

# 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, 15 Janvier 2018



# D'une démarche analytique...

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 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 Lw	

... à une autre, un siècle plus tard

# Composants élémentaires de la matière

Être humain  
1m

Cellule  
 $10^{-6}$ m

Macromolécule  
 $10^{-9}$ m

Atome  
 $10^{-10}$ m

Noyau  
 $10^{-14}$ m

Proton  
 $10^{-16}$ m

Neutron  
 $10^{-16}$ m

	LEPTONS	QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Rapide plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charm / charme	s strange / étrange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Relique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	t top	b bottom / heavy / lourd

**INTERACTIONS FONDAMENTALES**

P O U V E S	infinie	Interaction faible	
	$10^{-16}$ m	Interaction électromagnétique	
	infinie	Interaction forte	
	infinie	Gravitation	

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

<b>Bosons Z, W<sup>±</sup></b>	Interaction électromagnétique et faible
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Électricité, magnétisme, chaleur, lumière, ondes radio, etc.
<b>Gluons g</b>	Cohésion des noyaux, des nucléons et des nucléons, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

**ANTIMATIÈRE**

Autre version de la matière avec une charge opposée. Les électrons ont des positrons, les quarks ont des antiquarks, etc. Les particules et les antiparticules peuvent s'annihiler et produire de la lumière.

Antiproton

Un certain des autres interactions fondamentales que se réalisent en laboratoire ou en particulier en Soleil

→ la production par le processus de fusion nucléaire qui se réalise dans le Soleil et dans les étoiles à partir de la fusion de noyaux légers en noyaux plus lourds et la production de lumière.

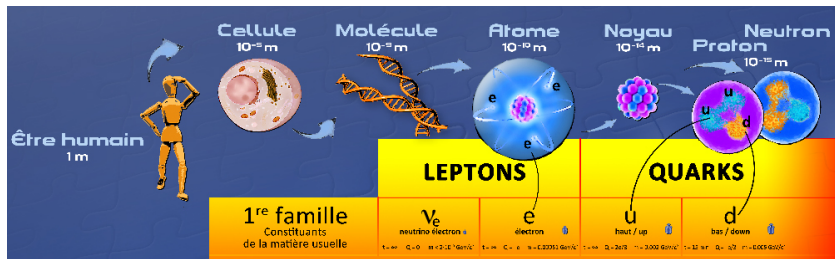
Soleil  
 $10^9$  m

Galaxie  
 $10^{21}$  m

Terre  
 $10^7$  m

# Le Modèle Standard

# La matière ordinaire

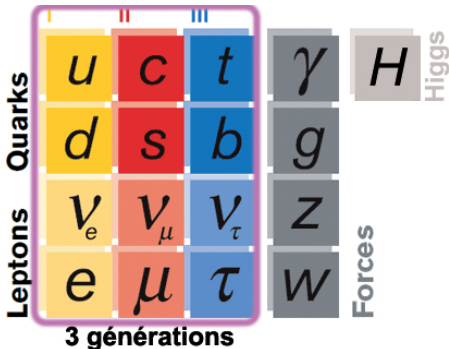
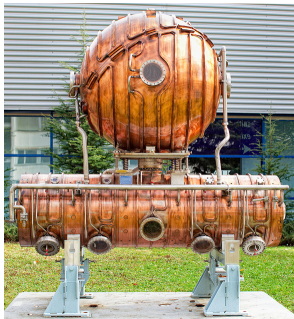


- Quarks: constituants des protons (uud) et neutrons (udd)
- Électrons: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives:  $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$  (15 min)

	I	II	III		
Leptons Quarks	u	c	t	$\gamma$	H
	d	s	b	g	
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Z	
	e	$\mu$	$\tau$	W	
	2 <sup>e</sup> famille			Forces	

# Les trois générations

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



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

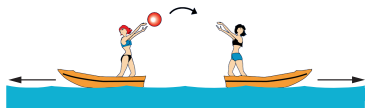
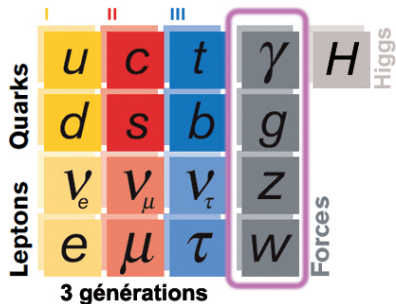
# Carte d'identité d'une particule

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

<b><math>c\bar{c}</math> MESONS</b>			
<b><math>\eta_c(1S)</math></b>		$J^G(J^{PC}) = 0^+(0^{-+})$	
Mass $m = 2980.5 \pm 1.2$ MeV ( $S = 1.7$ )		Full width $\Gamma = 27.4 \pm 2.9$ MeV ( $S = 2.0$ )	
<b><math>\eta_c(1S)</math> DECAY MODES</b>	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Confidence level	$\beta$ (MeV/c)
<b>Decays involving hadronic resonances</b>			
$\eta'(958)\pi\pi$	(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
$K^*(892) K^+ \pi^-$	(9.2 $\pm$ 3.4) $\times 10^{-3}$		1194
$K^{*0} K^+ \pi^-$	(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
$K^*(892) K^+ + c.c.$	< 1.20 %		1308
$f_2(1270)\eta$	< 1.1 %	90%	1343
$\omega\omega$	< 3.1 $\times 10^{-3}$	90%	1266
$\omega\phi$	< 1.7 $\times 10^{-3}$	90%	1183
$f_2(1270)f_2(1270)$	(7.6 $\pm$ $\frac{3.1}{2.4}$ ) $\times 10^{-3}$		771
$f_2(1270)f_2'(1525)$	(1.0 $\pm$ $\frac{0.4}{0.2}$ ) %		500
<b>Decays into stable hadrons</b>			
$K\bar{K}\pi$	(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
$A\bar{A}$	(1.04 $\pm$ 0.31) $\times 10^{-3}$		988
$K\bar{K}\eta$	< 3.1 %	90%	1263
$\pi^+ \pi^- p\bar{p}$	< 1.2 %	90%	1025
<b>Radiative decays</b>			
$\gamma\gamma$	(1.8 $\pm$ $\frac{0.6}{0.5}$ ) $\times 10^{-4}$		1490

résumé dans le Particle Data Book

# Les interactions fondamentales



- Gravitation  
étoiles, galaxies... [10<sup>-38</sup>]
  - Force faible (bosons  $W, Z$ )  
radioactivité  $\beta$  [10<sup>-5</sup>]
  - Electromagnétisme (photon  $\gamma$ )  
électricité, chimie... [10<sup>-3</sup>]
  - 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	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charme / charm	s étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ 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 <sup>re</sup> famille Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino Electron $\nu$ $l = -1, Q = 0, m = 2.33 \times 10^{-36} \text{kg}$	e électron $e$ $l = -1, Q = -1, m = 9.10938356 \times 10^{-31} \text{kg}$	u haut / up $u$ $l = 2/3, Q = 2/3, m = 0.00232 \text{kg}$	d bas / down $d$ $l = 1/3, Q = -1/3, m = 0.00334 \text{kg}$
2 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $\nu$ $l = -1, Q = 0, m = 2.33 \times 10^{-36} \text{kg}$	$\mu$ muon $\mu$ $l = -1, Q = -1, m = 1.883531627 \times 10^{-28} \text{kg}$	c charme / charm $c$ $l = 2/3, Q = 2/3, m = 1.27 \times 10^{-27} \text{kg}$	s étrange / strange $s$ $l = 1/3, Q = -1/3, m = 0.12 \times 10^{-27} \text{kg}$
3 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $\nu$ $l = -1, Q = 0, m = 2.33 \times 10^{-36} \text{kg}$	$\tau$ tau $\tau$ $l = -1, Q = -1, m = 1.77683847 \times 10^{-27} \text{kg}$	t top $t$ $l = 2/3, Q = 2/3, m = 173 \times 10^{-27} \text{kg}$	b bas / beauty / bottom $b$ $l = 1/3, Q = -1/3, m = 4.18 \times 10^{-27} \text{kg}$
<b>INTERACTIONS FONDAMENTALES</b>				
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	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron $\nu$ $\left( \begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=2.2 \times 10^{-36} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$e$ électron $e$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=9.109 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$u$ haut / up $u$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=6.000 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$d$ bas / down $d$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1/3 \\ m=6.000 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{matrix} \right)$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $\nu$ $\left( \begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=2.2 \times 10^{-36} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$\mu$ muon $\mu$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=1.88 \times 10^{-28} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$c$ charme / charm $c$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=1.3 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$s$ étrange / strange $s$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1/3 \\ m=1.2 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{matrix} \right)$
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $\nu$ $\left( \begin{matrix} I=0 \\ Q=0 \\ m=2.2 \times 10^{-36} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$\tau$ tau $\tau$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1 \\ m=1.78 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$t$ top $t$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=2/3 \\ m=1.7 \times 10^{-25} \text{ kg} \end{matrix} \right)$	$b$ bas / beauty / bottom $b$ $\left( \begin{matrix} I=1/2 \\ Q=-1/3 \\ m=4.2 \times 10^{-26} \text{ kg} \end{matrix} \right)$
<b>INTERACTIONS FONDAMENTALES</b>				
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-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	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino Electron $\nu$ <small><math>\tau = 0</math> <math>Q = 0</math> <math>m = 2.33 \times 10^{-36}</math> kg</small>	$e$ électron $e$ <small><math>\tau = 2.43 \times 10^{-25}</math> s <math>Q = -1</math> <math>m = 9.10938356 \times 10^{-31}</math> kg</small>	$u$ haut / up $u$ <small><math>\tau = 3 \times 10^{-25}</math> s <math>Q = 2/3</math> <math>m = 4.18 \times 10^{-31}</math> kg</small>	$d$ bas / down $d$ <small><math>\tau = 1.5 \times 10^{-25}</math> s <math>Q = -1/3</math> <math>m = 4.18 \times 10^{-31}</math> kg</small>
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $\nu$ <small><math>\tau = 2.2 \times 10^{-6}</math> s <math>Q = 0</math> <math>m = 1.68 \times 10^{-28}</math> kg</small>	$\mu$ muon $\mu$ <small><math>\tau = 2.2 \times 10^{-6}</math> s <math>Q = -1</math> <math>m = 1.88 \times 10^{-28}</math> kg</small>	$c$ charme / charm $c$ <small><math>\tau = 3.1 \times 10^{-13}</math> s <math>Q = 2/3</math> <math>m = 1.38 \times 10^{-27}</math> kg</small>	$s$ étrange / strange $s$ <small><math>\tau = 3.1 \times 10^{-13}</math> s <math>Q = -1/3</math> <math>m = 1.38 \times 10^{-27}</math> kg</small>
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $\nu$ <small><math>\tau = 8.7 \times 10^{-11}</math> s <math>Q = 0</math> <math>m = 1.77 \times 10^{-27}</math> kg</small>	$\tau$ tau $\tau$ <small><math>\tau = 2.9 \times 10^{-13}</math> s <math>Q = -1</math> <math>m = 1.77 \times 10^{-27}</math> kg</small>	$t$ top $t$ <small><math>\tau = 3.1 \times 10^{-13}</math> s <math>Q = 2/3</math> <math>m = 1.77 \times 10^{-27}</math> kg</small>	$b$ beau / beauty / bottom $b$ <small><math>\tau = 3.1 \times 10^{-13}</math> s <math>Q = -1/3</math> <math>m = 1.77 \times 10^{-27}</math> kg</small>
<b>INTERACTIONS FONDAMENTALES</b> portée 10 <sup>-17</sup> m infinie 10 <sup>-15</sup> m infinie	Interaction faible Interaction électromagnétique Interaction forte Gravitation			

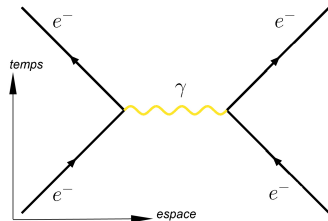
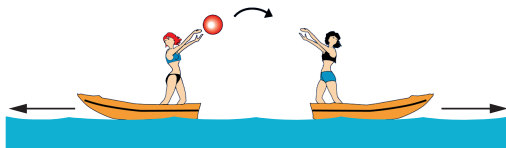
Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

... 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  $\beta$ )

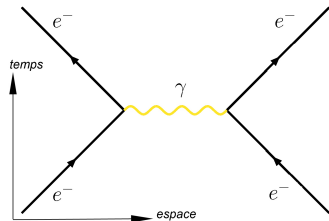
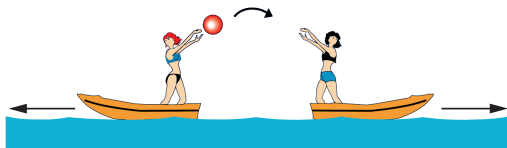
# Interaction électromagnétique

- 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

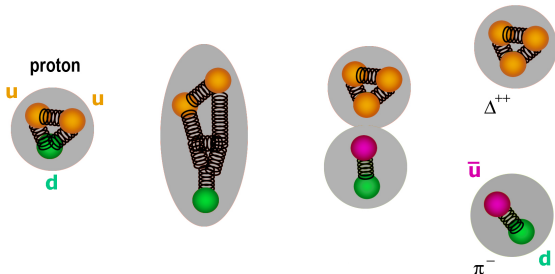
- Boson médiateur : **photon** de masse nulle
- Interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand  $r$ , potentiel  $V(r) \sim 1/r$  de portée infinie



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

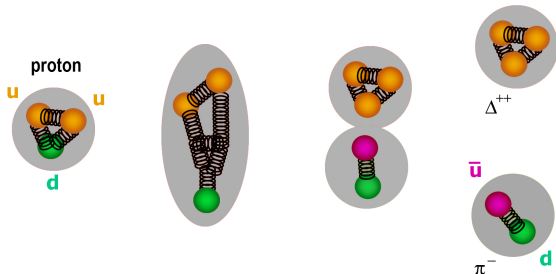
# Interaction forte

- 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

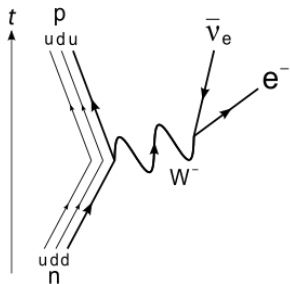


## Interaction faible

- 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  $10^{-17} m$

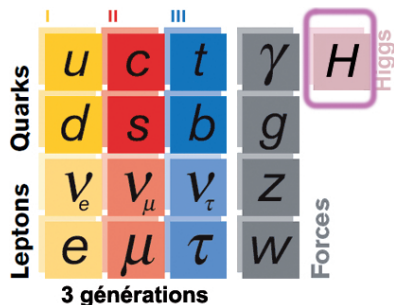


- Portée **subatomique**, pas d'état lié
- Désintégrations, en particulier désintégration nucléaire  $\beta$
- ... via un boson  $W^\pm$  impliquant ( $u, d$ ) et/ou ( $e, \nu_e$ )
- ... ou leurs copies plus lourdes des autres familles
- Certains bosons médiateurs ( $W^\pm$ ) chargés électriquement

# Le boson $H$

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

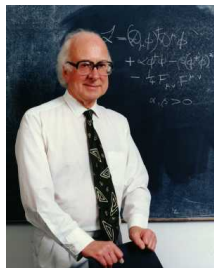
- Indice de réfraction  $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité  $c_{\text{vide}}$
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement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



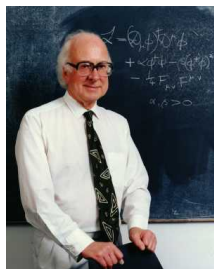
## Problème similaire dans le Modèle Standard

- 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  $c_{\text{vide}}$
- ... 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

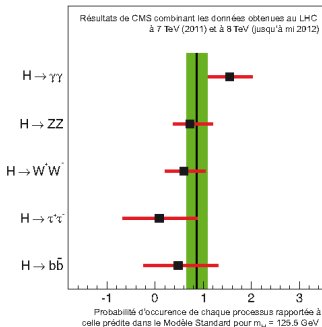
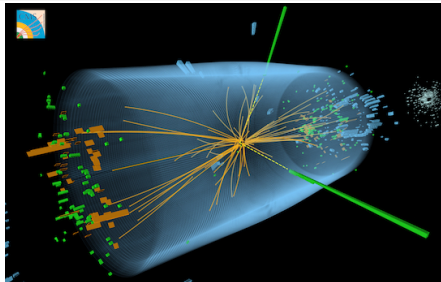
- description relativiste et quantique des particules élémentaires
- particule = excitation d'un champ (quantique)
- qui se propage comme une vague se déplaçant sur la mer



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



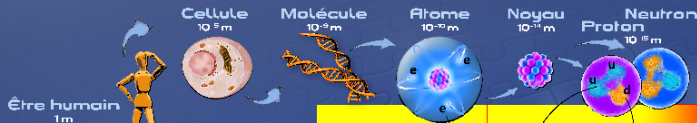
# Champagne pour le LHC



- 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  
10<sup>7</sup> m

Soleil  
10<sup>9</sup> m

Galaxie  
10<sup>21</sup> m

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

## INTERACTIONS FONDAMENTALES

portée	Interaction	Bosons
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup> Défini par les p <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> certains neutrons instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$ Force électro, magnétique, cohésion des atomes et des molécules, chimie
10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte	Gluons g Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	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 isolée ou en combinaison avec d'autres qui impliquent en particulier les photons.  
 = à grande échelle: la gravitation, les vents, les courants de gaz, les marées, les tsunamis et les météores sont les conséquences de l'action de ces interactions électromagnétiques, qui est à la production de lumière.



Antiproton

## ANTIMATIÈRE

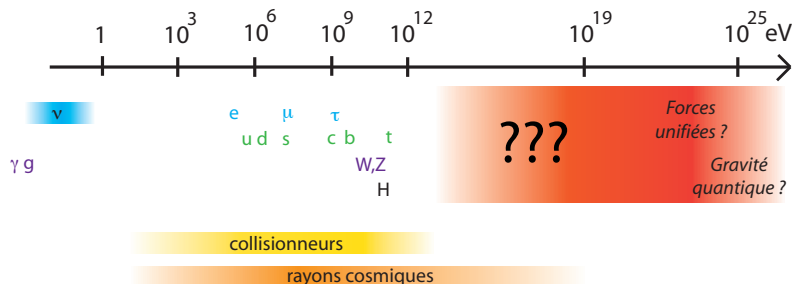
A chaque particule est associée une antiparticule. Les antiparticules ont la même masse, mais des charges opposées.

# Quelques questions en suspens

# Les limites du Modèle Standard

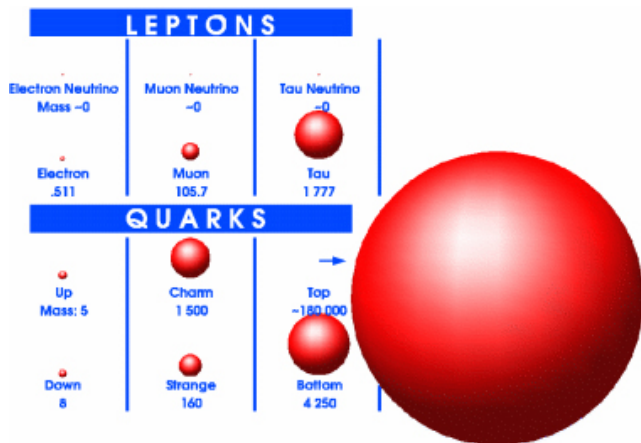
Modèle Standard reproduit très bien l'expérience (y compris pour le boson  $H$ ), mais pas parfaitement satisfaisant

- 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

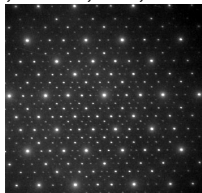
*Boson de Higgs responsable de la masse des particules*

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

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

Élémentaire

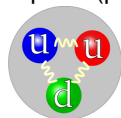
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

Composite

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



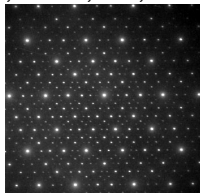
Masse des quarks (Higgs,  $\sim 1\%$ ) + E  
de "liaison" (inter. forte,  $\sim 99\%$ )

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

## Champ de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

### Élémentaire

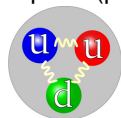
électron, muon, tau, neutrinos...



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)

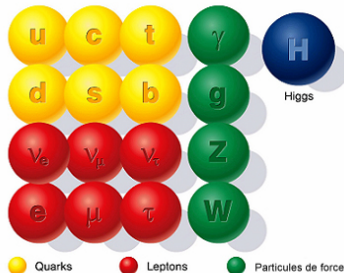
Expliquer la masse des particules composites est aussi un défi !



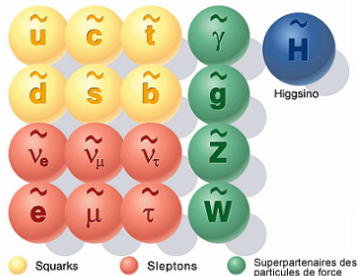
# Au-delà du Modèle Standard

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

## Particules du Modèle Standard

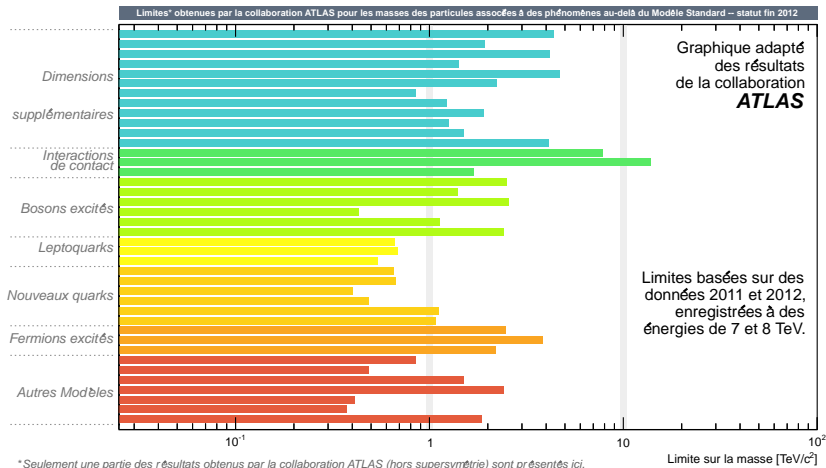


## Particules supersymétriques



- 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

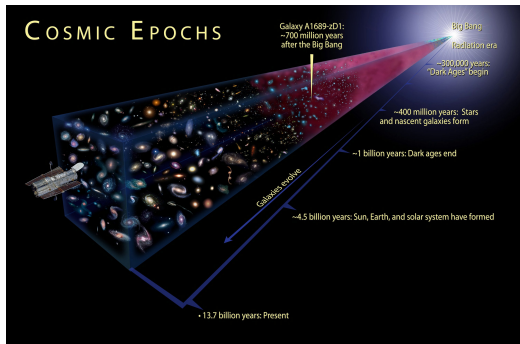
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- 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 ?

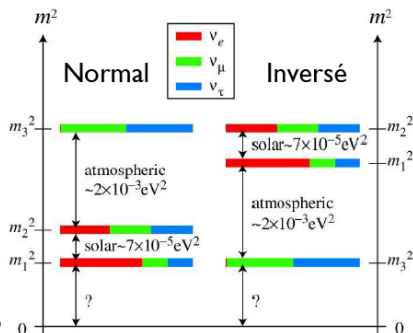
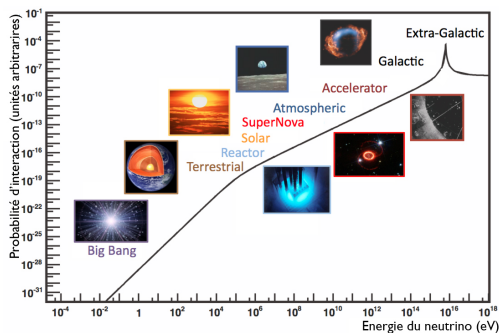
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

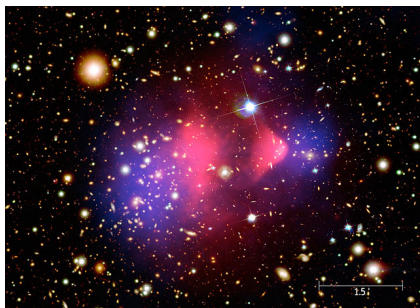
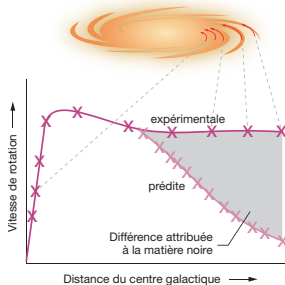
# Les neutrinos

## 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 ?



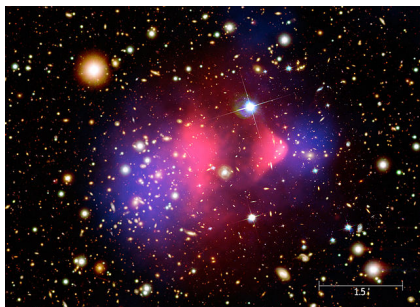
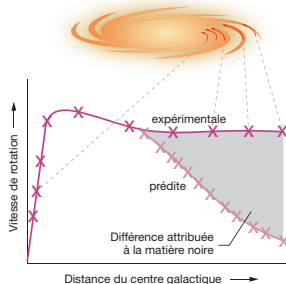
# La matière noire



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)

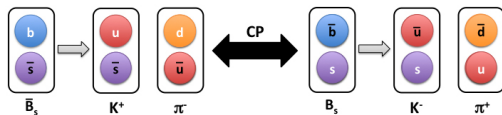
## Matière "noire"

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

# Asymétrie matière-antimatière

## Collisionneurs

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

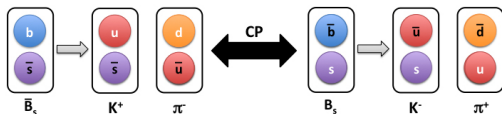




# Asymétrie matière-antimatière

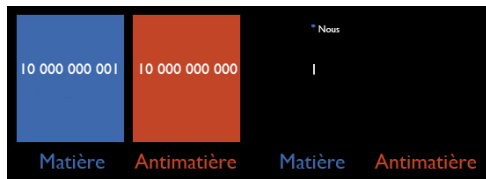
## Collisionneurs

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



## Cosmologie

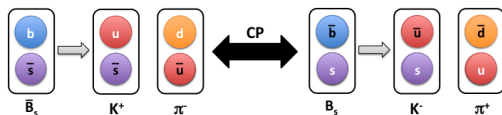
- Big bang:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule
- Disparition de l'un au détriment de l'autre
- Asymétrie bien trop large pour Modèle Standard !



# Asymétrie matière-antimatière

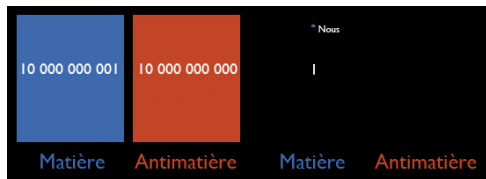
## Collisionneurs

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



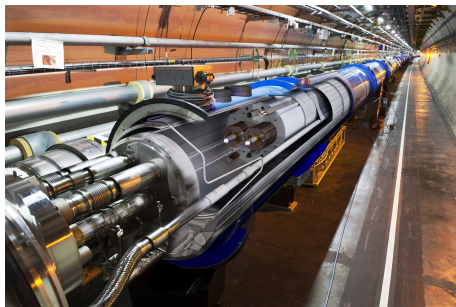
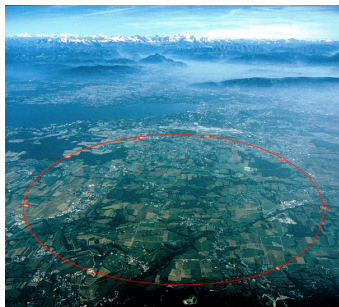
## Cosmologie

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



Nouveaux mécanismes d'asymétrie à des énergies plus élevées ?

En 2018...



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 ?

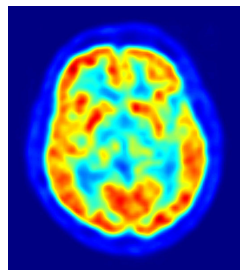
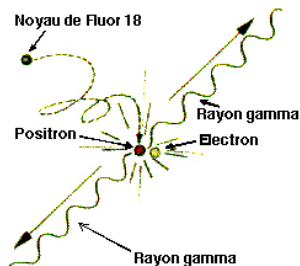
- En 2002, dizaines de milliers d'atomes d'anti-hydrogène au CERN
- soit 1/10 000 000 000 000 000 d'un ballon d'enfant !
- au rythme de production, plusieurs milliards d'années pour avoir de quoi faire une bombe !

## 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  $\beta^+$  ...
- ... 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 (entre 15 et 20% du coût total))

sur plus de vingt ans, personnel + matériel

- Accélérateur seul: 4 milliards d'euros
- Détecteurs et informatique: 1 milliard d'euros  
(CERN seul, entre 15 et 20% du coût total)  
(21 Etats-membres + participation d'autres états)

# Combien a coûté le LHC ?

Pour le CERN (entre 15 et 20% du coût total))

sur plus de vingt ans, personnel + matériel

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