

# La substantif-ique moelle de notre message

- ▶ Description, Modèle Standard; Physique, Particules;
- ▶ Théorie; Matière; Sondes, Energies, Distances; Radioactivité; Rayons cosmiques; Collisionneurs; Structure; Atome; Electron; Noyau; Proton, Neutron; Quarks.
- ▶ Limites, Siècle; Mécanique (quantique); Relativité; Combinaison.
- ▶ Mesure, Détecteurs; LHC; Informatique; Evènements; Probabilité, Diagrammes; Champ
- ▶ Fermions, Générations; Masse, Spin, Charges; Sensibilité, Interactions.
- ▶ Antiparticule; Conversion, Energie, Création, Annihilation, Paire;
- ▶ Bosons, Photon, Gluon.
- ▶ Higgs, Pièce, Témoin; Existence.
- ▶ Ensemble, précision



# Le texte (1)

- ▶ Notre description actuelle de l'infiniment petit et de la physique des particules est le Modèle Standard.
- ▶ Cette théorie s'est bâtie en étudiant la matière avec des sondes d'énergie de plus en plus élevées pour tester des distances de plus en plus petites, en utilisant la radioactivité, les rayons cosmiques, les collisionneurs.
- ▶ On a ainsi découvert la structure de la matière en atome, electron et noyau atomique, proton et neutron, quarks.
- ▶ Cela a amené les physiciens théoriciens et expérimentateurs à rencontrer deux limites de la physique du 19ème siècle : la mécanique quantique et la relativité.
- ▶ La combinaison de ces deux théories aboutit à ce que des sondes de plus en plus énergétiques ne diffusent pas simplement sur la matière existante, mais créent des particules nouvelles.

## Le texte (2)

- ▶ Pour effectuer des mesures de ces particules, on crée dans des collisionneurs de nouvelles particules que des détecteurs sont chargés d'identifier et d'enregistrer par informatique. Le plus récent est le LHC.
- ▶ On peut interpréter théoriquement ces événements et calculer leur probabilité en termes de diagrammes de Feynman, basés sur la théorie quantique des champs.
- ▶ On a ainsi découvert les particules élémentaires composant la matière, les fermions, selon 3 générations de masses croissantes. Les particules lourdes sont instables et se désintègrent en particules plus légères.
- ▶ Ces particules sont décrites par leur masse, leur spin, et différentes charges, comme la charge électrique, qui décrivent leur sensibilité aux interactions.
- ▶ A chaque particule est associée une antiparticule, de même masse et spin, mais de charges opposées. La conversion entre énergie et matière se fait par la création ou l'annihilation d'une paire particule-antiparticule à partir d'énergie et vice-versa.

## Le texte (3)

- ▶ Le Modèle Standard décrit 3 interactions fondamentales agissant sur ces particules :
  - ▶ l'interaction électromagnétique, responsable des phénomènes électriques, de la structure des atomes,
  - ▶ l'interaction forte, qui maintient les quarks au sein des protons et des neutrons, et ceux-ci dans les noyaux atomiques
  - ▶ l'interaction faible, qui est responsable de la radioactivité beta
- ▶ Ces trois forces s'exercent par l'échange de bosons médiateurs : le photon, les gluons, les bosons  $W$  et  $Z$ .
- ▶ La dernière pièce du Modèle Standard est le boson de Higgs. C'est le témoin de l'existence du champ de Higgs, responsable de la masse de toutes les particules du Modèle Standard.
- ▶ L'ensemble du Modèle Standard a été testé à une remarquable précision.

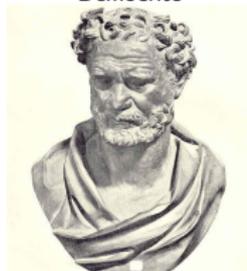


# Physique des particules

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

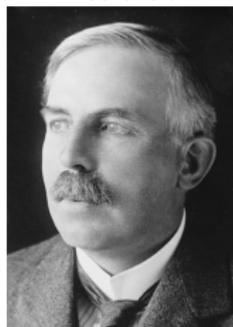
Démocrite



Lavoisier



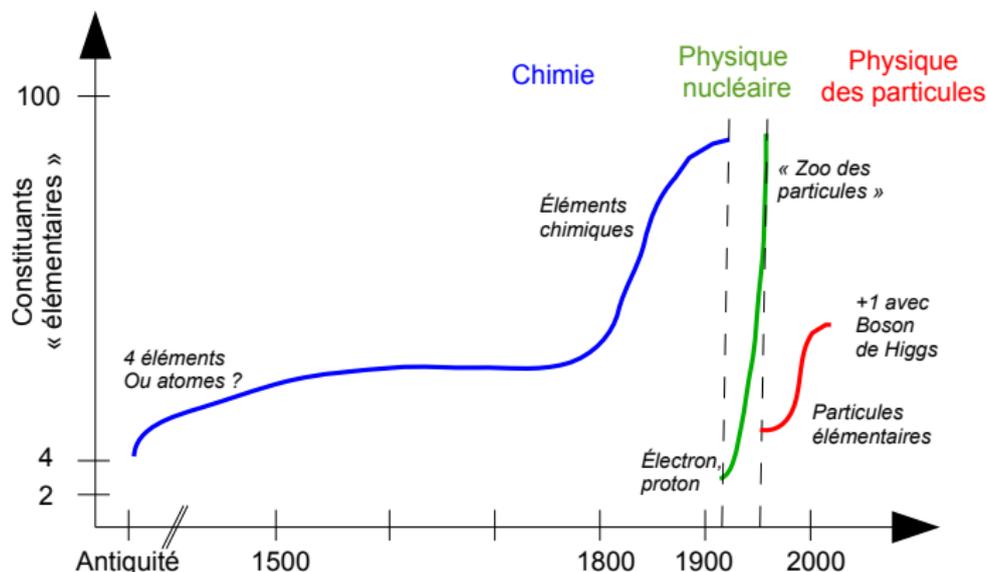
Rutherford



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



*Il semble probable que la plupart des grands principes sous-tendant [la physique] ont été fermement établis [...] Un éminent physicien a remarqué que les vérités futures de la science physique doivent être recherchées à la sixième décimale.*

Albert Michelson (1894)

Tout était simple

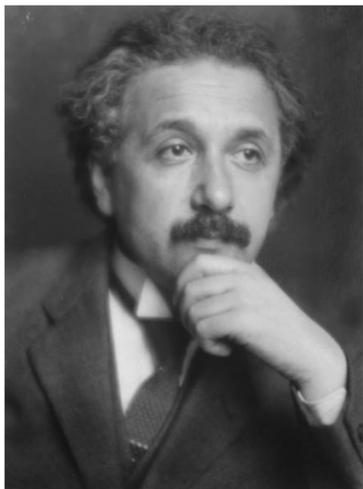
- ▶ Deux forces fondamentales: gravitation et électromagnétisme
- ▶ Matière constituée d'atomes neutres
- ▶ ... contenant des électrons chargés négativement

Juste deux “petits” problèmes : l'éther et le rayonnement de corps noir

# Deux révolutions de la physique



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



# “Notre” classification périodique actuelle



## Composants élémentaires de la matière

Être humain  
1m

Cellule  
 $10^{-6}$ m

Molécule  
 $10^{-9}$ m

Atome  
 $10^{-10}$ m

Noyau  
 $10^{-14}$ m

Neutron  
Proton  
 $10^{-16}$ m

	LEPTONS	QUARKS	BOSON DE HIGGS H
1 <sup>re</sup> famille Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électronique <small><math>m \approx 0</math>, <math>q = 0</math>, <math>s = 1/2</math></small>	$e$ électron <small><math>m = 9.1 \times 10^{-31}</math> kg, <math>q = -1.6 \times 10^{-19}</math> C, <math>s = 1/2</math></small>	
2 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon <small><math>m \approx 1.9 \times 10^{-28}</math> kg, <math>q = 0</math>, <math>s = 1/2</math></small>	$u$ up <small><math>m = 2.3 \times 10^{-27}</math> kg, <math>q = +2/3</math>, <math>s = 1/2</math></small>	
3 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive des 1 et 2 familles	$\nu_\tau$ neutrino tau <small><math>m \approx 1.8 \times 10^{-27}</math> kg, <math>q = 0</math>, <math>s = 1/2</math></small>	$d$ down <small><math>m = 4.8 \times 10^{-28}</math> kg, <math>q = -1/3</math>, <math>s = 1/2</math></small>	
		$c$ charm / charme <small><math>m = 1.3 \times 10^{-27}</math> kg, <math>q = +2/3</math>, <math>s = 1/2</math></small>	
		$s$ strange / étrange <small><math>m = 9.3 \times 10^{-29}</math> kg, <math>q = -1/3</math>, <math>s = 1/2</math></small>	
		$t$ top <small><math>m = 1.7 \times 10^{-26}</math> kg, <math>q = +2/3</math>, <math>s = 1/2</math></small>	
		$b$ bottom / bas / faux <small><math>m = 4.2 \times 10^{-27}</math> kg, <math>q = -1/3</math>, <math>s = 1/2</math></small>	
			<b>Champ de Higgs</b>

**INTERACTIONS FONDAMENTALES**

portées	$10^{-17}$ m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>
	infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
	$10^{-14}$ m	Interaction forte	Gluons g
	infinie	Gravitation	Graviton (?)

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

L'existence de particules massives fondamentales avec un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui impliquent ces particules, en particulier en ce qui concerne :

- la production par les étoiles des neutrinos à partir de la chaîne p-p-p
- la production de photons et de neutrinos dans les réactions de fusion nucléaire "thermonucléaire" qui ont lieu dans les étoiles.

**ANTIMATIÈRE**

L'antimatière est constituée de particules qui sont les antiparticules des particules de la matière ordinaire. Elle est produite en petites quantités dans les accélérateurs de particules et dans les rayons cosmiques.

Soleil  
 $10^9$ m

Galaxie  
 $10^{17}$ m



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

⇒ découverte de la **radioactivité**

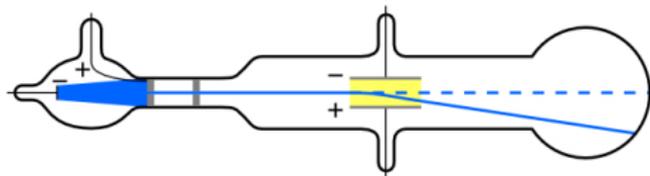
(H. Becquerel, P. et M. Curie)

- ▶ Séparation des rayonnement “uraniques” en 3 catégories
  - ▶  $\alpha$ : noyaux d'hélium (interaction forte)
  - ▶  $\beta$ : électron (et neutrino, interaction faible)
  - ▶  $\gamma$ : photons de haute énergie (interaction em)
- ▶ Mise en évidence d'isotopes radioactifs dans de nombreux éléments
- ▶ Découverte progressive des effets biologiques

# L'électron



1897: rayonnement cathodique  
infléchi par  $\vec{E}$  (J.J. Thomson)

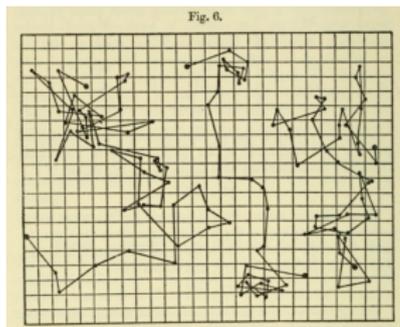


- ▶ charge négative
- ▶ rapport charge/masse très élevé
- ▶ indépendant du matériau utilisé

corpuscules très légers ou très chargés

⇒ l'électron, constituant de l'atome

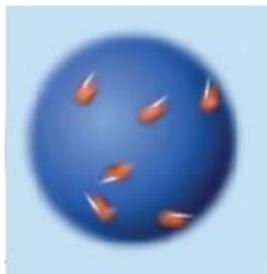
# L'hypothèse atomique



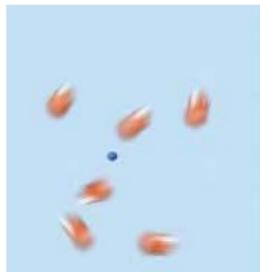
- ▶ chimistes, en particulier J. Dalton (1805-10) et A. Avogadro (1811)
- ▶ mouvement aléatoire de pollen dans l'eau (R. Brown 1827)
- ▶ due aux collisions du pollen avec les molécules d'eau (A. Einstein, 1905, vérifié par J. Perrin, 1908)

avec des diverses visions sur le rôle de l'électron

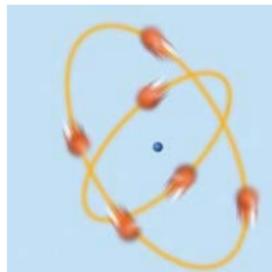
(à présent, une probabilité de présence autour du noyau)



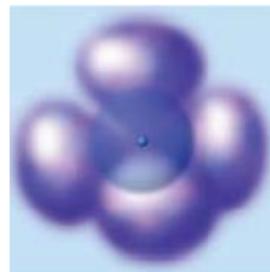
Thomson (1903)



Rutherford(1909)

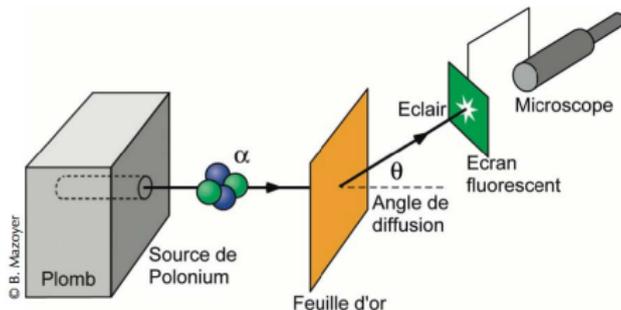


Bohr (1913)



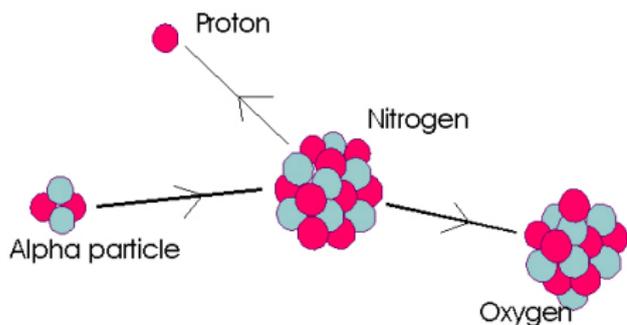
Vision moderne

# Du plein avec du vide

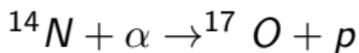


- ▶ en 1909, Geiger, Marsden, Rutherford frappe une feuille d'or avec des noyaux d'hélium (particules  $\alpha$ )
  - ▶ la plupart traverse la feuille sans problème
  - ▶ une petite fraction “rebondit” sur un obstacle de petite taille
- ⇒ **le noyau atomique** (10000 fois plus petit que l'atome)

# Le proton et le neutron



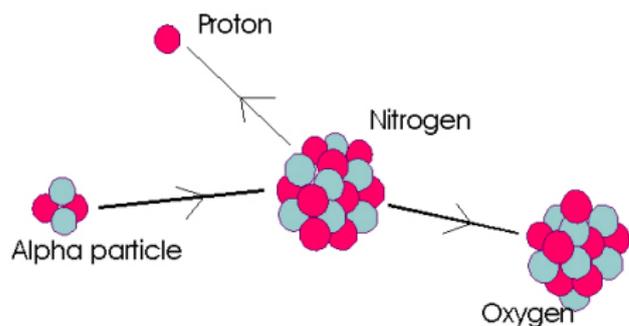
1917-1919: première réaction nucléaire



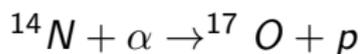
$\implies$  noyau d'*H* ou **proton**

constituant de tous les noyaux  
(E. Rutherford)

# Le proton et le neutron



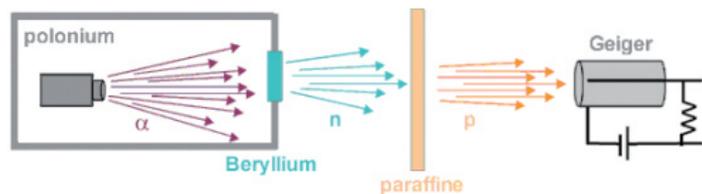
1917-1919: première réaction nucléaire

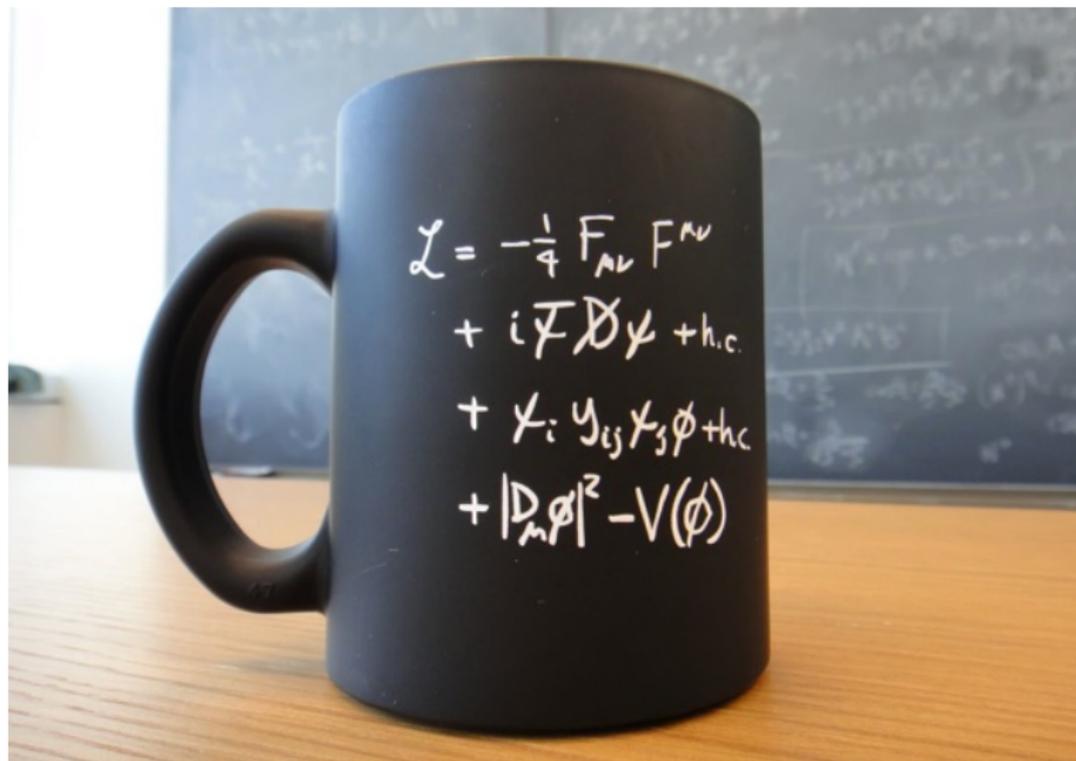


$\Rightarrow$  noyau d'*H* ou **proton**  
constituant de tous les noyaux  
(E. Rutherford)

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

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





$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$



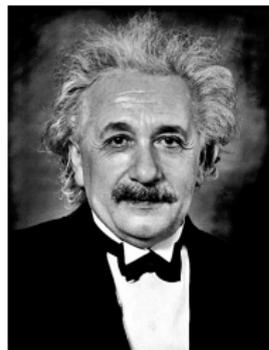
# La physique théorique ? Une cible mouvante





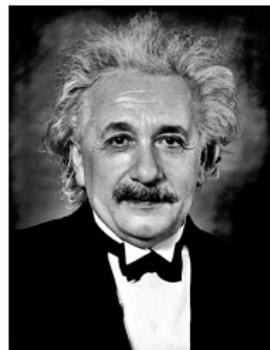
# La physique théorique ? Une cible mouvante

- ▶ Plutôt de la physique ou des mathématiques ?
  - ▶ Concepts mathématiques empruntés ou développés  
(*algèbre linéaire, symétries, groupes, statistique...*)
  - ▶ Mais comme outils et non comme fin en soi  
(*pas d'existence/unicité de solutions, convergence de séries...*)



# La physique théorique ? Une cible mouvante

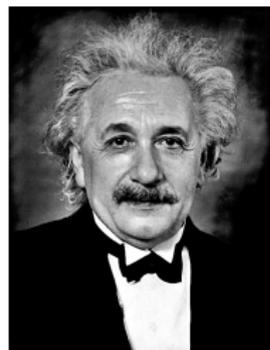
- ▶ Plutôt de la physique ou des mathématiques ?
  - ▶ Concepts mathématiques empruntés ou développés  
(*algèbre linéaire, symétries, groupes, statistique...*)
  - ▶ Mais comme outils et non comme fin en soi  
(*pas d'existence/unicité de solutions, convergence de séries...*)



- ▶ Plutôt analytique, ou plutôt synthétique ?

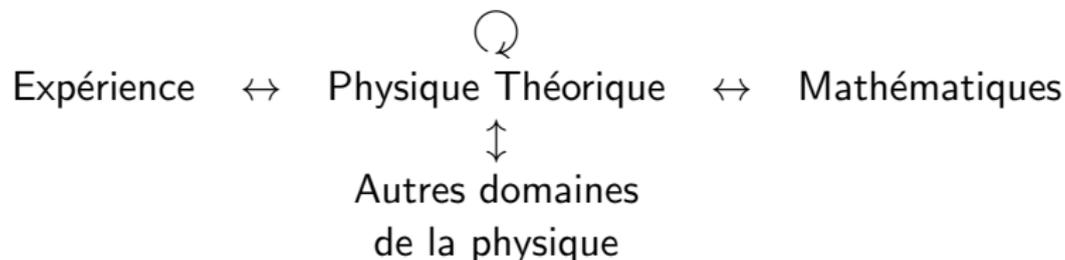
# La physique théorique ? Une cible mouvante

- ▶ Plutôt de la physique ou des mathématiques ?
  - ▶ Concepts mathématiques empruntés ou développés  
(*algèbre linéaire, symétries, groupes, statistique...*)
  - ▶ Mais comme outils et non comme fin en soi  
(*pas d'existence/unicité de solutions, convergence de séries...*)



- ▶ Plutôt analytique, ou plutôt synthétique ?
  - ▶ découpage en niveaux d'énergie et en objets différents  
(*physique nucléaire, physique des particules, cosmologie...*)
  - ▶ mais avec une volonté d'unification des phénomènes

# La physique théorique, des interactions multiples



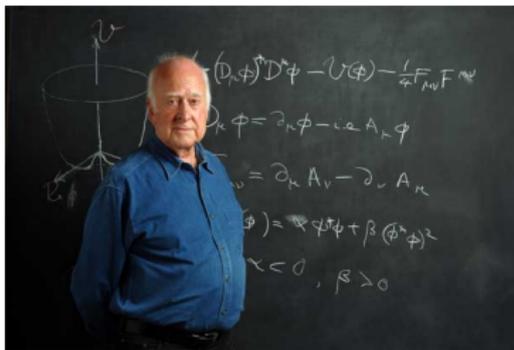
- ▶ Aller-retour permanent avec l'expérience pour à la fois interpréter les résultats et proposer de nouvelles idées
- ▶ Sociologie assez particulière entre théoriciens et expérimentateurs

# Deux tribus



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

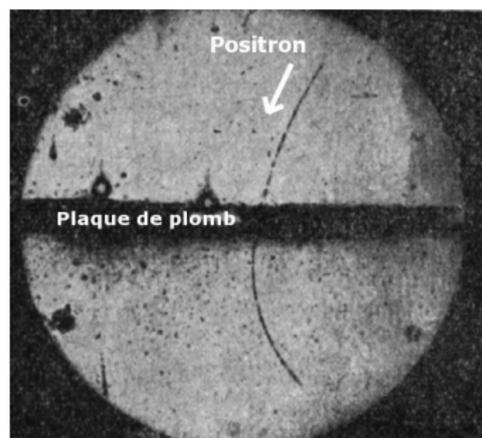
# Des nouvelles de l'espace



Anderson (1932)

- ▶ Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre

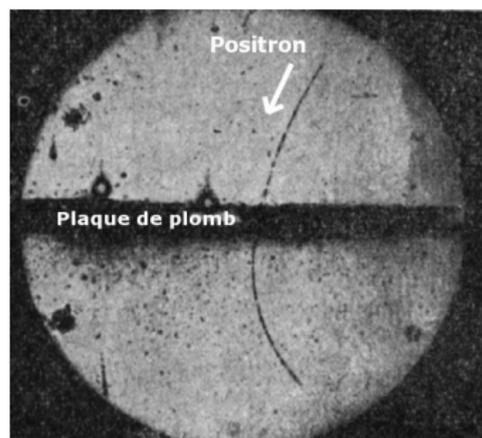
# Des nouvelles de l'espace



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)

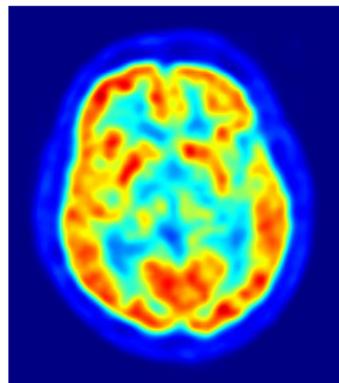
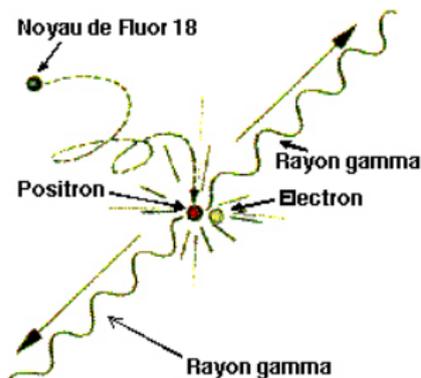
- ▶ Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre
- ▶ Cliché de chambre à brouillard, pour visualiser particules chargées +  $\vec{B}$
- ▶ Même masse qu'un électron, mais charge électrique opposée : **positron**

## Dirac (1928)

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



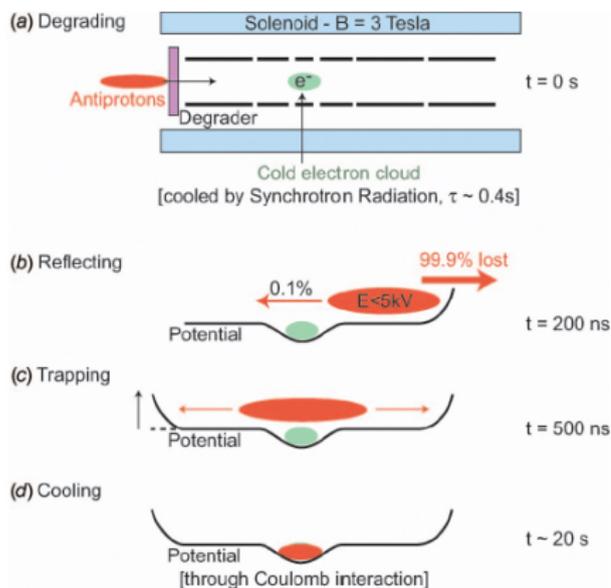
# La tomographie par émission de positrons



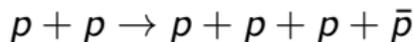
- ▶ Traceur, molécule contenant un noyau radioactif  $\beta^+$  ...
- ▶ ... absorbé par l'organisme vivant et fixé dans un organe
- ▶ Un positron émis, qui rencontre un électron environnant ...
- ▶ ... ce qui engendre 2 photons gamma dos-à-dos avec  $E_\gamma = m_e c^2$
- ▶ ... faciles à détecter en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

# Des antiparticules à l'antimatière (1)

On fait même de l'antihydrogène au CERN, en combinant des antiparticules



► Collisions faisceau proton sur cible fixe :



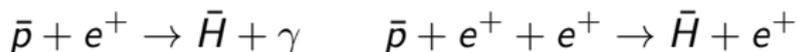
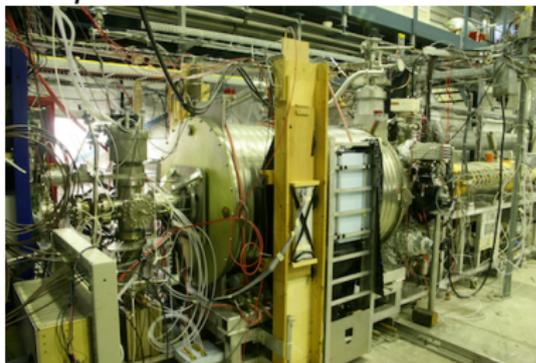
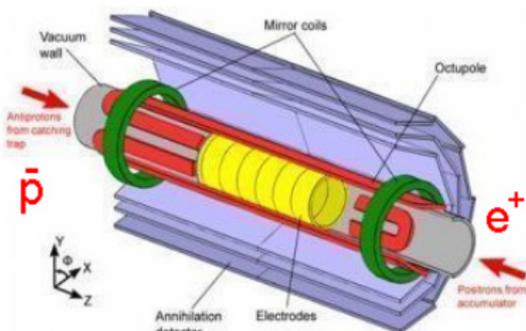
► puis  $\bar{p}$  ralentis emprisonnés et refroidis sur des électrons

► Source  $\beta^+$   $\text{Na}^{22}$  pour  $e^+$ , ensuite piégés et refroidis sur un gaz

Puis  $\bar{p}$  et  $e^+$  injectés dans un piège électromagnétique de Penning...

## Des antiparticules à l'antimatière (2)

$\bar{H}$  difficile conserver car s'annihile avec les  $p$  et  $e^-$  ambiants !



Premiers atomes d'antihydrogène formés en 2002) et stockés en 2010

- ▶ Spectroscopie de l'atome d'antihydrogène vs hydrogène
- ▶ Comportement de l'antimatière dans champ de gravité

# Anges et démons



## Produire de l'antimatière ?

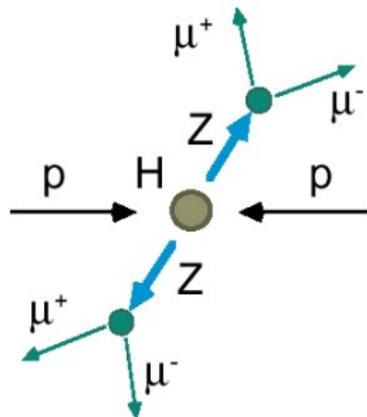
- ▶ En 2002, dizaines de milliers d'atomes d'anti-hydrogène au CERN
- ▶ soit 1/10 000 000 000 000 000 d'un ballon d'enfant !
- ▶ au rythme de production, plusieurs milliards d'années pour avoir de quoi faire une bombe !

## 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...)

# Paires particule-antiparticule (1)



Énergie **convertie** en masse sous forme de paire particule-antiparticule

- ▶ en fait, énergie transportée par une/des particules peut être convertie en paires particule-antiparticule  
*par exemple, deux protons énergétiques entrant en collision*
- ▶ ces particules produites n'étaient pas présentes initialement
- ▶ toutes paires possibles à condition de respecter lois de conservation (énergie-impulsion, charges)

## Paires particule-antiparticule (2)



Inversement, une particule et une antiparticule peuvent **s'annihiler** en produisant de l'énergie

- ▶ ... qui est là encore transportée par d'autres particules  
*un électron et un antiélectron s'annihilant en deux photons, ou un boson  $Z^0$*
- ▶ les particules initiales ont disparu

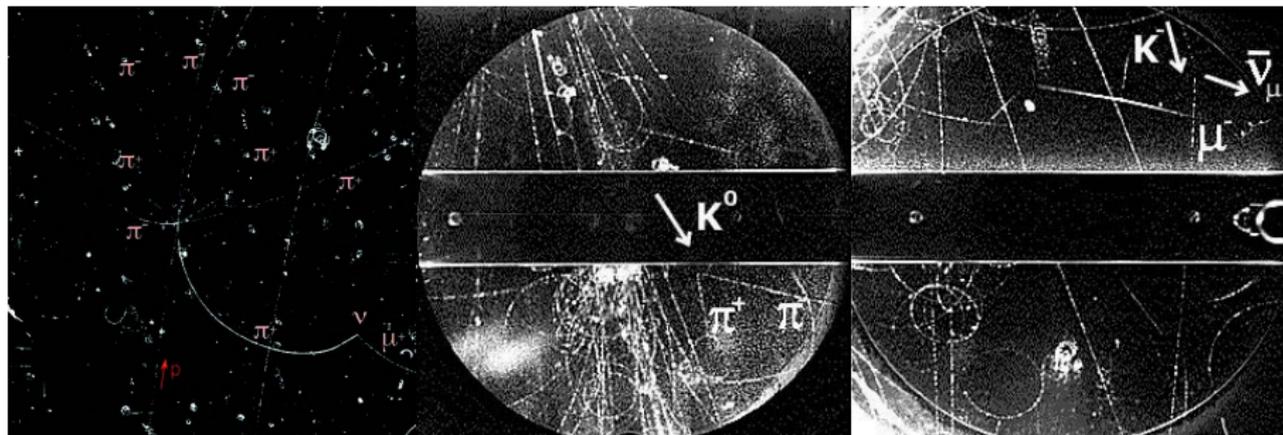
Ne pas confondre **annihilation et désintégration**

- ▶ désintégration: une particule lourde, instable, se désintègre spontanément en particules plus légères  
*le quark top se désintègre très rapidement en quarks plus légers*
- ▶ annihilation: une particule et son antiparticule doivent se rencontrer  
*l'antiélectron est stable, il ne se désintègre pas, il ne s'annihile que s'il rencontre un électron*

## Qui a commandé ça ?



- ▶ Ionisation de l'atmosphère, avec composante extraterrestre
- ▶ Rayons cosmiques, particules chargées venant de l'espace
- ▶ Source de particules énergétiques



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 quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...

$a_0$ ,  $f_0$ ,  $\pi'$ ,  $N^*$ ...

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Theta$ ...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...

$a_0$ ,  $f_0$ ,  $\pi'$ ,  $N^*$ ...

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !

proton, neutron...  $\Omega$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Theta$ ...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...  $D$ ,  $D_s$ ,  $B$ ,  $B_s$ ...

$a_0$ ,  $f_0$ ,  $\pi'$ ,  $N^*$ ...

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !

proton, neutron...  $\Omega$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Theta$ ...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...  $D$ ,  $D_s$ ,  $B$ ,  $B_s$ ...

$a_0$ ,  $f_0$ ,  $\pi'$ ,  $N^*$ ...  $X(3850)$ ,  $Y(3950)$ ...

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)



Et la liste n'est pas close !

proton, neutron...  $\Omega$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Theta$ ...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...  $D$ ,  $D_s$ ,  $B$ ,  $B_s$ ...

$a_0$ ,  $f_0$ ,  $\pi'$ ,  $N^*$ ...  $X(3850)$ ,  $Y(3950)$ ...

Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir  
du nom de toutes ces particules, je serais  
devenu botaniste !*

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)



Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...  
 $\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...  
 $a_0, f_0, \pi', N^*$ ...  $X(3850), Y(3950)$ ...

Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir  
du nom de toutes ces particules, je serais  
devenu botaniste !*

Gell-Mann et Zweig (1964): les **quarks**, constituants de toutes ces  
particules pas si élémentaires que cela:  $p = uud, n = udd, \Lambda^0 = uds$

# Les quarks



Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)



Et la liste n'est pas close !

proton, neutron...  $\Omega$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Theta$ ...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...  $D$ ,  $D_s$ ,  $B$ ,  $B_s$ ...

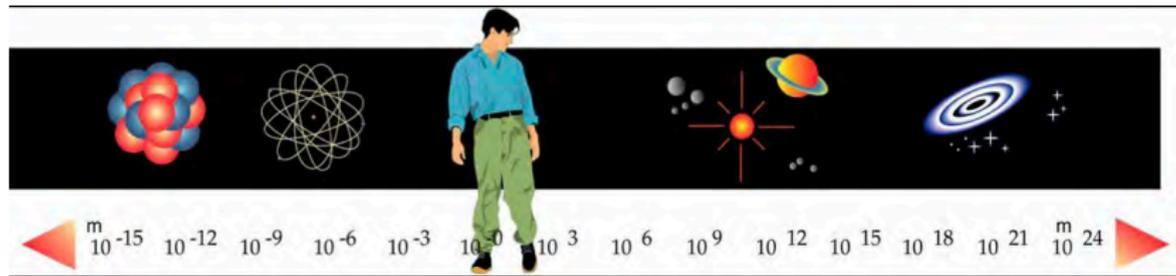
$a_0$ ,  $f_0$ ,  $\pi'$ ,  $N^*$ ...  $X(3850)$ ,  $Y(3950)$ ...

Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir du nom de toutes ces particules, je serais devenu botaniste !*

Gell-Mann et Zweig (1964): les **quarks**, constituants de toutes ces particules pas si élémentaires que cela:  $p = uud$ ,  $n = udd$ ,  $\Lambda^0 = uds$

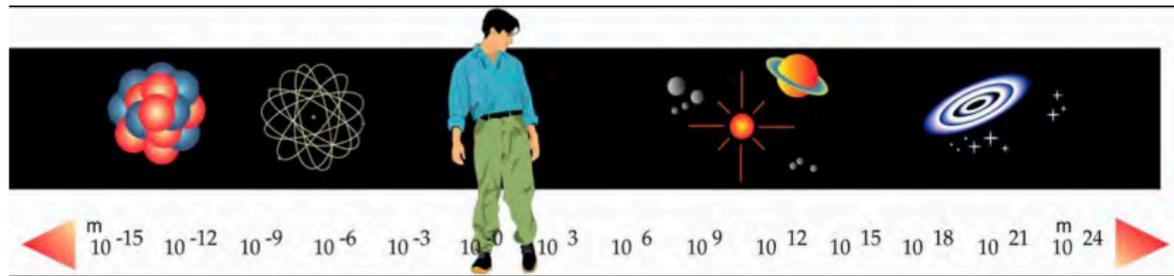
- ▶ prédit de nouvelles combinaisons, et leurs masses et propriétés
- ▶ sous-structure du proton confirmée en 1968 ( $e^-$  sur  $p$  déviés)

# Monter en énergie, diminuer en taille

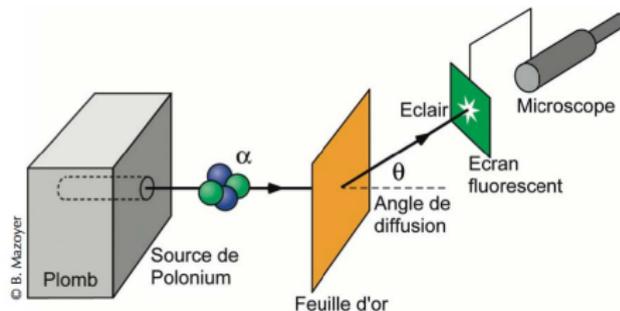


- ▶ sonder sur des distances plus petites
- ▶ avec des particules d' $E$  de plus en plus élevée
- ▶ photons de plus en plus énergétiques (UV, X,  $\gamma$ )

# 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 [cf. Geiger, Marsden, Rutherford qui "voient" le noyau avec  $\alpha$  sur atome d'or]

# Quelques ordres de grandeur



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

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

Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )	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

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

# Dessine-moi une particule

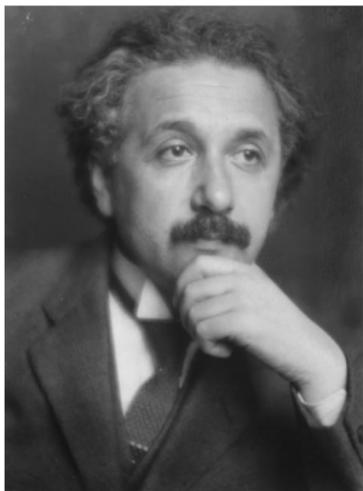


Pas vraiment du billard...

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

# Un champ de bataille théorique

Albert Einstein



Relativité restreinte  
(Poincaré, Lorentz...)  
 $c$  vitesse de la lumière ( $v$  max)  
objets rapides

Niels Bohr



Mécanique quantique  
(Schrödinger, Heisenberg...)  
 $h$  quantum d'action ( $E \cdot t$  min)  
temps courts

Une cohabitation qui fait des étincelles en physique des particules !

# 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



- ▶ A chaque particule son antiparticule:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule

# 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

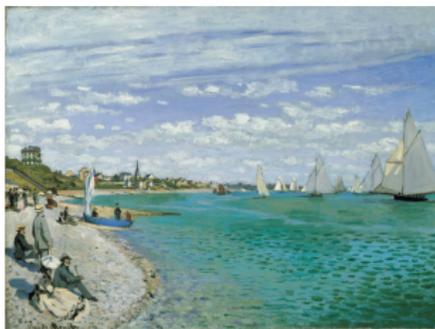


- ▶ A chaque particule son antiparticule:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule
- ▶ On ne casse plus la matière en sous-constituants. . .
- ▶ . . . on crée de **nouvelles particules** lors de collisions violentes

# La théorie quantique des champs

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



# La théorie quantique des champs

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



Chaque champ quantique est capable  
de créer ou d'annihiler des excitations, les particules

# Le cadre théorique de la physique des particules





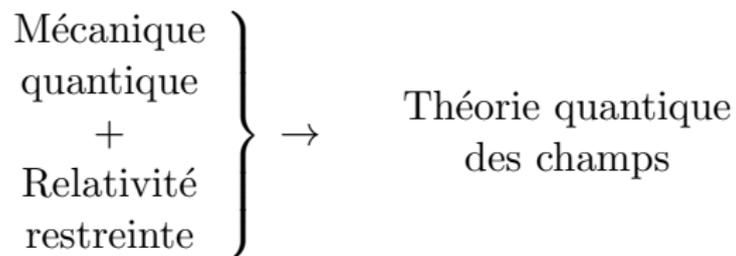
Mécanique  
quantique

*Comportement d'objets pour énergie ou temps petits*



Mécanique  
quantique  
+  
Relativité  
restreinte

*Comportement d'objets de vitesse très grande*



*Nombre de particules variable*

Mécanique  
quantique  
+  
Relativité  
restreinte

} → Théorie quantique  
des champs

Théorie  
des groupes

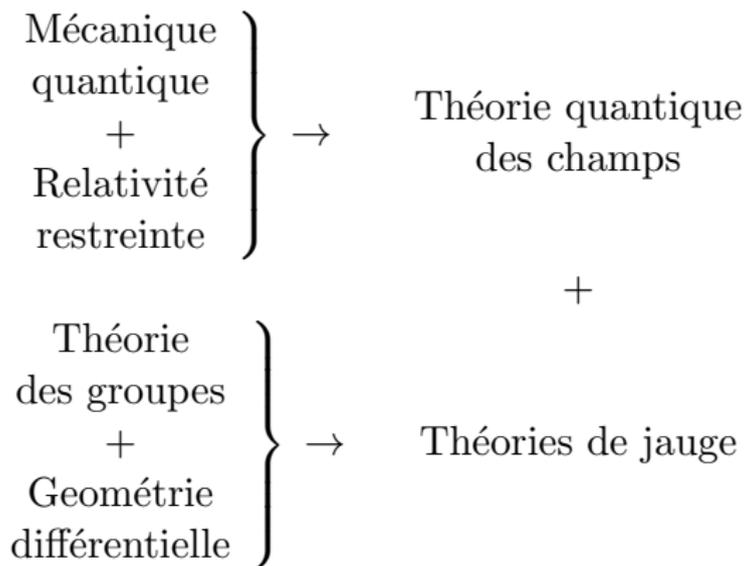
*Structure mathématique des interactions*

Mécanique  
quantique  
+  
Relativité  
restreinte

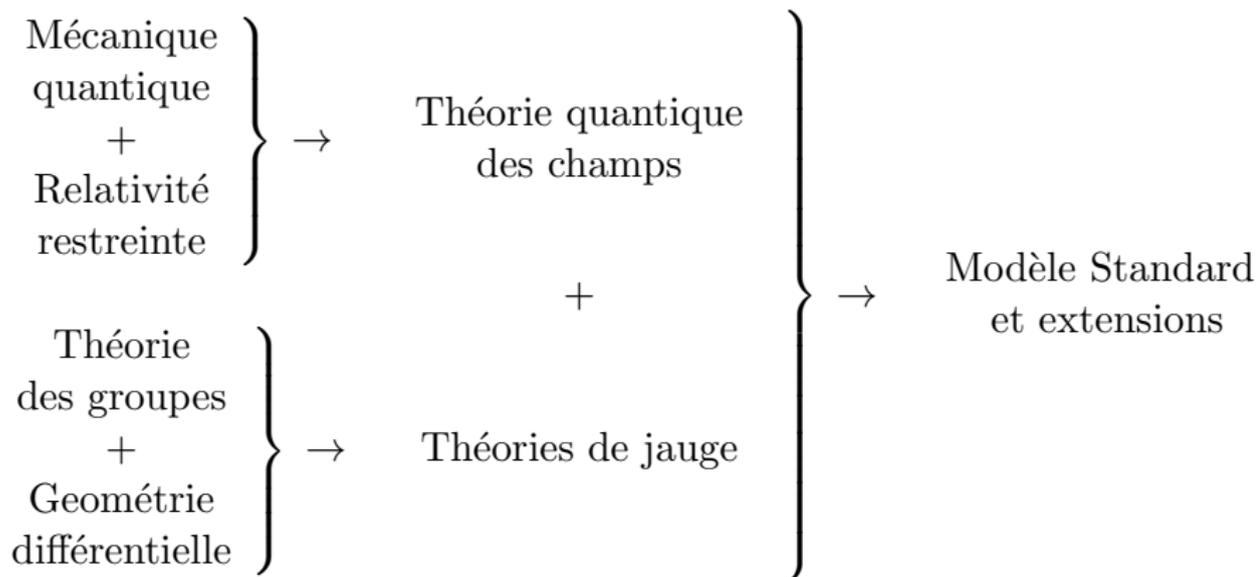
} → Théorie quantique  
des champs

Théorie  
des groupes  
+  
Géométrie  
différentielle

*Dépendance spatiale des interactions*



*Bosons médiateurs des interactions*



*Le cadre général en physique des particules contemporaine*

# La relativité (restreinte)



- ▶ **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- ▶ vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
- ▶ dilatation des temps, contraction des longueurs
- ▶ notion de référentiel propre (au repos) de la particule

# La relativité (restreinte)



- ▶ **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- ▶ vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
  - ▶ dilatation des temps, contraction des longueurs
  - ▶ notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- ▶ Énergie, impulsion et vitesse

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

- ▶ masse: identique dans tout référentiel
- ▶ représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée
- ▶ près de  $c$ ,  $E$  plus important que  $v$
- ▶ énergie disponible lors d'une collision (Rutherford ?)

# La relativité (restreinte)



- ▶ **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- ▶ vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
  - ▶ dilatation des temps, contraction des longueurs
  - ▶ notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- ▶ Energie, impulsion et vitesse

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

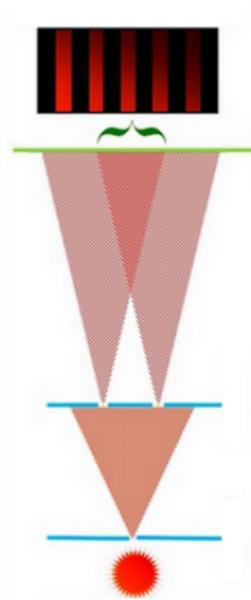
- ▶ masse: identique dans tout référentiel
  - ▶ représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée
  - ▶ près de  $c$ ,  $E$  plus important que  $v$
  - ▶ énergie disponible lors d'une collision (Rutherford ?)
- ▶ **Equivalence entre masse et énergie**  $E = Mc^2$ 
    - ▶ Possible de convertir de la matière en énergie et vice-versa

# La mécanique quantique



## ► Lumière

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



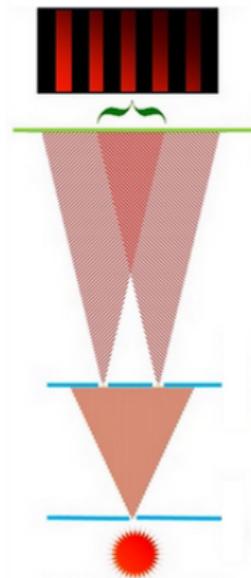


## ▶ Lumière

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

## ▶ Probabilités

- ▶ Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- ▶  $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$





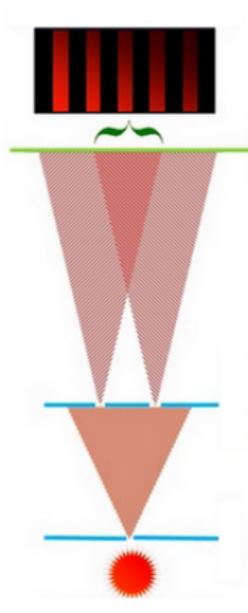
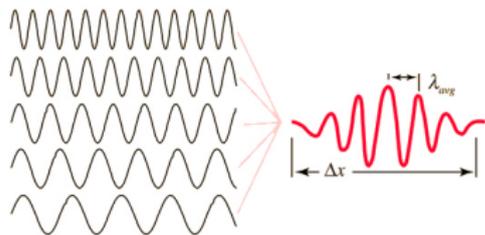
## ► Lumière

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

## ► Probabilités

- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$

- Toute particule décrite par une **superposition** d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



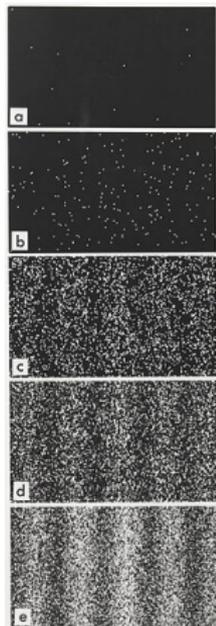
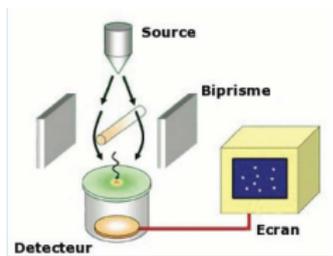
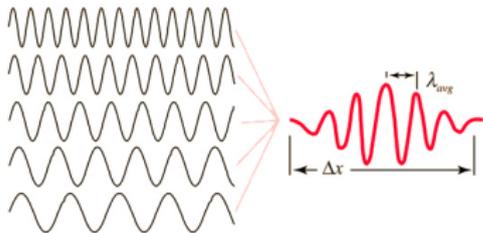
## ► Lumière

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

## ► Probabilités

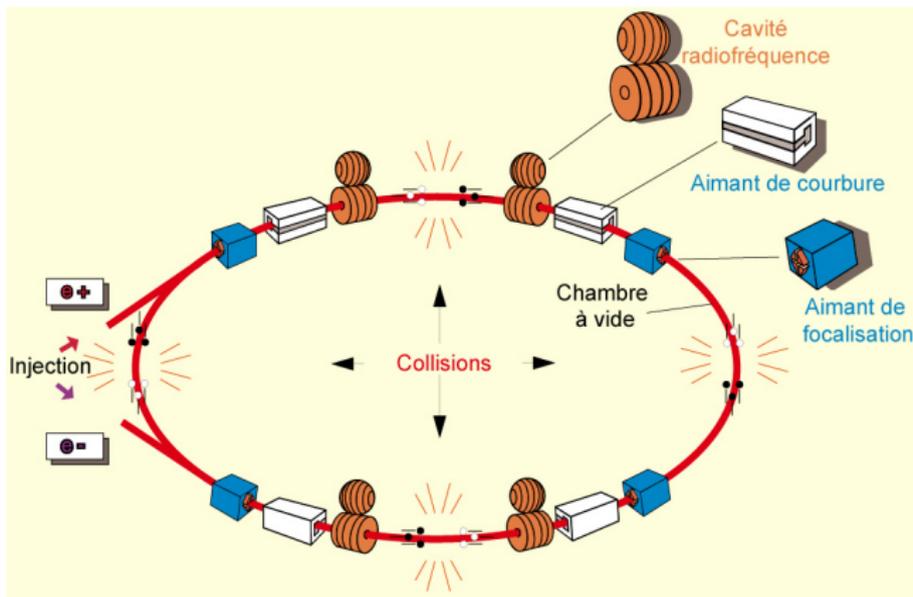
- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$

- Toute particule décrite par une **superposition** d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$

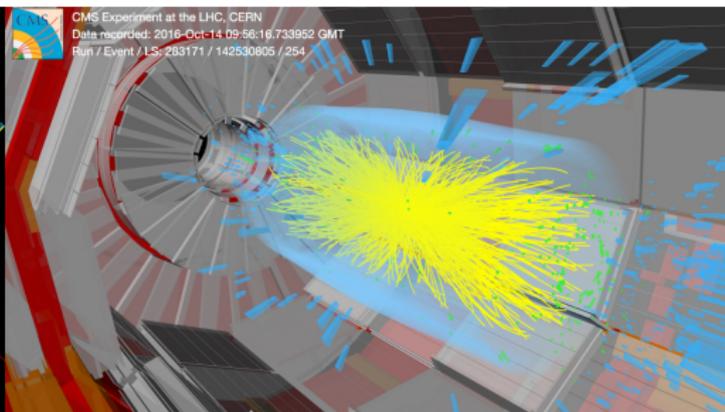
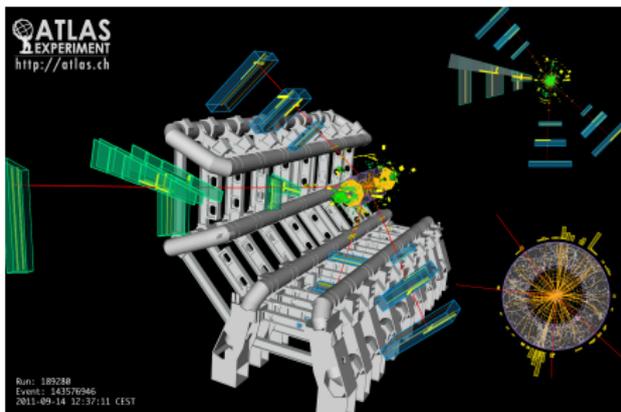




# Accélérer

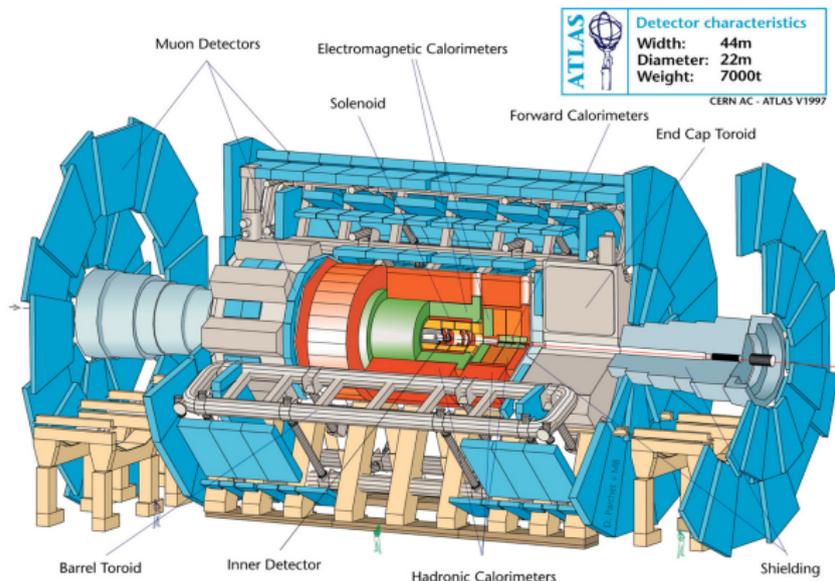


- ▶ projectiles chargés (électron, proton) gardés sur une trajectoire "circulaire" par  $\vec{B}$  (aimants dipolaires, quadrupolaires...)
- ▶ à chaque tour, gagnent de l'énergie par  $\vec{E}$  (cavités radiofréquence)
- ▶ mise en paquets séparés les uns des autres
- ▶ collisions de deux faisceaux en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



- ▶ Un évènement est le résultat d'une collision, tel qu'il sera enregistré par les détecteurs
- ▶ Problème au LHC: collisions très rapides et nombreuses, engendrant l'empilement des évènements

# Détecter (1)



- ▶ Plusieurs couches, spécialisées selon le type de particules
- ▶ Liquide ou solide perturbé par le passage de particules

## Détecter (2)

Les détecteurs de particules servent à identifier et mesurer les caractéristiques des particules mises en jeu dans une réaction d'accélérateurs ou de particules d'origine cosmique. Ses fonctions principales sont :

- ✓ Déterminer la trajectoire des particules chargées
- ✓ Déterminer leur charge électrique et leur impulsion
- ✓ Identifier la nature des particules
- ✓ Mesurer l'énergie des particules neutres

## Détecter (3)

Déterminer la trajectoire des particules chargées: quelques exemples de détecteurs.

A/ Chambre à fils (G.Charpak, 1970)

B/ Chambres à dérive

C/ Détecteurs à semi-conducteurs

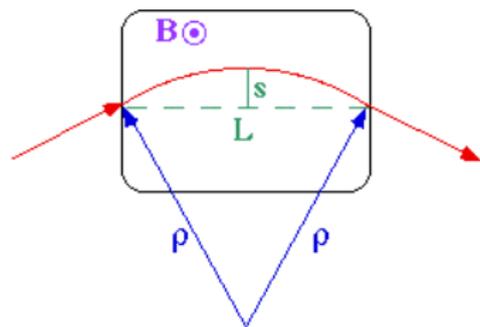
D/ History: chambres à bulles



Il est intéressant de noter qu'une particule du point de vue d'un détecteur (ou d'un accélérateur d'ailleurs) se comporte comme un objet ponctuel de masse et de charge définie dans des champs électromagnétiques macroscopiques.

## Détecter (4)

### Mesurer l'impulsion



$$\rho = \frac{L^2}{8s} + \frac{s}{2}$$

*Un peu de géométrie: la corde et la flèche.*

$$p_{\perp} c(\text{MeV}) = 300B(\text{T})\rho(\text{m}) \sim 300B \frac{L^2}{8s}$$

# Détecter (5)

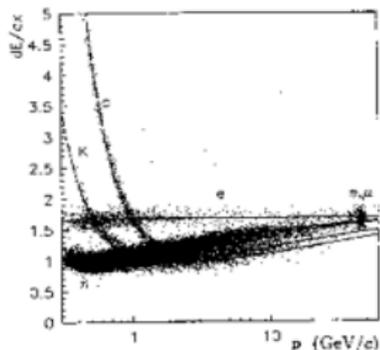
## Identifier la nature des particules chargées

A/ La perte d'énergie linéique par ionisation.

$$-\frac{dE}{\rho dx} = \frac{4\pi N_A \alpha_{em}^2}{m_e c^2} \times \frac{Zz^2}{A\beta^2} \times \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\epsilon}{2} - \frac{\delta}{2} \right]$$

$$-\frac{dE}{dx} = f(\beta\gamma) \text{ avec } \beta\gamma = \frac{p}{m}.$$

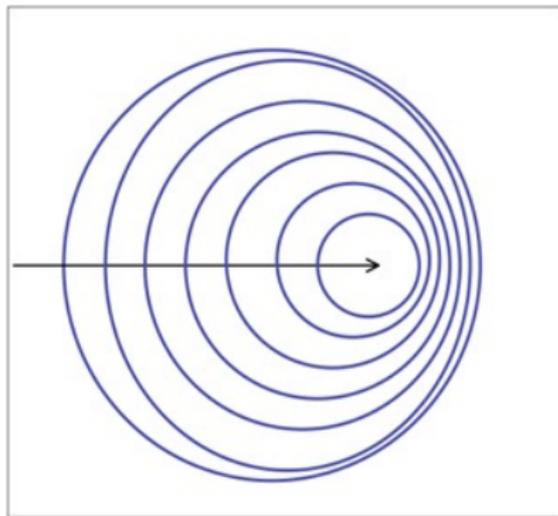
B/ Effet Cerenkov (voir diapositives d'après).



## Détecter (6)

### Identifier la nature des particules chargées

B/ Effet Cerenkov: un effet de milieu.

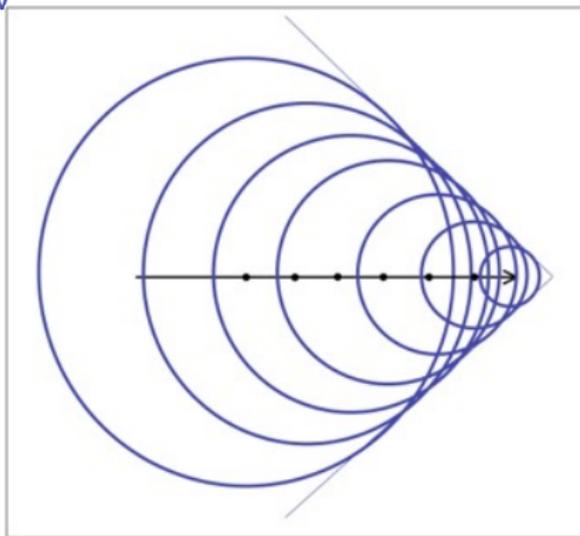


Particule  $v < c/n$

## Détecter (7)

### Identifier la nature des particules chargées

B/ Effet Cerenkov



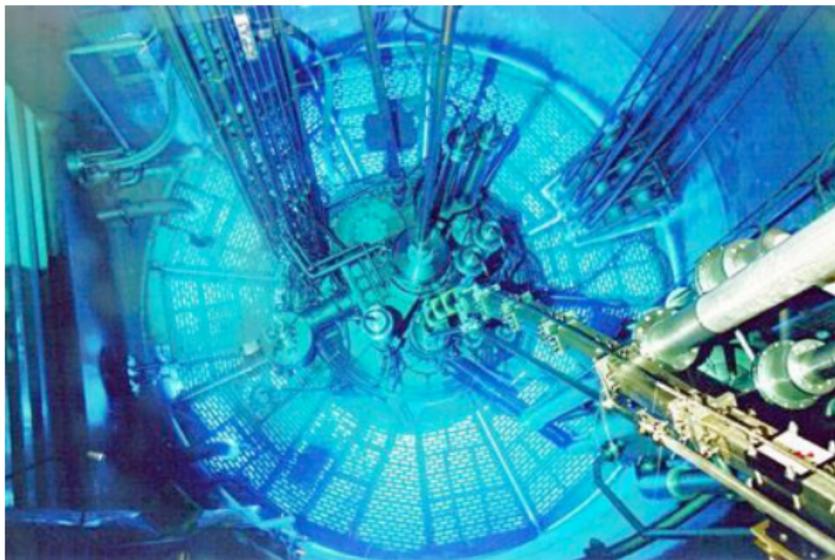
Particule  $v > c/n$

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$

# Détecter (8)

## Identifier la nature des particules chargées

B/ Effet Cerenkov : un bleu unique (photo de piscine)

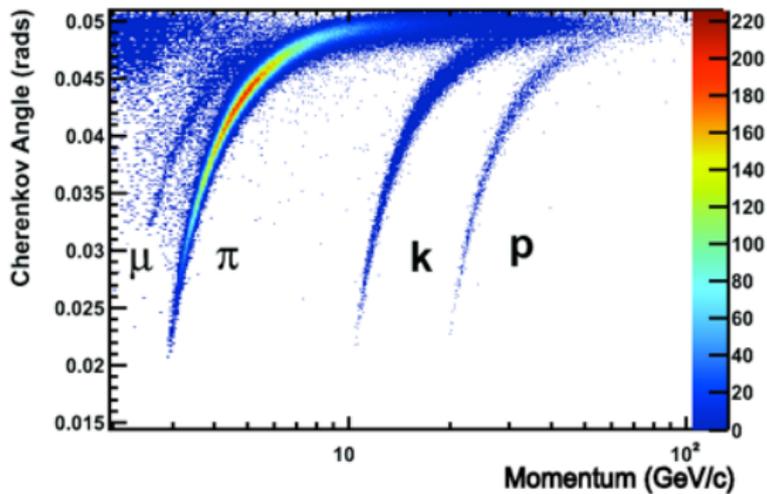


© CEA

# Détecter (9)

Identifier la nature des particules chargées

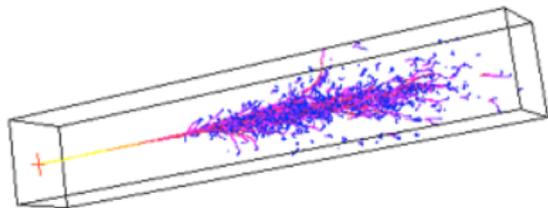
B/ Effet Cerenkov: LHCb RICH.



# Détecter (10)

## Identifier et mesurer les neutres: calorimétrie

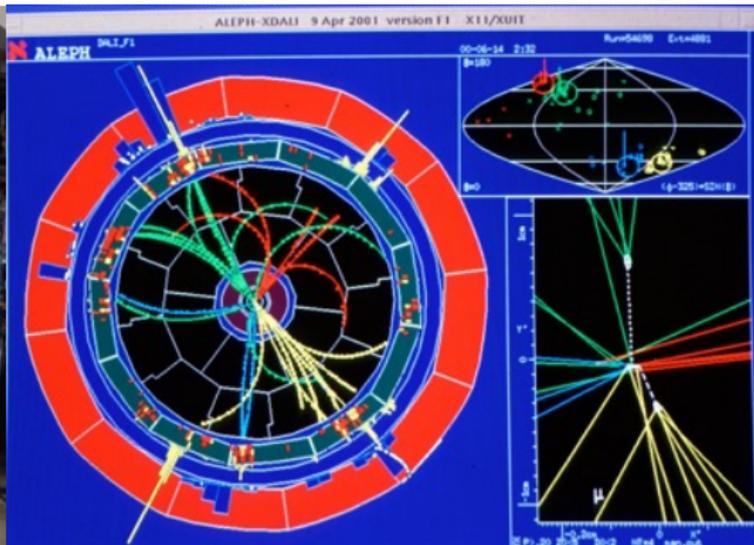
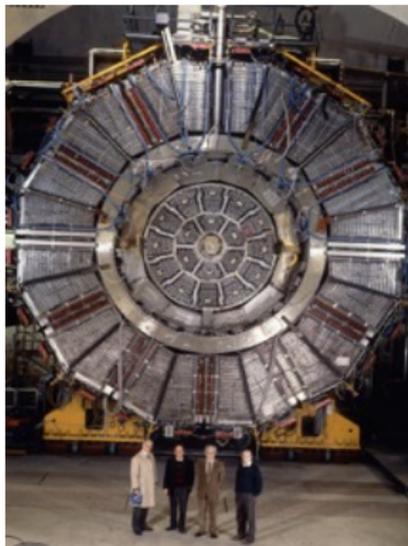
- ✓ Les électrons commencent par perdre leur énergie par rayonnement de freinage.
- ✓ Les photons perdent leur énergie par création de paires, diffusion Compton et effet photoélectrique.
- ✓ Les positrons s'annihilent avec les électrons du milieu pour produire des photons.
- ✓ Ci-contre un électron de 20 GeV dans du fer.



# Détecter (11)



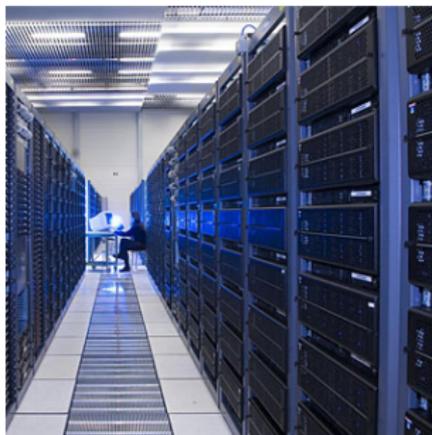
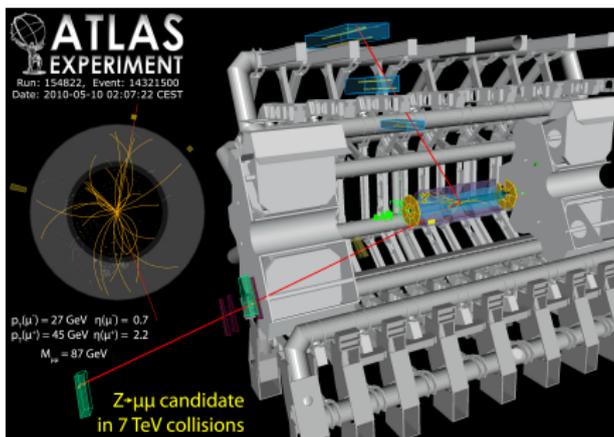
Tous détecteurs mis ensemble: ALEPH



# Enregistrer et analyser (1)

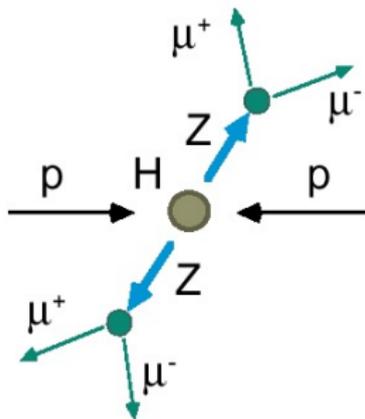
Près de **600 millions** de collisions par seconde dans les détecteurs

- ▶ 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)



## Enregistrer et analyser (2)

- ▶ 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



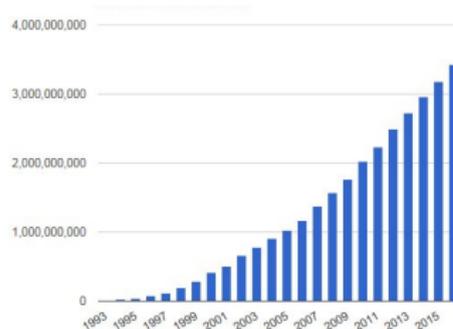
# Enregistrer et analyser (4)

A la fin de l'année 1990, on a:

- Le protocole de transfert des données: [http](http://www.cern.ch)
- Une manière de joindre les documents <http://www.cern.ch>.
- Un langage pour écrire ces pages : html
- Le premier navigateur web (xmosaic dans mon souvenir)
- Le premier serveur web <http://info.cern.ch>



© Clara Gaspar



# Enregistrer et analyser (5)

Le Cern fut pionnier ou a joué un rôle prééminent dans les développements du calcul informatique:

Ingénieurs et techniciens des compagnies informatiques en séjour au Cern pour servir les besoins de la Physique. Un bénéfice mutuel.



# Enregistrer et analyser (6)

## Quelques citations brillantes:

© Clara Gaspar

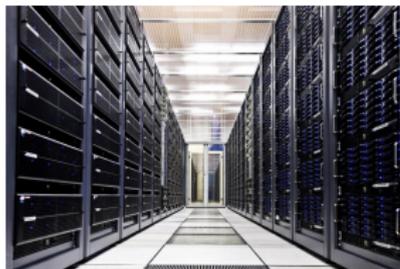
- Dans le futur, les ordinateurs pourront peser moins de 1.5 tonnes.  
Popular mechanics, 1949
- Je crois qu'il existe un marché mondial pour cinq grands ordinateurs.  
Thomas Watson, président d'IBM, 1943.
- J'ai rencontré les personnes les plus intelligentes du pays et je peux vous assurer que le traitement des données est une mode passagère  
L'éditeur principal du business books de Prentice-Hall - 1957
- Mais à quoi ça sert? (à propos du premier microprocesseur)  
Ingénieur de la division de Calcul avancée d'IBM.
- Il n'y a aucun marché pour l'ordinateur domestique.  
Ken Olson, 1977, DEC.

# Enregistrer et analyser (7)

Aujourd'hui, en précurseur du calcul de cloud, les données du LHC sont analysées au moyen de grilles de calcul.

De la collection à l'écriture des données

© Clara Gaspar



Jusqu'à l'analyse finale des données

# Enregistrer et analyser (8)



Un résumé personnel:

Les avancées technologiques discutées dans les diapositives précédentes ont été stimulées / engendrées par des questions de recherche fondamentale.

Au CERN sont nés :

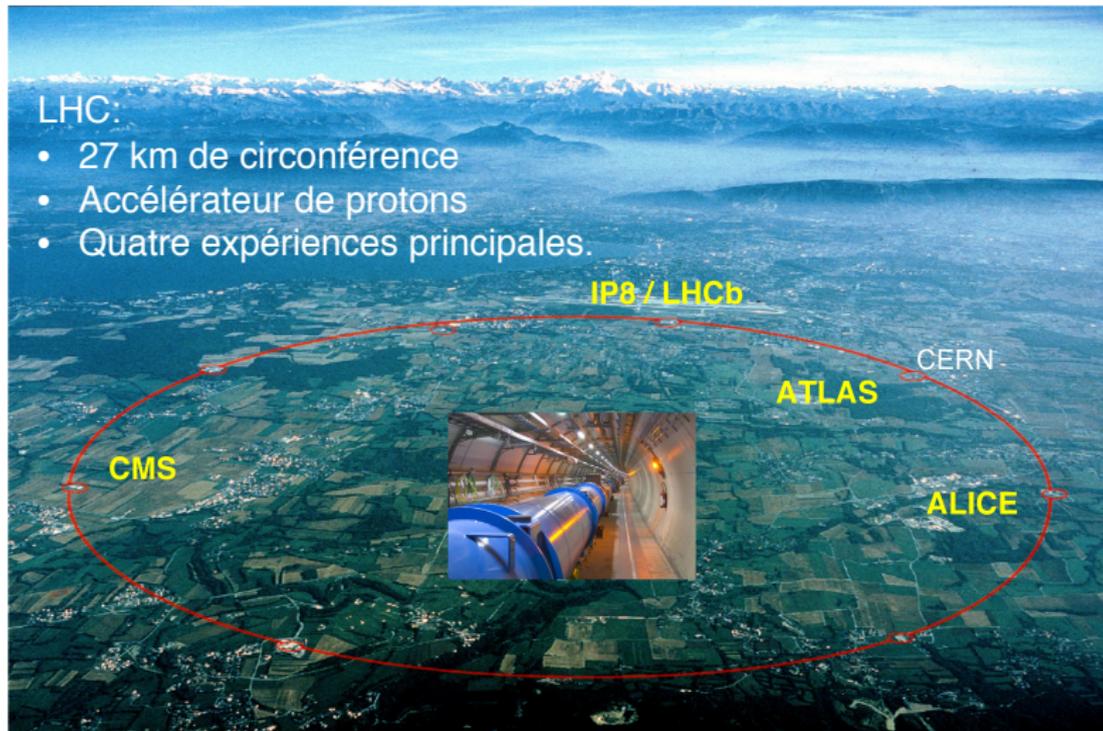
- la souris (pour piloter le SPS)
- les écrans tactiles (capacitifs)
- le world wide web



# Le LHC (1)

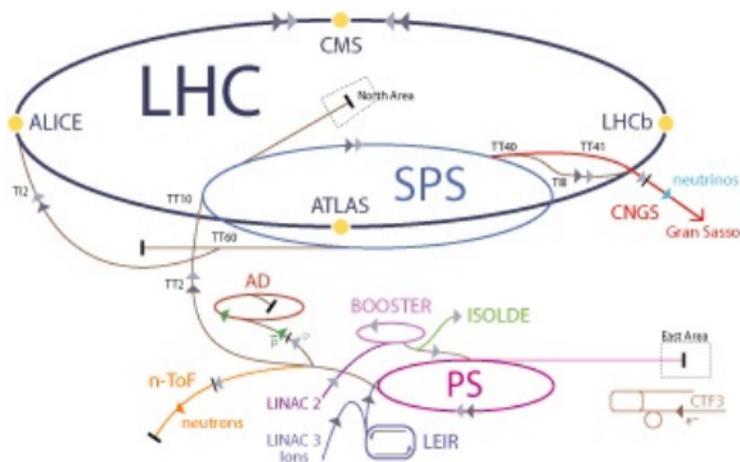
LHC:

- 27 km de circonférence
- Accélérateur de protons
- Quatre expériences principales.



## Le LHC (2)

- C'est un peu plus compliqué que tracer un cercle sur une photo ...



## Le LHC (3)

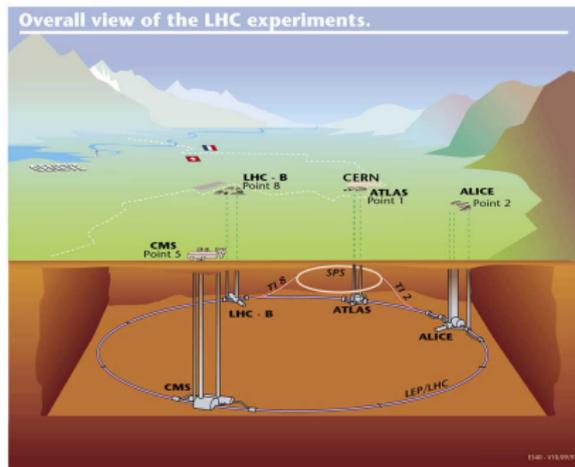
- ▶ Sur 27 km de circonférence, 2 faisceaux de protons
- ▶ déviés par plus de 1500 **aimants** (de 5 à 7m chacun)
- ▶ refroidis à  $-271^{\circ}\text{C}$  (plus froid que l'espace !): **supraconducteurs**



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

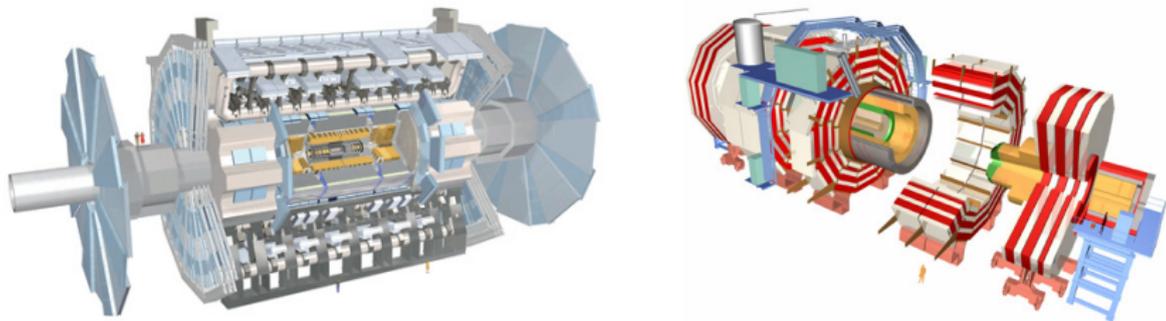
- ▶ L'énergie cinétique d'un Airbus A380 voyageant à 700 km/h
- ▶ Elle suffirait à faire fondre plusieurs tonnes de cuivre

# Le LHC (4)



- ▶ Environ 3000 paquets contenant chacun 100 milliards de protons
- ▶ Séparés de seulement 25 nanonescondes
- ▶ Chaque faisceau concentre l'énergie d'un TGV à 300 km/h
- ▶ 10 000 tours/s, un milliard de collisions/s, pendant 20h
- ▶ En faisceaux plus fins qu'un cheveu humain lors des collisions
- ▶ Les protons restants auront fait 4 fois la distance Terre-Neptune

## Le LHC (5)

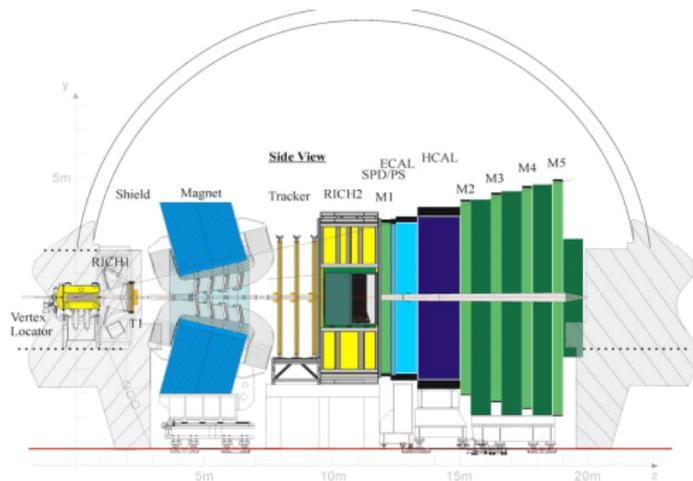


ATLAS et CMS (2 des 4 expériences principales)

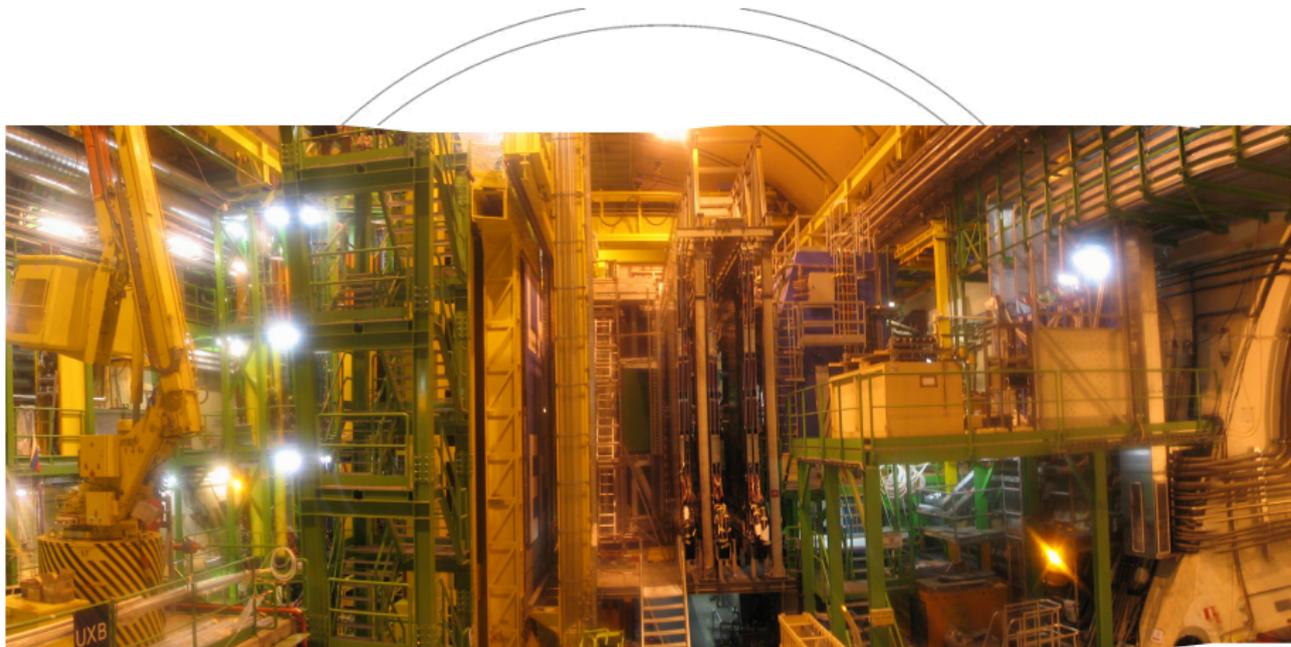
- ▶  $46\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$  (ATLAS) et  $21\text{ m} \times 15\text{ m} \times 15\text{ m}$  (CMS)
- ▶ 7000 tonnes (ATLAS) et 12500 tonnes (CMS) [ $\sim$  Tour Eiffel]
- ▶ Pour chacune, plusieurs milliers de scientifiques venant d'une quarantaine de pays [le CERN est une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

# Le LHC (6)

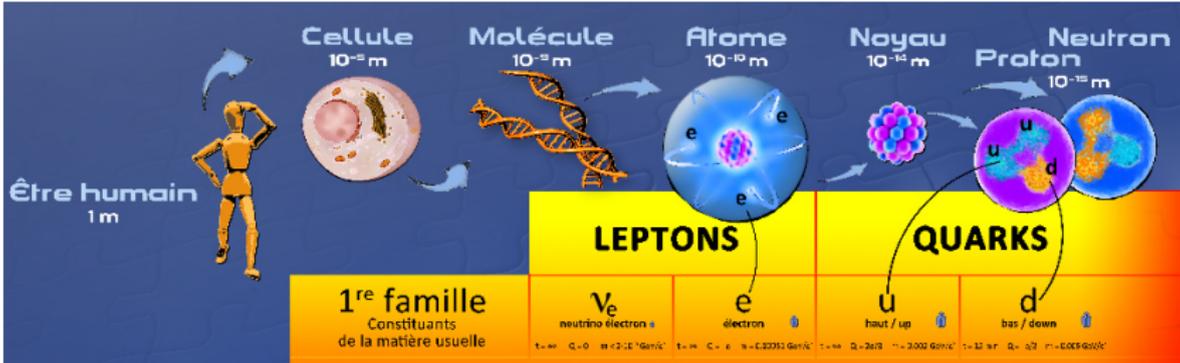
- LHCb est une troisième expérience du LHC.
- Le LHC produit 1000 milliards de paires de quarks beaux par an dont les désintégrations peuvent être enregistrées par LHCb.
- Elle mesure les asymétries entre particules et antiparticules (belles et/ou charmées).



# Le LHC (7)



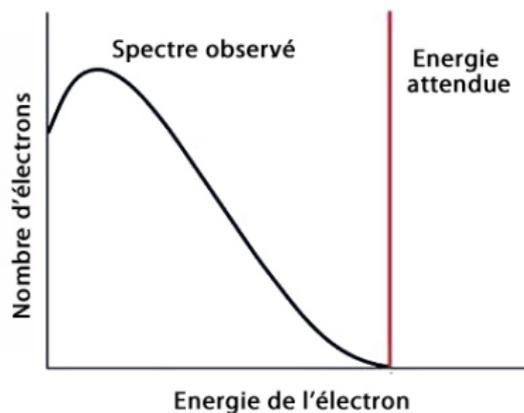
# La matière ordinaire



- ▶ 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 Higgs
	d	s	b	g	
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Z	
	e	$\mu$	$\tau$	W	Forces
	3 générations				

# Le neutrino

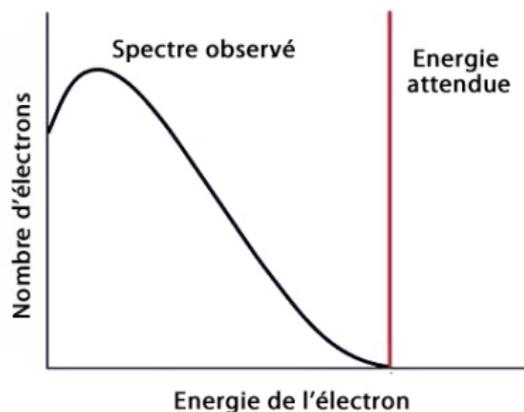


1930: si les désintégrations  $\beta$  conservent l'énergie,  $X \rightarrow Y + e^-$  aboutirait à  $E_e$  fixe

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

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

# Le neutrino



1930: si les désintégrations  $\beta$  conservent l'énergie,  $X \rightarrow Y + e^-$  aboutirait à  $E_e$  fixe

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

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

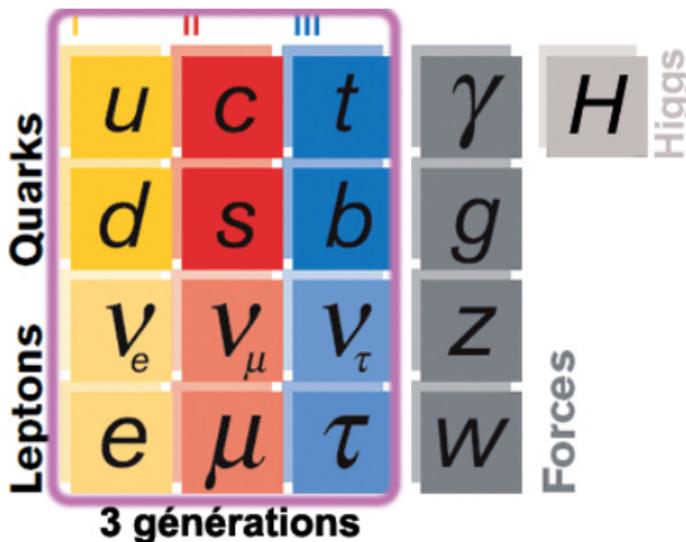
1956 : détection du neutrino électronique par Reines et Cowan auprès d'une centrale nucléaire, selon la réaction  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$



# Les trois générations



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



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

# Carte d'identité d'une particule

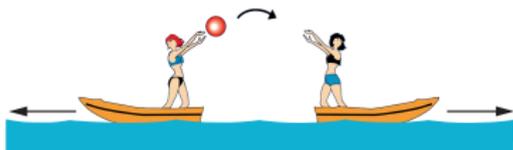
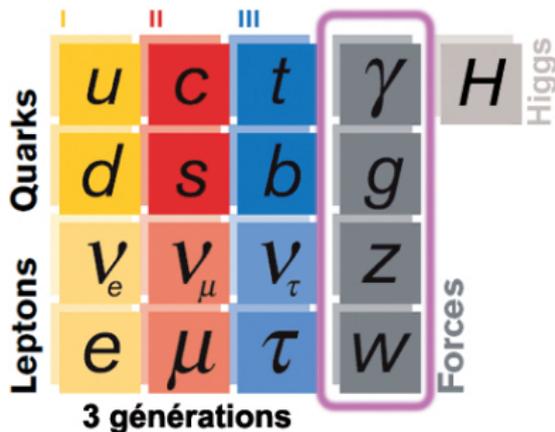


- ▶ Nom
- ▶ Constitution (si particule composite)
- ▶ Masse
- ▶ Spin (moment angulaire intrinsèque, d'origine quantique)
- ▶ Sensibilité aux interactions (charge électrique, couleur. . . )
- ▶ Durée de vie
- ▶ Modes de désintégration (dans des particules plus légères), et probabilités associées
  - ▶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

<b><math>c\bar{c}</math> MESONS</b>		
<b><math>\eta_c(1S)</math></b>	$J^{PC} = 0^{-+}(0^{-+})$	
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 (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
$K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)$	(9.2 $\pm$ 3.4) $\times 10^{-3}$	1194
$K^{*0} \bar{K}^{*0} \pi^+ \pi^-$	(1.1 $\pm$ 0.5) %	1071
$\phi K^+ K^-$	(2.0 $\pm$ 1.4) $\times 10^{-3}$	1102
$\phi\phi$	(2.7 $\pm$ 0.9) $\times 10^{-3}$	1087
$\phi 2(\pi^+ \pi^-)$	< 2.5	90% 1240
$a_0(980)\pi$	< 2	90% 1325
$a_0(1320)\pi$	< 2	90% 1194
$K^*(892)K + c.c.$	< 1.08	90% 1308
$f_0(1270)\eta$	< 1.1	90% 1143
$\omega\omega$	< 3.1	90% 1268
$\omega\phi$	< 1.7	90% 1183
$f_0(1270)f_0(1270)$	(7.6 $\pm$ $\frac{1.4}{0.4}$ ) $\times 10^{-3}$	771
$f_0(1270)f_0'(1525)$	(1.0 $\pm$ $\frac{0.5}{0.4}$ ) %	500
<b>Decays into stable hadrons</b>		
$K\bar{K}\pi$	(7.0 $\pm$ 1.2) %	1379
$\eta\pi\pi$	(4.9 $\pm$ 1.8) %	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) $\times 10^{-3}$	1063
$2(\pi^+ \pi^-)$	(1.20 $\pm$ 0.30) %	1457
$3(\pi^+ \pi^-)$	(1.5 $\pm$ 0.5) %	1405
$\rho\rho$	(1.3 $\pm$ 0.4) $\times 10^{-3}$	1159
$\rho\omega$	(1.04 $\pm$ 0.31) $\times 10^{-3}$	988
$K\bar{K}\eta$	< 3.1	90% 1263
$\pi^+ \pi^- \rho^0$	< 1.2	90% 1025
<b>Radiative decays</b>		
$\gamma\gamma$	(1.8 $\pm$ $\frac{0.6}{0.6}$ ) $\times 10^{-4}$	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 electron	$e$ electron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	
	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	
	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	
<b>INTERACTIONS FONDAMENTALES</b> 10 <sup>-17</sup> m infinie 10 <sup>-15</sup> m infinie					

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 electron	e electron	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 beau / beauty / bottom
<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 electron	e electron	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 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 beau / beauty / bottom
<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
- ▶ **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	e electron	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 beau / beauty / bottom
<b>INTERACTIONS FONDAMENTALES</b>				
Portée				
$10^{-17}$ m	Interaction faible			
infinie	Interaction électromagnétique			
$10^{-15}$ m	Interaction forte			
infinie	Gravitation			

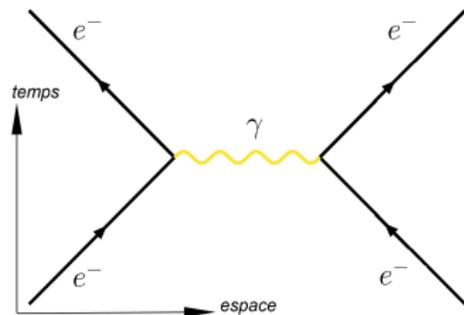
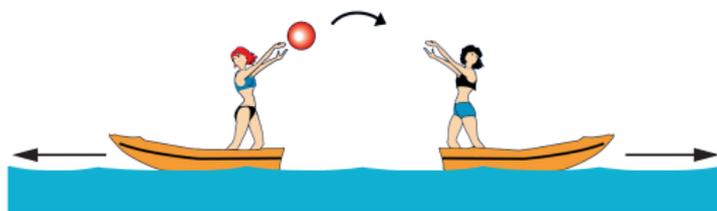
Les trois interactions ne parlent pas toutes aux mêmes particules élémentaires

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

- ▶ **Electromagnétique:** particules chargées, atomes comme états liés électrons-noyau, interaction lumière-matière
- ▶ **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  $\beta$ )

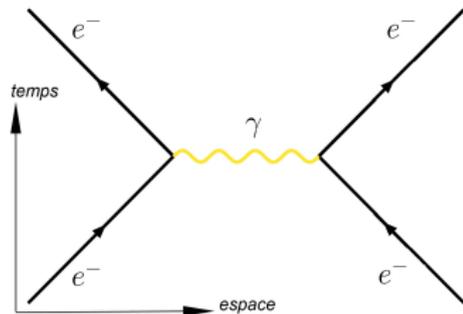
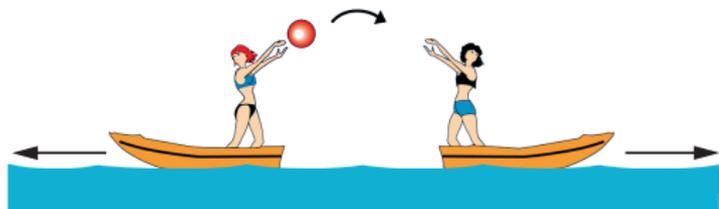
# Interaction électromagnétique

- ▶ 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

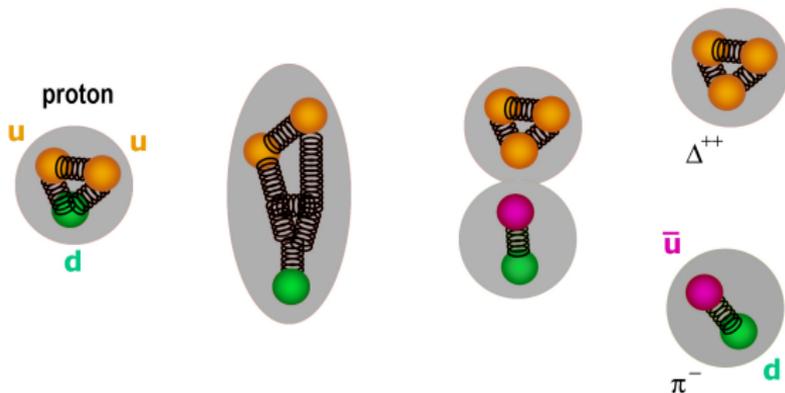
- ▶ Boson médiateur : **photon** de masse nulle
- ▶ Interagit avec les particules chargées électriquement
- ▶ A grand  $r$ , potentiel  $V(r) \sim 1/r$  de portée infinie



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

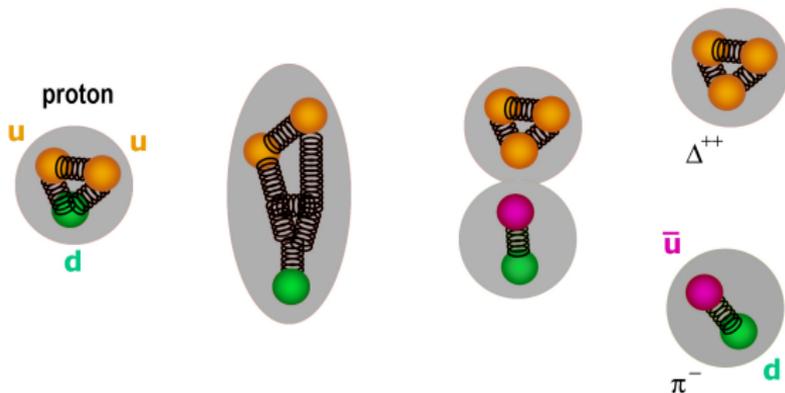
# Interaction forte

- ▶ 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

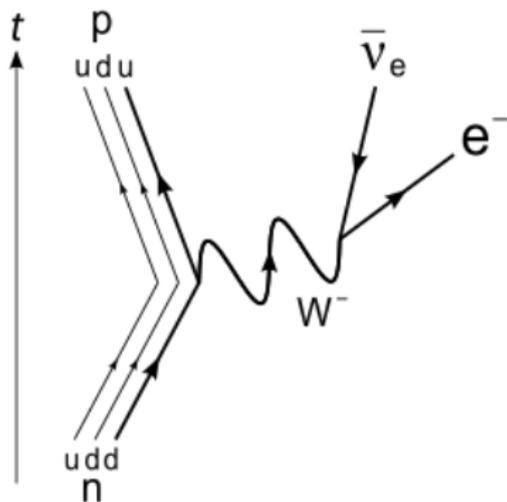


- ▶ Bosons médiateurs : 2 bosons chargés électriquement  $W^\pm$  et un boson neutre  $Z^0$ , massifs (80 à 90 GeV)
- ▶ Interagit avec tout le monde, hormis les gluons
- ▶  $V(r) \propto e^{-Mr}/r$  avec  $M = M_{W,Z}$ , portée d'ordre  $10^{-17}m$

# 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  $10^{-17}m$

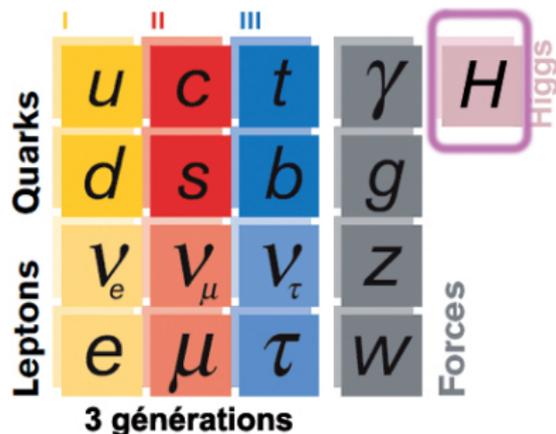


- ▶ Portée **subatomique**, pas d'état lié
- ▶ Désintégrations, en particulier désintégration nucléaire  $\beta$
- ▶ ... via un boson  $W^\pm$  impliquant ( $u, d$ ) et/ou ( $e, \nu_e$ )
- ▶ ... ou leurs copies plus lourdes des autres familles
- ▶ Certains bosons médiateurs ( $W^\pm$ ) chargés électriquement

# 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

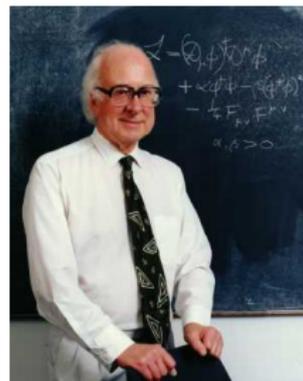
- ▶ Indice de réfraction  $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- ▶ Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité  $c_{\text{vide}}$
- ▶ ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- ▶ Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement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



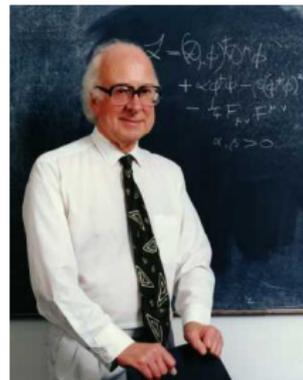
## Problème similaire dans le Modèle Standard

- ▶ 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) !



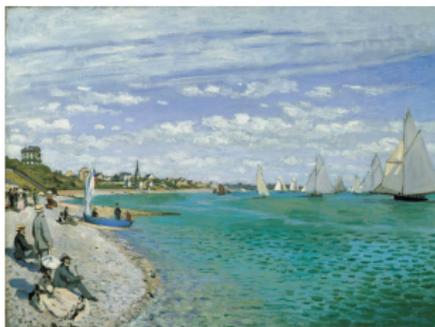
## Problème similaire dans le Modèle Standard

- ▶ 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

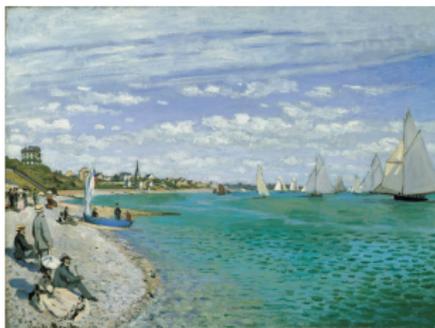
- ▶ description relativiste et quantique des particules élémentaires
- ▶ particule = excitation d'un champ (quantique)
- ▶ qui se propage comme une vague se déplaçant sur la mer



# 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)

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



*Boson de Higgs responsable de la masse des particules*

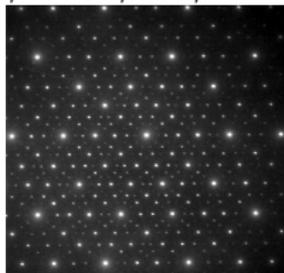
# De la masse oui, mais pas de toute la masse



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

Élémentaire

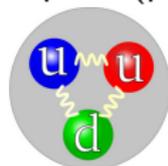
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

Composite

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



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

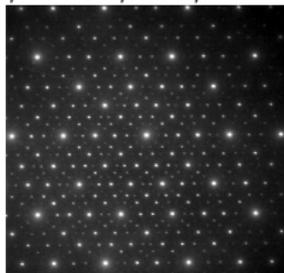
# De la masse oui, mais pas de toute la masse



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

**Élémentaire**

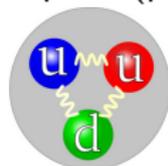
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

**Composite**

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



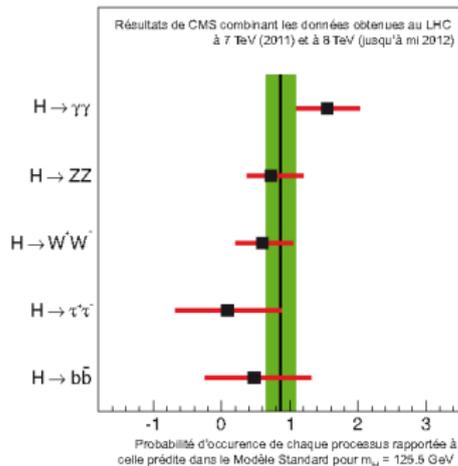
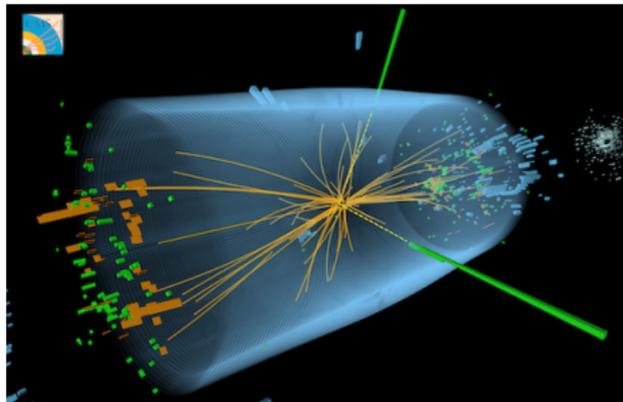
Masse des quarks (Higgs,  $\sim 1\%$ ) + E de  
"liaison" (inter. forte,  $\sim 99\%$ )

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 !

# Champagne pour le LHC



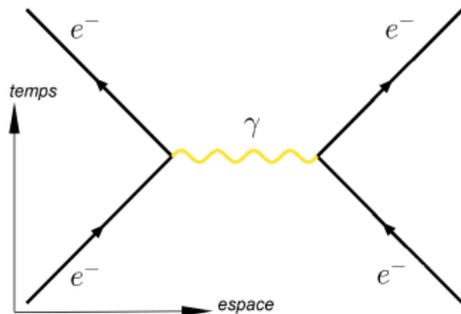
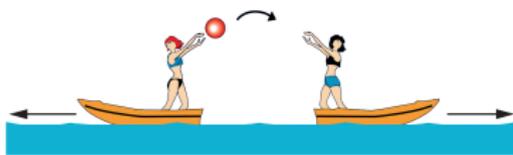
- ▶ 4 juillet 2012: ATLAS et CMS voient un signal de type boson  $H$
- ▶ Et plus on l'étudie, plus il ressemble au boson  $H$  du Modèle Standard

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

# Les diagrammes de Feynman

## Théorie quantique des champs

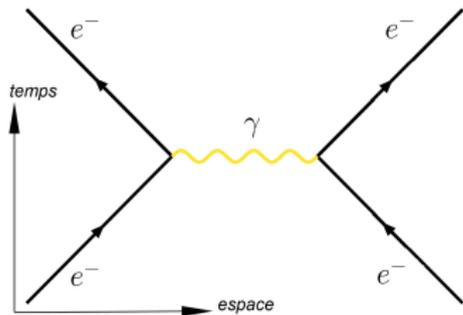
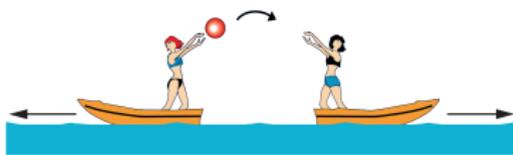
- ▶ quantique: seulement proba, somme sur toutes les possibilités
- ▶ relativiste: pas de tps et espace abs, équivalence masse énergie



# Les diagrammes de Feynman

## Théorie quantique des champs

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



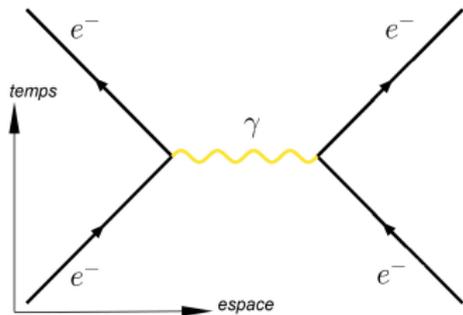
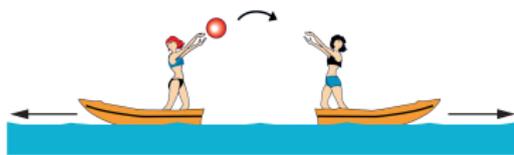
## ▶ Diagramme de Feynman

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

# Les diagrammes de Feynman

## Théorie quantique des champs

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



### ▶ Diagramme de Feynman

- ▶ Ligne = propagation d'un point d'espace-temps à un autre
- ▶ Flèche = charges, en particulier électrique (particule vs antipart)
- ▶ Vertex = interaction (création/annihilation de particules)
- ▶ Probabilité  $|A|^2$ , avec  $A$  amplitude complexe

- ▶  $A = [\text{couplage } e-\gamma] \times [\text{propagation du photon}] \times [\text{couplage } \mu-\gamma]$

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

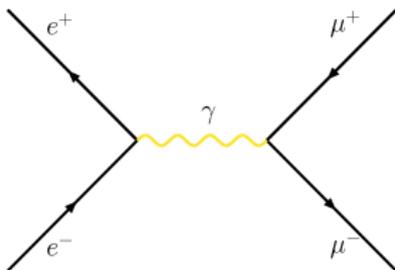
# La théorie des perturbations



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

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

- ▶ Chaque puissance de  $\alpha$  correspond à un échange de photon



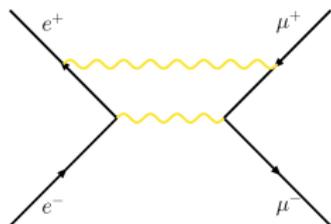
# La théorie des perturbations



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

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

- ▶ Chaque puissance de  $\alpha$  correspond à un échange de photon



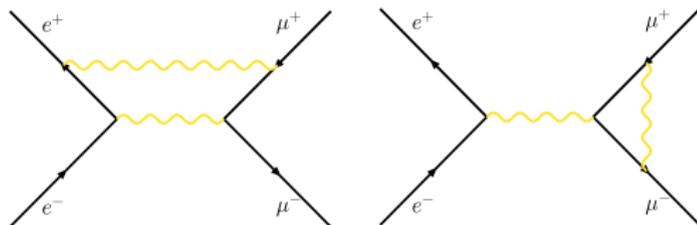
# La théorie des perturbations



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

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

- ▶ Chaque puissance de  $\alpha$  correspond à un échange de photon



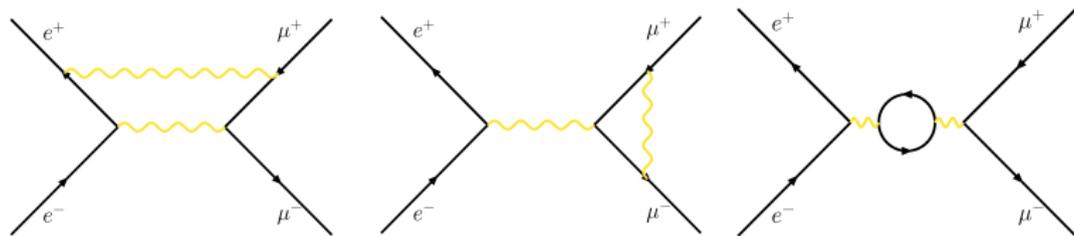
# La théorie des perturbations



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

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

- ▶ Chaque puissance de  $\alpha$  correspond à un échange de photon



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

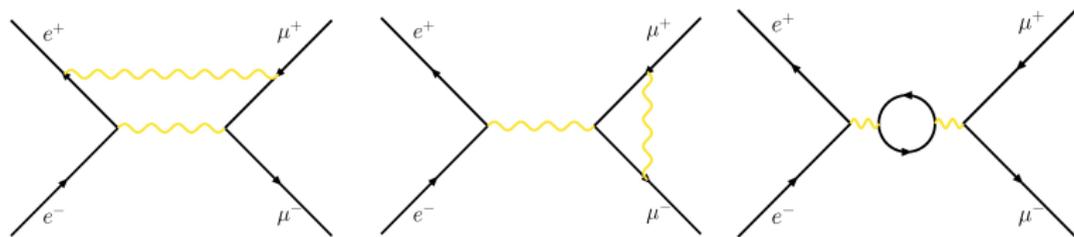
# La théorie des perturbations



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

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

- ▶ Chaque puissance de  $\alpha$  correspond à un échange de photon



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

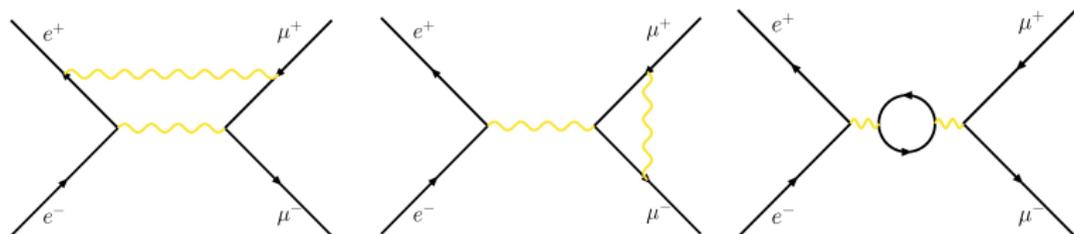
# La théorie des perturbations



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

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

- ▶ Chaque puissance de  $\alpha$  correspond à un échange de photon



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

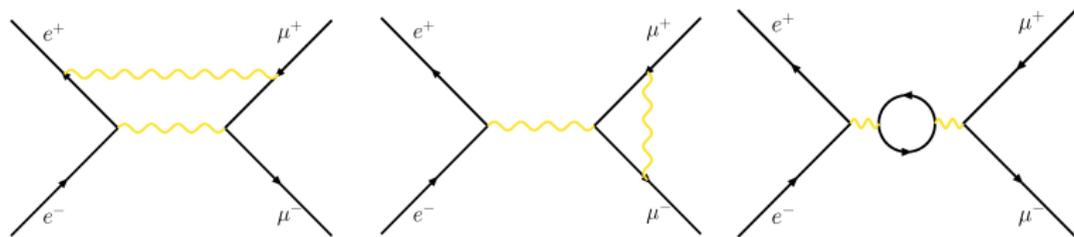
# La théorie des perturbations



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

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

- ▶ Chaque puissance de  $\alpha$  correspond à un échange de photon

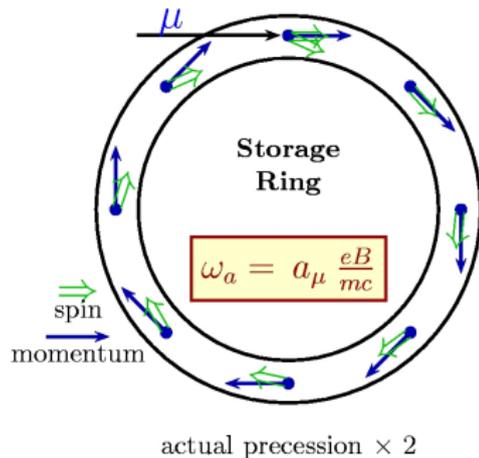


- ▶ Nombreux diagrammes non-classiques : relativiste (paires particule-antiparticule) + quantique (somme sur toutes configs)
- ▶ Somme sur toutes les impulsions possibles des particules internes qui sont virtuelles (ne satisfaisant pas  $E^2 \neq \vec{p}^2 + m^2$ )
- ▶ Avec toutes les particules chargées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

# Des tests du Modèle standard: $(g - 2)_\ell$ (1)

**Moment magnétique anormal** de  $e, \mu, \tau$ :  
interaction avec un champ magnétique  
(precession selon le facteur de Landé  $g$ )

$$\mu_\ell = g_\ell \frac{e}{2m_\ell} \quad a_\ell = \frac{g_\ell - 2}{2}$$

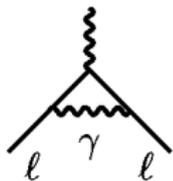


# Des tests du Modèle standard: $(g - 2)_\ell$ (1)

**Moment magnétique anormal** de  $e, \mu, \tau$ :  
interaction avec un champ magnétique  
(precession selon le facteur de Landé  $g$ )

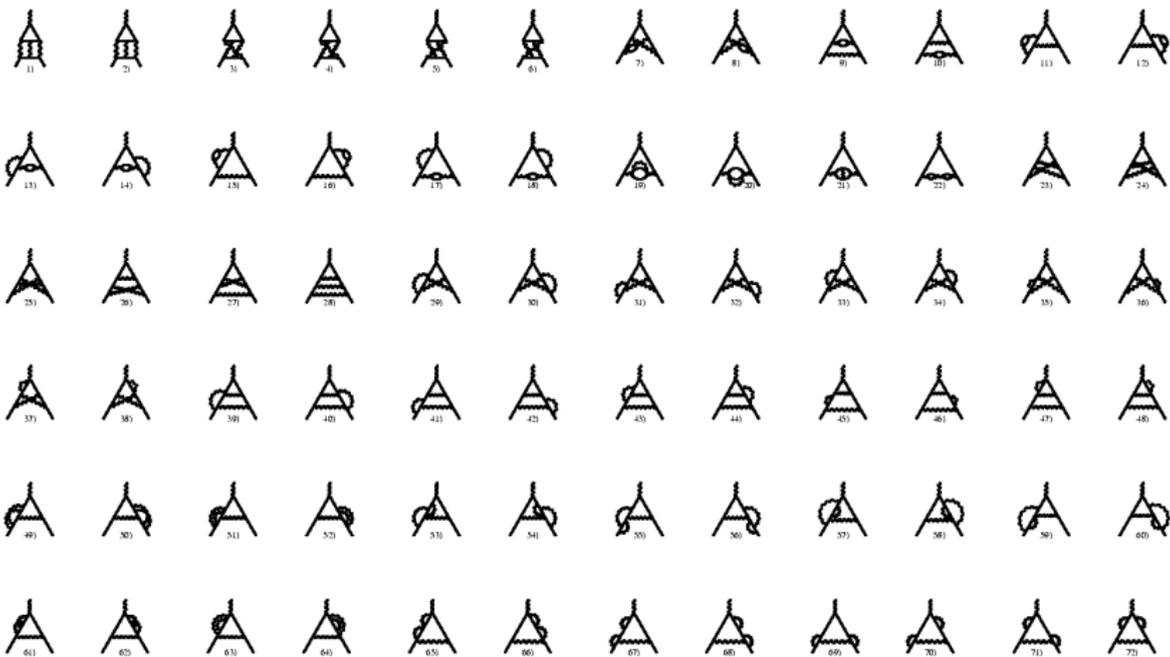


$$\mu_\ell = g_\ell \frac{e}{2m_\ell} \quad a_\ell = \frac{g_\ell - 2}{2}$$



$$a_e = a_\mu = a_\tau = \frac{\alpha}{2\pi}$$





## Des tests du Modèle standard: $(g - 2)_\ell$ (2)

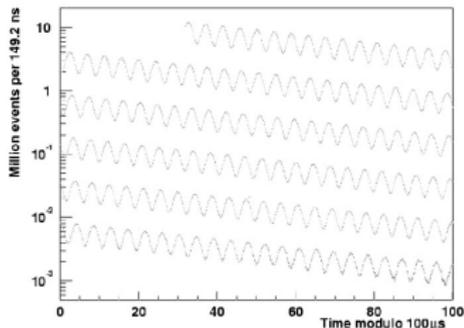
$$a_\mu^{th} = a_\mu^{QED} + a_\mu^{EW} + a_\mu^{had}$$
$$a_\mu^{QED} = \frac{\alpha}{2\pi} + 0.765857425(17) (\alpha/\pi)^2$$
$$+ 24.05050996(32) (\alpha/\pi)^3$$
$$+ 130.8796(63) (\alpha/\pi)^4$$
$$+ 753.3(1.0) (\alpha/\pi)^5 + \dots$$

$$= 116\,584\,718.95(0.08) \cdot 10^{-11}$$

$$a_\mu^{EW} = 153.6(1.0) \cdot 10^{-11}$$

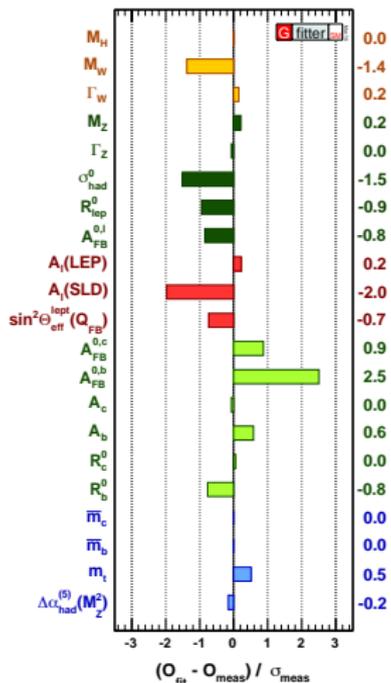
$$a_\mu^{had} = 6930(49) \cdot 10^{-11}$$

$$a_\mu^{th} = (116\,591\,803 \pm 49) \cdot 10^{-11} \quad a_\mu^{exp} = (116\,592\,091 \pm 63) \cdot 10^{-11}$$

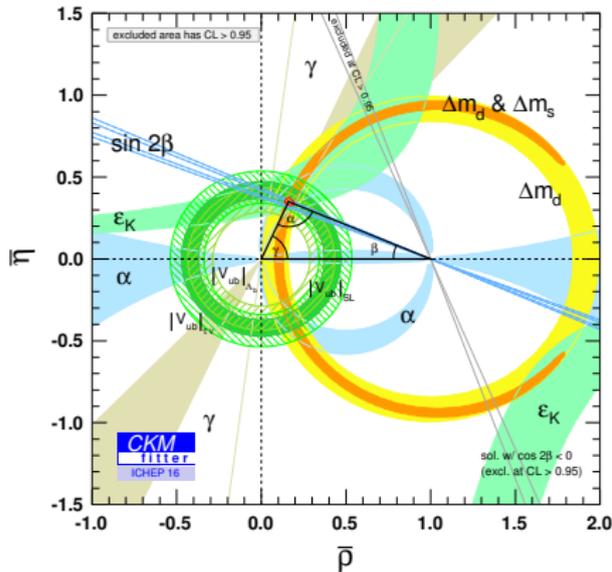


A **ce niveau de précision**, on ne teste plus QED, mais aussi les autres secteurs du Modèle Standard (interaction faible et forte) via les boucles de quarks, les échanges de bosons W et Z...

# Des tests du Modèle standard: interaction faible



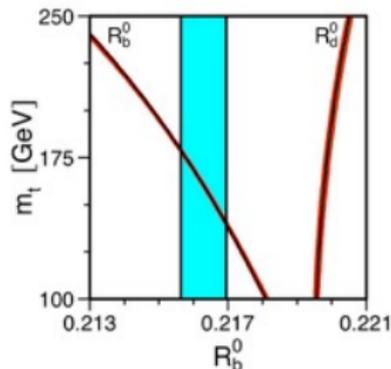
Propriétés du W et Z  
(tests de précision électrofaible)  
LEP (1990-2000)



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

# Des tests du Modèle standard: particules lourdes

Le quark top, même s'il est trop lourd pour être produit directement au LEP, laisse une empreinte à plus basse énergie via les processus virtuels.

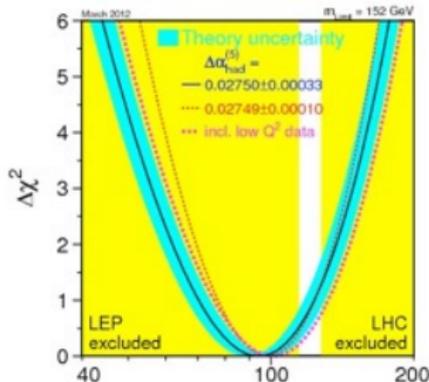


- Measurement
- $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)} = 0.02758 \pm 0.00035$
- $\alpha_s = 0.118 \pm 0.003$
- $m_H = 114 \dots 1000$  GeV

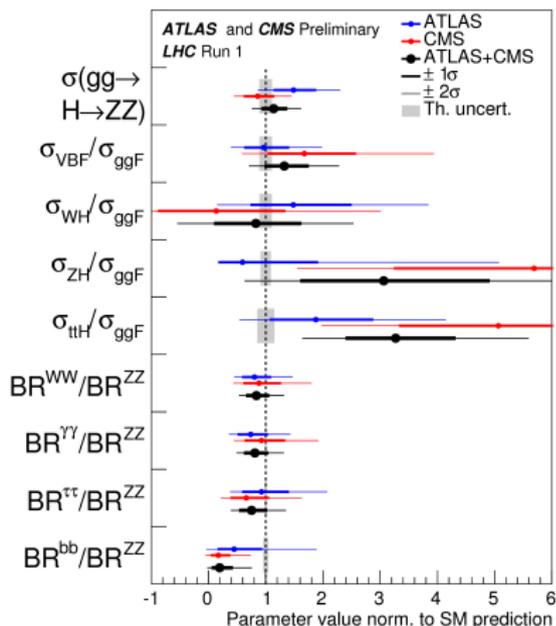
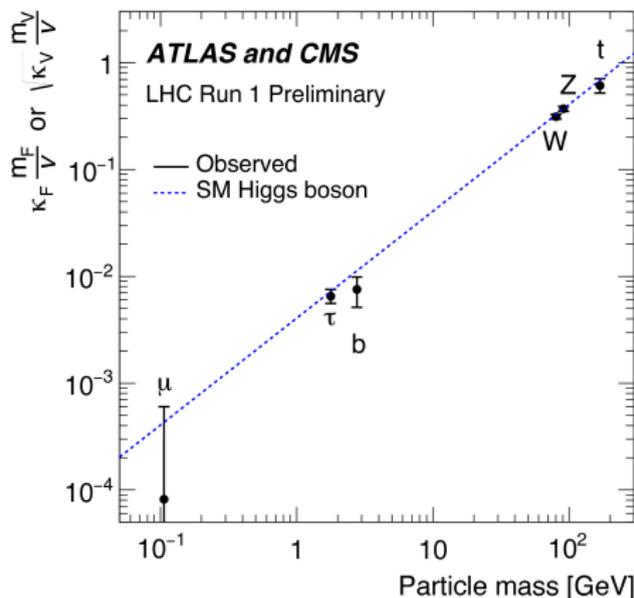
Cette particule a été découverte au Tevatron (Fermilab, Chicago) en 1995. Immense triomphe pour le Modèle Standard. T'Hooft et Veltman récompensés par un prix Nobel en 1999.

$$m_{\text{top}} = 172.6^{+13.3}_{-10.2} \text{ GeV}/c^2 \text{ [(indirect - LEP1)].}$$

De la même manière, avant même la découverte du boson de Higgs, des contraintes indirectes fortes existaient sur sa masse... si on suppose que le Modèle Standard était valide !



# Des tests du Modèle standard: boson $H$



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

# 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