

S. Muanza, CPPM Marseille, CNRS-IN2P3

La Quête du Graal ou la Longue Chasse au Boson de Higgs

I. Introduction

I.1. La Physique Classique

- Mécanique & Electromagnétisme -

- Différentes composantes:

- Mécanique:

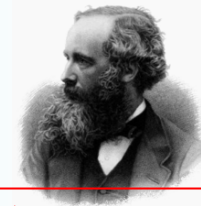
- étude du mouvement des corps (cinématique) et de leur causes (forces)
 - principe fondamentale de la dynamique I. Newton (1687)

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



- Electromagnétisme:

- théorie commune expliquant les phénomènes électriques, magnétiques et optiques
 - Synthèse magistrale en seulement 4 équations par J.C. Maxwell (1864)



- Physique Statistique:

- Etude de système à grand nombre de particules
 - Inclut la thermodynamique

- Caractéristiques communes:

- Espace 3-D absolu
 - Temps 1-D absolu
 - Causalité
 - Relativité Galiléenne

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \text{rot } \vec{B} = \mu_0 \cdot \left(\vec{j} + \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \\ \text{div } \vec{B} = 0 \end{array} \right.$$

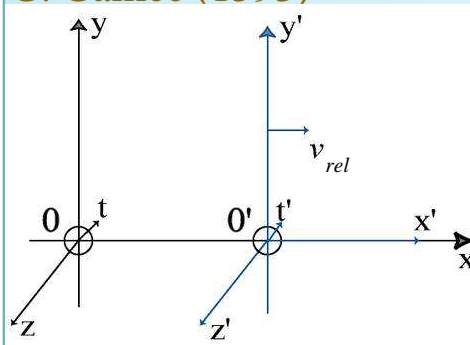
I.1. La Physique Classique

- Relativité Galiléenne -

- Localisation dans l'espace: $\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$
- Localisation dans le temps: t
- Relativité Galiléenne:
 - Principe de relativité: « les lois de la physique s'expriment de la même manière dans tous les référentiels inertiels »



G. Galilée (1593)



$$\begin{cases} x' = x - v_{rel} \cdot t \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \vec{V} = \vec{V}' + \vec{V}_{rel}$$



I.1. La Physique Classique

- Lois de Conservation & Symétries -

Lois de conservation

- Pour un système isolé:
 - Conservation de:
 - de l'Energie: E
 - de la Masse: m
 - de l'Impulsion: \vec{p}
 - du Moment Cinétique: $\vec{J} = \vec{r} \wedge \vec{p}$
 - de la Charge Electrique: Q
 - Quantité physique conservée:
 - quantité constante pendant l'évolution temporelle du système physique

=>

$$(Quantité\ Physique)_{initial} = (Quantité\ Physique)_{final}$$



Lois de conservation et Symétries

- Pour un système isolé:

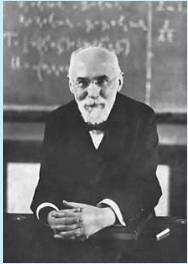
Quantité Conservée	Symétrie du Système Physique
Impulsion: \vec{p}	Invariance % Translation dans l'Espace
Energie: E	Invariance % Translation dans le Temps
Moment Cinétique: \vec{J}	Invariance % Rotation dans l'Espace

← Théorème de E. Noether (1918)

I.2. La Double Révolution - 1^{er} Acte: Relativité Einsteiniene -

- La Physique Moderne repose sur 2 piliers découverts au début du XX^e siècle:

La Relativité Restreinte d'Einstein



H. Lorentz (1904)
PNφ (1902)

$$\begin{cases} L = L_0/\gamma & : \text{contraction des longueurs} \\ T = \gamma \cdot T_0 & : \text{dilatation du temps} \end{cases}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

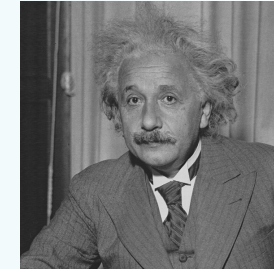
$$\begin{cases} x' = \gamma \cdot (x - \beta \cdot c \cdot t) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma \cdot \left(-\frac{\beta}{c} \cdot x + t\right) \end{cases}$$

- La transfo. de Lorentz préserve l'invariance des équations de Maxwell, contrairement à la transfo. de Galilée

$$E = \gamma \cdot m \cdot c^2$$

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$



A. Einstein (1905)
PNφ (1921)

- Généralise le principe de relativité:
 - la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous des référentiels inertiels
 - c'est la vitesse maximale de propagation de tout phénomène physique

I.2. La Double Révolution (2)

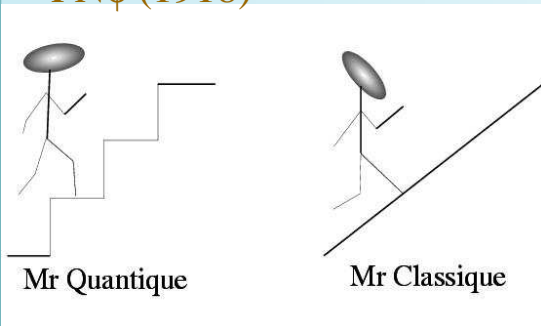
- La Physique Moderne repose sur 2 piliers découverts au début du XX^e siècle:
La Mécanique Quantique:

$$E = h \cdot \nu$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$



M. Planck (1900)
PNφ (1918)



$$\lambda = \frac{h}{p}$$



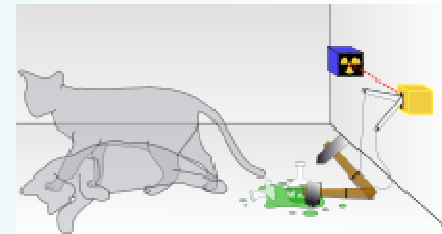
L. de Broglie (1924)
PNφ (1929)



$$-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \Delta \psi + V \cdot \psi = i\hbar \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t}$$



E. Schrödinger (1926)
PNφ (1933)



- Méthodes des Perturbations: équations très complexes résolues par approximations successives

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

I.2. La Double Révolution (3)

- La Physique Moderne repose sur 2 piliers découverts au début du XX^e siècle:

La Mécanique Quantique:

$$[R, P] = R \cdot P - P \cdot R = i \frac{h}{2\pi}$$

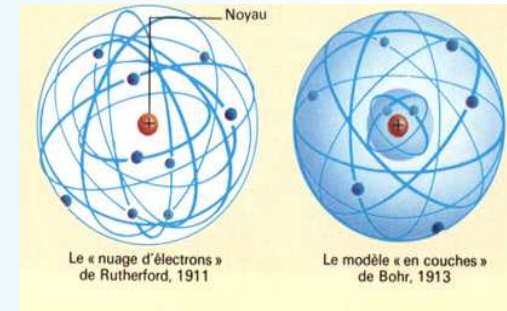
$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$



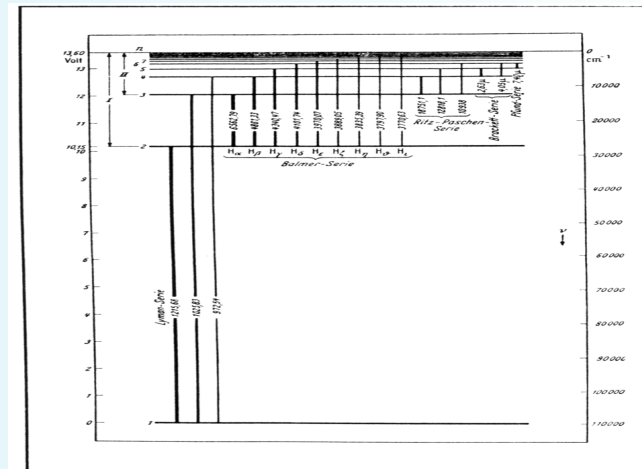
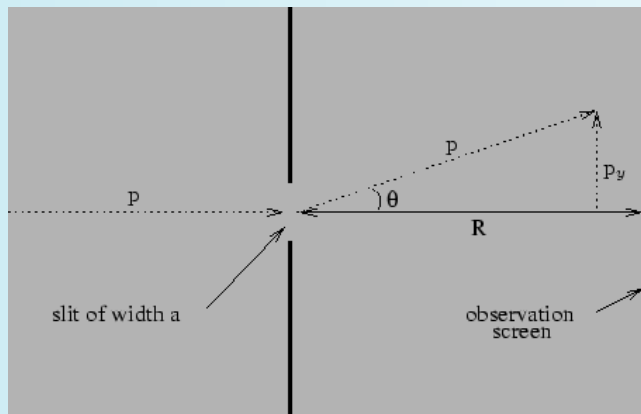
W. Heisenberg (1927)
PNφ (1932)



N. Bohr (1913)
PNφ (1922)

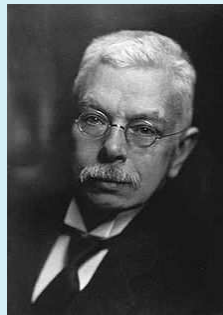


$$E_n = \frac{-1}{n^2} \cdot \frac{2\pi^2 \cdot m \cdot e^4}{h^2}$$

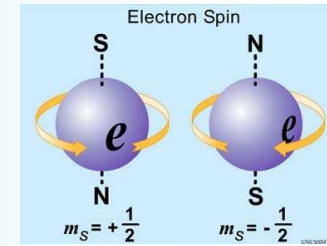
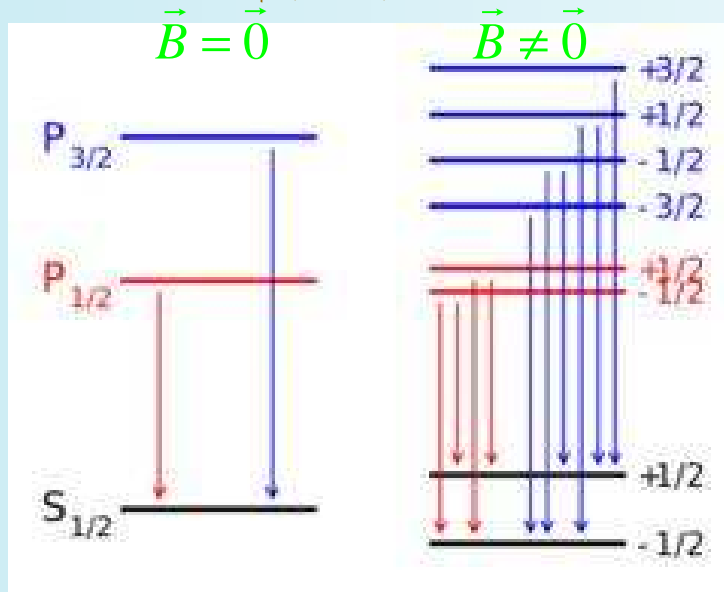


I.3. Le Spin (1)

- Effet Zeeman: le champ magnétique lève des dégénérescences entre états quantiques



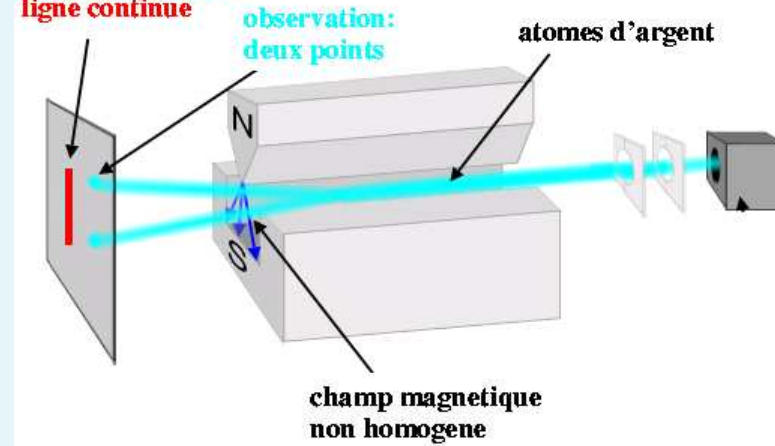
P. Zeeman (1886)
 $PN\phi$ (1902)



S. Goudsmit & G. Uhlenbeck (1925)

- Spin: magnétisme propre des particules, « comme si elles tournaient sur elles-mêmes »

physique classique:
 ligne continue



Expérience de O. Stern et W. Gerlach (1922)
 $PN\phi$ O. Stern (1943)

- Application: RMN

I.3. Le Spin (2)

- Principe d'exclusion: « *deux électrons ne peuvent simultanément occuper le même état quantique* »



W. Pauli (1925)
PN ϕ (1945)



- Théorème Spin-Statistique: M. Fierz (1939)
W. Pauli (1940)

Nom	Bosons	Fermions
Spin	Entier	½-Entier
Type de Particule Elémentaire	Porteur d'Interaction	Brique de Matière
Statistique Quantique	Bose-Einstein (1924)	Fermi-Dirac (1926)
Comportement Collectif	Grégaire « Moutons de Panurge »	Individualiste Exclusion de Pauli
Exemples	Lasers, Supraconducteur,...	Electrons dans un atome

I.3. Le Spin (3)

- Caractère tensoriel d'une grandeur physique:
 - **Scalaire:**
 - Rapport à l'espace: « *On n'a pas besoin d'une direction pour la définir* »
 - *Champ scalaire: 1 valeur en 1 pt donné de l'esp.*
 - *Opér. rotation d'un angle qlcque => le champ reste inchangé => $S=0$*
 - Ex: masse, temps, température,...
 - **Vectorel:**
 - Rapport à l'espace: « *On a besoin d'1 direction pour la définir* »
 - *Champ vectoriel: 3 valeurs indépdes en 1 pt donné de l'esp.*
 - *Opér. rotation => la dir. du vecteur change: 1 tour => vecteur inchangé => $S=1$*
 - Ex: champ électrique, champ magnétique, position, vitesse, accélération, forces,...
 - **Tensoriel:**
 - Rapport à l'espace: « *On a besoin de 2 directions pour la définir* »
 - *Champ tensoriel a plus de 3 valeurs indépdes en 1 pt donné de l'esp.*
 - *Opér. rotation => les 2 dirs changent. Tenseur $r=2$: $1/2$ -tour*
=> tenseur inchangé => $S=2$
 - Ex: contrainte mécanique, ,...
 - **Spinoriel:**
 - Rapport à l'espace: « *On a besoin de $2s+1$ sens pour la définir* »
 - *Champ spinoriel: plus de $2s+1$ valeurs indépdes en 1 pt donné de l'esp.*
 - *Opér. rotation => les composantes changent: 2 tours complets*
=> spineur inchangé => $S=1/2$
 - Ex: électron en mécanique quantique relativiste (équation de Dirac),...

II. Le Modèle Standard

II.1. Nouvelle Table de Mendeleev - Matière du Modèle Standard -

→ Masse

x3

couleurs

Leptons	Q	u	c	t
		up	charme	top
	Q	d	s	b
		down	étrange	bottom
	Q	ν _e	ν _μ	ν _τ
		neutrino e	neutrino μ	neutrino τ
Quarks	Q	e	μ	τ
		électron	muon	tau
	Q	I	II	III
	Trois générations de matière			

+ leurs anti-particules (anti-matière)

Q = 2/3

Fermions: S=1/2

Q = -1/3

Q = 0

Q = -1



P. Dirac (1928)
PNφ (1933)

Equation de Dirac: équation quantique et relativiste de la dynamique des fermions

II.2. Interactions Fondamentales (1)

Interactions & Symétries

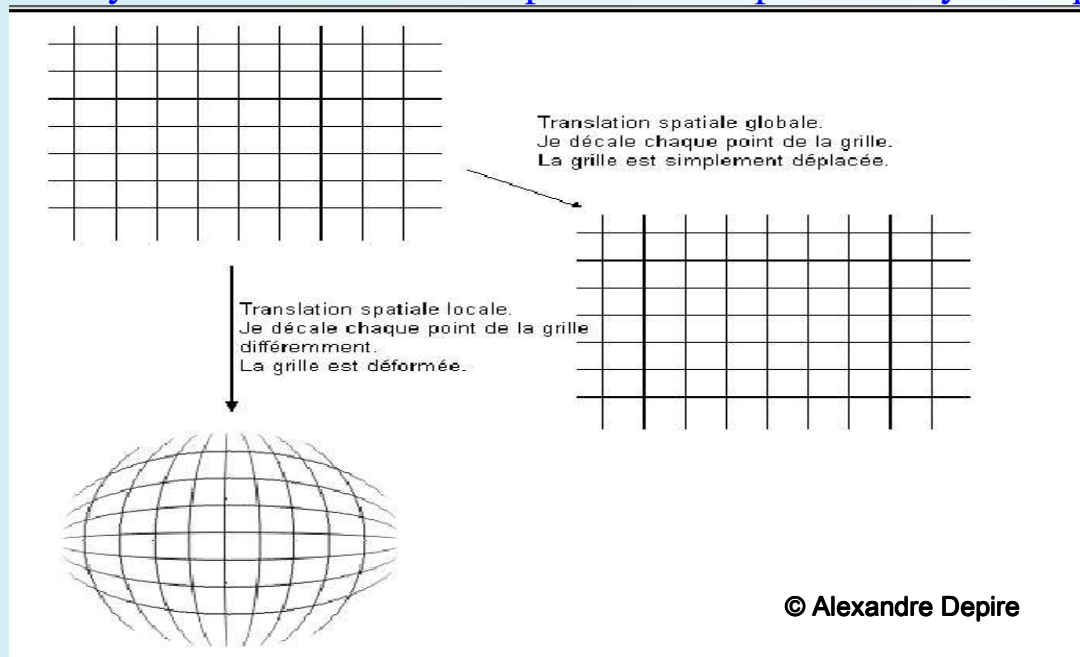
- On déduit certaines propriétés des particules à partir des symétries qu'elles respectent

- Symétrie Globale:

les opérations de symétrie sont les mêmes pour tous les points du système physique

- Symétrie Locale:

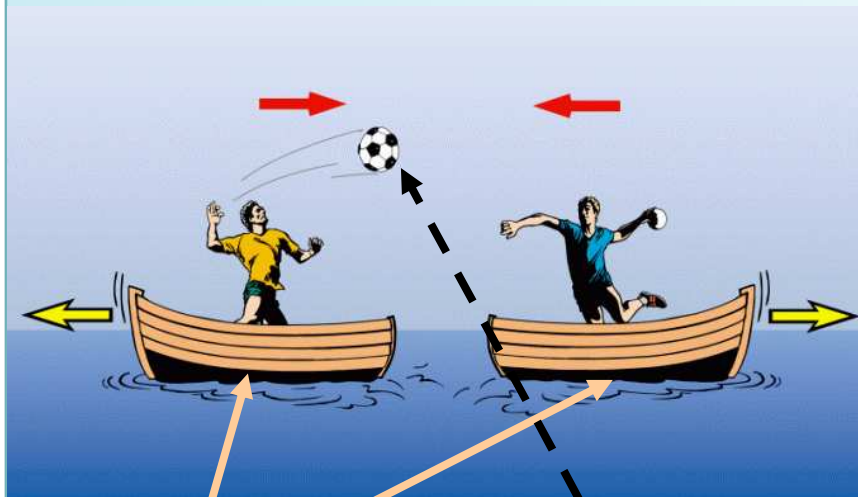
les opérations de symétrie sont différentes pour tous les points du système physique



- Les interactions fondamentales apparaissent quand on impose la localité de la symétrie

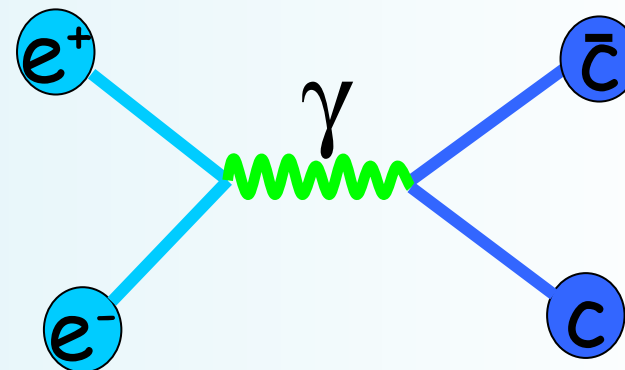
II.2. Interactions Fondamentales (2)

- Dans une théorie quantique et relativiste, l'interaction entre 2 particules est modélisée par l'échange d'une 3^e
- Sens de l'interaction: Ci-dessous, exemple d'interaction répulsive.
En envoyant/recevant le ballon les bateaux s'éloignent l'un de l'autre.
- Portée de l'interaction:
Plus le ballon est lourd, plus il est difficile de l'envoyer loin et vice-versa.



Matière

Boson Médiateur



II.2. Interactions Fondamentales (3)

- En conséquence de la Double Révolution, on peut estimer la portée des interactions fondamentales:

- Considérons une interaction due à l'échange d'un médiateur X

- la mécanique quantique impose:

$$\Delta E_x \cdot \Delta t_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$\nearrow \Delta E_x \cdot \Delta t_x \gg \frac{\hbar}{2}$ approx. classique valable
 $\searrow \Delta E_x \cdot \Delta t_x \approx \hbar$ système purement quantique
 $\Rightarrow \Delta t_x \approx \frac{\hbar}{\Delta E_x}$

- la relativité restreinte impose:

- d'une part:

$$v_x \leq c$$

$\nearrow v_x \ll c$ approx. classique valable
 $\searrow v_x^{\max} = c$ système ultra-relativiste
 $\Rightarrow \lambda_c = c \cdot \Delta t_x$

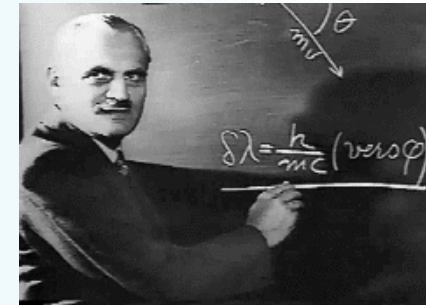
- d'autre part:

- en combinant le tout:

$$E_x = m_x \cdot c^2$$

$$\Rightarrow \lambda_c \approx c \cdot \frac{\hbar}{\Delta E_x} \Rightarrow \lambda_c \approx c \cdot \frac{\hbar}{m_x \cdot c^2}$$

$$\Rightarrow \lambda_c = \frac{\hbar}{m_x \cdot c}$$



**A.H. Compton (1922)
PN ϕ (1927)**

II.2. Interactions Fondamentales (4)

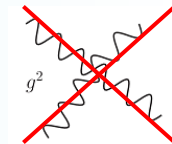
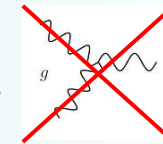
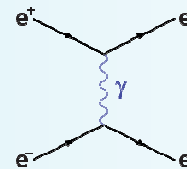
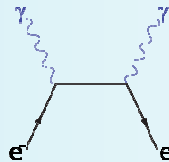
Interaction Electromagnétique

- QED: « Quantum ElectroDynamics » (ElectroDynamique Quantique)
- Théorie de Champs Quantique et Relativiste qui décrit toutes les interactions entre des particules portant une charge électrique par l'échange de photons:
 - Répulsion entre charges de même signe
 - Attraction entre charges de signe opposé
- Interaction responsable de la cohésion de la matière aux niveaux atomique et moléculaire
- Le groupe de symétrie continue est:

- $U(1)_{EM}$

- ce groupe possède un seul générateur: **le photon**

- c'est un groupe commutatif \Rightarrow pas de self-interaction entre photons



- NB: C'est la théorie humaine la mieux vérifiée expérimentalement!

- Ex: comparaison du $(g-2)_e$ et $R_\infty = \frac{\alpha m_e c}{4\pi\hbar}$

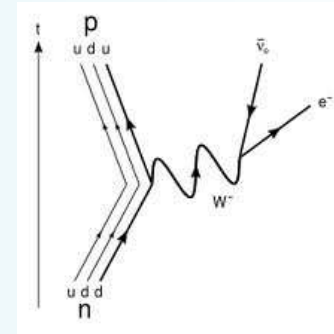
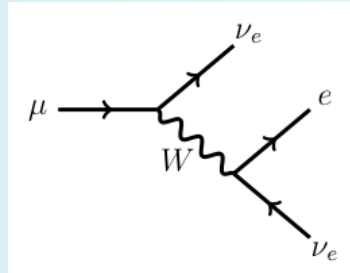
- Th: calculs de $(g-2)_e$ à O(4 boucles)

\Rightarrow détermination de la constante de structure fine: $\alpha = 1/137.035\ 999\ 037\ (91)$ à **0.66 ppb!!!**

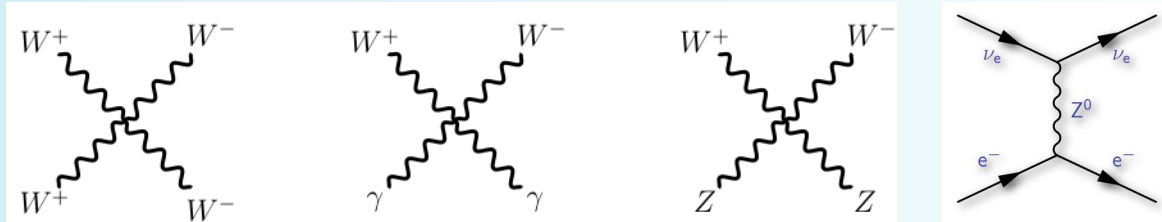
II.2. Interactions Fondamentales (5)

Interaction Faible

- Elle se produit au niveau subatomique (noyaux et particules)
- Elle est responsable de certaines désintégrations radioactives



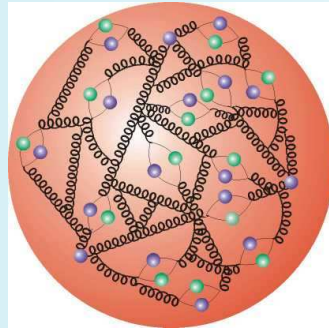
- Elle distingue la chiralité: une particule et son image dans un miroir n'ont pas les mêmes interactions faibles!
- Le groupe de symétrie continue est:
 - $SU(2)_L$
 - ce groupe possède $N^2-1=3$ générateurs: W^+ , W^- , Z^0
 - c'est un groupe n'est pas commutatif \Rightarrow il y a des self-interactions W et Z



II.2. Interactions Fondamentales (6)

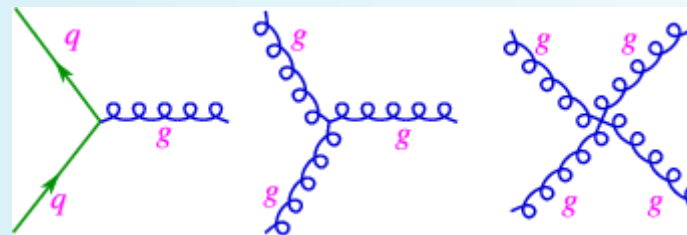
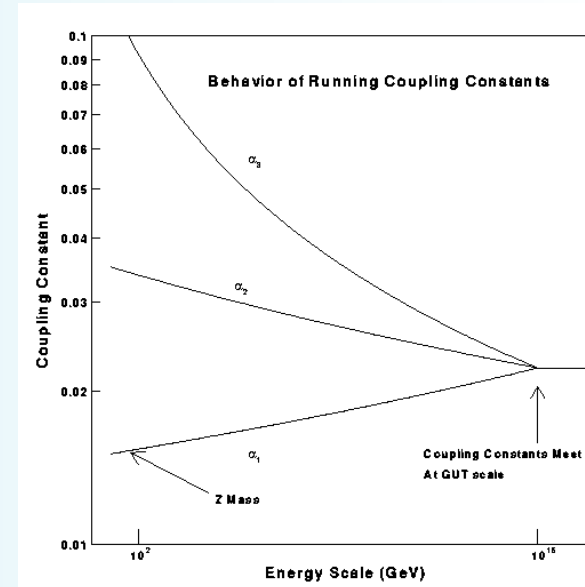
Interaction Forte

- Elle s'exerce au niveau subatomique (dans les noyaux et les hadrons, entre quarks, entre gluons)
- Elle est responsable de la cohésion des noyaux atomiques



- Le groupe de symétrie continue est:

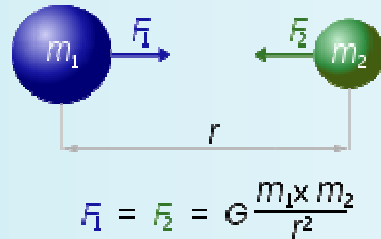
- $SU(3)_c$
- ce groupe possède $N^2-1=8$ générateurs: **8 gluons**
- c'est un groupe n'est pas commutatif \Rightarrow il y a des self-interactions entre gluons



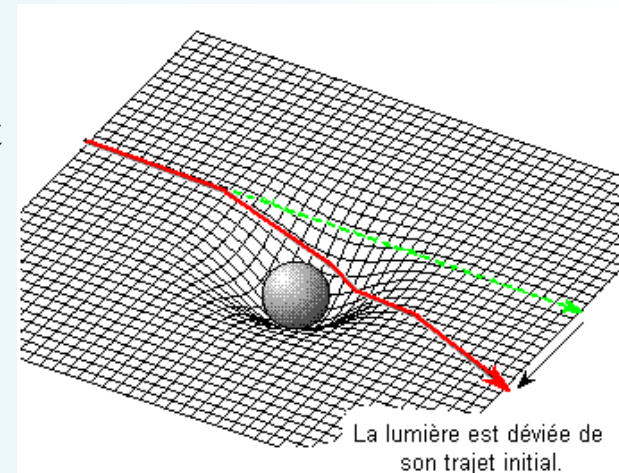
II.2. Interactions Fondamentales (7)

Gravitation

- Jusqu'au début du XXe siècle, c'est la théorie de **Newton (1687)** qui prévalait:



- la force s'exerce instantanément qlq soit la distance
 - ce qui est en contradiction avec la relativité restreinte
-
- En **1916 Einstein** généralise la relativité aux repères en accélération relative: c'est la théorie la relativité générale:
 - les corps suivent des géodésiques
 - la densité de matière-énergie déforme localement la géométrie de l'espace-temps
 - c'est une théorie basée sur une invariance par rapport à un changement local des coordonnées
 - mais cette théorie n'est pas quantifiée
 - c'est une théorie de jauge géométrique
 - Application: votre GPS!



II.2. Interactions Fondamentales (8)

Bosons: S=1

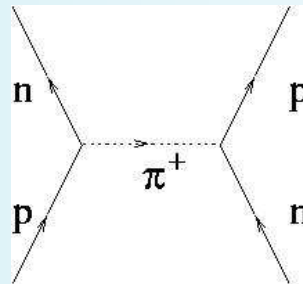
Interaction Fondamentale	Boson Médiateur	Portée $\lambda_c = \frac{h}{m_B \cdot c}$	Intensité Relative	Groupe de Symétrie
Forte	8 Gluons : g $m(g) = 0 \text{ GeV}$	$\sim 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$	1	$SU(3)_C$
Faible	W^\pm $m(W^\pm) = 80.399 \text{ GeV}$ Z^0 $m(Z^0) = 91.187 \text{ GeV}$	$\sim 10^{-2} \text{ fm}$	10^{-2}	$SU(2)_L$
EM	γ $m(\gamma) = 0 \text{ GeV}$	∞	10^{-13}	$U(1)_{EM}$
Gravitation	$G_{\mu\nu} ?$ $m(G_{\mu\nu}) = 0 \text{ GeV}?$	∞	10^{-38}	???

II.3. Le Problème des Masses (1)

- Le Modèle Standard de la Physique des Particules est une théorie quantique et relativiste de champs basée sur le groupe de jauge: $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
- Il explique toutes les interactions électrofaibles et fortes entre les quarks et les leptons
- Il permet d'expliquer tous les phénomènes connus à l'exception de:
 - la matière noire
 - l'énergie noire
 - la masse des neutrinos
- Il articule la classification des particules et leurs interactions en imposant la localité des symétries continues.
- Ce principe de symétrie de jauge a pour conséquence d'imposer une masse **nulle** aux bosons médiateurs de ces interactions

II.3. Le Problème des Masses (2)

- Tout boson médiateur de masse nulle transporte une interaction de portée infinie
- Ceci correspond parfaitement à ce qui est observé pour l'interaction EM
- Par contre, ça ne correspond pas aux cas des interactions fortes, ni des interactions faibles
- L'interaction forte a une constante de couplage très forte qui confine les charges de couleur
- Dans ce cas, un modèle effectif avec des échanges de pions entre hadrons permet d'expliquer cette interaction



H. Yukawa (1935)
PN ϕ (1949)

Et la portée de l'interaction forte $9 \times 10^{-15} m$ est en accord avec la masse du pion!

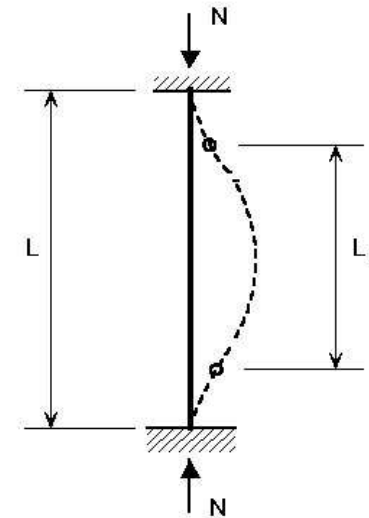
- Par contre, pour l'interaction faible aucun modèle effectif de ce genre ne marche. On a donc une contradiction majeure entre la symétrie de jauge et la portée de l'interaction faible!

III. Le Mécanisme de Higgs

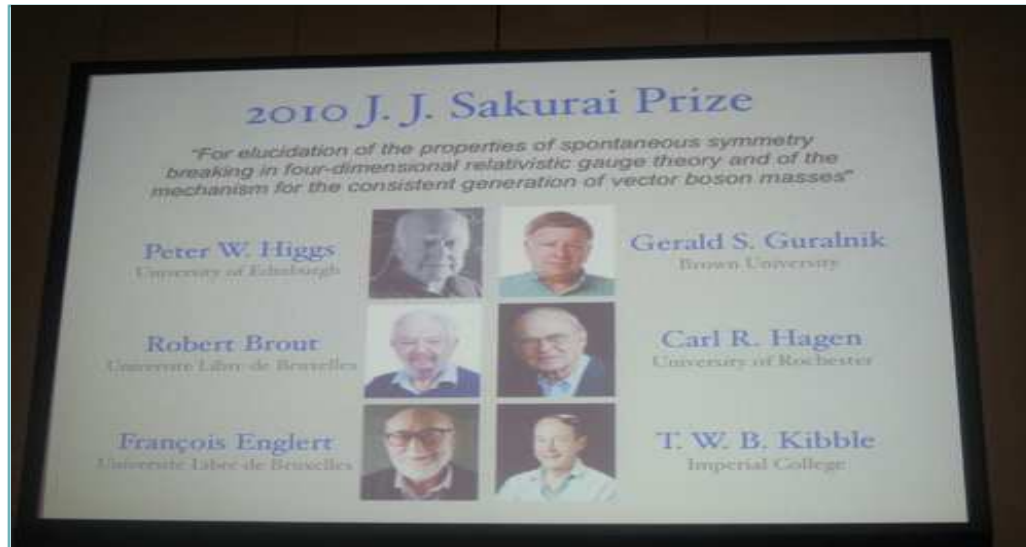
NB: On devrait l'appeler mécanisme de Higgs-Brout-Englert-Hagen-Guralnik-Kibble

III. Mécanisme de Higgs (1)

- Jusque là nous n'avons parlé que de symétries (*principe ordonnateur*), or nous savons que la Nature n'est pas complètement symétrique:
 - il y a des symétries qu'elle ne respecte pas du tout
=> nous les oublions!
 - il y a des symétries qu'elle respecte parfaitement
=> nous les identifions et nous les utilisons
 - il y a des symétries qu'elle ne respecte que partiellement
=> si on veut les exploiter, il faut introduire un *principe différenciateur*:
c'est le concept de brisure de symétrie
- Brisure de symétrie:
 - Situation dans laquelle:
 - les équations possèdent une symétrie,
 - mais pas leur solution ne la possède pas



III. Mécanisme de Higgs (2)



P. Higgs (1964)

F. Englert, R. Brout (1964)

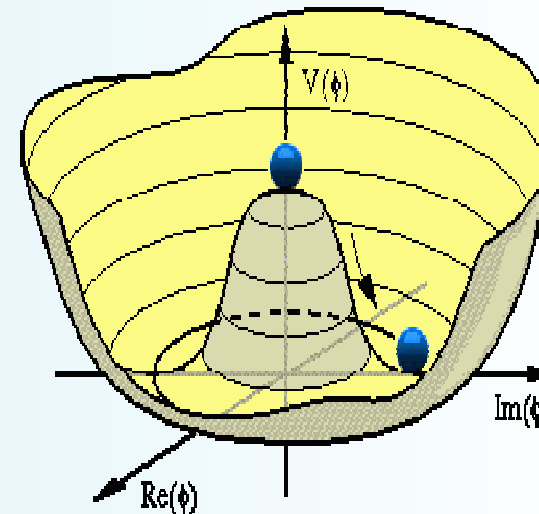
G. Guralnik, C. Hagen, T. Kibble (1964)

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \varphi_1^+ + i\varphi_2^+ \\ \varphi_3^0 + i\varphi_4^0 \end{pmatrix} \quad (4 \text{ d}^\circ \text{ de liberté})$$

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^2 + \lambda \Phi^4$$

$\lambda > 0$ et $\mu^2 < 0$ (choix arbitraire)

$$|\Phi_{\min}| = \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}} = v \neq 0 \quad v \approx 246 \text{ GeV}$$



Brise la symétrie électrofaible: $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$

III. Mécanisme de Higgs (3)

Génération de la Masse

- Bosons Médiateurs Faibles:

- $m_W = \frac{g \cdot v}{2}$
- $m_Z = \frac{g \cdot v}{2 \cos \theta_w}$
- $m_\gamma = 0$

- Boson de Higgs:

- $m_H = \sqrt{2\lambda} \cdot v = \sqrt{-2\mu^2}$

- non prédite par le MS

- Fermions Chargés:

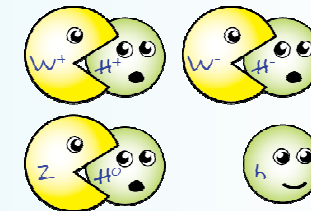
- $m_f = \frac{y_f \cdot v}{\sqrt{2}}$

SU(2)_L



U(1)_Y

Brisure Spontanée de la Symétrie Electrofaible



Avant:

- les bosons sont tous de masse nulle

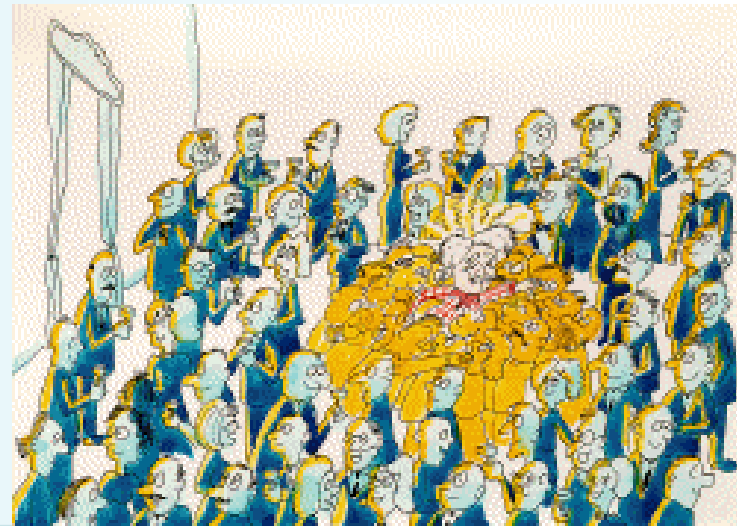
Après:

- les W⁺, W⁻ et Z⁰ acquièrent une masse
- le γ reste de masse nulle
- reste, 1 d° de liberté: le boson de Higgs

III. Mécanisme de Higgs (4)

- Le champ de Higgs baigne tout l'espace
- Contrairement aux autres champs il a une valeur moyenne dans le vide non nulle: v
- Les particules du MS (à l'exception des neutrinos) interagissent avec le champ de Higgs et acquièrent une masse d'autant plus élevée que cette interaction est intense
- Le boson de Higgs interagit avec lui-même et ça lui fournit une masse

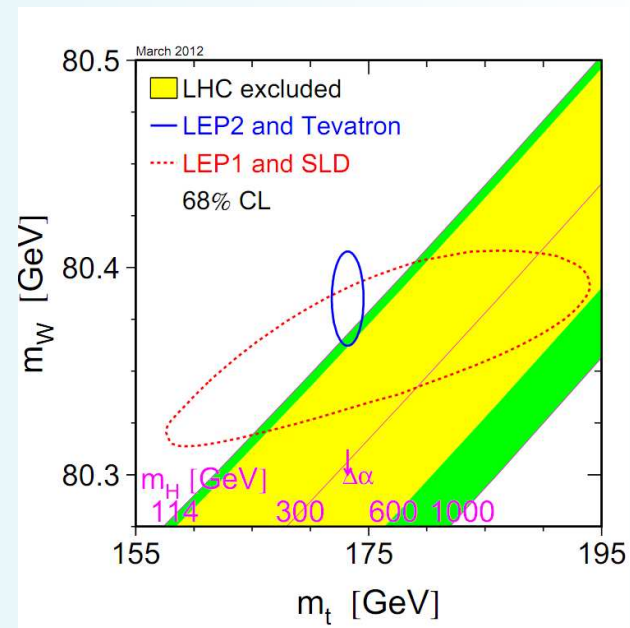
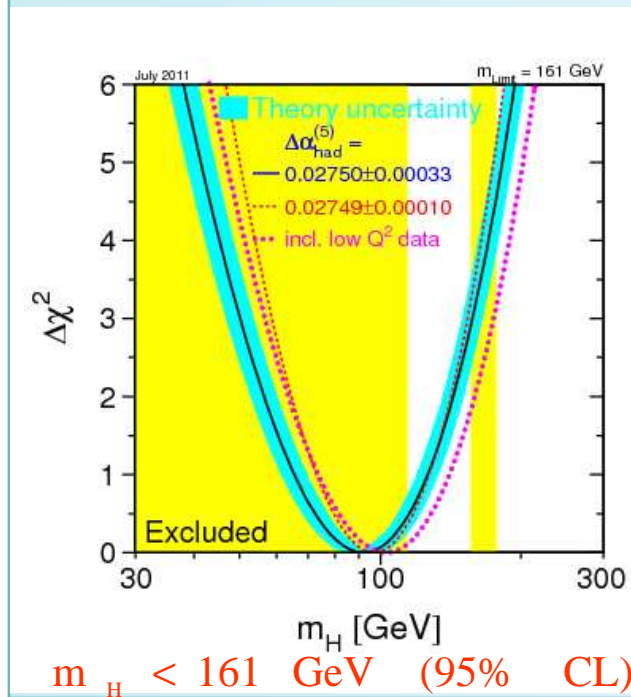
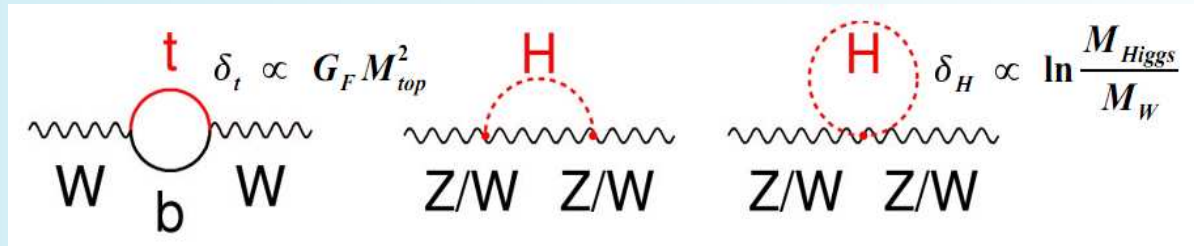
« Analogie: La célébrité »



III. Mécanisme de Higgs (5)

« Quelle est la masse du Boson de Higgs? »

- Comme on l'a vu, elle n'est pas prédite par le MS
- Toutefois, il existe des contraintes indirectes:



IV. La Recherche du Boson de Higgs

IV.1. Les Instruments: - Le LHC (1) -

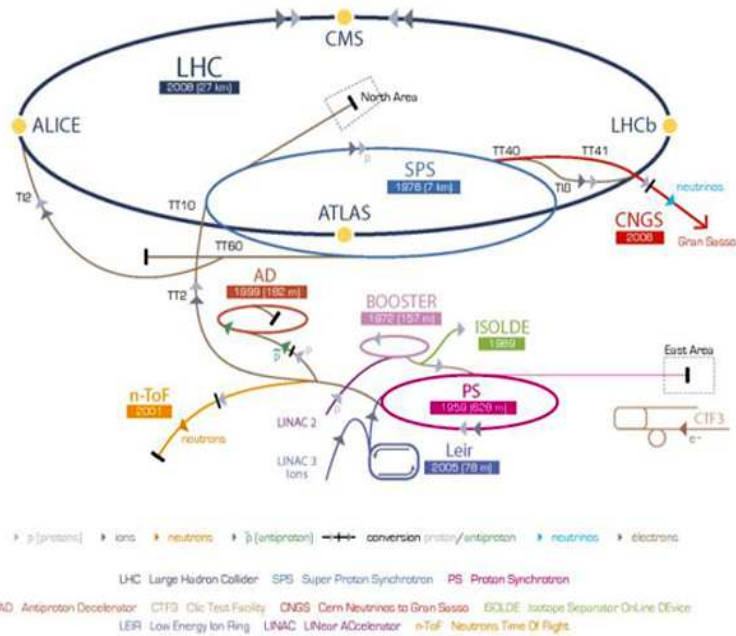
C'est l'accélérateur de particules le plus puissant au monde

C'est notre sonde de l'infiniment petit
C'est la « loupe » qui nous permet de reproduire en laboratoire le boson de Higgs

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Complexe des accélérateurs du CERN

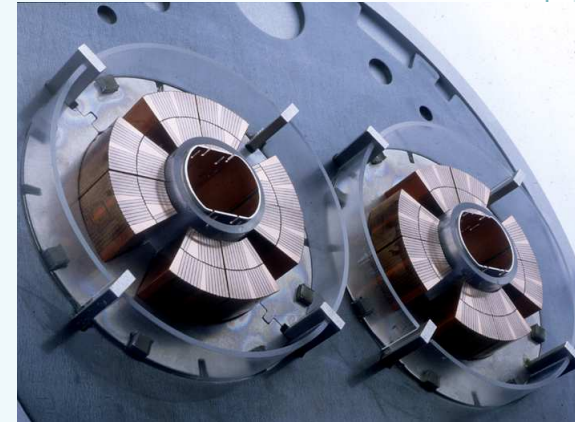


IV.1. Les Instruments: - Le LHC (2) -

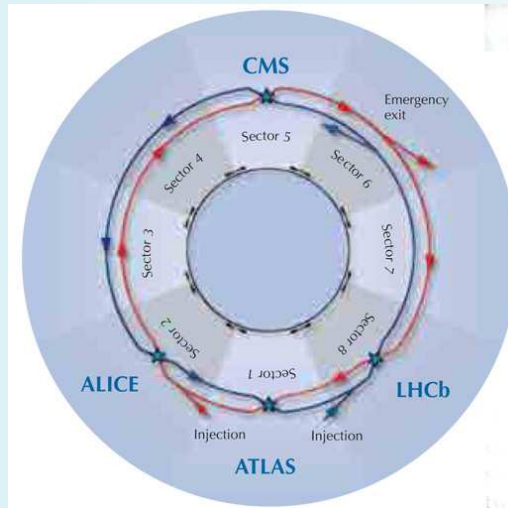
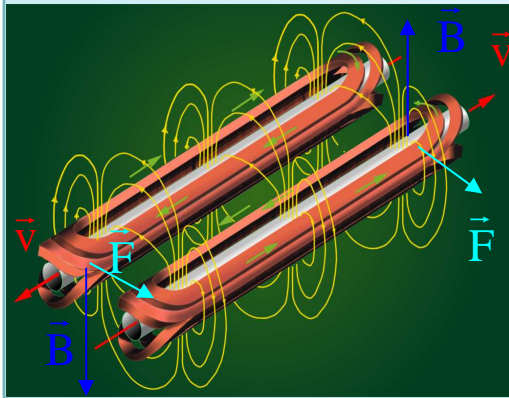


- 1232 dipôles supra.:
- 11850 A => B=8,36 T
 - masse: 35 tonnes
 - longueur: 15 m

E stockée LHC: 8,65 GJ de
quoi fondre 11 tonnes de Cu



$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$



Prouesse technologique:

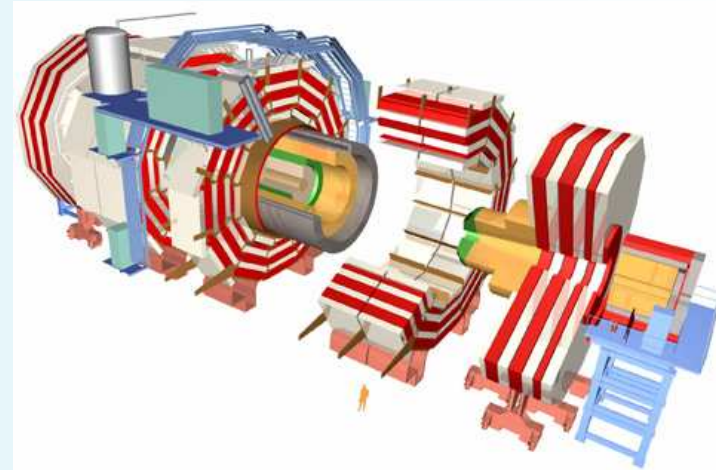
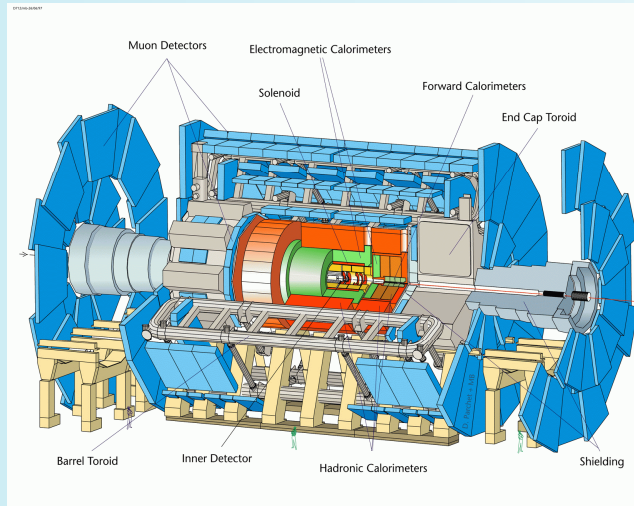
- c'est l'endroit le plus froid de l'univers

Petit rappel:

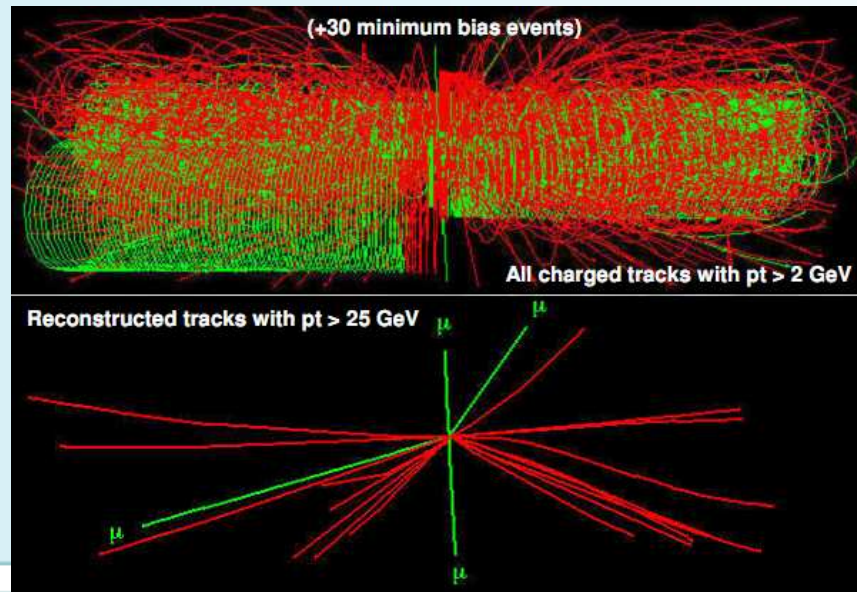
- zéro absolu:
-273,2°C (0°K)
- aimants supraconducteurs du LHC:
-271,3°C (1,9°K)
- « vide » intersidéral:
-270,5°C (2,7°K)

IV.1. Les Instruments: - Les Détecteurs de Particules (1) -

ATLAS et CMS

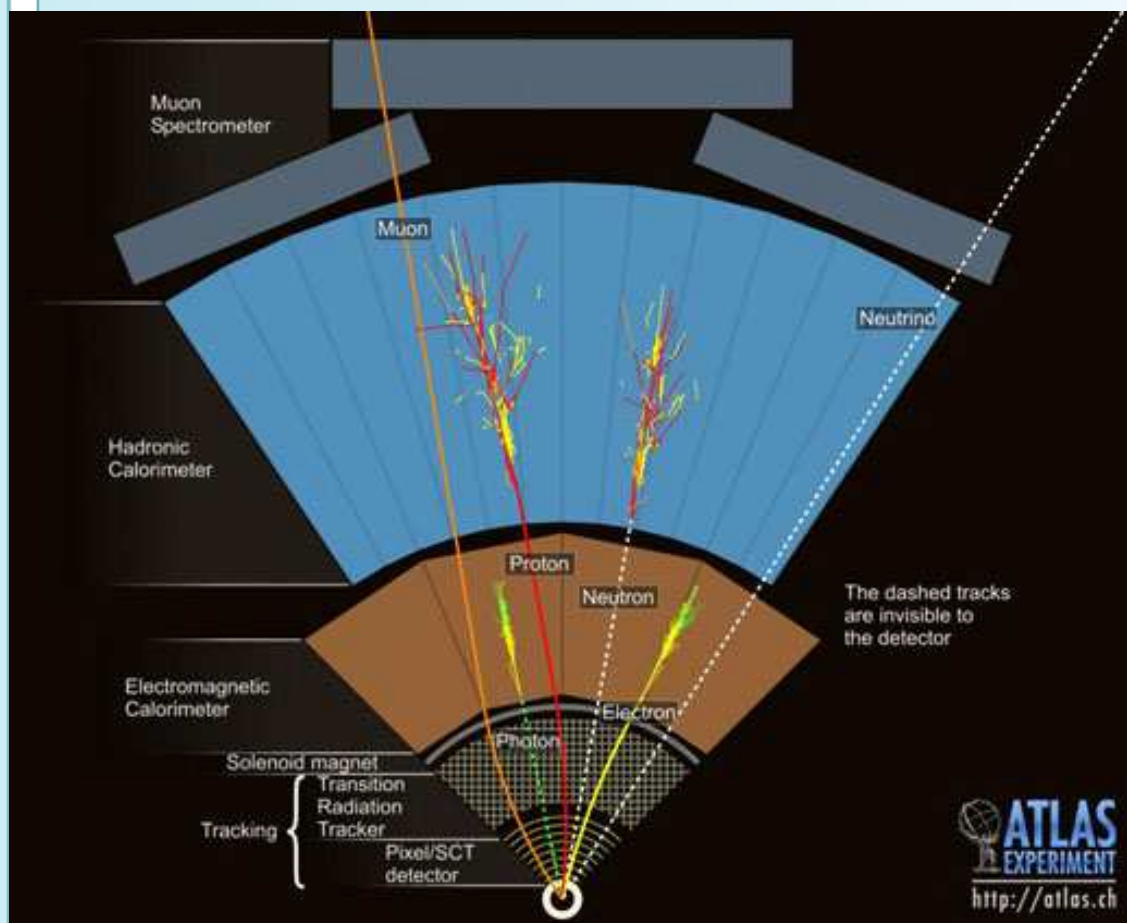


Comment retrouver nos aiguilles dans nos immenses meules de foin?
→ Reconstruction et identification des particules

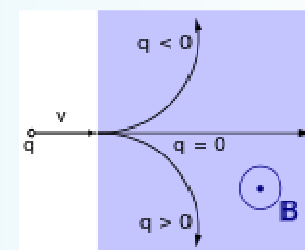


L'identification des particules: « ou comment retrouve-t'on nos différentes aiguilles dans nos immenses meules de foin »

http://atlas.physicsmasterclasses.org/fr/zpath_playwithatlas.htm



$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

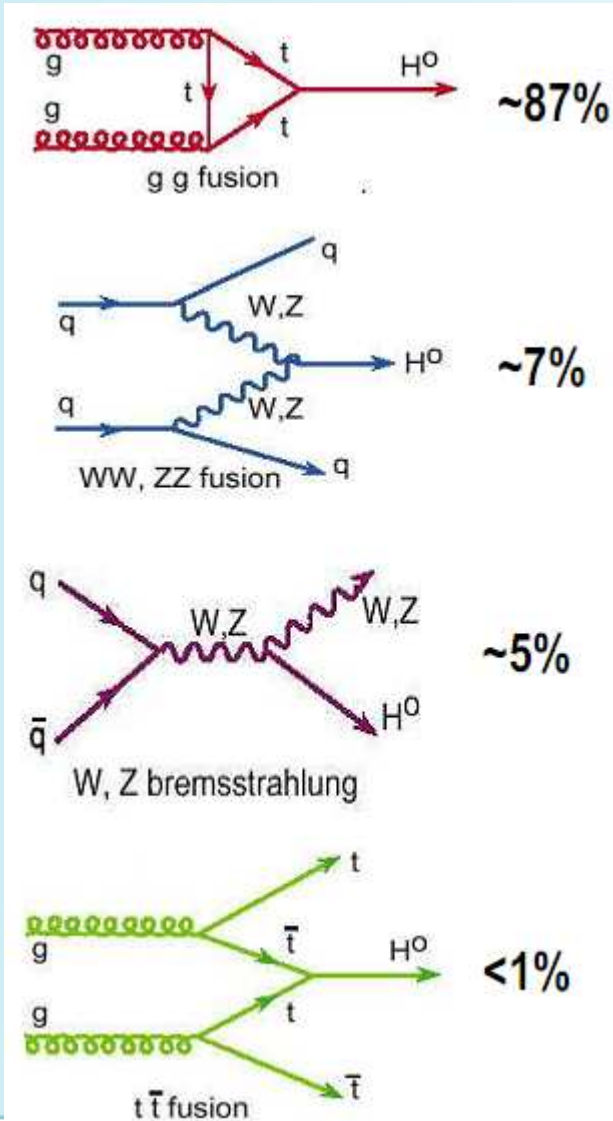


Le détecteur ATLAS

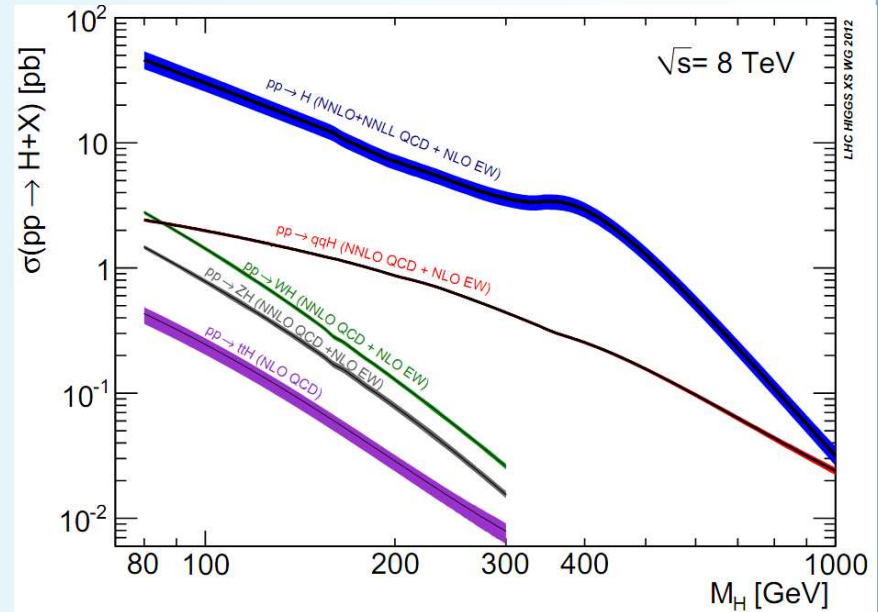


IV.2. Mécanismes de Production au LHC (1)

Diagrammes de Feynman

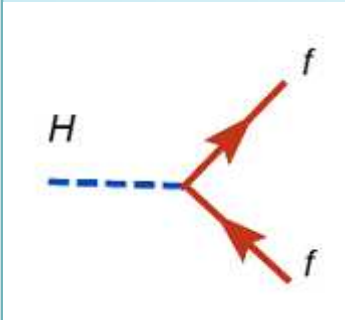


Sections Efficaces



IV.3. Modes de Désintégration

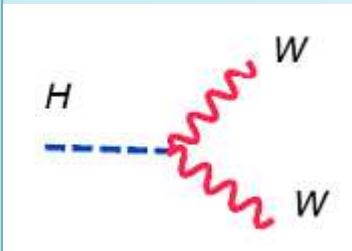
Diagrammes de Feynman



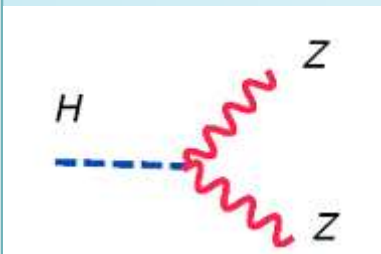
$$b\bar{b} \approx 58\%$$

$$c\bar{c} \approx 3\%$$

$$\tau^+\tau^- \approx 6\%$$

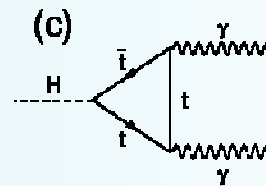
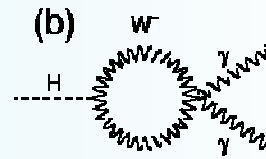
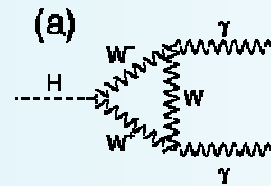
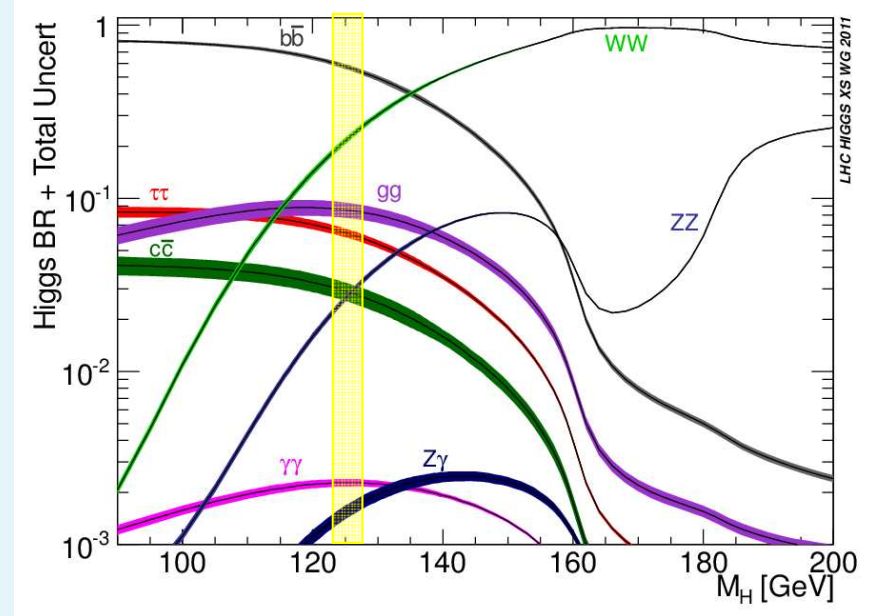


$$\approx 22\%$$



$$\approx 3\%$$

BRs



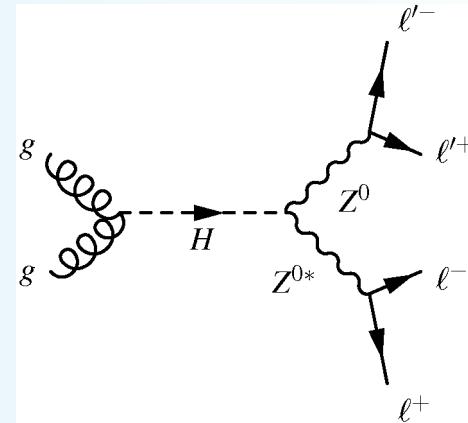
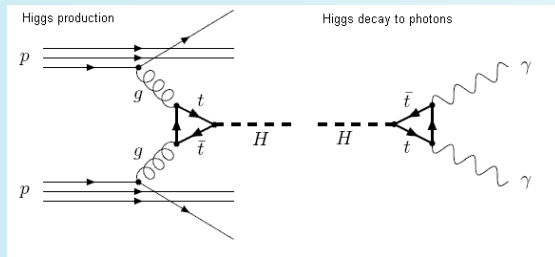
$$\approx 0.3\%$$

IV.4. Topologies de Recherche - 2 Exemples -

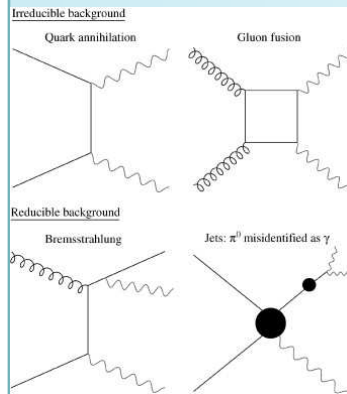
2 photons

4 leptons chargés

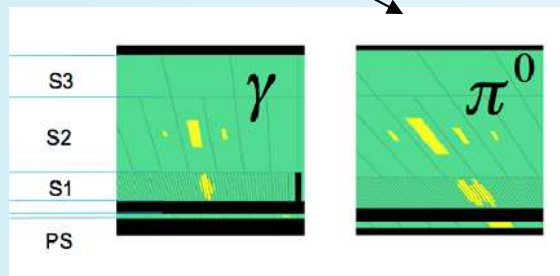
Signal



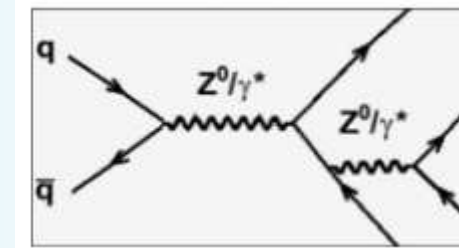
Bruits de fond



$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$



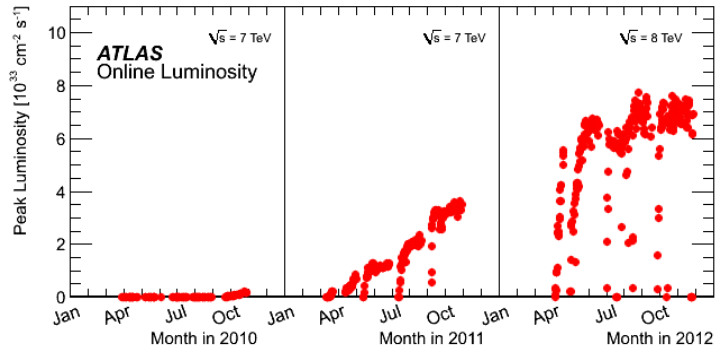
Irréductible:



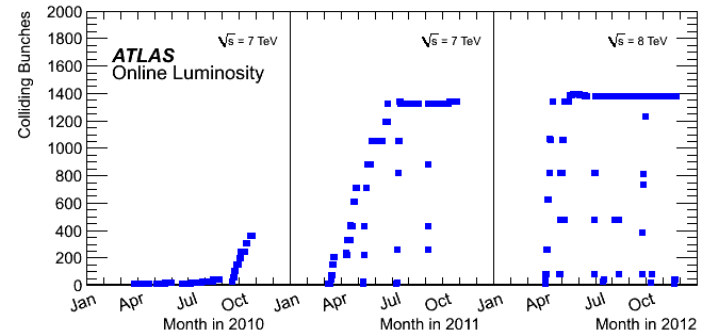
Réductibles: Z+bb, tt+jets

IV.5. Données d'ATLAS

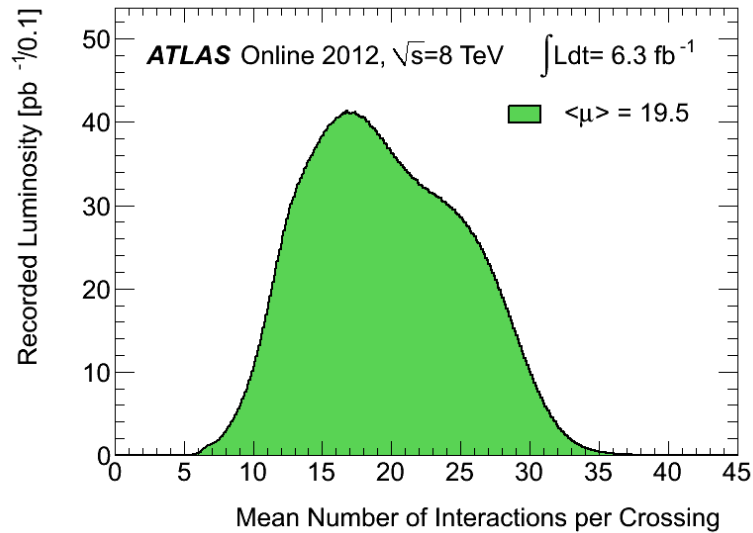
Evolution de la luminosité instantanée



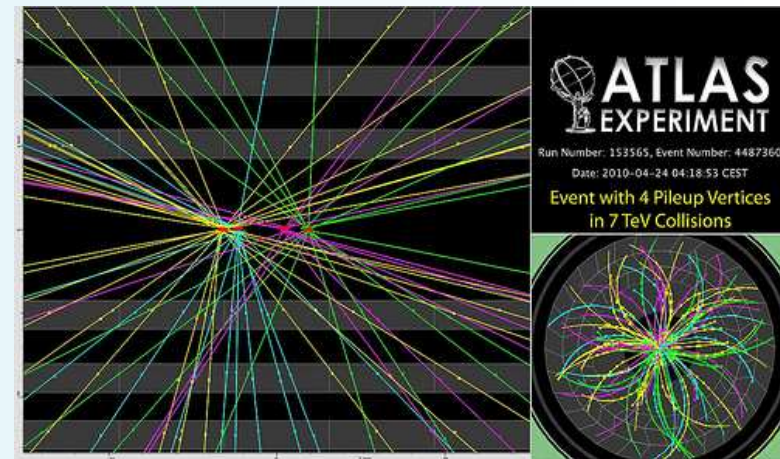
Evolution du nbre de paquets de p



$\langle \text{Nbre} \rangle$ de collisions par croisement

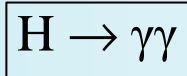
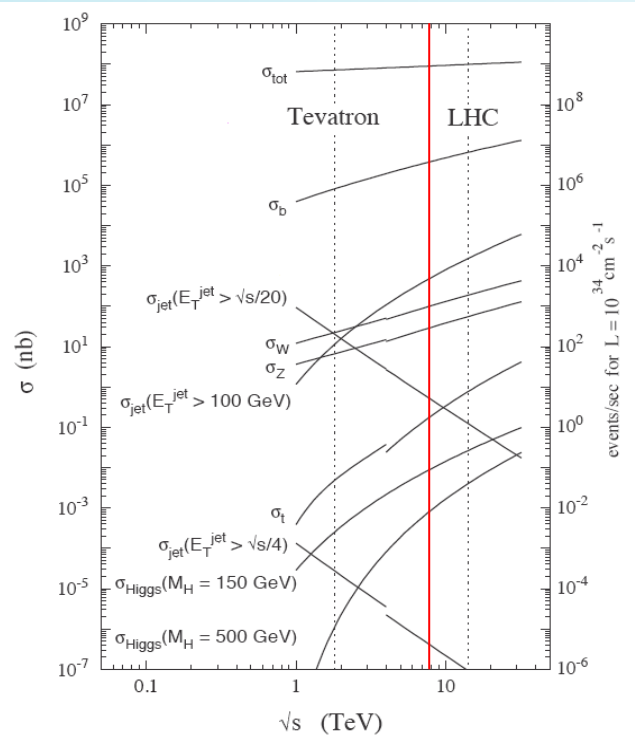


Collisions multiple pp



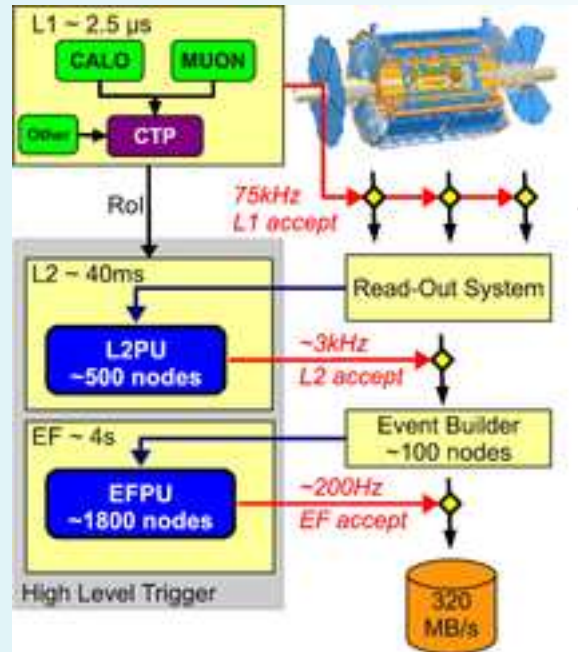
IV.6. Analyses - Sélection « En Ligne » -

- C'est ce qu'on appelle le « trigger » dans notre jargon



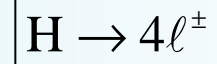
Single γ : $p_T(\gamma\gamma) > 60 \text{ GeV}$

Double γ : $\begin{cases} p_T(\gamma\gamma) > 20 \text{ GeV} \\ \text{Isolation} \end{cases}$



- Performances actuelles:

- v de sortie: $\sim 400 \text{ Hz}$
- $\mathcal{L} \sim 8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



Single ℓ^\pm : $\begin{cases} p_T(\mu^\pm) > 18 \text{ GeV} \\ p_T(e^\pm) > 22 \text{ GeV} \end{cases}$

Double ℓ^\pm : $\begin{cases} p_T(\mu^\pm) > 10 \text{ GeV} \\ p_T(e^\pm) > 12 \text{ GeV} \end{cases}$

IV.6. Analyses

- Sélection « Hors-Ligne » -

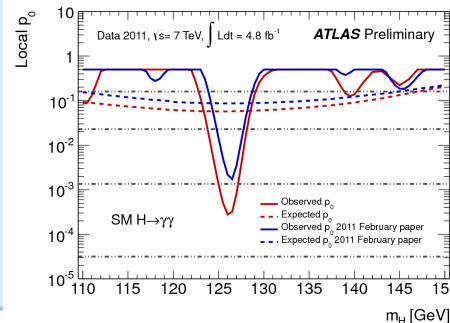
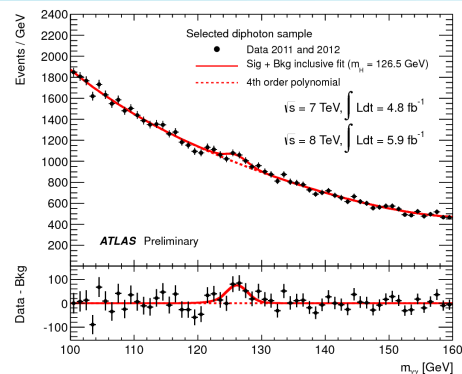
- A ce niveau, on relit les événements enregistrés sur des bandes magnétiques et on affine la séparation entre le signal et les bruits de fond

$$p_T(\gamma_1) > 40 \text{ GeV}$$

$$p_T(\gamma_2) > 30 \text{ GeV}$$

$$|\eta(\gamma)| < 2.37$$

Isolation



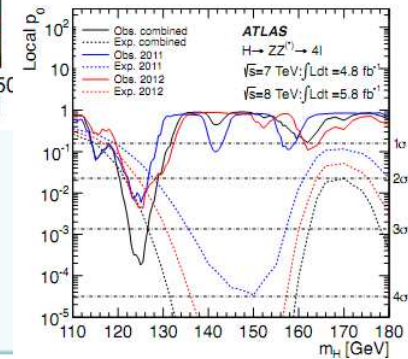
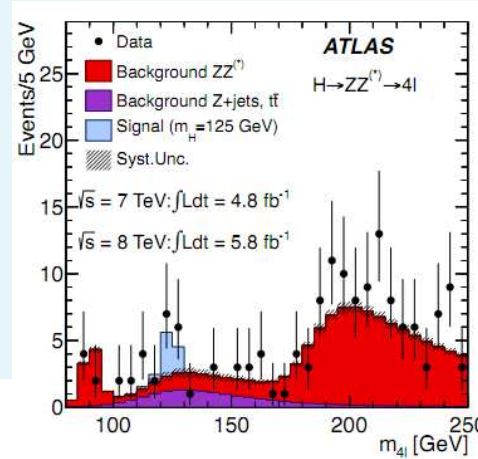
$$p_T(\ell^\pm) > 20, 15, 10, 7(6) \text{ GeV}$$

$$|\eta(e^\pm)| < 2.47 \quad 50 < M(\ell_1^\pm, \ell_2^\pm) < 106 \text{ GeV}$$

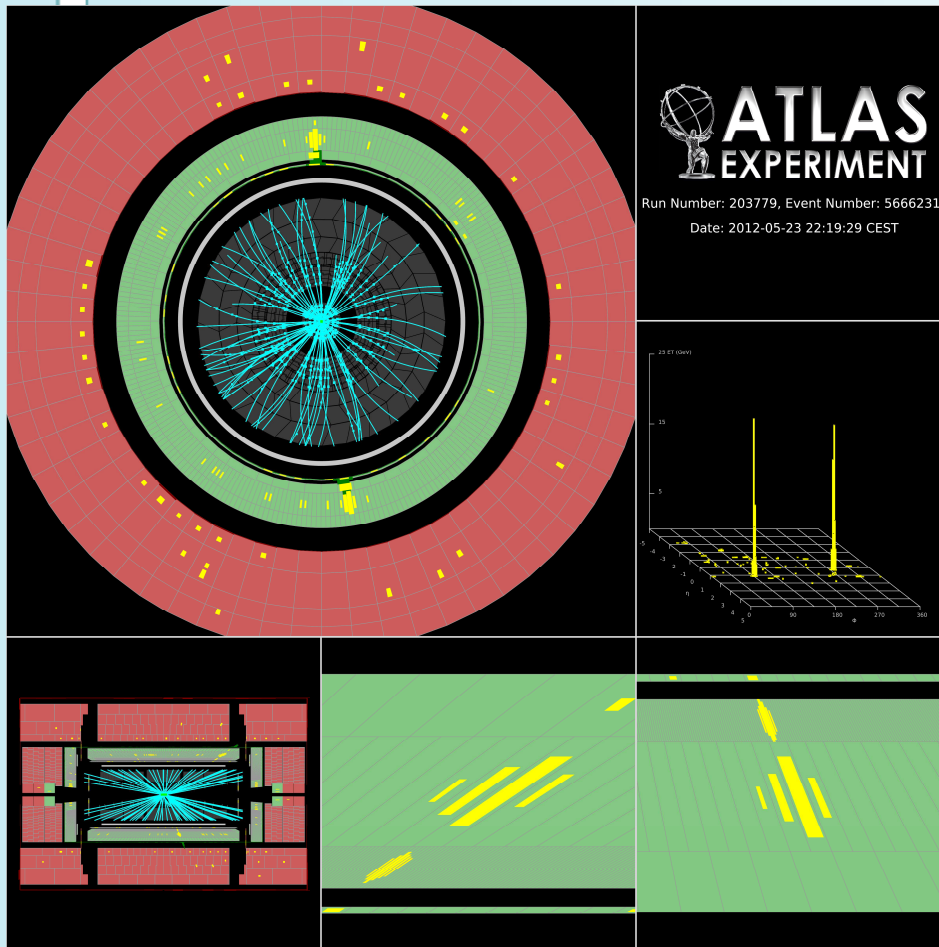
$$|\eta(\mu^\pm)| < 2.7 \quad M(\ell_3^\pm, \ell_4^\pm) < 115 \text{ GeV}$$

Isolation

$$M(\ell_3^\pm, \ell_4^\pm) \subset [17.5, 50] \text{ GeV}$$



IV.7. Candidats dans ATLAS (1)



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

Photon candidates are unconverted.

Event number: 56662314

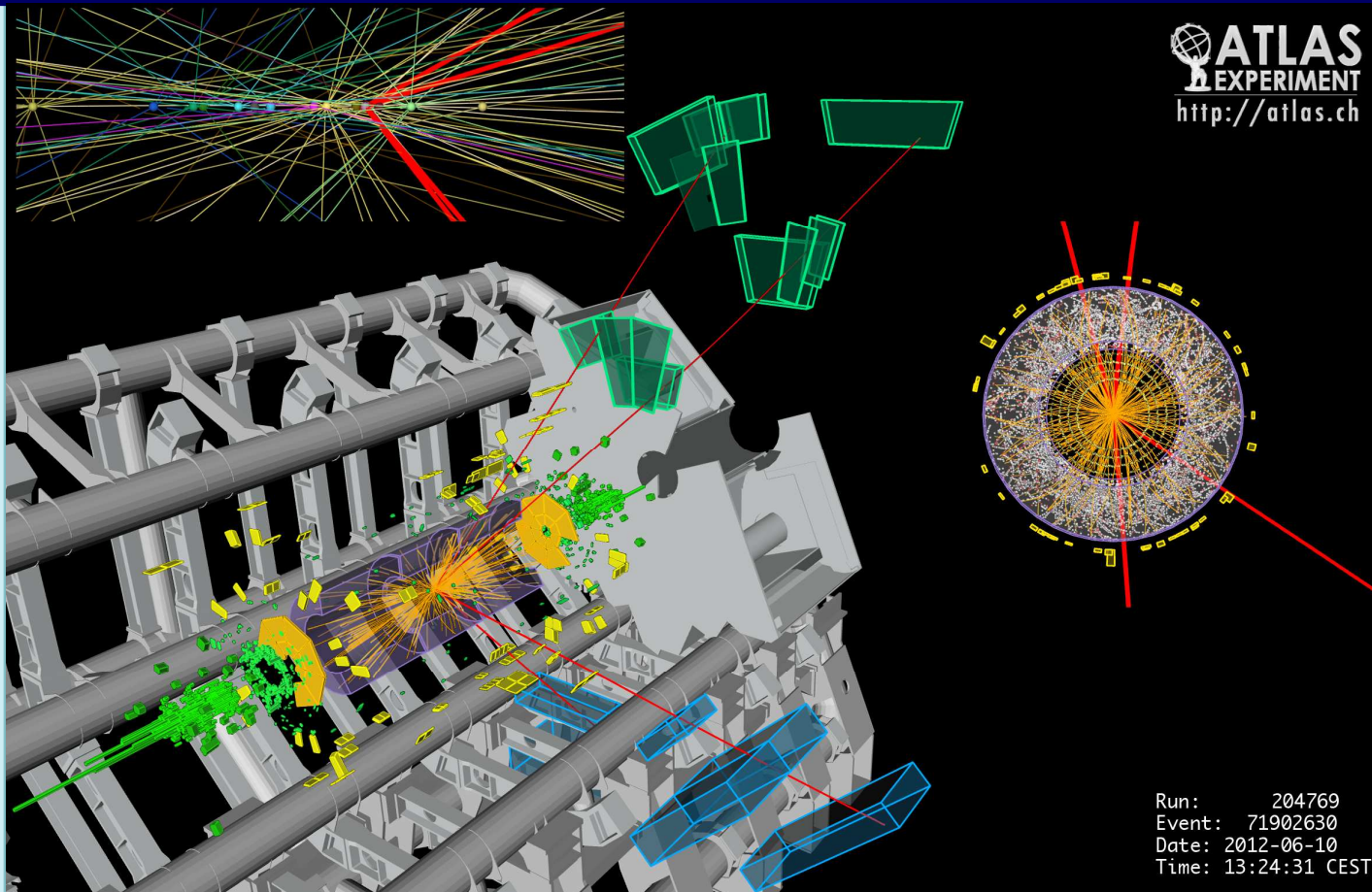
Run: 203779 at $\sqrt{s} = 8$ TeV

γ_1 : $p_T = 62.2$ GeV and $\eta = 0.39$

γ_2 : $p_T = 55.5$ GeV and $\eta = 1.18$

$M(\gamma\gamma) = 126.9$ GeV

IV.7. Candidats dans ATLAS (2)



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

EventNumber: 71902630

RunNumber: 204769

$M(4\mu) = 125.1$ GeV

$M_{12} = 86.3$ GeV, $M_{34} = 31.6$ GeV

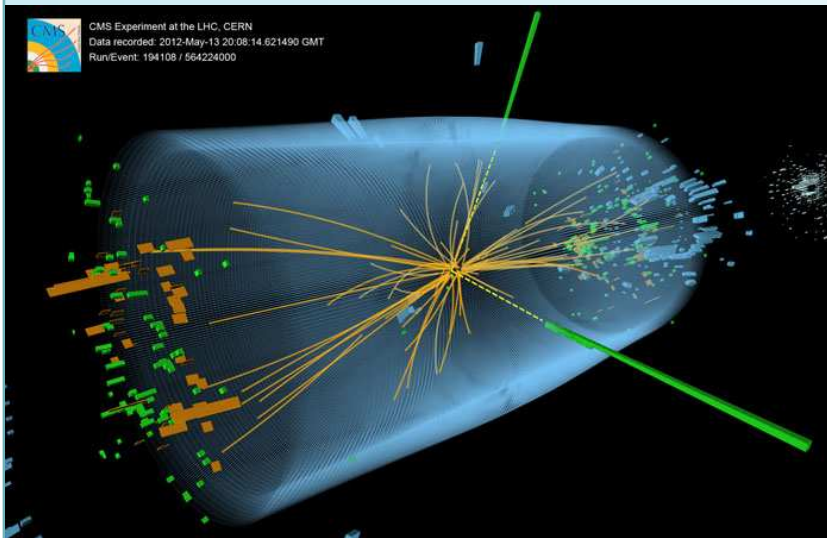
μ_1 : $pt = 36.1$ GeV, $\eta = 1.29$, $\phi = 1.33$

μ_2 : $pt = 47.5$ GeV, $\eta = 0.69$, $\phi = -1.65$

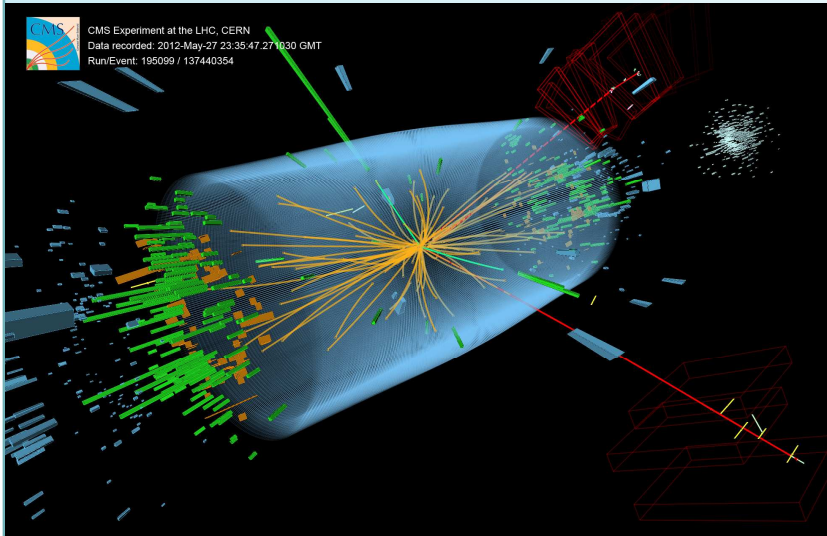
μ_3 : $pt = 26.4$ GeV, $\eta = 0.47$, $\phi = -2.51$

μ_4 : $pt = 71.7$ GeV, $\eta = 1.85$, $\phi = 1.65$

IV.7. Candidats dans CMS



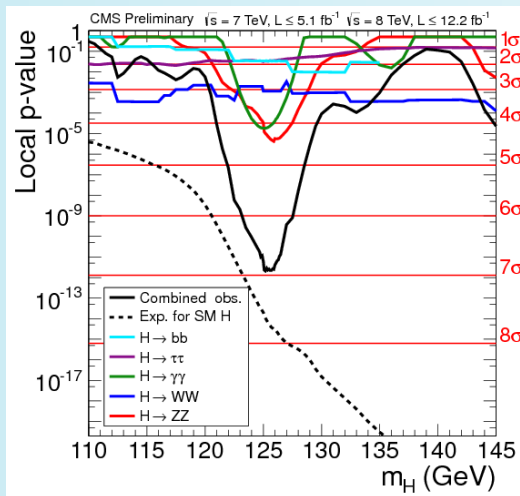
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



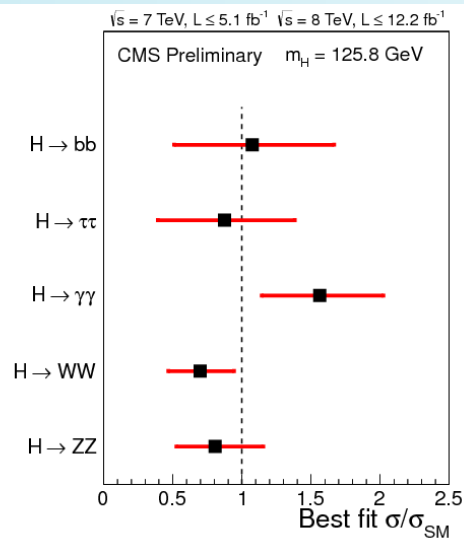
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$$

IV.8. Résultats récents de CMS

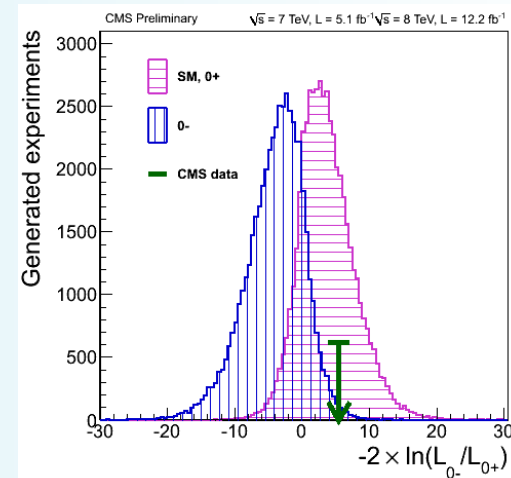
- HCP2012, 12-16 Nov 2012 à Kyoto JAPON -



Confirmation de la découverte



Mesure des taux de branchement



Mesure de la Parité

V. Conclusions

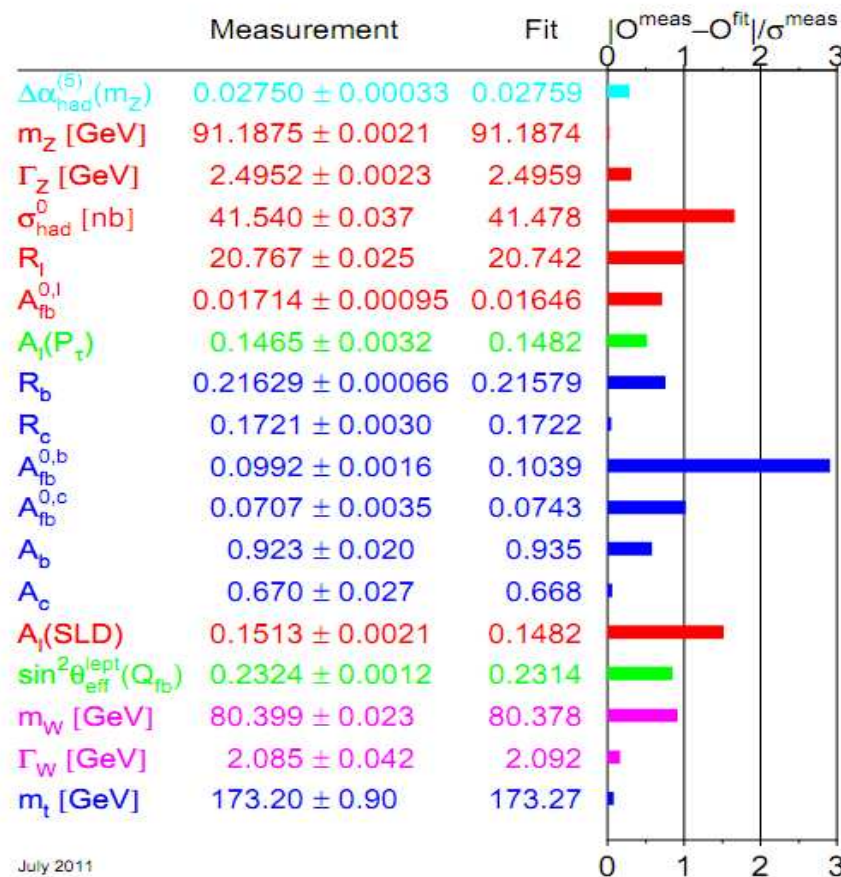
- Le LHC a permis la découverte du boson de Higgs dans les expériences ATLAS et CMS
- Cette découverte a été annoncée officiellement par le CERN le 4 juillet 2012
- C'est, d'une part, la conclusion d'une très longue quête (48 ans)
- C'est, d'autre part, le début d'une ère que certains nomment « higgsologie » de mesure de précision des propriétés du boson de Higgs
- Par ailleurs les recherches sur des extensions du Modèle Standard susceptibles de stabiliser la masse du boson de Higgs à haute énergie s'intensifient

BACK-UP

II.4. Succès & Limites du Modèle Standard (1)

Succès

Limites



July 2011

Problèmes Ouverts

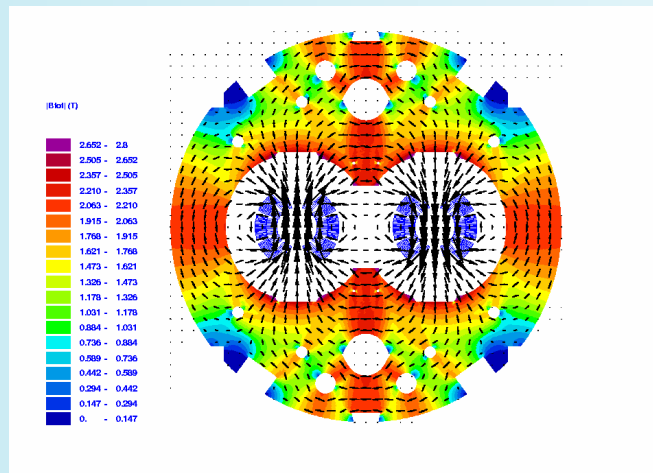
- Il y a 19 paramètres libres
- Pas de Particule de Matière Noire
- Pas de Gravitation Quantique
- Est-ce que le boson de Higgs est élémentaire?
- Comment stabiliser sa masse?
- Pourquoi y a-t-il 3 générations?
- Est-ce que les quarks et les leptons sont élémentaires?
- Quelle est l'origine du mélange des quarks?
- Quelle est l'origine de la violation de CP?
- Est-ce que la « Grand Unification » existe?
- Existe-t-il une théorie quantique de la gravitation?
- Si oui, est-elle unifiée avec les autres interactions fondamentales?
- Est-ce que cette théorie a des dimensions supplémentaires?
- Pourquoi la charge électrique est quantifiée?,...

Non-Observable	Symétrie	Loi de Conservation
Position spatiale absolue	Translation dans l'espace	Impulsion
Temps absolu	Translation dans le temps	Energie
Direction spatiale absolue	Rotation	Moment cinétique
Vitesse absolue	Transfo. de Lorentz	Générateurs du groupe de Lorentz
Différence entre 2 particules de même nature	Permutation entre particules de même nature	Statistique de Fermi-Dirac ou de Bose-Einstein
Droite ou gauche absolue	Changement en	Parité
Signa absolu de la charge électrique	Changement de particule en anti-particule	Conjugaison de charge
Phase absolue d'un champ de matière chargé	Changement de la phase	Charge électrique
Différence entre mélanges cohérents différents de quarks colorés	Changement de couleur	Générateurs de couleur
Différence entre mélanges cohérents différents de leptons chargés et de neutrinos	Changement d'un lepton chargé en son neutrino	Générateurs d'isospin faible

M. Spiro & G. Cohen-Tannoudji: « La Matière-Espace-Temps », Fayard (1986)

Les Instruments

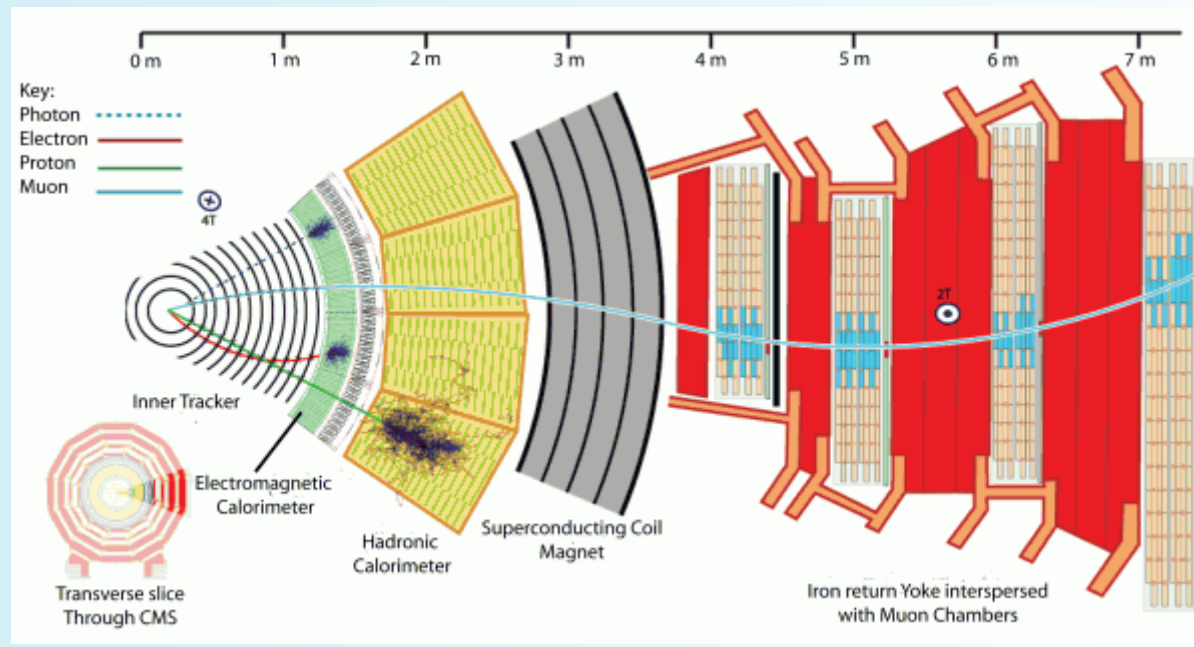
- L'accident du LHC (2008) -



Les Instruments

- Les Détecteurs de Particules (1) -

L'identification des particules: « ou comment retrouve-t'on nos différentes aiguilles dans nos immenses meules de foin »



Stabilité des Masses & Symétries

- En théorie quantique des champs, pour qu'une masse soit stable, il faut que ses corrections quantiques soient relativement faibles
 - Dans le Modèle Standard, la masse:
 - des Bosons Médiateurs est protégée par l'invariance de jauge des interactions fondamentales
 - des Fermions est protégée par la chiralité
 - du Boson de Higgs n'est protégée par aucune symétrie
- => elle est susceptible d'avoir des corrections quantiques gigantesques, incontrôlables par exemple de l'ordre de 10^{16} GeV dans un théorie de grande unification



$$m_H^2 (1 \text{ boucle}) = m_H^2 (1^{\text{er}} \text{ ordre}) + N_f \frac{\lambda_f^2}{8\pi^2} \left[-\Lambda^2 + 6m_f \text{Log} \left(\frac{\Lambda}{m_f} \right) - 2m_f^2 \right]$$

- par ailleurs, le boson de Higgs n'apporte une solution satisfaisante par rapport à la brisure de la symétrie électrofaible que si sa masse est inférieure à ~ 800 GeV