

# D'Einstein au CERN, la quête de l'infiniment petit

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

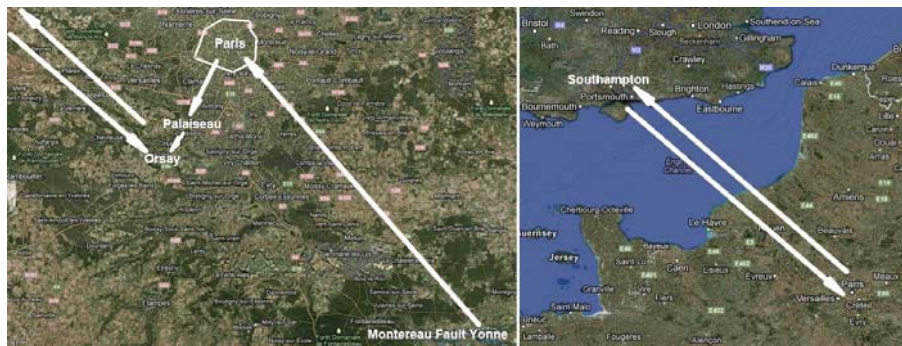
Laboratoire de Physique Théorique  
CNRS & Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

Université de Technologie de Troyes, 6 Novembre 2014



# Préambule

- 40 ans, directeur de recherche CNRS
- Thèse à Orsay (Institut de Physique Nucléaire)
- 2 ans de post-doctorat à Southampton (Grande-Bretagne)
- Actuellement, directeur du Lab. de Physique Théorique (Orsay)



Mots-clés: Physique des particules, Physique théorique,  
Physique des saveurs, Asymétrie particule/antiparticule, Vulgarisation

# D'une démarche analytique...

A hand-drawn periodic table of elements, showing atomic numbers and chemical symbols. The table is organized into groups and periods, with elements color-coded by groups. The elements are arranged in a standard periodic table layout, including the lanthanide and actinide series at the bottom.

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

... à une autre, un siècle plus tard

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

3 générations

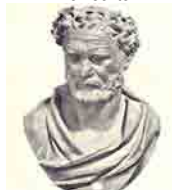
# Entrée en matière

# Physique des particules

Au fond, de quoi la matière est-elle constituée ?

- Antiquité (philosophe grec)  
air, eau, terre, feu ou atomes ?
- 18-19<sup>ème</sup> siècle (chimiste)  
molécules faites d'atomes
- 19-20<sup>ème</sup> siècle  
(physicien(ne) atomique & nucléaire)  
électrons et noyaux atomiques
- 21<sup>ème</sup> siècle  
(physicien(ne) des particules)  
particules élémentaires

Démocrite



Lavoisier



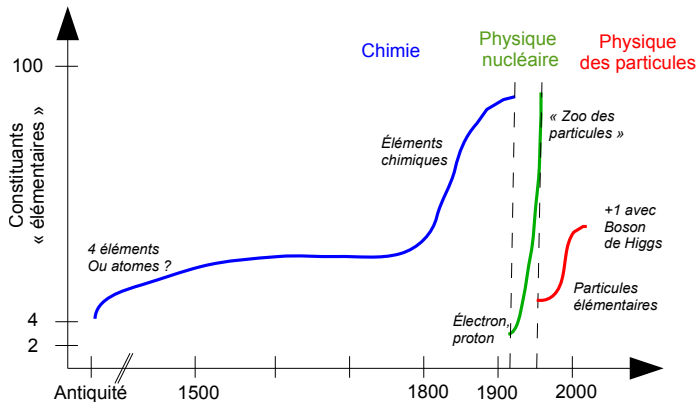
Rutherford



Weinberg

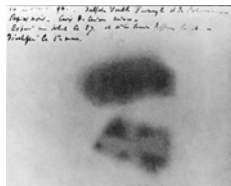


# A la bourse des particules élémentaires



- les "krachs" ne sont pas rares. . .
- . . . du fait de changements de paradigmes  
(évolution de la notion de constituants élémentaires)

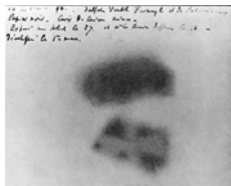
# Au tournant du 20ème siècle



1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement  
⇒ découverte de la **radioactivité**  
(H. Becquerel, P. et M. Curie)



# Au tournant du 20ème siècle



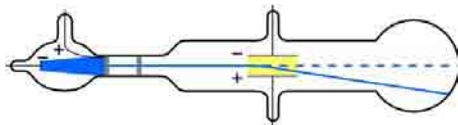
1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement

⇒ découverte de la **radioactivité**

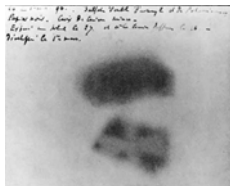
(H. Becquerel, P. et M. Curie)

1897: rayonnement cathodique infléchi par  $\vec{E}$

⇒ **l'électron** (J.J. Thomson)



# Au tournant du 20ème siècle



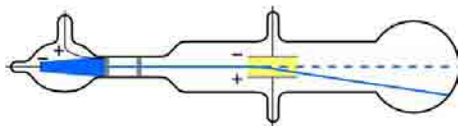
1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement

⇒ découverte de la **radioactivité**

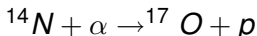
(H. Becquerel, P. et M. Curie)

1897: rayonnement cathodique infléchi par  $\vec{E}$

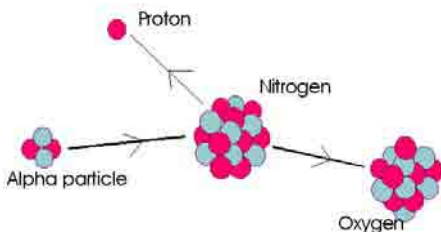
⇒ **l'électron** (J.J. Thomson)



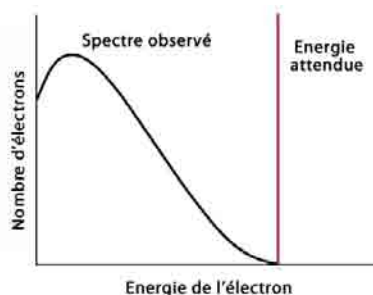
1917-1919: première réaction nucléaire



⇒ noyau d'**H** ou **proton**  
constituant de tous les noyaux (E. Rutherford)



# D'autres constituants de la matière



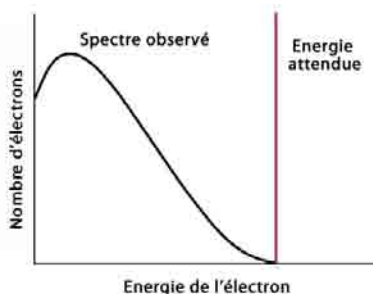
1930: désintégrations  $\beta$  ne semblent pas conserver  $E$ ... si  $X \rightarrow Y + e$

En fait  $X \rightarrow Y + e + \nu$ , et les  $e^-$  émis n'ont pas tous la même  $E$  !

$\Rightarrow$  **neutrino** imaginé par W. Pauli, décrit par E. Fermi

(finalement détecté en 1956)

# D'autres constituants de la matière



1930: désintégrations  $\beta$  ne semblent pas conserver  $E$ ... si  $X \rightarrow Y + e$

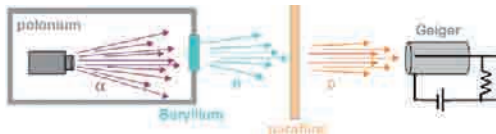
En fait  $X \rightarrow Y + e + \nu$ , et les  $e^-$  émis n'ont pas tous la même  $E$  !

$\Rightarrow$  **neutrino** imaginé par W. Pauli, décrit par E. Fermi

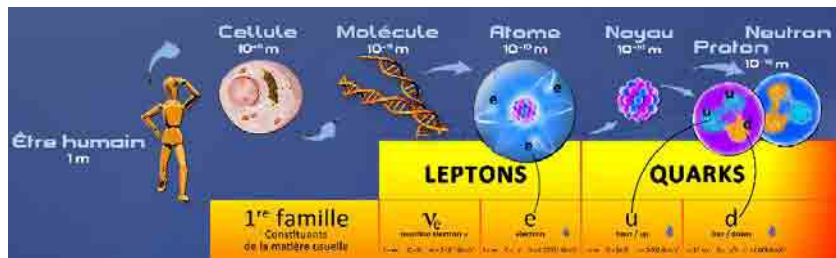
(finalement détecté en 1956)

1932: nouveau rayonnement inconnu, fait de particules de masse quasi-identique au proton, mais neutres

$\Rightarrow$  **neutron** (J. Chadwick, prédit par Rutherford en 1920)



# La matière ordinaire



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

	I	II	III		
Leptons	Quarks	u	c	t	γ
		d	s	b	g
		ν <sub>e</sub>	ν <sub>μ</sub>	ν <sub>τ</sub>	Z
		e	μ	τ	W
		3 générations			Forces

# Entre temps, sur le plan 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 !

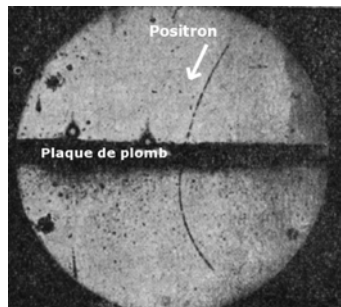
# Des nouvelles de l'espace



Anderson (1932)

- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre

# Des nouvelles de l'espace

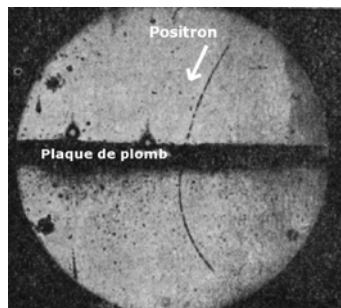


## Anderson (1932)

- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre
- Cliché de chambre à brouillard, pour visualiser particules chargées +  $\vec{B}$
- Même masse qu'un électron, mais charge électrique opposée : **positron**



# Des nouvelles de l'espace



## Anderson (1932)

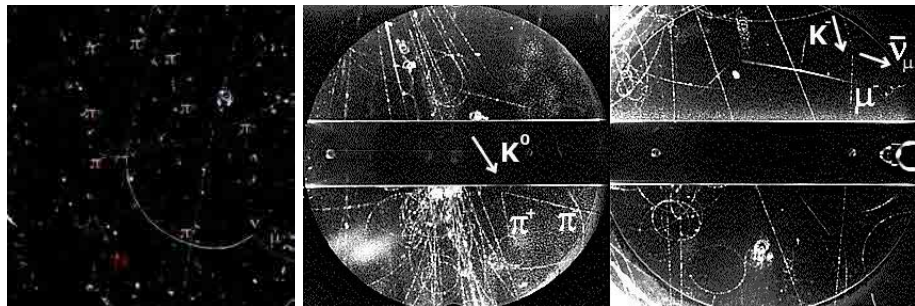
- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre
- Cliché de chambre à brouillard, pour visualiser particules chargées +  $\vec{B}$
- Même masse qu'un électron, mais charge électrique opposée : **positron**

## Dirac (1928)

- Equation pour décrire l'électron: Mécanique Quantique + Relativité restreinte
- Solutions supplémentaires, inattendues, vues comme **anti-particule de l'électron**



# Qui a commandé ça ?



Clichés de rayons cosmiques dans des chambres à brouillard

- 1937: muon  $\mu^-$  (sorte d'électron massif et instable)
- 1947: pions  $\pi$ , particules étranges  $K, \Lambda^0$

I. Rabi à propos du muon : “Who ordered that ?”

# Les adversaires réconciliés

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



# Les adversaires réconciliés

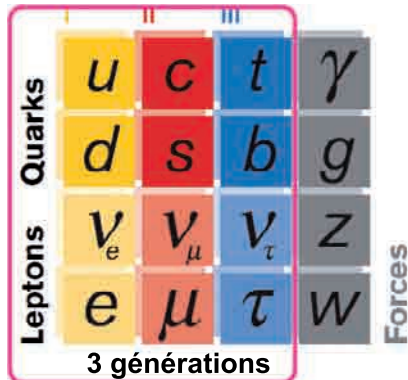
- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant,  $E$  suffisamment élevée pour des effets
  - Relativiste:  $E = mc^2$ , équivalence entre énergie et masse
  - Quantique: envisager tous les chemins, même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



L'énergie des collisions ne sert plus à casser en sous-constituants  
mais à **créer de nouvelles particules** (paires particule-antiparticule)

# Les trois générations

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



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

# Les forces fondamentales

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

3 générations

Forces



- 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 $\nu$	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 $\nu$	$\mu$ 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 $\nu$	$\tau$ tau	t top	b bottom / beauty / bottom
<b>INTERACTIONS FONDAMENTALES</b>				
<b>PORTÉE</b>				
$10^{-17}$ 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	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électronique $\nu$	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 $\nu$	$\mu$ 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 $\nu$	$\tau$ tau	t top	b bas / beauty / bottom
<b>INTERACTIONS FONDAMENTALES</b>				
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible			
infinie	Interaction électromagnétique			
10 <sup>-15</sup> 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 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 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 bas / beauty / bottom
<b>INTERACTIONS FONDAMENTALES</b>				
$10^{-17}$ m	Interaction faible			
infinie	Interaction électromagnétique			
$10^{-15}$ m	Interaction forte			
infinie	Gravitation			

Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

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

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

# 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 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 / beauty / bottom

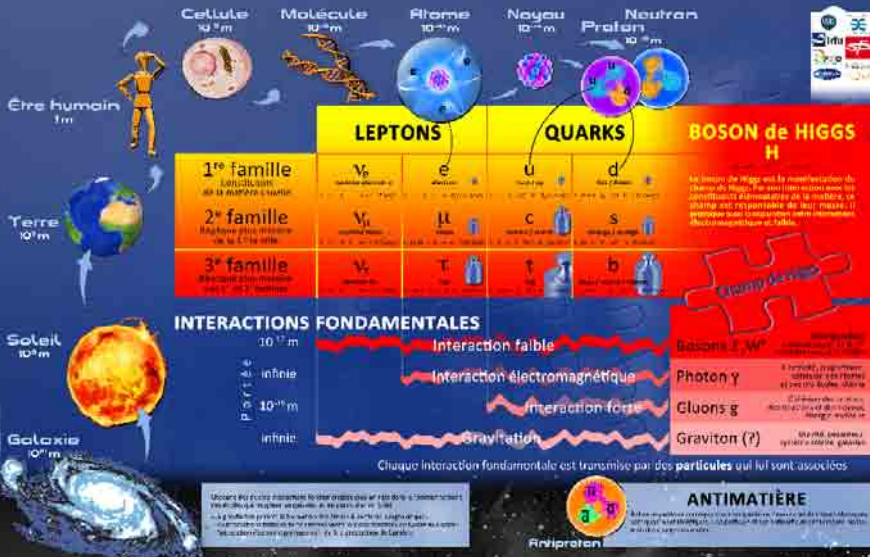
	INTERACTIONS FONDAMENTALES	
PORTÉE	$10^{-17}$ m	Interaction faible
	infinie	Interaction électromagnétique
	$10^{-15}$ m	Interaction forte
	infinie	Gravitation

Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

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

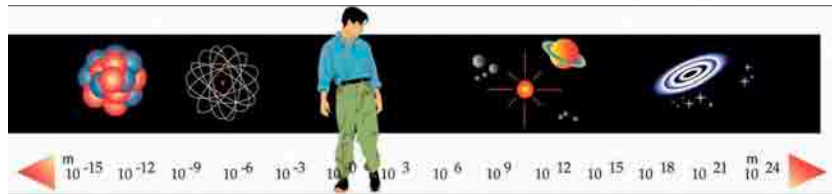
- **Electromagnétique**: particules chargées, atomes comme états liés électrons-noyau, interaction lumière-matière
- **Forte**: seulement pour les quarks, jamais libres, toujours confinés dans des particules composites (protons, neutrons, pions...)
- **Faible**: ne crée pas d'états liés, mais désintégrations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

# Composants élémentaires de la matière



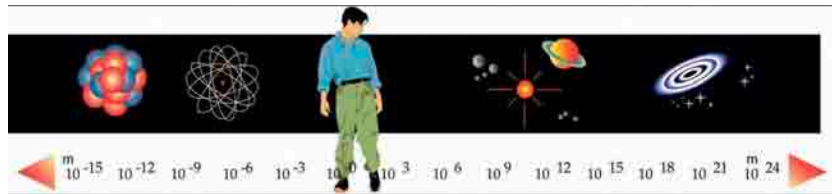
Voir les constituants de la matière

# Monter en énergie, diminuer en taille

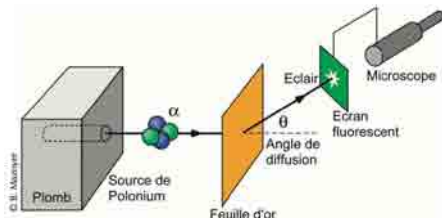


- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' $E$  de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X,  $\gamma$ )

# Monter en énergie, diminuer en taille



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



# Quelques ordres de grandeur

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

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

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

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

**Unités naturelles:** Cte de Planck  $\hbar$  = vitesse de la lumière  $c = 1$ :

$$\implies 1 \text{ eV} = 1 / (0.2 \mu\text{m}) = 10^{-36} \text{ kg} = 1 / (0.7 \text{ fs})$$

# “Voir” les particules élémentaires



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



# “Voir” les particules élémentaires



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

# Accélérateur de particules



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

# Accélérateur de particules

- un vrai périph' pour particules



# Accélérateur de particules

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

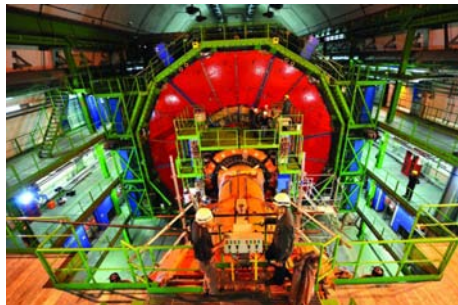


# Accélérateur de particules



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

# Accélérateur de particules



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

# Accélérateur de particules



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

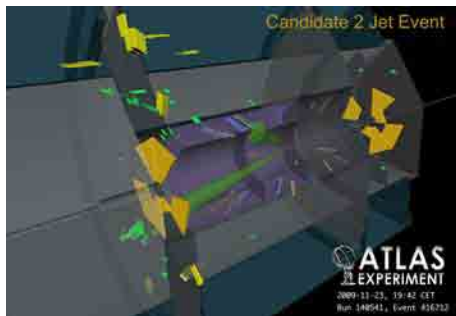
# Accélérateur de particules



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

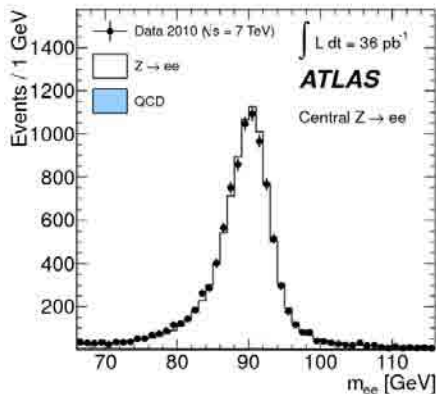


# Accélérateur de particules



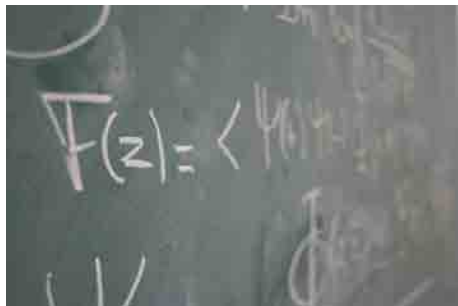
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

# Accélérateur de particules



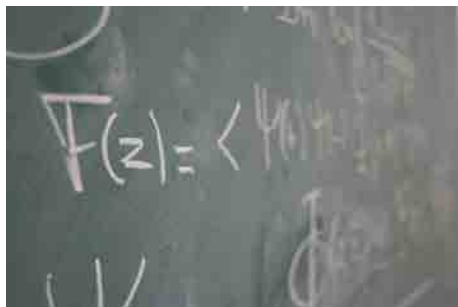
- un vrai périph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

# Accélérateur de particules



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

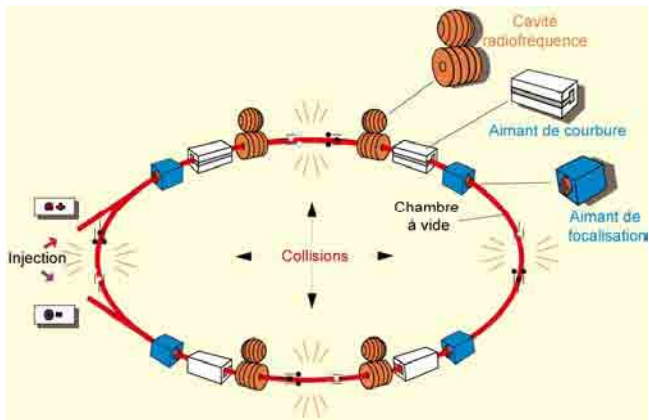
# Accélérateur de particules



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

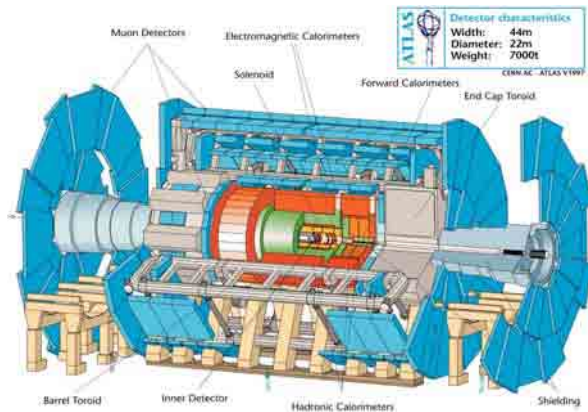
*Exemple: ATLAS au LHC*

# Accélérer



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

# Détecter

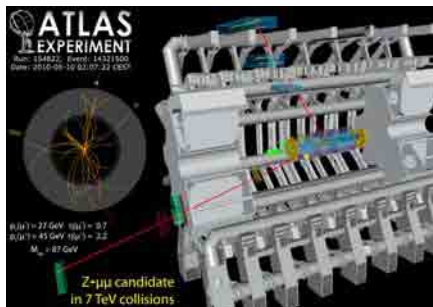


- Plusieurs couches, spécialisées selon le type de particules
- Liquide ou solide perturbé par le passage de particules
  - Trajectoire: perturbation du milieu (ionisation. . .) avec courbure  $\vec{B}$
  - Energie: dépôt d'énergie par interaction avec le détecteur

# Enregistrer

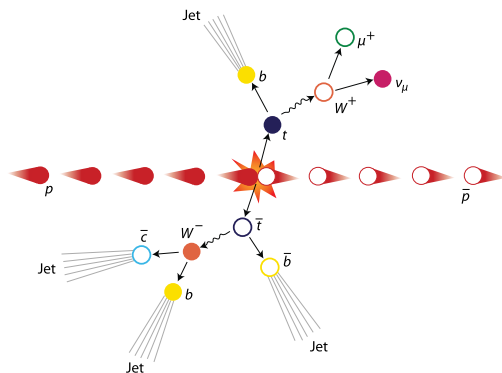
Près de **600 millions** de collisions par seconde dans les détecteurs

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



# Analyser

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



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

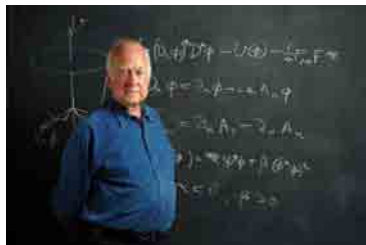
**Statistique** : Indispensable de répéter (très souvent) l'expérience



# Interpréter

Spécialisation importante entre théoriciens et expérimentateurs

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



Chez les théoriciens

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

# Quelques nombres autour du LHC (1)

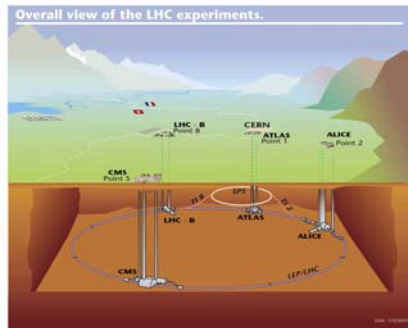
- Sur 27 km de circonférence, 2 faisceaux de protons
- déviés par plus de 1500 **aimants** (de 5 à 7m chacun)
- refroidis à  $-271^{\circ}\text{C}$  (plus froid que l'espace !): **supraconducteurs**



L'énergie emmagasinée dans les **aimants** correspond à

- L'énergie cinétique d'un Airbus A380 voyageant à 700 km/h
- Elle suffirait à faire fondre plusieurs tonnes de cuivre

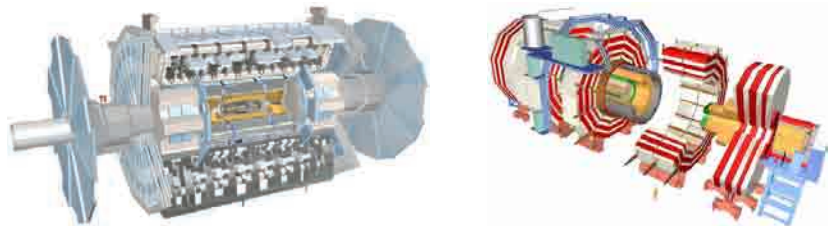
## Quelques nombres autour du LHC (2)



### Dans l'anneau du LHC

- Environ 3000 paquets contenant chacun 100 milliards de protons
- Chaque faisceau concentre l'énergie d'un TGV à 150 km/h
- 10 000 tours/s, 600 millions collisions/s, pendant 10h
- En faisceaux plus fins qu'un cheveu humain lors des collisions
- Les protons restants auront fait la distance Terre-Neptune (AR)

## Quelques nombres autour du LHC (3)



### ATLAS et CMS (2 des 4 expériences principales)

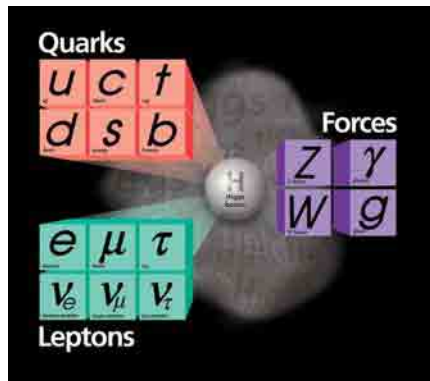
- 46 m × 25 m × 25 m (ATLAS) et 21 m × 15 m × 15 m (CMS)
- 7000 tonnes (ATLAS) et 12500 tonnes (CMS) [~ Tour Eiffel]
- Pour chacune, plusieurs milliers de scientifiques venant d'une quarantaine de pays [le CERN est une vraie ruche !]
- Mais aussi beaucoup d'ingénieurs et de techniciens (cryogénie, électronique, informatique, topographie...)

# Le boson de Higgs

# La dernière pièce du Modèle Standard

Vision actuelle de la physique des particules, très bien testée

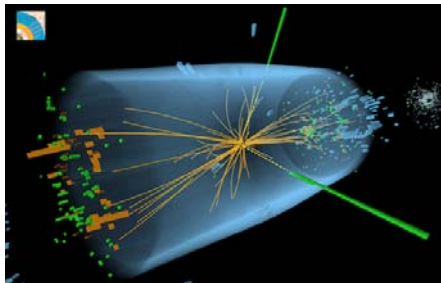
- depuis plus d'un siècle: électromagnétisme, électron, photon
- 1960-70: interaction forte, quarks
- 1990-2010: interaction faible, neutrinos



Un ingrédient  
du Modèle Standard  
encore à étudier,  
prédit en 1964

le boson de Higgs

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



Une nouvelle particule a été observée. . .  
et plus on l'étudie, plus elle ressemble au boson de Higgs !

# La chasse au Higgs (1)

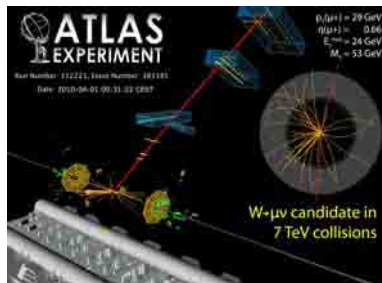
- 1984 : Premières études sur l'intérêt d'une telle machine
- 1994 : Construction du LHC et des détecteurs approuvée
- 1996 : Des accords de collaboration définissent les équipes de travail
- 2002-2007 : Aimants et détecteurs progressivement installés sous terre
- 2007-2008 : Les aimants sont refroidis (lentement)
- 10/09/2008 : Les premiers faisceaux de protons circulent dans l'anneau





## La chasse au Higgs (2)

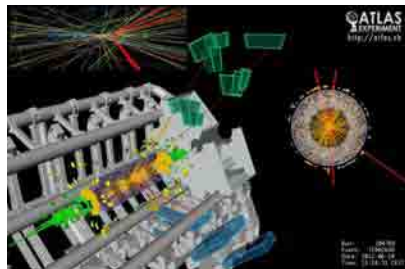
- 19/09/2008 : un défaut de connexion affecte certains aimants, ce qui les endommage gravement
- 20/11/2009 : les faisceaux de protons circulent à nouveau
- 23/11/2009 : premières collisions protons-protons au LHC
- 19/12/2009 : pause hivernale



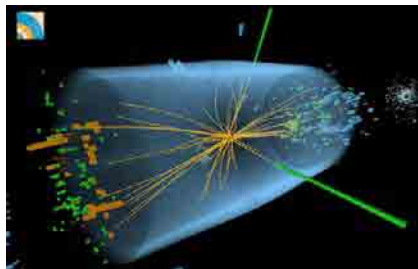
- Février 2010 : redémarrage du LHC à moitié de l'énergie prévue
- Été 2010 : observation des particules lourdes connues ( $W, Z, t$ )

# La chasse est finie ? (1)

- 4/7/12 : ATLAS et CMS annoncent au CERN la découverte d'une nouvelle particule !



$H \rightarrow 4\mu$  [ATLAS]

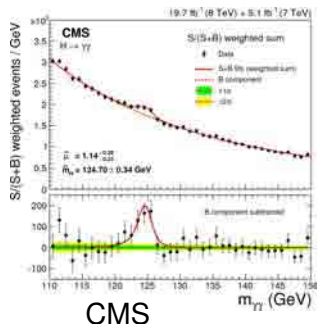
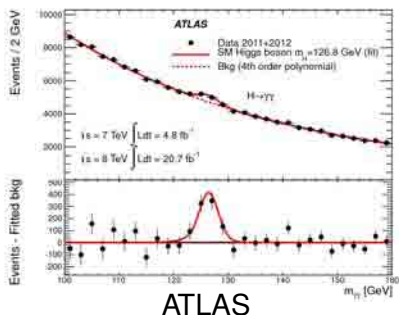


$H \rightarrow 2\gamma$  [CMS]

- Février 2013 : début arrêt de longue durée, prévu pour une mise à niveau de l'accélérateur et des détecteurs
- Début 2015 : redémarrage du LHC à l'énergie initialement prévue

# La chasse est finie ? (2)

ATLAS et CMS annoncent la découverte d'une nouvelle particule  
... ou plus exactement, un excès de certains évènements  
(par ex, 2 photons avec  $E$  donnée) dû à une nouvelle particule



- Masse (position du pic) et désintégrations observées (hauteur du pic) proches du boson de Higgs du Modèle Standard
- Reste à confirmer la nature de cette particule en l'étudiant

# Le mécanisme de Higgs

## Propagation de la lumière dans un milieu

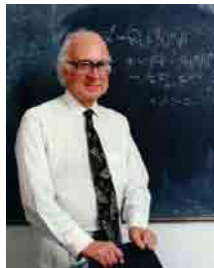
- Indice de réfraction  $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité  $c_{\text{vide}}$
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement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



# 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 !



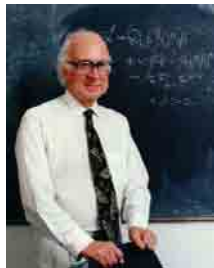
## Problème similaire dans le Modèle Standard

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

# Le mécanisme de Higgs

## 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 !

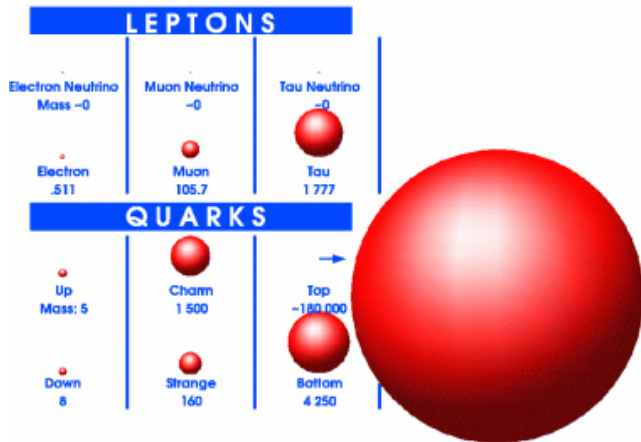


## Problème similaire dans le Modèle Standard

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

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

# Des masses très différentes



- Masses/interaction avec champ de Higgs a priori arbitraires
- Prennent des valeurs très différentes : pourquoi ?

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

*Boson de Higgs responsable de la masse des particules*

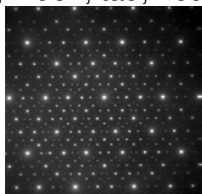


# De la masse oui, mais pas de toute la masse

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

## Élémentaire

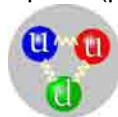
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

## Composite

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



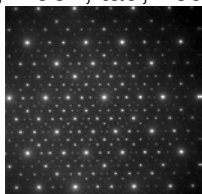
Masse des quarks (Higgs,  $\sim 1\%$ ) +  
E de "liaison" (inter. forte,  $\sim 99\%$ )

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

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

## Élémentaire

électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

## Composite

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



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

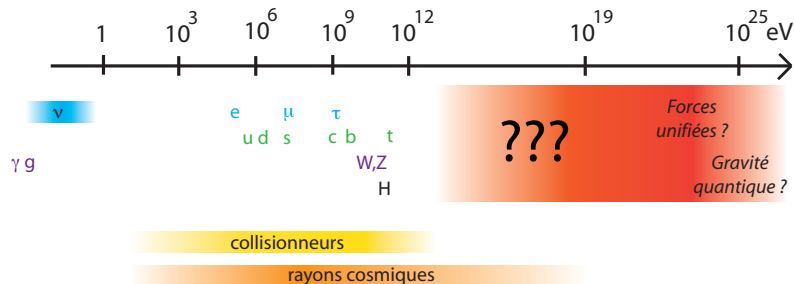
Energie de liaison :  $M_{\text{composite}} = \sum m_{\text{constituants}} - E_{\text{liaison}}$

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

Quo vadis ?

# Les limites du Modèle Standard

- Masse et propriétés du boson de Higgs en parfait accord avec les attentes basées sur les expériences antérieures
- Chaque montée en énergie a donné lieu à des découvertes: sous-structure, nouvelle interaction, nouvelles particules

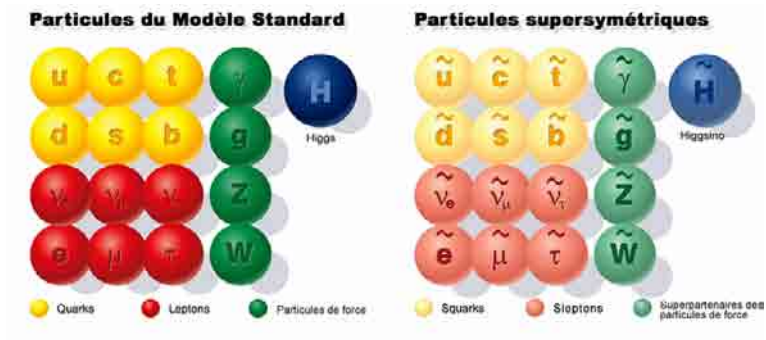


Modèle Standard très efficace, mais pas parfaitement satisfaisant

- 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 ?

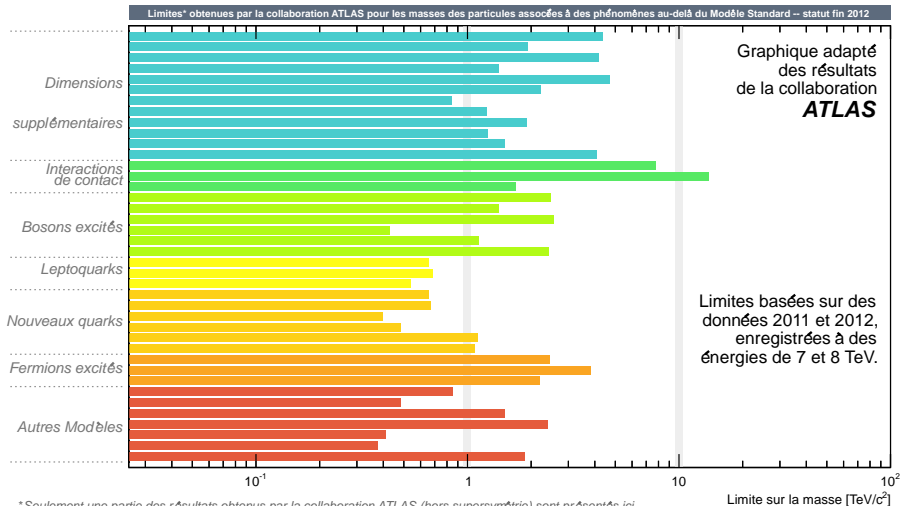
# Au-delà du Modèle Standard

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



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

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



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

- Chercher des paires de nouvelles particules-antiparticules
- Collisions au LHC 8 → 14 TeV en 2015 – de nouvelles particules ?

## De nouveaux alliés

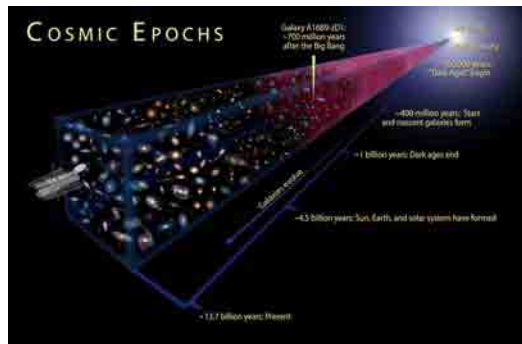
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

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

# De nouveaux alliés

Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

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



D'autres voies vers les très hautes énergies ?

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

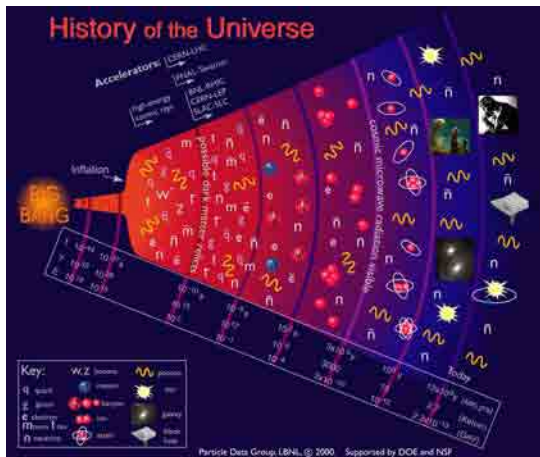
⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)



# De nouveaux alliés

Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

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



D'autres voies vers les très hautes énergies ?

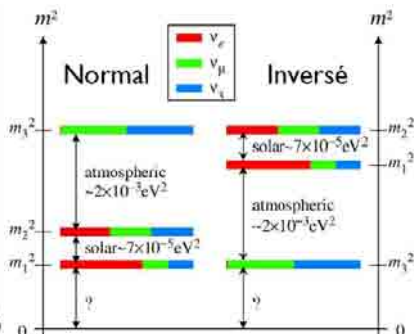
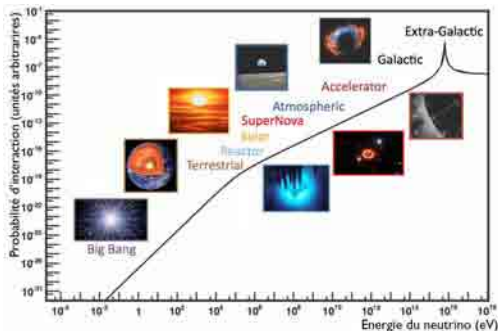
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

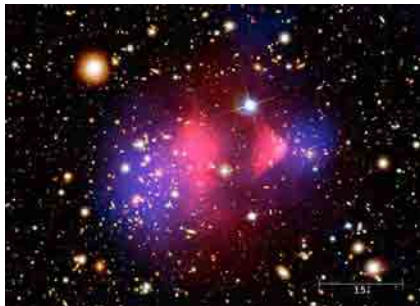
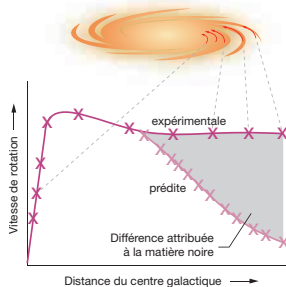
# Les neutrinos

Particules encore mal connues du Modèle Standard

- Neutrinos venant de supernovae, Soleil, rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère, réacteurs nucléaires, accélérateurs
- Oscillation de neutrinos avec différents  $L$ : différences de masse très faibles, paramètres de mélange
- Echelle de masse ? Propre antiparticule ? Plus de 3 neutrinos ?



# Matière noire et nouvelle physique



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)

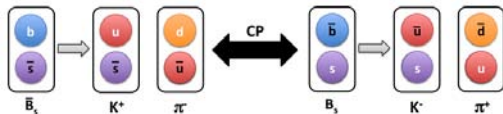
## Matière "noire"

- 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

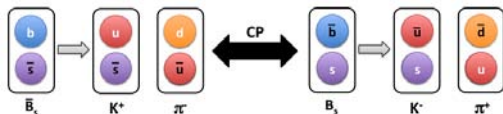
- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



# Asymétrie matière-antimatière

## Collisionneurs

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



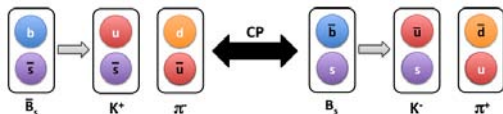
## Cosmologie

- 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 ?

Très bientôt...



Une partie des réponses se trouvera certainement lors de la prochaine collecte de données du LHC, pour les expérimentateurs comme pour les théoriciens !

# Les 60 ans du CERN

- De nombreuses manifestations: [cern60.web.cern.ch/fr](http://cern60.web.cern.ch/fr)
- Une expo virtuelle: [experience-cern360.fr](http://experience-cern360.fr)
- Une expo au Palais de la Découverte: Le grand collisionneur LHC
- Un film en salle: Particle Fever



APRÈS PARTICLE FEVER  
UNE AVENTURE HUMAINE VERS L'INFINIMENT PETIT



**PARTICLE FEVER**  
LA FIÈVRE DES PARTICULES

Partiscience | NY 11/11 | 11/11/11 | 11/11/11 | 11/11/11

APRÈS PARTICLE FEVER, LE GRAND COLLISIONNEUR LHC...  
LE 5 NOVEMBRE AU CINÉMA Er 7 Monde  
[www.jupiter-films.com](http://www.jupiter-films.com)

**LE GRAND COLLISIONNEUR LHC**  
Vivre la plus grande expérience scientifique de tous les temps.

**Experts en la matière**  
Regards sur le Cern



# L'école des deux infinis



- Sur [www.in2p3.fr](http://www.in2p3.fr), site de l'IN2P3 (institut du CNRS en charge de la physique des hautes énergies)
- Offre variée à destinations des lycéens et des enseignants
  - Conférences
  - Visites de laboratoires
  - Masterclasses
  - Outils pédagogiques
  - Stages de formation. . .
- Courriel: [ecole2infinis@in2p3.fr](mailto:ecole2infinis@in2p3.fr)

# Deux publications

## Élémentaire



<http://elementaire.lal.in2p3.fr/>

## Passeport pour les deux infinis



<http://www.passeport2i.fr/>