

Recherche du boson de Higgs : La quête de l'origine de la masse



Stéphane Perriès
IPN Lyon
27/03/2014

CERN 4 juillet 2012

Spécial Festival d'Avignon
La 66^e fête du théâtre démarre le 7 juillet
 Supplément

Le Monde

Le Monde des livres
Les coups de cœur de la rédaction
 Supplément

Jeudi 5 juillet 2012 - 68^e année - N°20981 - 1,60 € - France métropolitaine - www.lemonde.fr

Fondateur: Hubert Beuve-Méry - Directeur: Erik Izraelowicz

Science : la matière dévoilée

- Le boson de Higgs, particule manquante pour expliquer l'Univers, vient d'être découvert
- Les physiciens du CERN de Genève ont prouvé son existence à 99,9999 %

IMPÔTS CE QUI VA CHANGER

7,2 milliards de plus dès 2012
COLLECTIF BUDGÉTAIRE Entretien avec Jérôme Cahuzac, ministre délégué au budget, sur le détail des mesures qui toucheront les ménages et les entreprises. Page 8

Réforme fiscale à l'automne

BUDGET Pour tenir les engagements de réduction des déficits publics, Jean-Marc Ayrault (photo) laisse les décisions les plus lourdes sur les recettes et les dépenses pour le budget



1,50 EURO, PREMIÈRE ÉDITION N°6688

JEUDI 5 JUILLET 2012

WWW.LIBERATION.FR

Libération

Physique des particules

La masse est dite

Le Cern a réussi à mettre en évidence le boson de Higgs qui résout une énigme fondamentale et ouvre une nouvelle étape scientifique. PAGES 2-5

Les derniers feux des pharaons
 Au musée Jacquemart-André, à Paris, une exposition passionnante s'attarde sur la période tardive de l'antiquité égyptienne, souvent oubliée.

Suicides chez France Télécom : l'ancien patron mis en examen
 Didier Lombard, qui dirigeait l'opérateur téléphonique lors de la vague de suicides ayant touché l'entreprise en 2008 et 2009, est visé par une enquête de la justice pour harcèlement moral.

A nos lecteurs
 En raison d'un mouvement de grève dans les imprimeries, ce numéro de Libération n'est disponible que sous sa forme électronique. Toutes nos excuses à nos lecteurs.



Le détecteur Atlas, l'un des outils de recherche du boson de Higgs près de Genève.

C'est dans cette cathédrale souterraine de béton et d'acier, le LHC, Large Hadron Collider, situé près de Genève, que les physiciens ont trouvé leur graal, la seule particule élémentaire à n'avoir jamais été observée, celle qui valide la théorie scientifique sur la constitution de la matière, celle que les savants cherchent depuis 1964, le boson de Higgs. Mercredi 4 juillet, les chercheurs du CERN ont annoncé devant 400 physiciens survoltés - et l'écclesiaste Peter Higgs lui-même - avoir trouvé le fameux boson avec une certitude de 99,9999 %.

L'ÉVÉNEMENT

le boson de Higgs avec 99,9999 % de certitude

en 1964, vient d'être détectée grâce à des collisions phénoménales réalisées dans le grand accélérateur du CERN



L'écclesiaste Peter Higgs (à gauche) salue le belge François Engler, mercredi 4 juillet au CERN : les deux hommes avaient prédit l'existence du boson en 1964.

Tout ce jeu se complique aussi, car les physiciens ne savent pas directement le boson Higgs. En n'en voyant en fait que les effets ou ses petites filles, c'est à dire les particules produites lors de la désintégration du boson initial qui n'apparaît que très brièvement après les collisions.

Et comme toutes ces filles peuvent aussi naître par d'autres processus, la recherche en paternité est compliquée. « Ça va être de la physique devant nous. Un âge d'or arrive, pour ce que les Français appellent », souligne Daniel Foumier. « Une découverte se forme dans un chapitre. Elle ouvre au contraire un domaine complet pour les autres. Le laboratoire de physique théorique à l'École normale supérieure, en appelant l'existence du boson de Higgs, a découvert des particules virtuelles au XIX^e siècle et dont on ne peut plus se passer pour communiquer.

Il aura fallu des décennies et des milliards de dollars pour que les données aient pu être analysées et que la certitude de 99,9999 % ait pu être atteinte.

Cette percée dans l'infiniment petit ouvre une nouvelle page dans la compréhension des mystères de l'Univers.

Le monde de l'infiniment petit recèle bien des mystères. A l'origine du monde, tout est fait d'énergie ou d'atomes. Point de particules, en particulier les quarks, le monde plat dans un environnement très chaud. Puis l'Univers grandit et le coup de température baisse. Arrive un moment où le monde se refroidit et des halles se créent.

Dans l'Univers, le moment où une partie de l'énergie devient matière, ce qui se passe dans la soupe de liquide devient gas, ce qui était gas. Les quarks se forment encore, devient turbulents et asymétriques. Cette énergie de asymétrie, comme les physiciens l'appellent, correspond au moment où l'asymétrie de l'Univers bon.

Puis, pendant une période de quelques années, il y a une énergie devient matière, ce qui se passe dans la soupe de Higgs. Le boson Higgs donne leur masse. Mais qui a donné la masse au boson ? Voilà l'une des questions sans réponse.

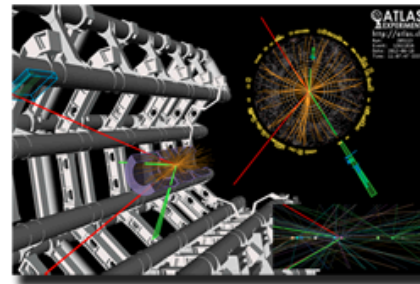
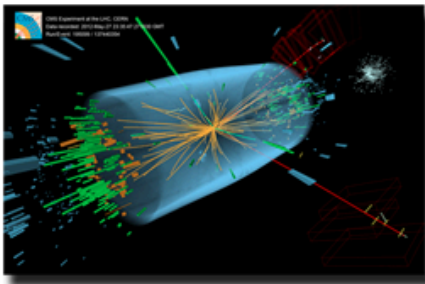
Les chercheurs qui ont travaillé pour découvrir le boson de Higgs ont pu constater que le boson de Higgs est une particule qui se désintègre en deux photons ou deux électrons. Il faut donc trouver une autre manière de le détecter. Les physiciens ont donc cherché à le détecter en le faisant passer à travers un matériau qui absorbe les photons ou les électrons. Ils ont donc cherché à le détecter en le faisant passer à travers un matériau qui absorbe les photons ou les électrons. Ils ont donc cherché à le détecter en le faisant passer à travers un matériau qui absorbe les photons ou les électrons.

Le boson de Higgs est une particule qui se désintègre en deux photons ou deux électrons. Il faut donc trouver une autre manière de le détecter. Les physiciens ont donc cherché à le détecter en le faisant passer à travers un matériau qui absorbe les photons ou les électrons. Ils ont donc cherché à le détecter en le faisant passer à travers un matériau qui absorbe les photons ou les électrons.

Prix nobel de physique 2013

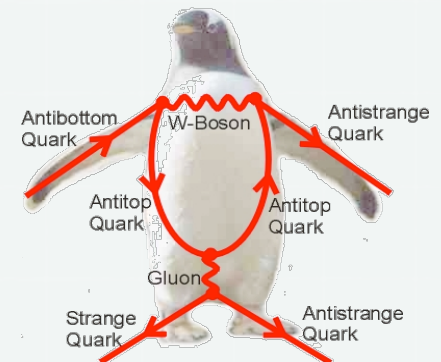
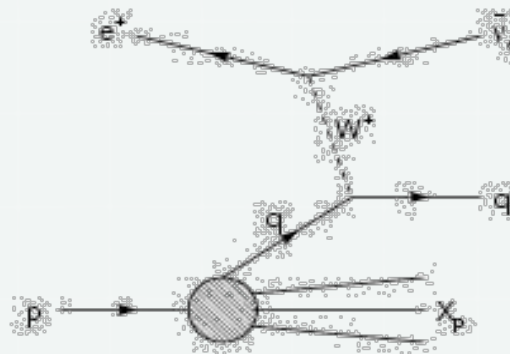
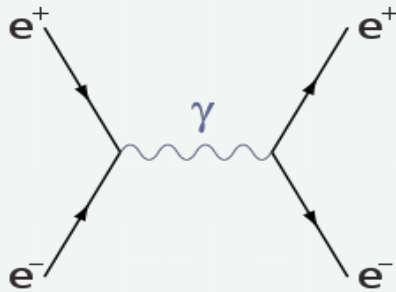


"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

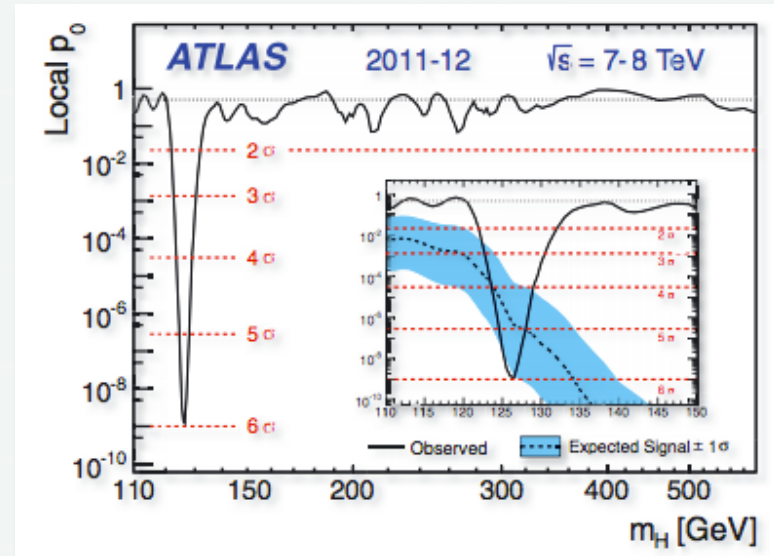
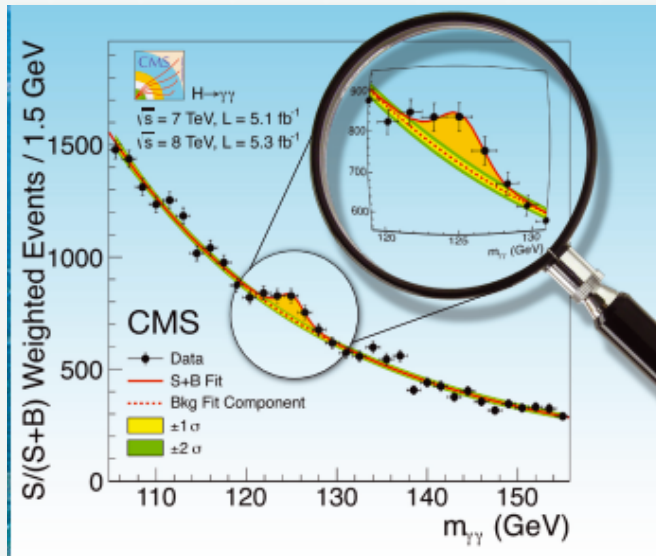


Point de vue théorique

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - e Q_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
 & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
 & - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
 & - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
 & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
 \end{aligned}$$



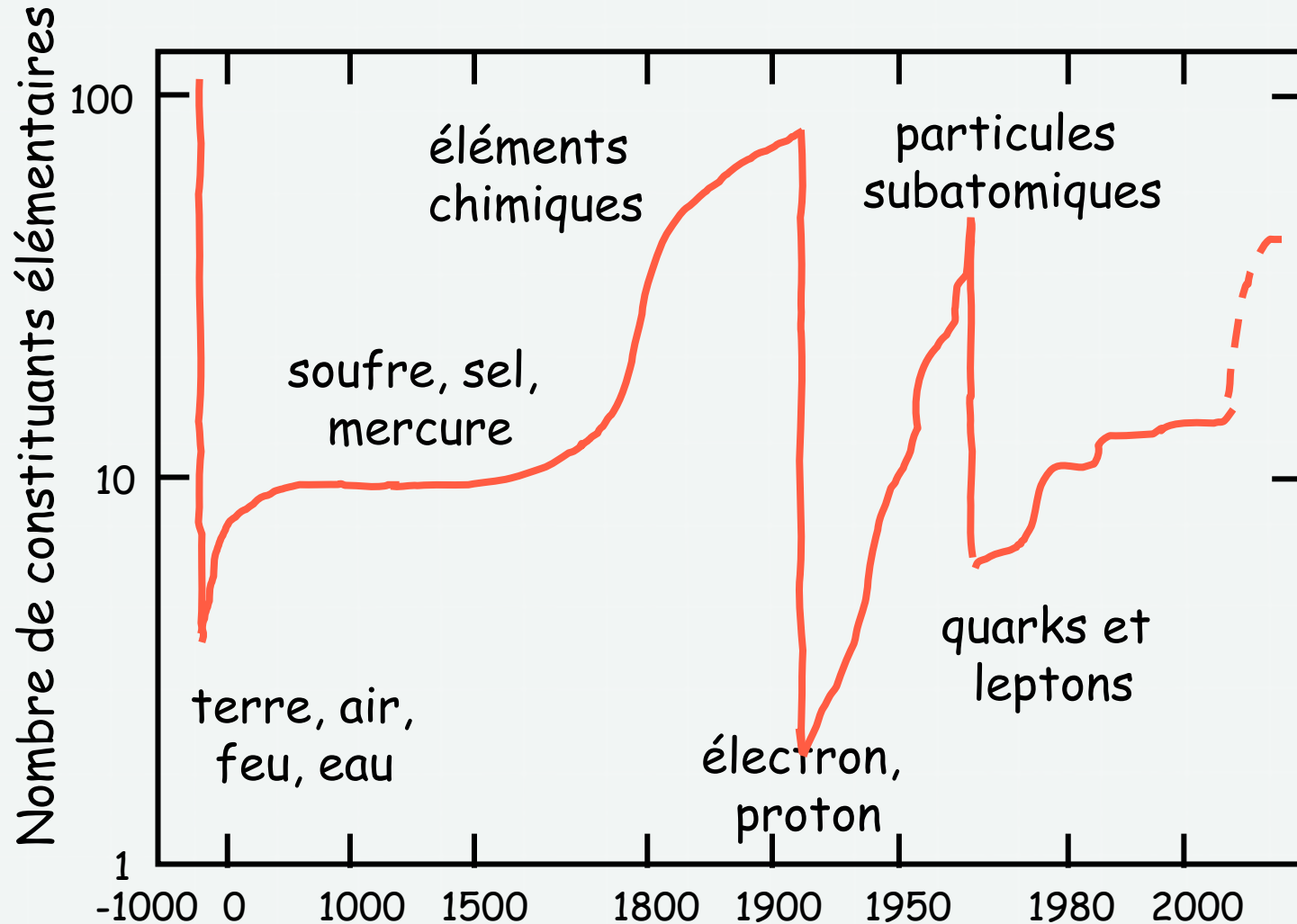
Point de vue expérimental



Plan

1. Modèle standard de la physique des particules
2. Le boson de Higgs
3. Les techniques expérimentales
4. La découverte
5. Et après ?

La quête des constituants élémentaires



Physique des particules

- Etude des constituants (élémentaires) de la matière
- Etude interactions (forces) qui s'exercent entre ces constituants
- Discipline qui a vu le jour il y environ 1 siècle avec l'avènement de la théorie de la relativité restreinte (Einstein) et de la mécanique quantique (Planck) → Théorie quantique des champs
- Expérimentalement deux grandes périodes :
 - Utilisation des rayons cosmiques → 1930-1960
 - Production de particules avec des accélérateurs 1960 → aujourd'hui
- Succession de découvertes expérimentales et prédictions/avancement théorique

Physique des hautes énergies

Les hautes énergies permettent de

- 🌐 Sonder la matière à petite échelle

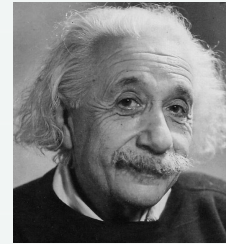
$$E \propto 1/\lambda$$



Dualité
onde-corpuscule
Louis De Broglie

- 🌐 Créer de nouvelles particules à grande masse

$$E = mc^2$$



Relativité restreinte
Albert Einstein

- 🌐 Etudier les très hautes températures

$$E = kT$$



Physique statistique
Ludwig Boltzmann

Physique des hautes énergies

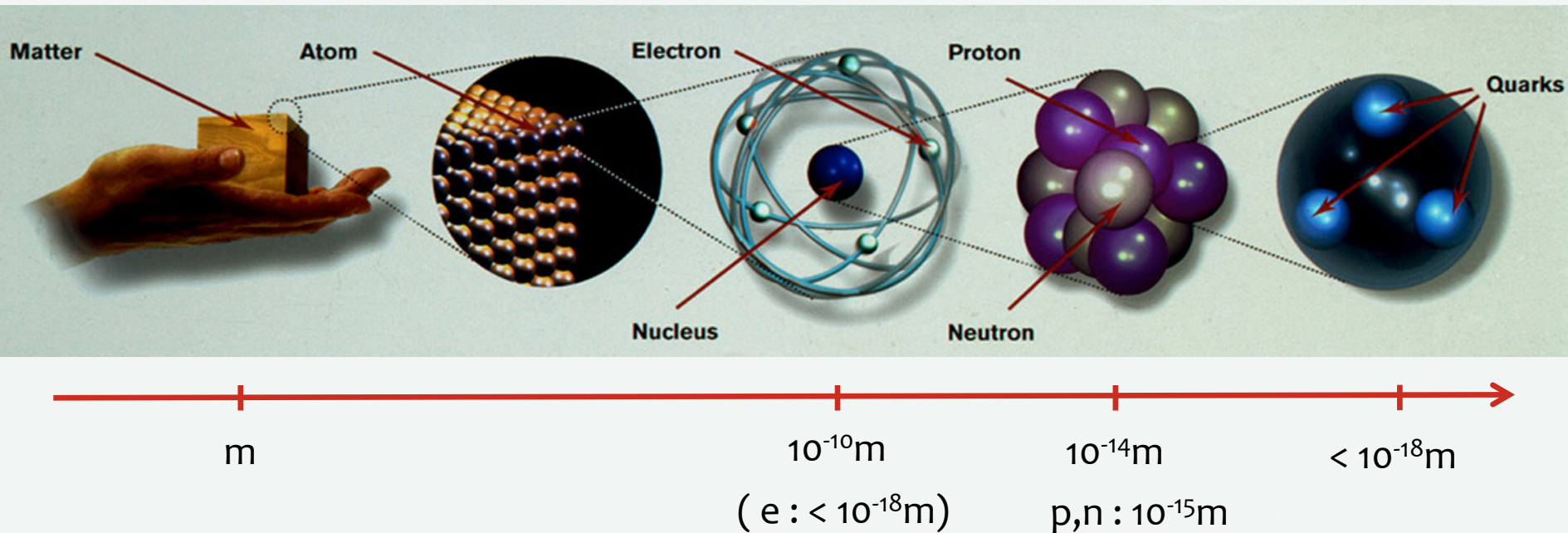
Les hautes énergies permettent de

- 🌐 Sonder la matière à petite échelle

$$E \propto 1/\lambda$$



Dualité
onde-corpuscule
Louis De Broglie

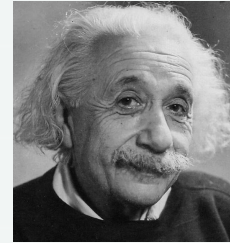


Physique des hautes énergies

Les hautes énergies permettent de

- Créer de nouvelles particules à grande masse

$$E = mc^2$$



Relativité restreinte
Albert Einstein

- Equivalence masse-énergie (1905)
- Unité naturelle de la physique des particules pour les énergies et les masses : GeV

Physique des hautes énergies

Les hautes énergies permettent de

- Etudier les très hautes températures

$$E = kT$$

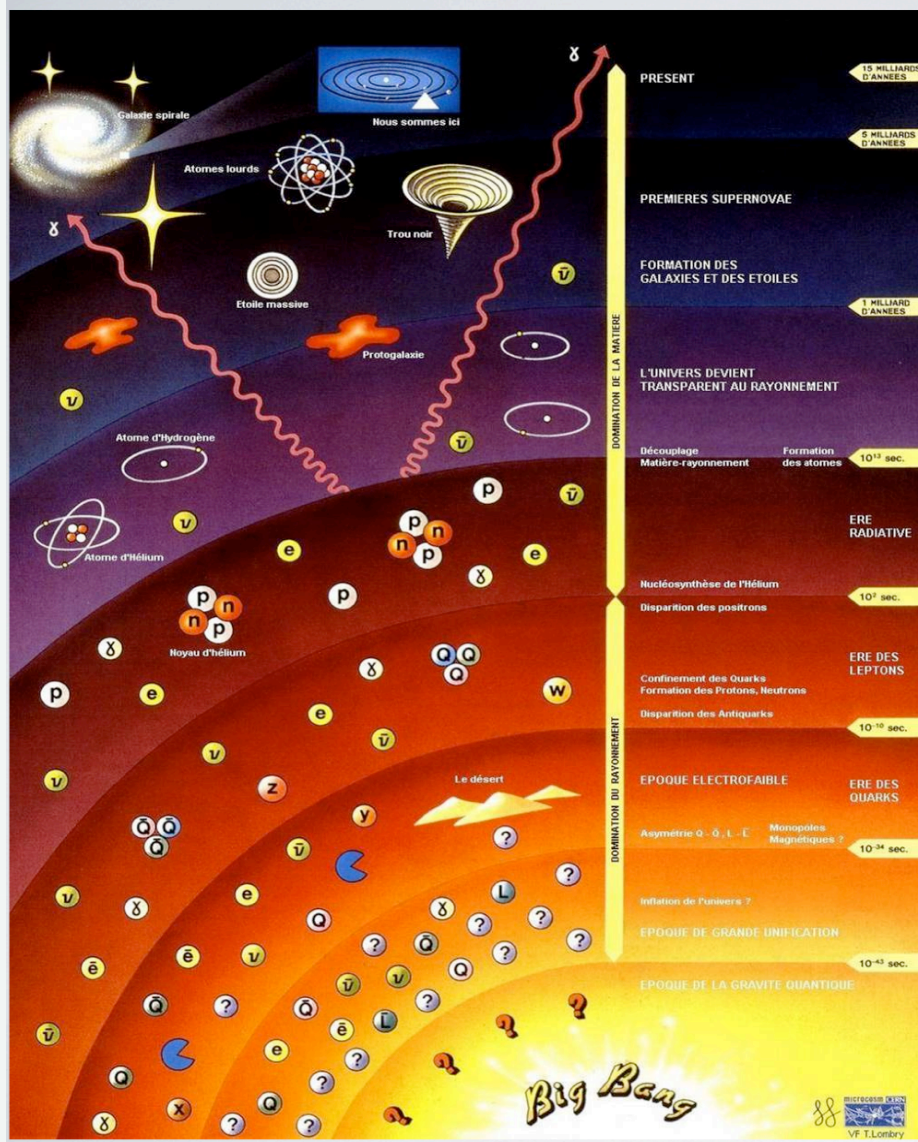


Physique statistique
Ludwig Boltzmann

Lien entre physique des particules et cosmologie

↑ Temps

↓ Température / densité d'énergie



l'histoire de notre univers

10¹³ s

premiers atomes

1 s

hadrons

10⁻⁶ s

quarks
leptons

10⁻¹⁰ s

10⁻³⁴ s

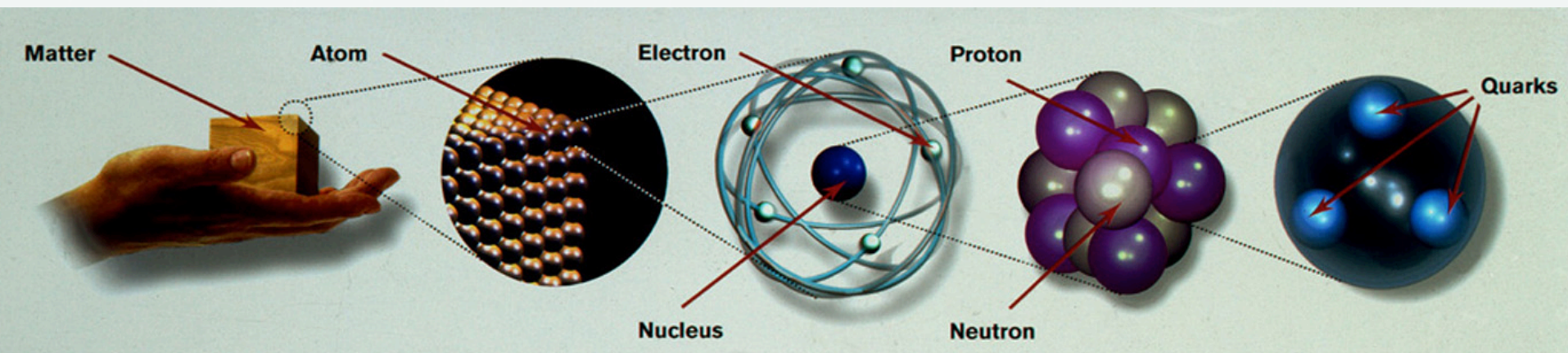
??

10⁻⁴⁴ s

gravitation
quantique

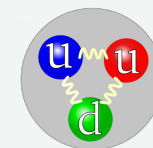
$$E = kT$$

La matière qui nous entoure

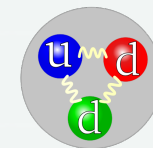


Toute la matière ordinaire peut être décrite par les interactions de quatre particules élémentaires de matière :

Particule	Symbole	Type	Charge (unité e)
Electron	e^-	Lepton	-1
Neutrino Electronique	ν_e	Lepton	0
Quark up	u	Quark	2/3
Quark down	d	Quark	-1/3



Proton (uud)



Neutron (udd)

• TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD •

FERMIONS La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe		LEPTONS		QUARKS	
		peuvent se déplacer librement		prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.	
Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	Première Famille	ELECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1. <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">e</div>	NEUTRINO ELECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant. <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">ν_e</div>	BAS Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2. <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">d</div>	HAUT Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2. <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">u</div>
	Deuxième Famille	MUON Un compagnon plus massif de l'électron. <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">μ</div>	NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du Neutrino électron. <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">ν_μ</div>	ETRANGE Un compagnon plus lourd du "Bas". <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">s</div>	CHARME Un compagnon plus lourd du "Haut". <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">c</div>
	Troisième Famille	TAU Un compagnon encore plus lourd que le Muon. <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">τ</div>	NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du Neutrino électron. <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">ν_τ</div>	BEAUTÉ Un compagnon encore plus lourd du "Bas". <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">b</div>	VÉRITÉ ou TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut". <div style="text-align: right; color: red; font-size: 2em;">t</div>

Masse ↓

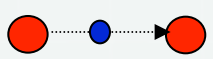
+ Antiparticules associées

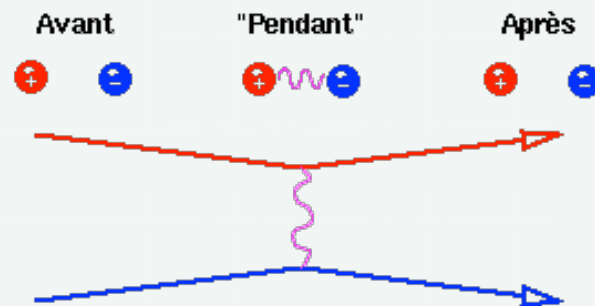
Comment les particules fondamentales interagissent-elles ?

- Vision classique : action instantanée à distance 
La force dépend de la position relative des particules. Mais comment font-elles pour « savoir » ?

- Interaction via un champ : 

Chaque particule crée un champ dans tout l'espace. Elle interagit avec le champ créé par l'autre particule.

- Théorie quantique : 
Les particules échangent d'autres particules qui sont les messagers de la force.



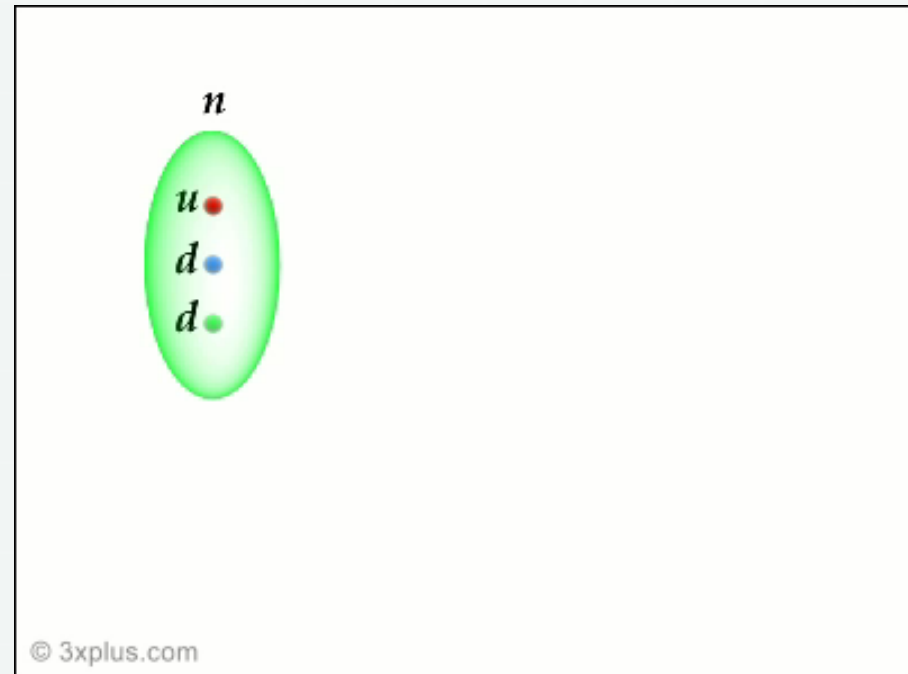
Les 4 interactions fondamentales

	Force	Fermions	Bosons	Portée	Charge	Intensité relative
	Gravitation Gravité, marées, trajectoire des planètes	Toutes les particules massives	graviton (?)	infinie	masse	10^{-39}
	Electromagnetique Presque tous les phénomènes de la vie courante	Leptons chargés et quarks	photon	infinie	Charge électrique	10^{-2}
	Forte Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10^{-15} m	Charge de couleur	1
	Faible Radioactivité β , Soleil	leptons et quarks	W^+ , W^- , Z^0 bosons	10^{-18} m	Charge faible	10^{-7}

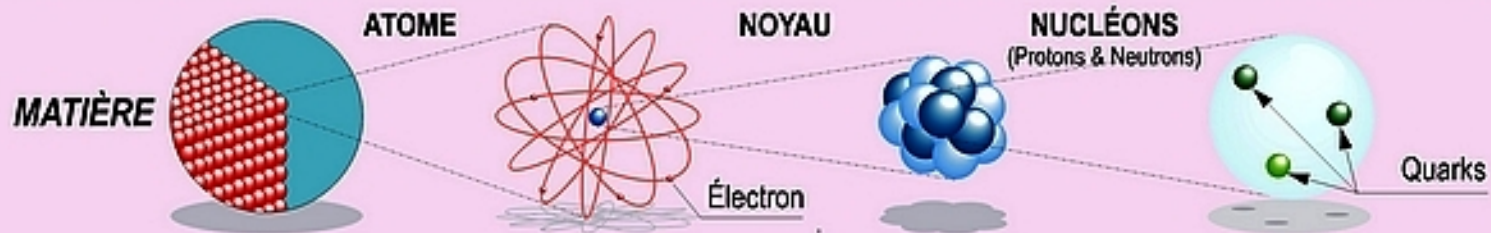
Un exemple d'interaction :


















Interaction Faible

- Désintégration du neutron (interaction faible)



• TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD •



		LEPTONS peuvent se déplacer librement		QUARKS prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.	
FERMIONS La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe	Première Famille	ELECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.  e	NEUTRINO ELECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.  ν_e	BAS Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.  d	HAUT Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.  u
	Deuxième Famille	MUON Un compagnon plus massif de l'électron.  μ	NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.  ν_μ	ETRANGE Un compagnon plus lourd du "Bas".  s	CHARME Un compagnon plus lourd du "Haut".  c
	Troisième Famille	TAU Un compagnon encore plus lourd que le Muon.  τ	NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.  ν_τ	BEAUTÉ Un compagnon encore plus lourd du "Bas".  b	VÉRITÉ ou TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut".  t
BOSONS VECTEURS Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.		PHOTON Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.  γ	GLUON Porteur de la force "forte" entre Quarks.  g	BOSONS INTERMÉDIAIRES : W⁺, W⁻ et Z⁰ Porteurs de la force "faible", responsables de certaines formes de désintégrations radioactives. 	
BOSON DE HIGGS ?		Hypothétique  Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"		Hypothétique  GRAVITON ?	

M a s s e ↓

Daniel BONNEJUE - CEA/DSM/DAPNIA février 1992 (MJ sept. 2005)

Masse

- La masse est omniprésente en physique

$\vec{P} = m\vec{g}$	Masse gravitationnelle	Galilée
$\vec{F} = m\vec{a}$	Masse inertielle	Newton
$E = mc^2$	Equivalence masse-énergie	Einstein

Toutes ces masses sont identiques

- Or au sein du modèle standard les particules sont toutes de masse nulle, sinon les invariances de jauge (symétries de la théorie) sont explicitement brisées.

→ Contraire aux résultats expérimentaux

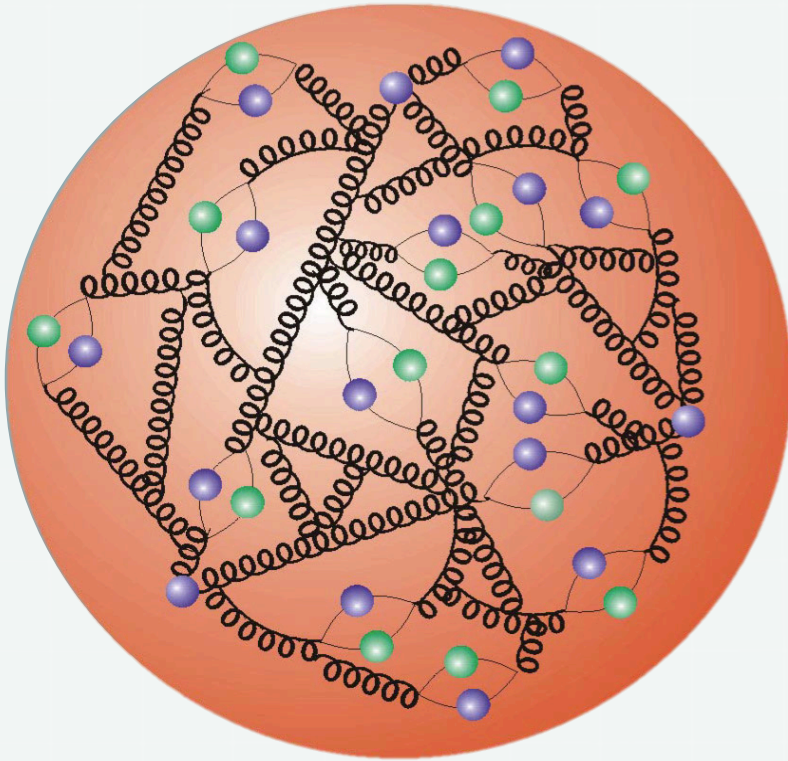
Le mécanisme de Higgs

- La solution la plus simple est (Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble 1964) :
 - Toutes les particules sont de masse nulle.
 - Un nouveau champ scalaire imprègne l'univers. Les particules interagissant avec ce champ acquièrent une masse. Plus l'interaction avec ce champ est intense, plus la masse est élevée.
- En relativité restreinte, $E=\gamma mc^2$ et $p=\gamma mv$, donc $v=pc^2/E$
- L'équation la plus connue de la physique $E=mc^2$ est le cas particulier d'une équation plus générale $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
Pour une particule de masse nulle $m=0$, on obtient $E=pc$ et donc $v=c$.
→ Les particules de masse nulle se déplacent obligatoirement à la vitesse de la lumière. Avec des arguments similaires, les particules massives ne peuvent jamais atteindre la vitesse de la lumière.
- Quand les particules de masse nulle se propagent dans le champ de Higgs, elles interagissent avec ce champ. Elles sont ralenties ($v<c$) et de ce fait acquièrent une masse.

Le boson de Higgs

- Comme tous les champs, le champs de Higgs doit avoir un “quanta”, qui est nommé le “**boson de Higgs**”
- la théorie ne contraint pas significativement la masse du boson de Higgs. M_H peut-être considérée comme un paramètre libre. Le boson de Higgs pouvait être n'importe où entre 10GeV and ~ 1000 GeV.
- Cette théorie est élégante, cohérente et en accord avec toutes les observations ... mais pendant 40 ans, cette particule a échappé à l'observation, elle a été observée en 2012 dans des expériences du CERN

La masse de notre matière



Médiateurs: **gluons**

- Elle correspond essentiellement à celle des noyaux atomiques
- Or la masse d'un noyau est principalement la somme des masses des neutrons et des protons qu'il contient (un peu moins).
- $m_u = 2.3 \text{ MeV}/c^2$, $m_d = 4.8 \text{ MeV}/c^2$
 $m_{uud} = 9.4 \text{ MeV}/c^2 \ll m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$
- Conclusion : l'essentiel de la masse de notre matière provient de l'énergie portée par les gluons piégés dans nos protons et nos neutrons.

Modèle standard de la physique des particules



Aboutissement et fleuron de la physique du 20^{ème} siècle

- Théorie élégante basée sur des principes de symétrie (invariances de jauge locale)
- Testé avec précision (accord théorie/expérience impressionnant, par exemple 10^{-12} pour le facteur gyromagnétique de l'électron)

Comment observer les particules élémentaires ?

Pour explorer le monde inconnu :

Il faut un accélérateur capable de produire des masses de l'ordre du TeV



... Et un détecteur capable de les identifier

Principe d'un accélérateur

- Pour obtenir des hautes énergies, il faut accélérer des particules :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Si v approche c , E devient très élevée

Au LHC, $E_{\text{protons}} = 4 \text{ TeV} \rightarrow v = 0.9999994c$ soit 30 km/h de moins que la vitesse de la lumière.

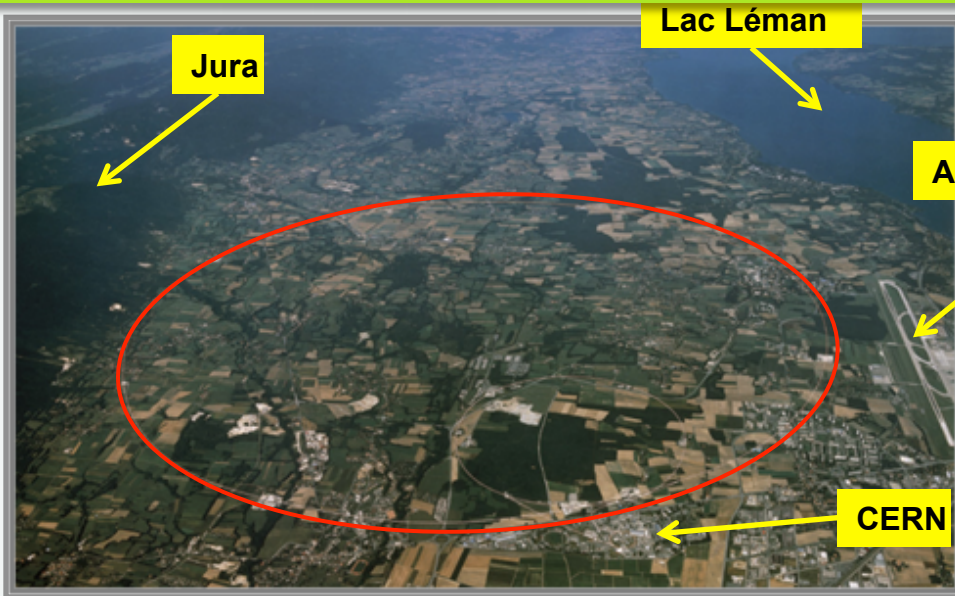
- Pour accélérer une particule chargée, on la place dans un champ électrique. Mais pour atteindre ces énergies, il faut l'accélérer plusieurs fois. Le plus simple, c'est de la faire tourner, pour la faire repasser dans le même champ électrique.
- Pour faire tourner une particule, on la fait passer dans un **champ magnétique**. Elle décrit alors un cercle de rayon R proportionnel à l'intensité de B , et à l'impulsion de la particule p

$$R = \frac{p}{qB} = \frac{mv}{qB\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

→ Plus v approche de c , plus R est grand. La taille de l'anneau dépend de la vitesse que l'on veut atteindre, et du champ magnétique que l'on est capable d'appliquer.

- Limitation également due à la radiation synchrotron

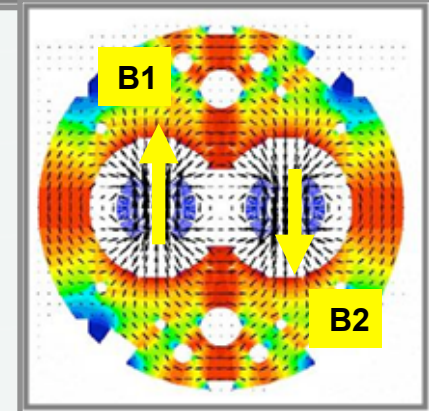
LHC = Large Hadron Collider



→ Tunnel de **27km de long**, situé 100m sous terre

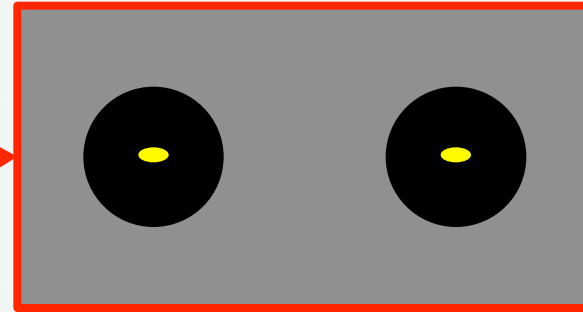
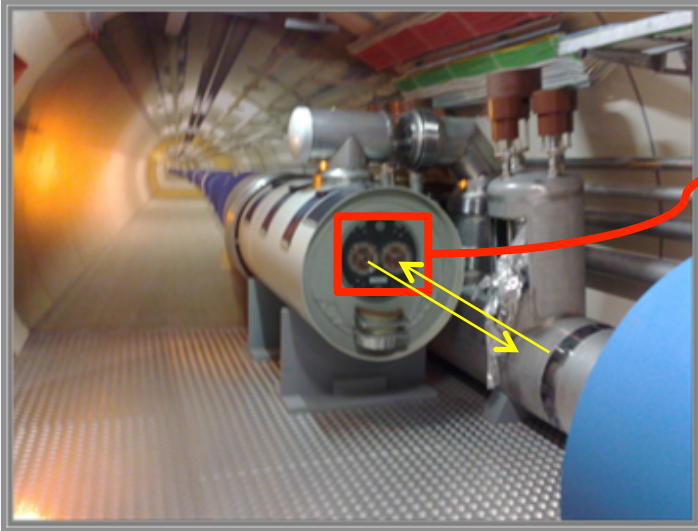
→ Les particules sont guidées par plusieurs milliers d'**aimants supraconducteurs** (pas de **perte d'énergie**), refroidis à **1,9K** la température de l'**hélium superfluide** (*plus froid que la température de l'univers*).

→ Ce champ magnétique de **8.4 Tesla** (**200000 fois le champ magnétique terrestre**) permet de guider simultanément **2 faisceaux de protons** (*particules de même charge*) dans des directions opposées.



Tranche d'aimant

LHC : quelques chiffres



→ Les deux faisceaux de protons très fins ($\sim 16 \mu\text{m}$) passent dans les tubes où règne un vide ultra-poussé (**plus vide que l'espace interstellaire**)

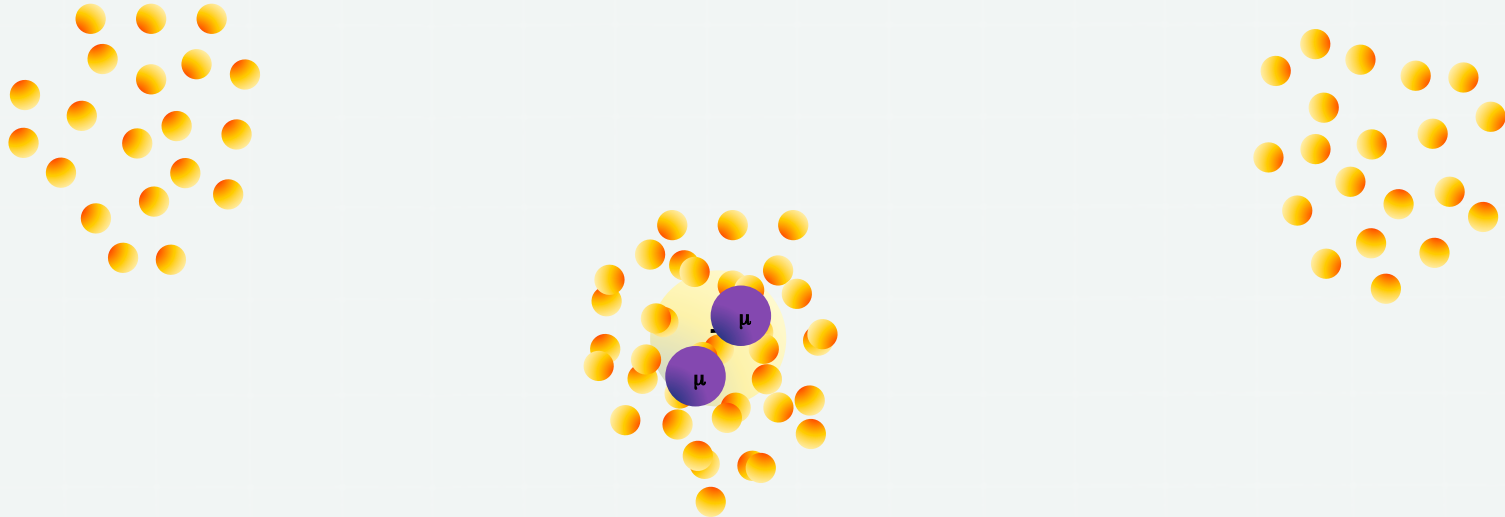
→ Chaque faisceau est une succession de **paquets de 10^{11} protons**. 25ns entre chaque paquets

→ 1 faisceau du LHC, c'est environ **3000 paquets de 10^{11} protons à une énergie de 4 TeV**, soit une énergie totale de **400MJ** (à peu près l'énergie d'un TGV lancé à 165 km/h)

→ Un paquet de protons fait **10000 tours par seconde (7x le tour de la Terre)**. Pour chaque paquet, on peut donc avoir **10000 collisions par seconde**

Collisions au LHC

→ Un paquet de protons fait **10000 tours par seconde** (*7x le tour de la Terre*). Pour chaque paquet, on peut donc avoir **10000 collisions par seconde**



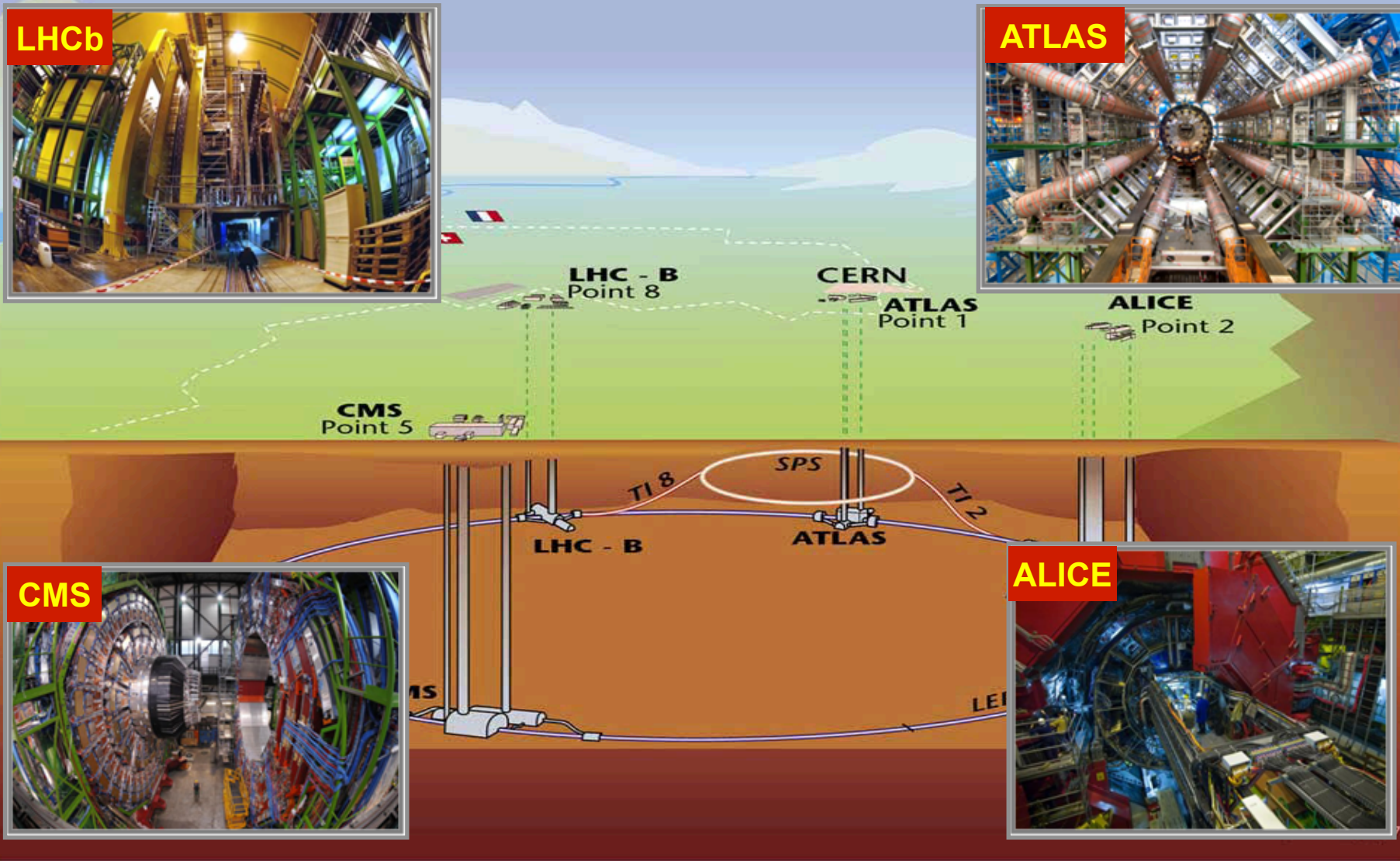
→ Protons bien plus petits que la taille des faisceaux. La plupart se croisent sans se voir, et il y aura en moyenne **seulement une dizaine d'interactions par croisement**.

→ Dans ces interactions, il y a peut-être celles qui nous intéressent

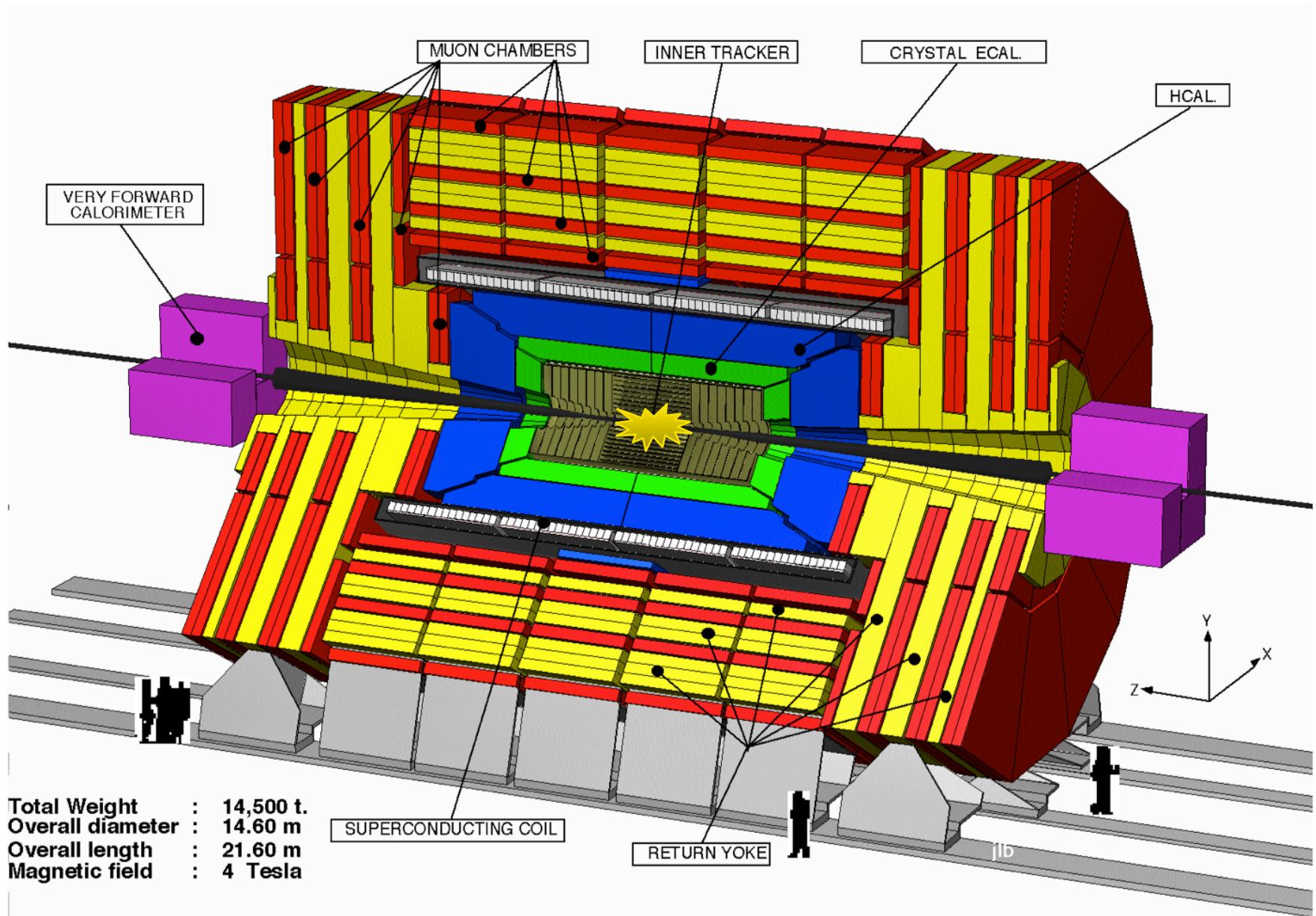
→ Pour savoir ce qui s'est passé, on place autour du lieu de la collision un **systeme de detection**.

Les points de collisions

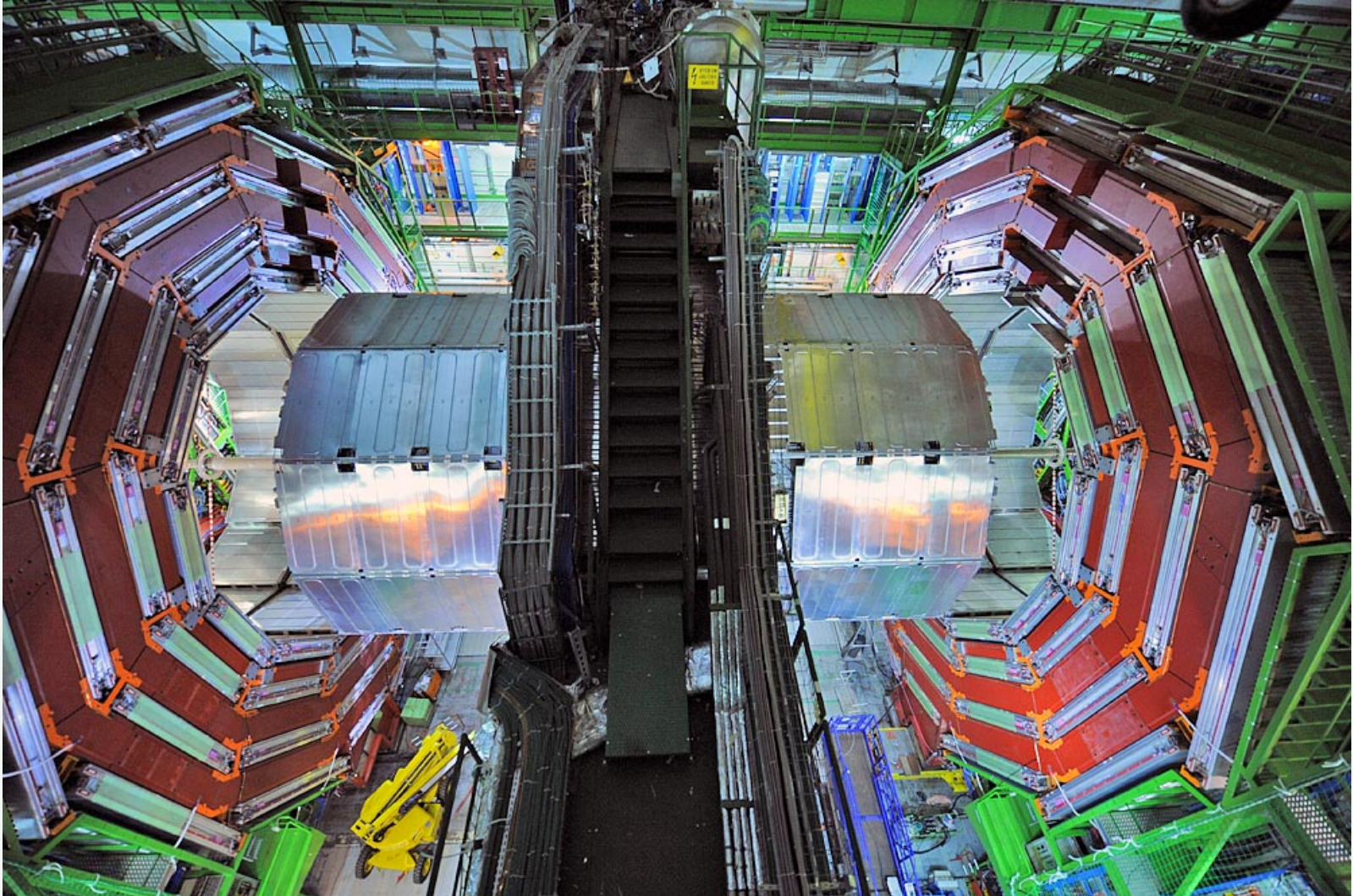
Overall view of the LHC experiments.



A Compact Solenoidal Detector for LHC

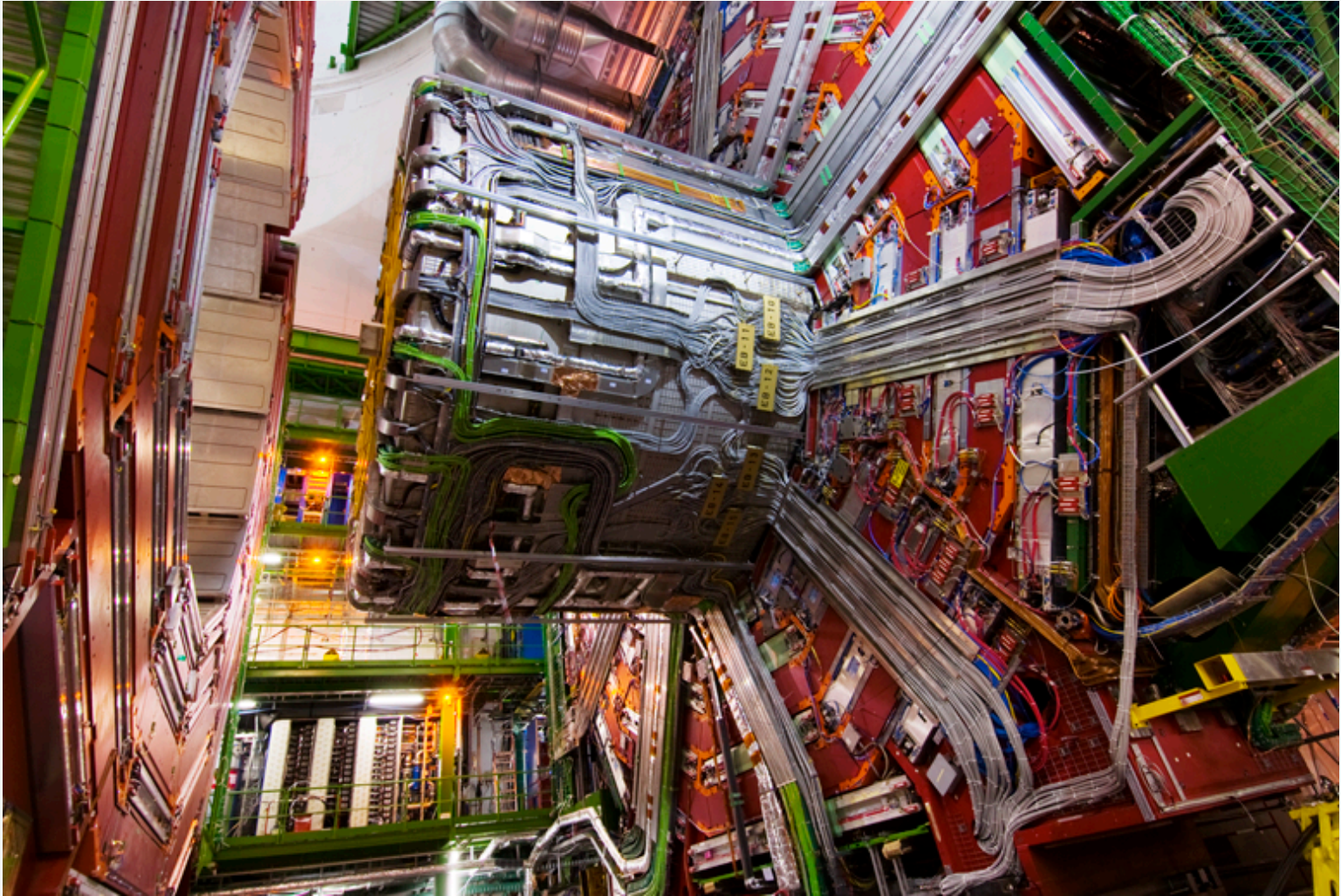


La construction a duré 16 ans



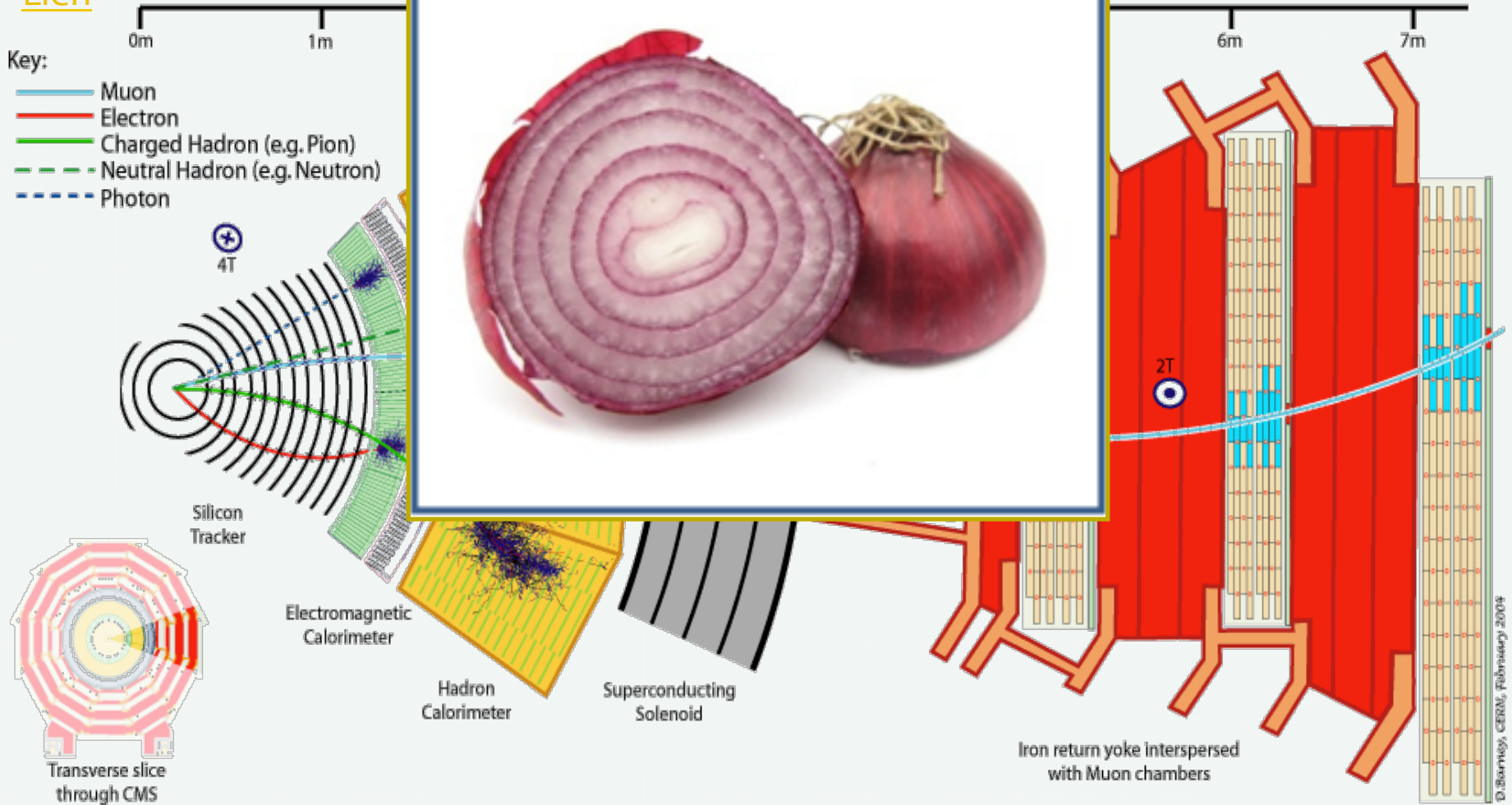
Comment faire des découvertes au LHC

Cables, tuyaux fibres optiques ...

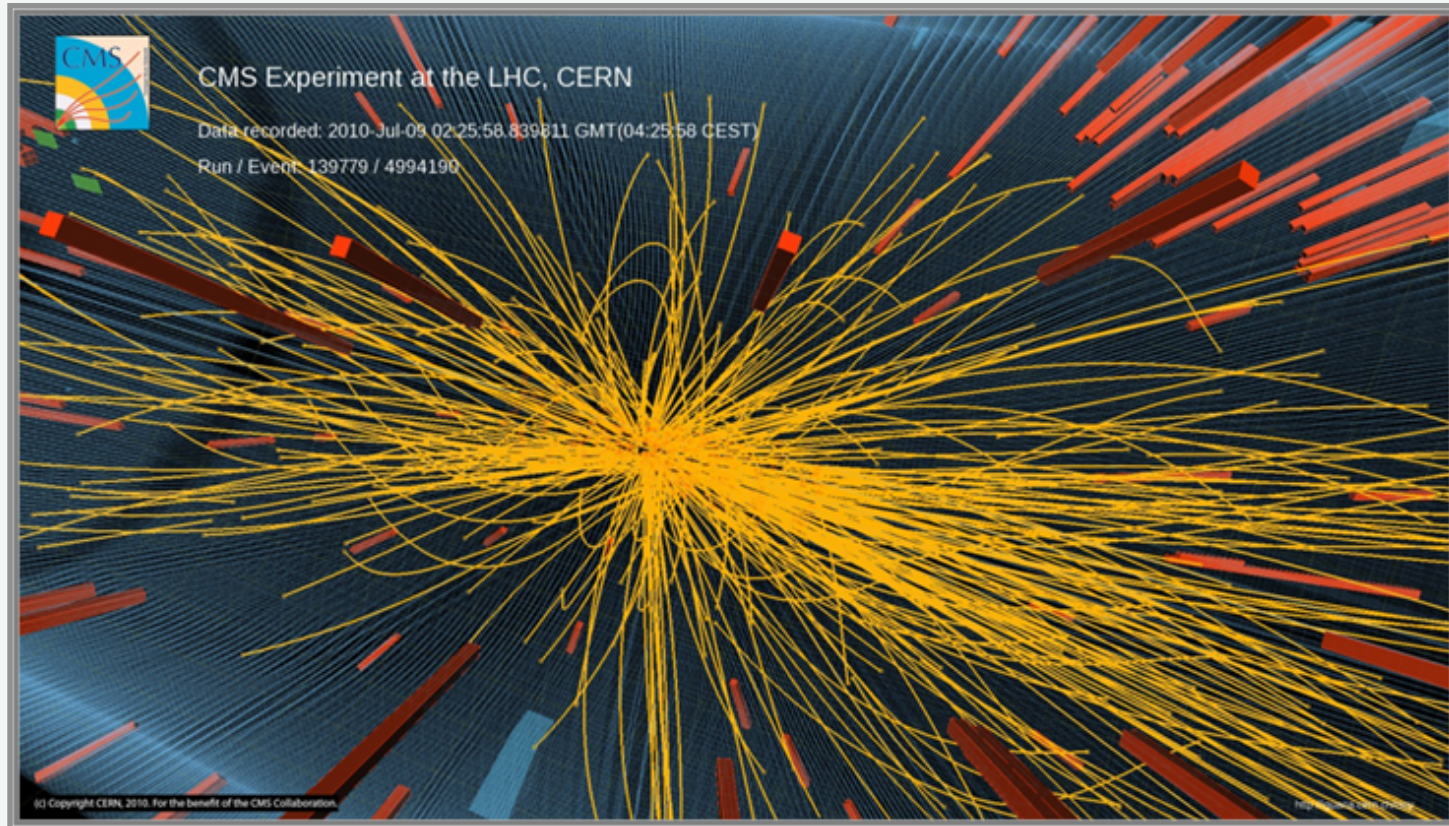


Identification et mesure

[Lien](#)



A quoi ressemble un événement ?



- Pour reconstruire correctement toutes ces traces, des programmes informatiques spéciaux ont été développés.
- L'informatique est aussi une composante importante dans ce type d'expérience.

Trier stocker et reconstruire les collisions

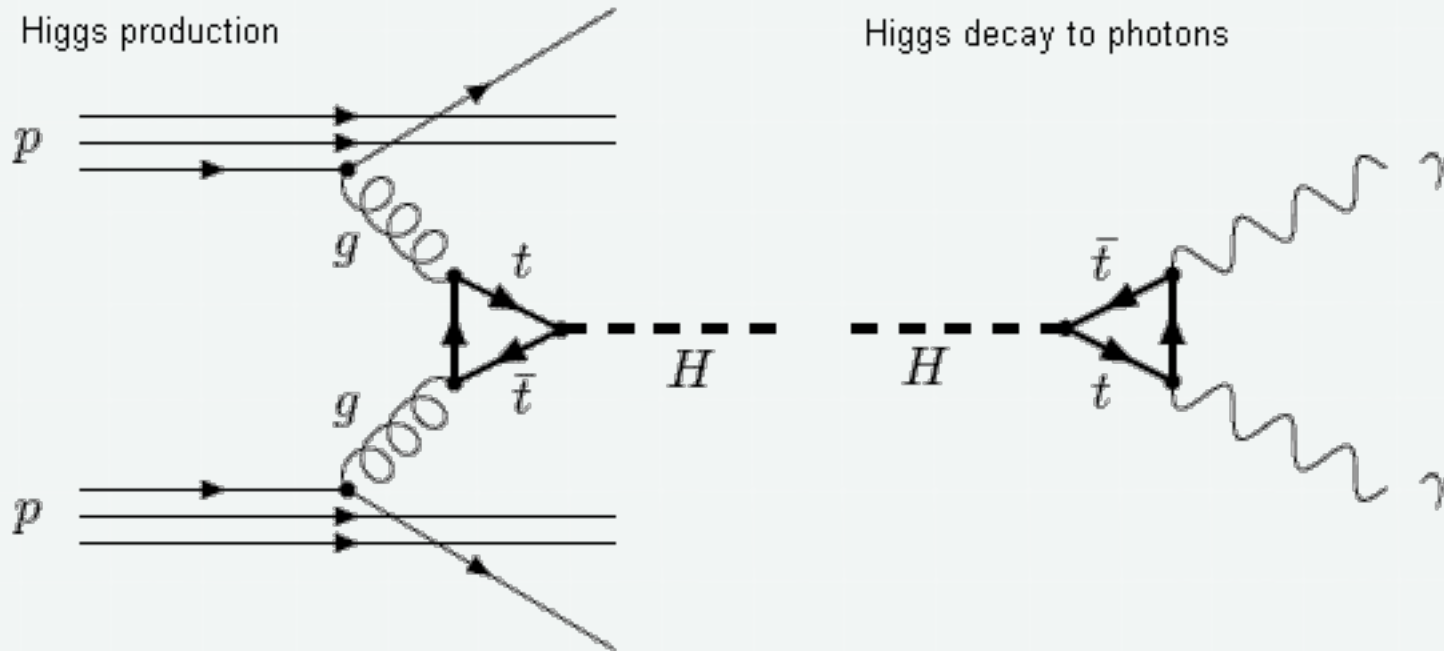
- Il y a environ **40 millions de collisions chaque seconde**, nous ne pouvons en garder que **quelques centaines**.
- Il faut décider lesquelles en très peu de temps, et donc être capable d'**analyser les données du détecteur en temps réel**. Ce tri est assuré par plusieurs centaines d'ordinateurs fonctionnant en parallèle.



- **1CD de données chaque seconde, 7J/7, 24H/24...**
 - Ces données sont distribuées dans les laboratoires du monde entier pour y être stockées et analysées
- Besoin d'une grande puissance de calcul :
- développement de la grille de calcul
Worldwide LHC Computing Grid connecte 100000 processeurs dans 34 pays avec des transferts de données ultra-rapides

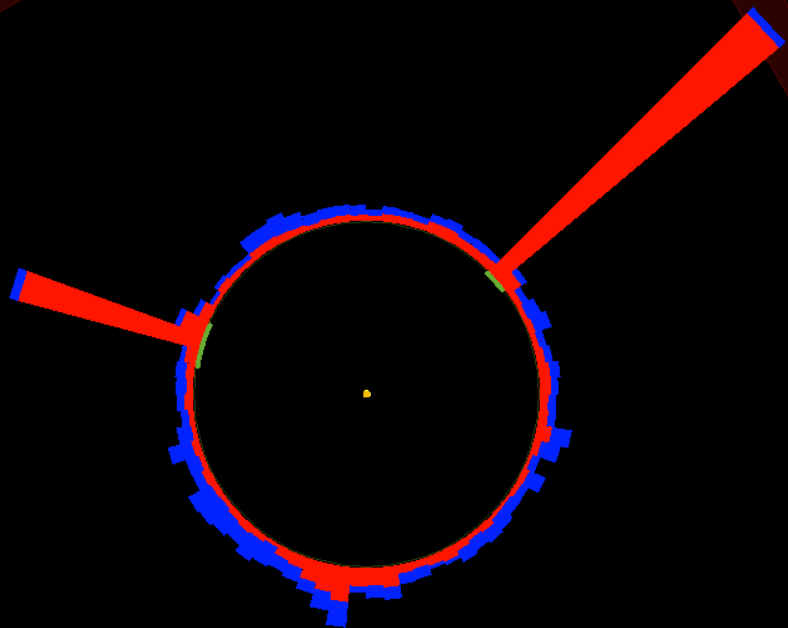
Découverte du boson de Higgs

Recherche du boson de Higgs : $H \rightarrow \gamma\gamma$

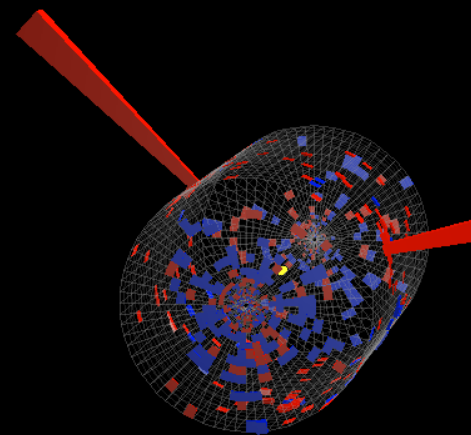
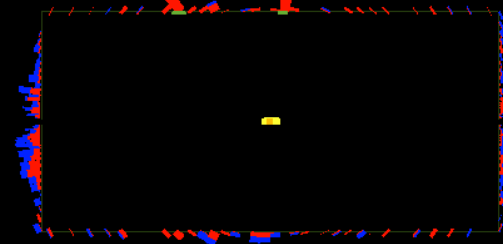


Bruits de fonds dominants : $gg \rightarrow \gamma\gamma$ et $qq \rightarrow \gamma\gamma$

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun May 13 22:08:14 2012 CEST
Run/Event: 194108 / 564224000



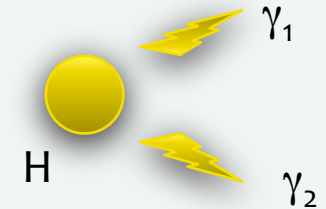
H→2photons



Masse invariante

- Le boson de Higgs créé se désintègre très vite et n'est pas visible dans le détecteur. Considérons le cas

$$H \longrightarrow \gamma_1 + \gamma_2$$



- $E=mc^2$ est le cas particulier d'une équation plus générale : $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
Appliqué au Higgs : $E_H^2 = \vec{p}_H^2 c^2 + m_H^2 c^4$

- Conservation de l'énergie et de l'impulsion :

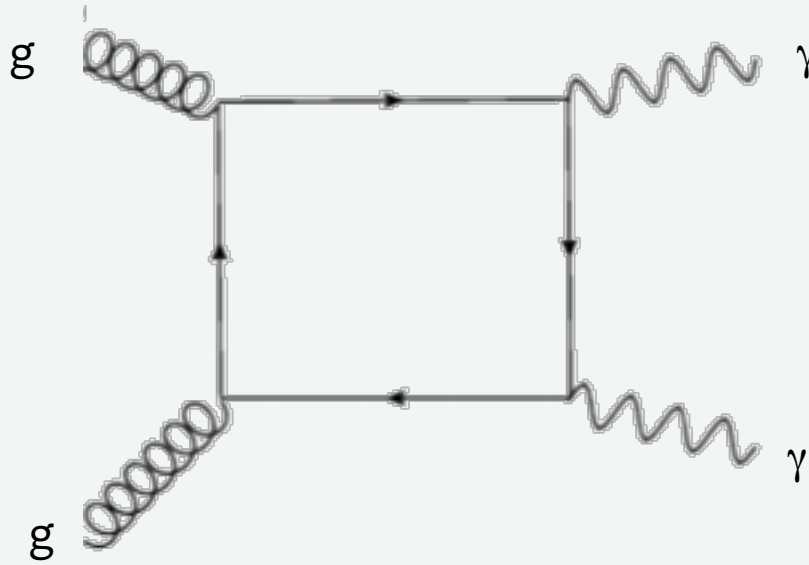
$$\begin{cases} E_H = E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} \\ \vec{p}_H = \vec{p}_{\gamma_1} + \vec{p}_{\gamma_2} \end{cases}$$

- On peut donc remonter à la masse de la particule qui a donné naissance aux deux photons :

$$m_H c^2 = \sqrt{E_H^2 - \vec{p}_H^2 c^2} = \sqrt{(E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2})^2 - (\vec{p}_{\gamma_1} + \vec{p}_{\gamma_2})^2 c^2}$$

Masse invariante

Bruit de fond : $gg \rightarrow \gamma\gamma$



Non résonnant
 $m_{\gamma\gamma}$ de forme exponentiellement décroissante

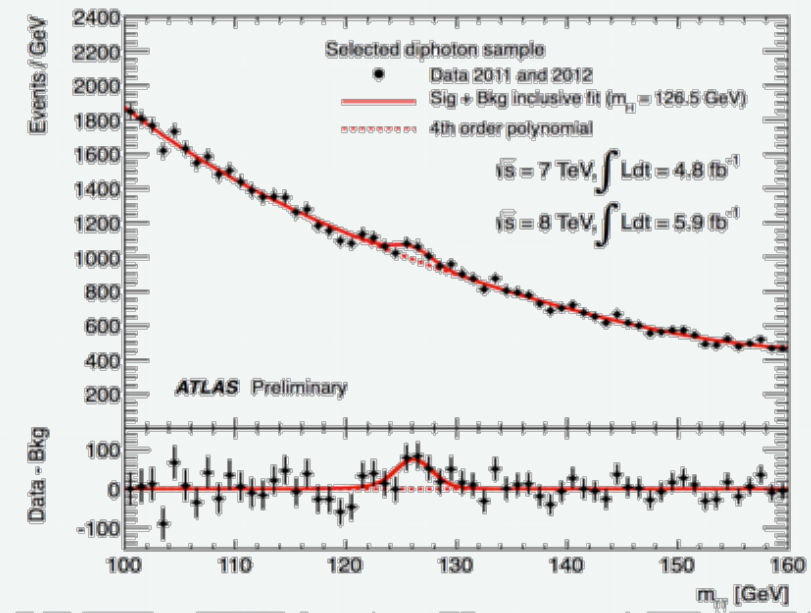
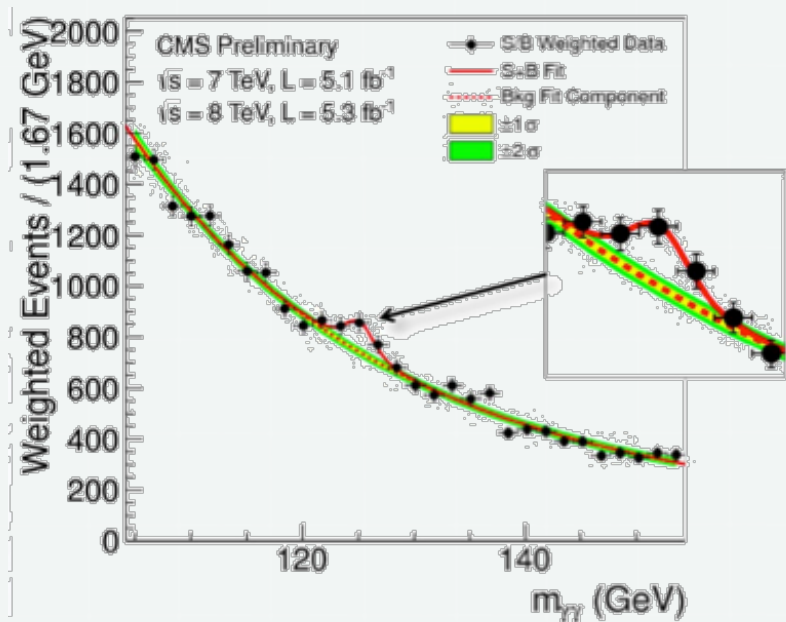
La découverte

Pour chaque collision contenant une paire de photon, on calcule :

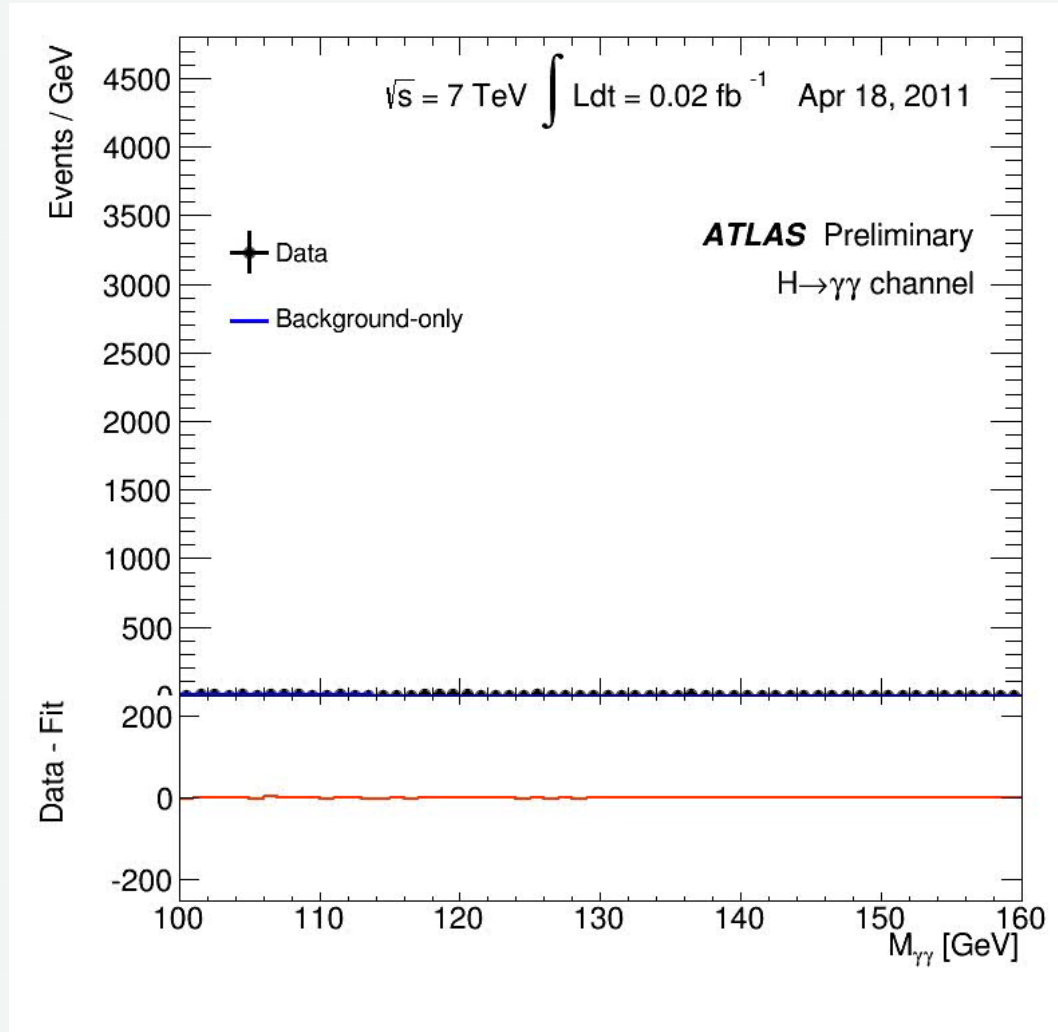
$$m_{\gamma\gamma}c^2 = \sqrt{(E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2})^2 - (\vec{p}_{\gamma_1} + \vec{p}_{\gamma_2})^2}c^2$$

🌐 Observation de CMS (juillet 2012)

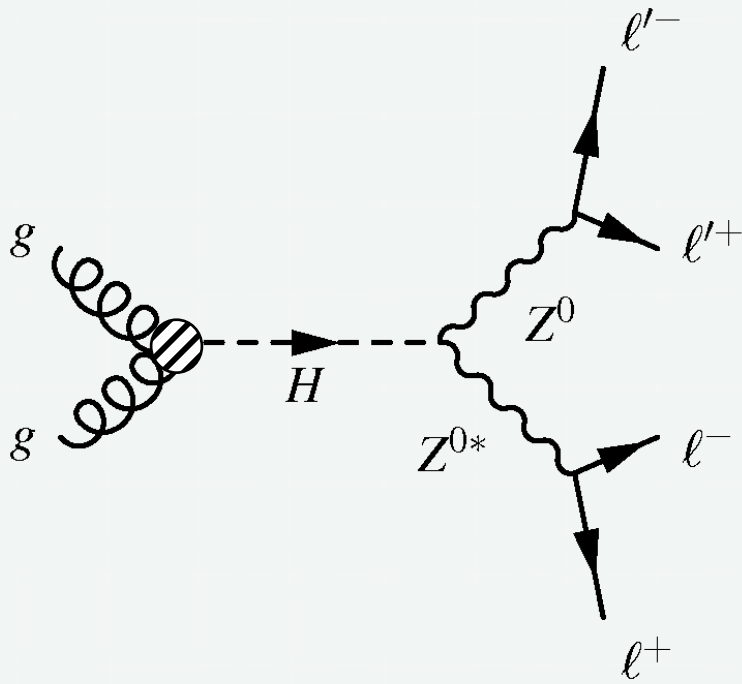
🌐 Observation d'ATLAS (juillet 2012)



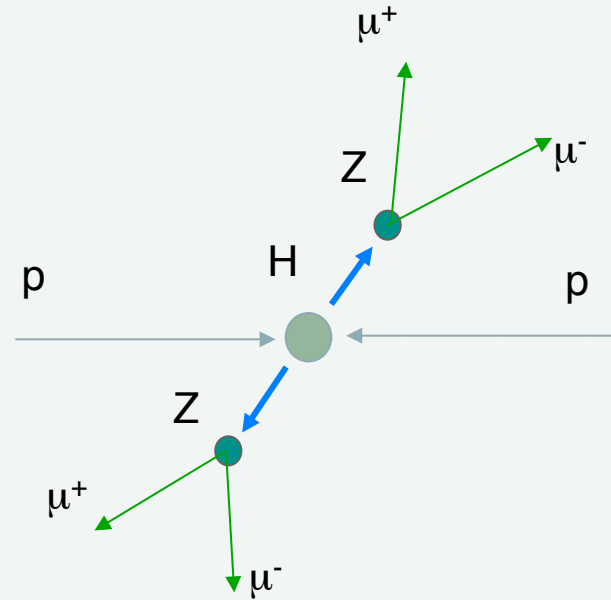
$H \rightarrow \gamma\gamma$ en fonction du temps



Autre canal : $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ leptons



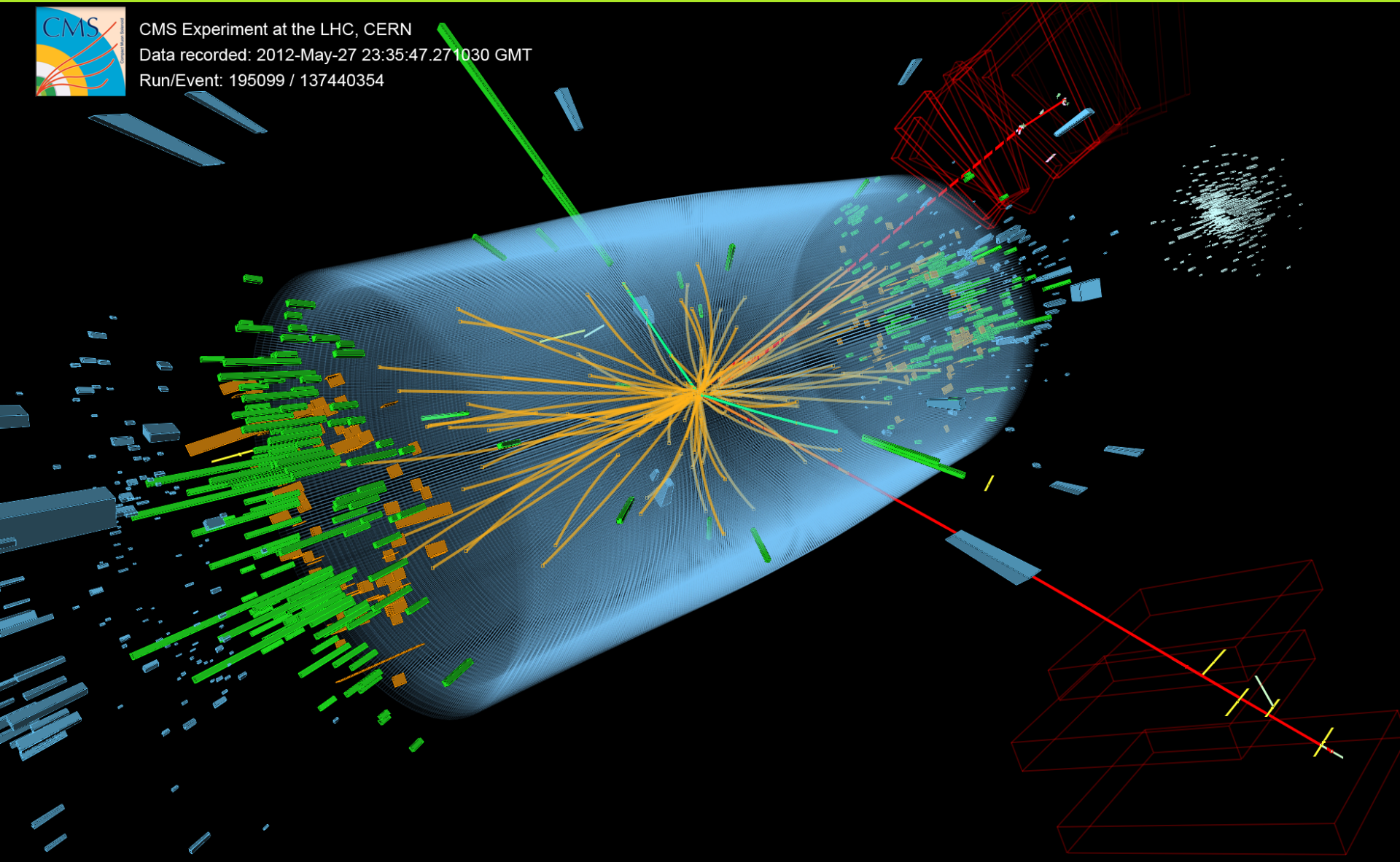
$$l = e, \mu$$



Event display $H \rightarrow 4$ leptons

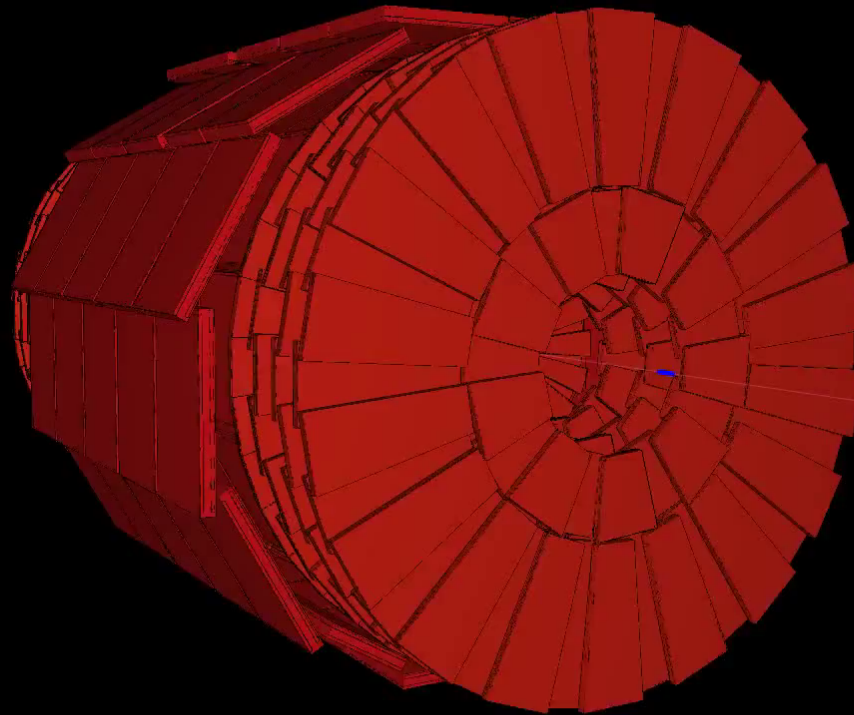


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354

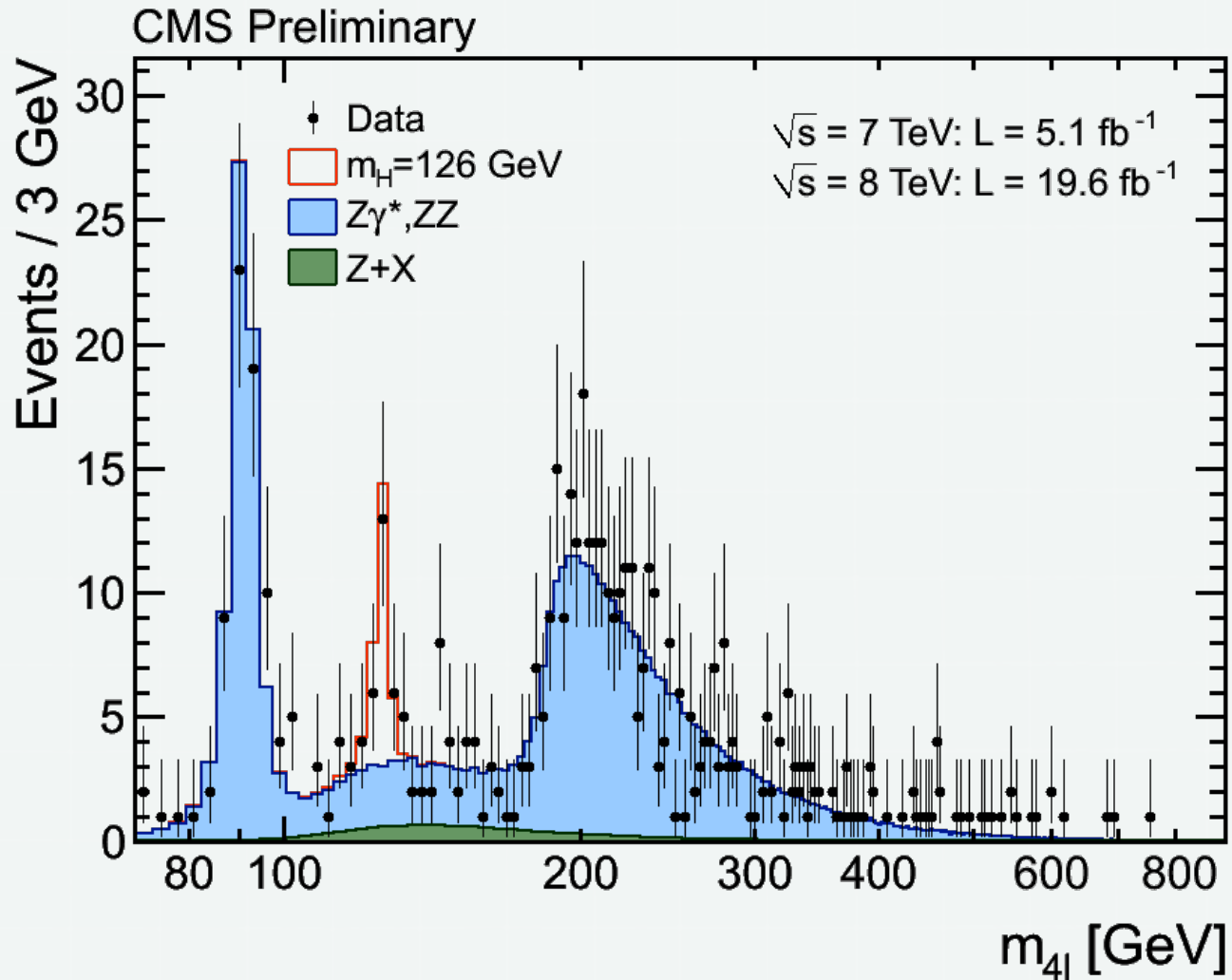


Animation : 4 muons

CMS Experiment at the LHC, CERN
Sun 2011-Aug-07 05:00:32 CET
Run 172822 Event 2554393033
C.O.M. Energy 7.00 TeV
H \rightarrow ZZ \rightarrow 4mu candidate

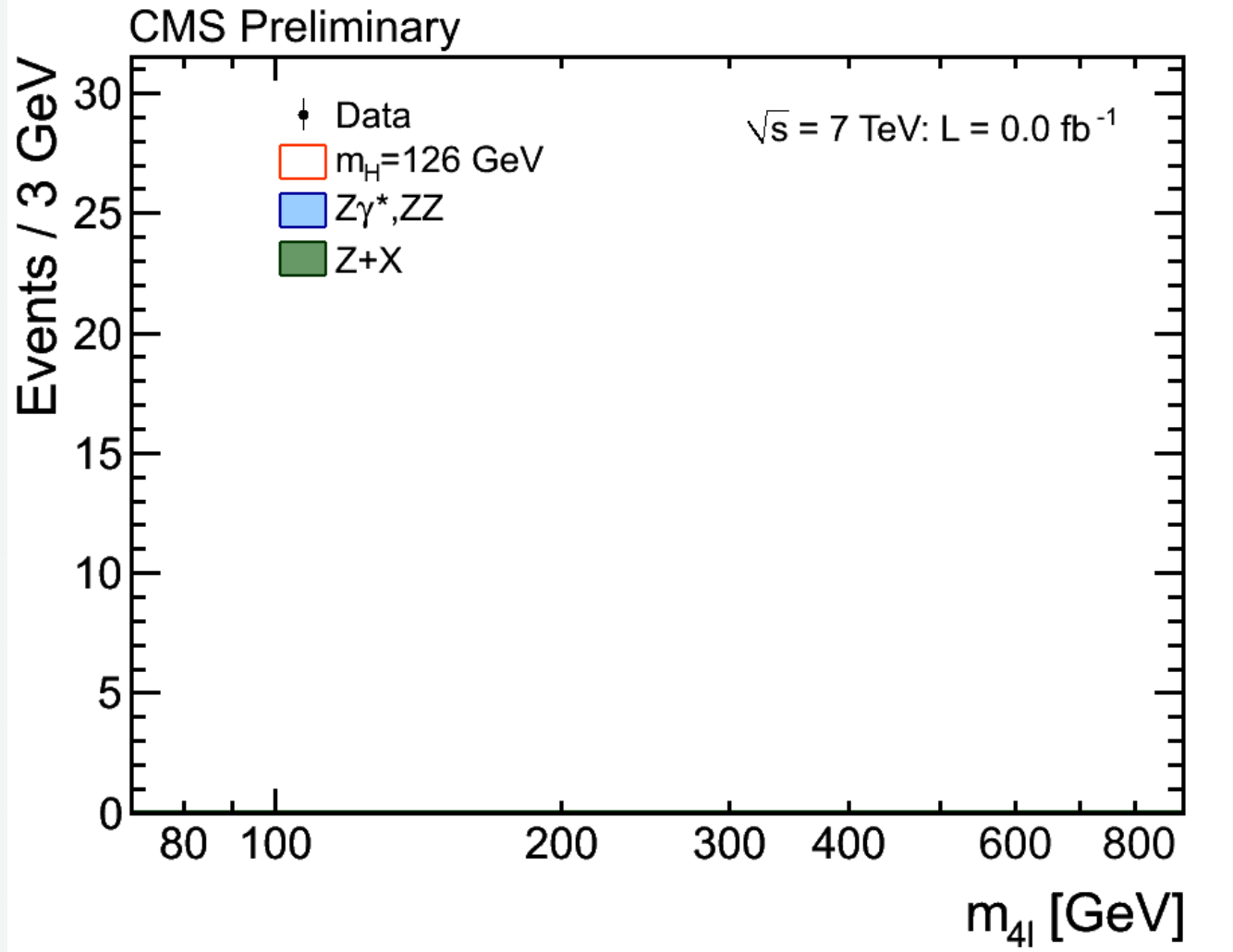


Masse invariante 4 leptons



Mars 2013

H \rightarrow 4l en fonction du temps



Conclusion : la science, école de la patience

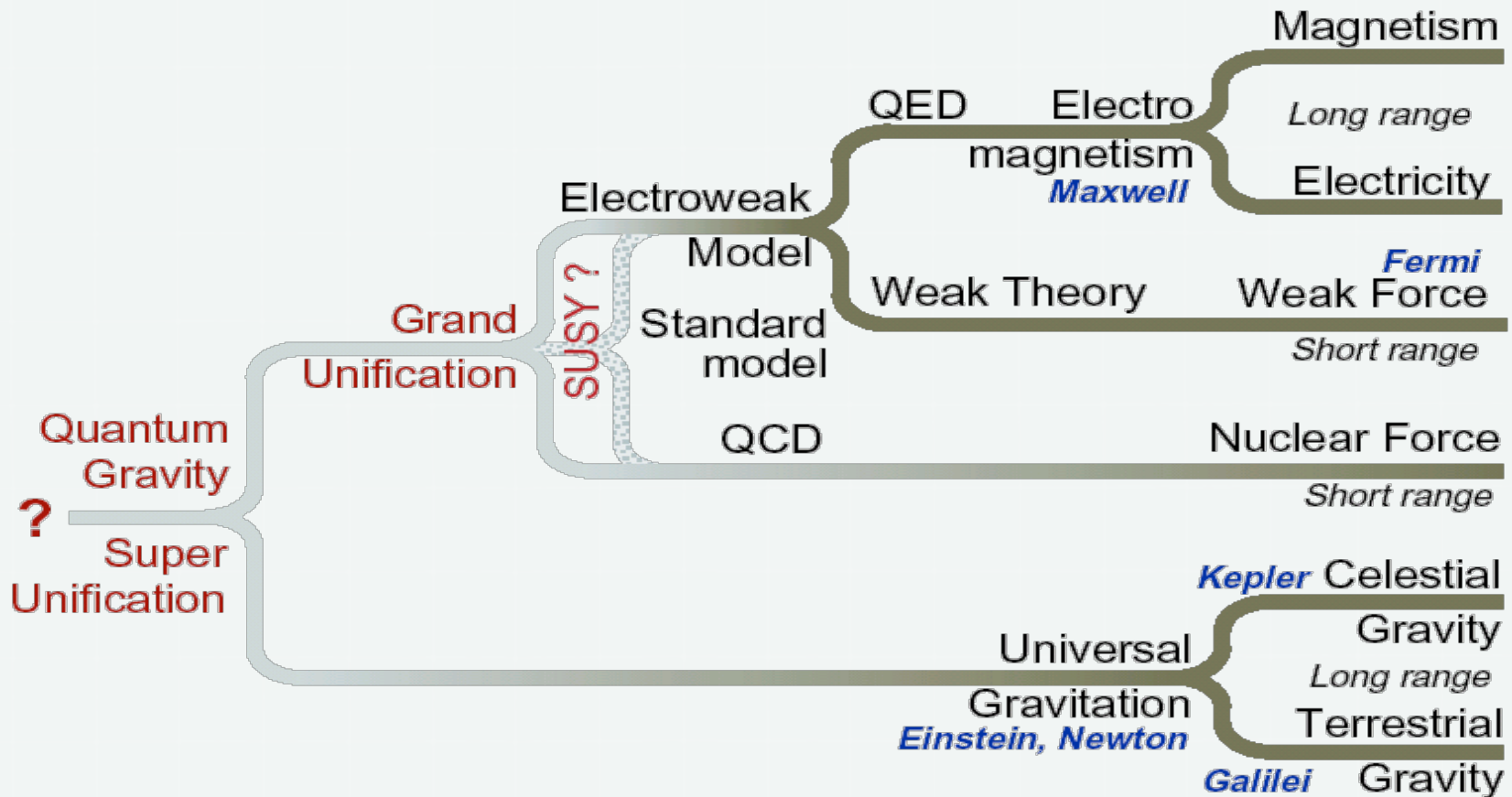
- 1964 : publication du mécanisme de Higgs par Robert Brout, François Englert et Peter Higgs
- 1967 : théorie complète pour toutes les particules élémentaires , Steven Weinberg
- 1983 : premier groupe de réflexion sur l'intérêt de la construction du LHC
- 1984 : Découverte des bosons W et Z au CERN.
- 1989-2000 : le boson de Higgs est recherché sur le collisionneur LEP au CERN sans succès
- 1992-2011 : le boson de Higgs est recherché sur le collisionneur Tevatron aux USA sans succès
- 1984-1998 : phase de conception du LHC et de ses détecteurs
- 1998-2008 : phase de construction du LHC et de ses détecteurs
- 2012 : découverte au LHC d'une particule compatible avec le boson de Higgs
- 2013 : Confirmation de la découverte. Observé en $\gamma\gamma$, ZZ , W^+W^- , $\tau^+\tau^-$. Propriété compatibles avec le boson de Higgs du modèle standard.

Au delà du modèle standard ?



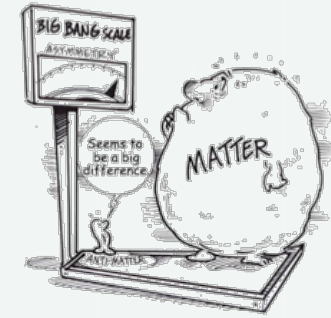
Stéphane Perriès
IPN Lyon
27/03/2014

Paradigme de l'unification

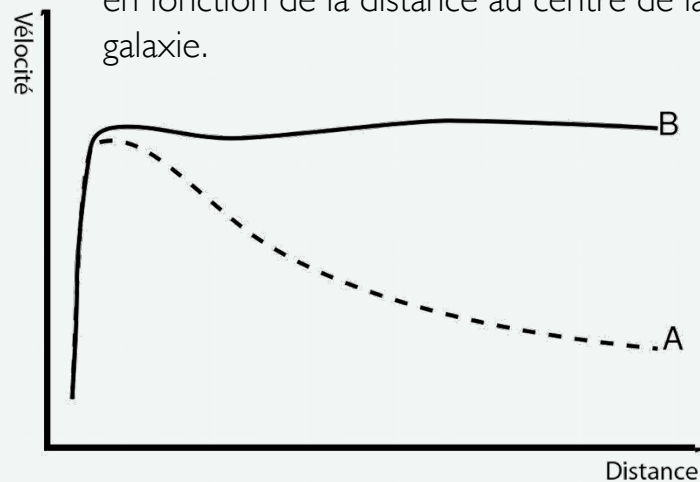
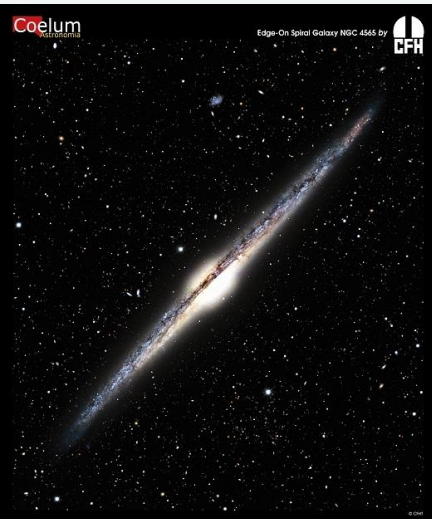


Les limites de la théorie : Des indices expérimentaux venus de l'univers

L'**anti-matière** a quasiment disparu de notre galaxie
Violation de CP ?

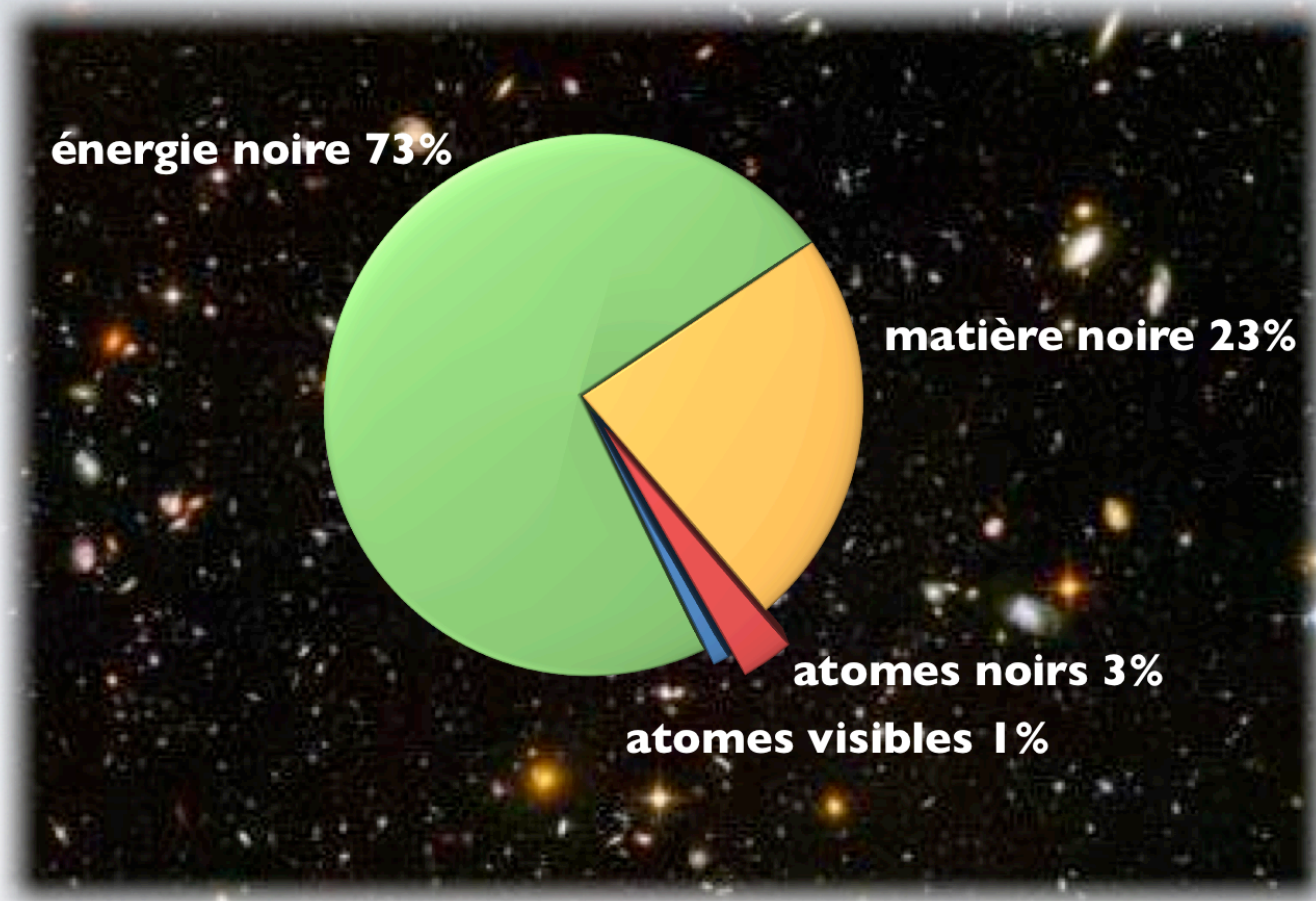


Courbe de rotation prévue par les équations de Newton (A) et la courbe observée (B), en fonction de la distance au centre de la galaxie.



La cinématique des galaxies indique l'existence d'une matière supplémentaire non lumineuse : **la matière noire**

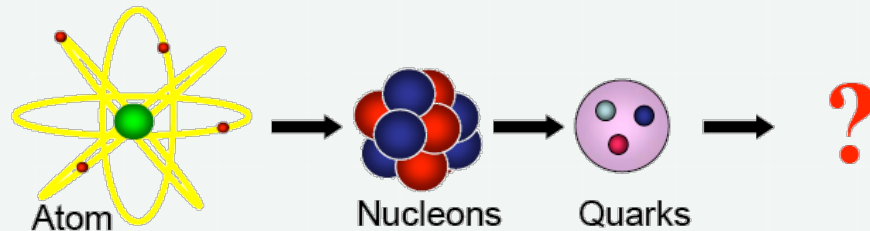
bilan : que connaissons-nous ?



Energie noire + matière noire > 96 %.

Nous ne comprenons que 4 % de l'Univers !

Des questions sans réponses



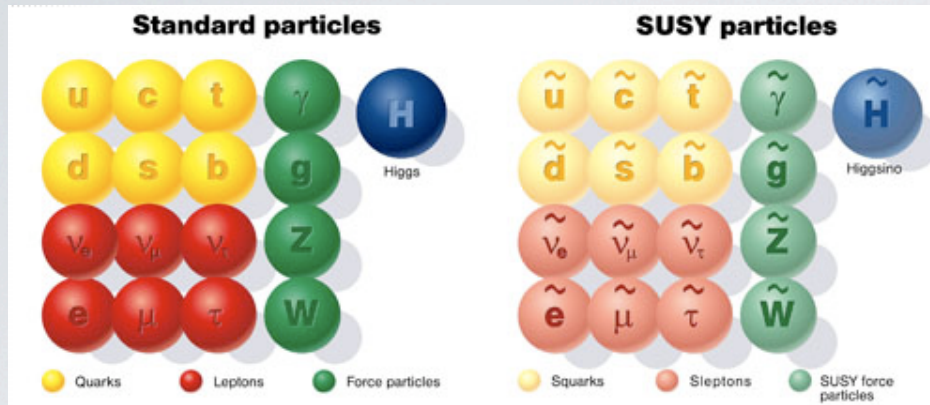
- Qu'est-ce que la matière noire ? L'énergie sombre ?
- Pourquoi l'antimatière a disparu ?
- Pourquoi les 4 interactions fondamentales ont des intensités si différentes ? Comment réconcilier la gravité avec les autres interactions ?
- Combien y-a-t-il vraiment de dimensions dans notre univers ?

La réponse à certaines de ces questions est probablement cachée dans la région du TeV (10^{12} eV) que l'on commence à peine à explorer.

L'exploitation du LHC va continuer bien au delà de 2020 ...

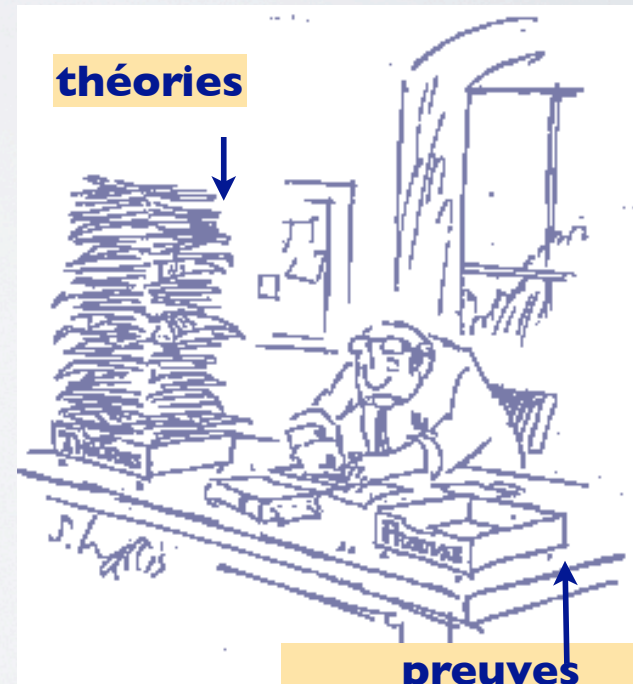
- 🌐 Les questions fondamentales en physique des hautes énergies sont trop nombreuses pour croire que le Modèle Standard soit la théorie ultime. Le modèle est probablement une théorie valide seulement à l'échelle d'énergie que l'on arrive à sonder aujourd'hui.

la recherche en physique des particules aujourd'hui



Le boson de Higgs !
Des nouvelles particules ?
Des dimensions supplémentaires ?

Les questions fondamentales en physique des hautes énergies sont trop nombreuses pour croire que le Modèle Standard soit la théorie ultime. Le modèle est probablement une théorie valide seulement à l'échelle d'énergie que l'on arrive à sonder aujourd'hui. Des extensions du modèle standard prédisent l'existence de particules de matière noire, de nouveaux champs expliquant l'énergie sombre. Le LHC a déjà mis en évidence une nouvelle particule. Il va peut-être en découvrir d'autres, et ainsi valider de nouvelles théories



preuves
expérimentales

Lois fondamentales de la physique < 1900

Fin XIX^{ème} siècle :

*« La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien **deux petits problèmes** : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance... »*

Lord Kelvin, 1900, british association for the advancement of science

Michelson → théorie de la relativité restreinte Einstein (1905)

Corps noir → Mécanique quantique Planck (1900)

Début XXI^{ème} siècle :

Le modèle standard est une théorie très aboutie, mais il reste quelques “petits problèmes”

Nous pourrions bien nous trouver maintenant dans la même situation

Le LHC (2010-2030) ouvre une nouvelle ère de la physique!

Un peu de pub : Masterclasses du CERN

- 🌐 Programme international initié par le CERN et destiné aux élèves de terminale scientifique (voire première).
- 🌐 Idée : Initiation à la recherche en physique des particules, en proposant aux étudiants d'être acteurs de la recherche.
- 🌐 Format :
 - 🌐 Cours/conférences d'introduction à la physique des particules, et aux techniques expérimentales associées
 - 🌐 Analyse de données réelles enregistrées en 2012 par le détecteur CMS auprès du LHC - Higgs/W/Z
 - 🌐 Visioconférence (en anglais) pour présenter les résultats obtenus

Pour en savoir plus ...

Revue élémentaire : <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/>



N° 1 : De l'atome au noyau



N° 5 : Les Neutrinos



N° 2 : Le neutron



N° 6 : Le Modèle Standard



N° 3 : Les rayons cosmiques



N° 7 : Quand l'Univers fait boum



N° 4 : La couleur des particules



N° 8 : En route pour l'au-delà

Backup

Masse invariante de paires de muons

