

La masse des particules élémentaires et la recherche du boson de Higgs au LHC

Laurent Vacavant
Centre de Physique des
Particules de Marseille



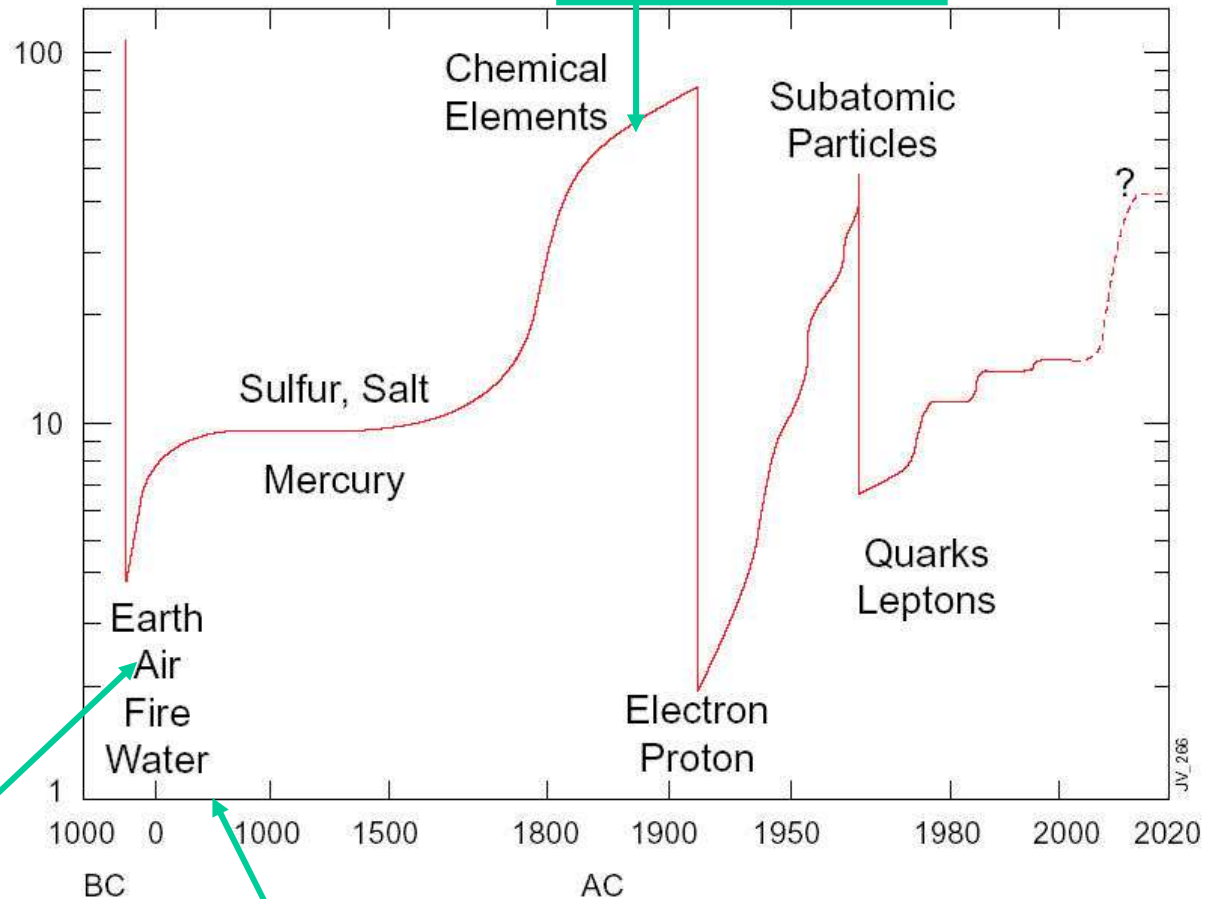
Lycée Daumier - 9 mars 2005

La physique des particules élémentaires

- **Physique des particules**: étude des constituants ultimes de la matière
- **Objectif**: décrire les propriétés du tout à partir de ses parties
 - Les particules de matière (les « briques » formant toute la matière)
 - Les interactions de ces briques
- **Démarche**: réduire le nombre d'éléments, recherche des similitudes/symétries, unification de phénomènes apparemment différents
- Le tout dans un cadre mathématique prédictif

Qui est élémentaire au fil des ages ?

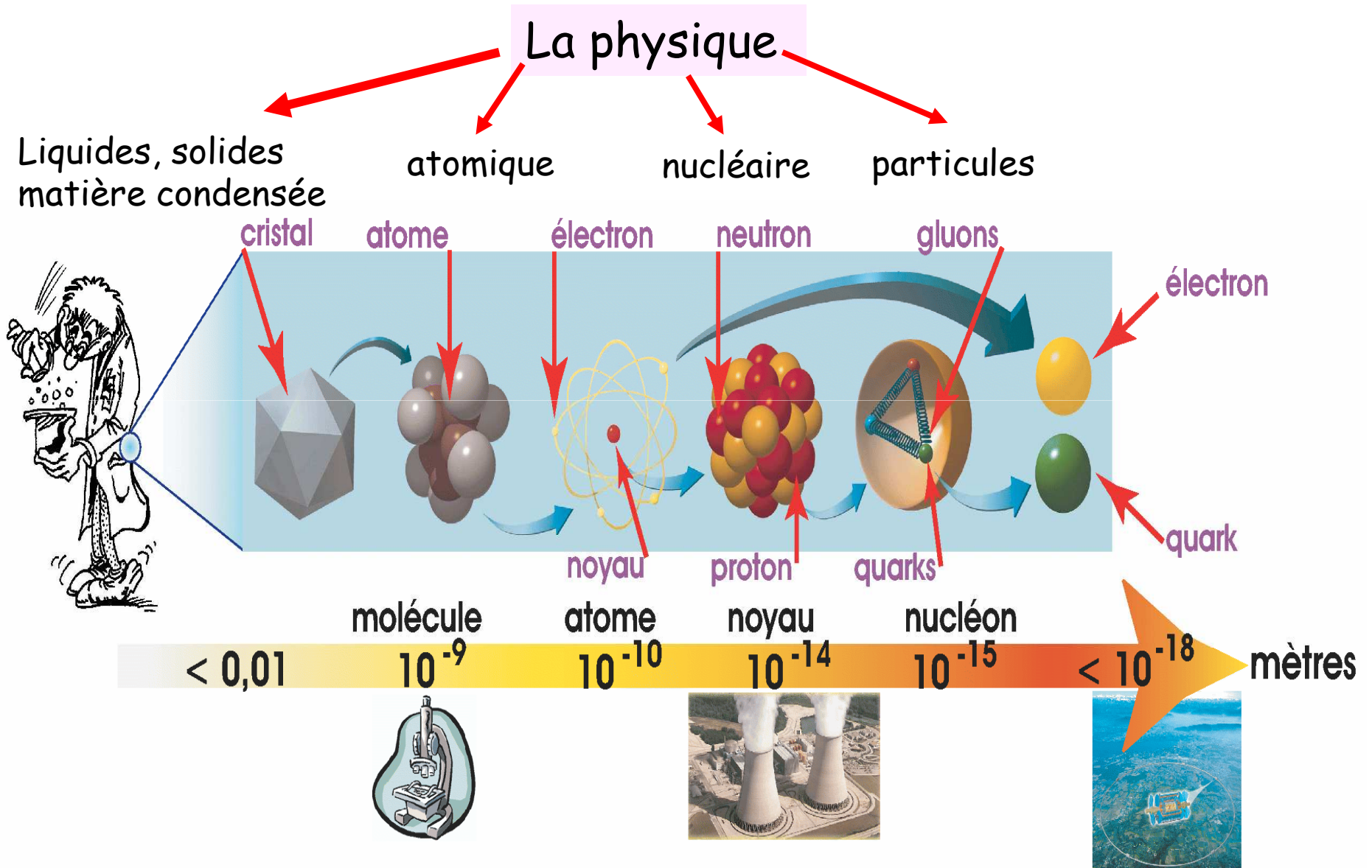
Classification de Mendeleïv



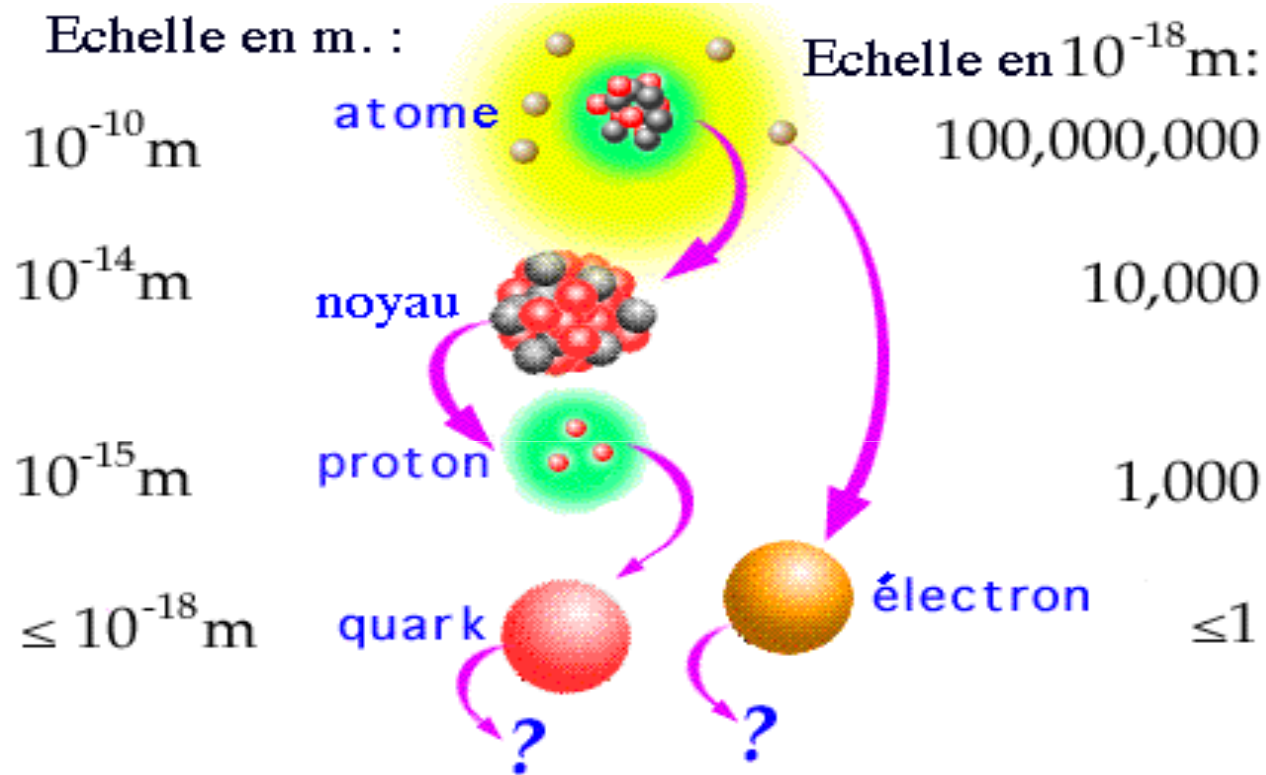
V av.J.C: Thalès, Anaximène

V ap.J.C: idée d'atomes
Leucippe, Démocrite

Voyage vers l'infiniment petit



Les échelles de distance



Les échelles d'énergie et de masse

- Unité d'énergie: l'électron-Volt (eV)
 - l'énergie qu'acquiert un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

- C'est l'énergie typique de liaison des électrons aux atomes
- En physique des particules:
 - Le giga-électron-volt: $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1\,000\,000\,000 \text{ eV}$
 - Le téra-électron-volt: $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 1\,000\,000\,000\,000 \text{ eV}$
- Unités de masse: GeV/c^2 par ex.

Les constituants élémentaires de la matière

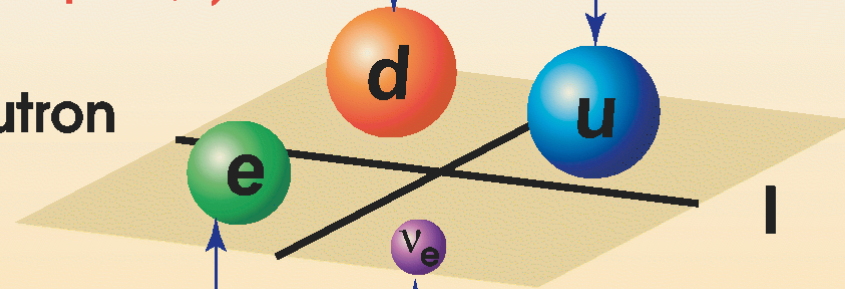
La matière ordinaire

Quarks:

Up (charge électrique 2/3)

et **Down** (charge électrique -1/3)

Ils composent
le proton et le neutron

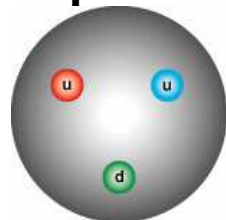


Leptons :

l'**électron** et son
neutrino associé

Matière ordinaire,
dont nous sommes constitués

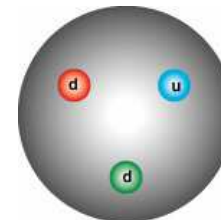
proton



Proton

$$q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$$

neutron

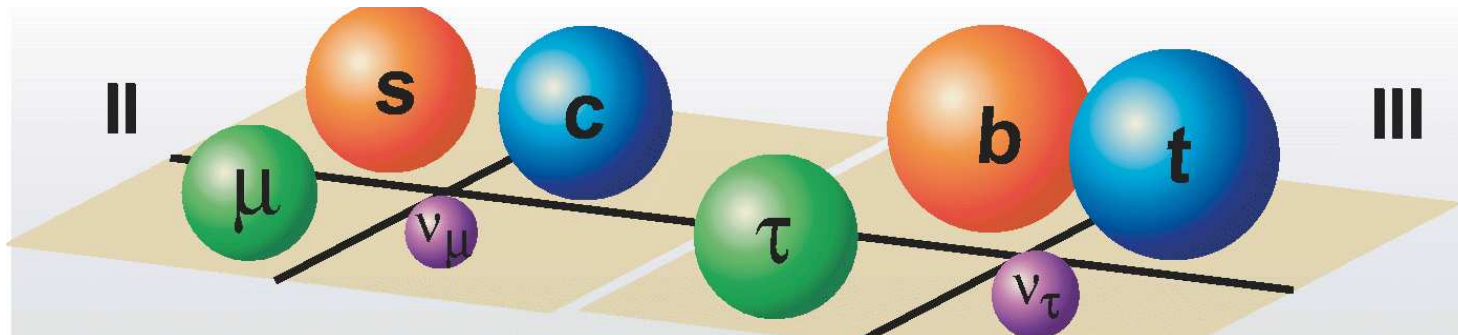


Neutron

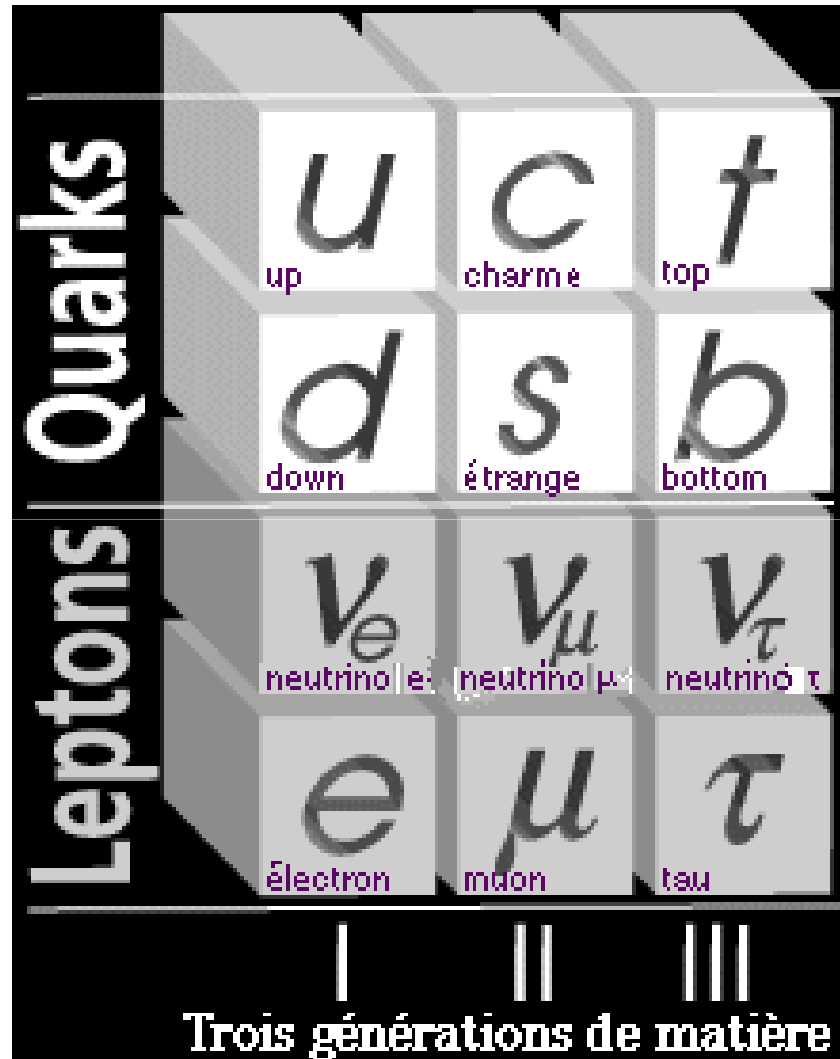
$$q_n = -1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$$

La matière cosmique/artificielle

- Deux nouvelles familles, répliquas de la famille I
- Présentes au moment du big-bang
- Particules plus lourdes et instables, se désintégrant en éléments de la famille I (sauf neutrinos)
- Créée de nos jours dans les accélérateurs ou dans le cosmos



Pour résumer

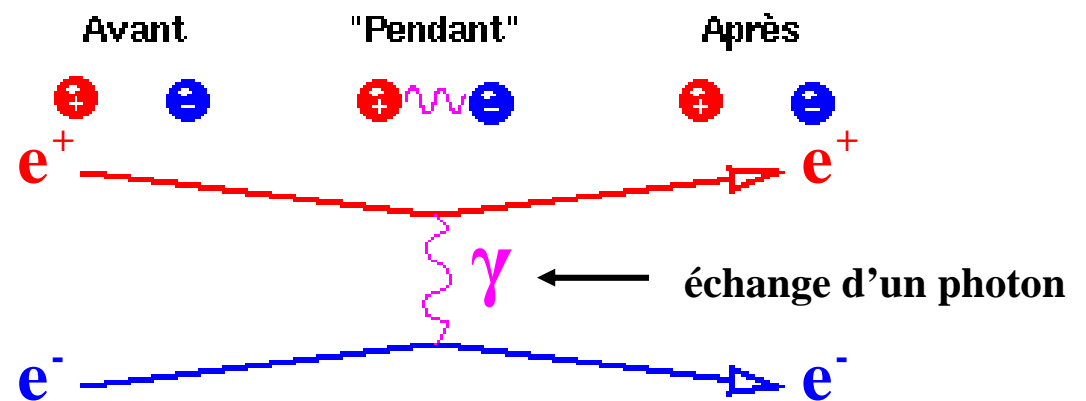


+ leurs anti-particules (anti-matière)

Les interactions entre particules élémentaires

Principe des interactions: échange de médiateur

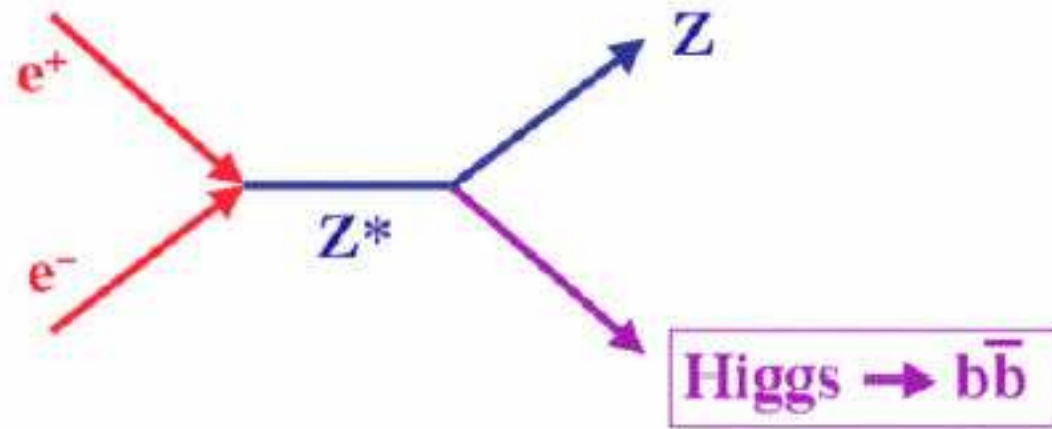
- L'interaction entre deux particules est médiée par une troisième particule, le vecteur de l'interaction
- Analogie du ballon:
 - en envoyant ou recevant le ballon, les bateaux reculent (dans cet exemple la force est répulsive, il y a aussi des forces attractives)
 - plus le ballon est lourd, plus il est difficile de l'envoyer loin (c'est la portée de l'interaction)



Principe des interactions: annihilation

- Autre possibilité d'interaction: l'annihilation de deux particules en une troisième

Ex: production du boson de Higgs au LEP



NB: La particule (ici Z^*) peut être virtuelle, c.a.d. plus lourde que l'énergie de la collision. Ceci n'est possible que pendant un temps très court:

Inégalité de Heisenberg: $\Delta E \times \Delta t \geq \hbar/2$

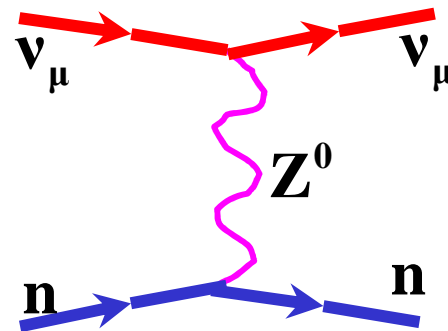
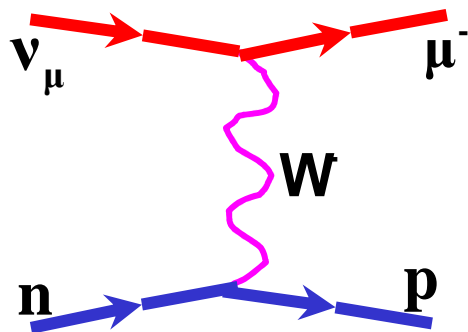
Interaction électromagnétique



- Agit sur toutes les particules chargées électriquement
 - Attractive ou répulsive
 - Le messenger de l'interaction est le photon (masse nulle)
 - Portée infinie, forte intensité
 - Régit la plupart des phénomènes de la vie courante: lumière, électricité, magnétisme, chimie, ...
 - Quelques repères:
 - Unification électricité+magnétisme: Maxwell (1868)
 - Découverte de l'électron: Thomson (1897)
 - Les photons sont des quantas de lumière: Einstein (1905)
 - Découverte du positon: Anderson (1932)
 - Électrodynamique quantique (QED): Tomonoga, Schwinger, Feynman (1945)
- (la plus précise des théories physiques)

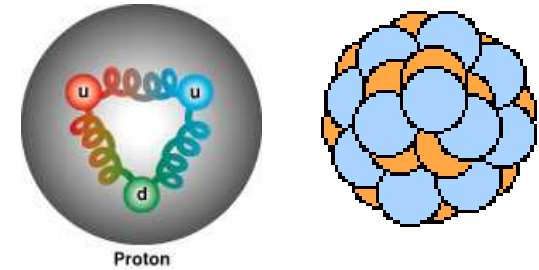
Interaction faible

- La plus universelle, agit sur toutes les particules
- Trois messagers massifs: les bosons-vecteurs W^+, W^- et Z^0
- Courte portée, faible intensité
- Peu visible: radioactivité β , certains processus dans le soleil
- Quelques repères:
 - La radioactivité: Becquerel, P.&M. Curie (~1890, artificielle:1934)
 - Invention du neutrino: Pauli (1930)
 - Interaction faible: Fermi (1933)
 - Théorie électrofaible: Glashow, Weinberg, Salam (1960-70)
 - Découverte des courants neutres au CERN: (1973)
 - Découverte des W et Z au CERN: (1984)



échange d'un boson Z^0
"courant neutre"

Interaction forte



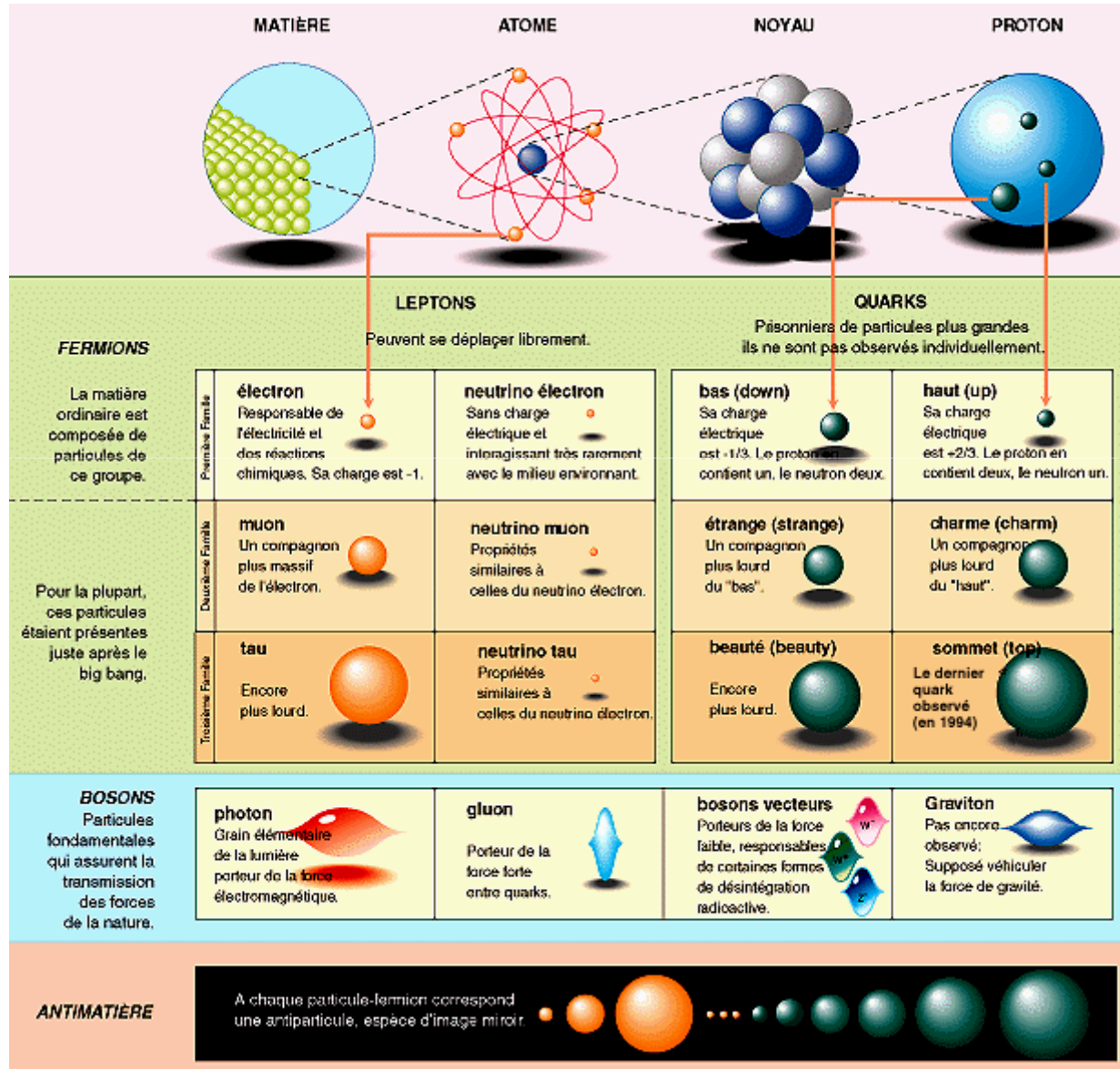
- Agit sur les quarks (charge de couleur)
- Les messagers sont les gluons (masse nulle)
- Très courte portée, la plus intense des forces
- Comportement spécial «élastique»: confinement
- Responsable de la cohésion du proton, du noyau atomique; des réactions nucléaires dans les étoiles
- Quelques repères:
 - Découverte du proton: Rutherford (1919)
 - Découverte du neutron: Chadwick (1932)
 - Modèle des quarks: Gell-Man (1964)
 - Mise en évidence des quarks: Stanford (1968)
 - Chromodynamique quantique (QCD): Gross, Politzer, Wilczek (1973), Nobel 2004
 - Découverte des quarks c (1974) et b (1977)

Gravitation

- La plus familière: pesanteur, système solaire,...
- Toujours attractive (pas de masses négatives)
- Portée infinie, mais très faible intensité, complètement négligeable au niveau corpusculaire
- Le médiateur est le graviton (reste à découvrir)
- Ce n'est pas une théorie quantique
- Quelques repères:
 - Mécanique: Newton (1687)
 - Relativité Générale: Einstein (1915)



En résumé



La masse des particules élémentaires

Le Modèle Standard et la masse des particules

- Modèle Standard: vérifié très précisément
- La théorie n'autorise pas ces particules à avoir une masse
- Pourtant on observe qu'elles ont des masses, qui plus est très différentes les unes des autres !!!

Saveur	Masse(GeV/c ²)	Charge élec.
u up	.005	+2/3
d down	.01	-1/3
c charm	1.5	+2/3
s strange	0.2	-1/3
t top	180	+2/3
b bottom	4.7	-1/3

I

II

III

	Saveur	Mass(GeV/c ²)	Charge élec.
ν_e	neutrino e	$< 7 \times 10^{-9}$	0
e^-	electron	.000511	-1
ν_μ	neutrino μ	$< .0003$	0
μ^-	muon	0.106	-1
ν_τ	neutrino τ	$< .03$	0
τ^-	tau	1.7771	-1

Qu'est-ce que la masse ?

- La masse est une caractéristique fondamentale de la matière, qui mesure sa capacité à résister lorsque l'on essaie de modifier son mouvement:

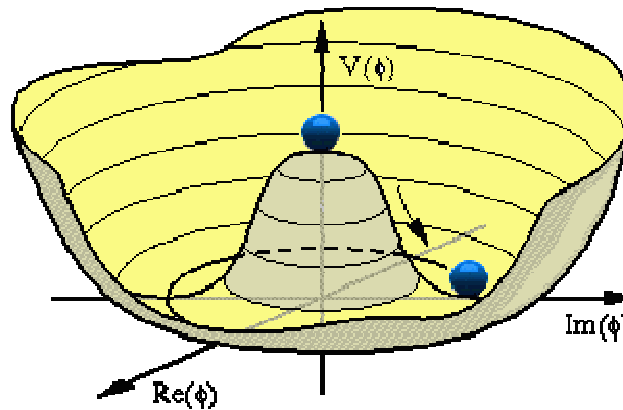
$$\vec{F} = m \vec{a}$$

Le vide et l'invention du boson de Higgs

- Pour pouvoir donner une masse aux particules, il faut que le vide ne soit pas vraiment vide (!)
- Débat déjà ancien, constamment revisité
 - Notion d' «éther » au 17ème siècle pour expliquer la propagation de la lumière
 - En fait le «vide » contient des particules virtuelles

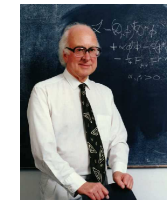
L'invention du boson de Higgs

- La structure du vide peut donner une masse aux particules qui interagissent constamment avec elle:



- Si cette structure du vide existe, elle implique l'existence d'une nouvelle particule, encore inconnue:

le boson de Higgs



A la recherche du boson de Higgs



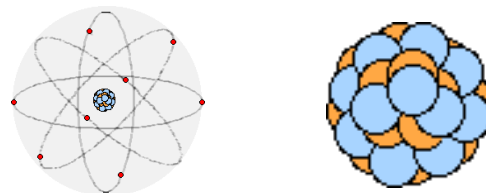
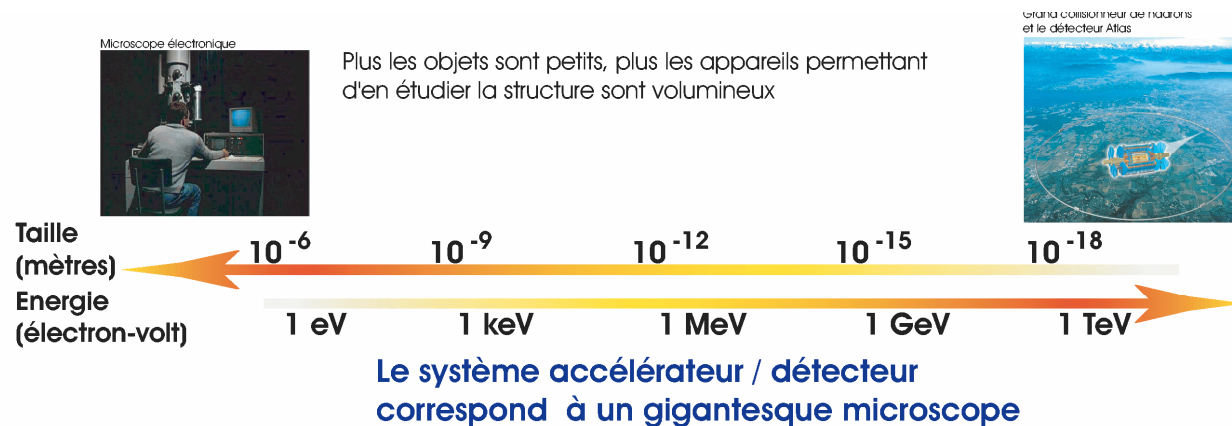
Pourquoi un accélérateur de particules ?

On a besoin de sonder la matière avec des énergies toujours plus élevées pour:

1. étudier des objets plus petits

→ Mécanique quantique: une particule d'énergie E est associée à une longueur d'onde $\lambda = h/E$

→ Plus λ est petite, plus on peut voir des détails fins



Les collisions de haute énergie

2. pour créer des particules plus lourdes:

→ la relativité restreinte exprime l'équivalence entre masse et énergie

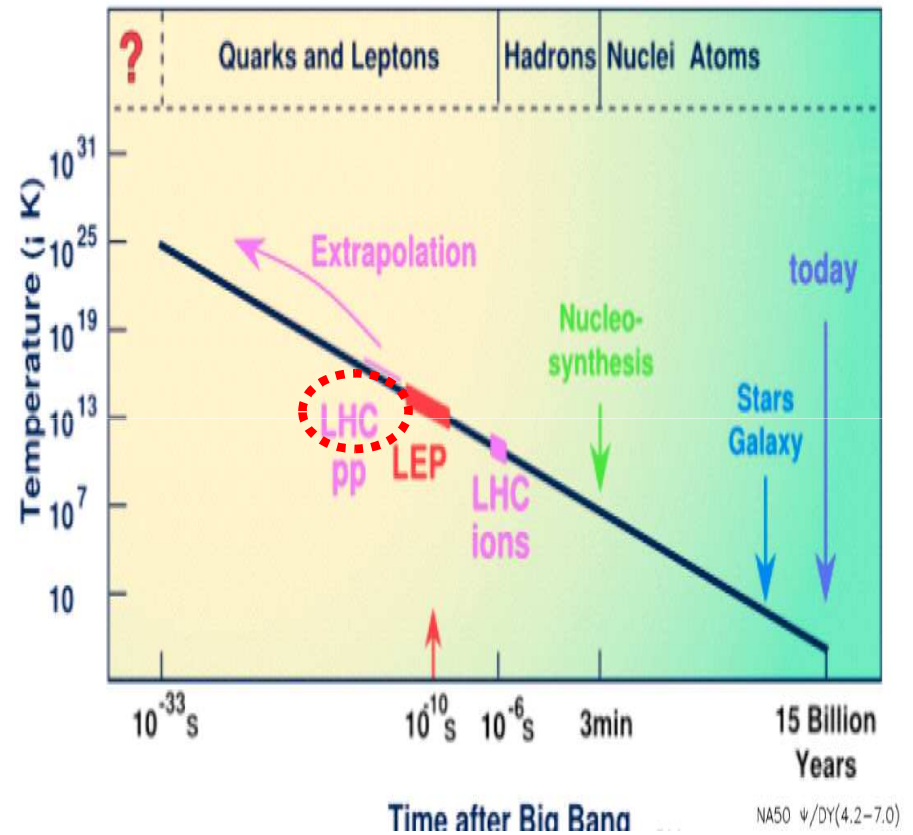
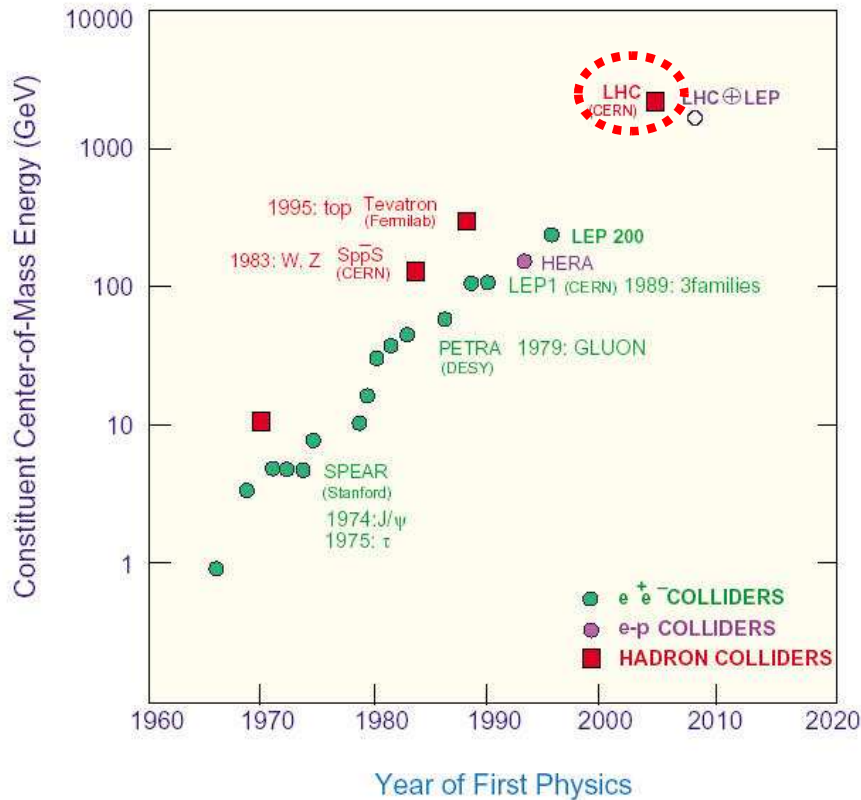
$$E = mc^2$$



Dans un accélérateur:

- toute l'énergie cinétique E de la collision est transformée en masse m
- $E = E(\text{faisceau protons}_1) + E(\text{faisceau protons}_2)$

Des collisionneurs pour remonter le temps



Les plus petites longueurs explorées jusqu'à maintenant sont de l'ordre de 0.001 fermi = 0.000000000000000001 cm

Pour remonter au *Big-Bang*, à 10^{-33} cm: 17 ordres de grandeur !

Laboratoire européen de physique des particules (CERN)



Organisation internationale
Basée à Genève (Suisse)
Créé en 1954

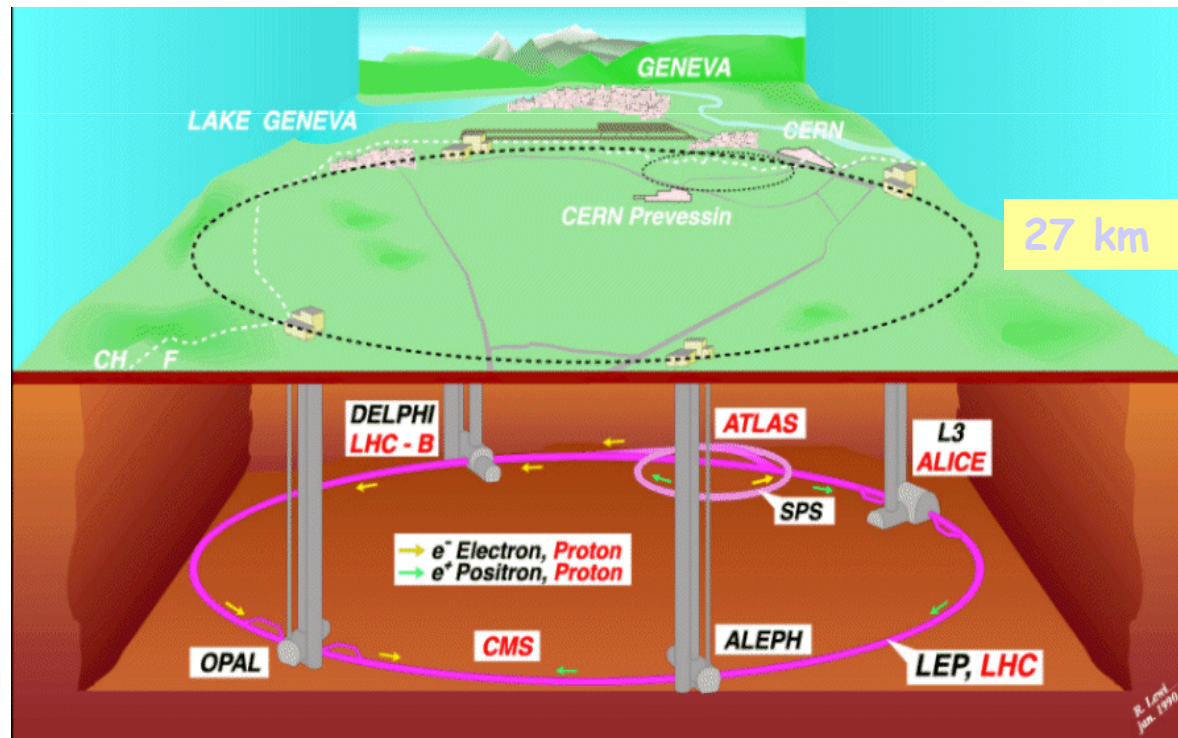
Le plus gros laboratoire de physique des particules du monde
20 états-membres, plusieurs états associés

Le Grand Collisionneur de Hadrons « Large Hadron Collider » (LHC)

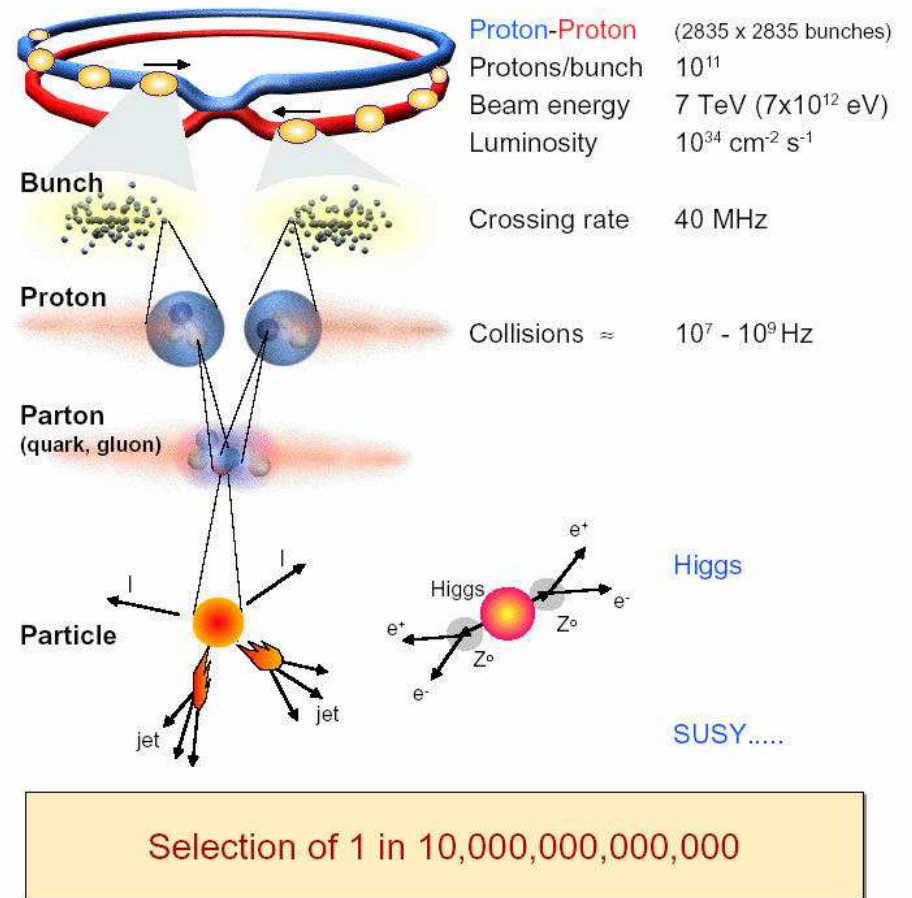
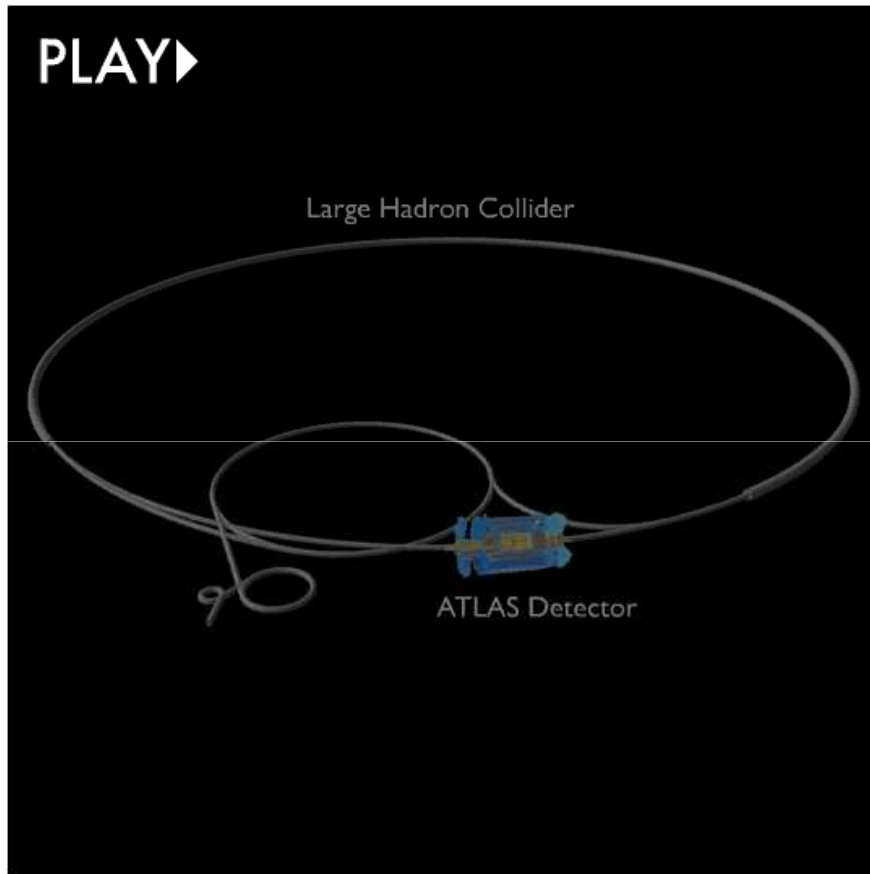
- le LHC (collisions proton-proton) remplace le LEP (e^+e^-) dans son tunnel
 - énergie du LEP limitée (rayon. synchrotron)
- l'énergie du LHC limitée par les aimants:
 - aimants supraconducteurs de 8T

Energie au LHC:
14 TeV !

Collisions pp:
+ haute énergie
+ interactions fortes
- proton non-élem.
- collisions « sales »



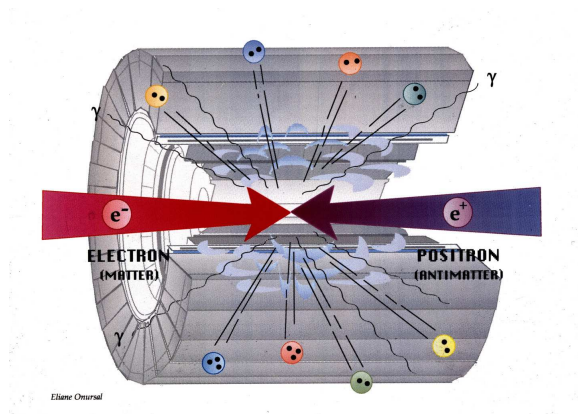
Collisions au LHC



Le boson de Higgs n'est produit que très rarement !! $\sim 1/10^9$

Comment observe-t-on de nouvelles particules ?

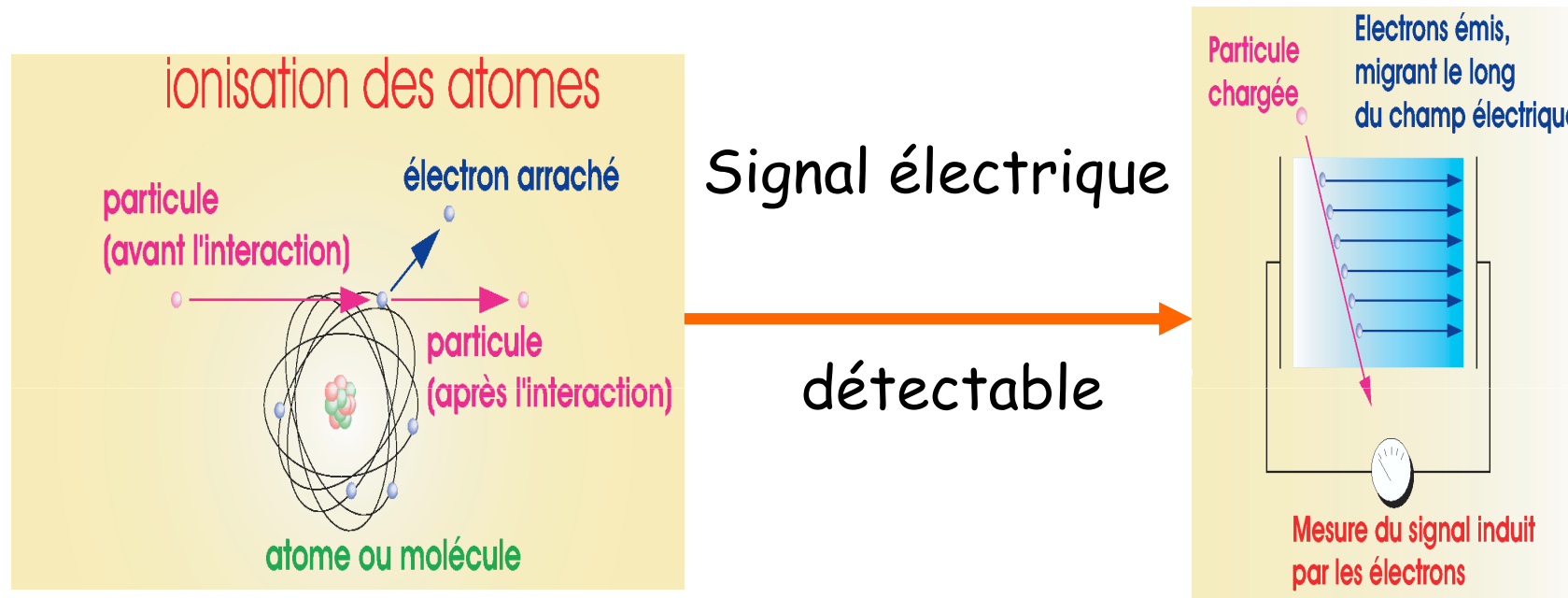
- Les particules produites dans les accélérateurs vivent en général très peu de temps: elles se désintègrent presque immédiatement en particules de matière ordinaire (\sim stables).



- On ne verra donc pas directement le boson de Higgs
- Par contre en mesurant très précisément ses produits de désintégration on peut vérifier qu'ils viennent du Higgs.

Comment détecter les particules ?

Particules chargées:

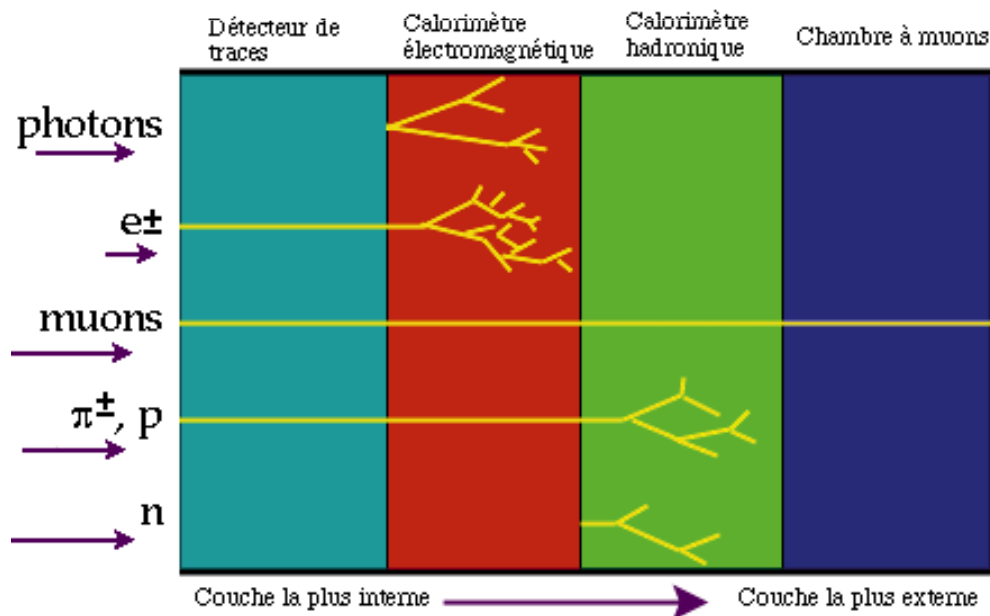


Particules neutres: interagissent dans la matière et créent des cascades de particules chargées.

Comment détecter les particules ?

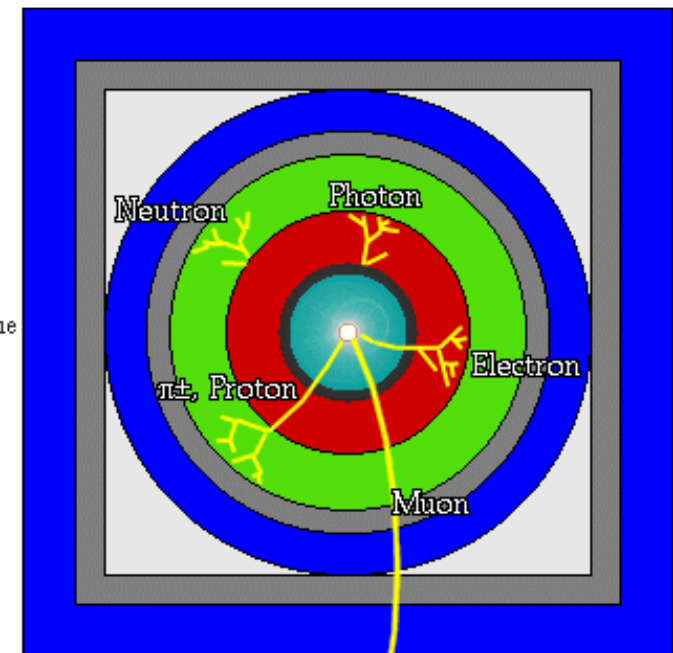
Essentiellement deux types de mesures:

- mesure d'impulsion:
 - particules chargées déviées dans un champ magnétique
 - la courbure de la trajectoire donne l'impulsion
- mesure d'énergie:
 - particule chargée ou neutre, stoppée dans la matière → cascade
 - l'énergie de la cascade est reliée à l'énergie de la particule

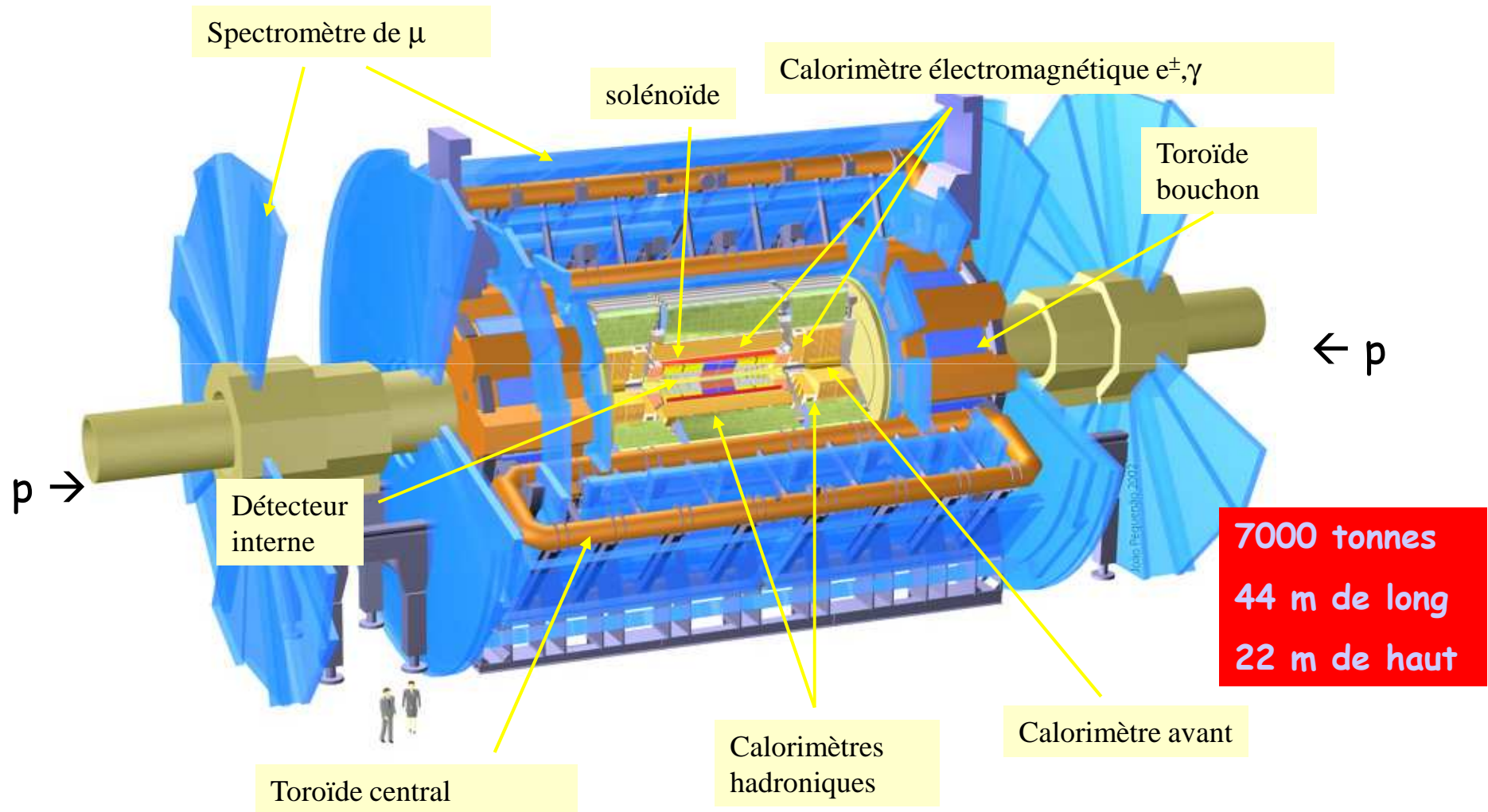


Section transversale d'un détecteur montrant les trajectoires des particules

- Tube à vide contenant le faisceau
- Détecteur de traces
- Bobine magnétique
- Calorimètre électromagnétique
- Calorimètre hadronique
- Fer magnétique
- Chambres à muons



ATLAS, un détecteur géant



Une collaboration mondiale

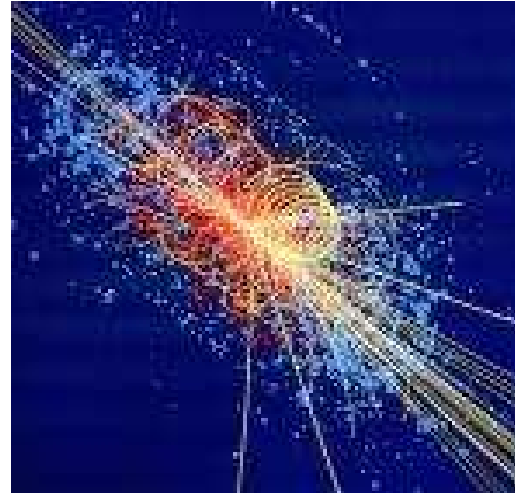
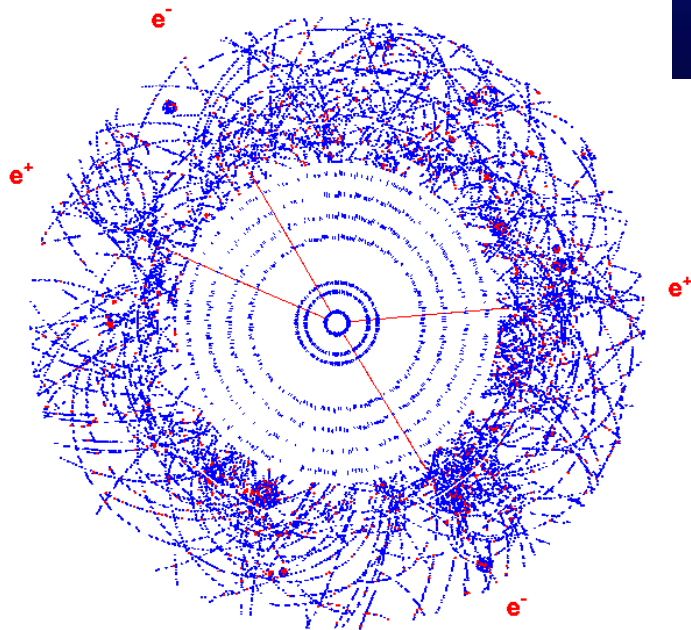


34 pays: Europe, Amérique du Nord, Russie, Chine, Japon,...
150 universités et laboratoires
Environ 1800 physiciens !

A quoi ressemblera l'apparition du Higgs ?

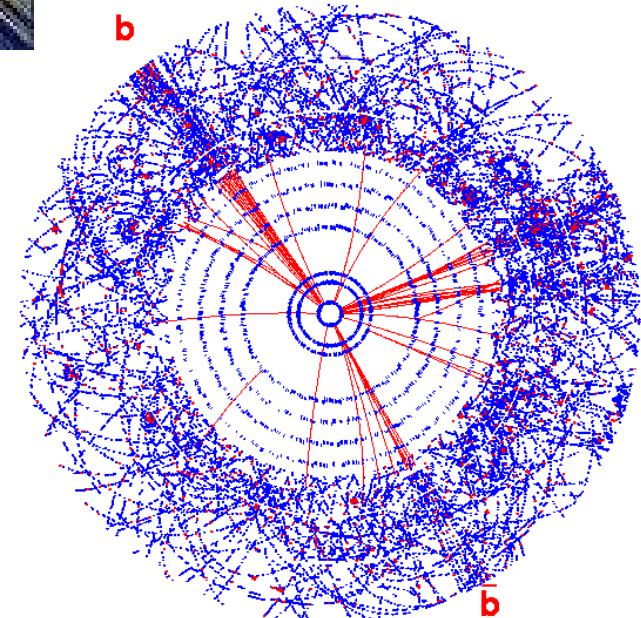
ATLAS Barrel Inner Detector

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ ($m_H = 130 \text{ GeV}$)



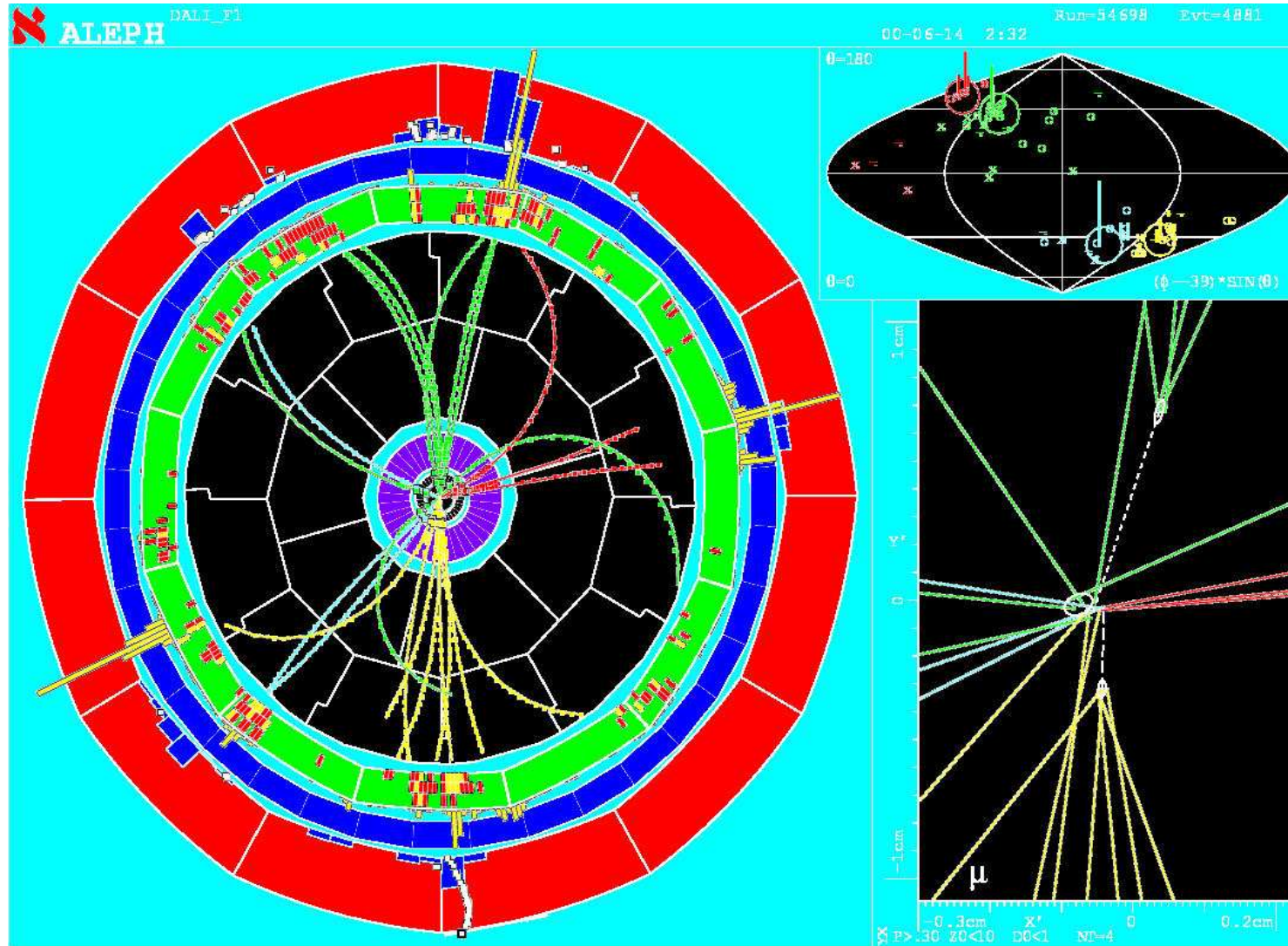
ATLAS Barrel Inner Detector

$H \rightarrow b\bar{b}$



Il faudra que cela se produise un grand nombre de fois pour être sûr qu'il s'agit du boson de Higgs !

Apparition furtive du boson de Higgs au LEP ?

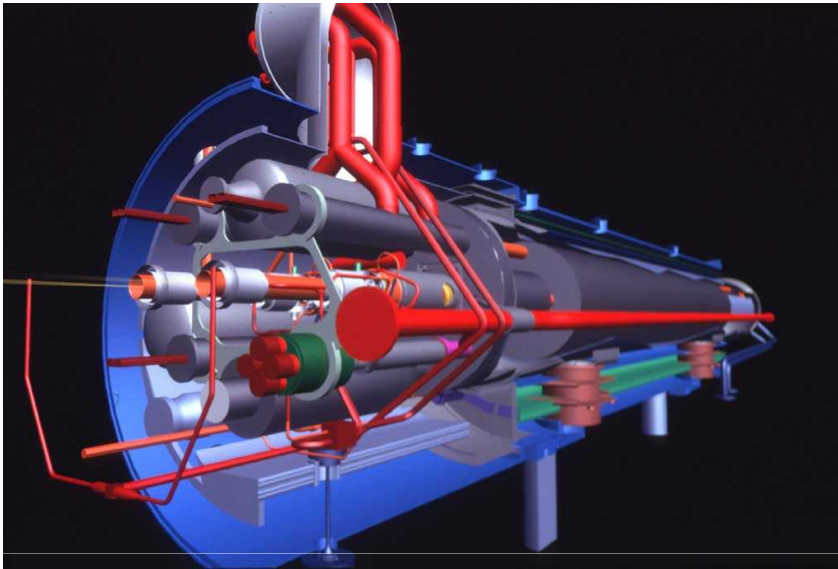


Candidat $e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0 \rightarrow qqbb$, $m_H = 115 \text{ GeV}$

Le défi des données d'ATLAS

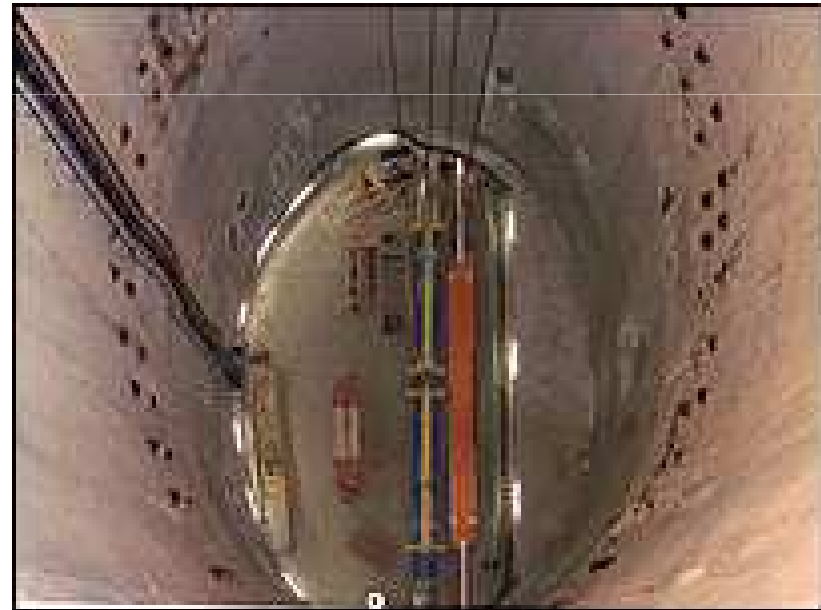
- Une avalanche de données:
 - l'équivalent de 10 millions de DVD chaque année !!
- La solution: la grille de calcul
 - Mettre en réseau des millions d'ordinateurs dans le monde qui se partagent le travail d'analyse des données
- Après l'invention du World-Wide-Web, le CERN développe la grille
 - Programme EGEE: équivalent à 100 000 PCs.

Le LHC en construction



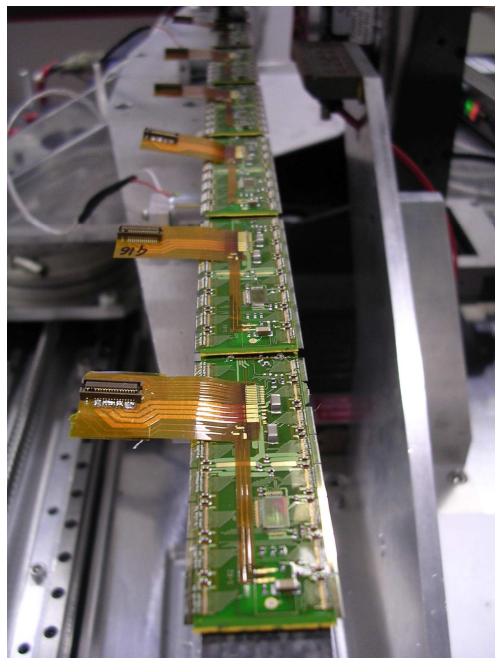
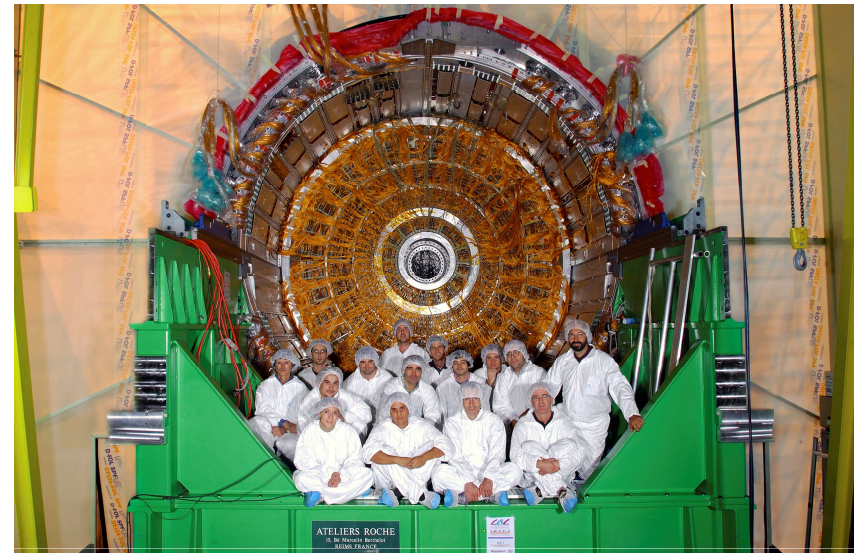
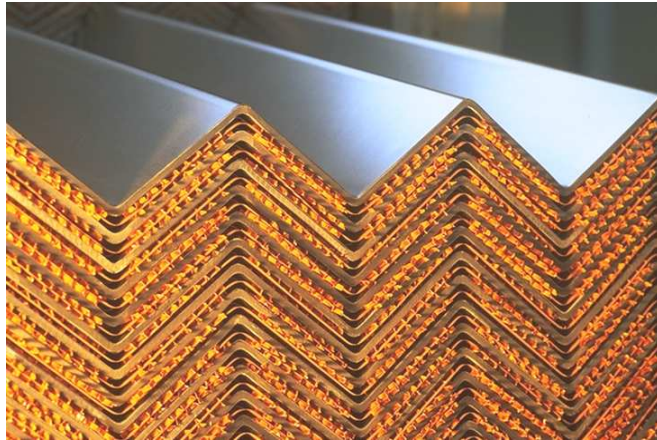
Helium superfluide
(1.8 K) sur 27 km

Descente du premier aimant: lundi 7 mars 2005

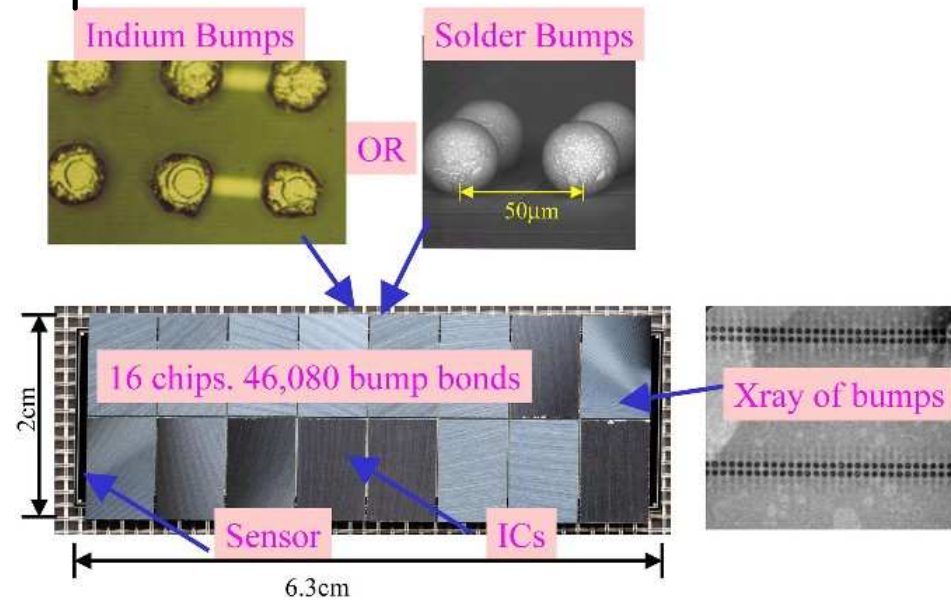


ATLAS: contributions du CPPM à la construction

Calorimètre à argon liquide:



Détecteurs à pixels:



ATLAS en cours de montage



<http://atlaseye.web.cern.ch/atlaseye/>

Conclusion

- Le LHC devrait démarrer à la fin de 2007
- La recherche du boson de Higgs prendra quelques années: rendez-vous en 2012 ?!
- On devrait/espère également observer d'autres phénomènes et de nouvelles particules...

2005, année mondiale de la physique

- Site web: <http://www.physique2005.org>
- A Marseille: <http://www.crmcn.univ-mrs.fr/amp05-provence/>
- Profitez-en !!

