



Une histoire particulière

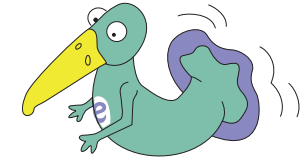
François Arleo

Laboratoire Subatech (Nantes)

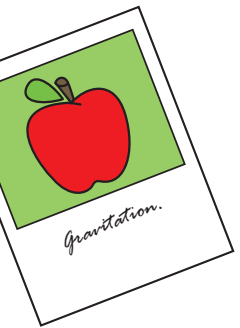
(illustrations par Roxane Nizon)

CERN Masterclass – 25 février 2024

La physique des particules



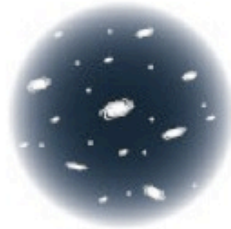
- Son but, comprendre
 - quelles sont les **particules élémentaires** constituant la matière ?
 - quelles sont les grandes familles de particules ?
 - quelles sont les lois qui les régissent, leurs **interactions** ?
- ... à travers un vaste programme expérimental et théorique !
- En France, une **vingtaine de laboratoires** et trois institutions
 - CNRS – Institut national de la physique nucléaire et de la physique des particules (IN2P3)
 - Universités
 - Commissariat à l'énergie atomique (CEA)



De la cosmologie aux particules



10^{26} meter:
Observable
universe



10^{-10} meter:
Atom



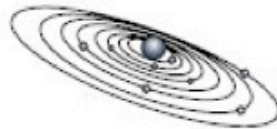
10^{21} meter:
Milky Way galaxy



10^{-15} meter:
Atomic nucleus



10^{13} meter:
Solar system



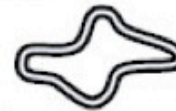
10^{-18} meter:
Smallest distance
probed by particle
accelerators



10^7 meter:
Earth



10^{-18} to 10^{-35} meter:
Typical size of
fundamental strings
and of extra dimensions



10^{-2} meter:
Insect



10^{-35} meter:
Minimum meaningful
length in nature





Les atomes

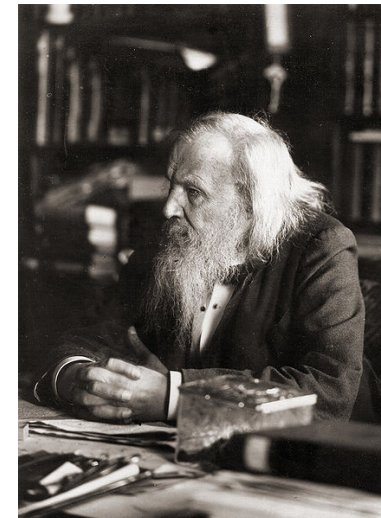
- Concept introduit par les Grecs dans l'Antiquité (Démocrite)
- Éléments chimiques qui composent les molécules et cristaux
- Plus d'une centaine d'éléments, classifiés dans le célèbre **tableau périodique** de Mendeleïev
- Recherche actuelle pour former de nouveaux éléments très lourds



TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Numéro atomique — Z — Masse molaire atomique (g.mol⁻¹)
Symbole atomique — X — Famille

Logo: CERIMES, INTERNET, science.gouv.fr, <http://www.science.gouv.fr>

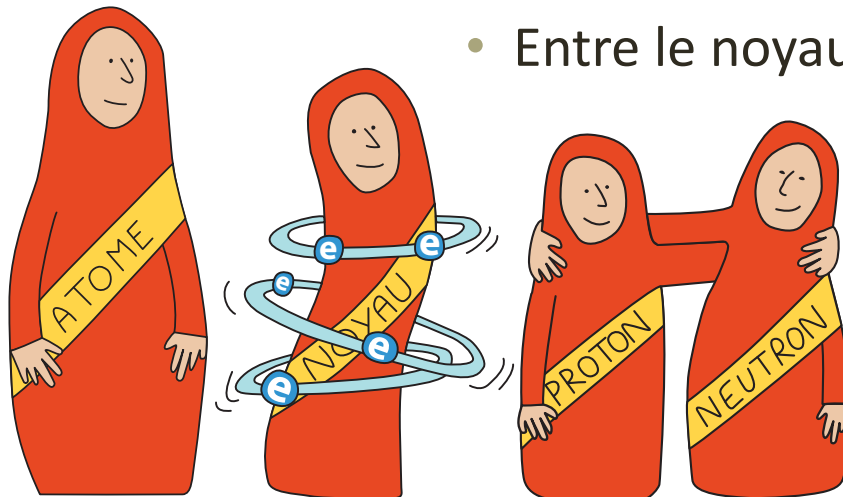




Au cœur de l'atome, les noyaux

Démocrite avait tort : les atomes sont eux-mêmes composés de particules subatomiques ! (expérience de Rutherford, 1909)

- Le **noyau atomique**
 - contient presque toute la masse de l'atome
 - cent mille fois plus petit que l'atome
 - composé de particules plus petites : les **protons** et les **neutrons**
- Les **électrons**
 - particules élémentaires, deux mille fois plus légères que le proton
 - circulent autour du noyau pour former un « nuage électronique »
- Entre le noyau et les électrons : le **vide**



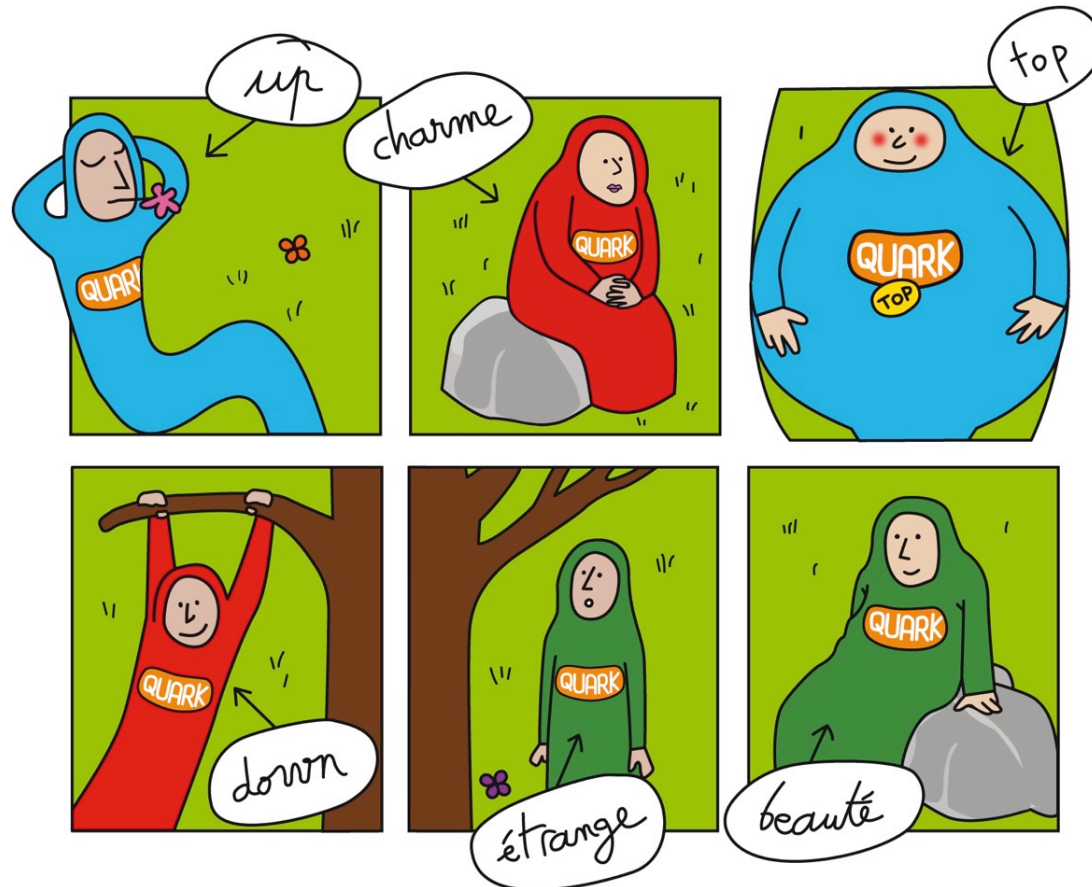
... ?



Dans le proton, les « quarks »

Les « **quarks** » sont les particules élémentaires qui composent les protons et les neutrons

- Existent en 6 modèles différents : les **savours**
 - Le up et le down, l'étrange et le charme, la beauté et le top





Dans le proton, les « quarks »

Les « **quarks** » sont les particules élémentaires qui composent les protons et les neutrons

- Existent en 6 modèles différents : les **saveurs**
 - Le up et le down, l'étrange et le charme, la beauté et le top
- Protons et neutrons composés de 3 quarks, « up » et « down »

proton

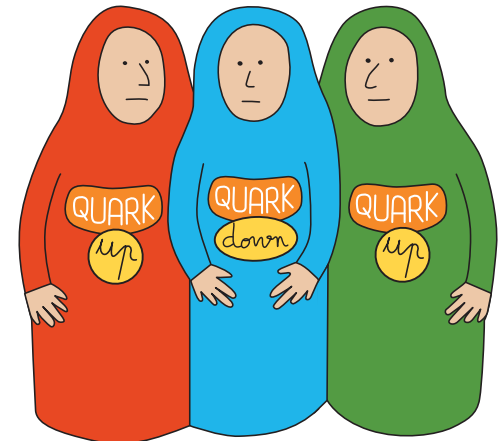


quarks u u d

neutron



quarks u d d



- Imaginés par le théoricien Gell-Mann en 1964
- Observés (indirectement) expérimentalement quelques années plus tard

A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS *

M. GELL-MANN

California Institute of Technology, Pasadena, California

Received 4 January 1964

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon b if we assign to the triplet t the following properties: spin $\frac{1}{2}$, $z = -\frac{1}{3}$, and baryon number $\frac{1}{3}$.

We then refer to the members $u^{\frac{2}{3}}$, $d^{-\frac{1}{3}}$, and $s^{-\frac{1}{3}}$ of the triplet as "quarks" q and the members of the anti-triplet as anti-quarks \bar{q} . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations (qqq) , $(qqq\bar{q})$, etc., while mesons are made out of $(q\bar{q})$, $(qq\bar{q}\bar{q})$, etc. It is assuming that the lowest baryon configuration (qqq) gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while the lowest meson configuration $(q\bar{q})$ similarly gives just **1** and **8**.

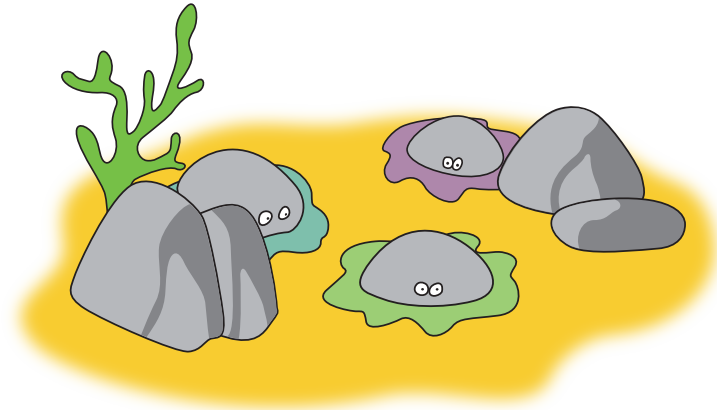
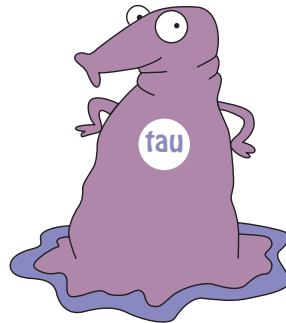
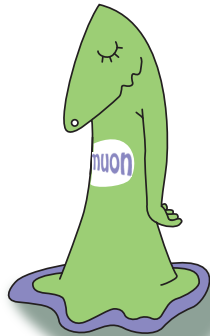
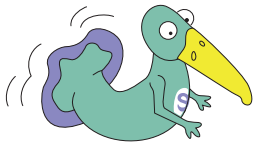




Un peu de légèreté : les leptons !

Une autre famille de particules élémentaires compose la matière : les **leptons** !

- l'électron et deux grands frères : le muon et le tau
- 3 types de neutrinos, particules timides et très légères



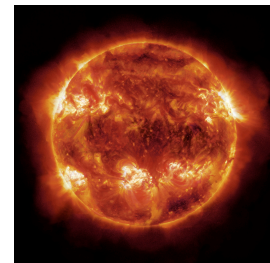
Les particules élémentaires qui composent la matière appartiennent à deux grandes familles : **quarks** et **leptons**



Des particules en interaction

Quarks et leptons interagissent selon quatre types d'interaction :

- La **gravitation**, responsable de la chute d'une pomme sur la tête d'Isaac Newton
- L'**interaction électromagnétique**, qui agit sur les particules chargées. Elle régit les phénomènes électriques (foudre) et magnétiques (boussoles)
- L'**interaction faible**, responsable de certains processus radioactifs
- L'**interaction forte** soude les quarks à l'intérieur des protons et des neutrons, mais n'agit pas sur les leptons !

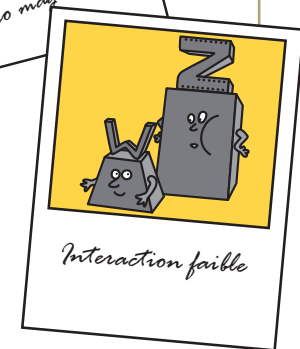
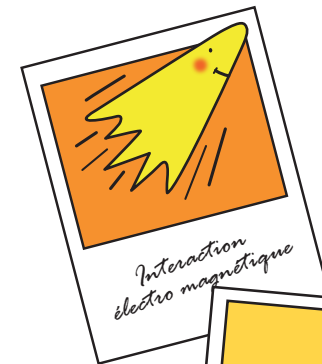
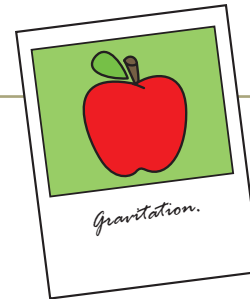


Sous les interactions, les bosons



À chaque interaction fondamentale correspond un (ou plusieurs)
« **boson** »

- La gravitation : **le graviton**
 - particule hypothétique
- L'interaction électromagnétique : **le photon**
 - « grain » de lumière, sans masse
- L'interaction faible : **les bosons W^+ , W^- et Z^0**
 - découverts au CERN, prix Nobel 1984
- L'interaction forte : **8 gluons**
 - mis en évidence en 1979



Plan du zoo

« Le Modèle Standard »

Glashow, Salam, Weinberg
Prix Nobel 1979

Testé avec succès dans de nombreuses expériences !

... mais quelques « problèmes » :

- Matière noire de l'Univers ?
- La gravité fait bande à part
- ~~Un absent : le boson de Higgs~~



Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e lightest neutrino*	(0.000-0.001) $\times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
ν_μ middle neutrino*	(0.009-0.13) $\times 10^{-9}$	0	d down	0.005	-1/3
ν_τ heaviest neutrino*	(0.04-0.14) $\times 10^{-9}$	0	s strange	0.1	-1/3
e^- electron	0.000511	-1	t top	173	2/3
μ^- muon	0.106	-1	b bottom	4.2	-1/3
τ^- tau	1.777	-1			

*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$) where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$ kg.

Neutrinos

Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e , ν_μ , or ν_τ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite mass neutrinos ν_L , ν_M , and ν_H for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$ but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Blue-green shaded areas represent the cloud of gluons.

$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β (beta) decay.

$e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$

An electron and positron (antielepton) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and \bar{B}^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.39	-1			
W^+	80.39	+1			
Z^0	91.188	0			

Color Charge

Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated – they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs. The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge.

Two types of hadrons have been observed in nature **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq . Among the many types of baryons observed are the proton (uud), antiproton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), neutron (udd), lambda Λ (uds), and omega Ω^- (sss). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge 1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion π^+ (u \bar{d}), kaon K^0 (s \bar{u}), B^0 (d \bar{s}), and η_c (c \bar{c}). Their charges are +1, -1, 0, 0 respectively.

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at

ParticleAdventure.org

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory

©2008 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. For more information see

CPEPweb.org

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\begin{cases} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, mini-black holes, and/or evidence of string theory.

Universe Accelerating?

The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

Dark Matter?

Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

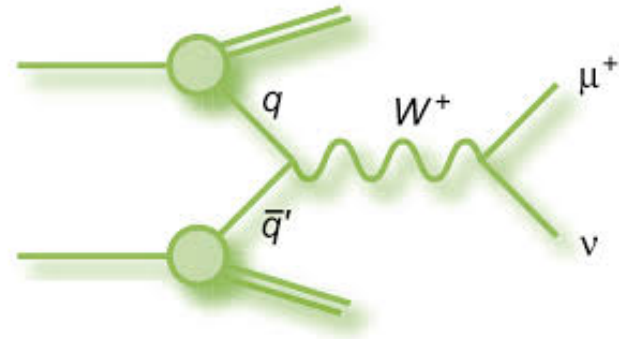
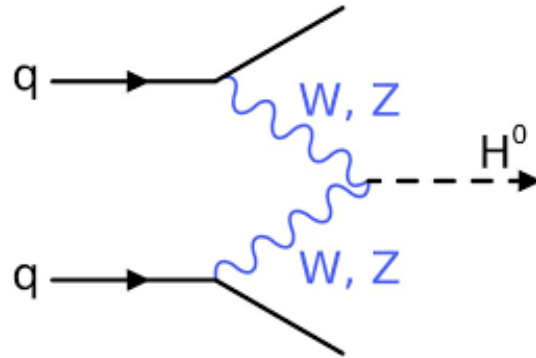
Origin of Mass?

In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting more than one type of Higgs?



Succès du Modèle Standard

- Le modèle standard permet de prédire **avec une grande précision** l'abondance des particules produites dans les collisions du LHC
- Les physiciens théoriciens dessinent des « diagrammes de Feynman » leur permettant de calculer les différents processus physiques

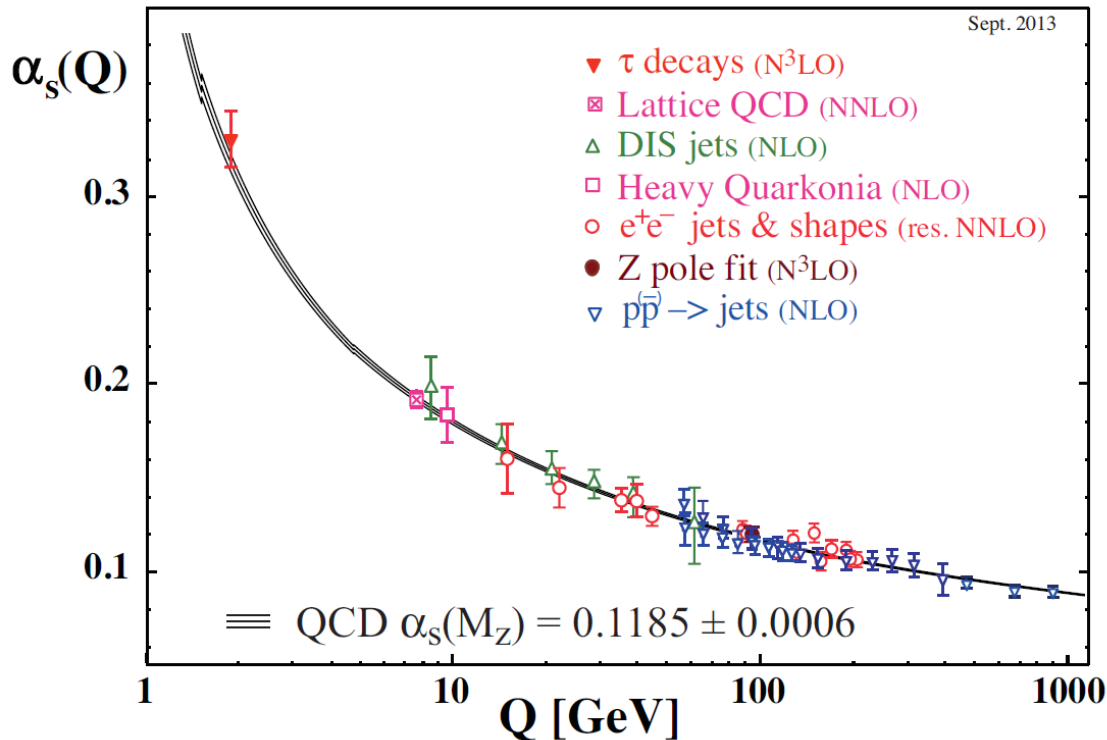


- Un exemple célèbre : l'intensité de l'interaction forte entre deux quarks !



La liberté asymptotique !

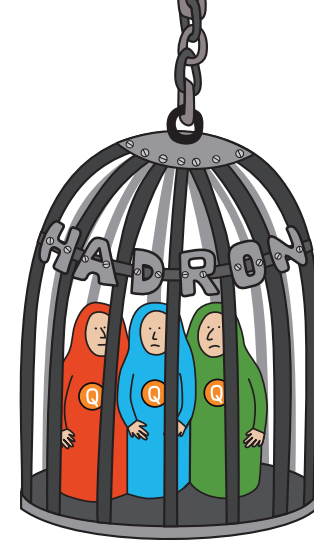
- La théorie prédit que l'intensité de l'interaction forte entre deux quarks diminue quand les quarks se rapprochent. C'est la **liberté asymptotique** !
- Cette prédiction est vérifiée précisément dans les expériences
- **Prix Nobel 2004** pour Gross, Politzer et Wilczek



Le mystère du confinement



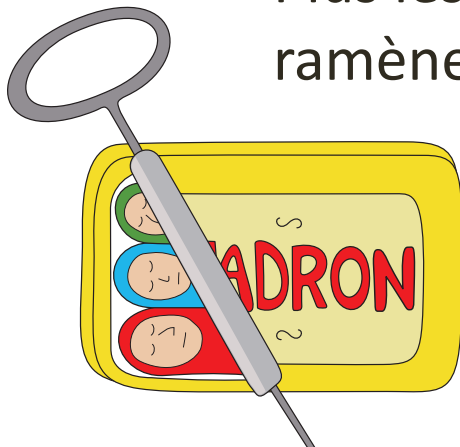
Jamais un quark n'a été observé de manière isolée



Les quarks s'associent systématiquement

- par **trois** (quark-quark-quark) pour former des « baryons »
 - proton, neutron, ...
- par **deux** (quark et « antiquark ») pour former des « mésons »
 - pion, kaon, ...

Plus les quarks sont séparés, plus la force qui les ramène ensemble est importante, comme un ressort



Le confinement !

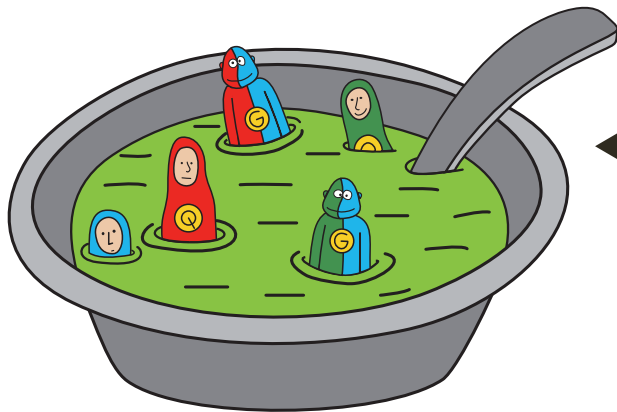
Vive le quark libre !



Un millionième de seconde après le Big Bang, la température avoisinait les deux mille milliards de degrés

Pas de confinement à ces températures !

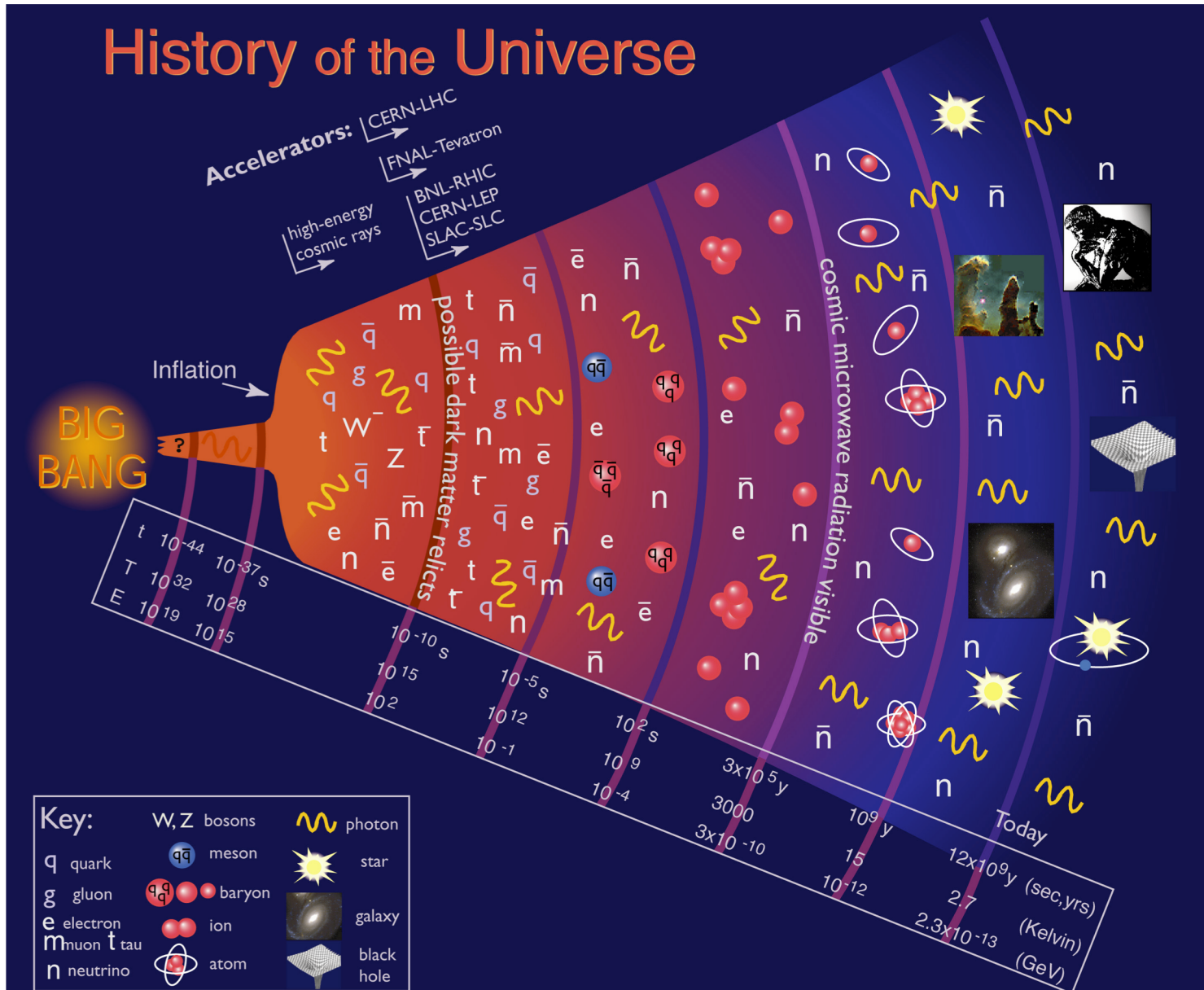
L'Univers était composé d'une « soupe » de quarks et gluons libres



← *Plasma quarks-gluons*

(attention : chaud)

Le plasma quarks-gluons dans l'Univers





« Chauffe, Marcel »

But : chauffer la matière pour recréer un plasma quarks-gluons

Problème : comment atteindre des températures aussi extrêmes ?

Recette de Grand-mère

Aujourd'hui, le plasma quarks-gluons

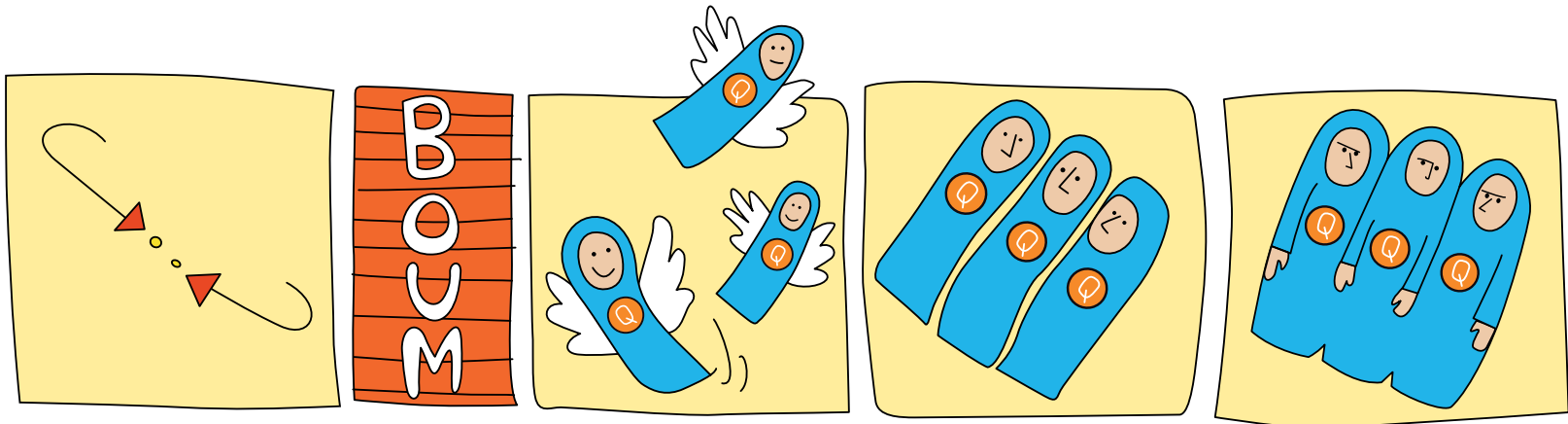
1. Choisir des atomes lourds, comme l'or ou le plomb
2. Une fois épluchés , accélérer leur noyaux à des vitesses proches de celle de la vitesse de la lumière (300 000 km par seconde)
3. Les faire entrer en collision
4. C'est prêt ! À déguster très rapidement.

Scénario du « Little Bang »

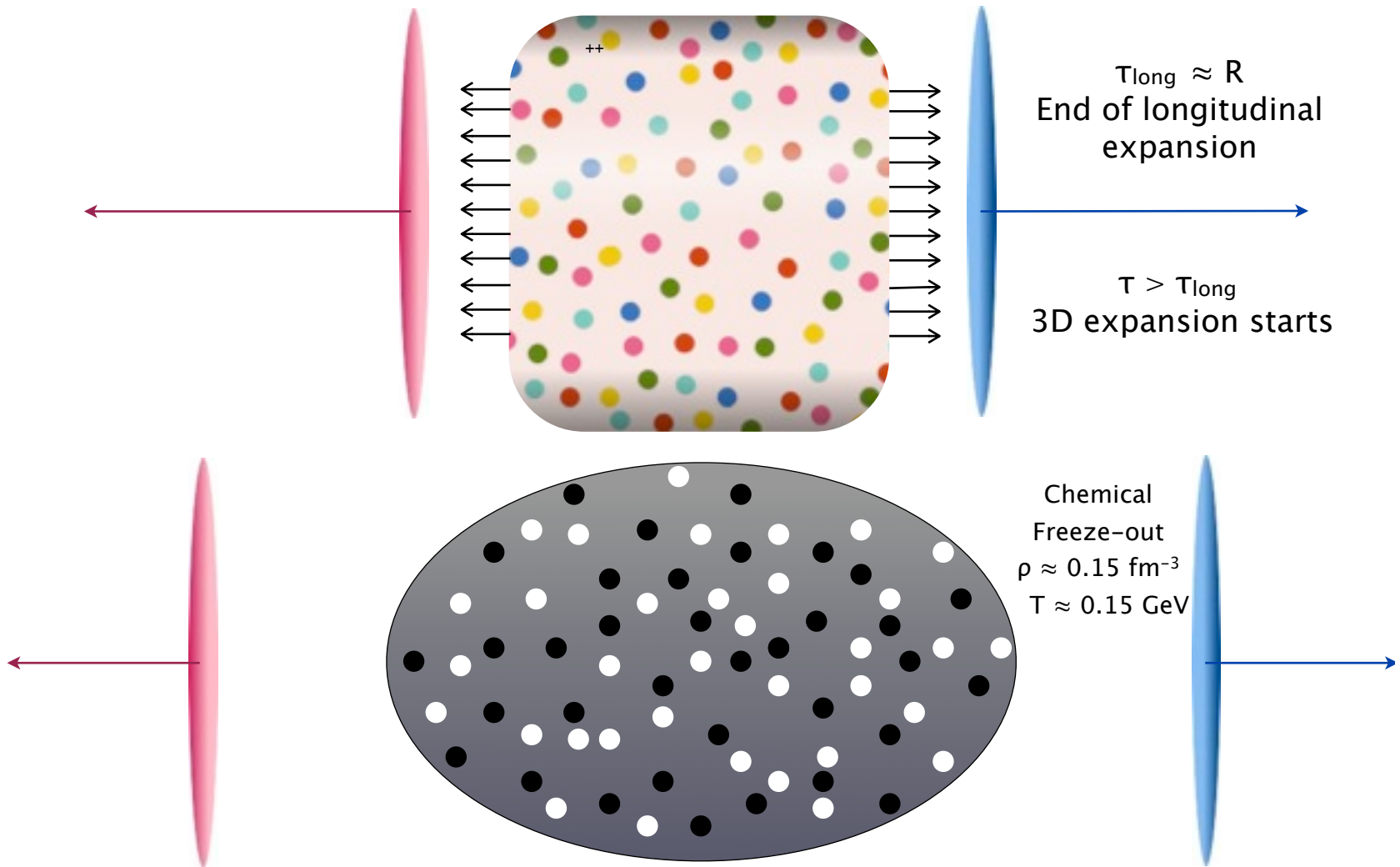


Les **collisions plomb – plomb** se déroulent selon plusieurs phases :

1. La collision des noyaux de plomb produit un grand nombre de gluons puis de quarks
2. Quarks et gluons interagissent pour former le plasma
3. Le plasma s'étend, puis **se refroidit**
4. En-deçà de la température critique de deux mille milliards de degrés, **le confinement revient au galop !**
5. Les quarks s'associent pour former de nombreux « hadrons » (pions, protons) observés expérimentalement



Mini-Bang





L'éphémère destin du plasma

Le temps de vie du plasma quarks-gluons formé dans les collisions plomb – plomb est **très** court :

$t = 0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,1$ seconde

Dès lors, comment **mettre en évidence sa formation** ?

La soupe est **trop fugace** pour être observée directement , mais certaines propriétés du plasma peuvent survivre bien après sa disparition.



Les **signatures**, preuves « fossiles » de la formation du plasma quarks-gluons



Le LHC – Grand collisionneur de hadrons

Grand dispositif expérimental dont le but est d'accélérer des particules puis de les faire entrer en collision

Caractéristiques

Taille : 27 kilomètres de circonférence

Première mise en route : septembre 2008

Lieu : frontière franco-suisse , près de Genève

Particularité : enfoui à une profondeur de 100 mètres



Deux types de collisions

- proton – proton
 - Recherche de nouvelles particules (p. ex. boson de Higgs) et phénomènes non prévus par le « Modèle Standard »
- plomb – plomb
 - Formation et étude du plasma quarks-gluons





LHC

ALICE

SPS

CERN Meyrin

Petite chronologie du LHC

« Rien n'est jamais construit selon le planning ou le budget »

– Loi de Khéops



- **Décembre 1994** : le projet de construire le LHC est officiellement approuvé, démarrage initialement prévu en 1999
- 10 septembre 2008 : les protons sont injectés pour la première fois dans le tunnel du LHC
- 19 septembre 2008 : incident majeur dû à une connexion électrique défectueuse
- 2009 : réparation et planning pour les années à venir
- Novembre 2009 : redémarrage
- **30 mars 2010** : premières collisions proton – proton à des énergies jamais atteintes dans les expériences
- 4 novembre 2010 : premières collisions plomb – plomb

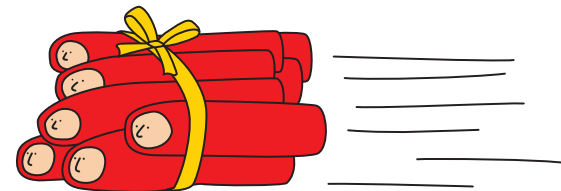
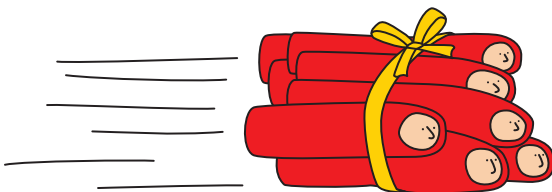




30 mars 2010

Et pourtant ils tournent !

- Les particules voyagent successivement dans plusieurs accélérateurs avant l'injection dans le tunnel du LHC
- A chaque passage dans des cavités, les particules sont accélérées sous l'effet du champ **électrique**
- Le champ **magnétique** puissant (généré par 1200 aimants de vingt-cinq tonnes l'unité) dévie les particules qui décrivent de belles trajectoires circulaires
- Les particules sont regroupées par 3000 paquets régulièrement espacés, chacun contenant... 100 milliards de particules





Des collisions et des détecteurs

- Les **paquets de protons et noyaux de plomb se croisent** à quatre endroits répartis le long du tunnel du LHC
 - En moyenne 20 collisions proton – proton ou plomb – plomb lorsque deux paquets se croisent
 - Environ 30 millions de croisements de paquets par seconde
- D'immenses **détecteurs de particules** ont pour but d'observer toutes les particules produites lors de ces collisions
 - **ALICE**, ATLAS, CMS, LHCb
 - Plusieurs milliers de physiciens sur chacune des expériences

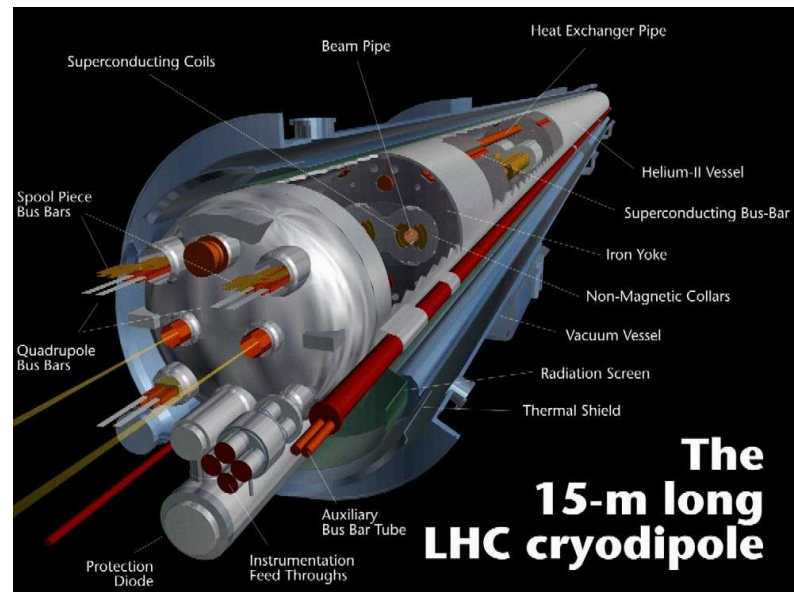


Le proton qui venait du froid

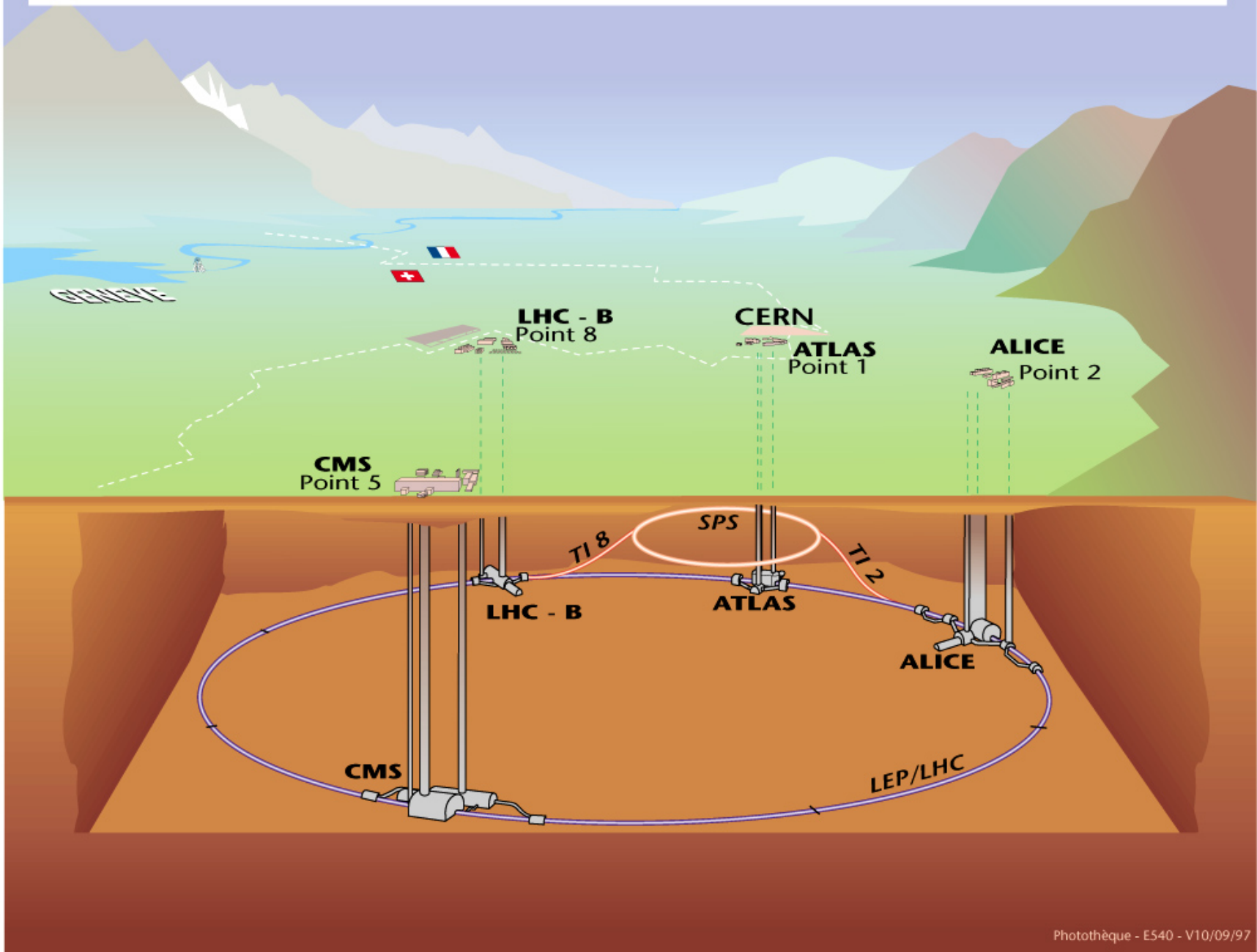


La technologie du froid (cryogénie) est capitale au LHC

- Réalisation d'un « vide » afin d'éviter les collisions des particules accélérées avec les molécules d'air résiduelles
 - Le vide du LHC est équivalent à celui régnant à la surface de la Lune
- Refroidir les aimants afin qu'ils deviennent « supraconducteurs »
 - Température de -271 degrés !



Vue d'ensemble des expériences LHC.



Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters



Width: 44m
Diameter: 22m
Weight: 7000t

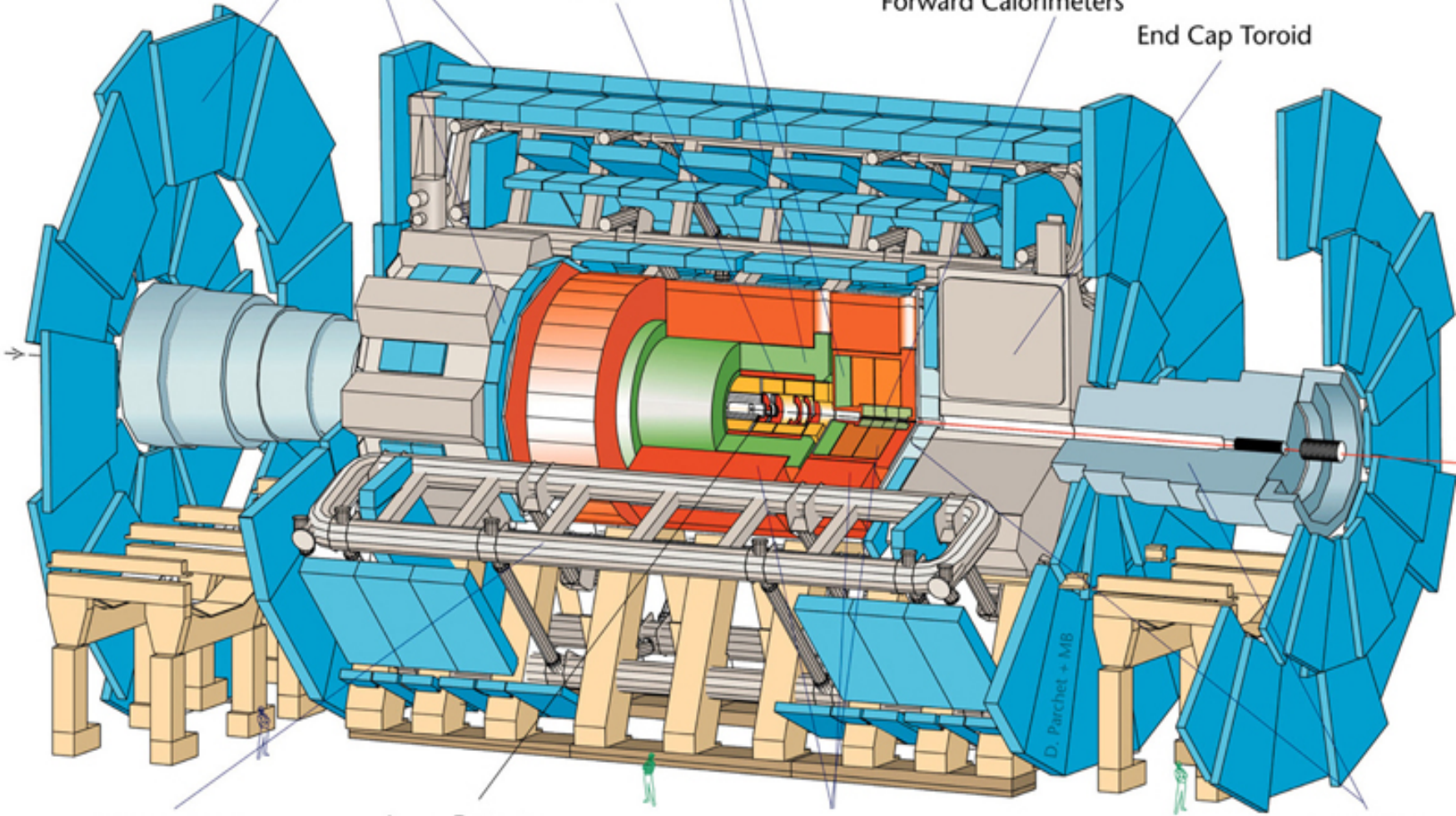
CERN AC - ATLAS V1997



Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid



Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding

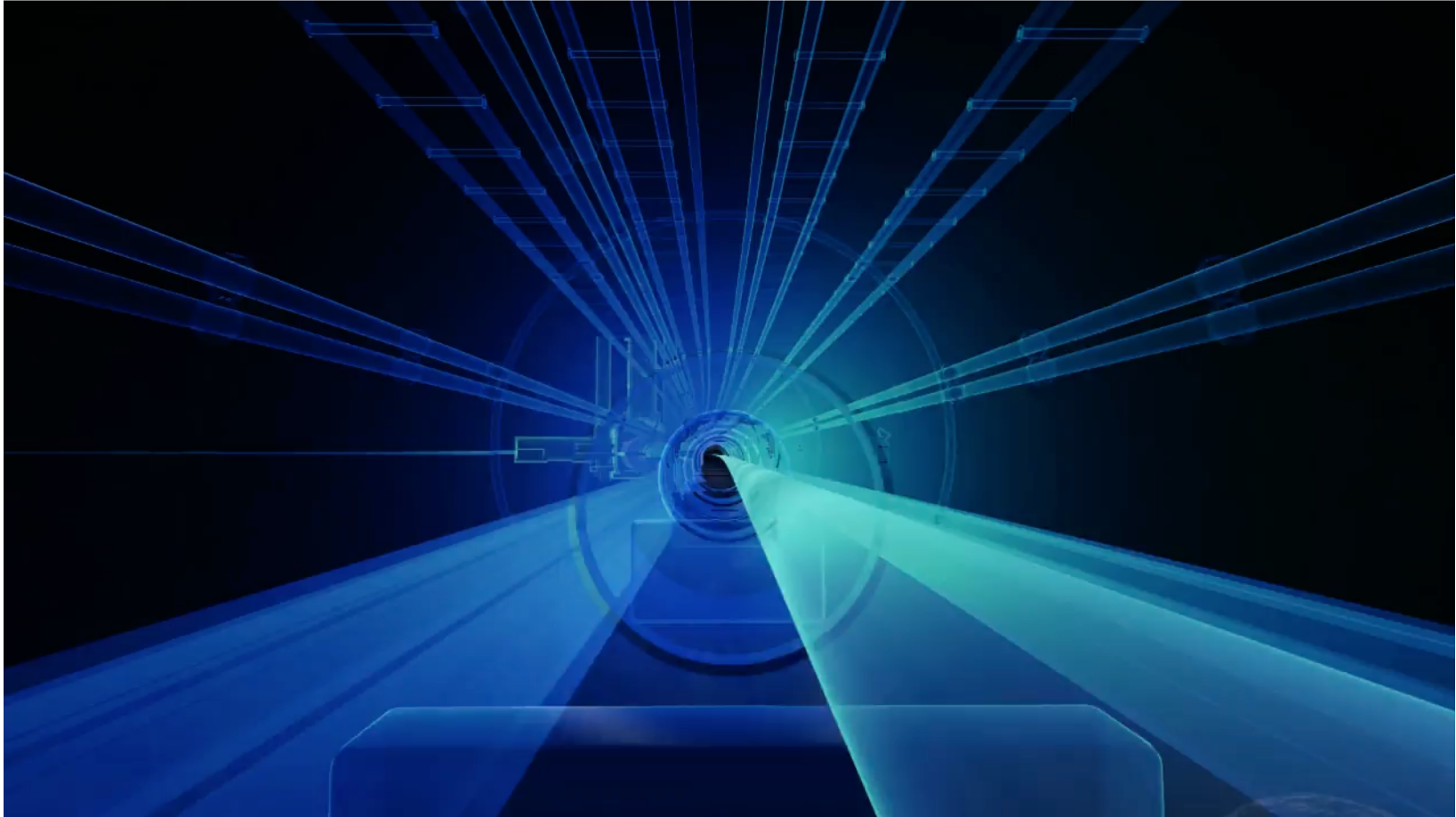
ATLAS



ALICE



CMS



Collision d'ions lourds au LHC

Des collisions aux analyses

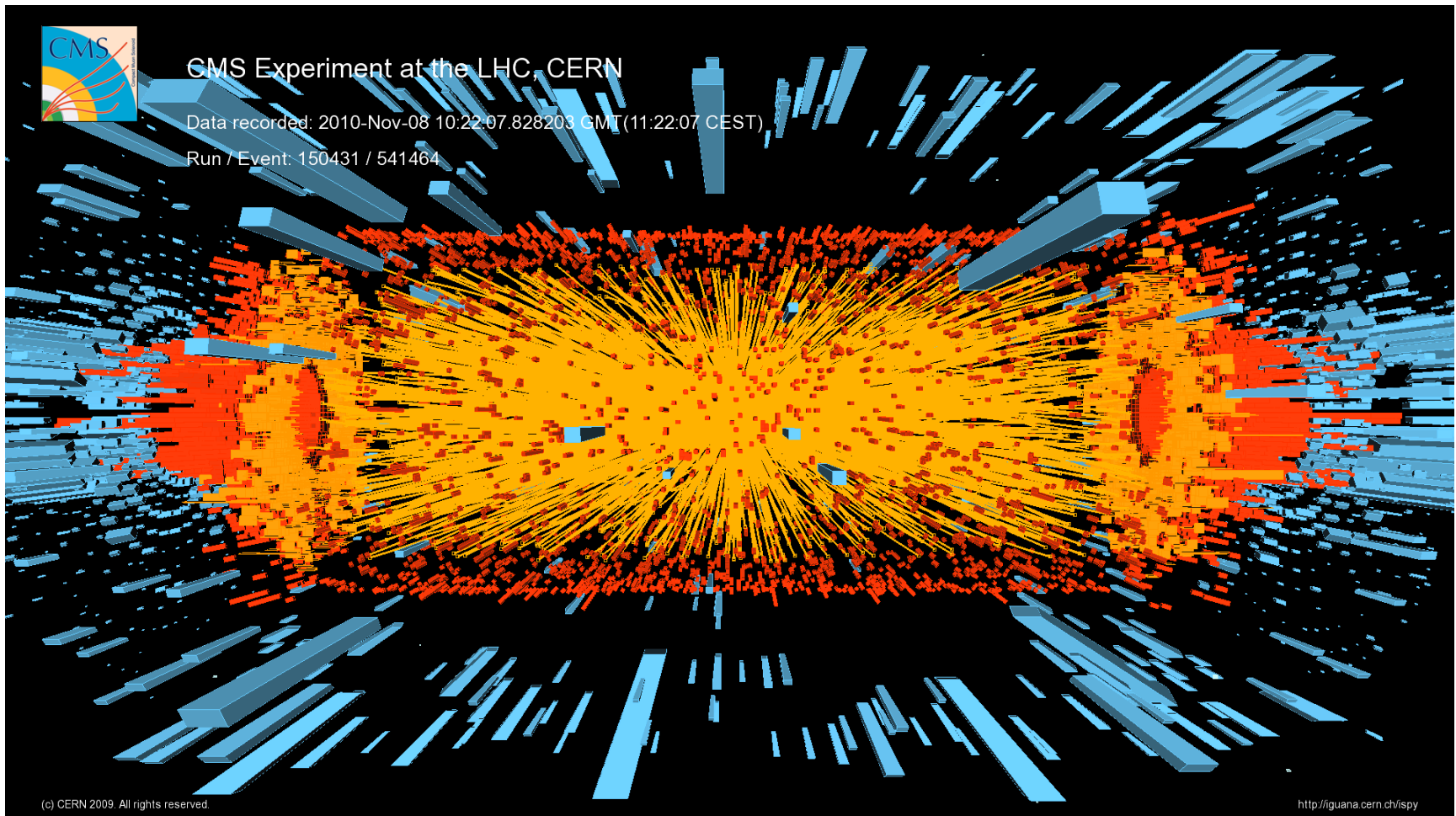
Sitôt les premières collisions enregistrées, les physiciens analysent les mesures recueillies par les détecteurs



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2010-Nov-08 10:22:07.828203 GMT (11:22:07 CEST)

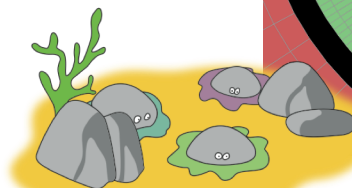
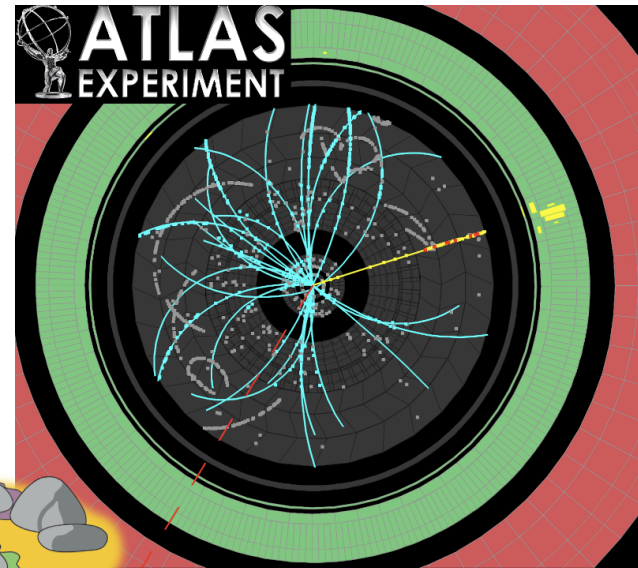
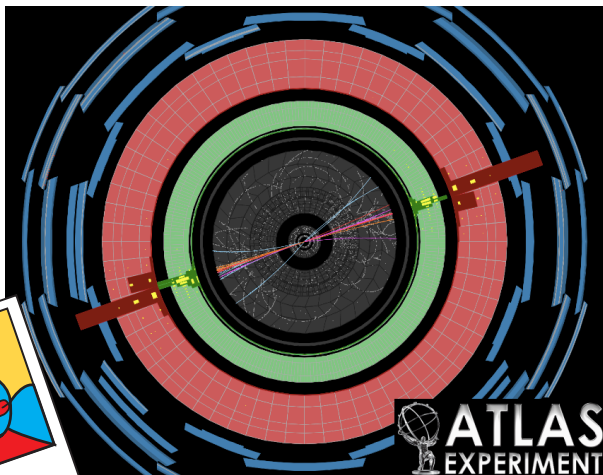
Run / Event: 150431 / 541464



Comment identifier les particules ?



1. Particules ayant un long temps de vie
 - arrêtées dans un calorimètre
 - certains hadrons (p. ex. pions, protons) – cal. hadronique
 - électrons et photons – cal. électromagnétique
 - traversent les différentes couches du détecteur
 - en laissant une trace (muons)...
 - ... ou pas ! (neutrinos)





Comment identifier les particules ?

2. Particules ayant un **court temps de vie**

- identifiées par leurs produits de désintégration

$$A \rightarrow 1 + 2 + \dots + n$$

- masse de la particule A obtenue par

$$m_A^2 c^4 = (E_1 + E_2 + \dots + E_n)^2 - c^2(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n)^2$$

$$\vec{p}_i = \vec{v}_i / c^2 \times E_i \quad ; \quad p_i^2 = (E_i^2 - m_i^2 c^4) / c^2$$

- nombreuses particules (**résonances**) découvertes

- J/psi, Z⁰,... et boson de Higgs ?!
- nombreux canaux de détection

$$J/\psi \rightarrow e^+ e^-, \mu^+ \mu^- \quad Z^0 \rightarrow e^+ e^-, \mu^+ \mu^-, q\bar{q}, \dots$$

$$H^0 \rightarrow W^+ W^-, Z^0 Z^0, t\bar{t}, b\bar{b}, \gamma\gamma, \dots$$

Décroissance de particules



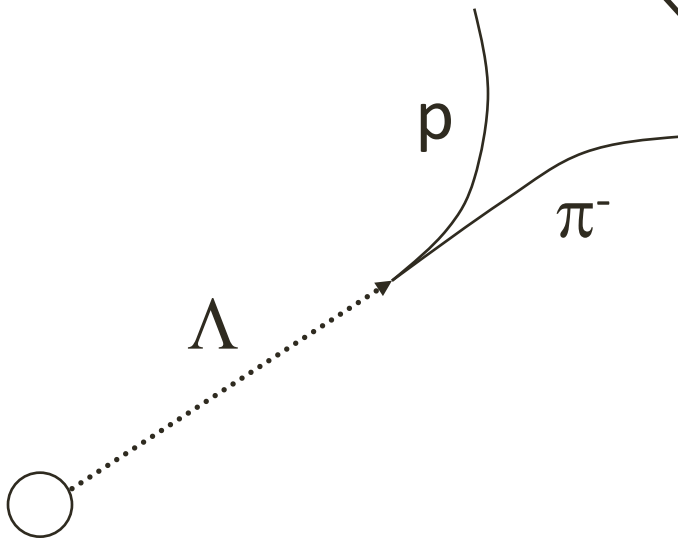
- Hadrons étranges

- $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ (494 MeV/c², 2.7cm, 68.6%),
- $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ (1.12 GeV/c², 7.9cm, 63.9%),
- $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$ (1.32 GeV/c², 4.9cm, 99.9%),
- $\Omega^- \rightarrow \Lambda K^-$ (1.67 GeV/c², 2.5cm, 67.8%),

Rapport de
branchement

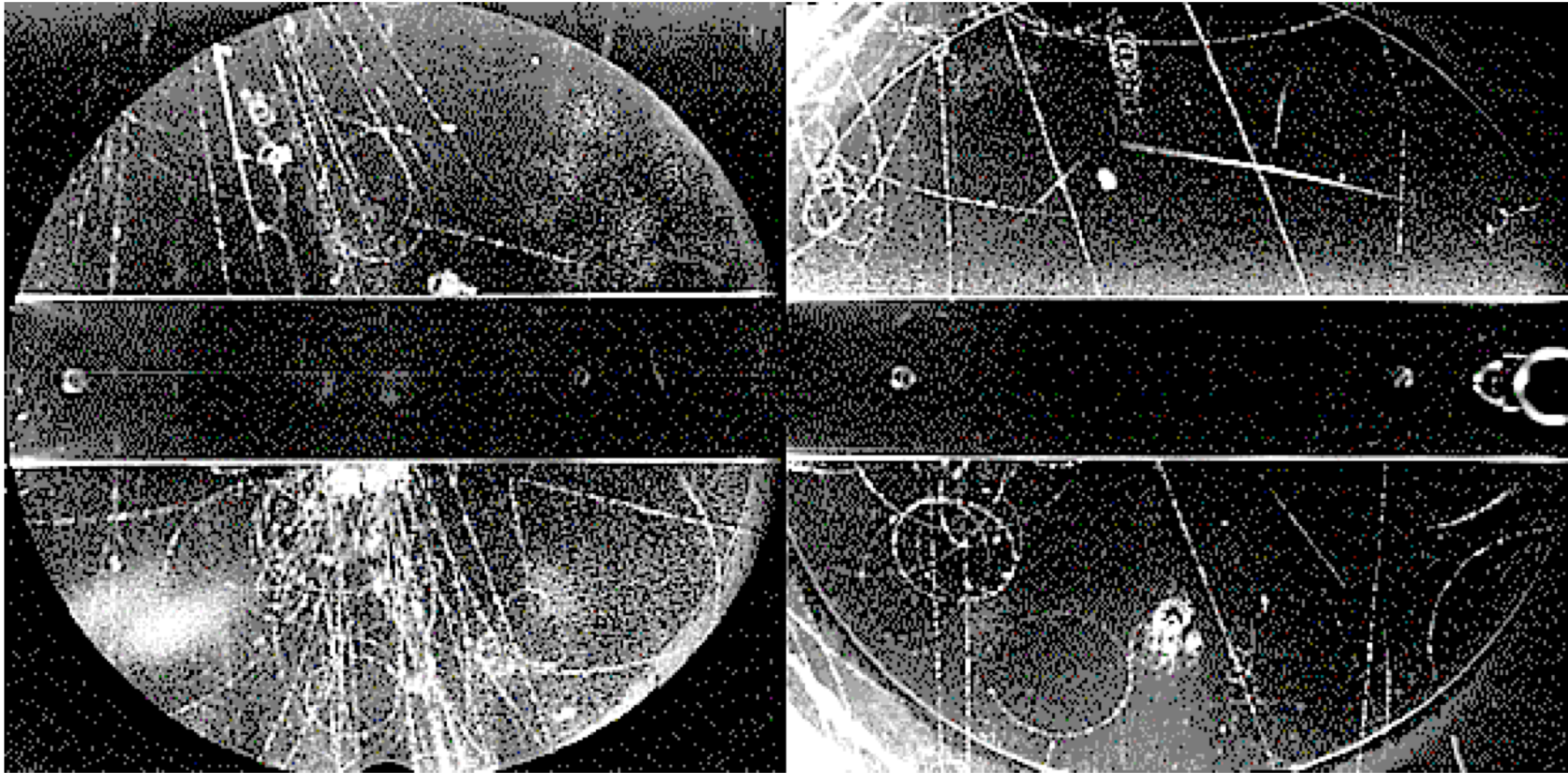
ct

Masse



Vertex primaire
et secondaire

Découverte du K^0



Rochester and Butler, Nature 160, 855 (1947)

Mésos étranges aujourd'hui (S=1)



STRANGE MESONS (S = ±1, C = B = 0)

$K^+ = u\bar{s}$, $K^0 = d\bar{s}$, $\bar{K}^0 = \bar{d}s$, $K^- = \bar{u}s$, similarly for K^* 's

K^*	1/2(0 ⁻)	K_2^* (1430)	1/2(2 ⁺)	• K_0^* (1950)	1/2(0 ⁺)
K^0	1/2(0 ⁻)	• K (1460)	1/2(0 ⁻)	• K_2^* (1980)	1/2(2 ⁺)
K_S^0	1/2(0 ⁻)	• K_2 (1580)	1/2(2 ⁻)	K_4^* (2045)	1/2(4 ⁺)
K_L^0	1/2(0 ⁻)	• K (1630)	1/2(? [?])	• K_2 (2250)	1/2(2 ⁻)
• K_0^* (800) or κ	1/2(0 ⁺)	• K_1 (1650)	1/2(1 ⁺)	• K_3 (2320)	1/2(3 ⁺)
$K^*(892)$	1/2(1 ⁻)	K^* (1680)	1/2(1 ⁻)	• K_5^* (2380)	1/2(5 ⁻)
$K_1^*(1270)$	1/2(1 ⁺)	K_2 (1770)	1/2(2 ⁻)	• K_4 (2500)	1/2(4 ⁻)
$K_1^*(1400)$	1/2(1 ⁺)	K_3^* (1780)	1/2(3 ⁻)	• K (3100)	? [?] (? ^{??})
$K^*(1410)$	1/2(1 ⁻)	K_2 (1820)	1/2(2 ⁻)		
K_0^* (1430)	1/2(0 ⁺)	• K (1830)	1/2(0 ⁻)		
				• — OMITTED FROM SUMMARY TABLE	

Découverte du J/psi (1974)

VOLUME 33, NUMBER 23

PHYSICAL REVIEW LETTERS

2 DECEMBER 1974

Experimental Observation of a Heavy Particle J^\dagger

J. J. Aubert, U. Becker, P. J. Biggs, J. Burger, M. Chen, G. Everhart, P. Goldhagen, J. Leong, T. McCorrison, T. G. Rhoades, M. Rohde, Samuel C. C. Ting, and Sau Lan Wu
Laboratory for Nuclear Science and Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139

and

Y. Y. Lee
Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973
(Received 12 November 1974)

We report the observation of a heavy particle J , with mass $m = 3.1$ GeV and width approximately zero. The observation was made from the reaction $p + \text{Be} \rightarrow e^+ + e^- + x$ by measuring the e^+e^- mass spectrum with a precise pair spectrometer at the Brookhaven National Laboratory's 30-GeV alternating-gradient synchrotron.

Discovery of a Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation*

J.-E. Augustin,† A. M. Boyarski, M. Breidenbach, F. Bulos, J. T. Dakin, G. J. Feldman, G. E. Fischer, D. Fryberger, G. Hanson, B. Jean-Marie,† R. R. Larsen, V. Lüth, H. L. Lynch, D. Lyon, C. C. Morehouse, J. M. Paterson, M. L. Perl, B. Richter, P. Rapidis, R. F. Schwitters, W. M. Tanenbaum, and F. Vannucci‡

Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305

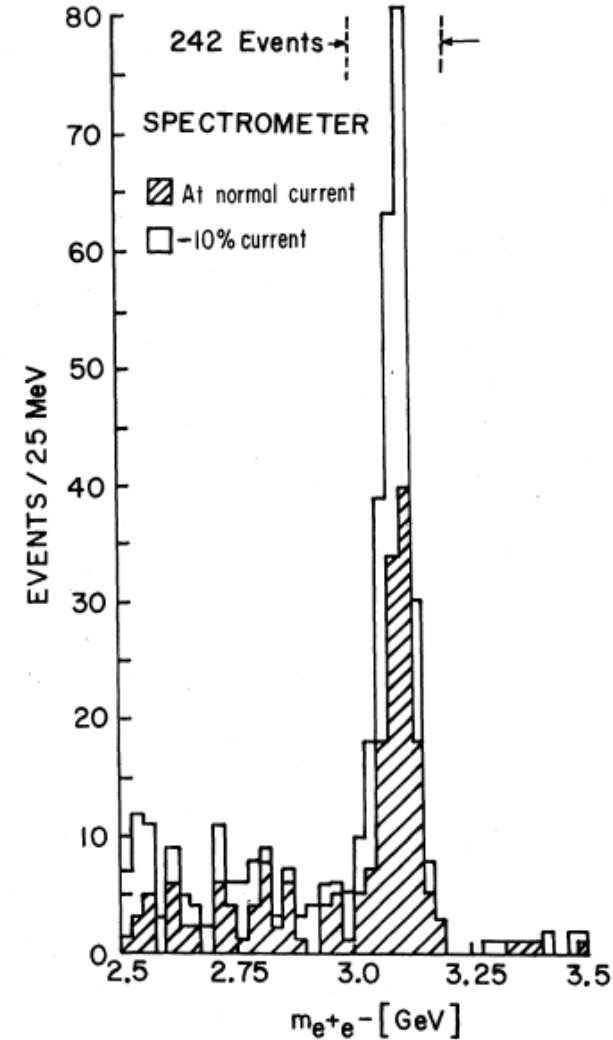
and

G. S. Abrams, D. Briggs, W. Chinowsky, C. E. Friedberg, G. Goldhaber, R. J. Hollebeek, J. A. Kadyk, B. Lulu, F. Pierre,§ G. H. Trilling, J. S. Whitaker, J. Wiss, and J. E. Zipse

Lawrence Berkeley Laboratory and Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720

(Received 13 November 1974)

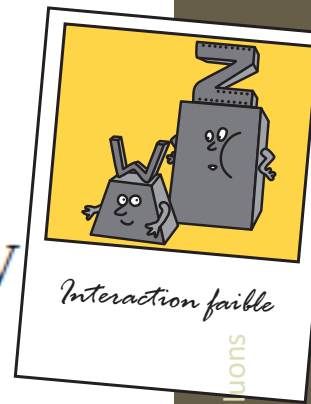
We have observed a very sharp peak in the cross section for $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$, e^+e^- , and possibly $\mu^+\mu^-$ at a center-of-mass energy of 3.105 ± 0.003 GeV. The upper limit to the full width at half-maximum is 1.3 MeV.



Mesure des Z au LHC

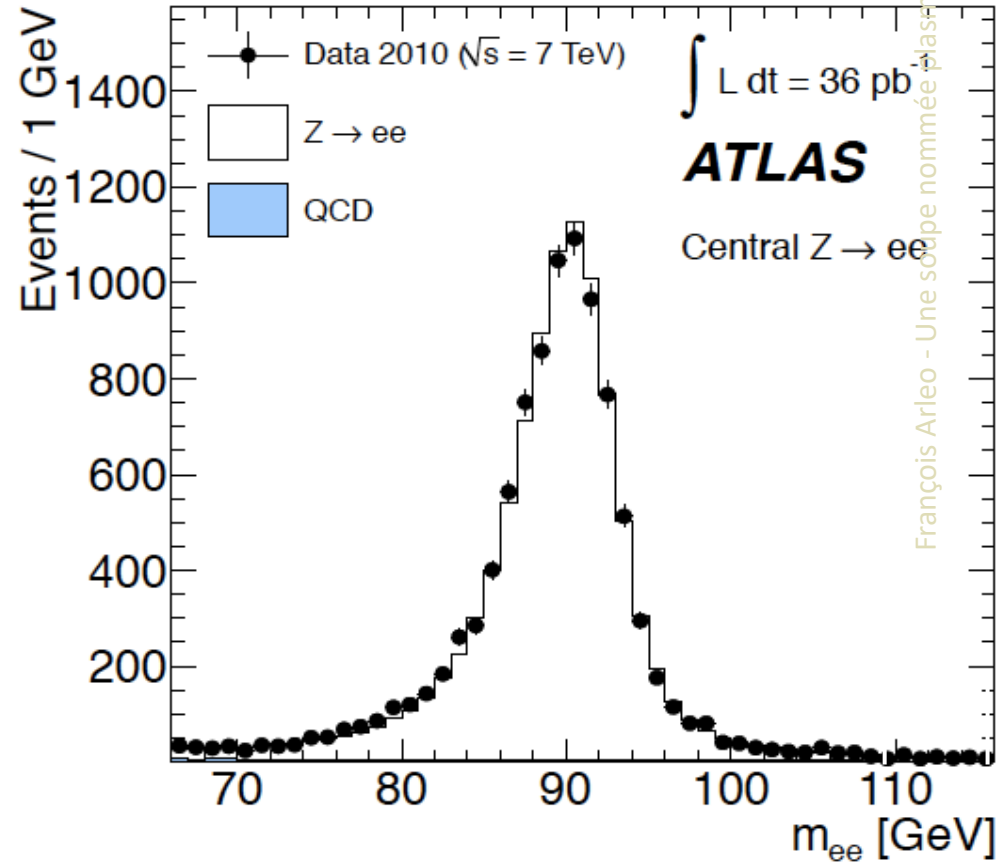
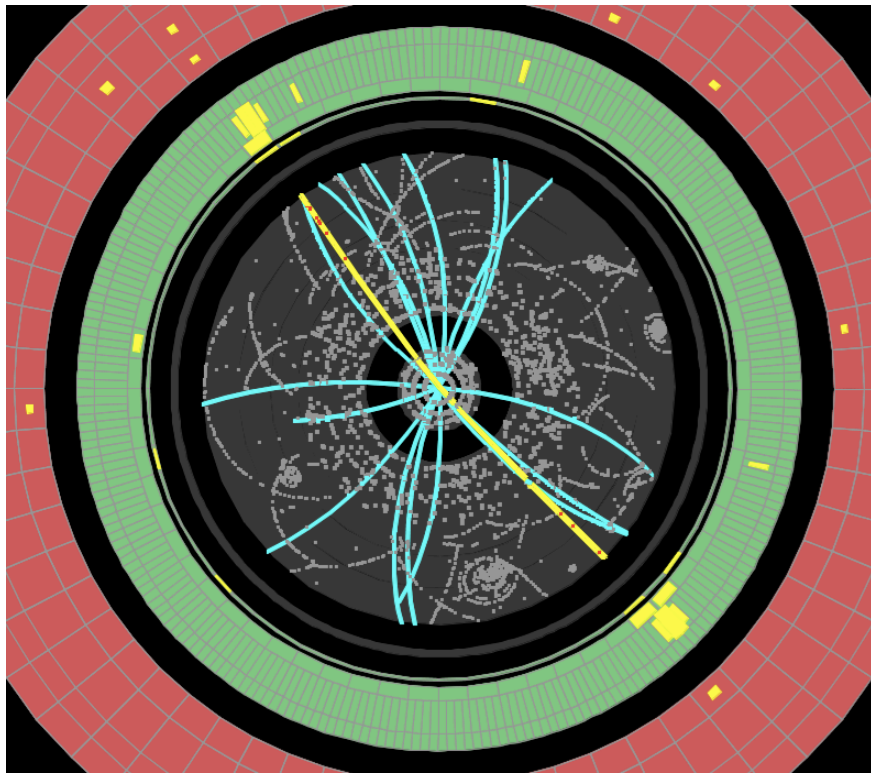
Measurement of the inclusive W^\pm and Z/γ^* cross sections in the e and μ decay channels in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector

The ATLAS Collaboration*
(Dated: December 6, 2011)



quarks-gluons

François Arleo - Une soupe nommée plasma

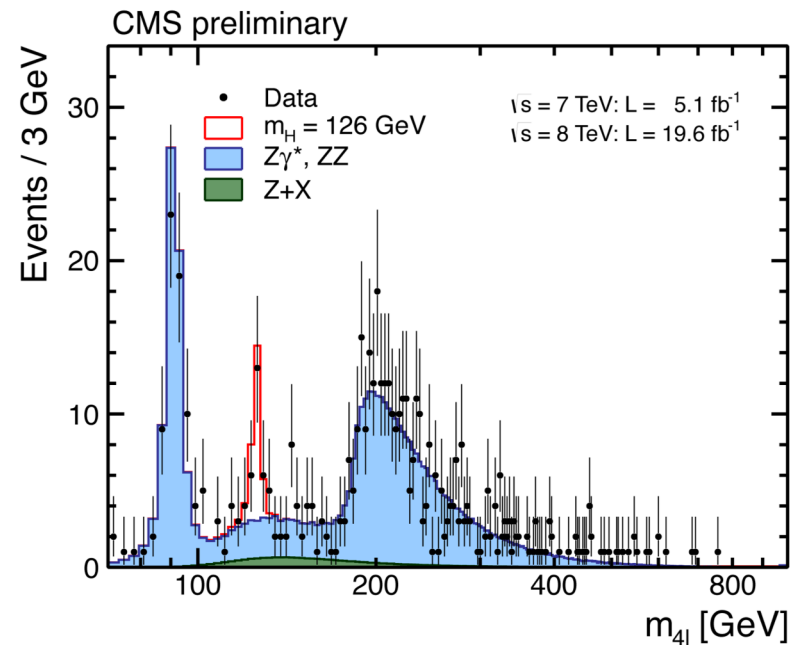
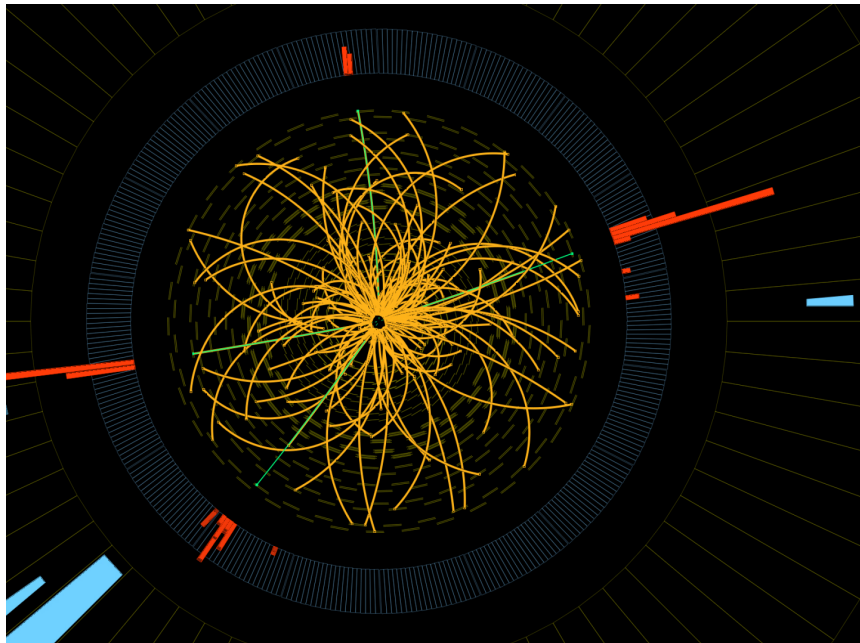


Le boson de monsieur Higgs

(et aussi de messieurs Brout et Englert)



- LE responsable de la masse des particules élémentaires
- Découverte annoncée par les expériences ATLAS et CMS le 4 juillet 2012
- Prix Nobel de Physique 2013 attribué à François Englert et Peter Higgs





Bienvenue au laboratoire !

