

Le Modèle Standard

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

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

Stage de formation "Cosmos à l'École",
CPPM Marseille, 11-12 mai 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 Hf	59 Ta	60 W	61 Re	62 Os	63 Ir	64 Pt	65 Au	66 Hg	67 Tl	68 Pb	69 Bi	70 Po	71 At	72 Rn													
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 U														91 Th	92 Pa	93 U	94 Np	95 Pu	96 Am	97 Cm	98 Bk	99 Cf	100 Es	101 Fm	102 Md	103 No	104 Lr


... à une autre, un siècle plus tard

Composants élémentaires de la matière


Cellule
 10^{-6} m




Macromolécule
 10^{-9} m




Atome
 10^{-10} m




Noyau
 10^{-14} m




Proton
 10^{-16} m




Neutron
 10^{-16} m







Être humain
1 m



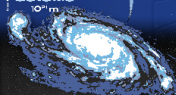
Terre
 10^7 m



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. Ses interactions avec les constituants élémentaires de la matière, le champ est responsable de leur masse. Il se distingue de la gravitation par son interaction électromagnétique et faible.

Champ de Higgs

Description
radiation électromagnétique
et casino, chaleur

Photon γ

Cohésion des atomes
et des molécules, chaleur,
énergie nucléaire

Gluons g

Gravité, pesanteur,
système solaire, galaxies

Graviton (?)


INTERACTIONS FONDAMENTALES

P O U V E S

10^{-17} m	Interaction faible	
infinie	Interaction électromagnétique	
10^{-16} m	Interaction forte	
infinie	Gravitation	

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 régit les phénomènes de la lumière et de l'électricité et du magnétisme. Elle est responsable de la cohésion des atomes et des molécules, de la chaleur et de l'énergie nucléaire. Elle est responsable de la production de lumière.



Antiproton

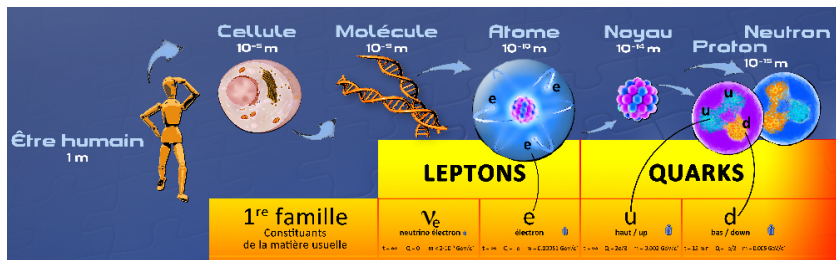
A l'instar de la particule correspondante ordinaire, le **antiproton** est constitué de quarks, mais ceux-ci sont inversés. Le **antiproton** est la particule antiparticule du **proton**, lequel est constitué de quarks.

ANTIMATIÈRE

A l'instar de la particule correspondante ordinaire, le **antiproton** est constitué de quarks, mais ceux-ci sont inversés. Le **antiproton** est la particule antiparticule du **proton**, lequel est constitué de quarks.

Casser... ou créer ?

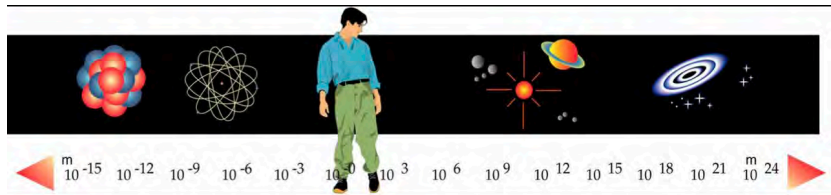
La matière ordinaire



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

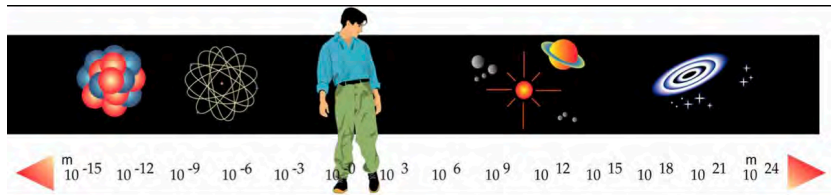
	I	II	III		
Leptons	u	c	t	γ	H
	d	s	b	g	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	
	e	μ	τ	W	
					Forces

Monter en énergie, diminuer en taille

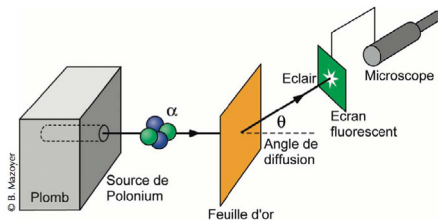


- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' E de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X, γ)

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 [cf. Geiger, Marsden, Rutherford qui "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...

Dessine-moi une particule

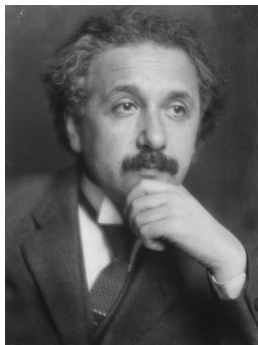


Pas vraiment du billard. . .

- Elles ont parfois les propriétés d'onde (étendue) plutôt que particule (ponctuelle)
- Capables d'atteindre des vitesses proches de celle de la lumière
- Peuvent disparaître en laissant apparaître d'autres particules à leur place (désintégration)

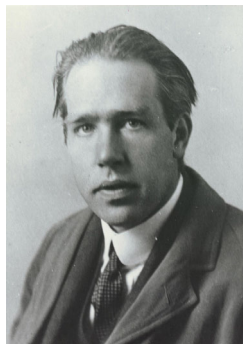
Un champ de bataille théorique

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 !

- 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**

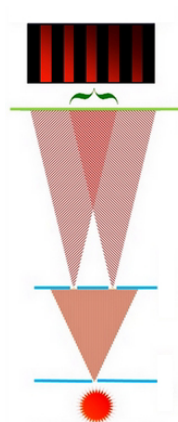
$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

- 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



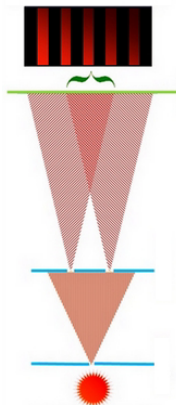
La mécanique quantique

- Lumière

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

- Probabilités

- 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

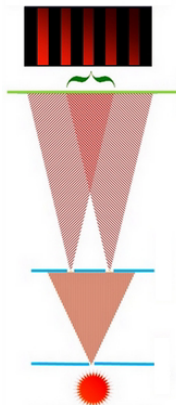
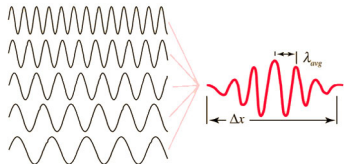
● Lumière

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

● Probabilités

- 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

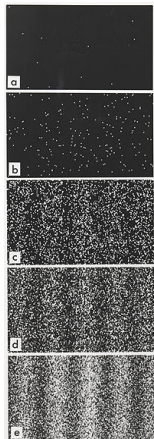
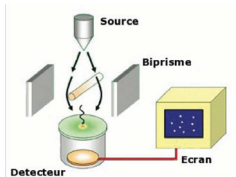
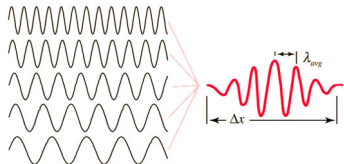
● Lumière

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

● Probabilités

- 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

- 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



Les adversaires réconciliés

- 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

Les adversaires réconciliés

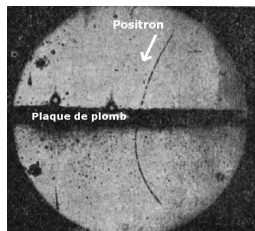
- Collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant, E suffisamment élevée pour des effets
 - Relativiste: $E = mc^2$, équivalence entre énergie et masse
 - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



- 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

Le Modèle Standard

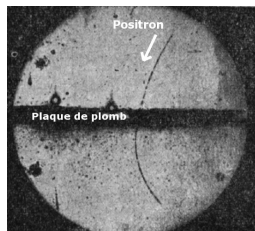
Les antiparticules



Anderson (1932): rayons cosmiques

- Chambre de Wilson remplie de vapeur d'eau avec \vec{B}
- Des gouttes d'eau se forment sur le passage des particules chargées
- Même masse qu'un électron, mais charge opposée : **positron**

Les antiparticules



Anderson (1932): rayons cosmiques

- Chambre de Wilson remplie de vapeur d'eau avec \vec{B}
- Des gouttes d'eau se forment sur le passage des particules chargées
- Même masse qu'un électron, mais charge opposée : **positron**

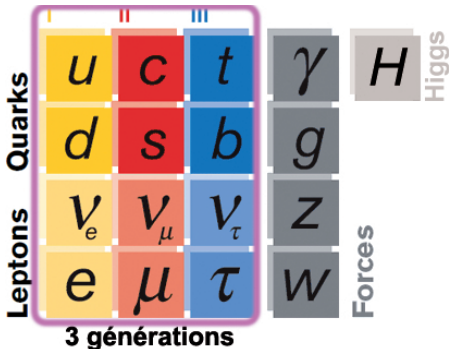
Dirac (1928): équation pour décrire l'électron

- Mécanique Quantique + Relativité restreinte
$$E = p^2/(2m_e) \rightarrow E^2 = p^2c^2 + m_e^2c^4$$
- Solution $E < 0$ vue comme **anti-particule**
- Permet l'équivalence Énergie ($E = 2m_e c^2$)
↔ Masse (paire particule/antiparticule)
- De nouvelles particules dans des collisions !



Les trois générations

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



- Copies de la 1^{ère} 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

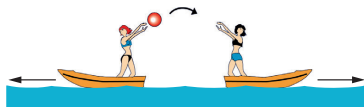
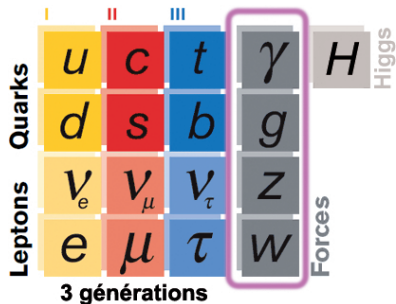
Carte d'identité d'une particule

- 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 ± 1.7) %		1321
$\rho\rho$	(2.0 ± 0.7) %		1273
$K^*(892)^0 K^- \pi^+ + c.c.$	(2.0 ± 0.7) %		1276
$K^*(892) \bar{K}^0(892)$	(0.2 ± 3.4) × 10 ⁻³		1194
$K^{*0} \bar{K}^{*0} \pi^+ \pi^-$	(1.1 ± 0.5) %		1071
$\phi K^+ K^-$	(2.7 ± 1.4) × 10 ⁻³		1102
$\phi\phi$	(2.7 ± 0.0) × 10 ⁻³		1087
$\phi 2(\pi^+ \pi^-)$	< 3.5 × 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 × 10 ⁻³	90%	1266
$\omega\phi$	< 1.7 × 10 ⁻³	90%	1183
$f_2(1270) f_2(1270)$	(7.6 ± 3.1) × 10 ⁻³		771
$f_2(1270) f_2'(1525)$	(1.0 ± 0.4) %		500
Decays into stable hadrons			
$K \bar{K} \pi$	(7.0 ± 1.2) %		1379
$\eta \pi \pi$	(4.0 ± 1.0) %		1427
$\pi^+ \pi^- K^+ K^-$	(1.5 ± 0.6) %		1343
$K^+ K^- 2(\pi^+ \pi^-)$	(7.0 ± 2.0) × 10 ⁻³		1252
$2(K^+ K^-)$	(1.5 ± 0.7) × 10 ⁻³		1053
$2(\pi^+ \pi^-)$	(1.20 ± 0.30) %		1457
$3(\pi^+ \pi^-)$	(1.5 ± 0.5) %		1405
$\rho \bar{\rho}$	(1.3 ± 0.4) × 10 ⁻³		1158
$\bar{K} \bar{K}$	(1.04 ± 0.31) × 10 ⁻³		988
$K \bar{K} \eta$	< 3.1 %	90%	1263
$\pi^+ \pi^- \rho \rho$	< 1.2 %	90%	1025
Radiative decays			
$\gamma\gamma$	(1.8 ± 0.6) × 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	
INTERACTIONS FONDAMENTALES	1 ^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino electron ν	e electron	u haut / up	d bas / down
	2 ^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon ν	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 ν	τ tau	t top	b bas / beauty / bottom
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

... domaines d'action (portées) et intensités (couplages) différents

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1 ^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino electron ν	e electron	u haut / up	d bas / down
2 ^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon ν	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 ν	τ tau	t top	b base / 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

... domaines d'action (portées) et intensités (couplages) différents

- **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 electron ν	e electron e	u haut / up u	d bas / down d	
	ν_μ neutrino muon ν	μ muon μ	c charme / charm c	s étrange / strange s	
	ν_τ neutrino tau ν	τ tau τ	t top t	b base / beauty / bottom b	
3 ^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles					
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

... domaines d'action (portées) et intensités (couplages) différents

- **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 electron ν $\left(\begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=1.2 \times 10^{-36} \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	e electron β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=0.000511 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	u haut / up β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=0.0023 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	d bas / down β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1/3 \\ m=0.0048 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon ν $\left(\begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=1.2 \times 10^{-36} \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	μ muon β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=0.10566 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	c charme / charm β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=1.27 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	s étrange / strange β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1/3 \\ m=0.13957 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau ν $\left(\begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=1.2 \times 10^{-36} \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	τ tau β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=1.77686 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	t top β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=173.1 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$	b bas / beauty / bottom β $\left(\begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1/3 \\ m=4.18 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \right)$
INTERACTIONS FONDAMENTALES				
Portée	10^{-17} m	Interaction faible		
	infinie	Interaction électromagnétique		
	10^{-15} m	Interaction forte		
	infinie	Gravitation		

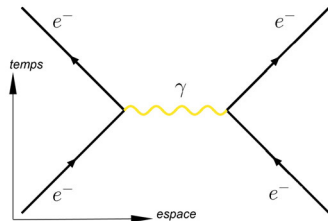
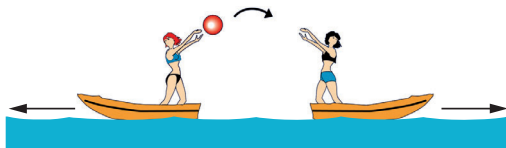
Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

... domaines d'action (portées) et intensités (couplages) différents

- **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...)
- **Faible**: ne crée pas d'états liés, mais désintégrations des particules lourdes en particules plus légères (désintégration β)

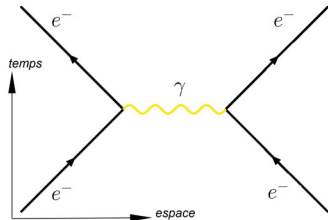
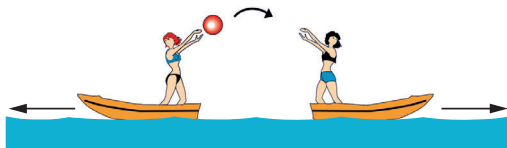
Interaction électromagnétique

- 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

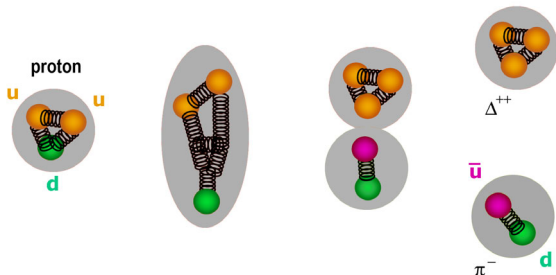
- Boson médiateur : **photon** de masse nulle
- Interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand r , potentiel $V(r) \sim 1/r$ de portée infinie



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

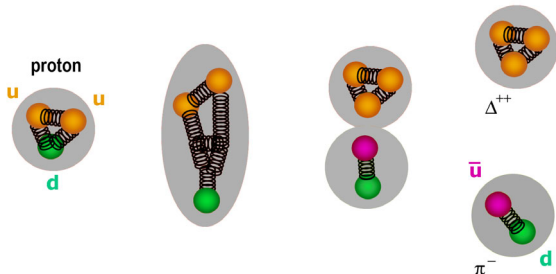
Interaction forte

- 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 $V(r) \sim r$



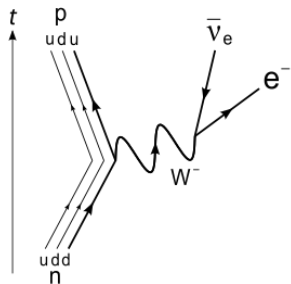
- Les quarks restent **confinés** dans de objets de rayon $O(1 \text{ fm})$
- . . . des hadrons, états liés de trois quarks (proton, neutron. . .) ou d'un quark et d'un anti-quark (pion, kaon. . .), observés
- Interaction forte aussi nécessaire pour la stabilité des noyaux

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 $10^{-17} m$

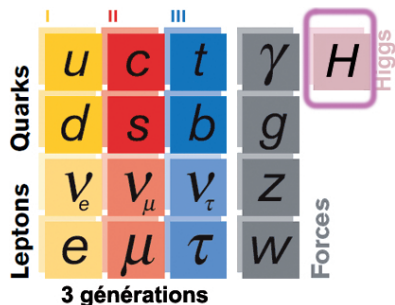


- Portée **subatomique**, pas d'état lié
- Désintégrations, en particulier désintégration nucléaire β
- ... via un boson W^\pm impliquant (u, d) et/ou (e, ν_e)
- ... ou leurs copies plus lourdes des autres familles
- Certains bosons médiateurs (W^\pm) chargés électriquement

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

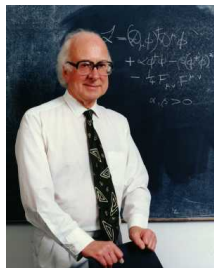
- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement (milieu optique,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



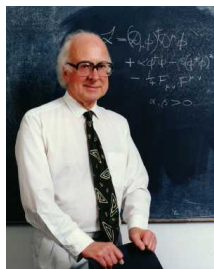
Problème similaire dans le Modèle Standard

- 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

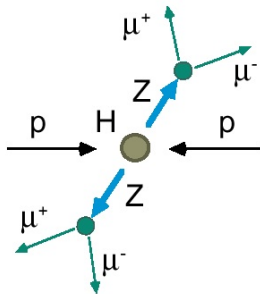
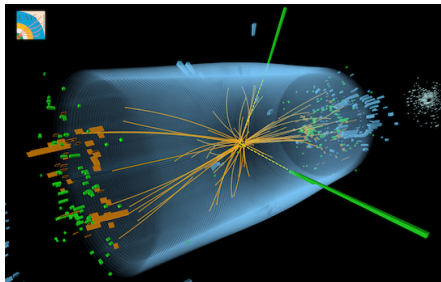
Modèle Standard basé sur la Théorie quantique des champs

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



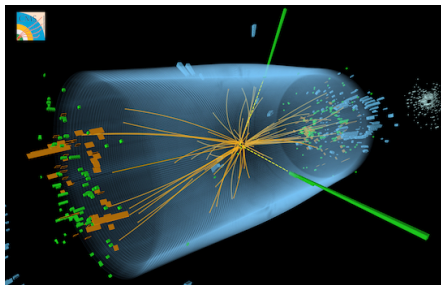
L'existence du champ de Higgs se manifeste par une particule, le boson H (excitation de ce champ)

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

Champagne pour le LHC

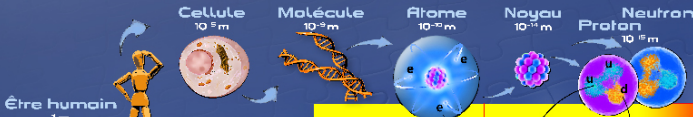


	I	II	III		
Quarks	u	c	t	γ	H Higgs
	d	s	b	g	
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	Forces
	e	μ	τ	W	

3 générations

- 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

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 participe aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
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 / bottom / bottom	



INTERACTIONS FONDAMENTALES



Bosons Z, W[±]	Déjà mentionnés dans les p ⁺ et K ⁰ certains neufs, ils sont stables.
Photon γ	Faiblesse, mais vitesse, cohésion des atomes et des molécules, chaleur.
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie-matière.
Graviton (?)	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 nous est révélée par ses effets qui impliquent en général, et en particulier, les Solés.
 = à grande échelle: la formation des étoiles à partir des nuages de gaz,
 = à petite échelle: la stabilité de la matière, les effets des interactions en tant que telles: les interactions électromagnétiques, est: de la production de lumière.



ANTIMATIÈRE

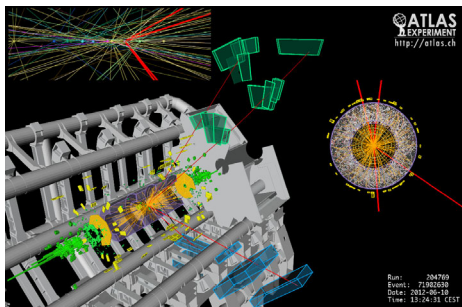
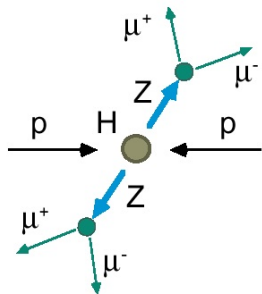
A chaque particule est associée une antiparticule. Les antiparticules sont toujours opposées à leur particule correspondante. Les particules et les antiparticules ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

Une pincée de théorie

Mesurer le Modèle Standard

- Particules créées dans des collisions de haute énergie ($E = mc^2$)
- ... étudiées via leurs produits de désintégration
- Souvent des processus peu fréquents



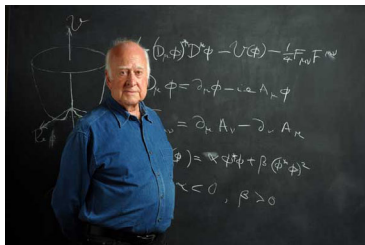
- Théorie: seulement la probabilité pour chaque processus
- Expérience: signal en compétition avec des bruits de fond

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

Tester le Modèle Standard

Spécialisation importante entre théoriciens et expérimentateurs

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



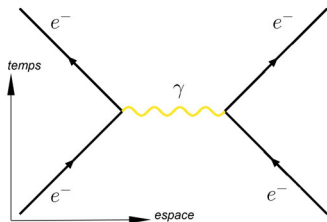
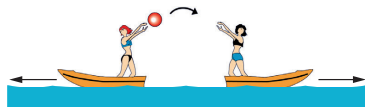
Chez les théoriciens

- 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

Les diagrammes de Feynman

Théorie quantique des champs

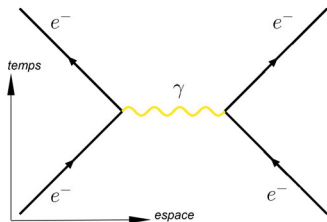
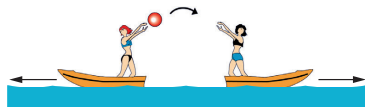
- quantique: seulement proba, somme sur toutes les possibilités
- relativiste: pas de tps et espace abs, équivalence masse énergie



Les diagrammes de Feynman

Théorie quantique des champs

- quantique: seulement proba, somme sur toutes les possibilités
- relativiste: pas de tps et espace abs, équivalence masse énergie



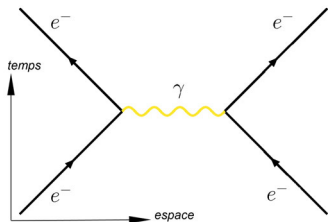
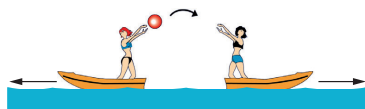
● Diagramme de Feynman

- Ligne = propagation d'un point d'espace-temps à un autre
- Flèche = charges, en particulier électrique (particule vs antipart)
- Vertex = interaction (création/annihilation de particules)

Les diagrammes de Feynman

Théorie quantique des champs

- quantique: seulement proba, somme sur toutes les possibilités
- relativiste: pas de tps et espace abs, équivalence masse énergie



● Diagramme de Feynman

- Ligne = propagation d'un point d'espace-temps à un autre
- Flèche = charges, en particulier électrique (particule vs antipart)
- Vertex = interaction (création/annihilation de particules)
- Probabilité $|A|^2$, avec A amplitude complexe
 - $A = [\text{couplage } e-\gamma] \times [\text{propagation du photon}] \times [\text{couplage } \mu-\gamma]$

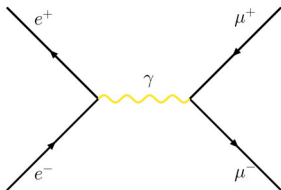
$$A \propto eQ \times \frac{1}{p^2} \times eQ$$

La théorie des perturbations

- Théorie des perturbations en $\alpha = e^2/(4\pi)$ (1/137, petit paramètre)

$$A = A^{(0)} + \alpha A^{(1)} + \alpha^2 A^{(2)} + \dots$$

- Chaque puissance de α correspond à un échange de photon

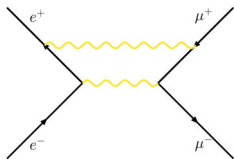


La théorie des perturbations

- Théorie des perturbations en $\alpha = e^2/(4\pi)$ (1/137, petit paramètre)

$$A = A^{(0)} + \alpha A^{(1)} + \alpha^2 A^{(2)} + \dots$$

- Chaque puissance de α correspond à un échange de photon

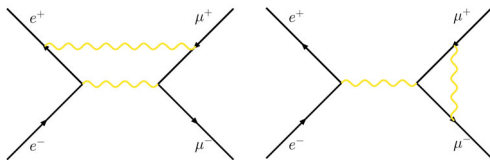


La théorie des perturbations

- Théorie des perturbations en $\alpha = e^2/(4\pi)$ (1/137, petit paramètre)

$$A = A^{(0)} + \alpha A^{(1)} + \alpha^2 A^{(2)} + \dots$$

- Chaque puissance de α correspond à un échange de photon

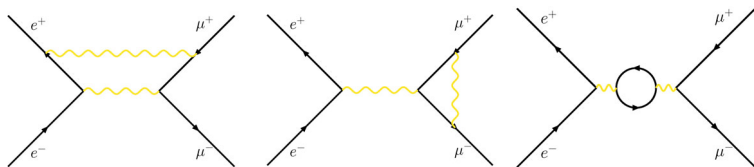


La théorie des perturbations

- Théorie des perturbations en $\alpha = e^2/(4\pi)$ (1/137, petit paramètre)

$$A = A^{(0)} + \alpha A^{(1)} + \alpha^2 A^{(2)} + \dots$$

- Chaque puissance de α correspond à un échange de photon



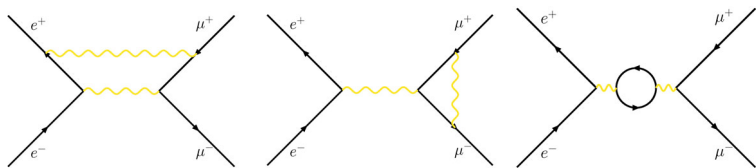
- Nombreux diagrammes non-classiques : relativiste (paires particule-antiparticule) + quantique (somme sur toutes configs)

La théorie des perturbations

- Théorie des perturbations en $\alpha = e^2/(4\pi)$ (1/137, petit paramètre)

$$A = A^{(0)} + \alpha A^{(1)} + \alpha^2 A^{(2)} + \dots$$

- Chaque puissance de α correspond à un échange de photon



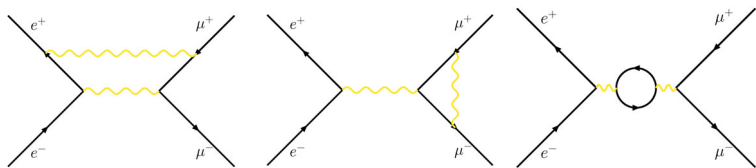
- Nombreux diagrammes non-classiques : relativiste (paires particule-antiparticule) + quantique (somme sur toutes configs)
- Somme sur toutes les impulsions possibles des particules internes qui sont virtuelles (ne satisfaisant pas $E^2 \neq \vec{p}^2 + m^2$)
- Avec toutes les particules chargées élect, couplant aux photons

La théorie des perturbations

- Théorie des perturbations en $\alpha = e^2/(4\pi)$ (1/137, petit paramètre)

$$A = A^{(0)} + \alpha A^{(1)} + \alpha^2 A^{(2)} + \dots$$

- Chaque puissance de α correspond à un échange de photon



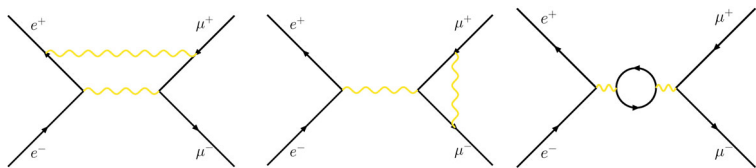
- Nombreux diagrammes non-classiques : relativiste (paires particule-antiparticule) + quantique (somme sur toutes configs)
- Somme sur toutes les impulsions possibles des particules internes qui sont virtuelles (ne satisfaisant pas $E^2 \neq \vec{p}^2 + m^2$)
- Avec toutes les particules chargées élect, couplant aux photons
- Étendu à l'interaction faible (résultats analytiques)

La théorie des perturbations

- Théorie des perturbations en $\alpha = e^2/(4\pi)$ (1/137, petit paramètre)

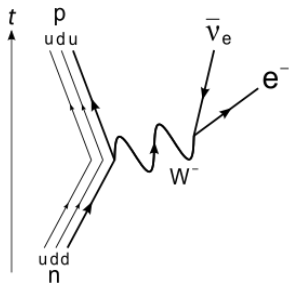
$$A = A^{(0)} + \alpha A^{(1)} + \alpha^2 A^{(2)} + \dots$$

- Chaque puissance de α correspond à un échange de photon



- Nombreux diagrammes non-classiques : relativiste (paires particule-antiparticule) + quantique (somme sur toutes configs)
- Somme sur toutes les impulsions possibles des particules internes qui sont virtuelles (ne satisfaisant pas $E^2 \neq \vec{p}^2 + m^2$)
- Avec toutes les particules chargées élect, couplant aux photons
- Étendu à l'interaction faible (résultats analytiques)
- Plus compliqué pour interaction forte (résolution numérique)

Zoom sur l'interaction faible

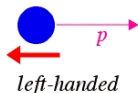
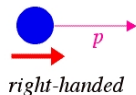


	I	II	III				
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	Forces		
	e	μ	τ	W			
	Quarks	u	c	t		γ	Higgs
		d	s	b		g	
3 générations							

- Portée très courte, pas d'état lié
- Désintégration, en particulier désintégration β
- ... via un boson W^\pm (virtuel) impliquant (u, d) et/ou (e, ν_e)
- ... ou leurs copies des autres familles
- Certains bosons médiateurs (W^\pm) chargés électriquement

Hélicité, parité, conjugaison de charge

- **Hélicité:** Projection du spin sur l'impulsion

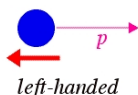
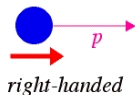


- Pour spin 1/2
deux hélicités, gauche et droite

- Pour spin 1/2 massif, dépend du référentiel
⇒ Cousine mieux définie (identique pour $m = 0$): la chiralité

Hélicité, parité, conjugaison de charge

- **Hélicité:** Projection du spin sur l'impulsion



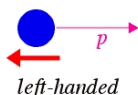
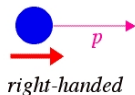
- Pour spin 1/2
deux hélicités, gauche et droite

- Pour spin 1/2 massif, dépend du référentiel
⇒ Cousine mieux définie (identique pour $m = 0$): la chiralité

- **Parité P :** $(t, x, y, z) \leftrightarrow (t, -x, -y, -z)$ (gauche \leftrightarrow droite)

Hélicité, parité, conjugaison de charge

- **Hélicité:** Projection du spin sur l'impulsion



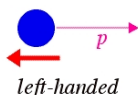
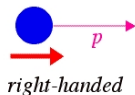
- Pour spin 1/2
deux hélicités, gauche et droite

- Pour spin 1/2 massif, dépend du référentiel
⇒ Cousine mieux définie (identique pour $m = 0$): la chiralité

- **Parité P :** $(t, x, y, z) \leftrightarrow (t, -x, -y, -z)$ (gauche \leftrightarrow droite)
- **Conjugaison de charge C :** particule \leftrightarrow antiparticule

Hélicité, parité, conjugaison de charge

- **Hélicité:** Projection du spin sur l'impulsion



- Pour spin 1/2
deux hélicités, gauche et droite

- Pour spin 1/2 massif, dépend du référentiel
⇒ Cousine mieux définie (identique pour $m = 0$): la chiralité

- **Parité P :** $(t, x, y, z) \leftrightarrow (t, -x, -y, -z)$ (gauche \leftrightarrow droite)
- **Conjugaison de charge C :** particule \leftrightarrow antiparticule
- C et P symétries pour électromagnétisme et interaction forte
⇒ proba identiques pour processus et processus miroir

L'expérience de Mme Wu

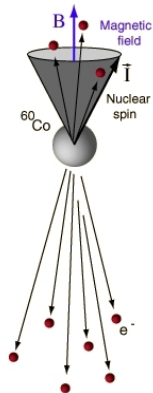


1956, Mme Wu (Berkeley)

Désintégration β du cobalt



émet e^{-} préférentiellement dans la direction opposée à celle du spin



L'expérience de Mme Wu

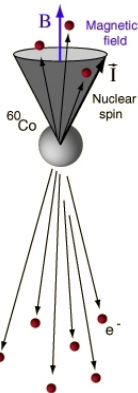


1956, Mme Wu (Berkeley)

Désintégration β du cobalt



émet e^{-} préférentiellement dans la direction opposée à celle du spin



P reverse l'impulsion d' e^{-} (vecteur)

mais pas le spin du noyau (pseudovecteur)

\Rightarrow si P était une bonne symétrie, l'émission devrait être isotrope !

Des investigations plus poussées montrent que
l'interaction faible ne respecte ni P ni C ,
et qu'elle parle seulement aux particules "gauches"

Une vision géométrique des interactions

Loi de conservation \leftrightarrow Symétrie \leftrightarrow Forme des interactions

Une vision géométrique des interactions

Loi de conservation \leftrightarrow Symétrie \leftrightarrow Forme des interactions

- Electromagnétique: Conservation de la charge électrique liée au caractère arbitraire de la phase pour les fonctions d'onde

$$\psi \rightarrow e^{i\alpha} \psi$$

qui contraint la structure des éqs de l'Electrodynamique Quantique

Une vision géométrique des interactions

Loi de conservation \leftrightarrow Symétrie \leftrightarrow Forme des interactions

- Electromagnétique: Conservation de la charge électrique liée au caractère arbitraire de la phase pour les fonctions d'onde

$$\psi \rightarrow e^{i\alpha} \psi$$

qui contraint la structure des éqs de l'Electrodynamique Quantique

- Interaction faible : Symétrie différenciant chiralités gauche et droite

$$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \rightarrow U \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \quad u_R \rightarrow u_R \quad d_R \rightarrow d_R$$

avec U matrice de "rotation" d'isospin

Une vision géométrique des interactions

Loi de conservation \leftrightarrow Symétrie \leftrightarrow Forme des interactions

- Electromagnétique: Conservation de la charge électrique liée au caractère arbitraire de la phase pour les fonctions d'onde

$$\psi \rightarrow e^{i\alpha} \psi$$

qui contraint la structure des éqs de l'Electrodynamique Quantique

- Interaction faible : Symétrie différenciant chiralités gauche et droite

$$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \rightarrow U \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \quad u_R \rightarrow u_R \quad d_R \rightarrow d_R$$

avec U matrice de "rotation" d'isospin

- Terme de masse traite identiquement chiralités gauche et droite
 \implies interdit par la symétrie qui veut avoir $m = 0$!

Une vision géométrique des interactions

Loi de conservation \leftrightarrow Symétrie \leftrightarrow Forme des interactions

- Electromagnétique: Conservation de la charge électrique liée au caractère arbitraire de la phase pour les fonctions d'onde

$$\psi \rightarrow e^{i\alpha} \psi$$

qui contraint la structure des éqs de l'Electrodynamique Quantique

- Interaction faible : Symétrie différenciant chiralités gauche et droite

$$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \rightarrow U \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \quad u_R \rightarrow u_R \quad d_R \rightarrow d_R$$

avec U matrice de "rotation" d'isospin

- Terme de masse traite identiquement chiralités gauche et droite
 \implies interdit par la symétrie qui veut avoir $m = 0$!

$m \neq 0$ grâce au champ de Higgs, qui brise la symétrie !

Les enjeux actuels du Modèle Standard

Un drôle de mélange

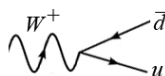
Principe de superposition: si $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ solutions acceptables,
solution plus générale $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, avec $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$

Un drôle de mélange

Principe de superposition: si $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ solutions acceptables, solution plus générale $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, avec $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$



$$Z^0 \rightarrow u\bar{u}, Z^0 \rightarrow d\bar{d}$$

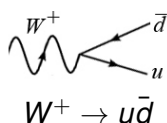
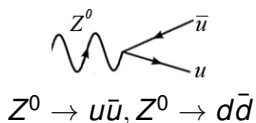


$$W^+ \rightarrow u\bar{d}$$

ou les deux autres familles, qui ont les mêmes propriétés...

Un drôle de mélange

Principe de superposition: si $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ solutions acceptables, solution plus générale $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, avec $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$



ou les deux autres familles, qui ont les mêmes propriétés...

En toute généralité $Z^0 \rightarrow d'\bar{d}'$ et $W^+ \rightarrow u'\bar{d}'$, avec d' combinaison linéaire des représentants des 3 familles (d, s, b)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix}_{\text{interaction}} = V \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_{\text{propagation}} \quad V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

avec V matrice "de rotation" (unitaire)

pour conserver la normalisation des états

L'asymétrie entre matière et antimatière



- Même rotation pour particule et antiparticule
⇒ la redéfinition s'élimine pour $Z^0 \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, c\bar{c}$
(idem pour γ et gluons)
- Mais pour $W^+ \rightarrow u\bar{d}$, la matrice V est bien là !
décrite par Cabibbo, Kobayashi, Maskawa

L'asymétrie entre matière et antimatière



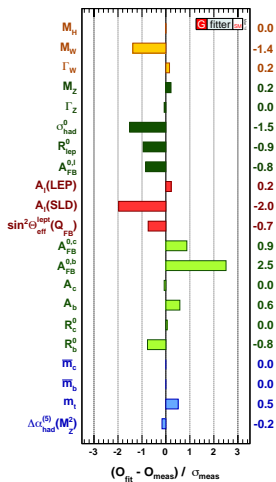
- Même rotation pour particule et antiparticule
⇒ la redéfinition s'élimine pour $Z^0 \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, c\bar{c}$
(idem pour γ et gluons)
- Mais pour $W^+ \rightarrow u\bar{d}$, la matrice V est bien là !
décrite par Cabibbo, Kobayashi, Maskawa

- V a une partie imaginaire, source d'asymétrie entre matière et antimatière (apparaît dans processus liés à l'interaction faible)

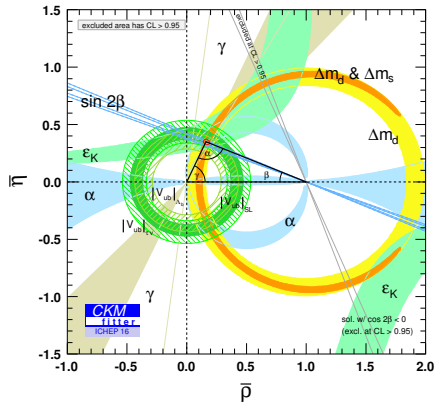
$$A(W^- \rightarrow \bar{u}d) \propto V_{ud},$$

$$A(W^+ \rightarrow u\bar{d}) \propto V_{ud}^*$$

Des tests de l'interaction faible...

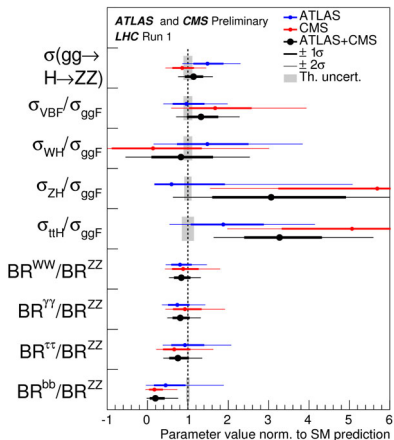
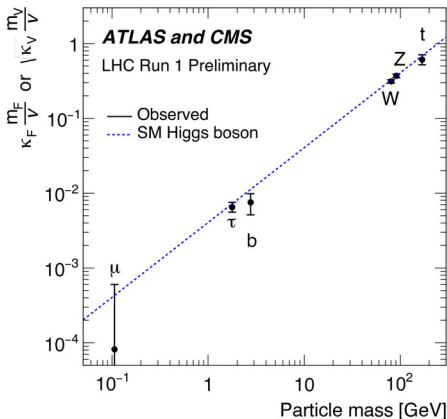


Propriétés du W et Z
(tests de précision électrofaible)
LEP (1990-2000)



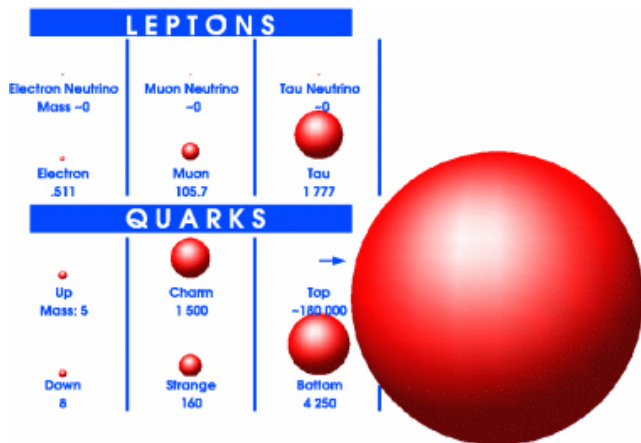
Asymétrie particule/antiparticule
(tests de violation de CP)
Babar, Belle (2000)

... et de sa brisure, en étudiant le boson H



- Géométrie des désintégrations confirme H scalaire
- Couplages du boson H aux autres particules prop. à la masse
- Production (σ) et désintégration (Br) OK

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

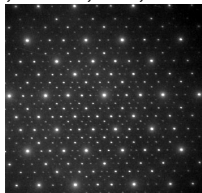
Boson de Higgs responsable de la masse des particules

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Champ de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

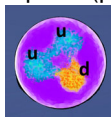
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

Composite

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



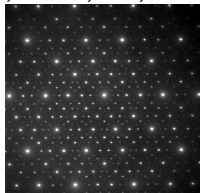
Masse des quarks (Higgs, $\sim 1\%$) + E
de "liaison" (inter. forte, $\sim 99\%$)

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

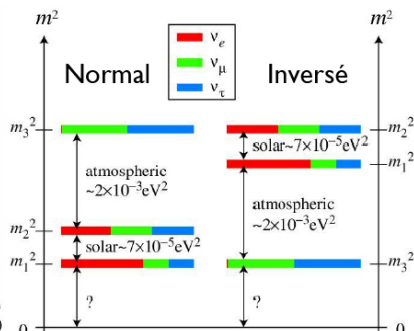
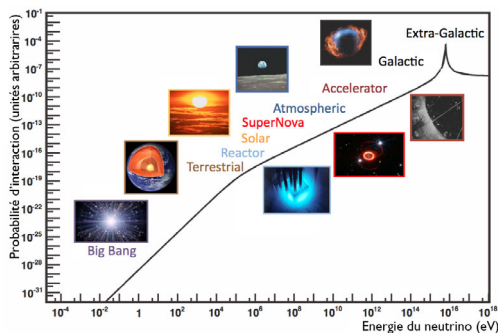
- Atome: $M_H = m_p + m_e - 13.6 \text{ eV}/c^2$ (1/100 000 000 du tout)
- Noyau: $M_D = m_p + m_n - 2.2 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$ (1/1000 du tout)
- Proton: $M_p = 2m_u + m_d + 0.93 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2$ (99% du tout)

Expliquer la masse des particules composites est aussi un défi !

Les neutrinos

Particules encore mal connues du Modèle Standard

- Neutrinos venant de supernovae, Soleil, rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère, réacteurs nucléaires, accélérateurs
- Masse des neutrinos ? Sont-ils leurs propres antiparticules ? Asymétrie entre particule et antiparticule ? Y a-t-il plus de 3 ν ?



Les neutrinos se mélangent eux aussi

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_{\text{interaction}} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}_{\text{propagation}}$$

U matrice décrite par
Pontecorvo, Maki,
Nakagawa, Sakata

Les neutrinos se mélangent eux aussi

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_{\text{interaction}} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}_{\text{propagation}}$$

U matrice décrite par
Pontecorvo, Maki,
Nakagawa, Sakata

Idem donc pour $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ et $W^+ \rightarrow \bar{d} u$, sauf que

- presque tous les quarks sont lourds et se désintègrent rapidement
- les neutrinos sont très légers et ne se désintègrent pas

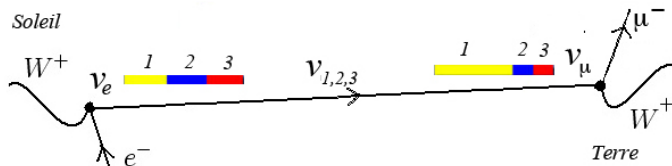
Les neutrinos se mélangent eux aussi

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_{\text{interaction}} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}_{\text{propagation}}$$

U matrice décrite par
Pontecorvo, Maki,
Nakagawa, Sakata

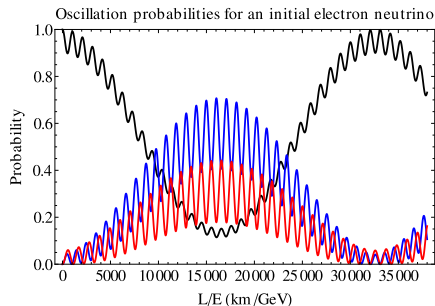
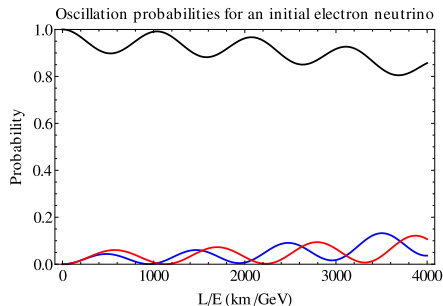
Idem donc pour $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ et $W^+ \rightarrow \bar{d} u$, sauf que

- presque tous les quarks sont lourds et se désintègrent rapidement
- les neutrinos sont très légers et ne se désintègrent pas
- ν_e combinaison de 3 états ν_1, ν_2, ν_3 , de masses différentes, se propageant à des vitesses légèrement différentes
- la composition de l'état change sur de longues distances !
 $|\nu_e\rangle \rightarrow c_e(L)|\nu_e\rangle + c_\mu(L)|\nu_\mu\rangle + c_\tau(L)|\nu_\tau\rangle$ **oscillation de neutrinos**



Les oscillations de neutrinos

Probabilité, en partant de ν_e , de mesurer $\nu_{e,\mu,\tau}$ (noir, bleu, rouge)



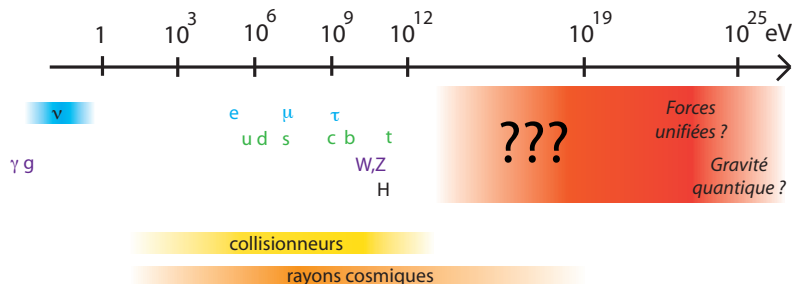
- Longueur L à parcourir, énergie E des neutrinos
- Différence de masses (i.e. propagation) entre neutrinos
- Interaction (faible) avec l'environnement
- Contraintes sur $m_{\nu_i} - m_{\nu_j}$ et matrice de mélange U
- Possibilité d'étudier la violation de CP, i.e. différences ν et $\bar{\nu}$

Au-delà du Modèle Standard

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 ?

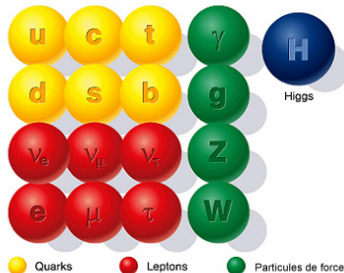


Chaque montée en énergie a donné lieu à des découvertes:
sous-structure, nouvelle interaction, nouvelles particules

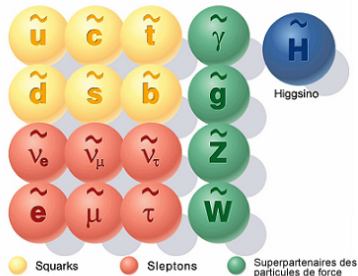
Au-delà du Modèle Standard

- 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

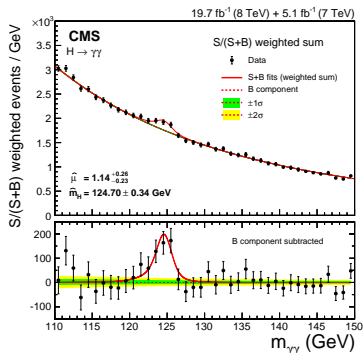


- Ne pas être en désaccord avec les observations antérieures
- Avoir des conséquences observables. . .

Deux voies pour la Nouvelle Physique

Relativiste $E = mc^2$

Preuve "directe" (ATLAS/CMS)

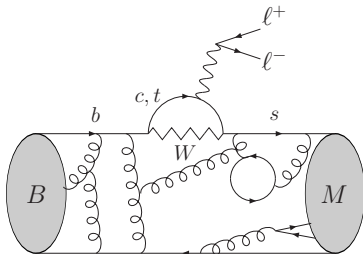


Collisions avec assez d'énergie pour produire des particules au-delà du Modèle Standard

Haute E /processus "fréquents"

Quantique: $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

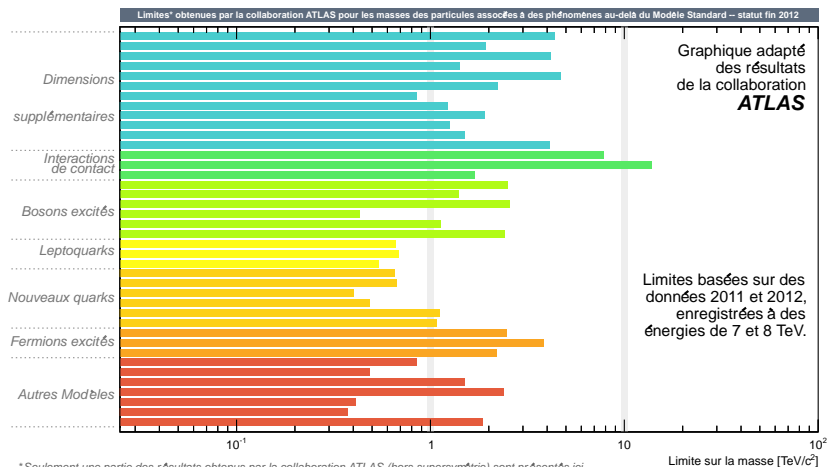
Preuve "indirecte" (LHCb, Belle-II)



Petites deviations venant d'états intermédiaires avec des particules lourdes

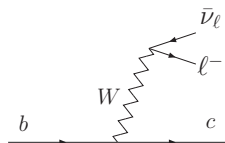
Basse E /processus "rares"

Voie relativiste: ne rien voir, c'est quelque chose !



- Collisions au LHC 8 2011-2012 → 13 TeV en 2015
- Mieux mesurer les propriétés des particules du Modèle Standard (top, boson H , bosons W et Z)
- Chercher (les effets) de part massives (pic de masse, énergie

Voie quantique: des désintégrations rares

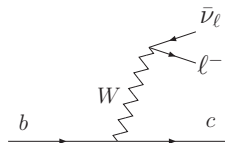


Désintégration d'un quark en un autre, plus léger (de saveur différente)

- interaction faible via un boson W
- $d \rightarrow ue^- \bar{\nu}_e$ (désintégration β du n)
- aussi autres familles $b \rightarrow ce^- \bar{\nu}_e$
- 2 quarks de charges électriques \neq

Voie quantique: des désintégrations rares

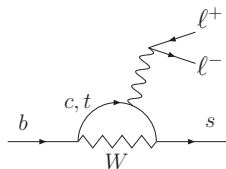
Désintégration d'un quark en un autre, plus léger (de saveur différente)



- interaction faible via un boson W
- $d \rightarrow ue^- \bar{\nu}_e$ (désintégration β du n)
- aussi autres familles $b \rightarrow ce^- \bar{\nu}_e$
- 2 quarks de charges électriques \neq

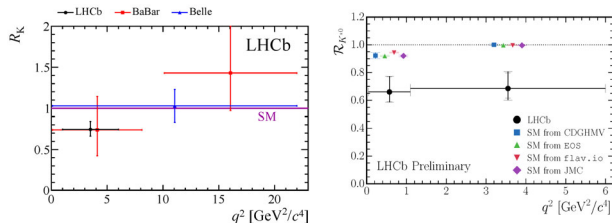
D'autres désintégrations plus rares

- $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ ou $b \rightarrow se^+e^-$ ($\ell = e, \mu$)
- même charge électrique des 2 quarks
- états intermédiaires compliqués, lourds, accessibles grâce à Mécanique Quantique
- compétition entre particules du Modèle Standard et nouvelle physique ?
- difficile: interact forte, faible, em + NP (?)



Voie quantique: des déviations qui s'accumulent

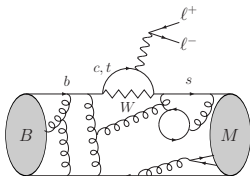
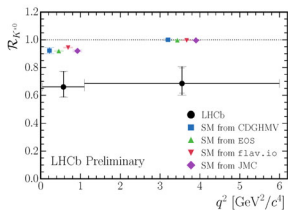
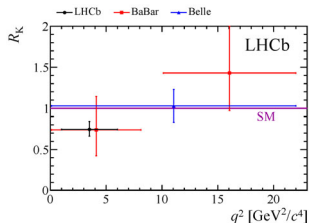
- Depuis 2012, étude de la désintégration $b \rightarrow s\mu\mu$, avec déviations par rapport au MS: LHCb en 2013, confirmée par LHCb en 2015, puis par Belle-II (Japon) en 2016...



- LHCb: $B \rightarrow K\mu\mu$ et $B \rightarrow Kee$ différentes proba de désintégration, vu aussi dans $B \rightarrow K^*\mu\mu$ face à $B \rightarrow K^*ee$

Voie quantique: des déviations qui s'accumulent

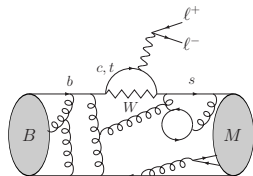
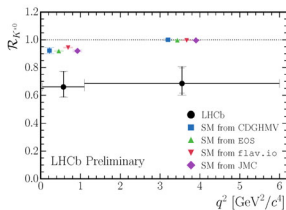
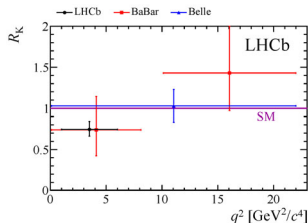
- Depuis 2012, étude de la désintégration $b \rightarrow s\mu\mu$, avec **déviations** par rapport au MS: LHCb en 2013, confirmée par LHCb en 2015, puis par Belle-II (Japon) en 2016...



- LHCb: $B \rightarrow K\mu\mu$ et $B \rightarrow Kee$ différentes proba de désintégration, vu aussi dans $B \rightarrow K^*\mu\mu$ face à $B \rightarrow K^*ee$
- Modèle Standard: e et μ même sensibilité aux 3 interactions (slt masses \neq), et partie QCD identique, donc même proba !

Voie quantique: des déviations qui s'accumulent

- Depuis 2012, étude de la désintégration $b \rightarrow s\mu\mu$, avec **déviations** par rapport au MS: LHCb en 2013, confirmée par LHCb en 2015, puis par Belle-II (Japon) en 2016...



- LHCb: $B \rightarrow K\mu\mu$ et $B \rightarrow Kee$ différentes proba de désintégration, vu aussi dans $B \rightarrow K^*\mu\mu$ face à $B \rightarrow K^*ee$
- Modèle Standard: e et μ même sensibilité aux 3 interactions (slt masses \neq), et partie QCD identique, donc même proba !
- Actuellement étudiée attentivement pour confirmer cette **violation de l'universalité leptonique** et les déviations dans $b \rightarrow s\mu\mu$

Connexions cosmiques

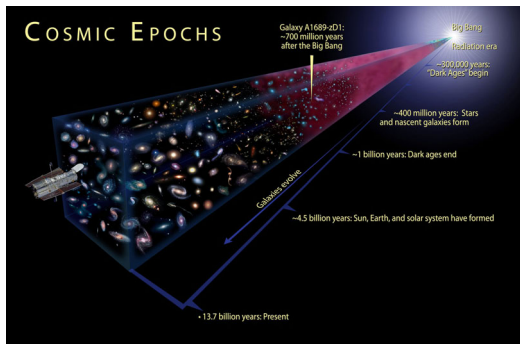
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

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

Connexions cosmiques

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]

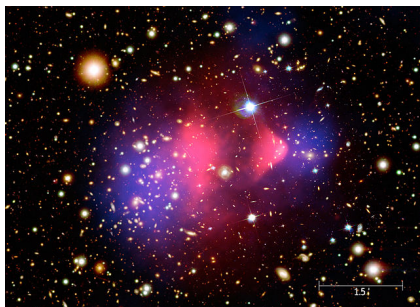
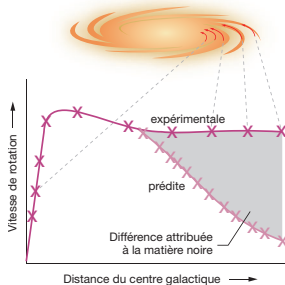


D'autres voies vers les très hautes énergies ?

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

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

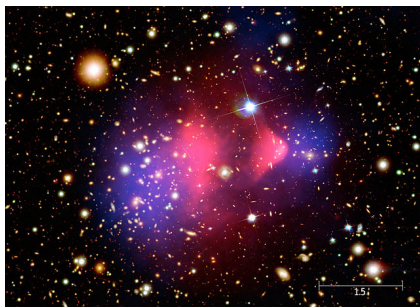
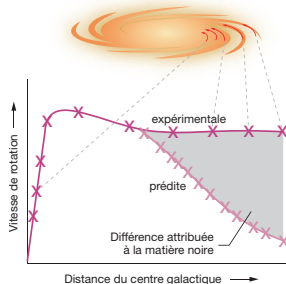
La matière noire



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



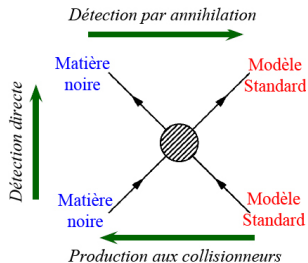
En se basant sur les lois de la gravitation, pas assez de matière visible

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

Matière "noire"

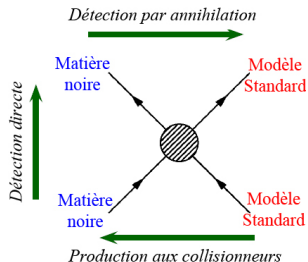
- lourde, stable, neutre, interagissant peu avec son environnement, hormis par interaction gravitationnelle (halos ? filaments ?)
- particule nouvelle χ , hors du Modèle Standard ?

Observer la matière noire



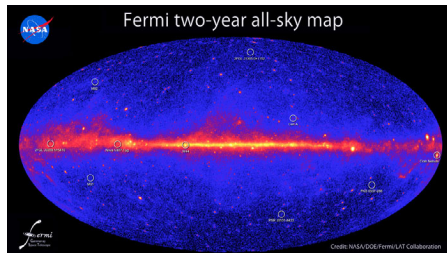
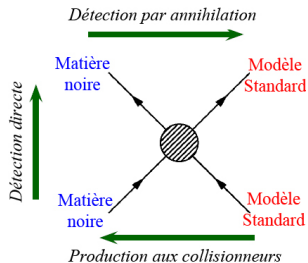
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)

Observer la matière noire



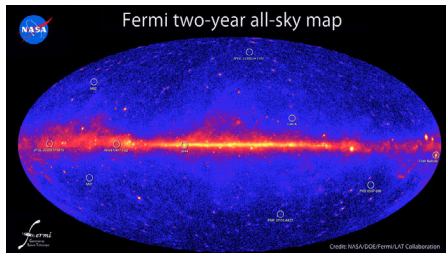
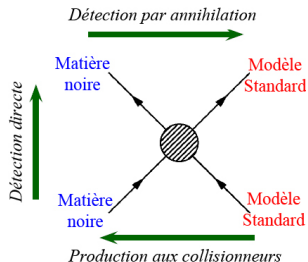
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)

Observer la matière noire



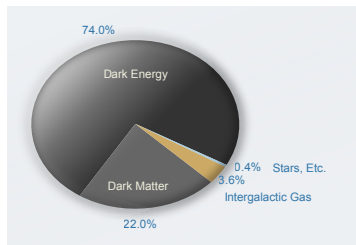
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
 - ⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)
- Voir son annihilation en observant le ciel
 - ⇒ rayons gamma monochromatiques ($E_\gamma = M_\chi c^2$)
 - ⇒ excès de rayons cosmiques de haute énergie

Observer la matière noire



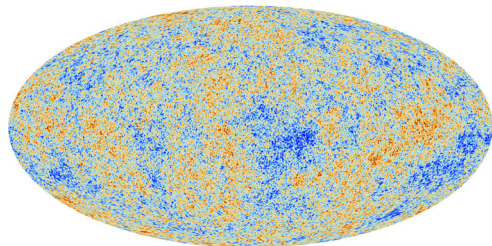
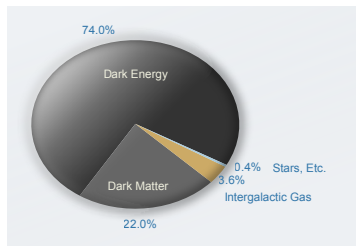
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
 - ⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)
- Voir son annihilation en observant le ciel
 - ⇒ rayons gamma monochromatiques ($E_\gamma = M_\chi c^2$)
 - ⇒ excès de rayons cosmiques de haute énergie
- Détecter sa présence par observations astronomiques
 - ⇒ déformation d’images par lentilles gravitationnelles

L'énergie noire



- Relativité Générale: courbure Univers \leftrightarrow contenu énergétique
- Trois composants (matière, rayonnement, énergie noire) caractérisées par relation entre densité et pression
- Plusieurs indications pour l'énergie noire: accélération de l'expansion de l'Univers, ray fond cosmologique, grandes structures
- "Pure" Relativité Générale: pas de contrepartie en physique des particules (espace-temps plat, pas de gravité)

L'énergie noire

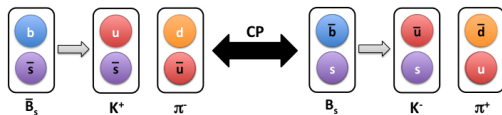


- Relativité Générale: courbure Univers \leftrightarrow contenu énergétique
- Trois composants (matière, rayonnement, énergie noire) caractérisées par relation entre densité et pression
- Plusieurs indications pour l'énergie noire: accélération de l'expansion de l'Univers, ray fond cosmologique, grandes structures
- "Pure" Relativité Générale: pas de contrepartie en physique des particules (espace-temps plat, pas de gravité)

Asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

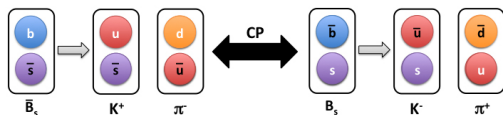
- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



Asymétrie matière-antimatière

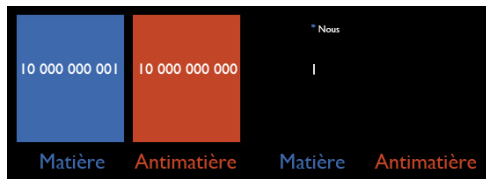
Collisionneurs

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



Cosmologie

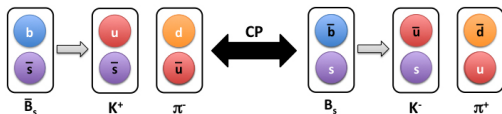
- Big bang: $E \leftrightarrow$ particule + antiparticule
- Disparition de l'un au détriment de l'autre
- Asymétrie bien trop large pour Modèle Standard !



Asymétrie matière-antimatière

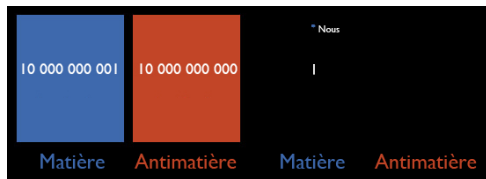
Collisionneurs

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



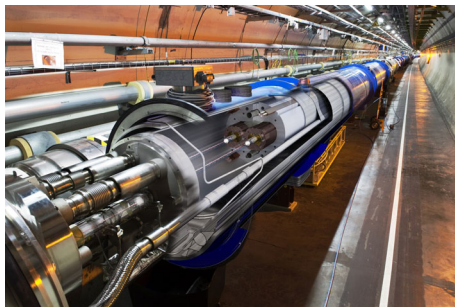
Cosmologie

- 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 !

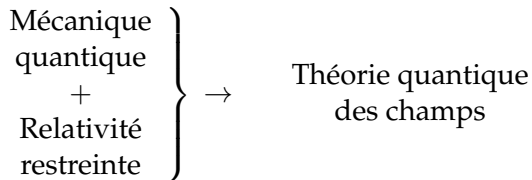
Le cadre théorique de la physique des particules

Mécanique quantique

Comportement d'objets pour énergie ou temps petits

Mécanique
quantique
+
Relativité
restreinte

Comportement d'objets de vitesse très grande



Nombre de particules variable

Mécanique
quantique
+
Relativité
restreinte

} → Théorie quantique
des champs

Théorie
des groupes

Structure mathématique des interactions

Le cadre théorique de la physique des particules

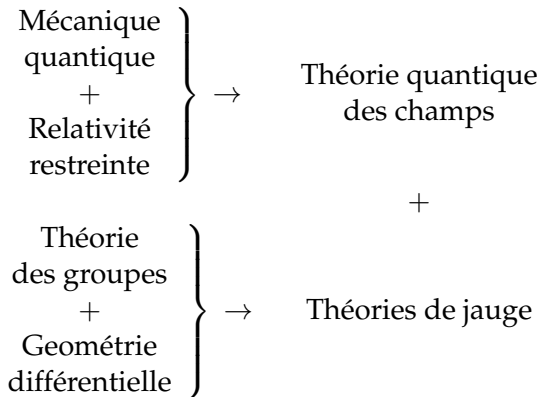
Mécanique
quantique
+
Relativité
restreinte

} → Théorie quantique
des champs

Théorie
des groupes
+
Géométrie
différentielle

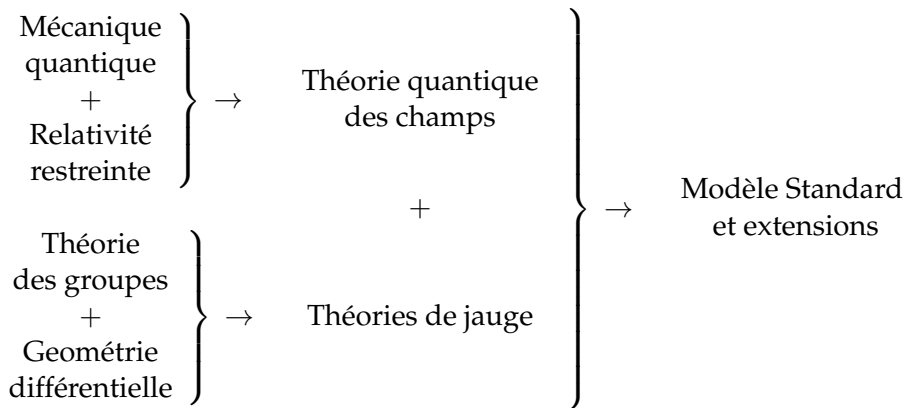
Dépendance spatiale des interactions

Le cadre théorique de la physique des particules



Bosons médiateurs des interactions

Le cadre théorique de la physique des particules



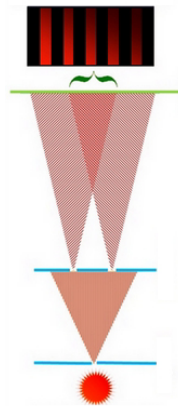
*Le cadre général en physique des particules
contemporaine*

La théorie quantique des champs

Optique

- Intensité lumineuse
- Interférences liées à une différence de marche

$$I = |A|^2 = |e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2}|^2 = 2 + 2 \cos(\delta_1 - \delta_2)$$



La théorie quantique des champs

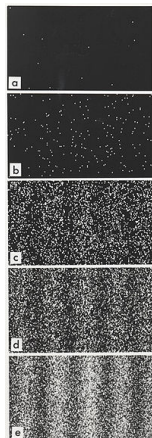
Optique

- Intensité lumineuse
- Interférences liées à une différence de marche

$$I = |A|^2 = |e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2}|^2 = 2 + 2 \cos(\delta_1 - \delta_2)$$

Mécanique Quantique

- Probabilité de présence d'un électron



La théorie quantique des champs

Optique

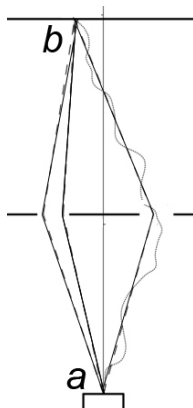
- Intensité lumineuse
- Interférences liées à une différence de marche
 $I = |A|^2 = |e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2}|^2 = 2 + 2 \cos(\delta_1 - \delta_2)$

Mécanique Quantique

- Probabilité de présence d'un électron
- Chaque chemin noté par une action S

$$P(a \rightarrow b) = |A(a \rightarrow b)|^2 = \left| \sum_{\text{tous chemins}} e^{i \cdot S/\hbar} \right|^2$$

- Limite classique: $\hbar \rightarrow 0$, seul reste le chemin d'action minimale (principe de Maupertuis)



La théorie quantique des champs

Optique

- Intensité lumineuse
- Interférences liées à une différence de marche

$$I = |A|^2 = |e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2}|^2 = 2 + 2 \cos(\delta_1 - \delta_2)$$

Mécanique Quantique

- Probabilité de présence d'un électron
- Chaque chemin noté par une action S

$$P(a \rightarrow b) = |A(a \rightarrow b)|^2 = \left| \sum_{\text{tous chemins}} e^{i \cdot S/\hbar} \right|^2$$

- Limite classique: $\hbar \rightarrow 0$, seul reste le chemin d'action minimale (principe de Maupertuis)

Théorie Quantique des Champs

- Probabilité de transition d'état initial à état final (multiparticules)
- S opérateur capable de créer ou d'annihiler des particules

Quelques conséquence de la MQ

- Sensibilité quantique à des états intermédiaires plus lourds
- “Constante” de couplage, comme $\alpha = e^2/(4\pi)$ pour electromag, dépend de la distance/énergie du processus

