

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

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

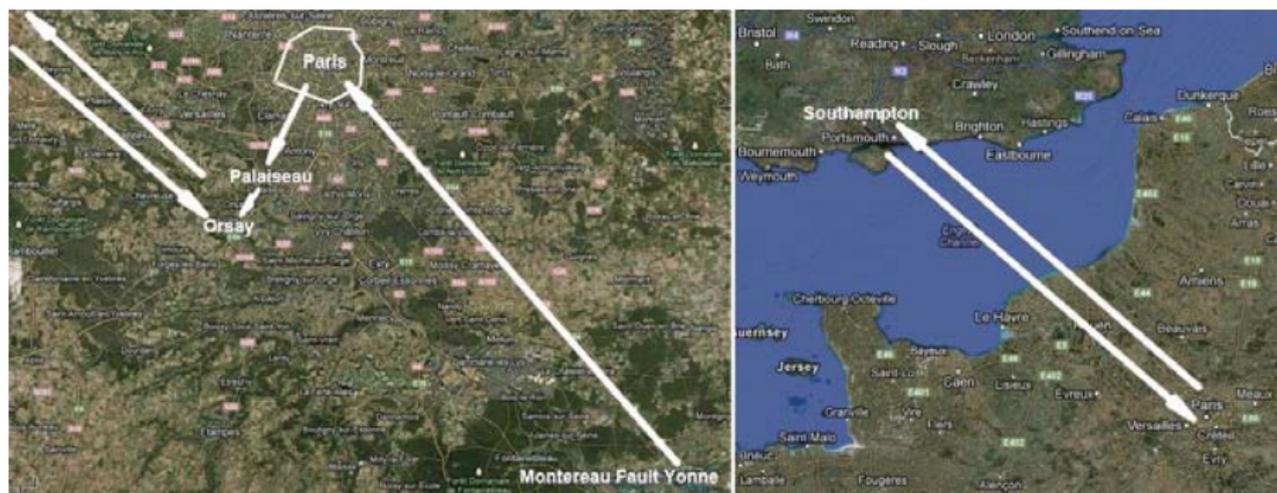
Laboratoire de Physique Théorique
CNRS & Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

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)



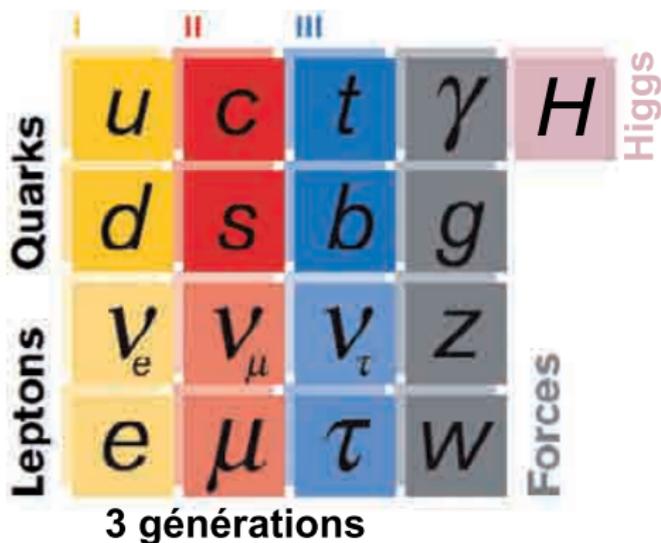
Mots-clés: Physique des particules, Physique théorique,
Physique des saveurs, Asymétrie particule/antiparticule, Vulgarisation

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 Lr	

... à une autre, un siècle plus tard



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^{ème} siècle (chimiste)
molécules faites d'atomes
- 19-20^{ème} siècle
(physicien(ne) atomique & nucléaire)
électrons et noyaux atomiques
- 21^{ème} siècle
(physicien(ne) des particules)
particules élémentaires

Démocrite



Lavoisier



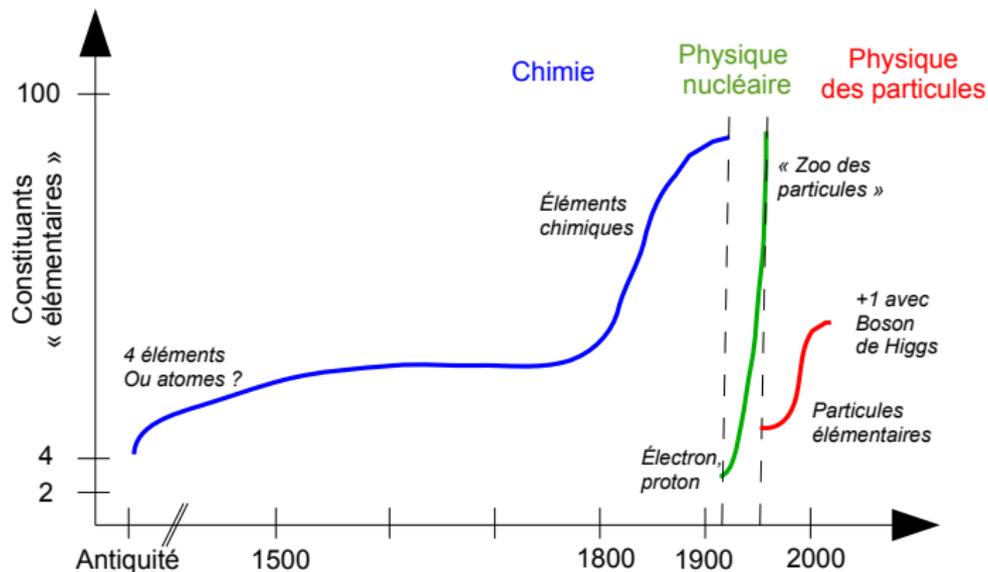
Rutherford



Weinberg

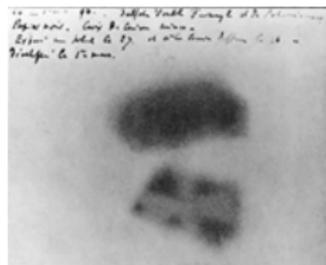


A la bourse des particules élémentaires



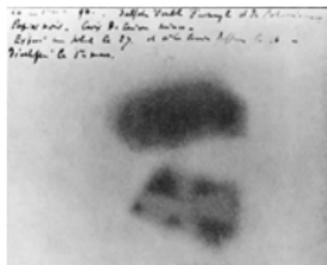
- les "krachs" ne sont pas rares...
- ... du fait de changements de paradigmes
(évolution de la notion de constituants élémentaires)

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

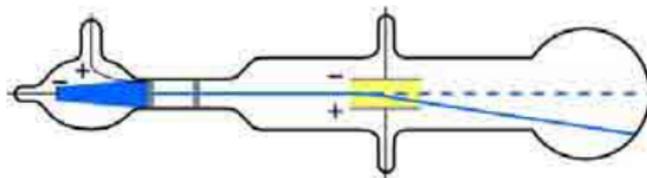
⇒ découverte de la **radioactivité**

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

1897: rayonnement

cathodique infléchi par \vec{E}

⇒ **l'électron** (J.J. Thomson)



Au tournant du 20ème siècle



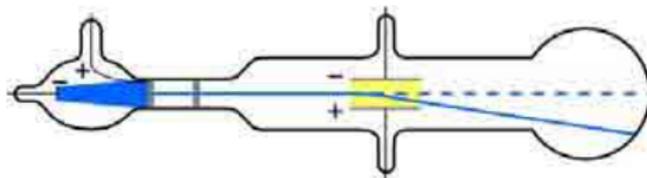
1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement

⇒ découverte de la **radioactivité**

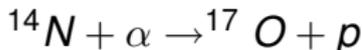
(H. Becquerel, P. et M. Curie)

1897: rayonnement cathodique infléchi par \vec{E}

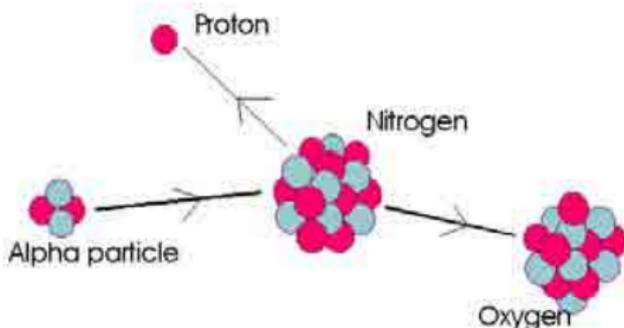
⇒ **l'électron** (J.J. Thomson)



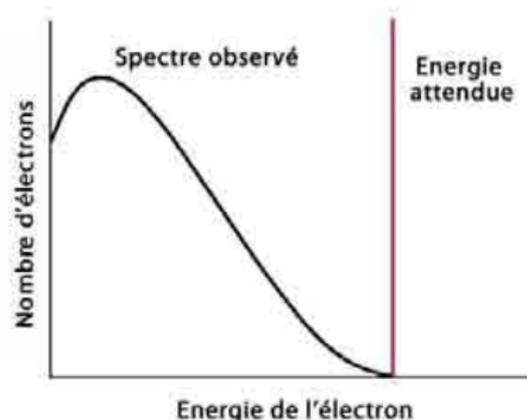
1917-1919: première réaction nucléaire



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



D'autres constituants de la matière



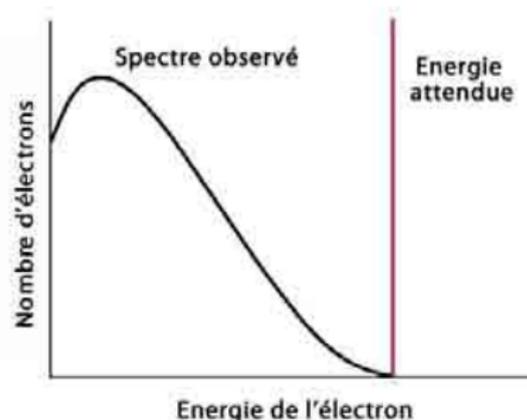
1930: désintégrations β ne semblent pas conserver E ... si $X \rightarrow Y + e$

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 β ne semblent pas conserver E ... si $X \rightarrow Y + e$

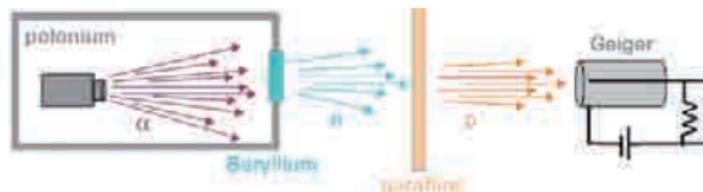
En fait $X \rightarrow Y + e + \nu$, et les e^- émis n'ont pas tous la même E !

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

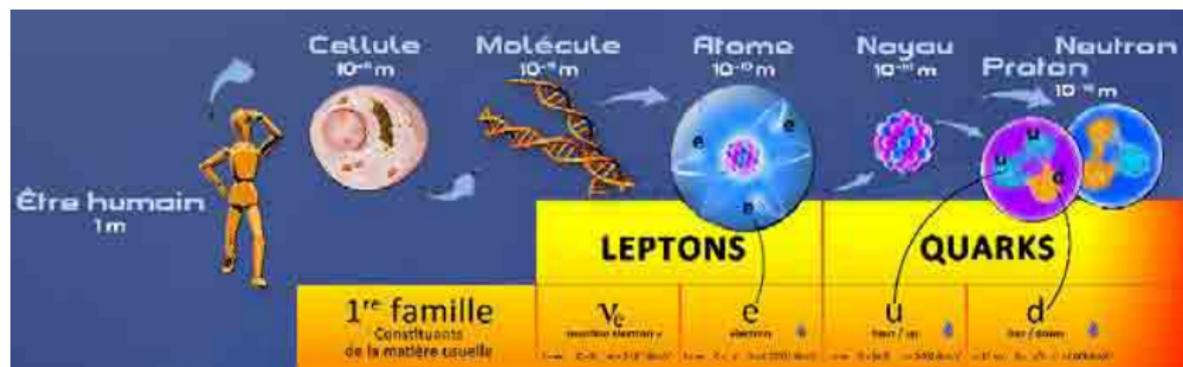
(finalement détecté en 1956)

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

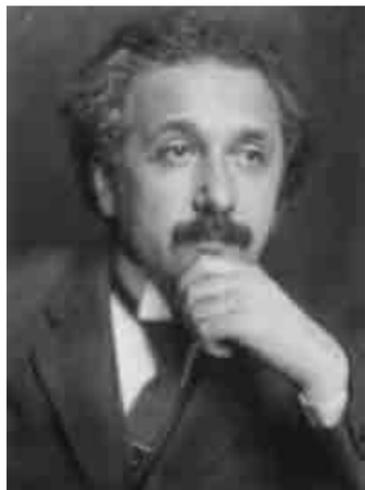


- Quarks: constituants des protons (uud) et neutrons (udd)
- Électrons: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives: $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$ (15 min)

	I	II	III		
Leptons	Quarks	u	c	t	γ
		d	s	b	g
		ν _e	ν _μ	ν _τ	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 !

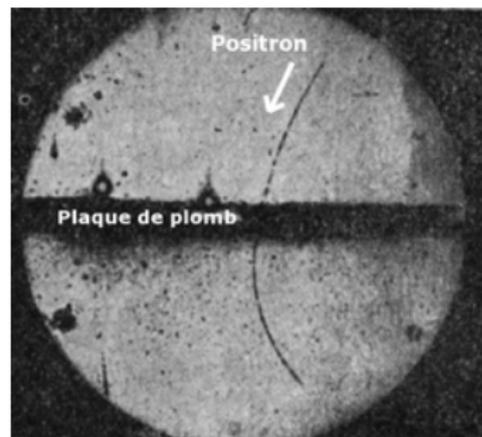
Des nouvelles de l'espace



Anderson (1932)

- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre

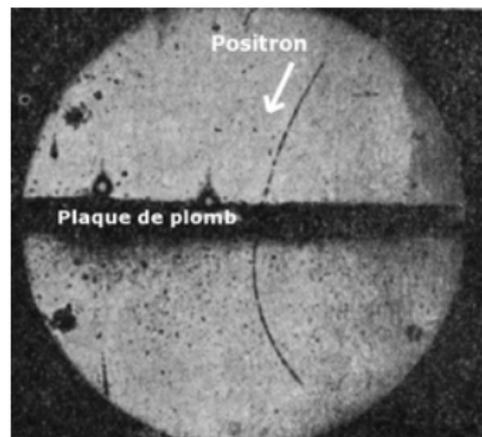
Des nouvelles de l'espace



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 μ^- (sorte d'électron massif et instable)
- 1947: pions π , particules étranges K , Λ^0

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

Les adversaires réconciliés

- Jusqu'à 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

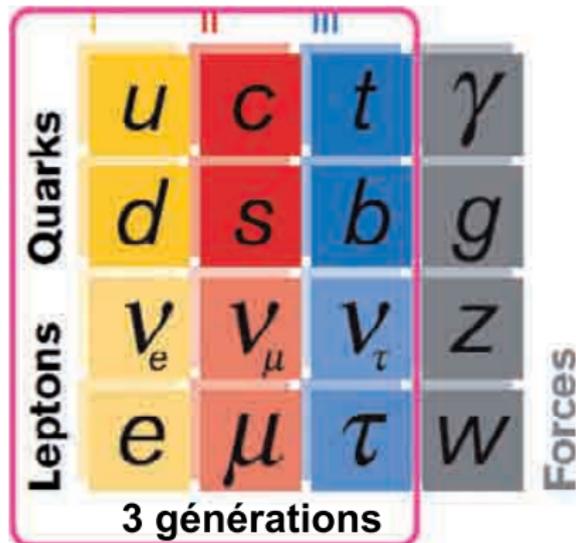
- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant, E suffisamment élevée pour des effets
 - Relativiste: $E = mc^2$, équivalence entre énergie et masse
 - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



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	γ
	d	s	b	g
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	e	μ	τ	W

3 générations

Forces



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

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique ν	e électron	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 charm / charm	s strange / 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
INTERACTIONS FONDAMENTALES				
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible			
infinie	Interaction électromagnétique			
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte			
infinie	Gravitation			

Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

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

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c 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 bas / beauty / bottom

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

Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

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

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

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique ν	e électron	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 charm / charm	s strange / 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
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...)

Trois interactions très différentes

	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c 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 bas / beauty / bottom

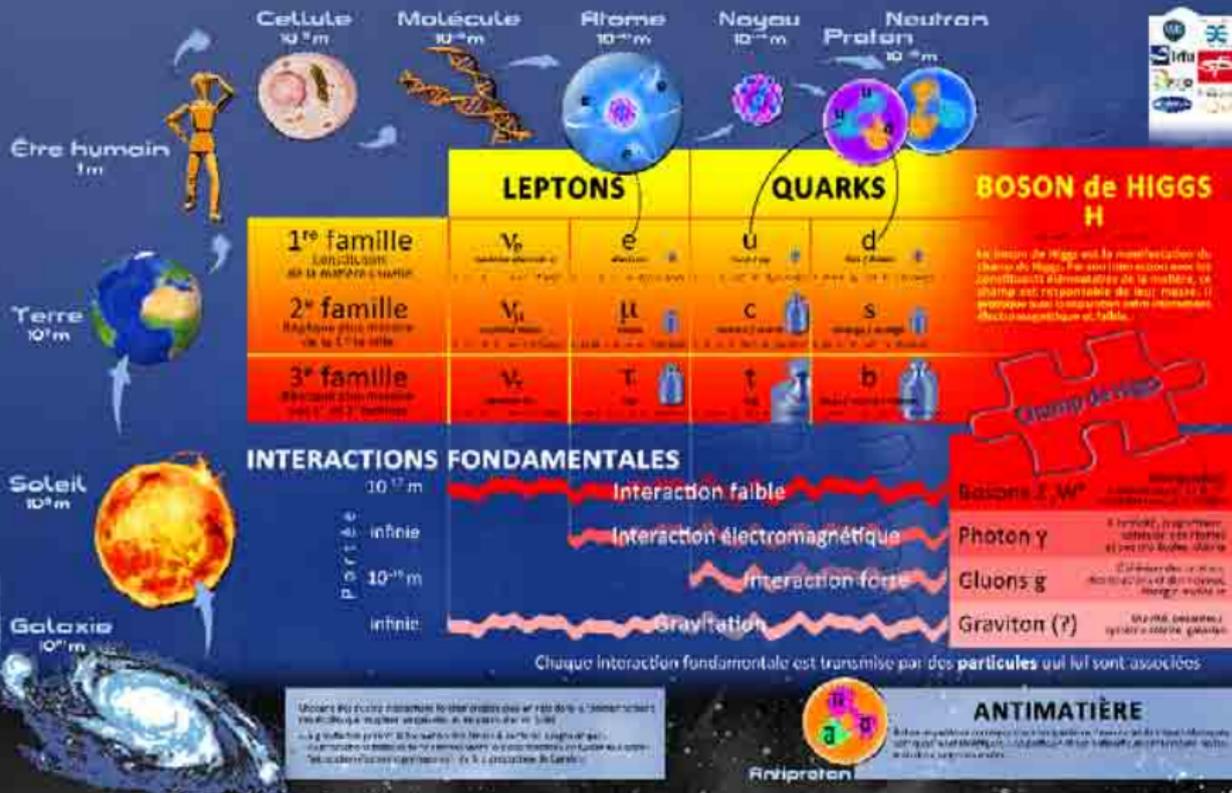
	INTERACTIONS FONDAMENTALES	
PORTÉE	10^{-17} m	Interaction faible
	infinie	Interaction électromagnétique
	10^{-15} m	Interaction forte
	infinie	Gravitation

Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

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

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

Composants élémentaires de la matière



Un anti-proton est composé de deux quarks up et d'un quark down. Un anti-neutrino électronique est composé de deux quarks up et d'un quark down. Un anti-neutrino muonique est composé de deux quarks up et d'un quark down. Un anti-neutrino taupin est composé de deux quarks up et d'un quark down.

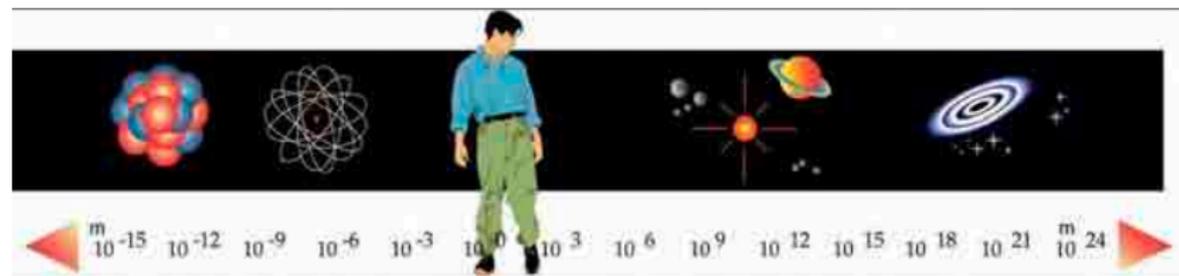


Antiproton

Un anti-neutrino électronique est composé de deux quarks up et d'un quark down. Un anti-neutrino muonique est composé de deux quarks up et d'un quark down. Un anti-neutrino taupin est composé de deux quarks up et d'un quark down.

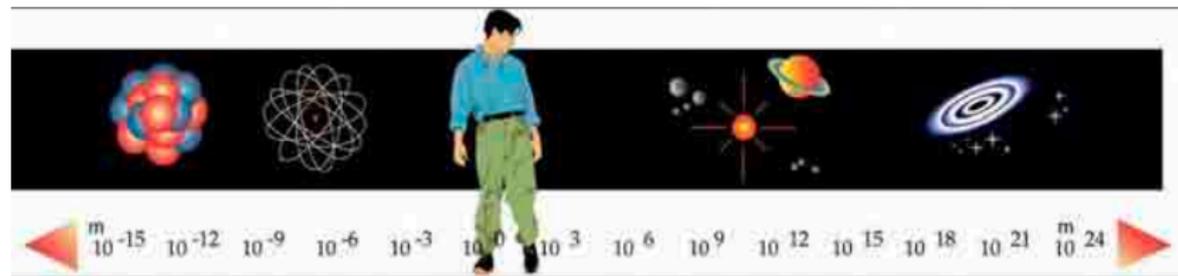
Voir les constituants de la matière

Monter en énergie, diminuer en taille

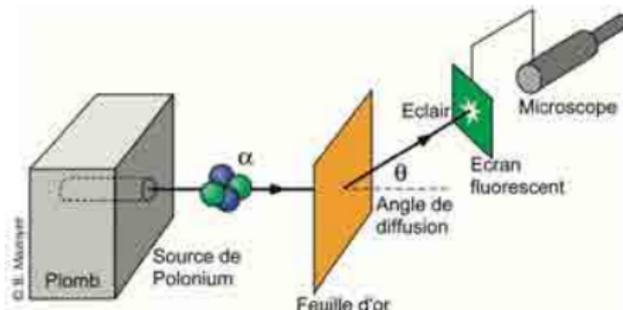


- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' E de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X, γ)

Monter en énergie, diminuer en taille



- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' E de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X, γ)
- ou d'autres projectiles déviés par constituants [en 1909, Geiger, Marsden, Rutherford "voient" le noyau avec α sur atome d'or]
- 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 (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

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

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 !

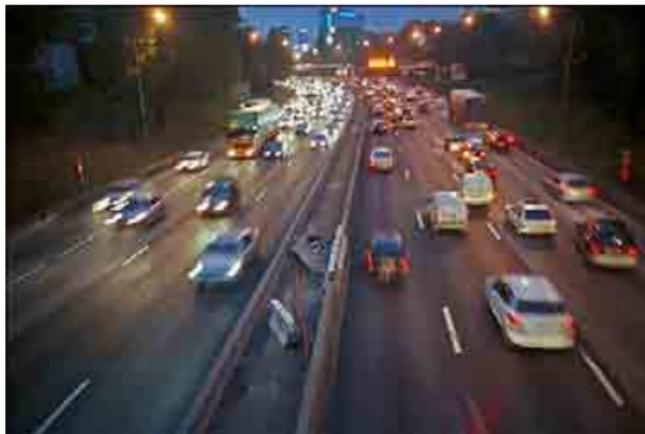
Accélérateur de particules



*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



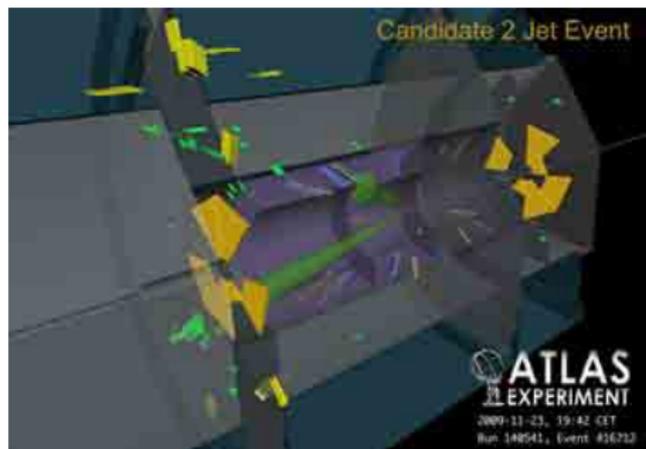
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

Accélérateur de particules



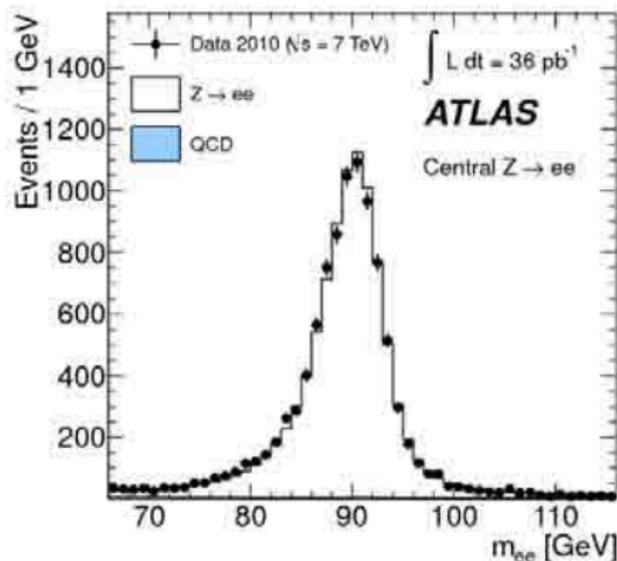
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

Accélérateur de particules



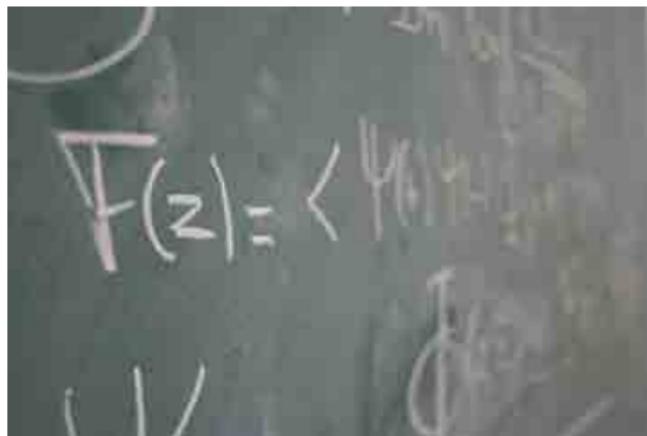
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

Accélérateur de particules



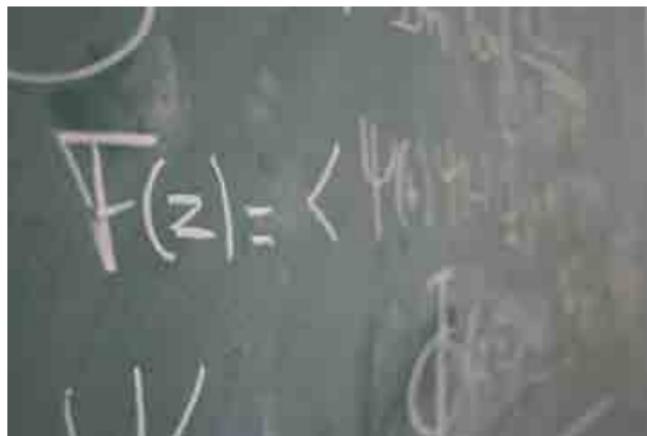
- un vrai périph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

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 !

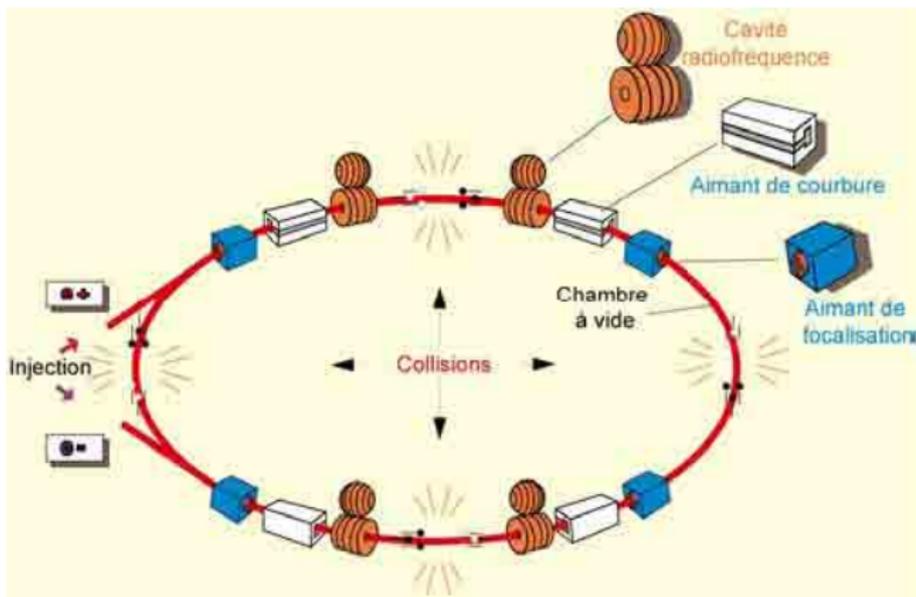
Accélérateur de particules



- 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 !

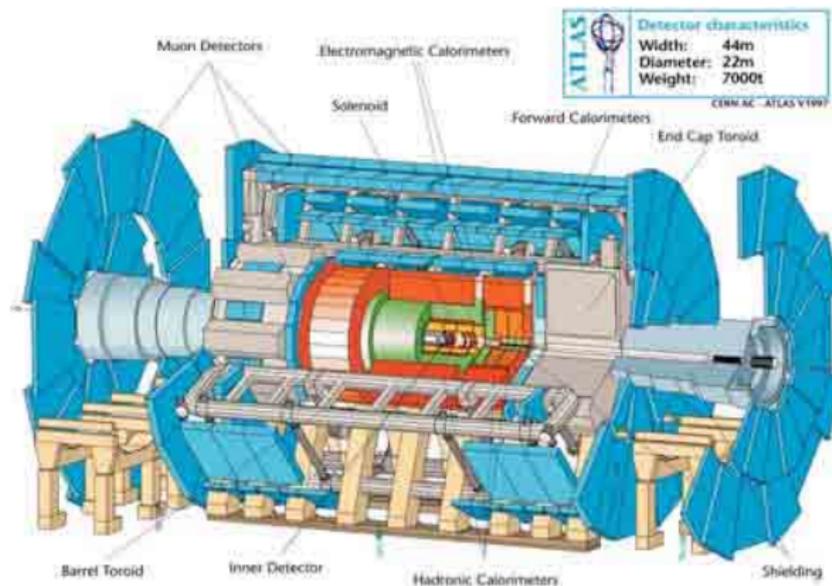
Exemple: ATLAS au LHC

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

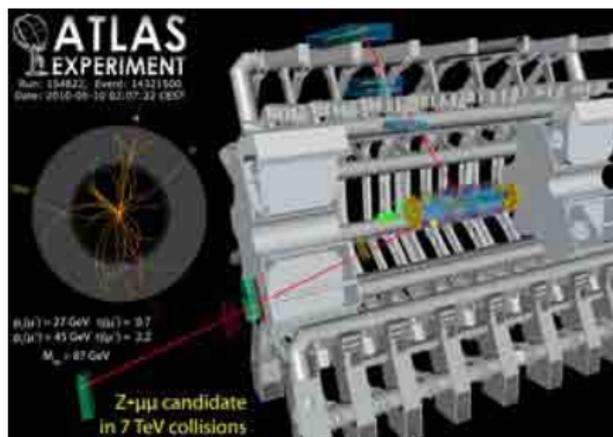


- Plusieurs couches, spécialisées selon le type de particules
- Liquide ou solide perturbé par le passage de particules
 - Trajectoire: perturbation du milieu (ionisation. . .) avec courbure \vec{B}
 - Energie: dépôt d'énergie par interaction avec le détecteur

Enregistrer

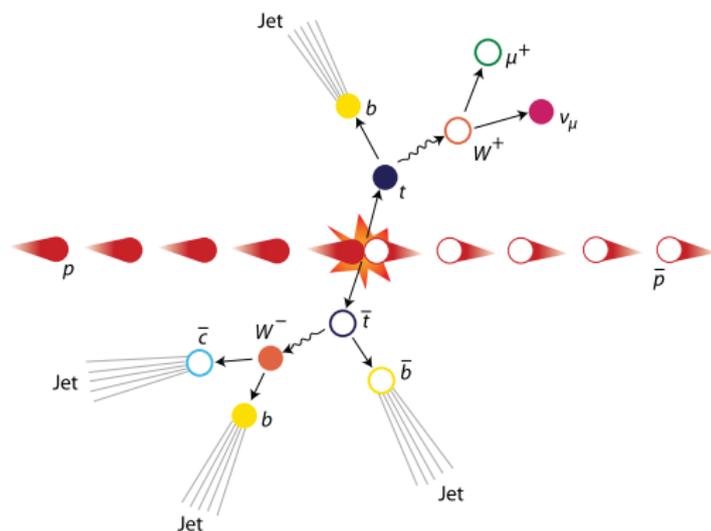
Près de **600 millions** de collisions par seconde dans les détecteurs

- 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



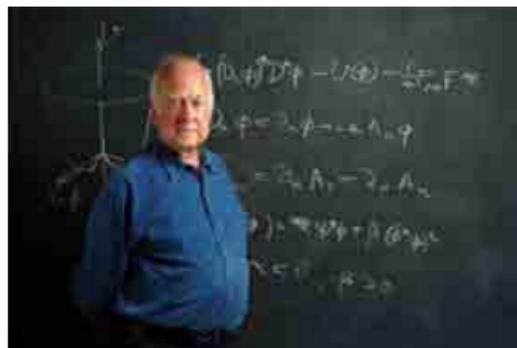
- Théorie: seulement la probabilité pour chaque processus
- Expérience: signal en compétition avec des bruits de fond

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)

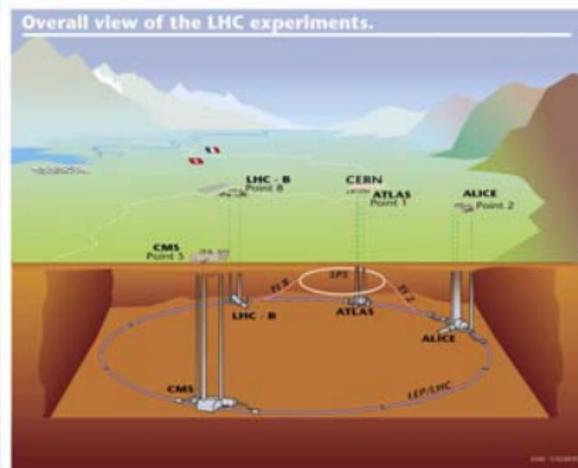
- Sur 27 km de circonférence, 2 faisceaux de protons
- déviés par plus de 1500 **aimants** (de 5 à 7m chacun)
- refroidis à -271°C (plus froid que l'espace !): **supraconducteurs**



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

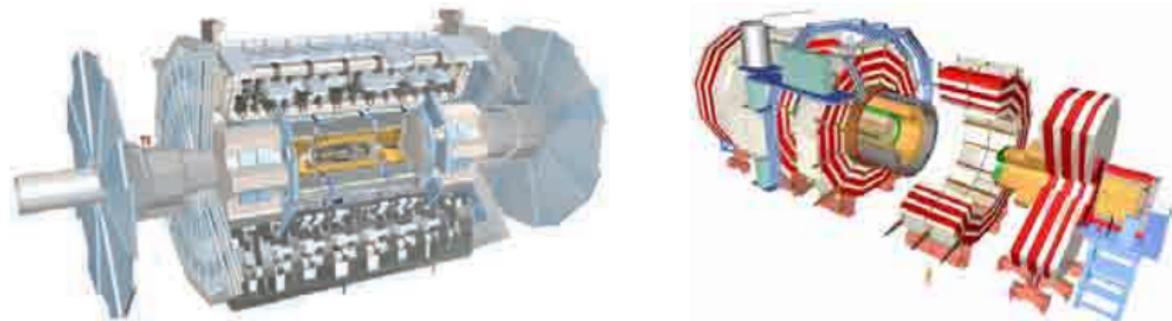
Quelques nombres autour du LHC (2)



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)

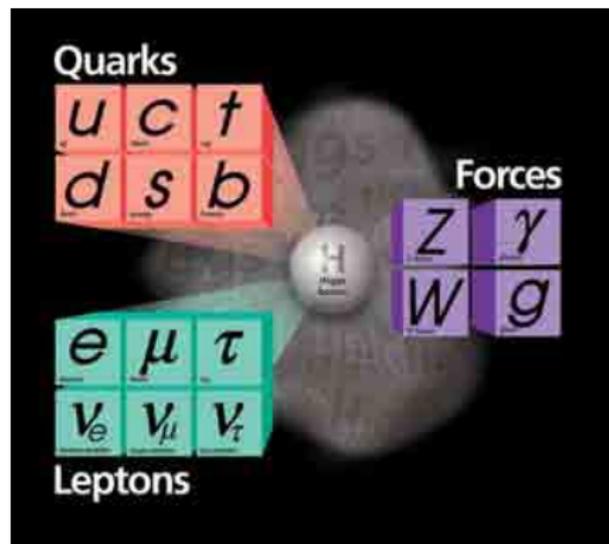
- 46 m × 25 m × 25 m (ATLAS) et 21 m × 15 m × 15 m (CMS)
- 7000 tonnes (ATLAS) et 12500 tonnes (CMS) [~ Tour Eiffel]
- Pour chacune, plusieurs milliers de scientifiques venant d'une quarantaine de pays [le CERN est une vraie ruche !]
- Mais aussi beaucoup d'ingénieurs et de techniciens (cryogénie, électronique,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

Le boson de Higgs

La dernière pièce du Modèle Standard

Vision actuelle de la physique des particules, très bien testée

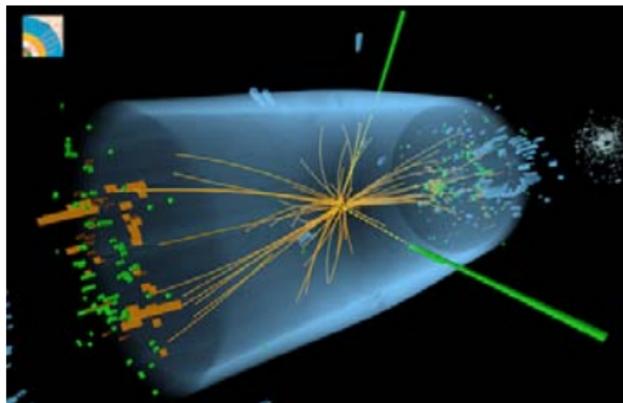
- depuis plus d'un siècle: électromagnétisme, électron, photon
- 1960-70: interaction forte, quarks
- 1990-2010: interaction faible, neutrinos



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 !

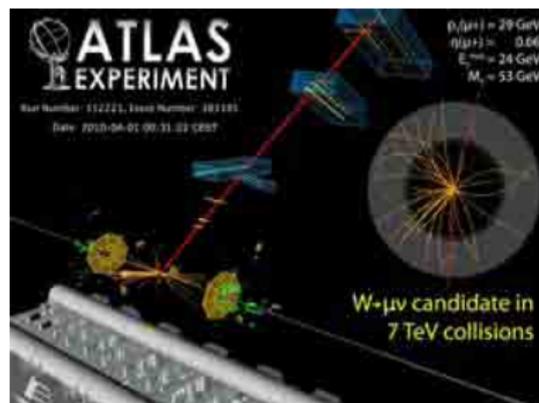
La chasse au Higgs (1)

- 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)

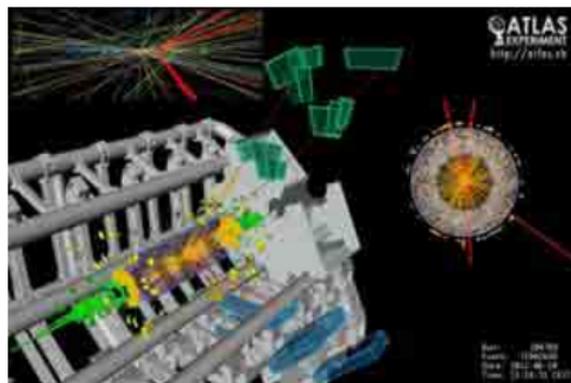
- 19/09/2008 : un défaut de connexion affecte certains aimants, ce qui les endommage gravement
- 20/11/2009 : les faisceaux de protons circulent à nouveau
- 23/11/2009 : premières collisions protons-protons au LHC
- 19/12/2009 : pause hivernale



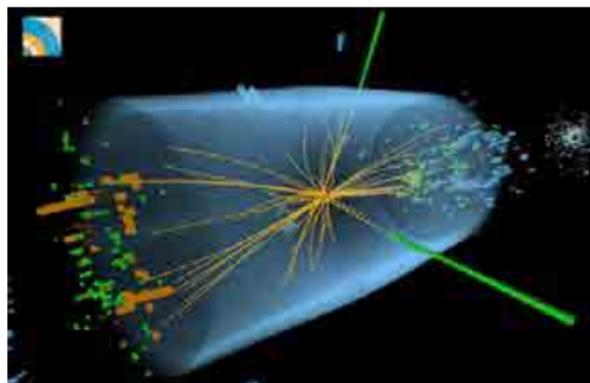
- Février 2010 : redémarrage du LHC à moitié de l'énergie prévue
- Été 2010 : observation des particules lourdes connues (W , Z , t)

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]

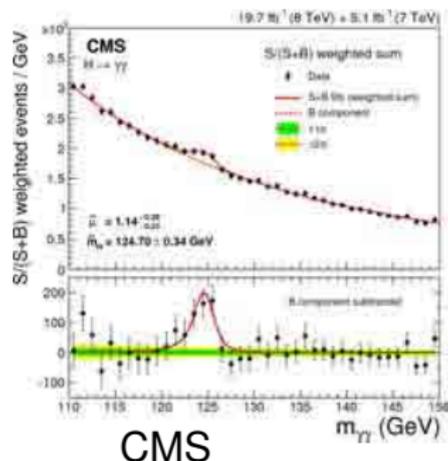
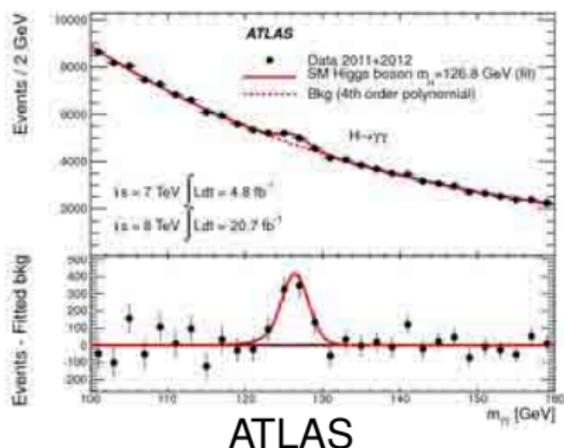


$H \rightarrow 2\gamma$ [CMS]

- 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

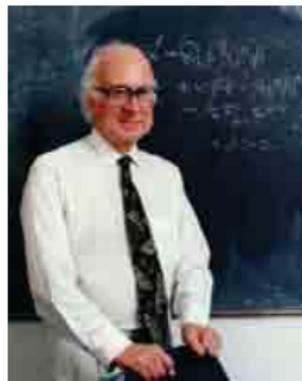
- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement !



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



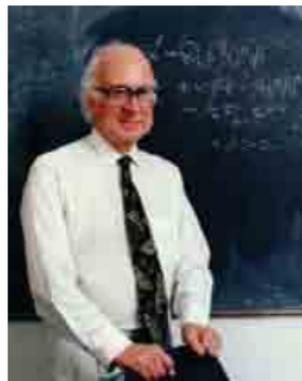
Problème similaire dans le Modèle Standard

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

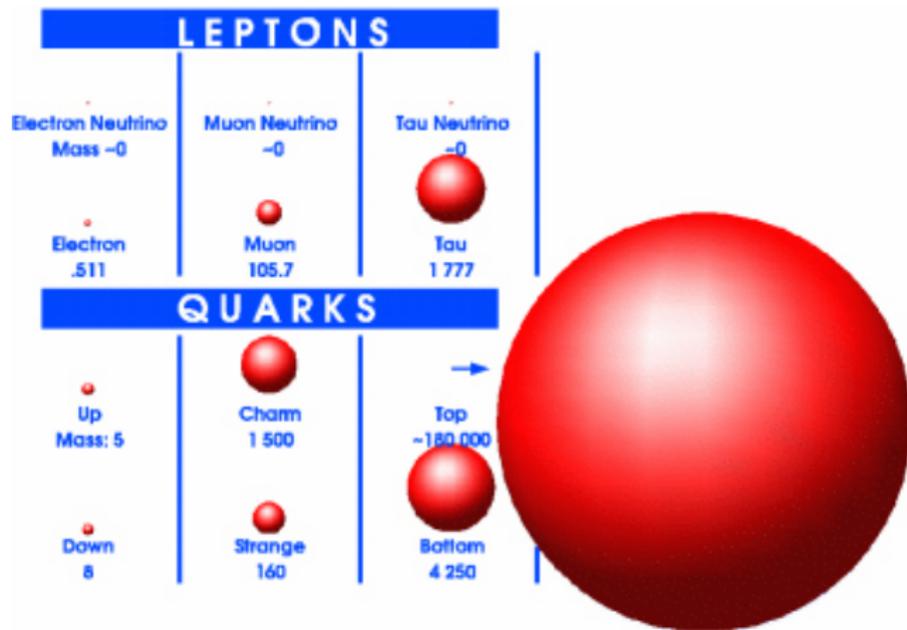


Problème similaire dans le Modèle Standard

- 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

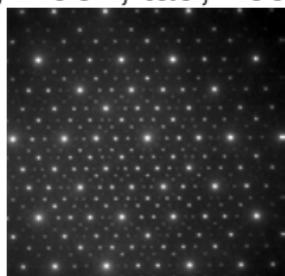
Boson de Higgs responsable de la masse des particules

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Boson de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

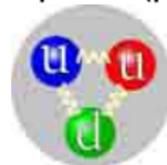
électron, muon, tau, neutrinos. . .



Masse = Higgs (100%)

Composite

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



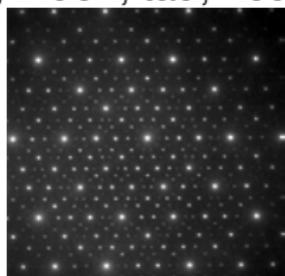
Masse des quarks (Higgs, $\sim 1\%$) +
E de "liaison" (inter. forte, $\sim 99\%$)

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Boson de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

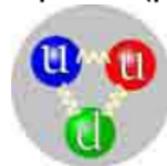
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

Composite

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



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

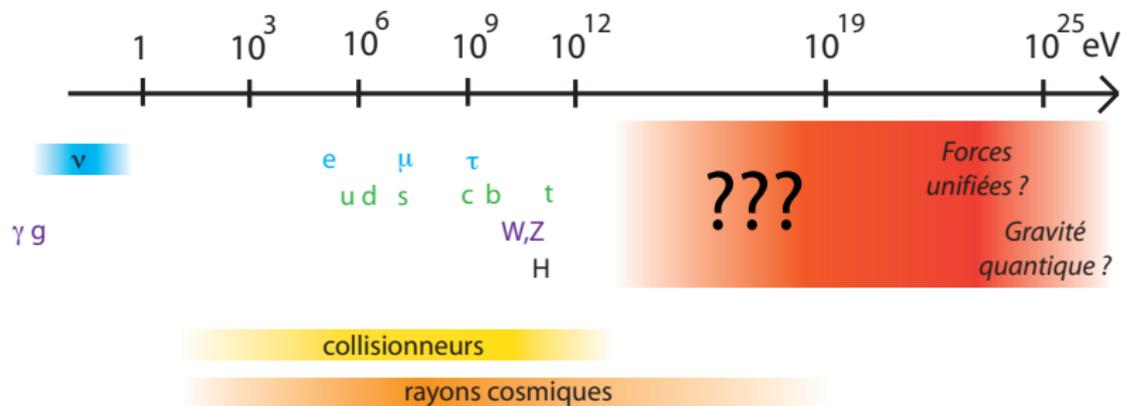
Energie de liaison : $M_{\text{composite}} = \sum m_{\text{constituants}} - E_{\text{liaison}}$

- 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



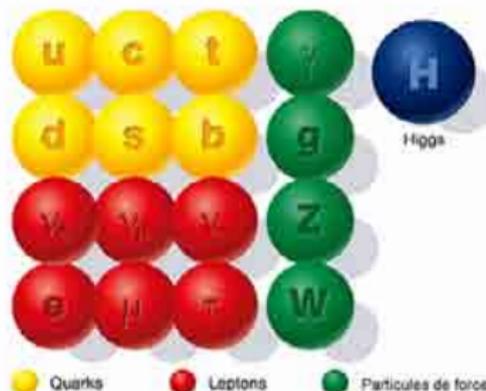
Modèle Standard très efficace, mais pas parfaitement satisfaisant

- 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 ?

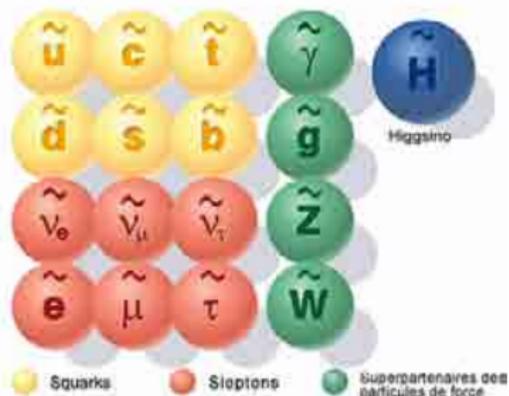
Au-delà du Modèle Standard

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

Particules du Modèle Standard

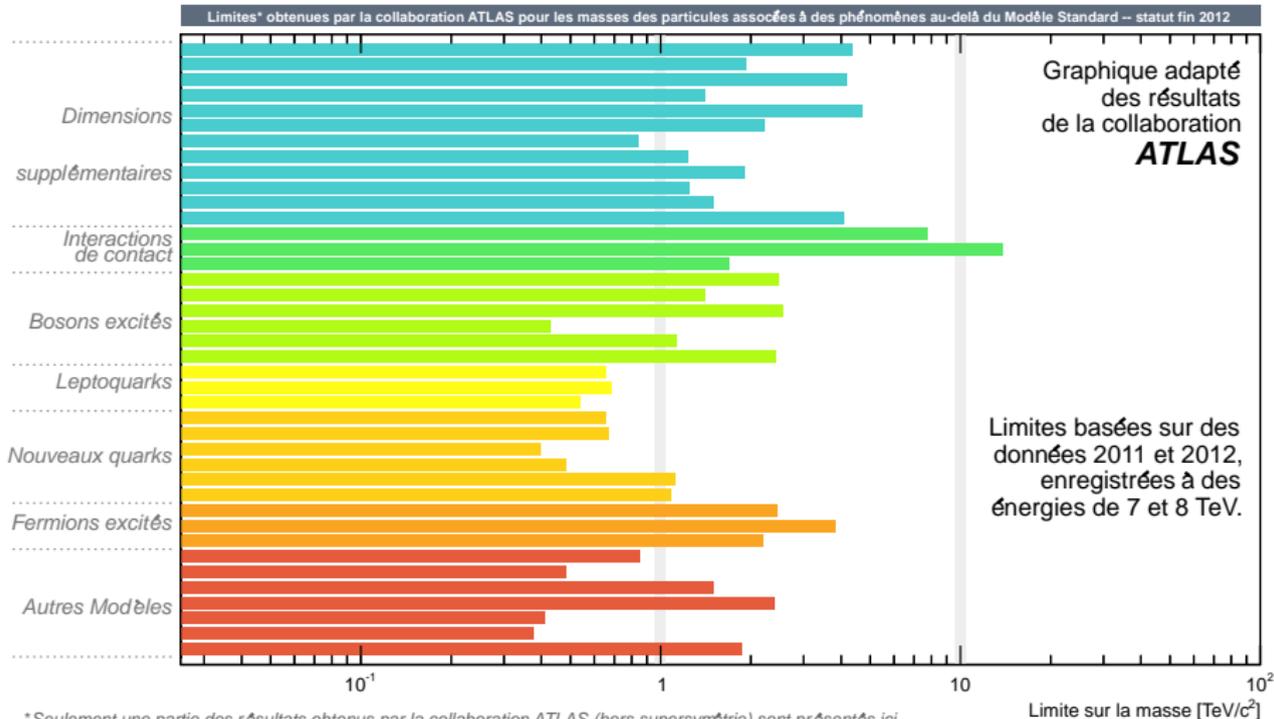


Particules supersymétriques



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

Ne rien voir, c'est déjà apprendre quelque chose



* 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

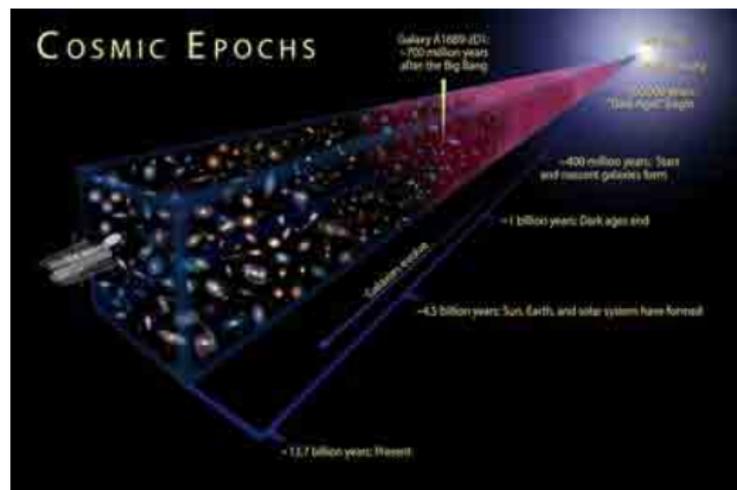
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- 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 ?

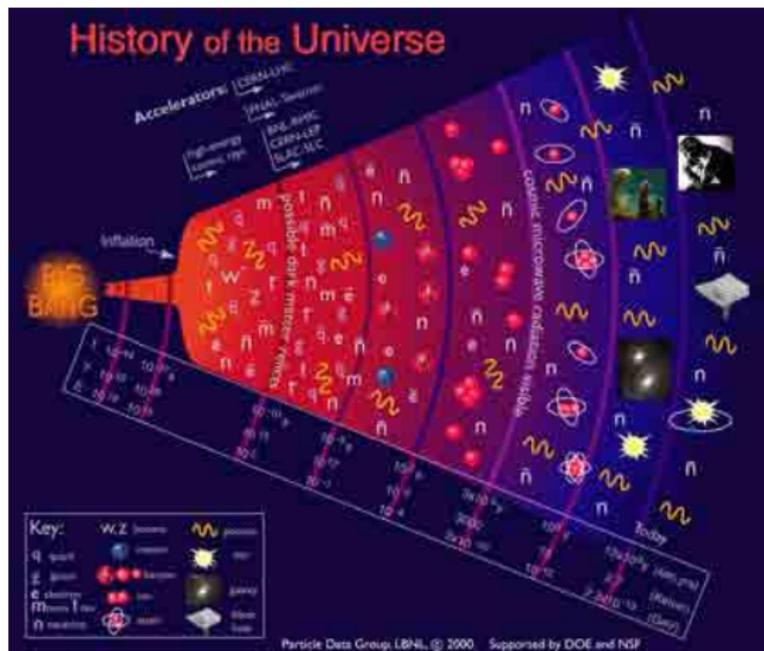
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ 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 ?

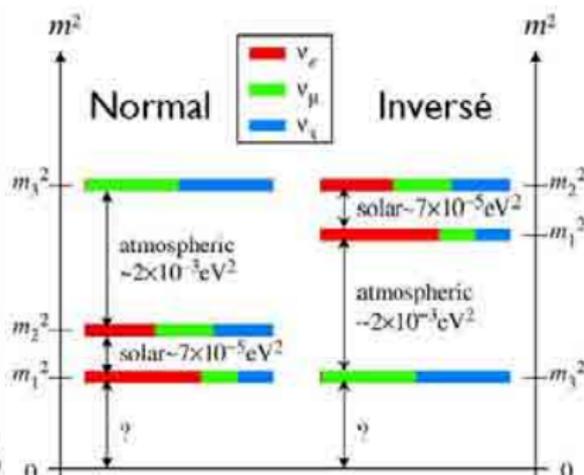
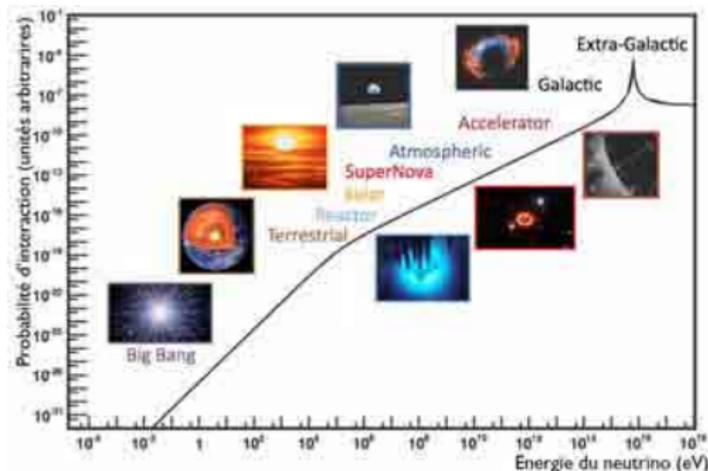
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

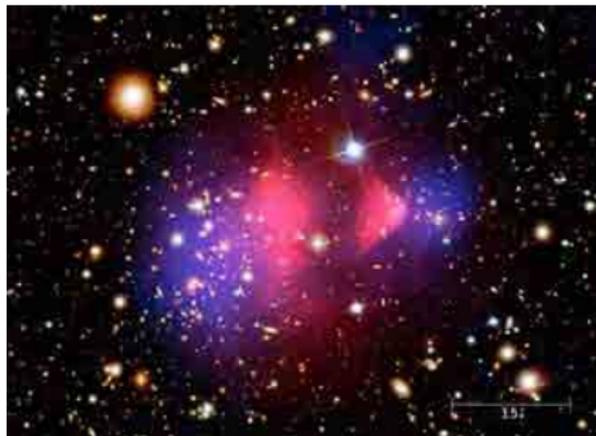
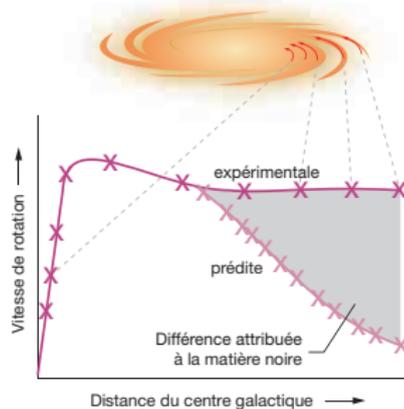
Les neutrinos

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)

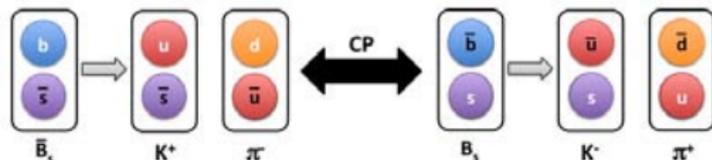
Matière "noire"

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

Asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

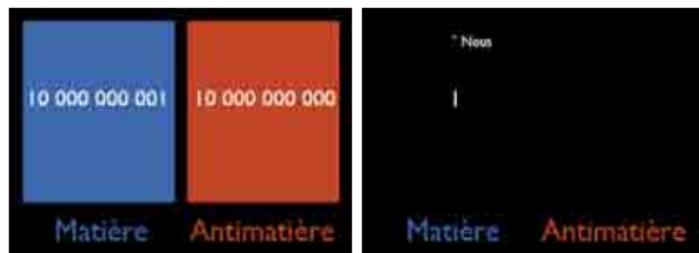
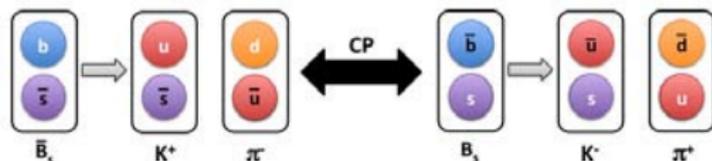
- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



Asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

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



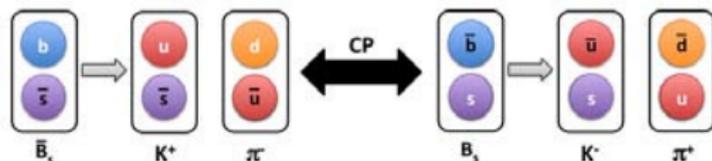
Cosmologie

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

Asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

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



Cosmologie

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

Nouveaux mécanismes d'asymétrie à des énergies plus élevées ?

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
- Une expo virtuelle: 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

APRÈS PARTICLE FEVER, LE GRAND COLLISIONNEUR LHC...
LE 5 NOVEMBRE AU CINÉMA Er 7 Monde
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, 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

Deux publications

Élémentaire



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

Passeport pour les deux infinis



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