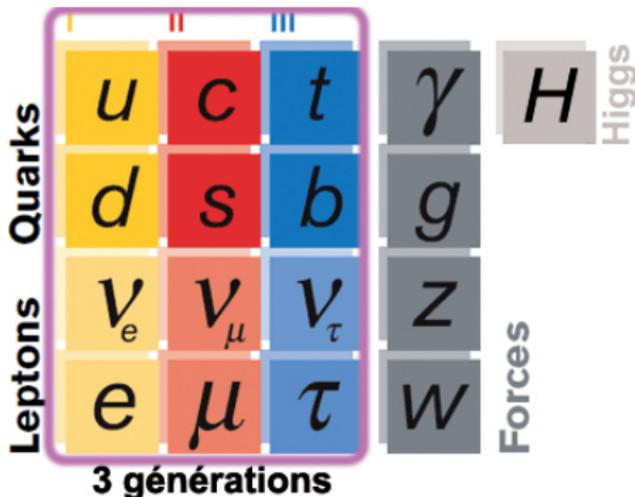


- Quarks: constituants des protons (uud) et neutrons (udd)
- Électrons: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives: $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$ (15 min)

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

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

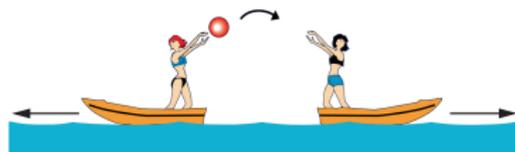
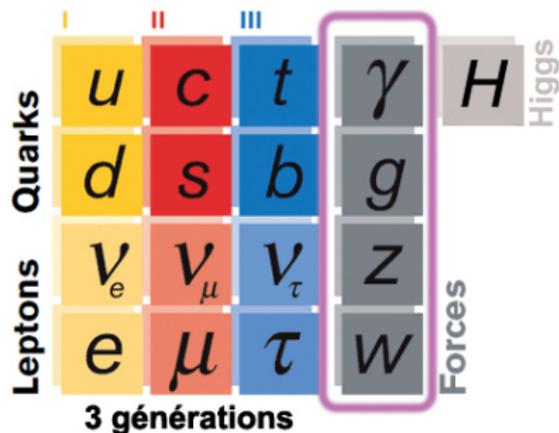
Carte d'identité d'une particule

- 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	Γ (MeV/c)
Decays involving hadronic resonances			
$\eta'(958)\pi\pi$	(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
$K^*(892) \bar{K}^*(892)$	(9.2 \pm 3.4) $\times 10^{-3}$		1194
$K^{*0} \bar{K}^{*0} \pi^+ \pi^-$	(1.1 \pm 0.5) %		1071
$\phi K^+ K^-$	(2.7 \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 %		1325
$\omega_2(1320)\pi$	< 2 %	90%	1194
$K^*(892) \bar{K}^+ + c.c.$	< 1.20 %		1308
$f_2(1270)\eta$	< 1.1 %	90%	1143
$\omega\omega$	< 3.1 $\times 10^{-3}$	90%	1266
$\omega\phi$	< 1.7 $\times 10^{-3}$	90%	1183
$f_2(1270) f_2(1270)$	(7.6 \pm $\frac{1.1}{1.4}$) $\times 10^{-3}$		771
$f_2(1270) f_2'(1525)$	(1.0 \pm $\frac{0.2}{0.4}$) %		500
Decays into stable hadrons			
$K \bar{K} \pi$	(7.0 \pm 1.2) %		1379
$\eta\pi\pi$	(4.0 \pm 1.0) %		1427
$\pi^+ \pi^- K^+ K^-$	(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
$\rho\bar{\rho}$	(1.3 \pm 0.4) $\times 10^{-3}$		1158
$\bar{K}^* K$	(1.04 \pm 0.31) $\times 10^{-3}$		988
$K \bar{K} \eta$	< 3.1 %	90%	1263
$\pi^+ \pi^- \rho^0$	< 1.2 %	90%	1025
Radiative decays			
$\gamma\gamma$	(1.8 \pm $\frac{0.6}{0.8}$) $\times 10^{-4}$		1490

résumé dans le Particle Data Book

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]

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b bas / beauty / bottom

INTERACTIONS FONDAMENTALES	
portée	
10^{-17} m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10^{-15} m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

... et elles ont des domaines d'action (portées) différentes

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1 ^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique $\left(\begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=2.33 \times 10^{-36} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	e électron $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=9.109 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	u haut / up $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=6.646 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	d bas / down $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=1/3 \\ m=6.646 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{matrix} \right)$
2 ^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon $\left(\begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=2.33 \times 10^{-36} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	μ muon $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=1.88 \times 10^{-28} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	c charme / charm $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=1.67 \times 10^{-24} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	s étrange / strange $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=1/3 \\ m=1.67 \times 10^{-24} \text{ kg} \end{matrix} \right)$
3 ^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau $\left(\begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=2.33 \times 10^{-36} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	τ tau $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=1.78 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	t top $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=1.73 \times 10^{-25} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	b bas / beauty / bottom $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=1/3 \\ m=4.18 \times 10^{-26} \text{ kg} \end{matrix} \right)$
INTERACTIONS FONDAMENTALES				
portée				
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible			
infinie	Interaction électromagnétique			
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte			
infinie	Gravitation			

Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

... et elles ont des domaines d'action (portées) différentes

- **Electromagnétique**: particules chargées, atomes comme états liés électrons-noyau, interaction lumière-matière

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b bas / beauty / bottom
INTERACTIONS FONDAMENTALES				
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible			
infinie	Interaction électromagnétique			
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte			
infinie	Gravitation			

Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

... et elles ont des domaines d'action (portées) différentes

- **Electromagnétique**: particules chargées, atomes comme états liés électrons-nyon, interaction lumière-matière
- **Forte**: seulement pour les quarks, jamais libres, toujours confinés dans des particules composites (protons, neutrons, pions...)

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1 ^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron ν $\left(\begin{matrix} +1 \\ 0 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ 0 \end{matrix} \right)$	e électron e $\left(\begin{matrix} +1 \\ -1 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix} \right)$	u haut / up u $\left(\begin{matrix} +2/3 \\ +2/3 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ +1/6 \end{matrix} \right)$	d bas / down d $\left(\begin{matrix} -1/3 \\ -1/3 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ -1/6 \end{matrix} \right)$
2 ^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon ν $\left(\begin{matrix} +1 \\ 0 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ 0 \end{matrix} \right)$	μ muon μ $\left(\begin{matrix} +1 \\ -1 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix} \right)$	c charme / charm c $\left(\begin{matrix} +2/3 \\ +2/3 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ +1/6 \end{matrix} \right)$	s étrange / strange s $\left(\begin{matrix} -1/3 \\ -1/3 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ -1/6 \end{matrix} \right)$
3 ^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau ν $\left(\begin{matrix} +1 \\ 0 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ 0 \end{matrix} \right)$	τ tau τ $\left(\begin{matrix} +1 \\ -1 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix} \right)$	t top t $\left(\begin{matrix} +2/3 \\ +2/3 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ +1/6 \end{matrix} \right)$	b bas / beauty / bottom b $\left(\begin{matrix} -1/3 \\ -1/3 \end{matrix} \right) \quad \left(\begin{matrix} +1/2 \\ -1/6 \end{matrix} \right)$
INTERACTIONS FONDAMENTALES				
portée				
10^{-17} m	Interaction faible			
infinie	Interaction électromagnétique			
10^{-15} m	Interaction forte			
infinie	Gravitation			

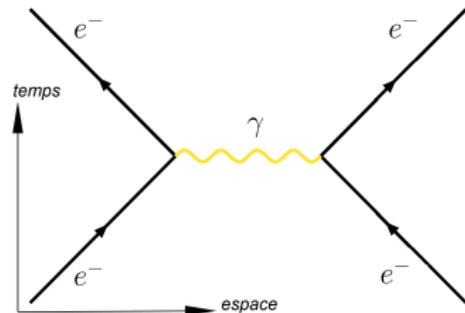
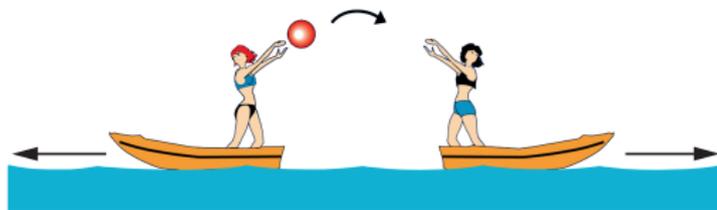
Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

... et elles ont des domaines d'action (portées) différentes

- **Electromagnétique**: particules chargées, atomes comme états liés électrons-noyau, interaction lumière-matière
- **Forte**: seulement pour les quarks, jamais libres, toujours confinés dans des particules composites (protons, neutrons, pions...)
- **Faible**: ne crée pas d'états liés, mais désintégrations des particules lourdes en particules plus légères (désintégration β)

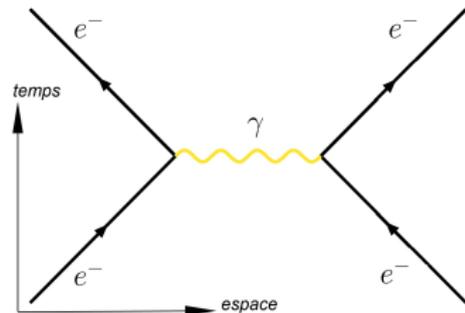
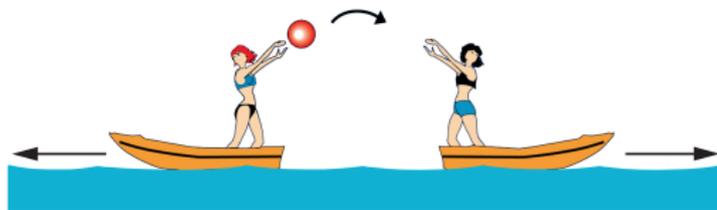
Interaction électromagnétique

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



Interaction électromagnétique

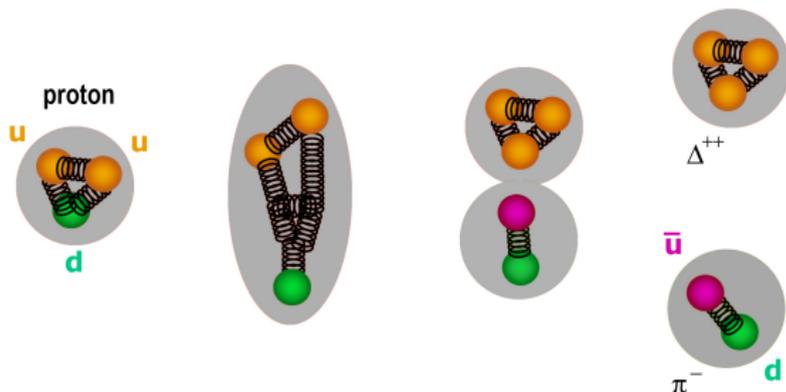
- Boson médiateur : **photon** de masse nulle
- Interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand r , potentiel $V(r) \sim 1/r$ de portée infinie



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

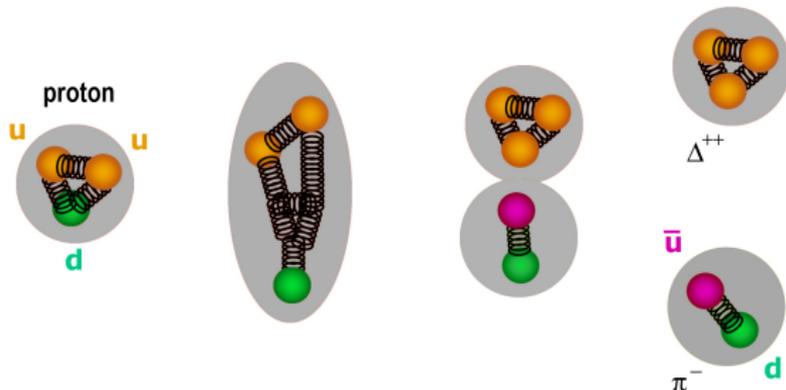
Interaction forte

- 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 $V(r) \sim r$



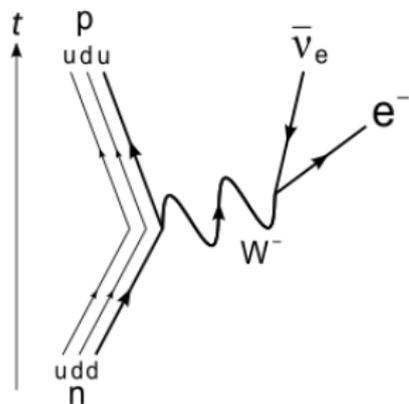
- Les quarks restent **confinés** dans de objets de rayon $O(1 \text{ fm})$
- . . . des hadrons, états liés de trois quarks (proton, neutron. . .) ou d'un quark et d'un anti-quark (pion, kaon. . .), observés
- Interaction forte aussi nécessaire pour la stabilité des noyaux

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 $10^{-17} m$

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 $10^{-17} m$

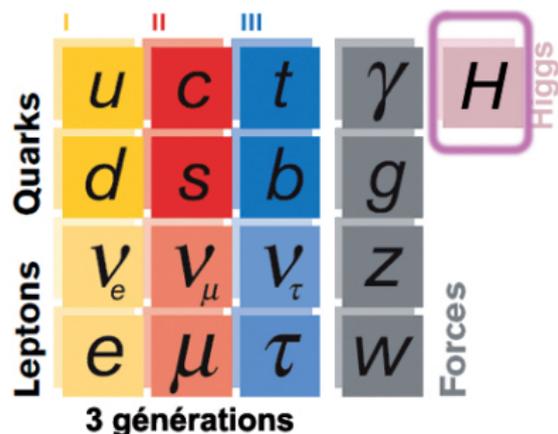


- Portée **subatomique**, pas d'état lié
- Désintégrations, en particulier désintégration nucléaire β
- ... via un boson W^\pm impliquant (u, d) et/ou (e, ν_e)
- ... ou leurs copies plus lourdes des autres familles
- Certains bosons médiateurs (W^\pm) chargés électriquement

Le boson H

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



Un dernier ingrédient
du Modèle Standard

le boson H , ou de Higgs

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

Le mécanisme de Higgs

Propagation de la lumière dans un milieu

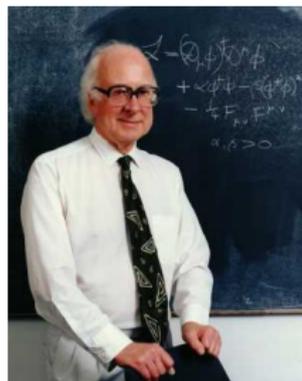
- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement (milieu optique,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



Le mécanisme de Higgs

Propagation de 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_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement (milieu optique, non relativiste) !



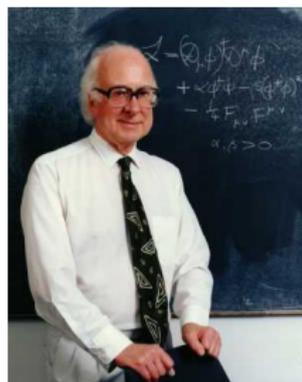
Problème similaire dans le Modèle Standard

- Eqs. (origine géométrique): $m = 0$ pour toutes les particules

Le mécanisme de Higgs

Propagation de 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_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement (milieu optique, non relativiste) !



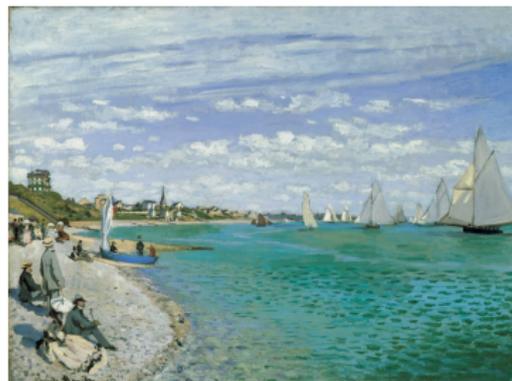
Problème similaire dans le Modèle Standard

- 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

Du mécanisme de Higgs au boson H

Modèle Standard basé sur la Théorie quantique des champs

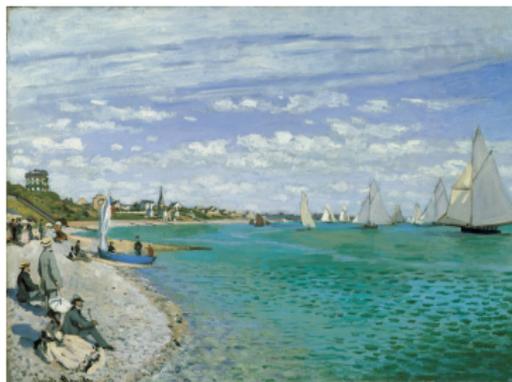
- description relativiste et quantique des particules élémentaires
- particule = excitation d'un champ (quantique)
- qui se propage comme une vague se déplaçant sur la mer



Du mécanisme de Higgs au boson H

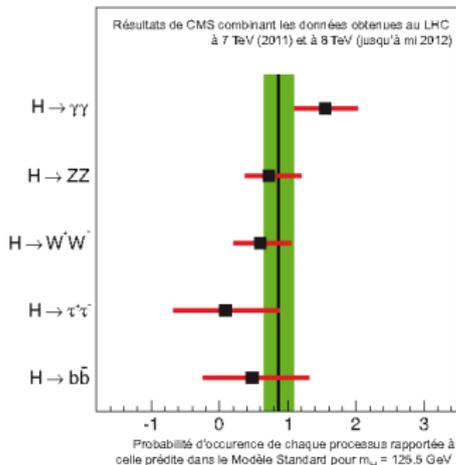
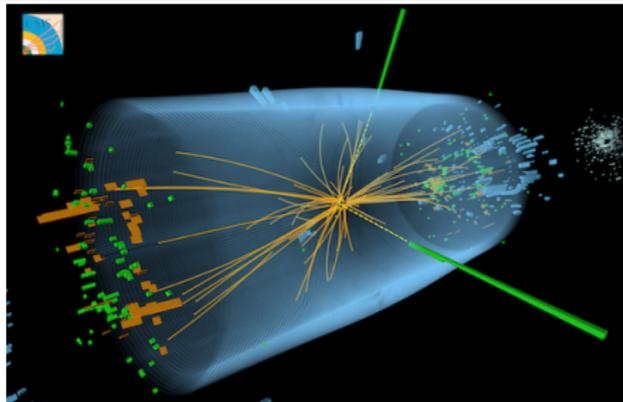
Modèle Standard basé sur la Théorie quantique des champs

- description relativiste et quantique des particules élémentaires
- particule = excitation d'un champ (quantique)
- qui se propage comme une vague se déplaçant sur la mer



L'existence du champ de Higgs se manifeste par une particule, le boson H (excitation de ce champ)

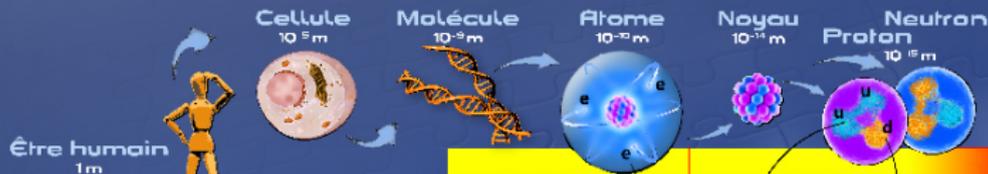
Champagne pour le LHC



- 4 juillet 2012: ATLAS et CMS voient un signal de type boson H
- Et plus on l'étudie, plus il ressemble au boson H du Modèle Standard

Exemple: $H \rightarrow \gamma\gamma$ vu d'ATLAS

Composants élémentaires de la matière



Être humain
1m

Terre
10⁷ m

Soleil
10⁹ m

Galaxie
10²¹ m



1^{re} famille
Constituants
de la matière usuelle

2^e famille
Réplique plus massive
de la 1^{re} famille

3^e famille
Réplique plus massive
des 1^{re} et 2^e familles

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1 ^{re} famille	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 participe aussi à la séparation entre interactions électrofaible et forte.
2 ^e famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charm / charm	s strange / strange	
3 ^e famille	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b bottom / bottom / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES



Champ de Higgs	
Bosons Z, W [±]	Déjà mentionnés dans les parties 1 et 2. Certains ne sont pas stables.
Photon γ	Force électro, magnétique, cohésion des atomes et des molécules, chimie.
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 destructive en situations qui impliquent, en particulier, les Soleils.
 = à grande échelle, il se manifeste à partir de nuages de gaz, et à petite échelle, il se manifeste à partir des interactions électromagnétiques, c'est-à-dire à la production de lumière.



Antiproton

ANTIMATIÈRE

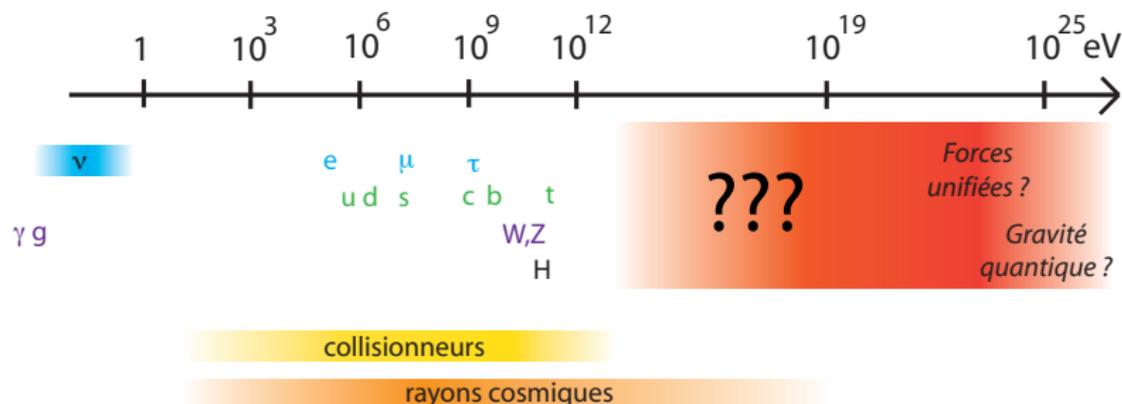
A chaque particule est associée une antiparticule. Les antiparticules ont la même masse, mais des charges opposées.

Quelques questions en suspens

Les limites du Modèle Standard

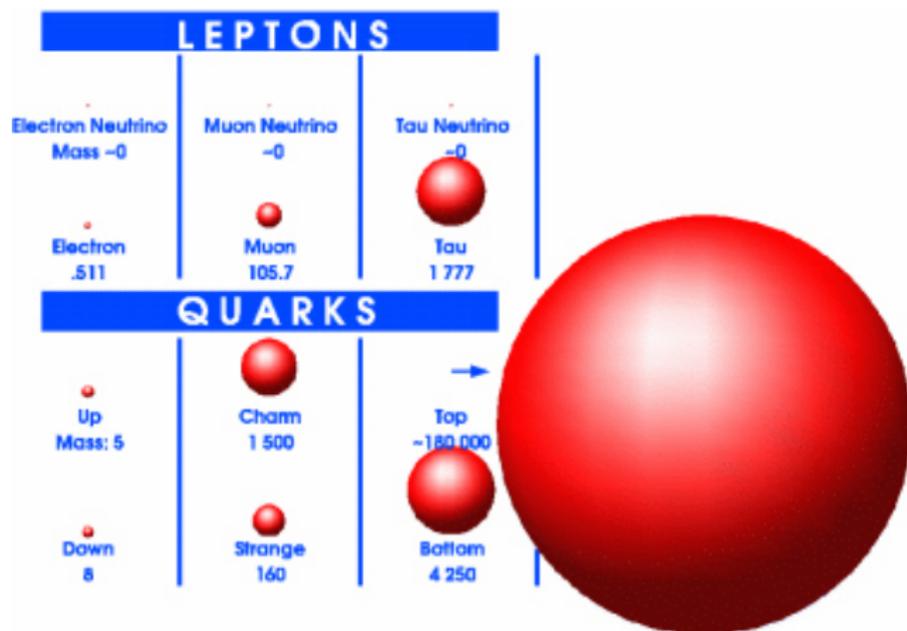
Modèle Standard reproduit très bien l'expérience (y compris pour le boson H), mais pas parfaitement satisfaisant

- 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

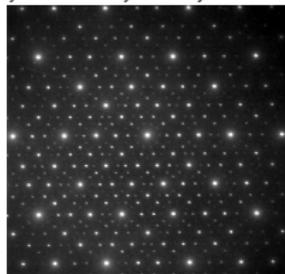
Boson de Higgs responsable de la masse des particules

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Champ de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

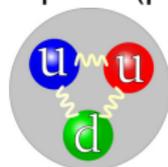
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

Composite

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



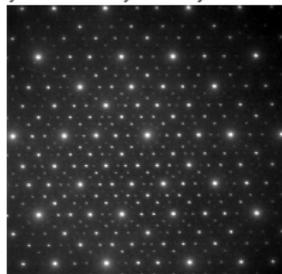
Masse des quarks (Higgs, $\sim 1\%$) + E
de "liaison" (inter. forte, $\sim 99\%$)

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Champ de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

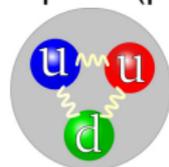
électron, muon, tau, neutrinos...



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

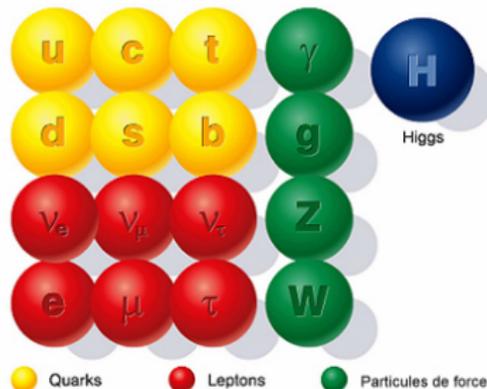
- Atome: $M_H = m_p + m_e - 13.6 \text{ eV}/c^2$ (1/100 000 000 du tout)
- Noyau: $M_D = m_p + m_n - 2.2 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$ (1/1000 du tout)
- Proton: $M_p = 2m_u + m_d + 0.93 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2$ (99% du tout)

Expliquer la masse des particules composites est aussi un défi !

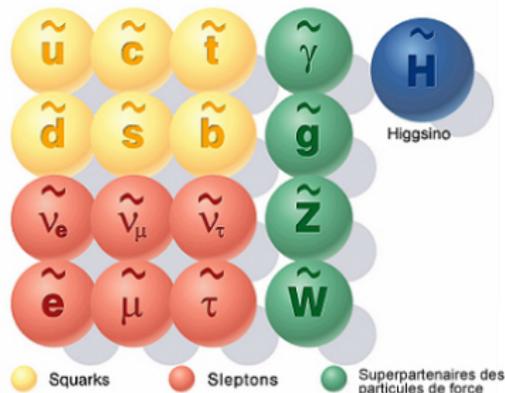
Au-delà du Modèle Standard

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

Particules du Modèle Standard

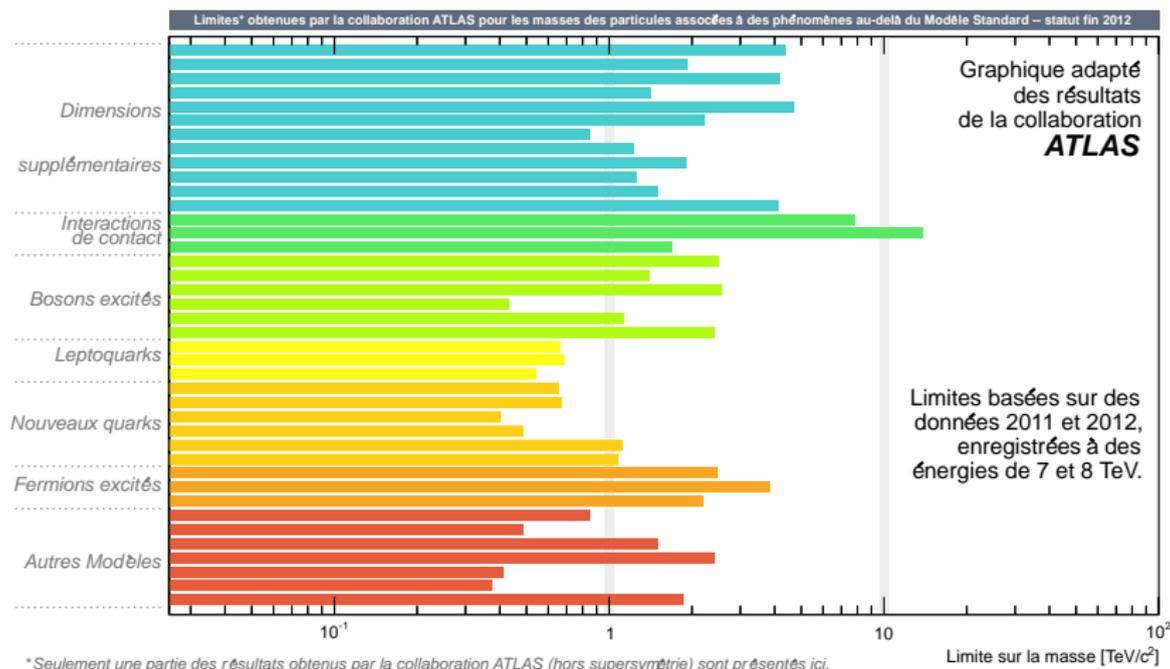


Particules supersymétriques



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

Ne rien voir, c'est déjà apprendre quelque chose



- Collisions au LHC 8 2011-2012 → 13 TeV en 2015
- Mieux mesurer les propriétés des particules du Modèle Standard
- Chercher (les effets) de nouvelles particules

De nouveaux alliés

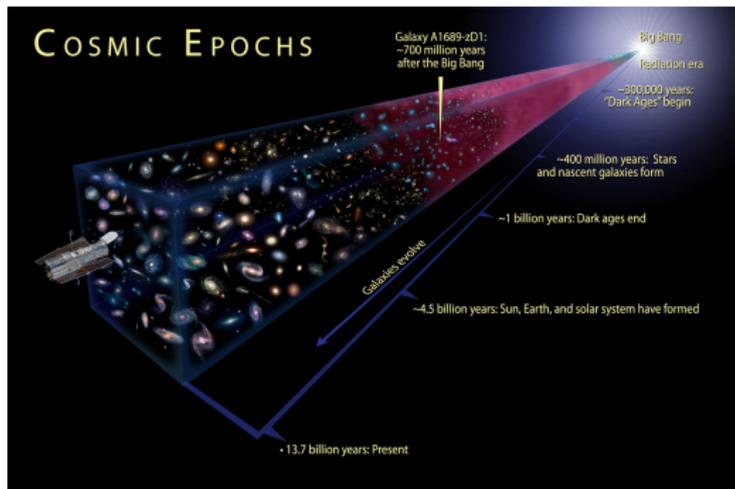
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

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



D'autres voies vers les très hautes énergies ?

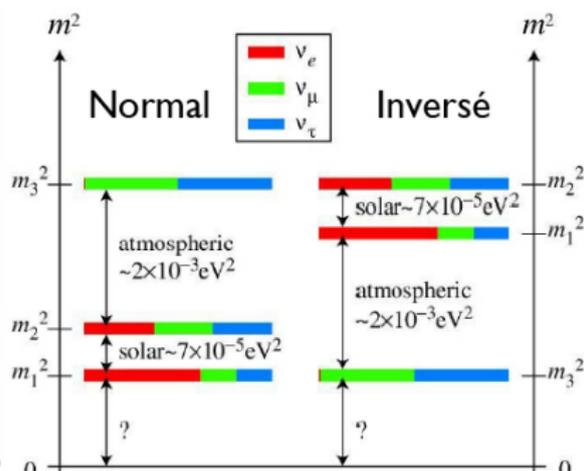
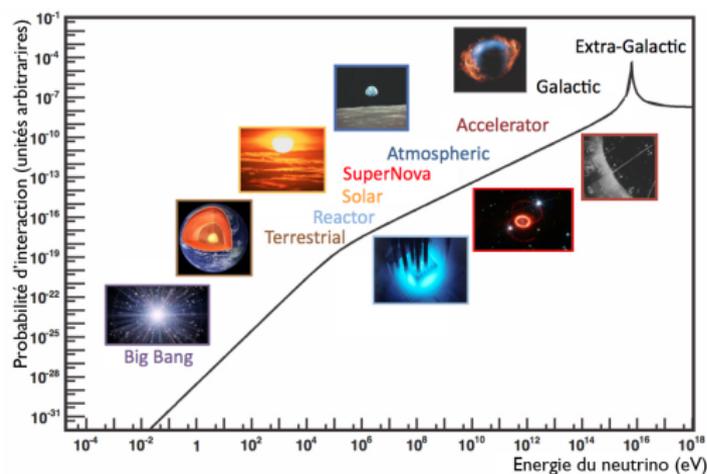
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

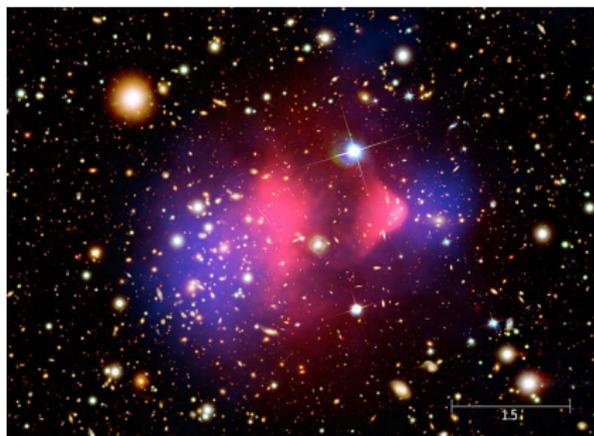
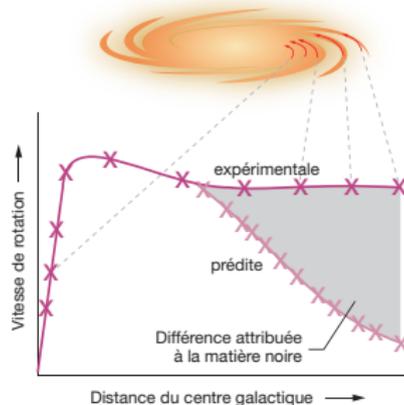
Les neutrinos

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 ?



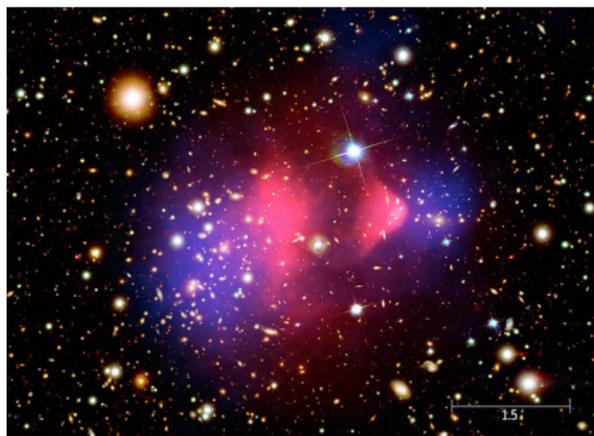
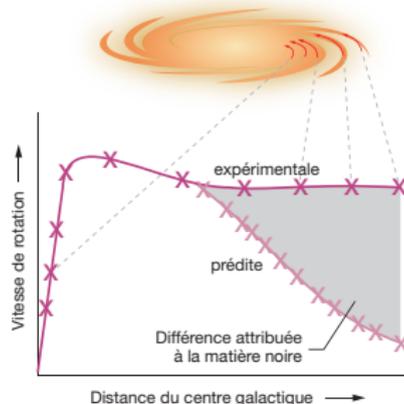
La matière noire



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)

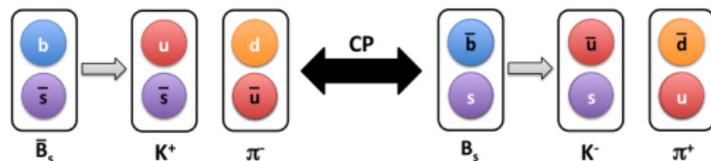
Matière "noire"

- 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

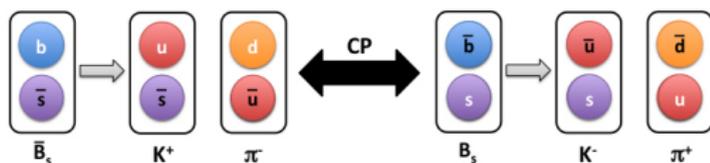
- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



Asymétrie matière-antimatière

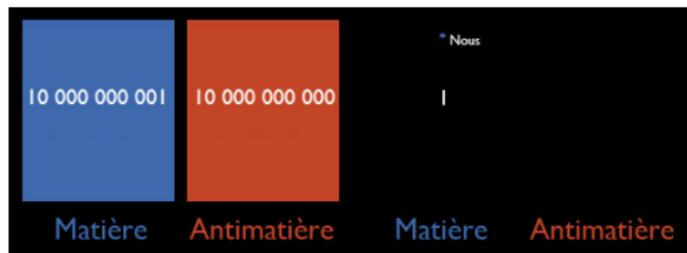
Collisionneurs

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



Cosmologie

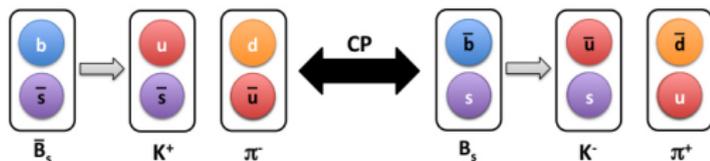
- Big bang: $E \leftrightarrow$ particule + antiparticule
- Disparition de l'un au détriment de l'autre
- Asymétrie bien trop large pour Modèle Standard !



Asymétrie matière-antimatière

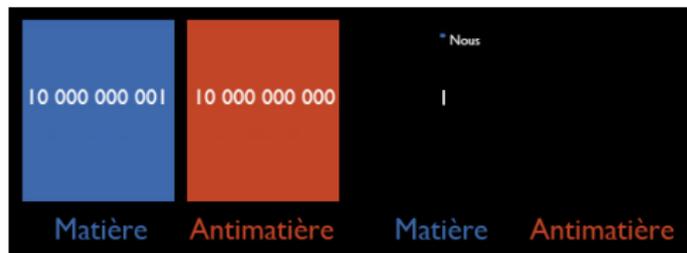
Collisionneurs

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



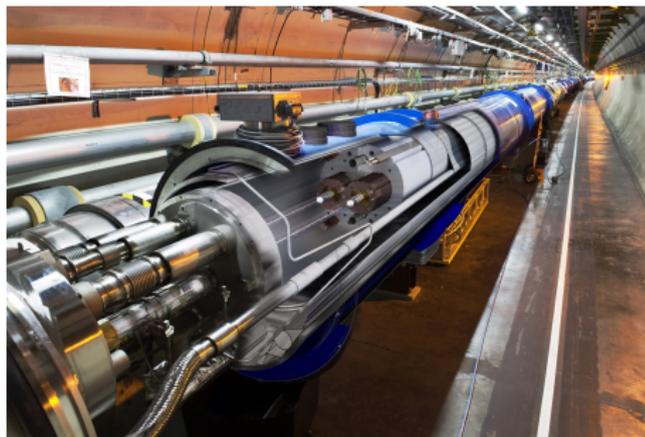
Cosmologie

- 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 2017...



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 !

Bonus track

Anges et démons



Produire de l'antimatière ?

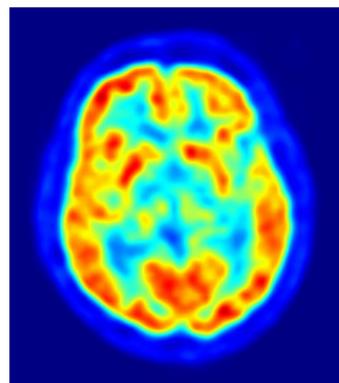
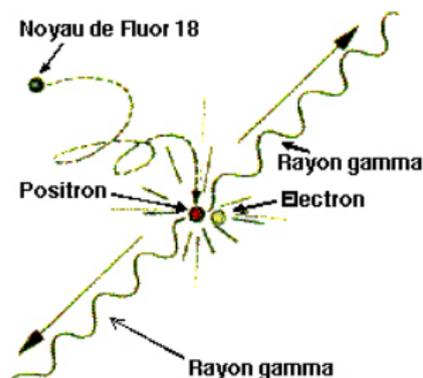
- En 2002, dizaines de milliers d'atomes d'anti-hydrogène au CERN
- soit 1/10 000 000 000 000 000 d'un ballon d'enfant !
- au rythme de production, plusieurs milliards d'années pour avoir de quoi faire une bombe !

En terme d'énergie ?

- Pas une source : pas de mine d'antimatière – il faut la fabriquer !
- Ni un stockage efficace : rendement pour produire $\bar{H} \simeq 1/10^{10}$
- Impossibilité théorique de contrôler parfaitement la "production"

Anges et démons est une oeuvre de "pure" fiction
(pas de science-fiction, et encore moins de science...)

La tomographie par émission de positrons



- Traceur, molécule contenant un noyau radioactif β^+ ...
- ... absorbé par l'organisme vivant et fixé dans un organe
- Un positron émis, qui rencontre un électron environnant ...
- ... ce qui engendre 2 photons gamma dos-à-dos avec $E_\gamma = m_e c^2$
- ... faciles à détecter en coïncidence pour faire une carte 3D

Combien a coûté le LHC ?

Pour le CERN, sur plus de vingt ans, personnel + matériel

- Accélérateur seul: 4 milliards d'euros
- Détecteurs et informatique: 1 milliard d'euros
(entre 15 et 20% du coût total de ce poste)

donc un coût total autour de 10 milliards d'euros

(21 Etats-membres + participation d'autres états)

Combien a coûté le LHC ?

Pour le CERN, sur plus de vingt ans, personnel + matériel

- Accélérateur seul: 4 milliards d'euros
- Détecteurs et informatique: 1 milliard d'euros
(entre 15 et 20% du coût total de ce poste)

donc un coût total autour de 10 milliards d'euros

(21 Etats-membres + participation d'autres états)

- Plus de 50 milliardaires dans le monde
ont une richesse individuelle supérieure
- Produit intérieur brut européen (2013) : 20 000 milliards d'euros
- Produit intérieur brut français (2013) : 2 000 milliards d'euros
- Coût des embouteillages en France (2013) : 17 milliards d'euros
- Fraude patronale (Cour des comptes 2013) : 20 milliards d'euros
- Coût pour l'Etat de l'Affaire Crédit Lyonnais : 15 milliards d'euros
- Porte-avion Charles de Gaulle : 3 milliards d'euros