

La physique des particules

et le

**LARGE
HADRON
COLLIDER**

Bienvenus au CERN

Laboratoire Européen pour la physique des particules



- Le plus grand laboratoire de physique au monde
- Une collaboration internationale depuis 1954
- Sur la frontière franco-suisse proche de Genève

Comment a-t-il commencé?

Après la deuxième guerre mondiale, plusieurs savants européens étaient partis du continent pour des persécutions politiques ou raciales. Les ressources étaient limitées.

Les scientifiques ont compris que nul pays pouvait avoir une recherche fondamentale de haut niveau tout seul.

Avant toute idée d'unification européenne, des pays qui jusqu'à quelques années auparavant s'étaient bombardés, ont commencé à collaborer dans une grande entreprise scientifique pacifique.



Sur le terrain du futur Institut nucléaire



En 1945, les membres du Comité consultatif pour les recherches nucléaires se réunissent à Washington pour discuter de la création de l'Institut international pour les études nucléaires.

Le CERN aujourd'hui

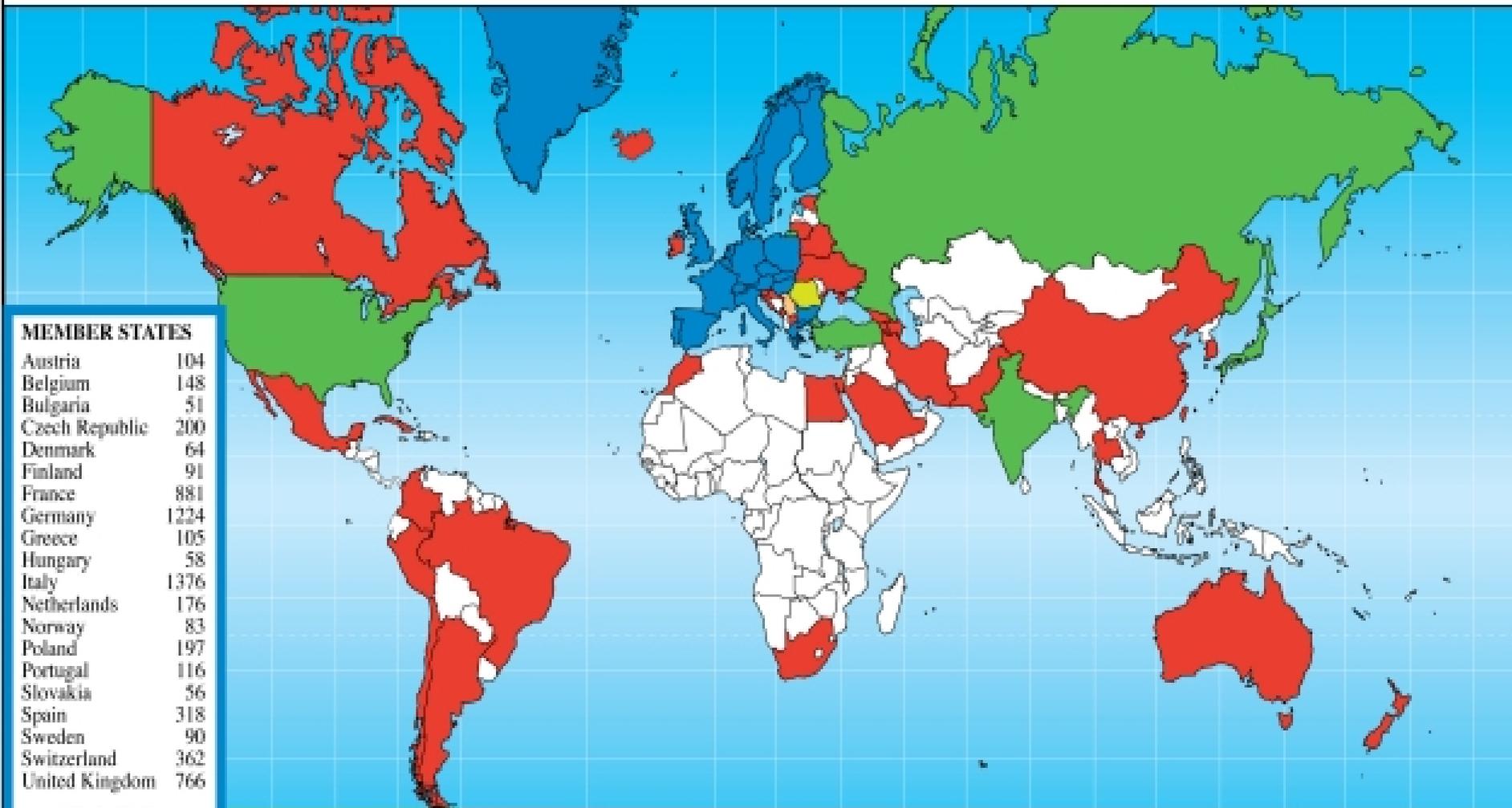
- **C**onseil → pas un conseil mais un grand labo
- **E**uropeen → mondial
- **R**echerche
- **N**ucléaire → pour la physique des particules



Environ **2500** membres du personnel (principalement technique)

>10000 utilisateurs (scientifiques universitaires, travaillant sur les expériences, la plupart basées dans leur pays d'origine)

Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 2 September 2013



MEMBER STATES

Austria	104
Belgium	148
Bulgaria	51
Czech Republic	200
Denmark	64
Finland	91
France	881
Germany	1224
Greece	105
Hungary	58
Italy	1376
Netherlands	176
Norway	83
Poland	197
Portugal	116
Slovakia	56
Spain	318
Sweden	90
Switzerland	362
United Kingdom	766

6466

OBSERVERS

India	154
Japan	224
Russia	899
Turkey	106
USA	1787

3170

CANDIDATE FOR ACCESSION

Romania	82
---------	----

ASSOCIATE MEMBER IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

Israel	57
Serbia	30

OTHERS

Chile	7	Georgia	10	New Zealand	6		
China	130	Iceland	4	Pakistan	21		
China (Taipei)	70	Iran	22	Peru	2		
Colombia	11	Ireland	7	Saudi Arabia	3		
Croatia	25	Korea	103	Slovenia	25		
Azerbaijan	2	Lithuania	16	South Africa	31		
Belarus	23	Cyprus	10	Thailand	6		
Brazil	110	Egypt	18	T.F.Y.R.O.M.	1		
Canada	154	Estonia	18	Morocco	9	Ukraine	26

987

Pourquoi la physique des particules?



Depuis ses origines, l'homme s'est posé la question des fondements de la nature; déjà les anciens Grecs avaient postulé que la complexité du monde pouvait s'expliquer par des interactions complexes entre des éléments simples

$$\det |(E_i^{(0)} - E) \delta_{ij} + V_{ij}^{(0)}| = 0, \quad i, j = 1, 2$$

$$V_{ij}^{(0)} = \int U_i^{(0)*} \hat{V} U_j^{(0)} d\tau_A; \quad \Psi_n^{(0)} = \{ \alpha_1^{(n)}, \alpha_2^{(n)}, \dots, \alpha_n^{(n)} \}$$

$$\sum |\alpha_i|^2 = 1$$

$$V_{12} \frac{1}{E^{(-)} - H_2} V_{12}^+ \rightarrow V_{12} \langle \Phi_2^{(0)} | \dots \rangle \frac{1}{E - E_2 + i \frac{\Gamma_2}{2}}$$

$$\langle \Phi_2^{(0)} | V_{12}^+ \int dE' \frac{2\pi (E' - E_2)^2 + \frac{\Gamma_2^2}{4}}{E^{(-)} - E'} V_{12} \Phi_2^{(0)} \rangle$$

$$V_{12} \frac{1}{E^{(-)} - H_2} V_{12}^+ = \frac{1}{E - (E_2 + i \frac{\Gamma_2}{2})}$$

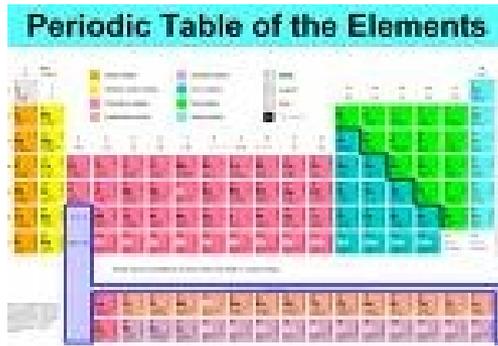
$$M_{0 \rightarrow 1} = \langle \Psi_{U_1} | \hat{H}_1 | \Psi_{U_1} \rangle + \frac{\langle \Phi_2^{(0)} | V_{12}^+ U_1 \rangle \langle \Psi_{\Phi_2^{(0)}} | \hat{H}_1 | \Psi_{\Phi_2^{(0)}} \rangle}{E - (E_2 + i \frac{\Gamma_2}{2})}$$

$$\langle U_{10} \rangle = \frac{1}{\Delta E} \sum_{\mu} \langle U_{10} | \hat{H}_1 | \Phi_{\mu}^{(0)} \rangle \langle \Phi_{\mu}^{(0)} | \dots \rangle$$

Le point de vue actuel est beaucoup plus complexe, mais l'idée était très puissante

Voyage dans la matière

Vers la fin du XIXème, les scientifiques ont compris que toute la matière était composée par 92 éléments



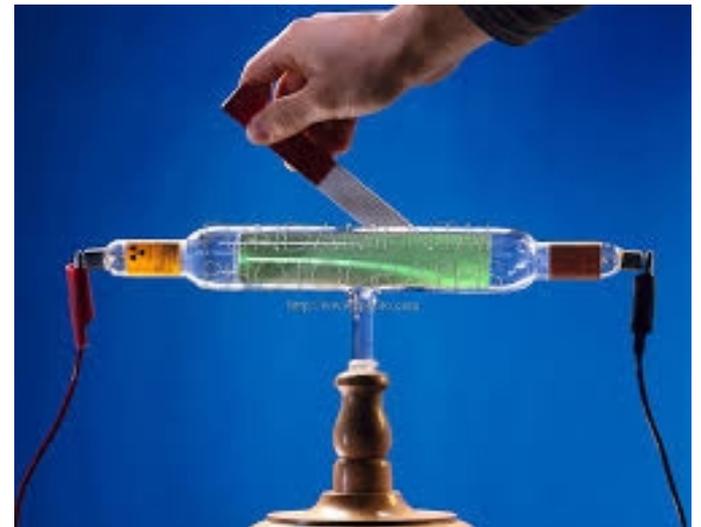
Periodic Table of the Elements

A colorful periodic table of elements, showing the arrangement of chemical elements. The table is divided into groups and periods, with elements color-coded by their properties. The title 'Periodic Table of the Elements' is displayed at the top.

Il y avait donc 92 "briques fondamentales" de la matière.

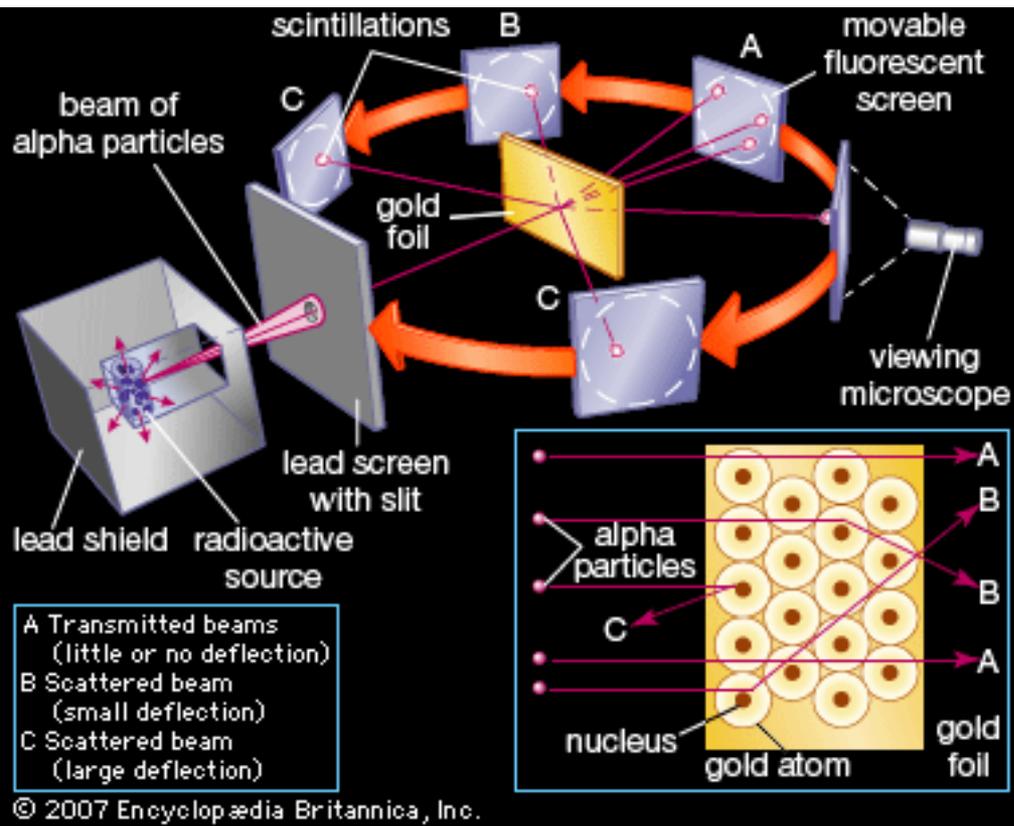
En honneur du philosophe grec Demokritos ces briques ont été appelées "atomes" (qu'on ne peut pas casser)

En 1896 la découverte était faite que l'électricité est transportée par une particule avec charge négative, petite mais finie.
Cette particule a été appelée "électron".



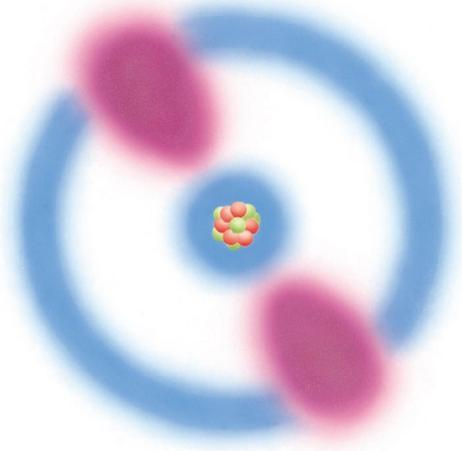
Plus petit que l'atome

En plus, des régularités dans la table périodique ont suggéré que peut-être les atomes avaient aussi une structure interne

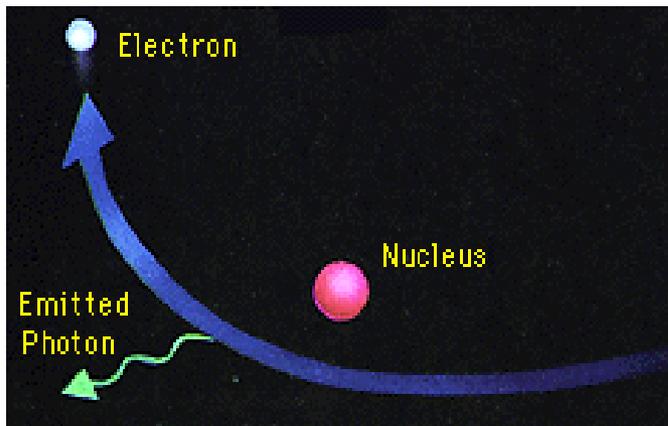


L'expérience de Rutherford a montré que la charge positive et la plupart de la masse des atomes se trouvent dans un noyau central beaucoup plus petit que la taille de l'atome.

Des atomes aux particules



Des études ultérieures ont montré que le noyau est composé de protons positifs et de neutrons neutres, entouré d'un nuage d'électrons négatifs.

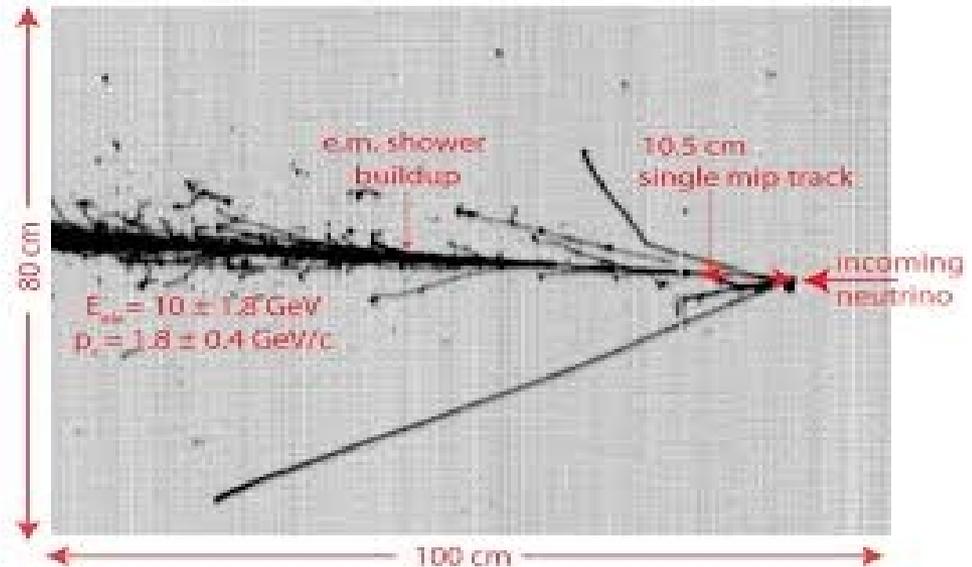


Les électrons ne bougent PAS autour du noyau dans des orbites circulaires comme des petites planètes, car chaque particule chargée qui tourne dans un mouvement circulaire émet de la radiation.

Est-qu'on peut tout expliquer avec quatre particules?

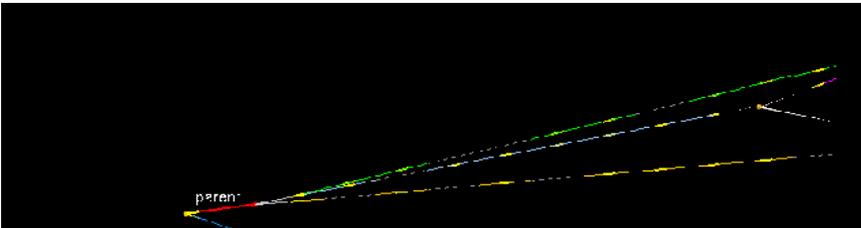
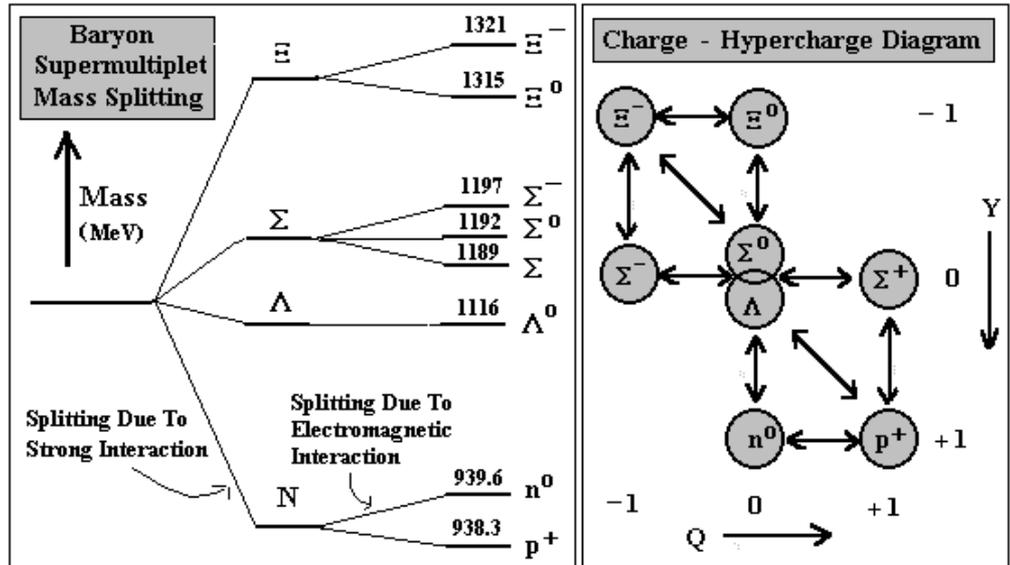
Les 92 atomes de la table périodique sont des combinaisons entre protons, neutrons et électrons.

Notre univers est aussi rempli de neutrinos, très difficiles à observer.



Un zoo de particules

Mais ce n'était que le début: des expériences avec les rayons cosmiques et les premiers accélérateurs ont découvert un véritable "zoo" de particules.



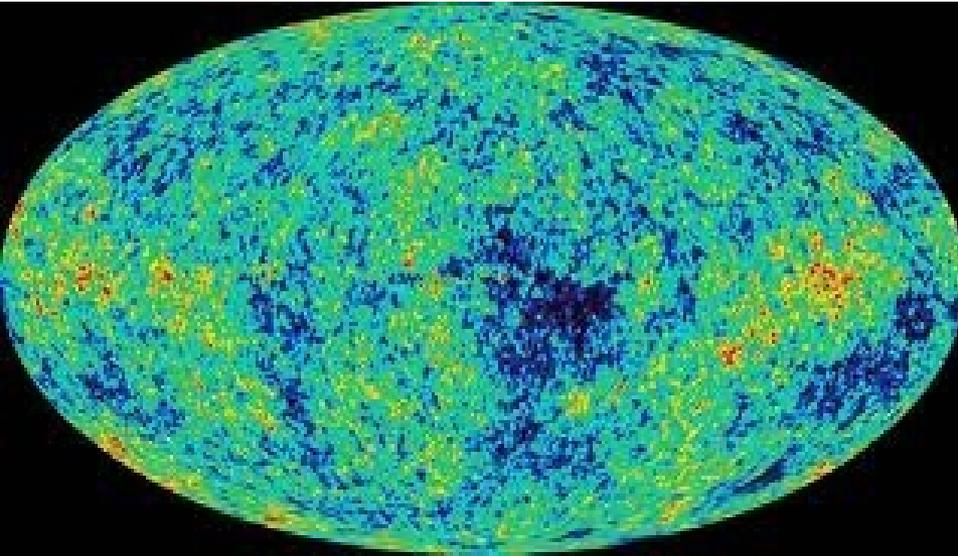
Mais la plupart de ces particules sont instables:

Temps de vie du Tau : $1/1000000000000$ s

Temps de vie du Muon : $2/1000000$ s

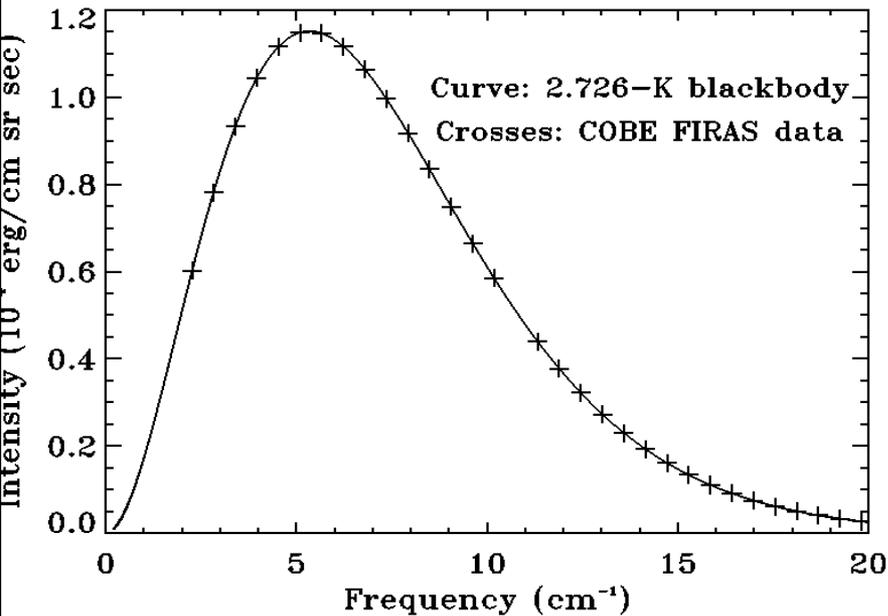
Électrons, protons, neutrons (dans les noyaux) et neutrinos sont STABLES: ils sont les plus légers de leur catégorie

Un univers froid



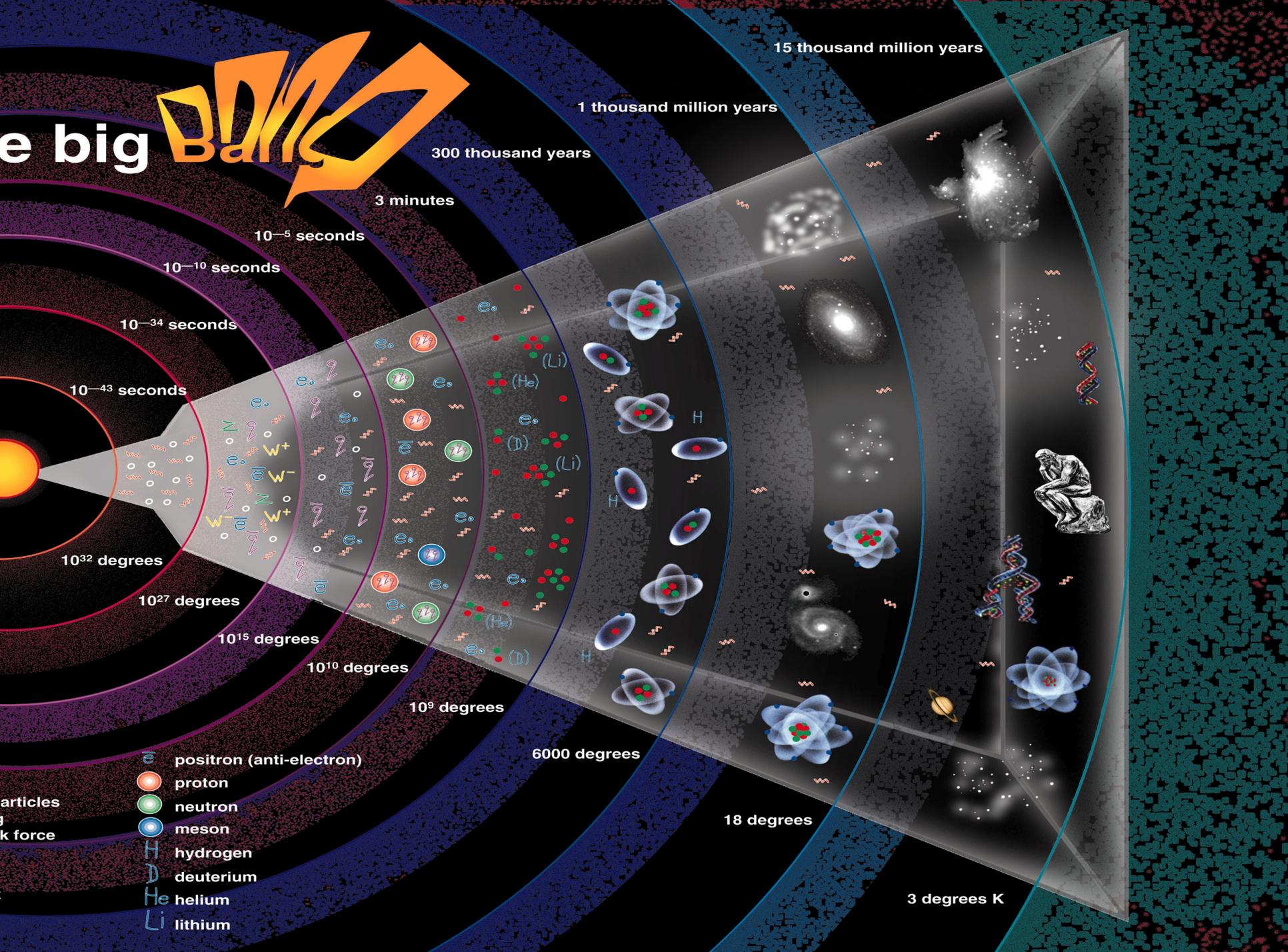
Notre univers est très froid, sa température moyenne est très basse

→ seules des particules de petite masse peuvent y être nombreuses



$$E = mc^2$$

The big Bang



10⁻⁵ seconds

10⁻¹⁰ seconds

10⁻³⁴ seconds

10⁻⁴³ seconds

10³² degrees

10²⁷ degrees

10¹⁵ degrees

10¹⁰ degrees

10⁹ degrees

6000 degrees

18 degrees

3 degrees K

300 thousand years

3 minutes

1 thousand million years

15 thousand million years

-  positron (anti-electron)
-  proton
-  neutron
-  meson
-  hydrogen
-  deuterium
-  helium
-  lithium

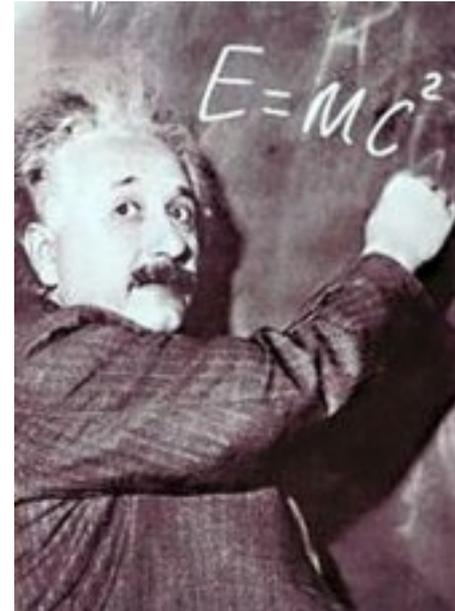
particles
strong force

L' univers primordial

Un univers très chaud était rempli de particules d'haute masse

En plus, les lois de symétrie étaient plus fortes

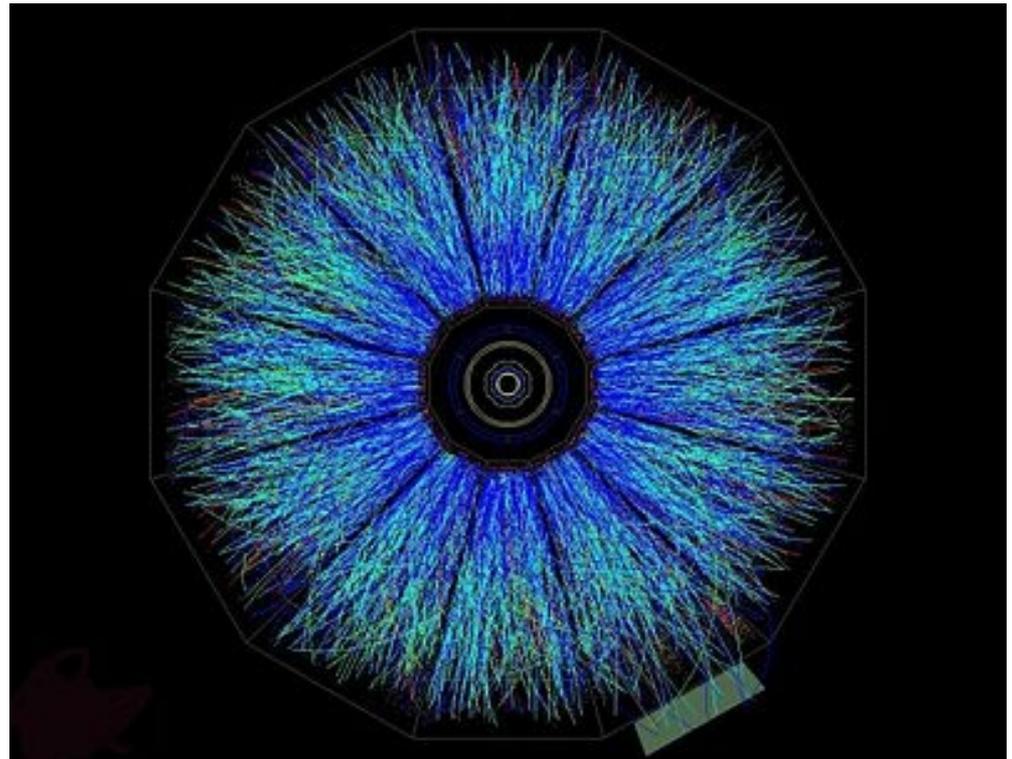
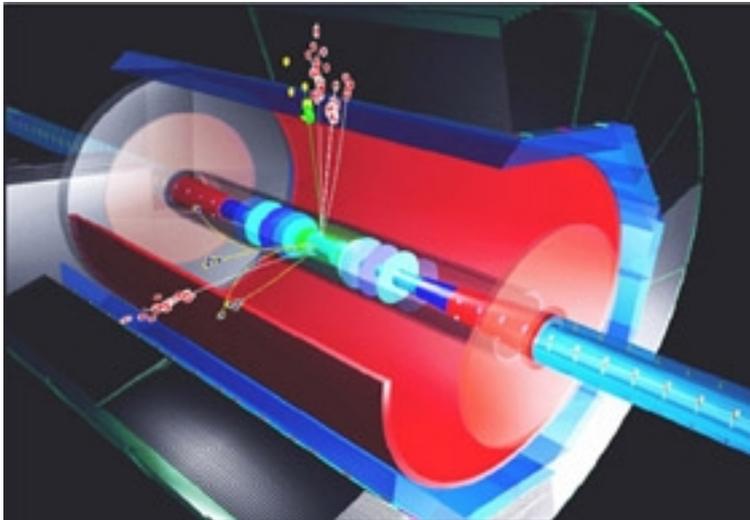
-> par exemple, l'eau est plus symétrique que la glace, mais la vapeur plus que l'eau



De l'archéologie cosmologique

Personne ne pouvait faire des expériences de physique quelques instants après le Big Bang...

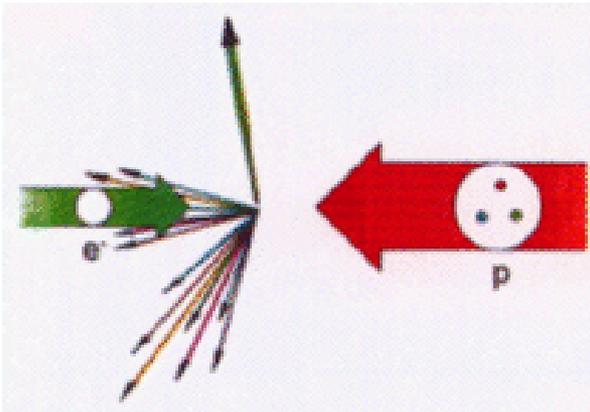
Mais nous pouvons maintenant créer des conditions similaires dans un laboratoire:



Des particules aux quarks

Peute-être que les particules ont des constituants plus petits?

Est-qu'on peut casser les protons dans quelque chose d'autre?



Oui!

Si nous envoyons un électron d'énergie suffisante contre un proton, le proton va se casser (mais pas l'électron)

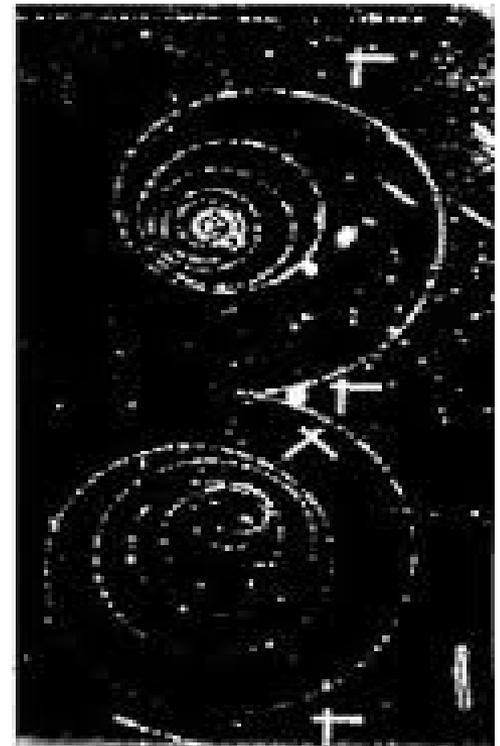
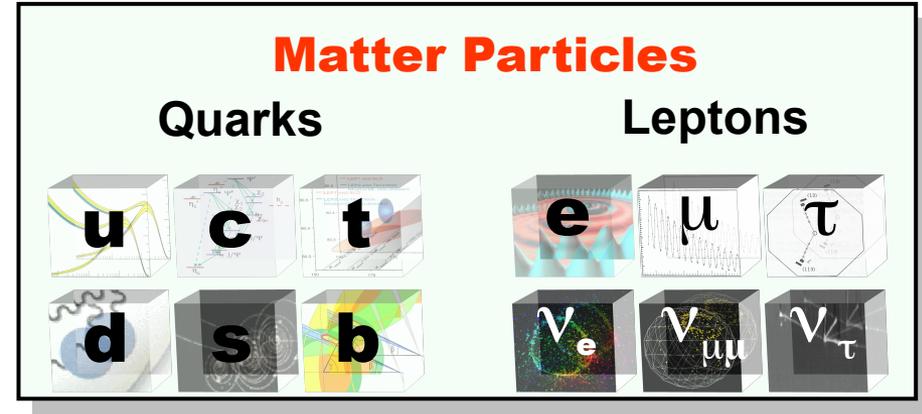
-> le proton a une structure interne, il est fait de particules plus petites, les QUARKS



Les particules élémentaires

Les quarks (et les leptons, particules qui ne sont pas sensibles à la force nucléaire forte) sont dans notre vision actuelle les composants fondamentaux de l'univers.

En plus, pour chaque particule nous avons aussi un frère jumeau d'anti-matière



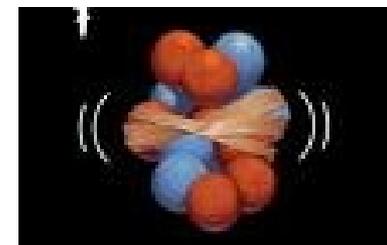
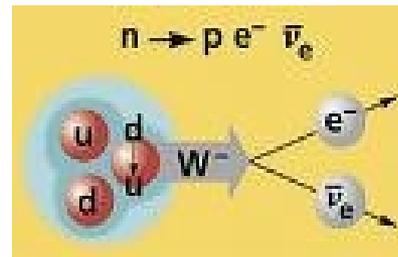
L' unification des forces

Un des rêves des physiciens est d'expliquer la plupart des phénomènes de la nature avec le plus petit nombre de forces:

- La gravitation, sur terre et dans le ciel
- La thermodynamique et la mécanique statistique
- L'électro-magnétisme

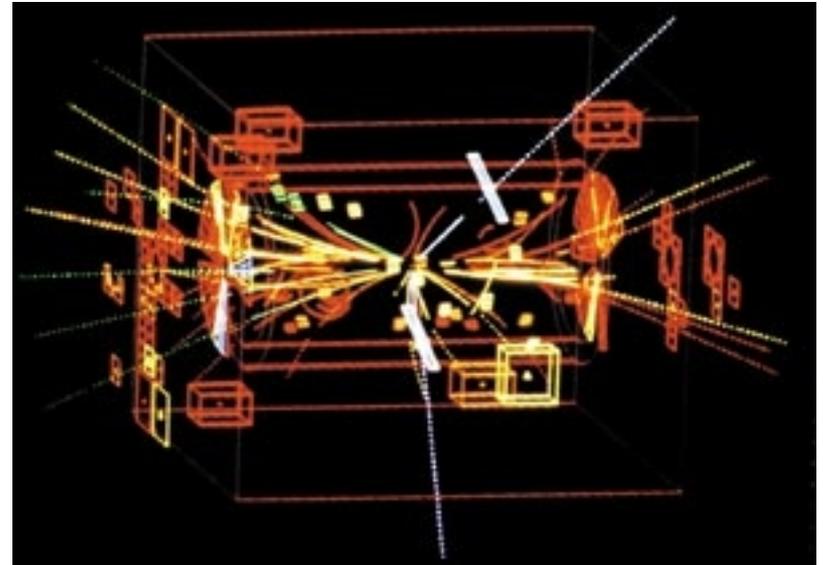
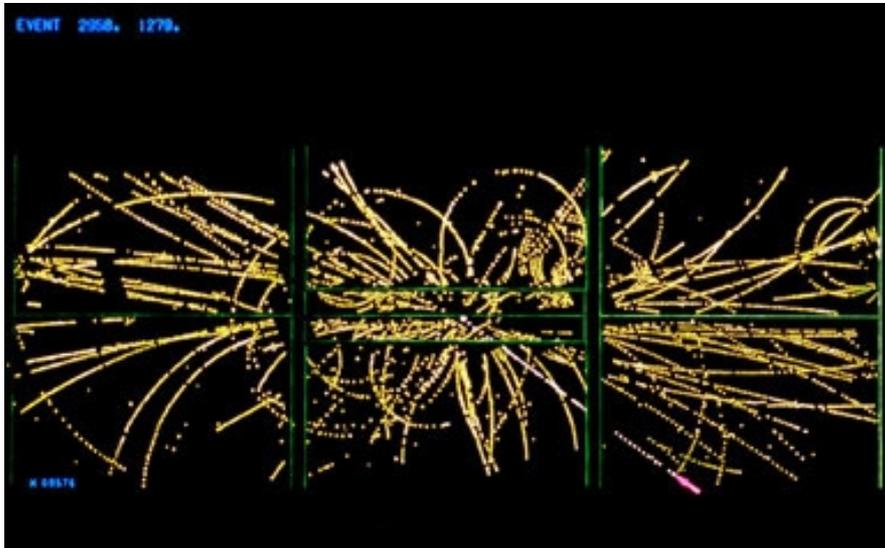
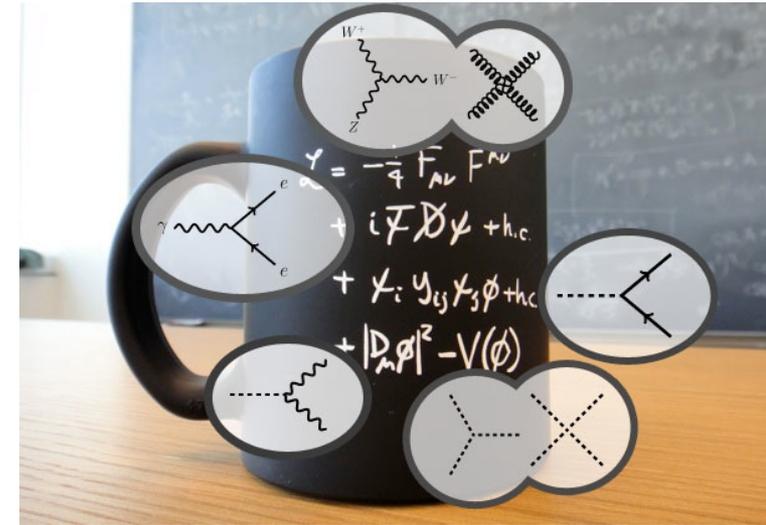
Vers 1950, tout pouvait s'expliquer avec 4 forces fondamentales:

- Gravitationnelle
- Electro-magnétique
- Nucléaire faible
- Nucléaire forte

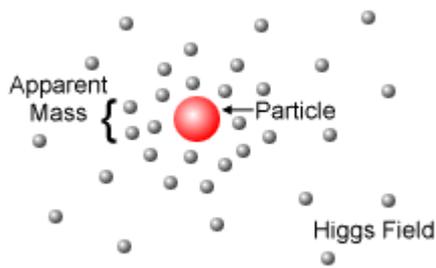


Théorie électro-faible

Dans les années 60 une théorie fut développée pour unifier la force électro-magnétique et nucléaire faible. Plusieurs confirmations expérimentales (dont la découverte des bosons intermédiaires W et Z au CERN en 1983)



Brisure de symétrie et le Higgs



La théorie électro-faible est basée sur des symétries entre quarks et leptons, qui ont des masses très différentes. La théorie postule que la masse est une conséquence de l'interaction avec un champs de Higgs externe.



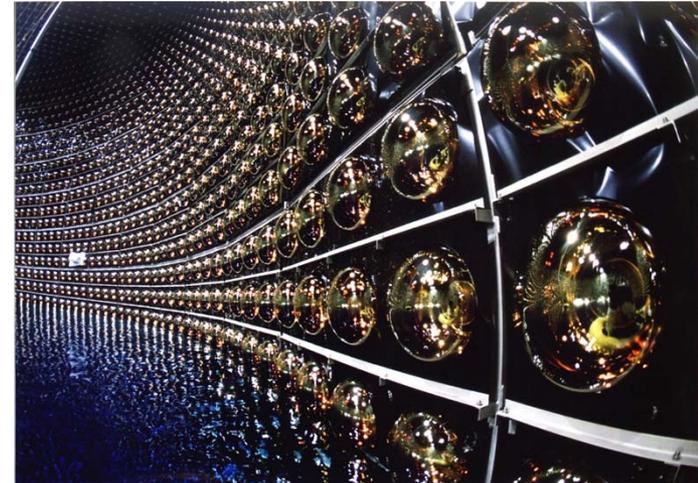
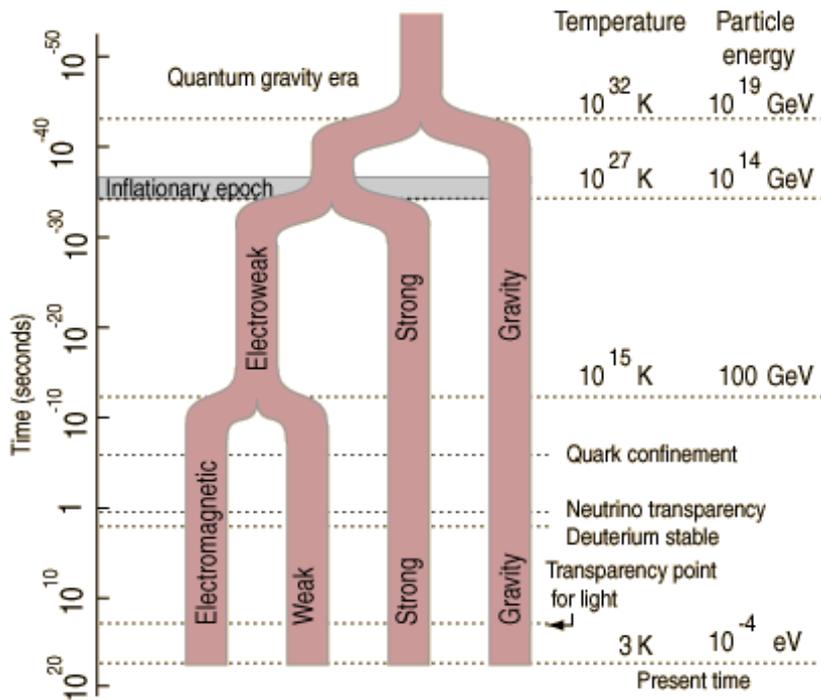
Le boson de Higgs, qui prouve la validité de cette théorie, a été découvert par ATLAS et CMS en 2012.

F.Engelert et P.Higgs ont reçu le prix Nobel de physique en 2013

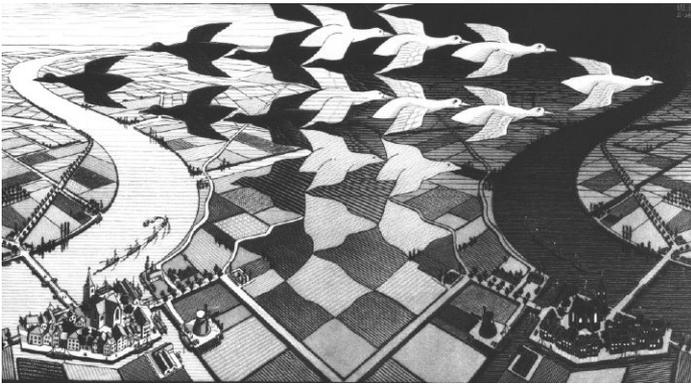


Encore des unifications?

Nous avons maintenant trois forces fondamentales.
Des théories unifient la force forte et, d'une certaine manière, la gravité (très difficile)
Nous cherchons des confirmations (par exemple, la désintégration du proton)



Plus de questions: ou est allée l'anti-matière?



Matière et anti-matière
ont été créés
dans la même quantité



La petite différence entre matière
et anti-matière est étudiée dans l'LHC

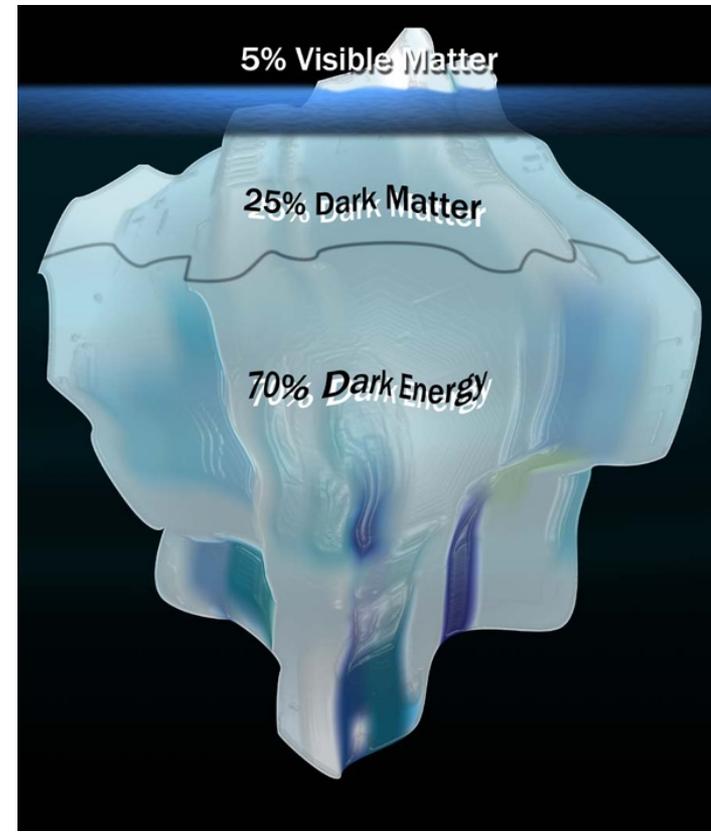
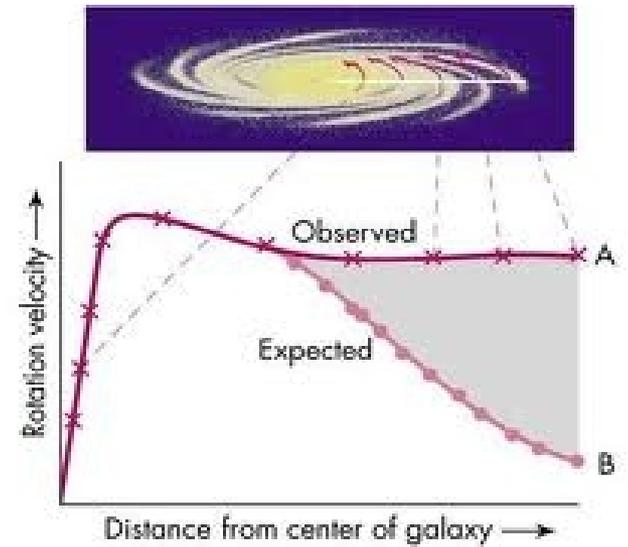
Les collisions de haute énergie créent les deux dans des quantités égales

De la matière noire?

Normal: faite par des atomes
étoiles, planètes,
hommes...

Matière noire: Substance inconnue
(pas d'atomes)
peut-être proche
d'une lumière
lourde
on espère la produire
dans l' LHC

Dark energy: on n'en sait rien...

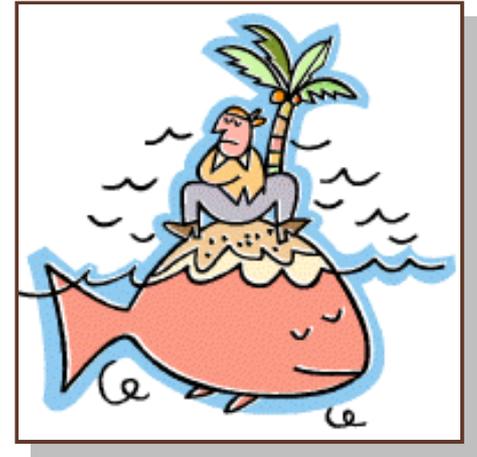


Qu'y a-t-il d'autre?

Plusieurs modèles exotiques...

- Nouvelles forces de la nature
- Extra dimensions de l'espace
- Des trous noirs microscopiques

Suggestés par la théorie des cordes



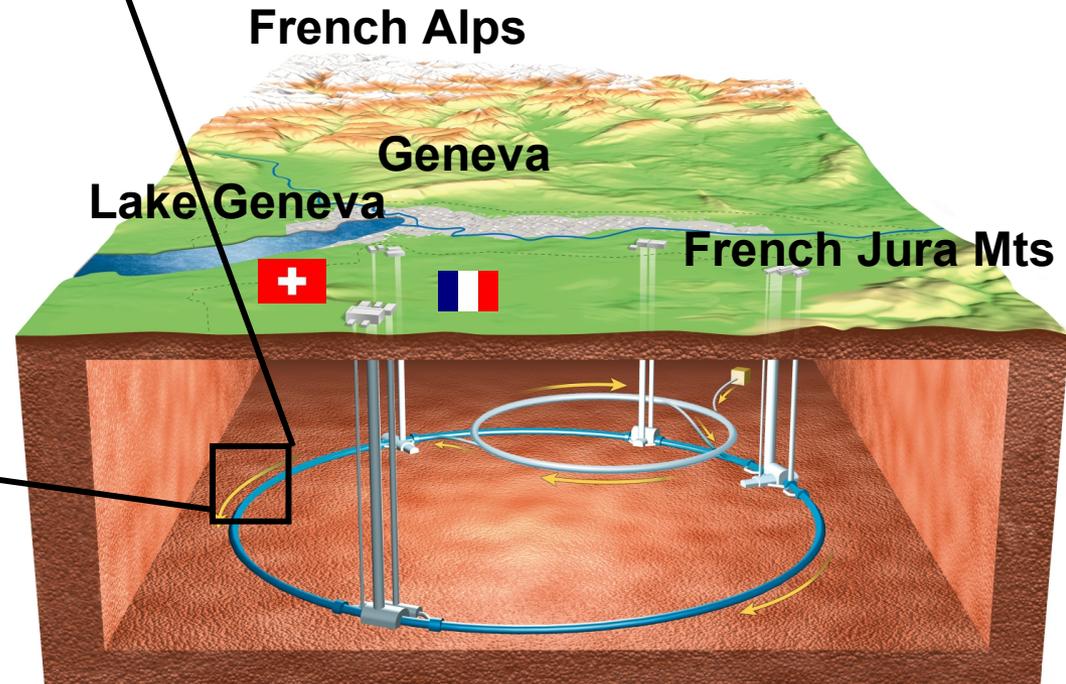
Les expériences de l'LHC cherchent tout ça.

Et aussi des choses complètement différentes

L'accélérateur

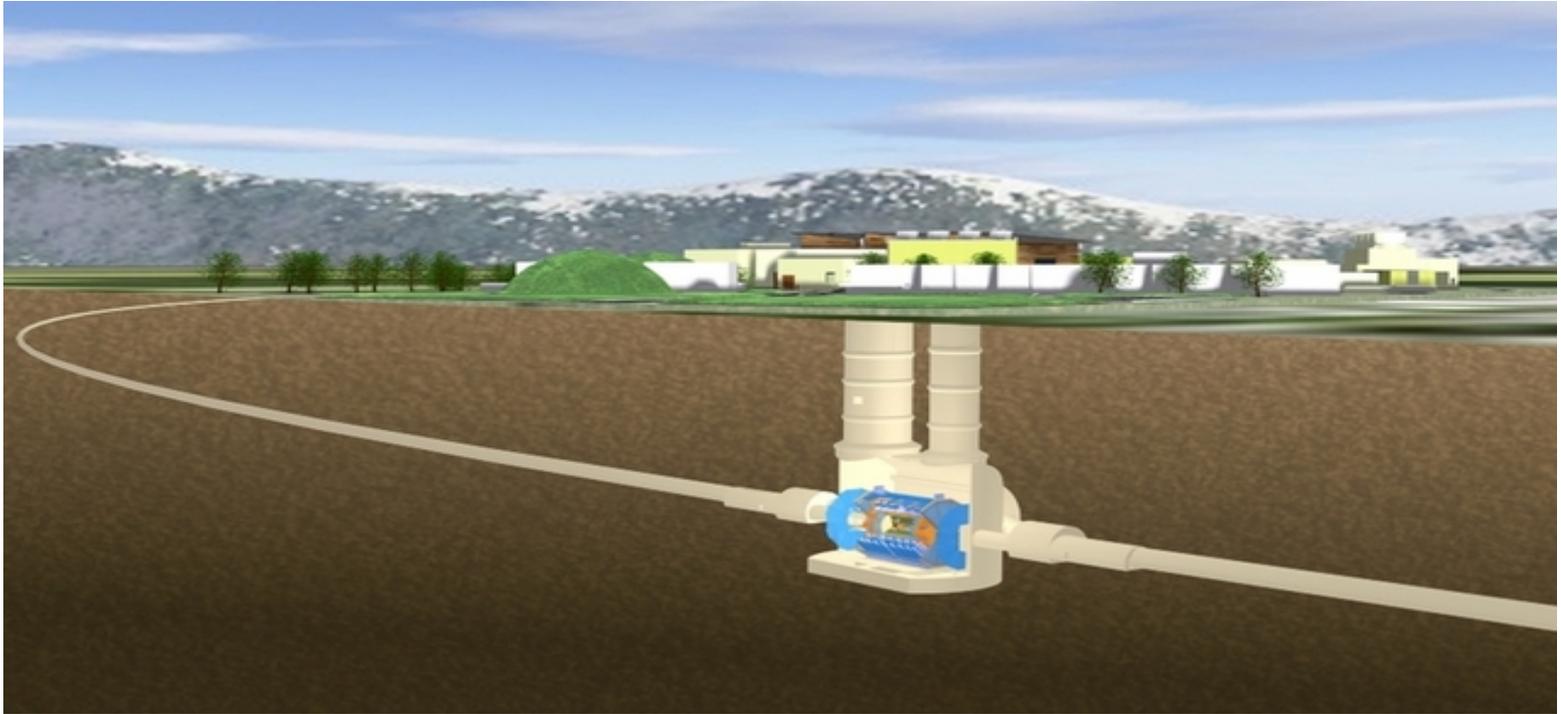


Des ondes électro-magnétiques accélèrent les particules

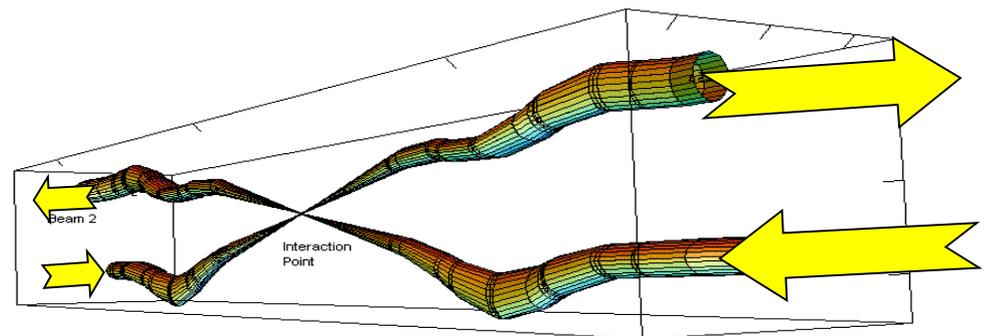


Des aimants les gardent dans une trajectoire circulaire

Points de collision

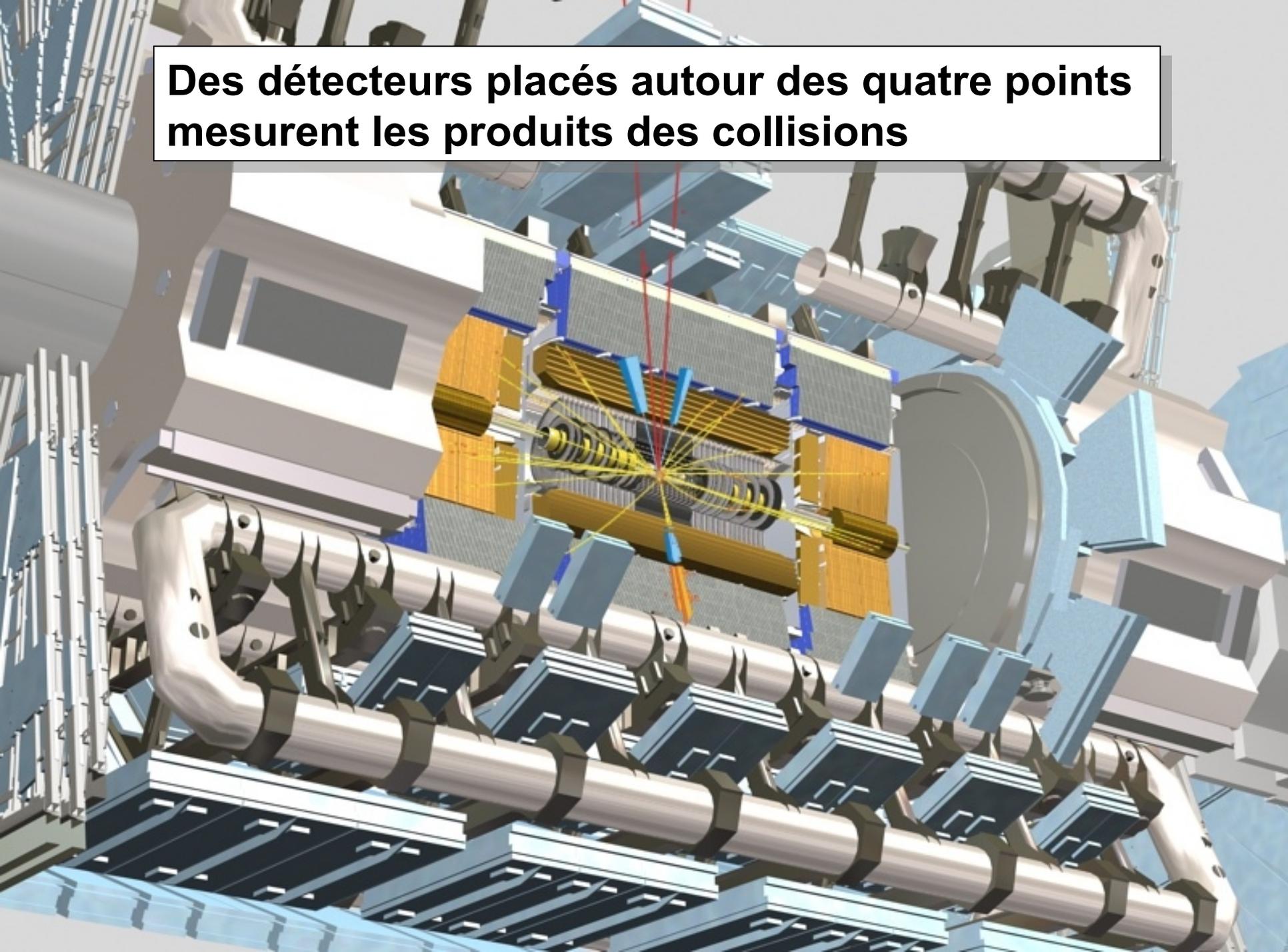


Les faisceaux se croisent en quatre points



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Des détecteurs placés autour des quatre points mesurent les produits des collisions



Les détecteurs sont comme des appareils photo numériques



Très grands
comme une cathédrale

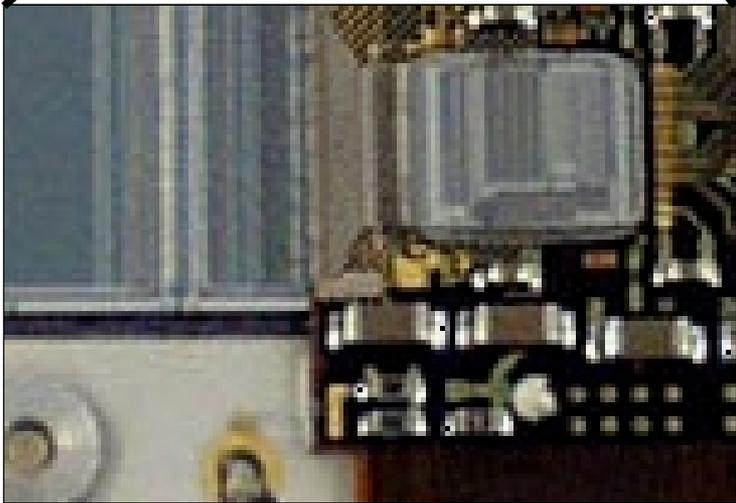
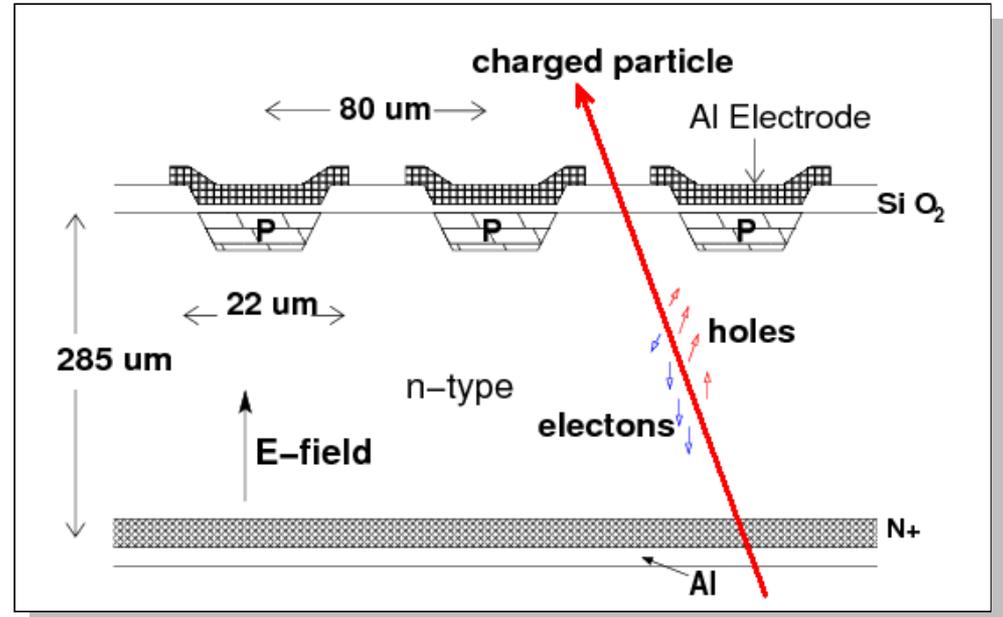
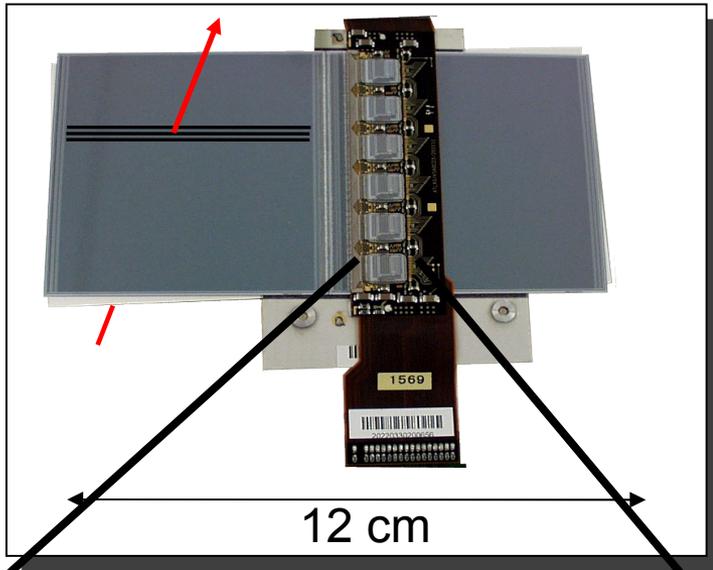
Précis:
plus que la taille d'un cheveu

Rapides:
40 millions d'images par seconde
(Votre appareil photo ne peut pas
faire ça)



Dessinés par des collaborations: des milliers de
physiciens, ingénieurs, techniciens

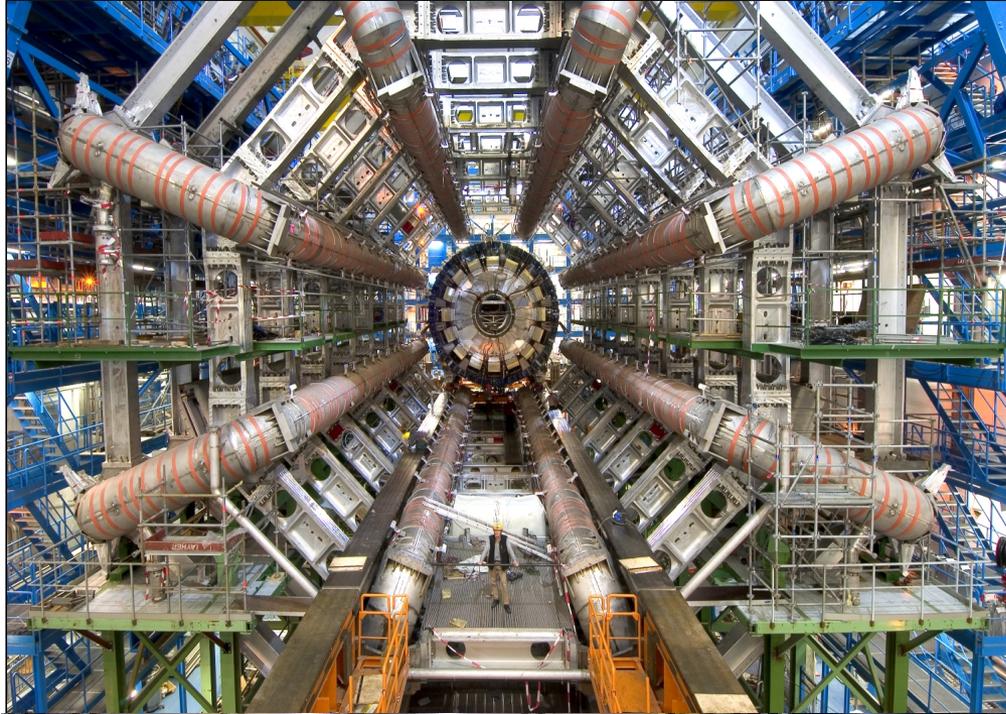
Un exemple de détecteur



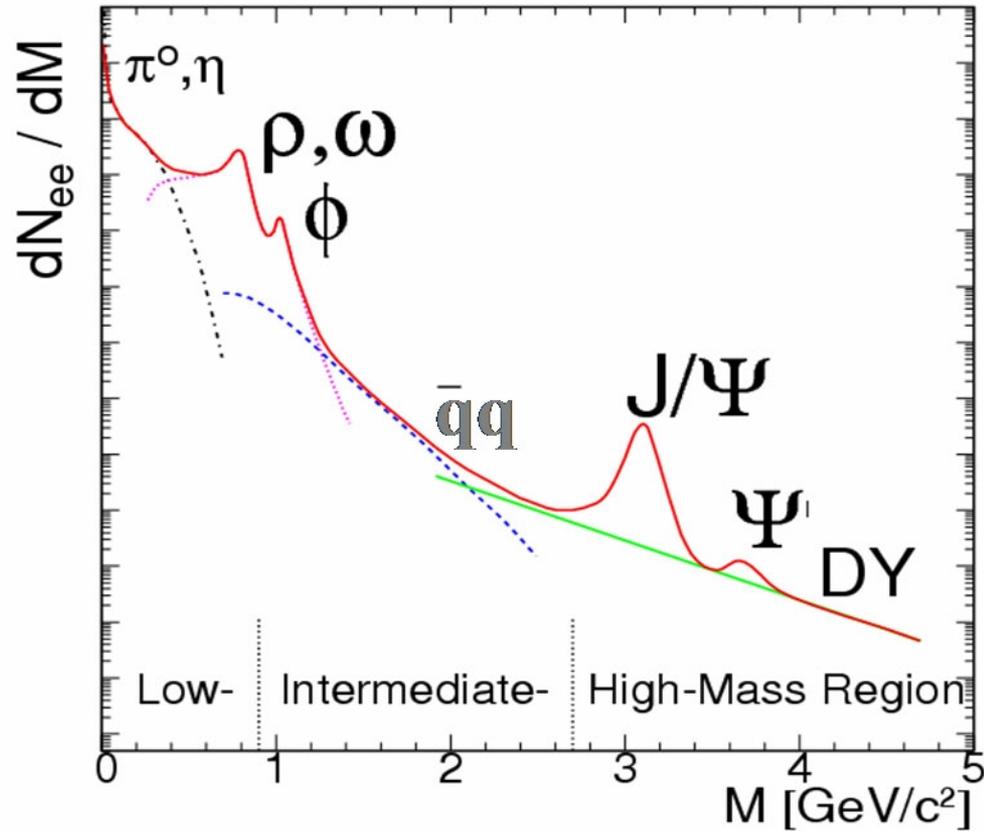
Charge mesurée par des puces

Les signaux envoyés dans des ordinateurs

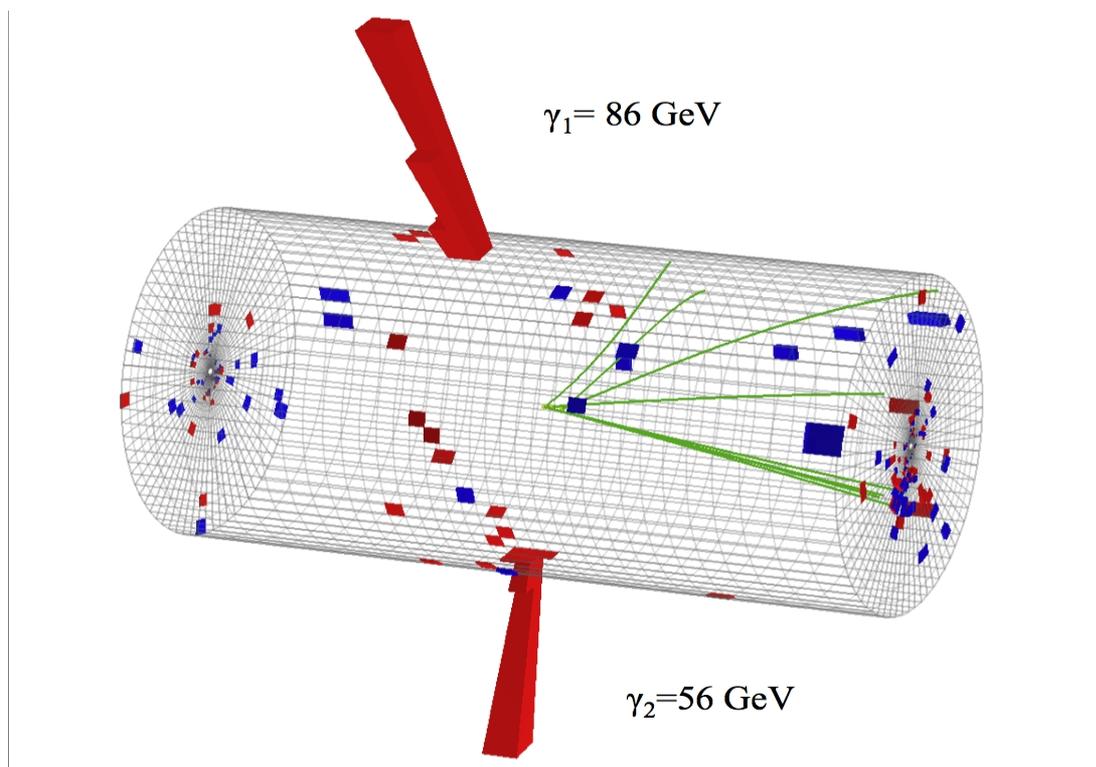
Beaucoup d'analyses nécessaires

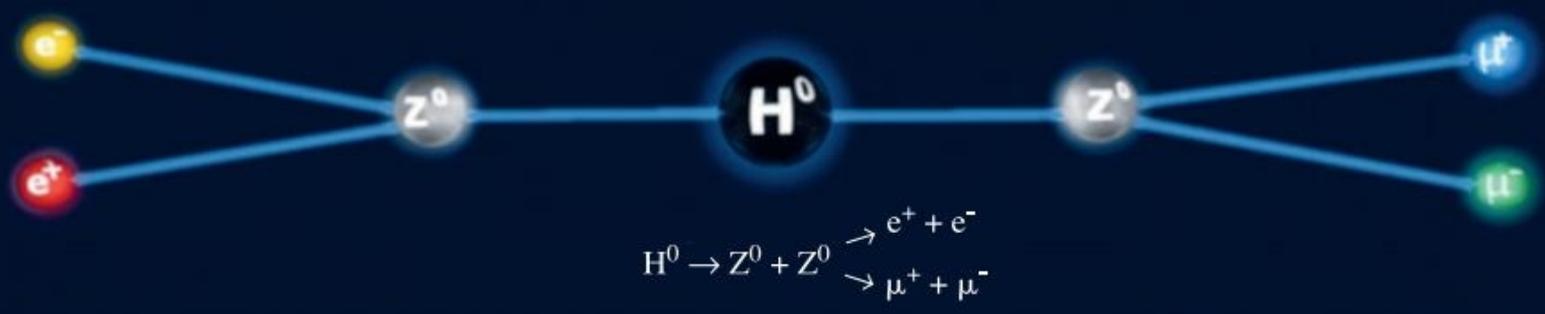


La découverte de l'Higgs: la méthode de la masse invariante

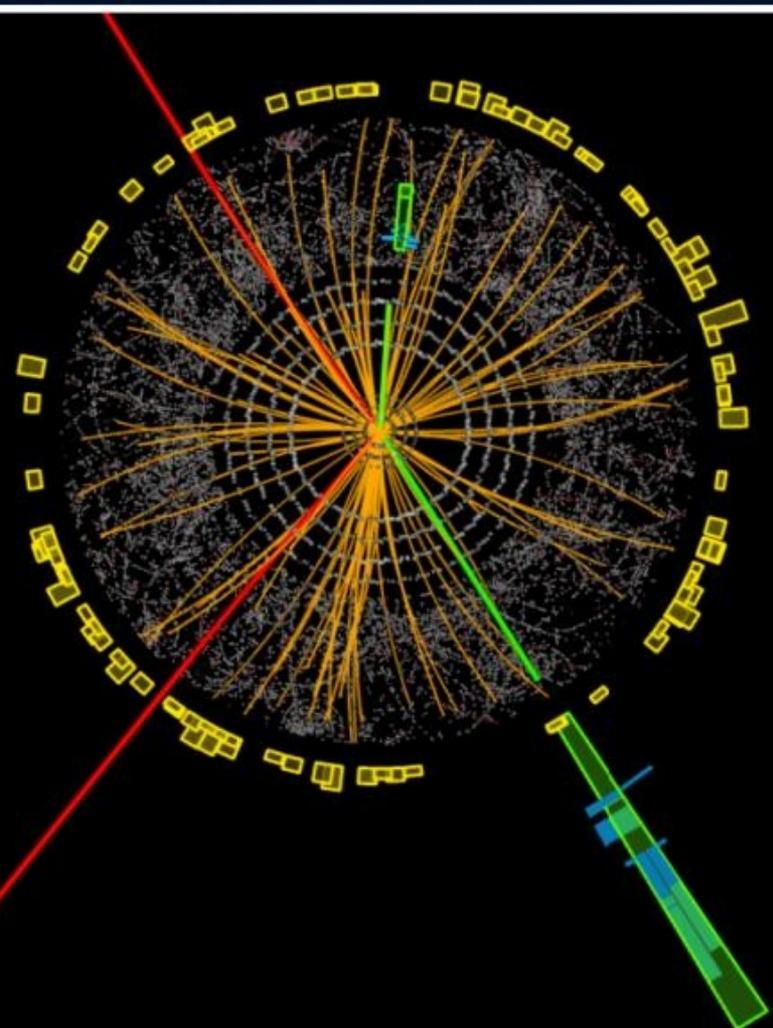


Désintégration en deux photons





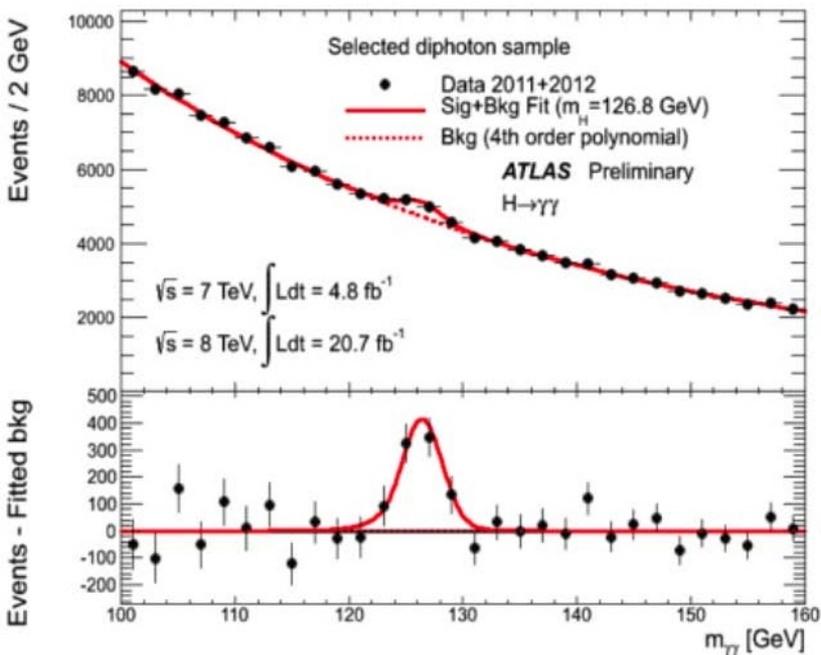
$$H^0 \rightarrow Z^0 + Z^0 \begin{cases} \rightarrow e^+ + e^- \\ \rightarrow \mu^+ + \mu^- \end{cases}$$



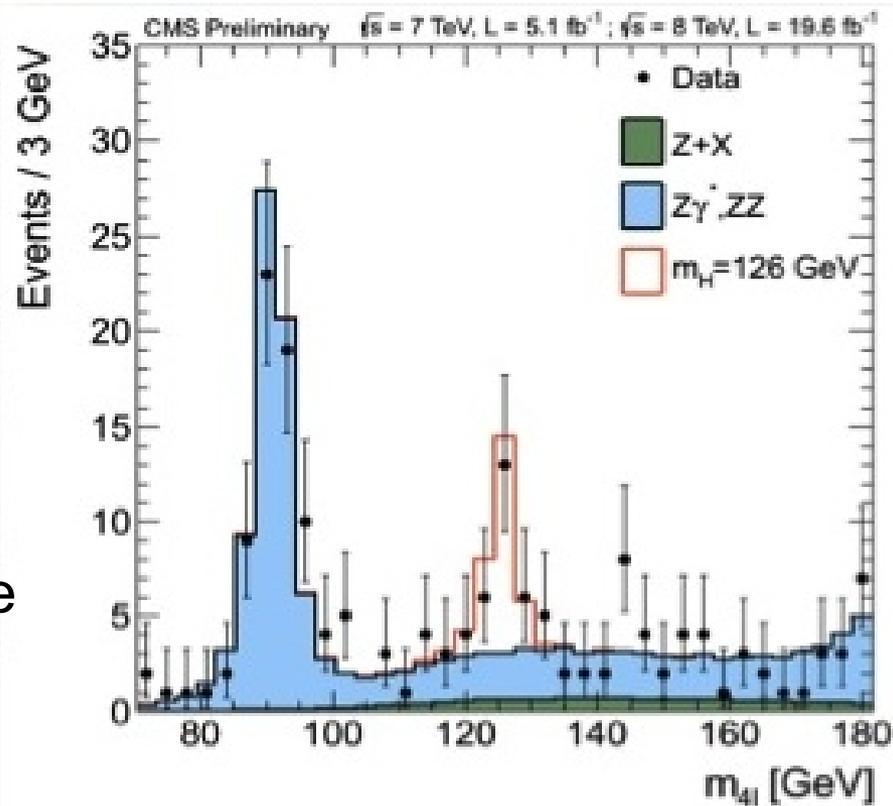
ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

Run: 205113
Event: 12611816
Date: 2012-06-18
Time: 11:07:47 CEST

Distributions des masses invariantes



Dans les deux cas, un pic est visible pour une masse de 125 GeV!
Il s'agit de la même particule, qui se désintègre en deux photons et quatre leptons, comme prévu par la théorie de l'Higgs



La physique fondamentale peut changer la vie

Unification électro-magnétique



$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Ondes électro-magnétiques

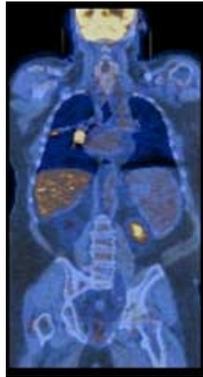
Mécanique quantique

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

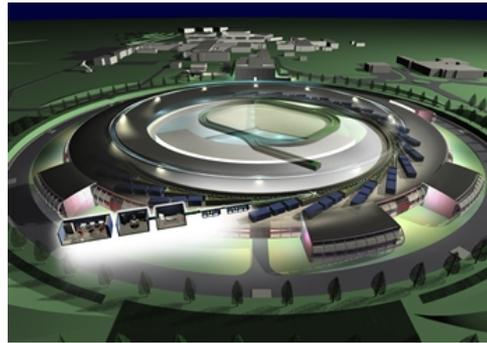


Transistors et électronique

Dans le court terme: des retombées technologiques



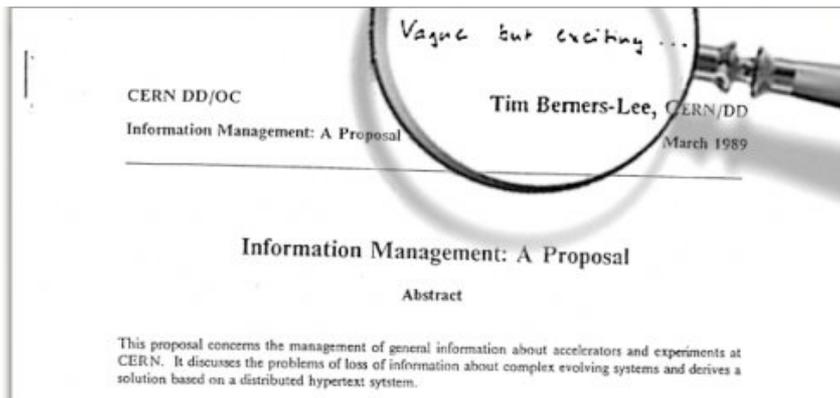
Medical Imaging



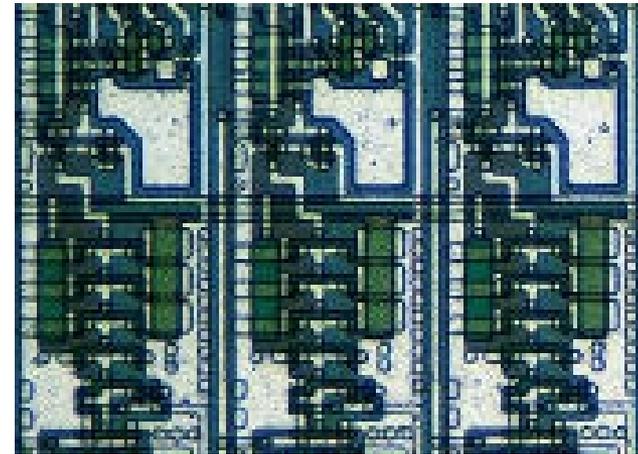
Research



Education



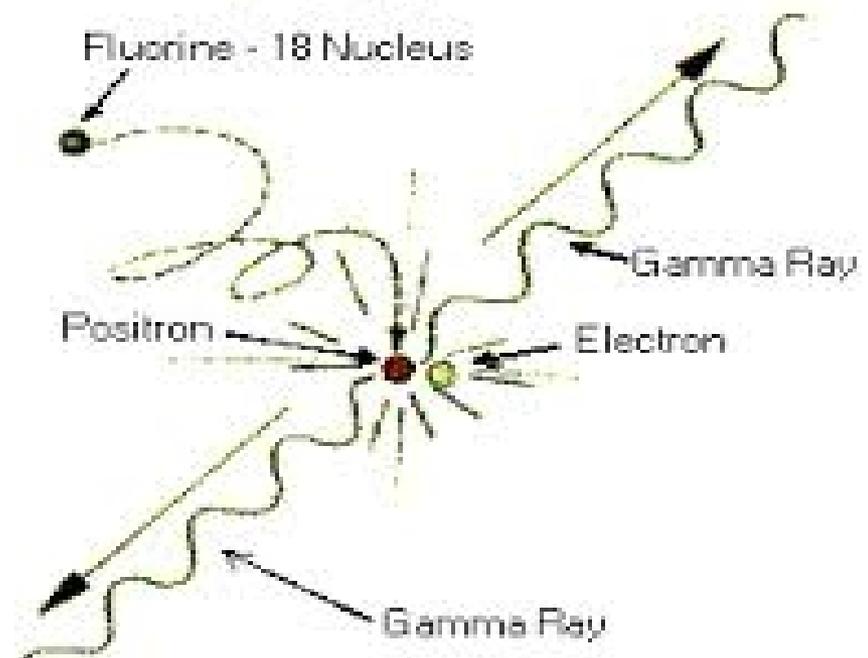
Computing



Technology

Applications médicales

Positron Emission Tomography



Proton radiation therapy



By adjusting the speed of the protons, a physician can control how deep they will penetrate into the body. The protons then release their energy at the tumor and cause less damage to the surrounding tissue.

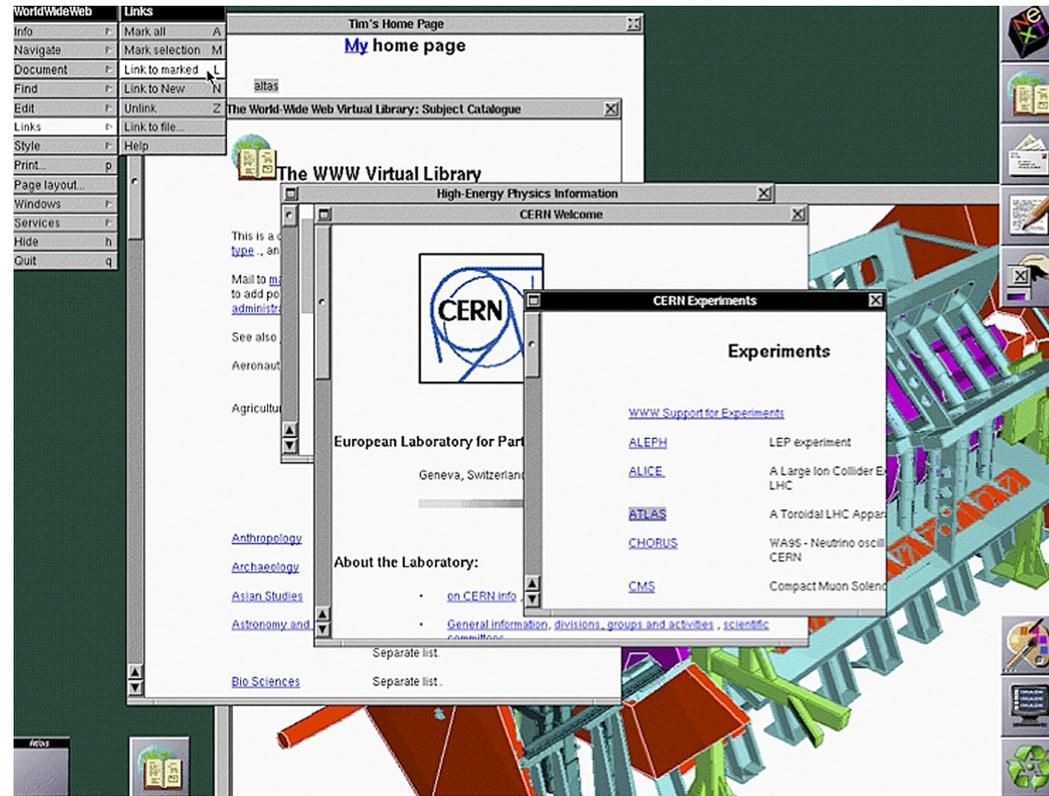
Conventional X-ray therapy



Because conventional radiation doesn't release its energy at a specified depth, as it travels through the body it can cause more damage to the tissue surrounding the tumor.

L'invention du web

- Internet existe depuis les années 50s
- Durant des décennies, pour obtenir de l'information il était nécessaire de connaître des mots de passe, et des commandes compliquées
- L'idée géniale: créer des pages publiques, les liens et des onglets pour passer d'une page à l'autre, et avoir accès aux documents (figures, etc.)



Tout ça pour permettre aux physiciens travaillant aux expériences du CERN depuis leur université de communiquer entre eux
www.info.cern.ch Premier site web du monde!

Conclusions

- Le CERN est le laboratoire mondial pour la physique des particules
- L' accélérateur LHC est unique au monde, et il va prendre des données encore pendant des années
- La découverte du boson de Higgs démontre que la masse est le résultat d'une interaction
- Beaucoup de questions fondamentales restent ouvertes
- La technologie d'avant-garde produit beaucoup de retombées
- Nous avons cherché le boson de Higgs pendant des décennies; entre temps, nous avons inventé le web, et puis nous avons aussi découvert le boson de Higgs!