

Une Brève Histoire des Particules : de l'Atomisme au LHC en passant par ACO

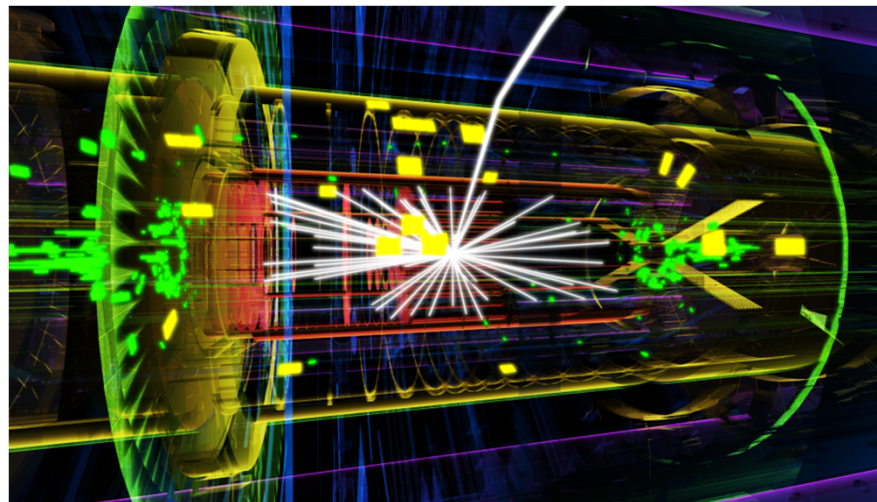
2014

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3)



[@LALOrsay](https://twitter.com/LALOrsay)

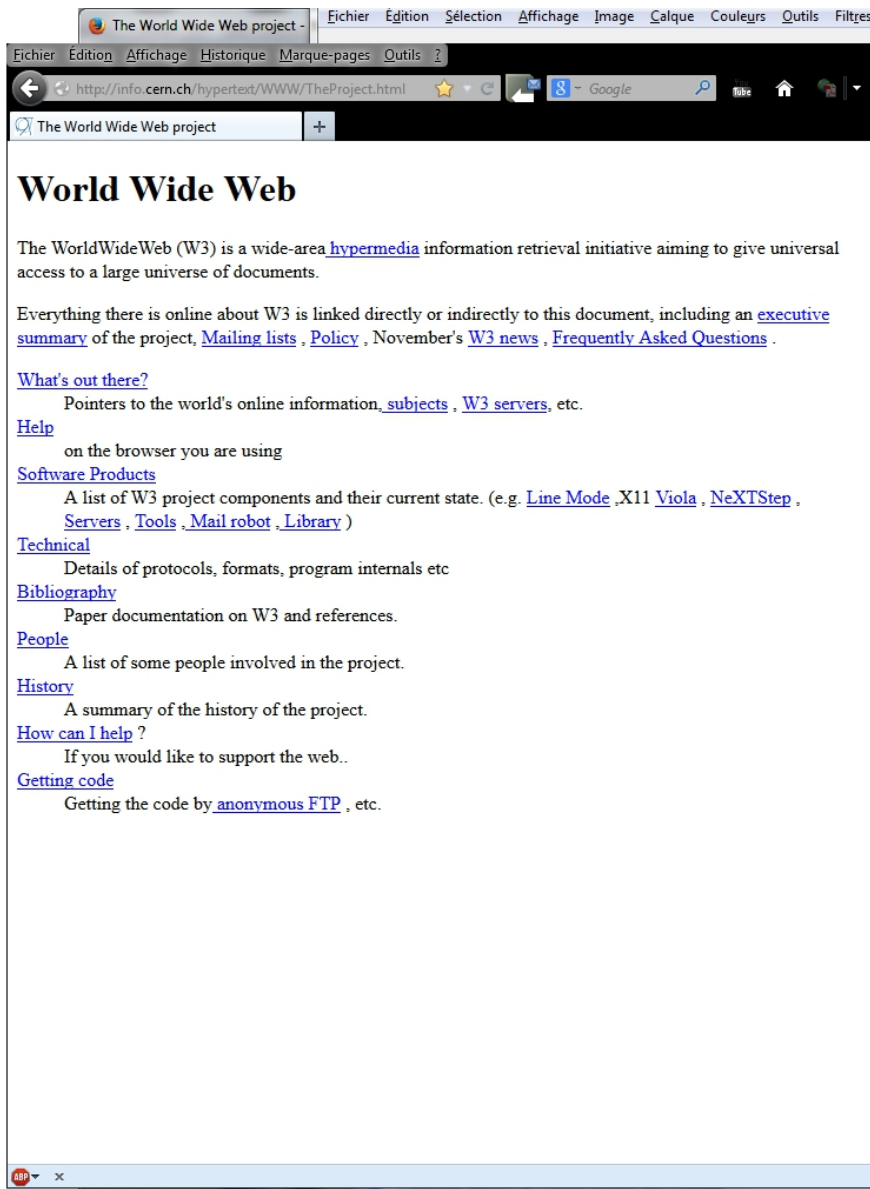


Comprendre le monde,
construire l'avenir®

Préambule

Qui peut me dire ce dont il s'agit ?

- <http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html>



World Wide Web

The WorldWideWeb (W3) is a wide-area [hypermedia](#) information retrieval initiative aiming to give universal access to a large universe of documents.

Everything there is online about W3 is linked directly or indirectly to this document, including an [executive summary](#) of the project, [Mailing lists](#), [Policy](#), November's [W3 news](#), [Frequently Asked Questions](#).

[What's out there?](#)

Pointers to the world's online information, [subjects](#), [W3 servers](#), etc.

[Help](#)

on the browser you are using

[Software Products](#)

A list of W3 project components and their current state. (e.g. [Line Mode](#), [X11 Viola](#), [NeXTStep](#), [Servers](#), [Tools](#), [Mail robot](#), [Library](#))

[Technical](#)

Details of protocols, formats, program internals etc

[Bibliography](#)

Paper documentation on W3 and references.

[People](#)

A list of some people involved in the project.

[History](#)

A summary of the history of the project.

[How can I help?](#)

If you would like to support the web..

[Getting code](#)

Getting the code by [anonymous FTP](#), etc.

25 siècles en 4 transparents ...

Une (très) brève histoire des particules

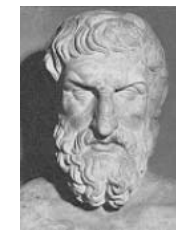
- **L'atome est un concept vieux de 2500 ans !**
→ Les philosophes cherchent à expliquer la Nature
(« *Physis* » en Grec)



- **Anaxagore** : « *Il y a quelque chose de chaque chose dans toutes les choses* »

- Atomisme : **Démocrite, Épicure, Lucrèce**

- « *Atoma* » signifie « *indivisible* » en grec
- Les atomes sont petits, élémentaires et pleins
- Les atomes se déplacent, s'assemblent et se séparent dans le vide, infini
- Il y a différents types d'atomes – les plus légers forment l'âme !
- Les atomes sont éternels et peuvent à l'infini former de nouvelles structures
→ Vision du monde opposée au Christianisme ; elle tombe dans l'oubli



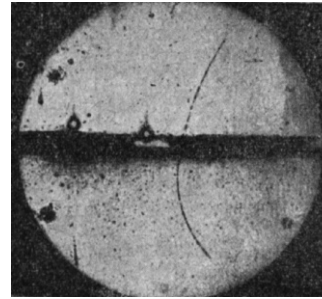
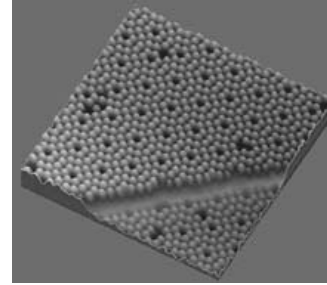
- **XVII^{ème} – XVIII^{ème} siècle** : les premiers chimistes

- **Boyle** : Une théorie scientifique valable est basée sur l'expérience
- **Lavoisier** : les molécules contiennent plus d'un élément chimique
- **Gay-Lussac** : $2\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$; les éléments chimiques sont à la base de la matière
- **Dalton** : chaque élément chimique est fait d'un type d'atome unique

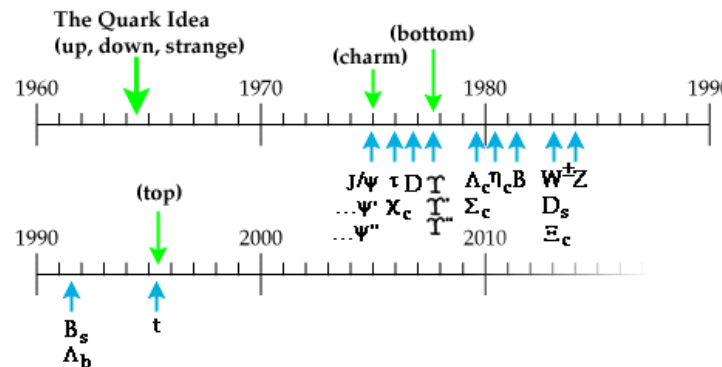
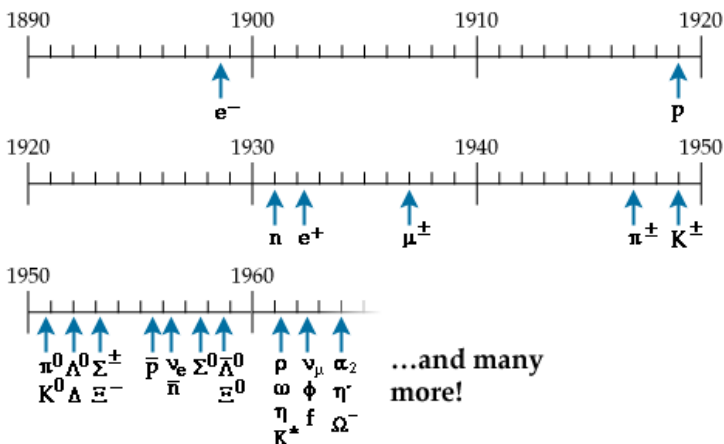


Une (très) brève histoire des particules

- **1897** : Découverte de l'électron
- **1905** : Les atomes existent !
- **1909** : Découverte du noyau
→ Les atomes sont presque vides !
- **1918** : Découverte du proton
- **1932** : Découverte du neutron
- **1933** : Découverte du positron
→ 1^{ère} particule d'antimatière
- **1936** : Découverte du muon



- Tout s'accélère **après la fin de la seconde guerre mondiale**
→ Un vrai "zoo" de particules (plusieurs centaines) !



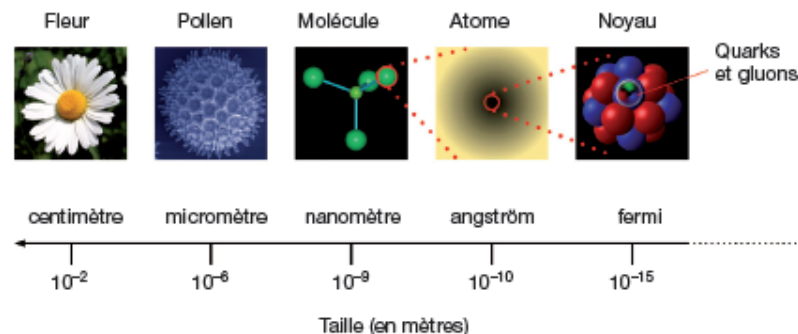
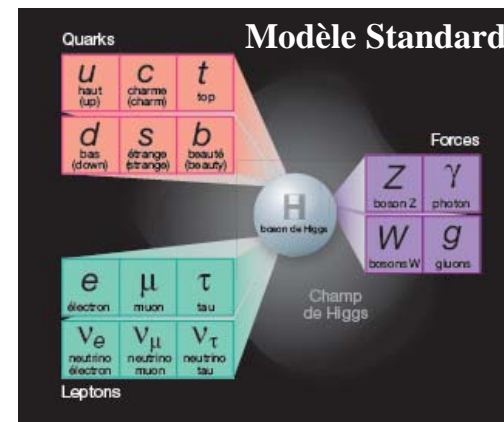
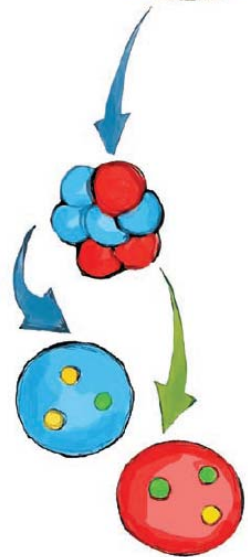
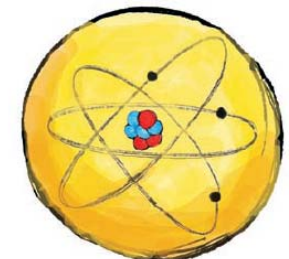
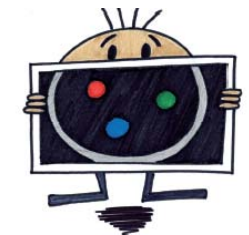
Une (très) brève histoire des particules

- La plupart de ces nouvelles particules sont faites de 2 ou 3 quarks
→ Il n'y a que **6 quarks au total**
- De **compliquée**,
la situation
redevient **simple** !

- Les constituants du noyau, les nucléons (protons et neutrons), sont formés de 3 quarks
- L'électron et les quarks sont des **particules élémentaires** qui n'ont pas de structure interne (pour l'instant !?)

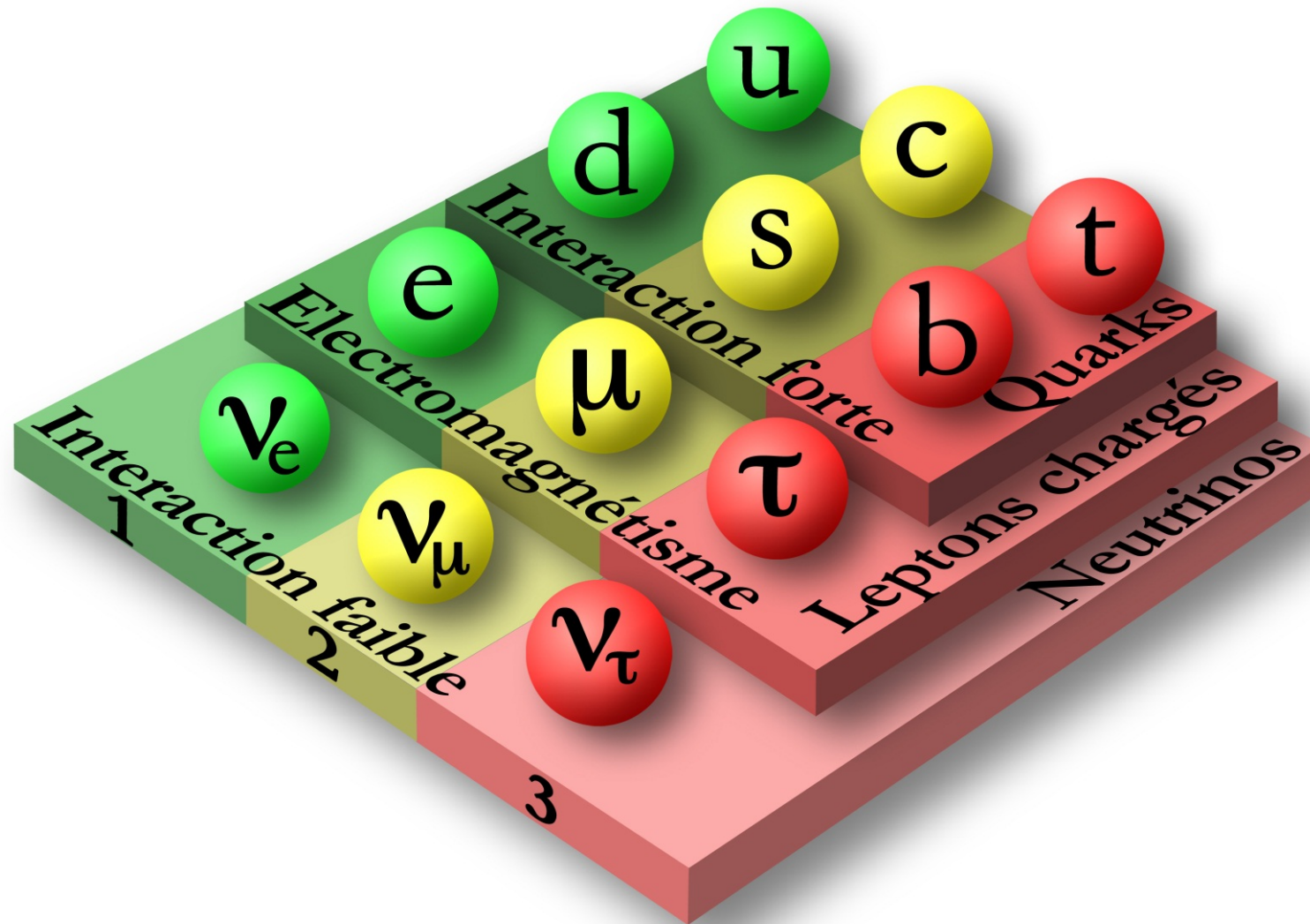
- Il y a **12 particules élémentaires** :
 - les **6 quarks**
 - l'**électron** et 2 « cousins » plus lourds, le **muon** et le **tau**
 - **3 neutrinos**

- Elles sont soumises à **3 forces** :
 - l'**interaction forte**
 - l'**interaction faible**
 - la **force électromagnétique**



Bilan

- 12 particules élémentaires réparties en 3 familles ; 3 interactions fondamentales

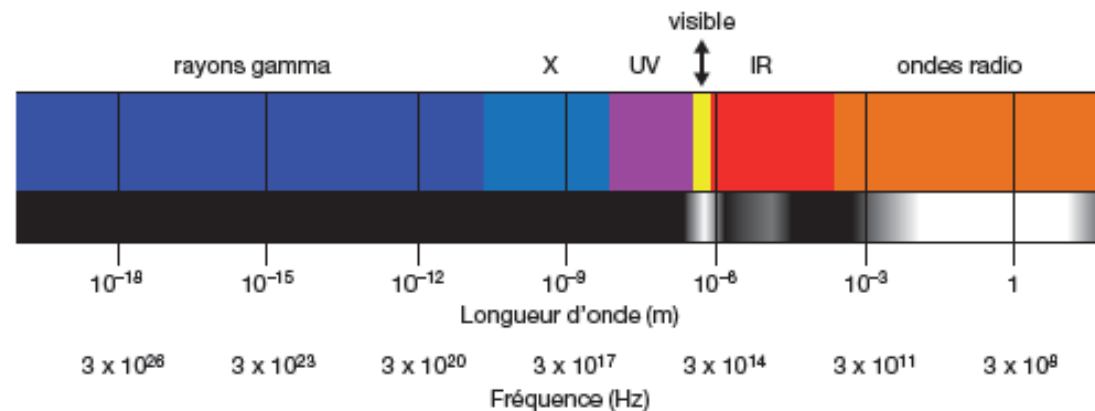


- A chaque particule de **matière** est associée une particule d'**antimatière**.

Accélérateurs, collisionneurs & détecteurs

Les accélérateurs de particules

- Plus on veut sonder la matière aux petites échelles, plus il faut d'énergie
→ Exemple des ondes électromagnétiques : énergie $\propto 1 / (\text{longueur d'onde})$



- La plupart des particules sont instables \Rightarrow elles n'existent pas dans la Nature
→ Il faut les produire artificiellement
→ En grande quantité pour obtenir des mesures de qualité
→ Les accélérer pour leur donner l'énergie souhaitée
→ Les amener/créer au cœur des détecteurs construits spécialement pour les étudier

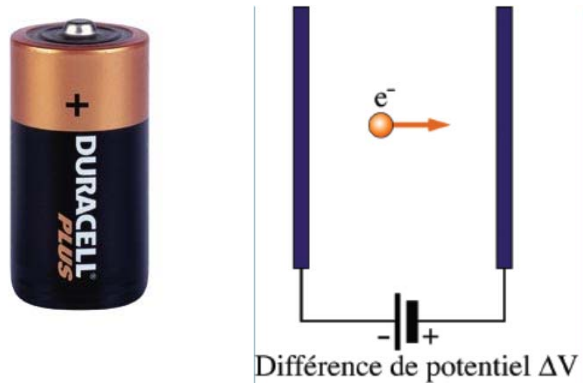
- Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

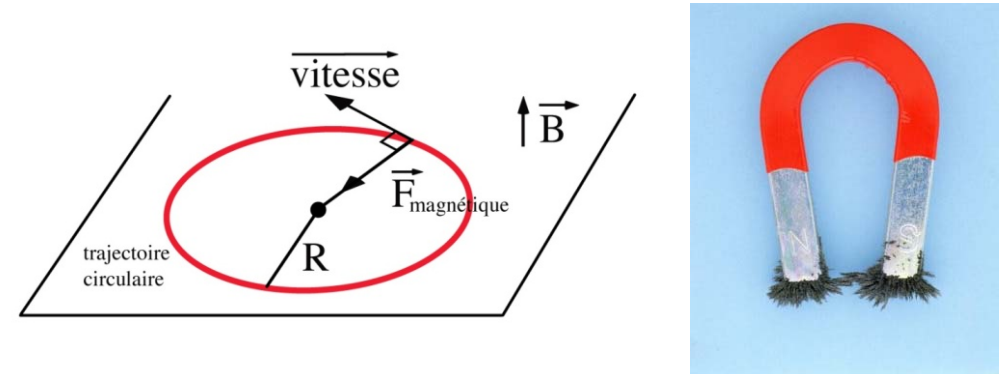
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$
$$E = mc^2$$

Les accélérateurs de particules

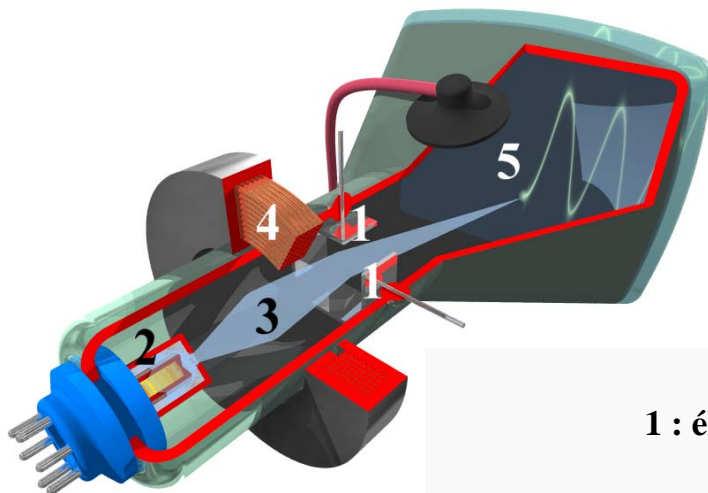
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



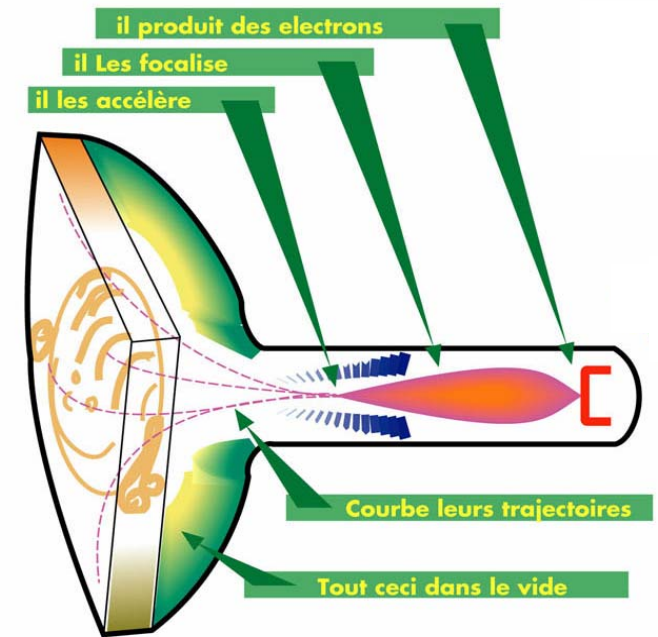
- On les pilote avec des champs magnétiques

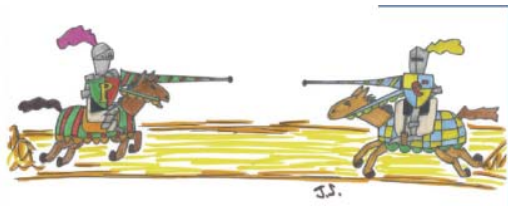


→ Les oscilloscopes et les tubes TV cathodiques sont des accélérateurs !

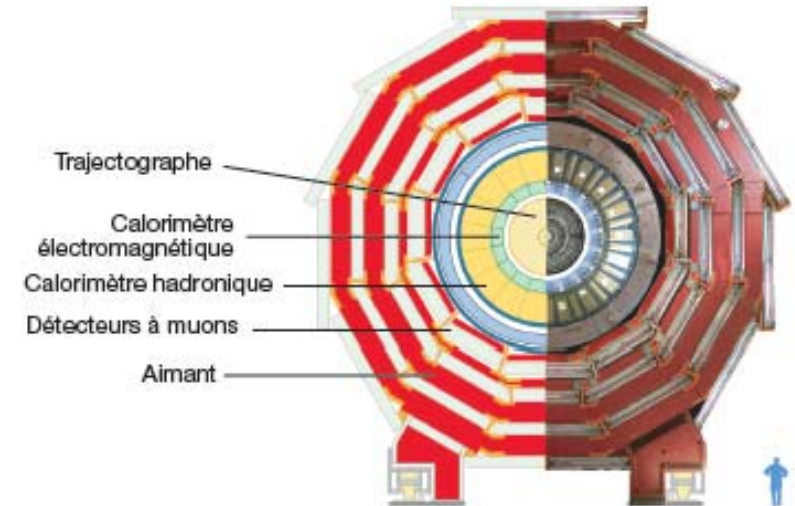
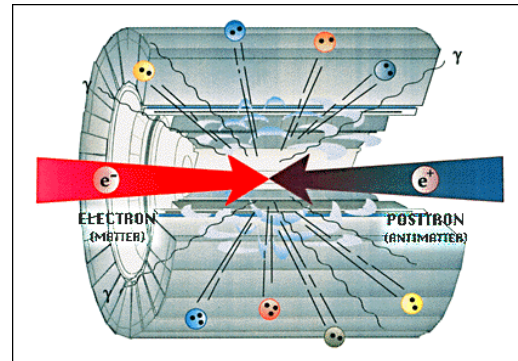
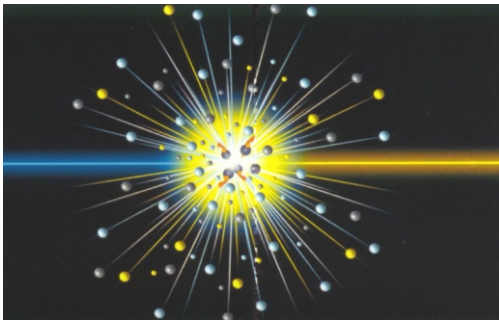
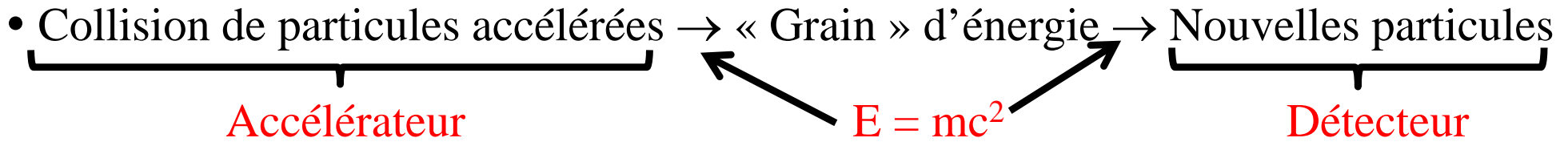
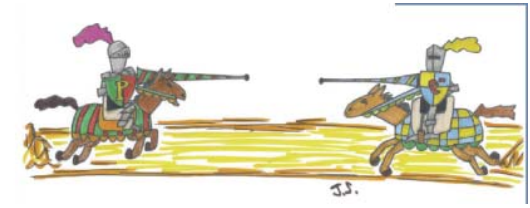


- Tube d'oscilloscope**
- 1 : électrodes déviant le faisceau
 - 2 : canon à électrons
 - 3 : faisceaux d'électrons
 - 4 : bobine pour faire converger le faisceau
 - 5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore

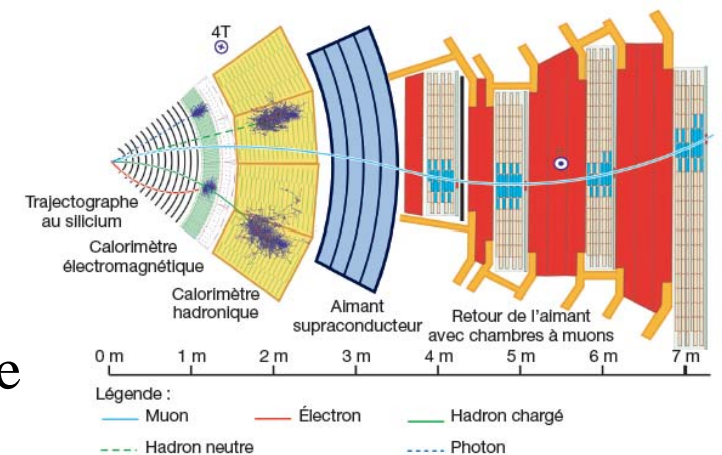




Les collisionneurs



- Accélération dans des sections droites
- Collisions dans des anneaux circulaires
 - Taille de la machine « réduite »
 - Particules produisent des collisions à chaque tour
 - Les collisions « frontales » permettent d'utiliser au mieux l'énergie disponible
- Précision d'horlogerie au-milieu d'une grosse machine
 - Taille de la zone de collision : ~ **cm** (plutôt moins)
 - Taille de l'accélérateur : ~ **km** (plutôt plus)



Intermède gourmand ...



Le collisionneur LHC au CERN

Le CERN

- Nom officiel : « **Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire** »

- **Plus grand laboratoire de physique des particules au monde** :

- ~ **3000** employés à plein temps
- ~ **6500** scientifiques y réalisent leurs expériences

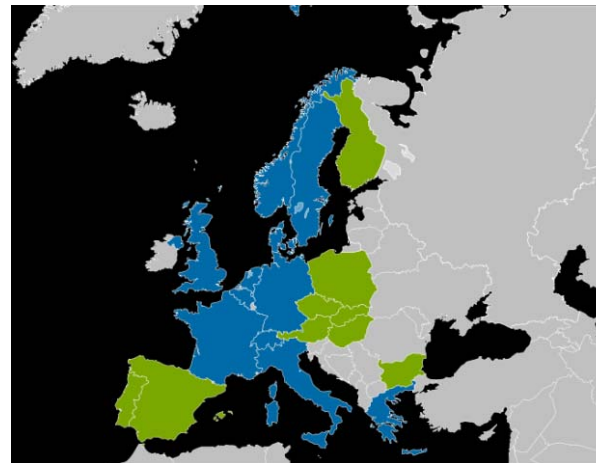
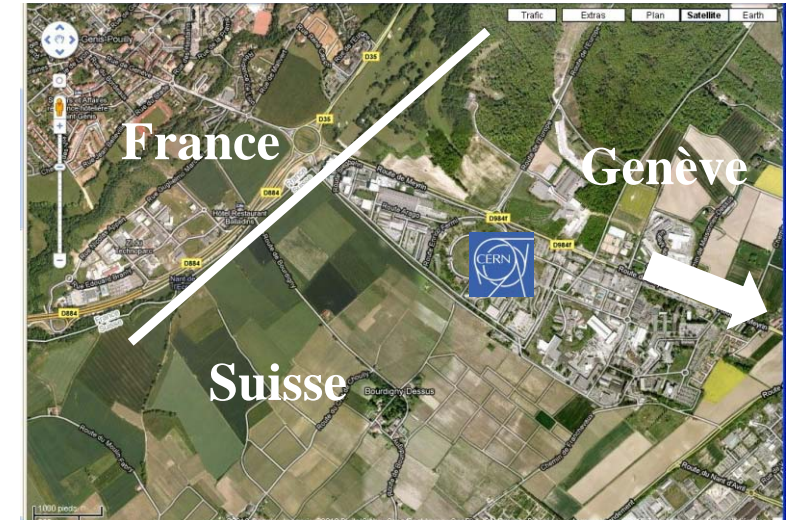
- Créé le **29 septembre 1954**

- **Vingt états membres**

- + pays « observateurs »
ou « participants »

- Le CERN est situé près de Genève, à cheval sur la frontière franco-suisse

- **Internet a été inventé au CERN au début des années 1990 !**



Pays fondateurs

**Pays devenus
membres ensuite**



<http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html>



La première page web au monde !

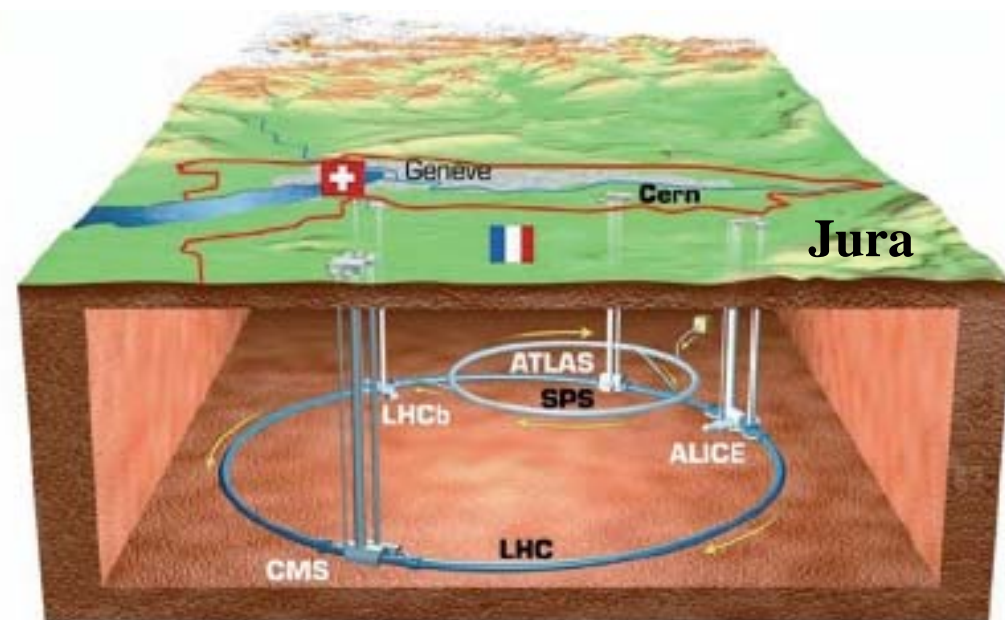
[En fait la version de 1992. La toute première]
[version (1990) est considérée comme *perdue*.]
[Si quelqu'un a une sauvegarde ... ☺]

Le LHC

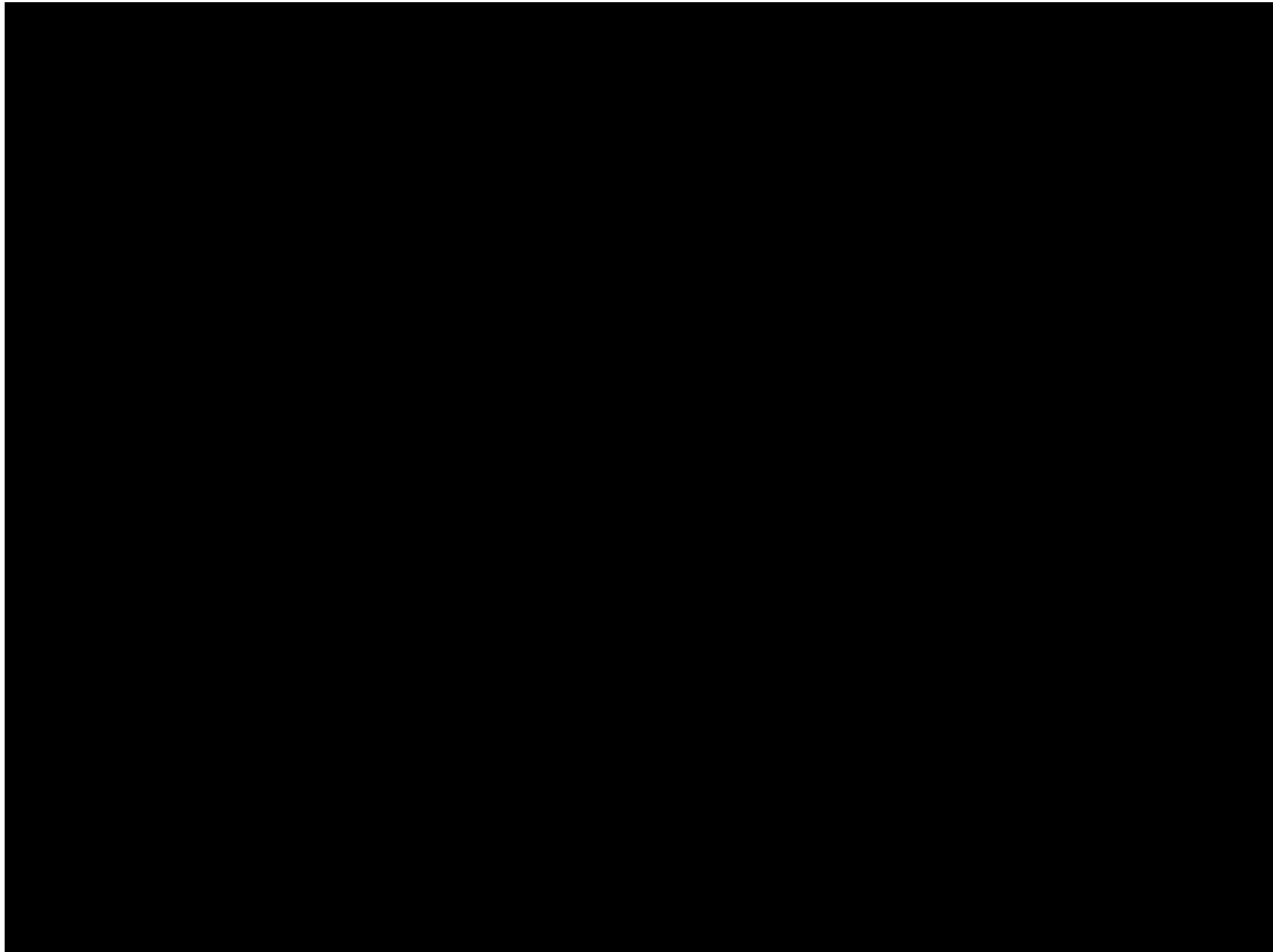


L'ancêtre :
Lawrence
(1930)

- Anneau quasi-circulaire de **~27 km de circonférence** creusé à **~100 m sous terre**
- **2 faisceaux de protons** (ou d'ions Pb selon les périodes) y circulent en sens opposé
- **Ils se croisent au centre de 4 détecteurs géants** (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) où se produisent les collisions dont les produits sont étudiés par les physiciens
- Les particules sont accélérées par tout une série d'accélérateurs en amont ; la dernière phase de ce processus a lieu dans l'anneau LHC lui-même



Accélération des particules au LHC

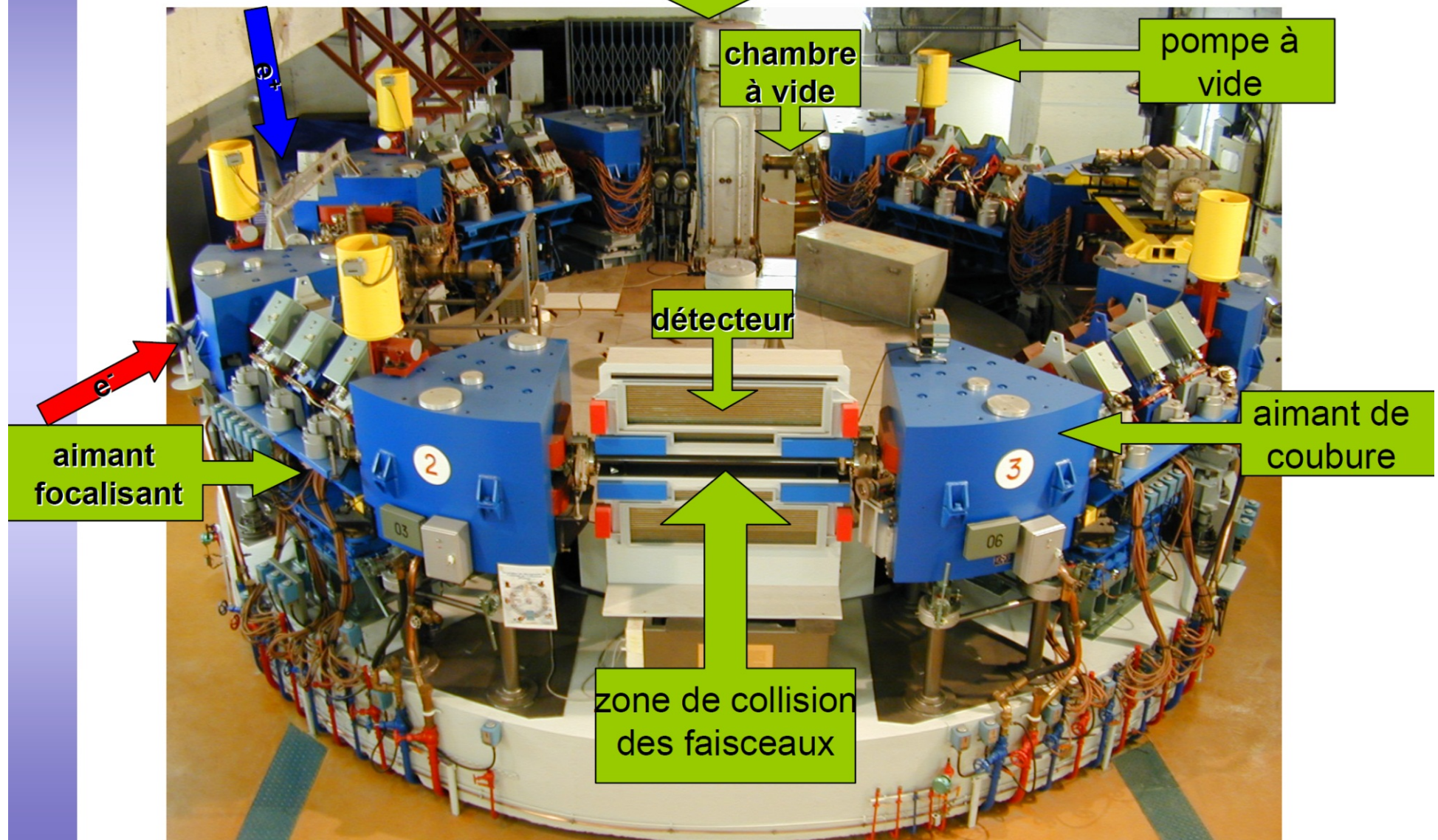


Et ACO dans tout ça ?

ACO

dispositif
d'accélération

(1962-1988)

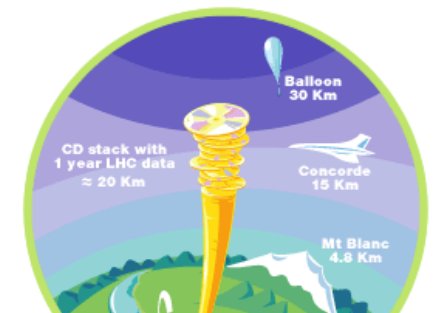


Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

- **Des cathédrales de métal et d'électronique !**
 - Dimensions de **plusieurs dizaines de mètres**
 - Poids de **plusieurs milliers de tonnes** (\approx Tour Eiffel)
- Des **millions de canaux électroniques** reçoivent des informations lors des collisions
 - **Les particules déposent de l'énergie en traversant les différents détecteurs ; ces dépôts sont convertis en signaux électriques puis lus**
 - Surfaces/volumes actifs, câbles, alimentations, etc.
- **Volume total de données : \sim plusieurs Encyclopédia Universalis / seconde**
 - Impossible de tout conserver
 - **Tri en temps réel des événements : drastique et très performant**
- Données stockées et analysées au moyen de **milliers d'ordinateurs** répartis dans des **centaines de centres de calcul** du monde entier
- Chaque collaboration du LHC compte **plusieurs milliers de membres**

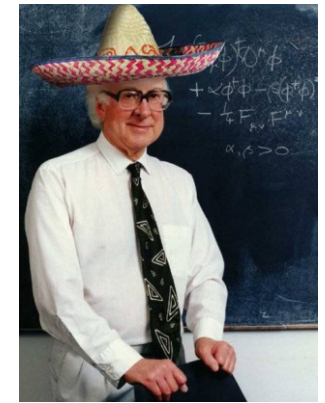


Taille des détecteurs **ATLAS** et **CMS**



A la recherche du boson de Higgs

Le boson de Higgs



- **Motivation théorique** au départ :
« quelque chose » doit donner leur masse aux particules
- **Sans ingrédient supplémentaire, la théorie échouerait à décrire la Nature** :
toutes les particules voyageraient à la vitesse de la lumière !
→ Une conséquence (parmi d'autres) : elles seraient sans masse ... **Ce qui est faux !**
- **Postulat** : un « champ » (dit de **Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble**)
emplirait tout l'espace et interagirait avec les particules
interaction \Rightarrow **ralentissement** \Leftrightarrow **masse** (vitesse < vitesse de la lumière)
- Plus une particule ralentit sous l'effet de ce champ,
plus elle est massive.
- **Peter Higgs** : si ce mécanisme est vrai,
il doit exister une particule « associée »
→ Le fameux **boson de Higgs**
- **Problème** : le boson de Higgs est la pierre angulaire du **Modèle Standard**
mais il n'a pas encore été découvert !!!!!

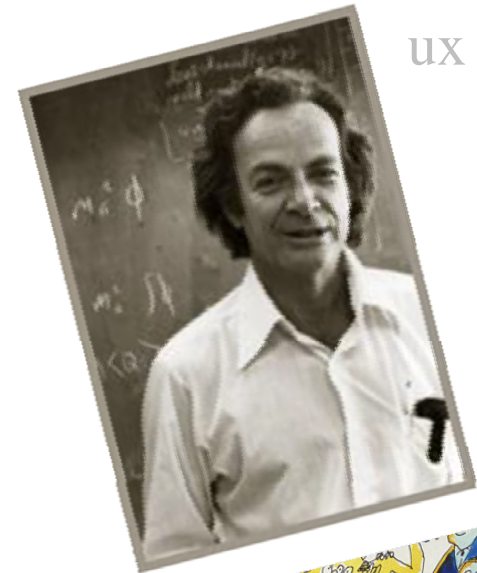
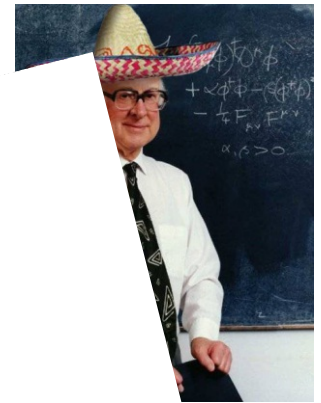


Le boson de Higgs

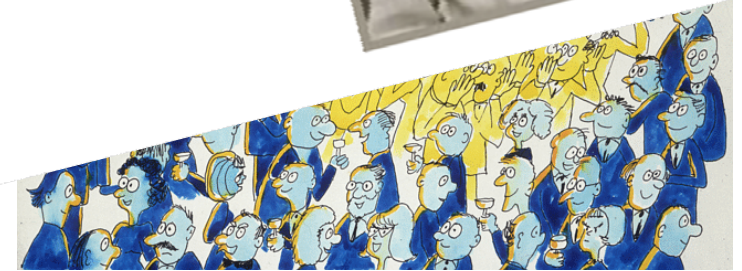
- Motivation théorique au départ :
« quelque chose » doit donner la masse

- Sans innovation, on ne peut pas résoudre le problème
- ▶ **Do you want to be famous?**
- ▶ **Do you want to be a king?**
- ▶ **Do you want more than the nobel prize?**
- **Then solve the mass Problem -**
R.P. Feynman

- Problème de la masse
- Petit problème de la masse
- Problème de la masse

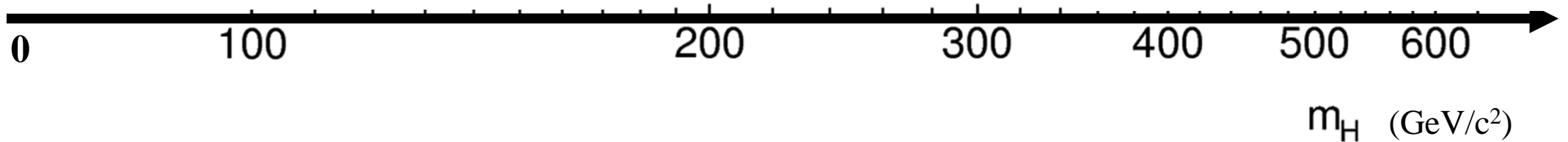


ux !



Le boson de Higgs est la pierre angulaire du Modèle Standard
mais il n'a pas encore été découvert !!!!

La chasse au boson de Higgs



- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par la théorie sauf sa masse
- Théorie $\Rightarrow m_H < 1000 \text{ GeV}/c^2$

Nota bene : $1 \text{ GeV}/c^2 = 1.8 \times 10^{-25} \text{ kg}$ (en gros la **masse d'un proton**)

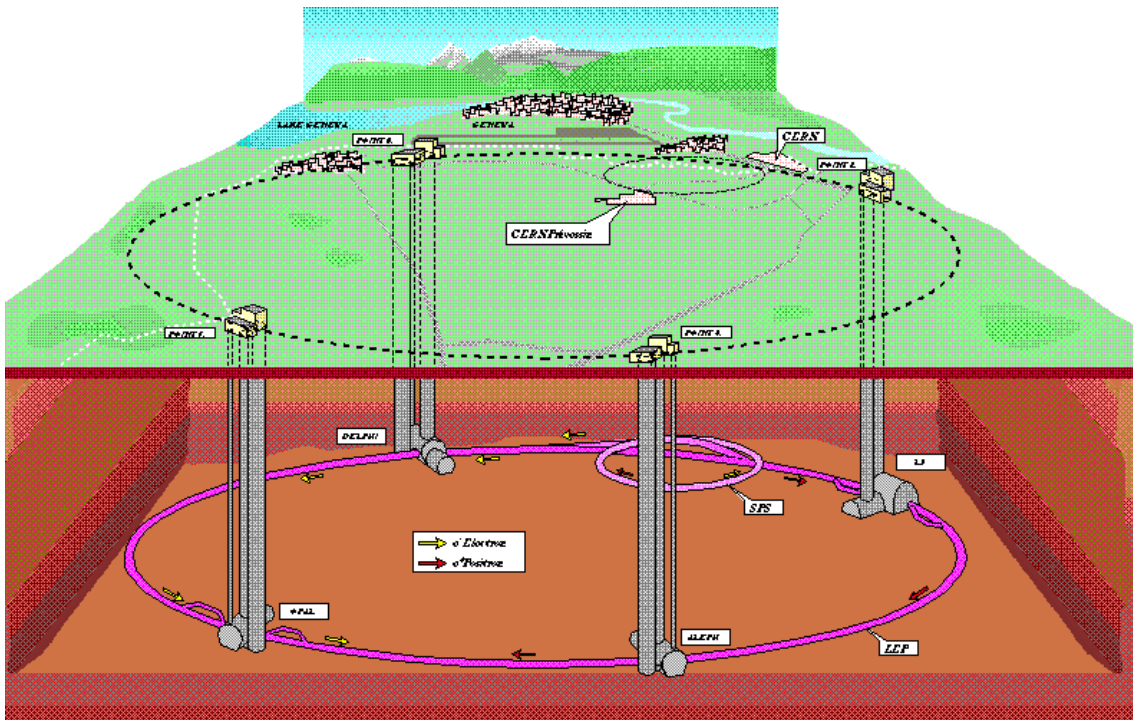
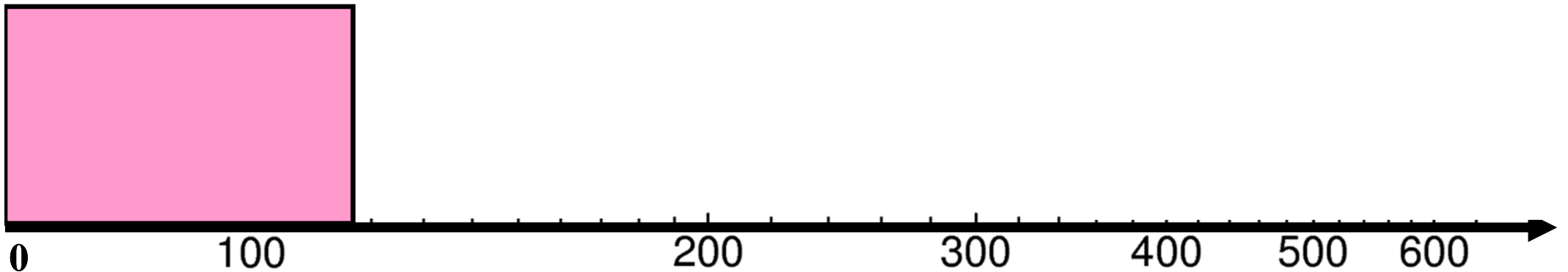
GeV = “Giga [10^9] électron-Volt”

Energie actuelle de collisions au LHC : 8 “Téra [10^{12}] électron-Volt” (**TeV**)

La chasse au boson de Higgs

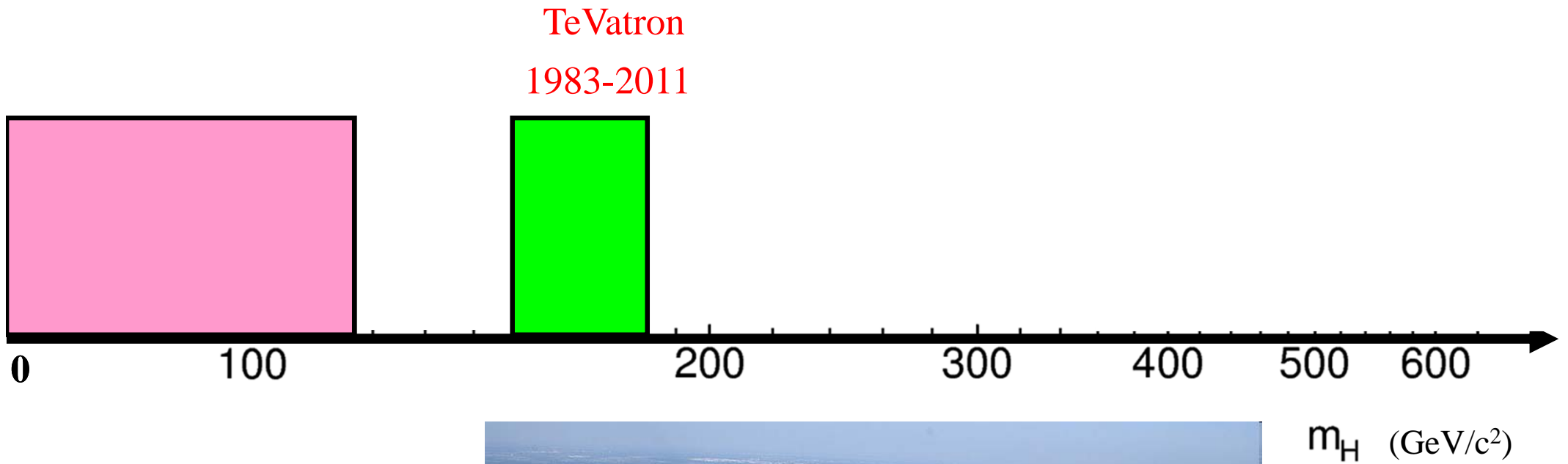
LEP

1989-2000



Le LEP au CERN
(près de Genève)

La chasse au boson de Higgs



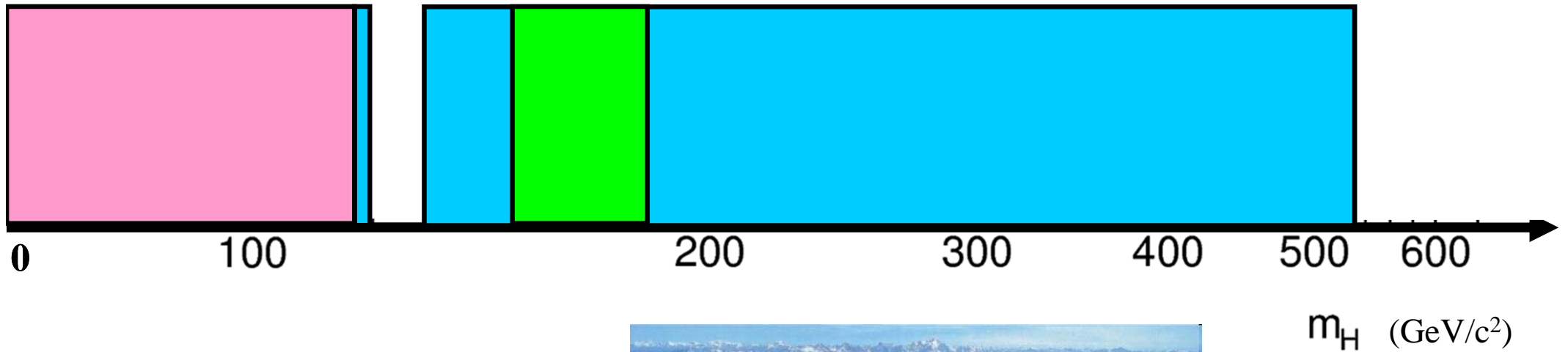
Le TeVatron
à Fermilab
(près de Chicago)



La chasse au boson de Higgs



LHC
2009-2011



Le LHC au CERN
(près de Genève)



4 juillet 2012

- Présentation des nouveaux résultats des expériences ATLAS et CMS
→ Communiqué de presse : <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2012/PR17.12F.html>

« Les expériences du CERN observent une particule dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs tant attendu »



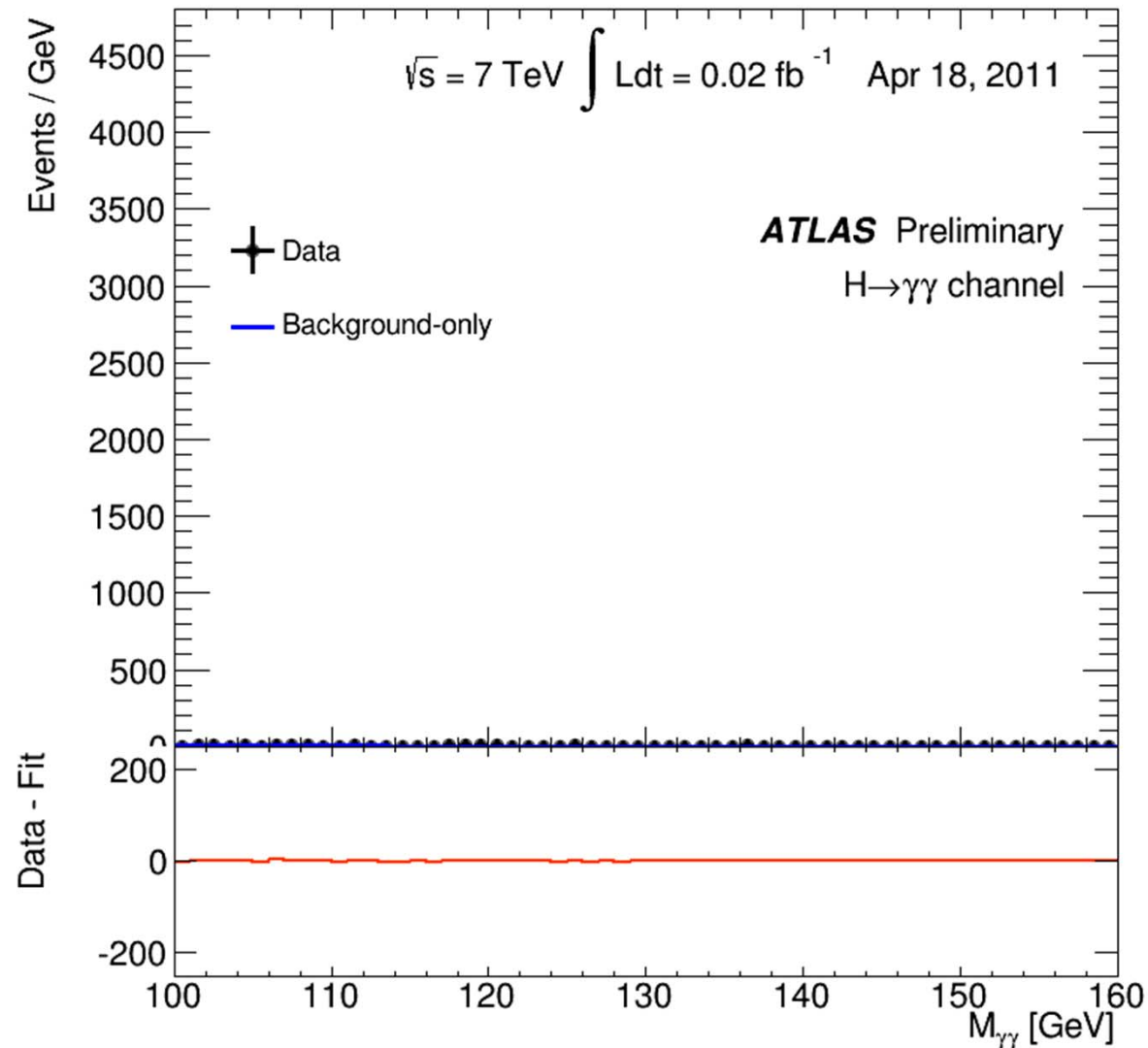
- C'est l'accélérateur LHC qui a « offert » cette découverte aux expériences !
- Que montrent les données ?
- Et maintenant ?

4 Juillet 2012



La puissance de la statistique à l'œuvre !

- Le **signal** laissé par « un » **boson de Higgs** sort peu à peu du **bruit de fond** ...



- ... à mesure que la quantité de données analysées augmente au cours du temps

2013

- 14 mars : mise à jour pour les « conférences d'hiver » des résultats annoncés en 2012
 - Nouveau communiqué de presse :

<http://press.web.cern.ch/fr/press-releases/2013/03/de-nouveaux-resultats-indiquent-que-la-particule-decouverte-au-cern-est-un>

« De nouveaux résultats indiquent que **la**
particule découverte au CERN est **un** boson de Higgs »

- 8 octobre : l'aboutissement d'une recherche de 49 ans ...



Le **Prix Nobel de Physique 2013** a été décerné à

François Englert et Peter Higgs



" 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 "

Pour en savoir plus sur le LHC

- Le site **LHC-France**
<http://www.lhc-france.fr>
- Site grand public du **CERN**
<http://public.web.cern.ch/public/welcome-fr.html>
- Sites grand public des **expériences du LHC** :
 - ALICE <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>
 - ATLAS <http://atlas.ch/>
 - CMS <http://cms.web.cern.ch/cms/index.html>
 - LHCb <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public>
- Films disponibles gratuitement sur le web :
 - Film “**Bottle to Bang**” produit et dirigé par Chris Mann (© CERN, 2008)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1125472>
 - Film « **LHC First Physics** » (© CERN video productions, 2010)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1259221>

