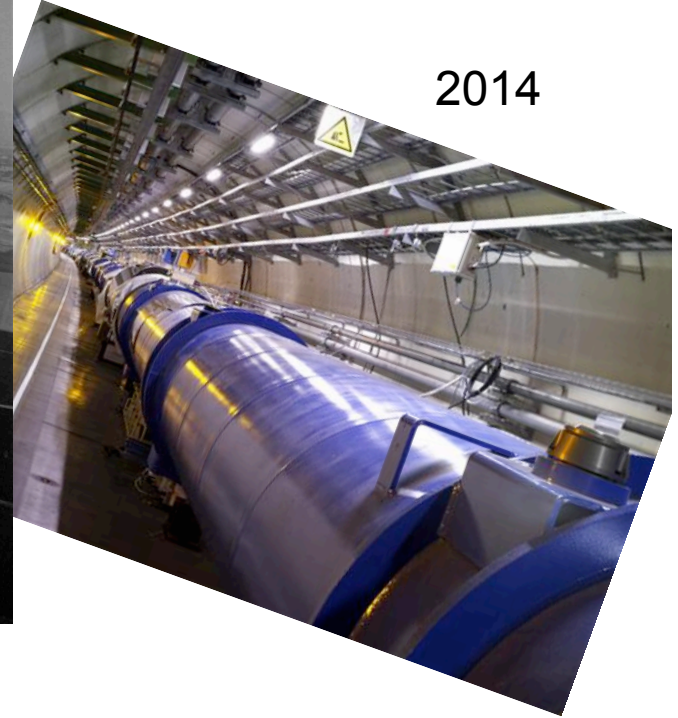


1954



2014



Le CERN

60 ans de découvertes scientifiques et de collaboration internationale

Philippe BLOCH (CERN)

Marseille 27 Septembre 2014



Contenu de la presentation

Qu'est ce que le CERN?

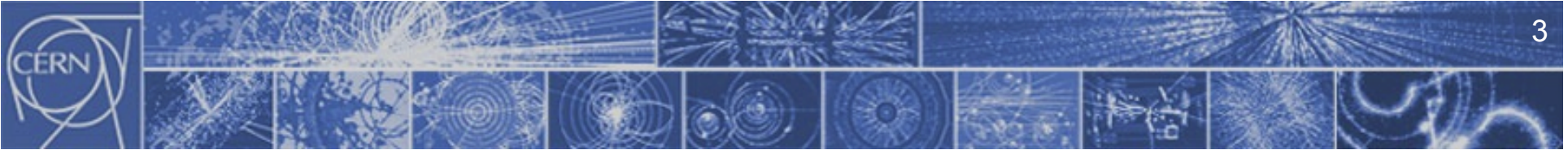
- sa genèse
- quelques statistiques (budget, personnel etc..)
- ses missions

Les grandes avancées du CERN en science fondamentale à travers son histoire et la découverte du Boson de Higgs

Le CERN au service de la société

**transfert de technologie, innovation
éducation
rassembler les nations**

Quelques mots sur le futur



Le CERN est une **organisation internationale** fondée en 1954 pour la recherche fondamentale en **Physique des Particules**.

Le siège et les équipements sont situés à cheval sur la frontière franco-suisse près de Genève.

La majorité des équipements se trouve en fait sur le territoire Français.



Genèse du CERN (1)

Dans les années 1930, la physique de l'infiniment petit était fortement basée en Europe



1929
De Broglie
FR



1932
Heisenberg
DE



1933
Schrödinger
AU



1933
Dirac
UK



1935
Chadwick
UK



1937
Hess
AU



1937
Anderson
USA



1938
Fermi
IT



Prix Nobel
Années 30

La deuxième guerre mondiale a entraîné une fuite des scientifiques vers les USA ou l'URSS.

Pour y remédier et reconstruire la coopération dans l'Europe détruite, dès décembre 1949 **Louis de Broglie** lance l'idée d'une collaboration Européenne (Conférence Européenne de la Culture à Lausanne, ancêtre de l' UNESCO)

15 Février 1952 : **Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire**

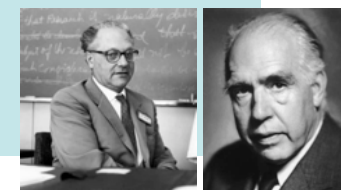
Les pères fondateurs:

Scientifiques: Pierre Auger (directeur sciences exactes et naturelles UNESCO), Francis Perrin (FR), Lev Kowarski (FR), Niels Bohr (DK), Paul Scherrer (CH), Edoardo Amaldi (IT), Isidore Rabi (US)

Diplomates: François de Rose,...



F de Rose, P. Auger



E. Amaldi, N. Bohr

Genèse du CERN (2)

La convention est signée
par 12 pays à l'UNESCO à Paris
le 1^{er} Juillet 1953 et entre en action le
29 Septembre 1954

Une convention remarquable et prémonitoire

- **Pas de relation avec le militaire, production publique et publiée**
- **Tout état peut être admis**
(pas de référence explicite à l'Europe)
- Un ou plusieurs laboratoires => pas nécessairement tout à Genève
- **Indépendance des gouvernements** représentés dans un Conseil par deux membres/pays
- **Organisation de la collaboration internationale** dans la physique des particules
- Collaboration avec les labos ou instituts des états membres sans compétition



CONVENTION for the Establishment of a European Organization for Nuclear Research

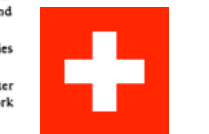
THE STATES parties to this Convention,
CONSIDERING the Agreement open for signature at Geneva on the fifteenth of February, 1952, constituting a Council of Representatives of European States for planning an international laboratory and organizing other forms of co-operation in nuclear research;
CONSIDERING the Supplementary Agreement signed at Paris on the thirtieth of June, 1953, prolonging the said Agreement; and
DESIRING, pursuant to section 2 of Article III of the said Agreement of the fifteenth of February, 1952, to conclude a Convention for the Establishment of a European Organization for Nuclear Research, including the establishment of an international laboratory for the purpose of carrying out an agreed programme of research of a pure scientific and fundamental character relating to high-energy particles;
HAVE AGREED as follows:

Article I Establishment of the Organization

1. A European Organization for Nuclear Research (hereinafter referred to as "the Organization") is hereby established.
2. The seat of the Organization shall be at Geneva, unless the Council referred to in Article IV subsequently decides by a two-thirds majority of all the Member States to transfer it to the place where another of the Laboratories referred to in sub-paragraph (a) of paragraph 2 of Article II is situated.

Article II Purposes

1. The Organization shall provide for collaboration among European States in nuclear research of a pure scientific and fundamental character, and in research essentially related thereto. The Organization shall have no concern with work for military requirements and the results of its experimental and theoretical work shall be published or otherwise made generally available.
2. The Organization shall, in the collaboration referred to in paragraph 1 above, confine its activities to the following:
 - (a) the construction and operation of one or more international laboratories (hereinafter referred to as "the Laboratories") for research on high-energy particles, including work in the field of cosmic rays; each Laboratory shall include:
 - (i) one or more particle accelerators;
 - (ii) the necessary ancillary apparatus for use in the research programmes carried out by means of the machines referred to in (i) above;
 - (iii) the necessary buildings to contain the equipment referred to in (i) and (ii) above and for the administration of the Organization and the fulfilment of its other functions



YU

Genèse du CERN (3)

Sur le terrain du futur institut nucléaire



Sous la conduite de M. A. Picot, les membres du Conseil européen pour la recherche nucléaire se sont rendus hier à Meyrin pour reconnaître le terrain où s'élèvera le Centre nucléaire (voir en Dernière heure)

(Photo Freddy Bertrand, Genève)

La Suisse du 30 octobre 1953

Albert Picot, un conseiller Genevois, propose le choix de **Genève** en Octobre 1952 et organise un referendum en Juin 1953 pour entériner le projet (70% de oui !)

Premiers coups de pioche 15 Mai 1954



Le CERN aujourd'hui

21 états membres

~ 2300 membres titulaires
~ 1600 autres personnels payés
~ 10500 utilisateurs
Budget (2014) 830 M€

← France: 1047 membres du personnel, 66 boursiers

Etats Membres: Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Israël, Italie, Norvège, Pays Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Royaume Uni, Slovaquie, Suède, Suisse

Candidat à l'accession au statut d'Etat Membre: Roumanie

Etat membre associé en phase préalable d'adhésion au CERN: Serbie

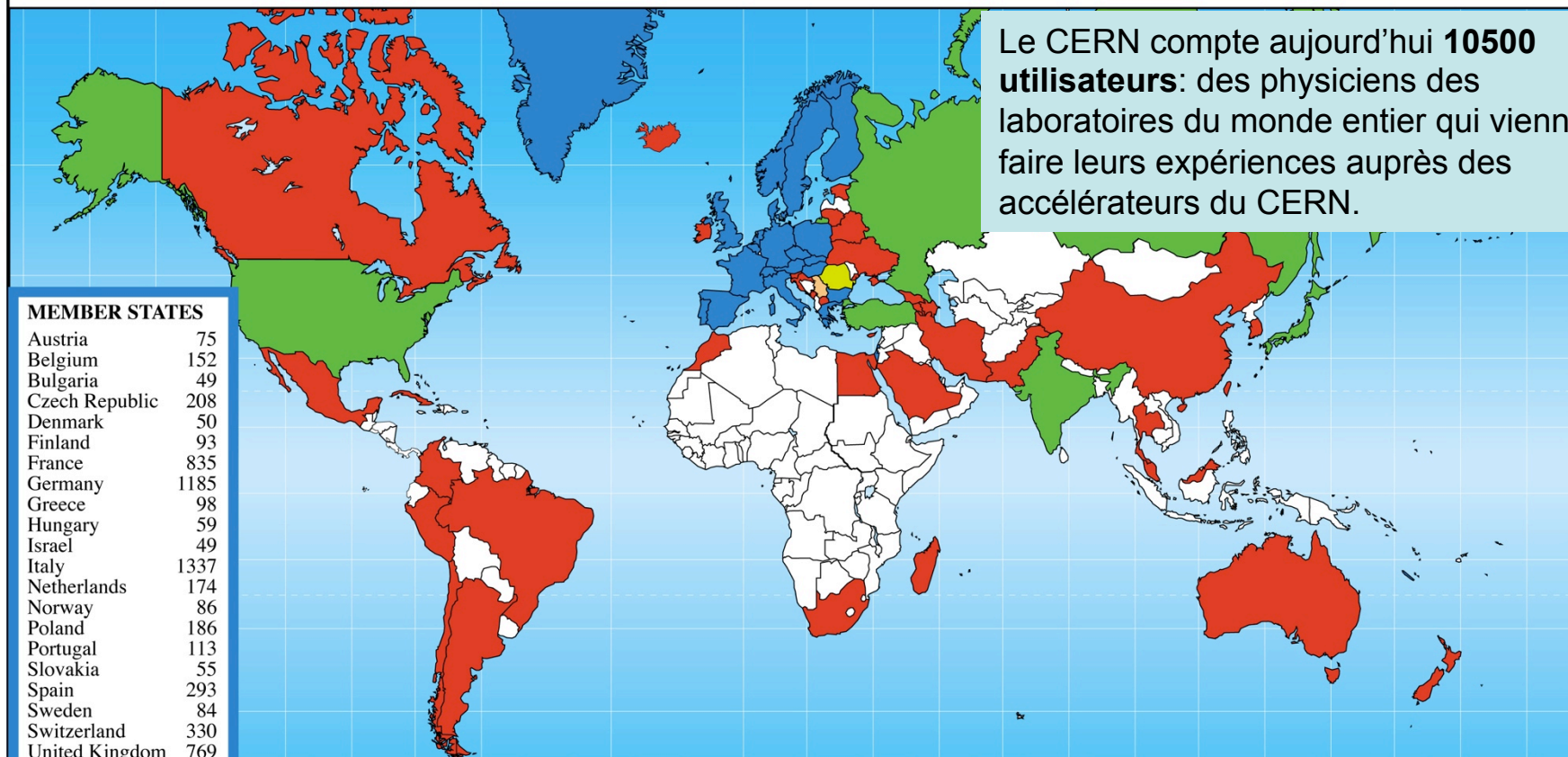
En cours de négociation: Brésil, Chypre, Pakistan, Russie, Slovénie, Turquie, Ukraine

Observateurs au Conseil: Inde, Japon, la Fédération de Russie, Turquie, les Etats-Unis, la Commission Européenne et l'Unesco



Le CERN : un laboratoire mondial

Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 14 January 2014



Le CERN compte aujourd'hui **10500 utilisateurs**: des physiciens des laboratoires du monde entier qui viennent faire leurs expériences auprès des accélérateurs du CERN.

MEMBER STATES

Austria	75
Belgium	152
Bulgaria	49
Czech Republic	208
Denmark	50
Finland	93
France	835
Germany	1185
Greece	98
Hungary	59
Israel	49
Italy	1337
Netherlands	174
Norway	86
Poland	186
Portugal	113
Slovakia	55
Spain	293
Sweden	84
Switzerland	330
United Kingdom	769

6280

OBSERVERS

India	153
Japan	217
Russia	890
Turkey	110
USA	1724

3094

CANDIDATE FOR ACCESSION

Romania	86
---------	----

ASSOCIATE MEMBER IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

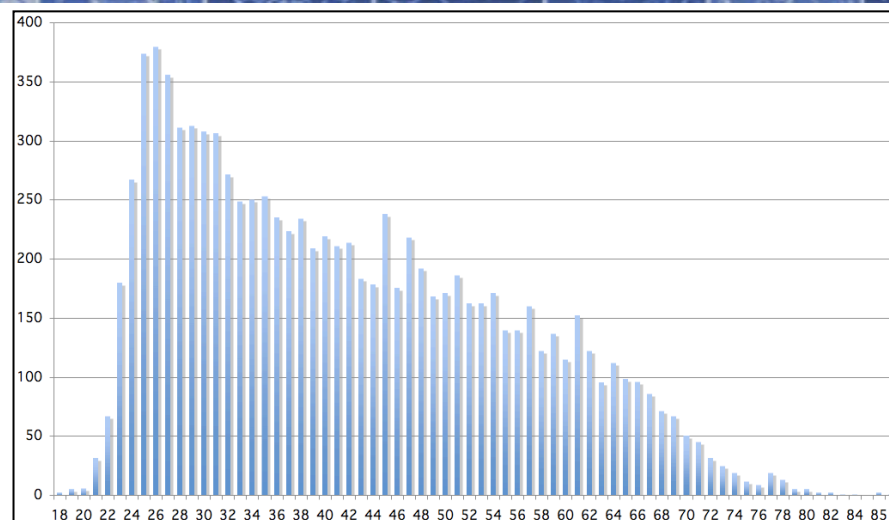
Serbia	30
--------	----

OTHERS

Argentina	13	China	122	Iran	20	Pakistan	18
Armenia	16	China (Taipei)	71	Ireland	5	Peru	2
Australia	39	Colombia	10	Korea	105	Saudi Arabia	3
Azerbaijan	2	Croatia	23	Lithuania	13	Slovenia	25
Belarus	24	Cuba	3	Madagascar	3	South Africa	32
Brazil	116	Cyprus	13	Malaysia	8	Thailand	8
Canada	147	Egypt	18	Mexico	46	T.F.Y.R.O.M.	1
Chile	8	Estonia	17	Montenegro	1	Ukraine	24
		Georgia	11	Morocco	6		
		Iceland	4	New Zealand	5		

982

Personnel et utilisateurs



Pyramide des âges utilisateurs
Aujourd'hui :
~2500 Doctorants
dans les expériences LHC

Grace au budget fourni par les Etats Membres, **le CERN finance**:

- L'infrastructure du laboratoire (bureaux, informatique, ateliers spécialisés, ...)
- Les accélérateurs et leurs lignes de faisceaux (et le personnel associé)
- Le personnel d'appui aux expériences (coordination technique, informatique en- et hors-ligne, électronique, technologies des détecteurs...)
- ~20% du coût des expériences
- 560 boursiers (post doctorants), 480 étudiants (master ou doctorat), 600 visiteurs
- Un très petit nombre de chercheurs en physique propres au CERN

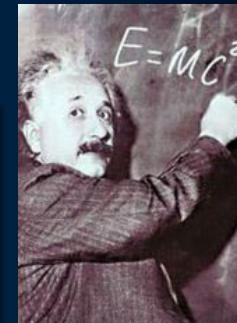
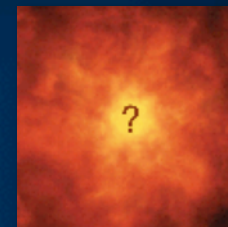
Les organismes de recherche extérieurs (CEA et CNRS en France) **financent** :

- Leurs chercheurs (et leurs infrastructures dans leur pays)
- Les missions des chercheurs au CERN
- 80% du coût des expériences auxquelles ils participent

Les missions du CERN

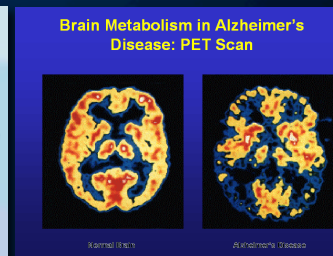
■ Repousser les frontières des connaissances

Les secrets du Big Bang ...à quoi ressemblait la matière dans les tout premiers instants de l'existence de l'Univers ?



■ Développer de nouvelles technologies pour les accélérateurs et détecteurs

Technologies de l'information : le Web et la Grille
Médecine – diagnostic et thérapie

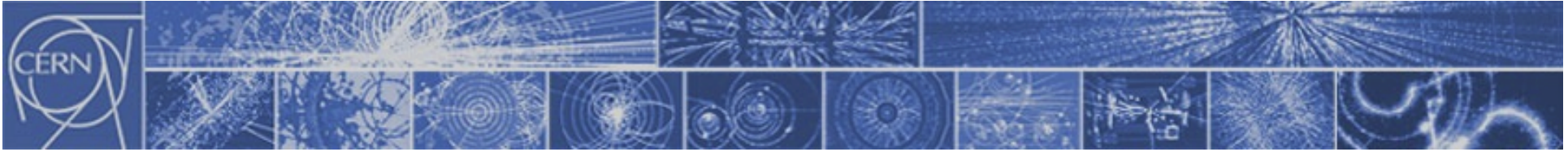


■ Former les scientifiques et les ingénieurs de demain



■ Rassembler des personnes de différentes nations et cultures



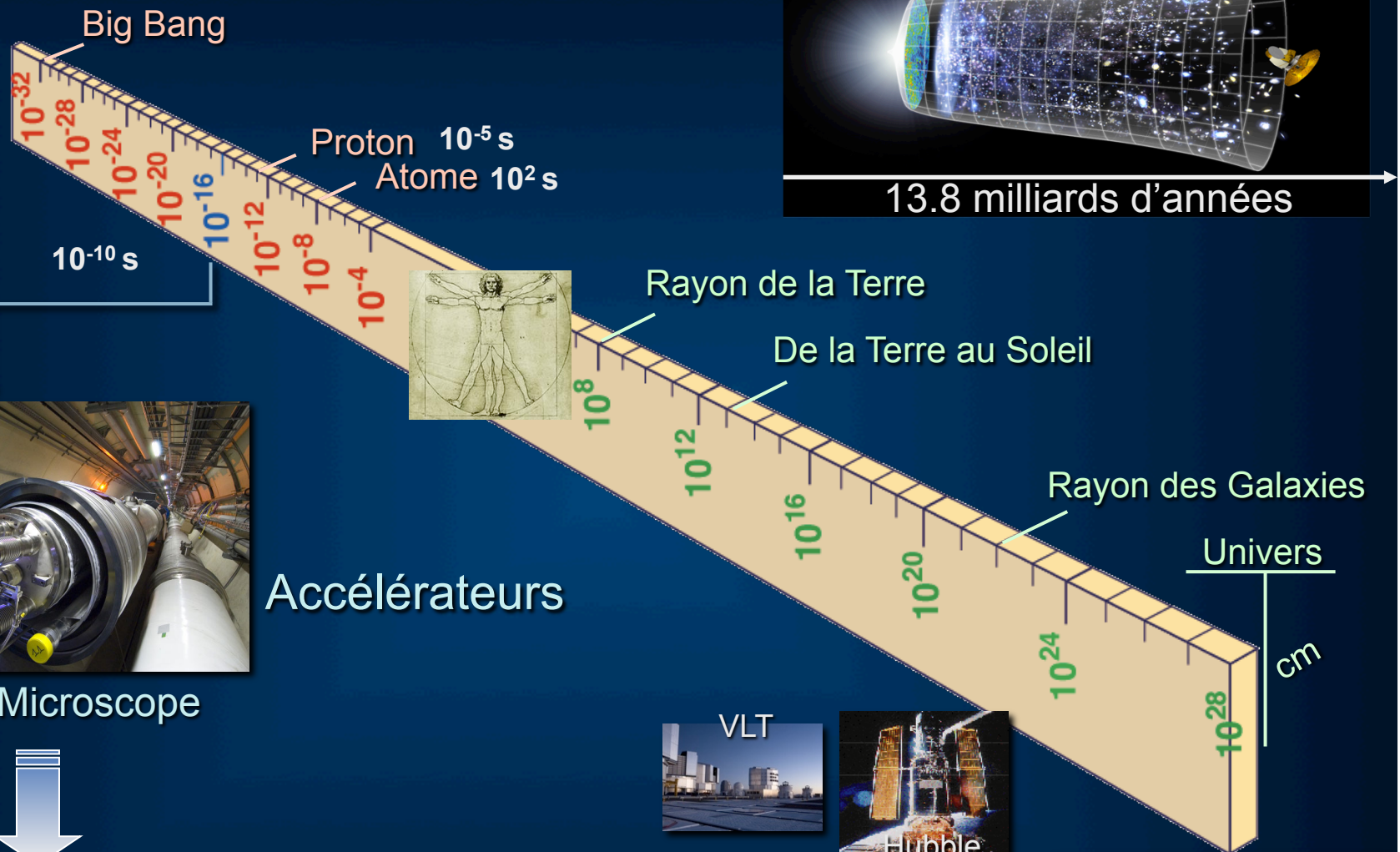


L'apport du CERN à la physique fondamentale

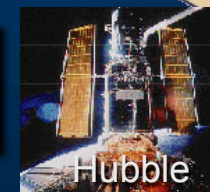
Rappels (rapides) sur la structure de la matière

Faits marquants depuis 1954

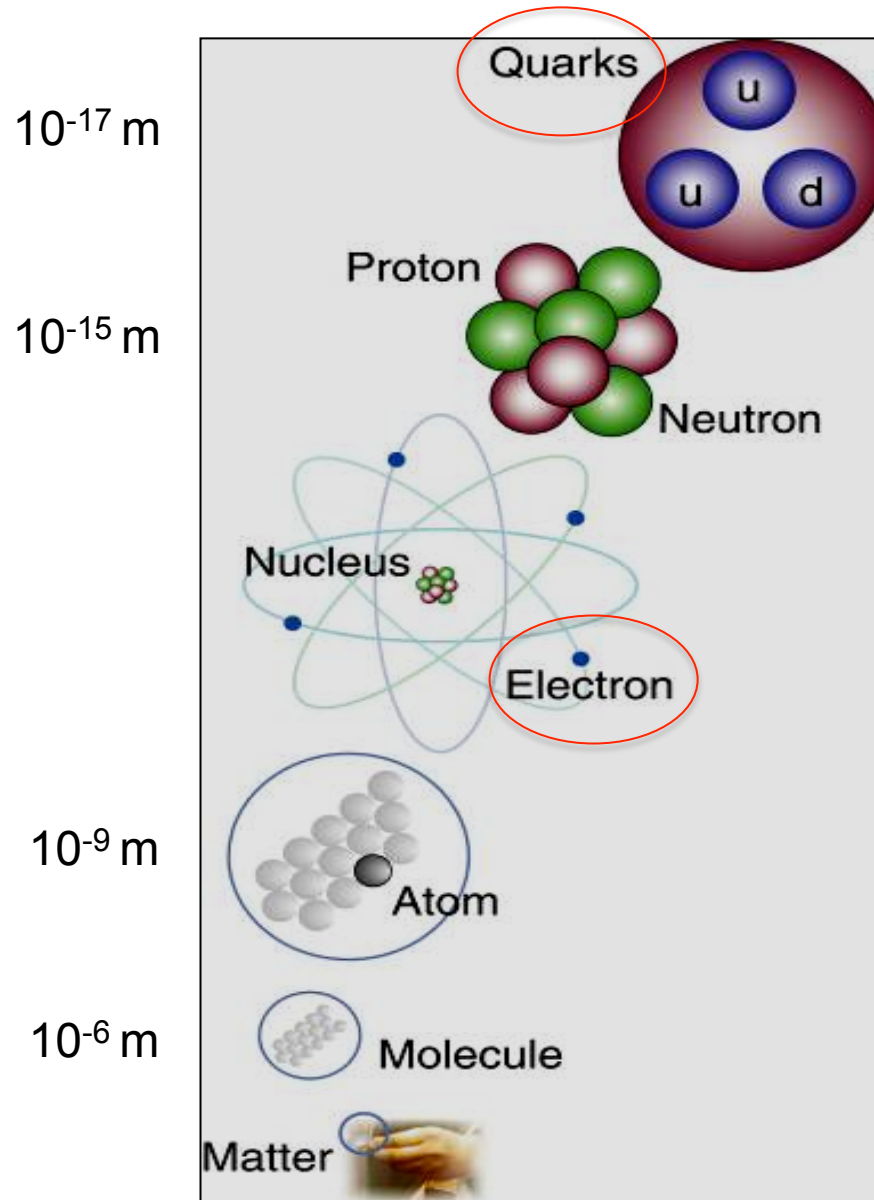
La découverte du Boson de Higgs



Etudie les lois de la physique juste après le Big Bang
symbiose entre la physique des
particules, l'astrophysique et la cosmologie



La structure de la matière



Quarks



1965



1968

M.Gell-Mann & R. Feynman introduisent le concept de quarks

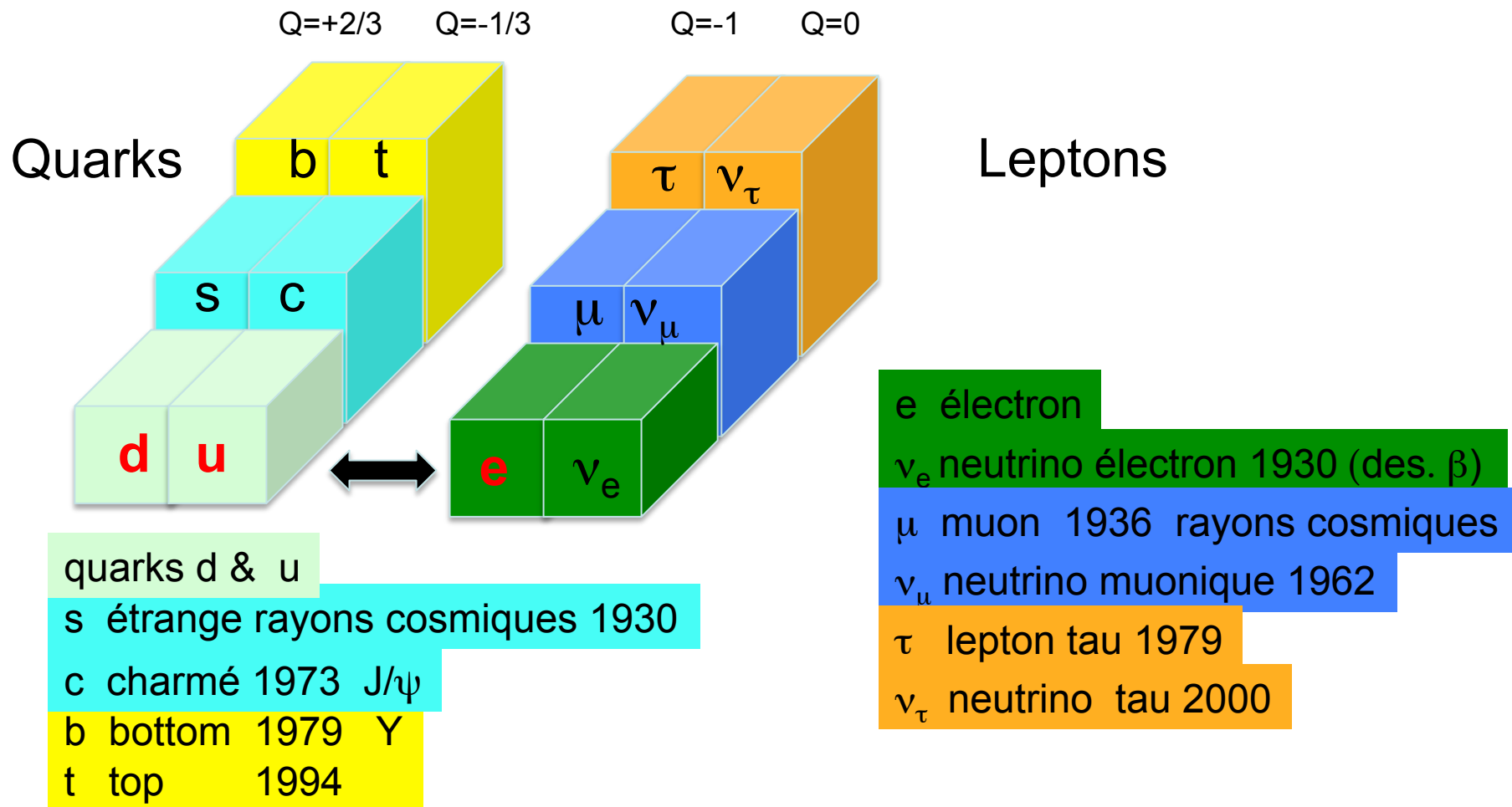
La matière est constituée de quarks et de leptons (~ électrons)

Les particules formées de quarks s'appellent des hadrons

Les constituants fondamentaux

Dès 1973, les théoriciens ont *postulé* l'existence de **3 familles** pour rendre compte des phénomènes observés, et les physiciens expérimentaux les ont découvertes peu à peu

**La matière ordinaire n'est formée que des quarks d, u et de l'électron.
Les autres constituants (sauf les neutrinos) sont instables**



Les 4 forces

Force électromagnétique

électricité et magnétisme

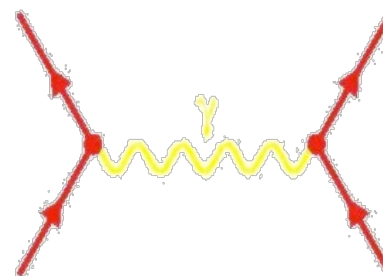
Force forte

cohérence des noyaux

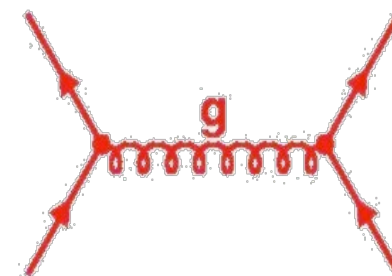
Force faible

désintégration β des noyaux

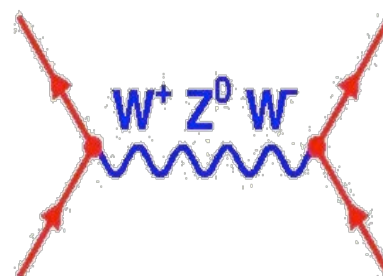
Gravitation



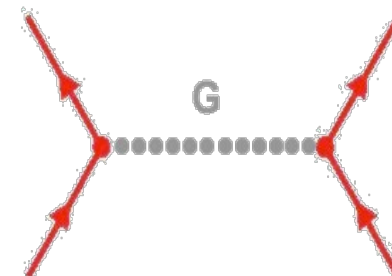
Force électromagnétique



Force forte



Force faible

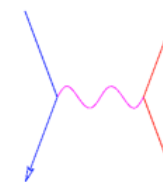


Gravitation

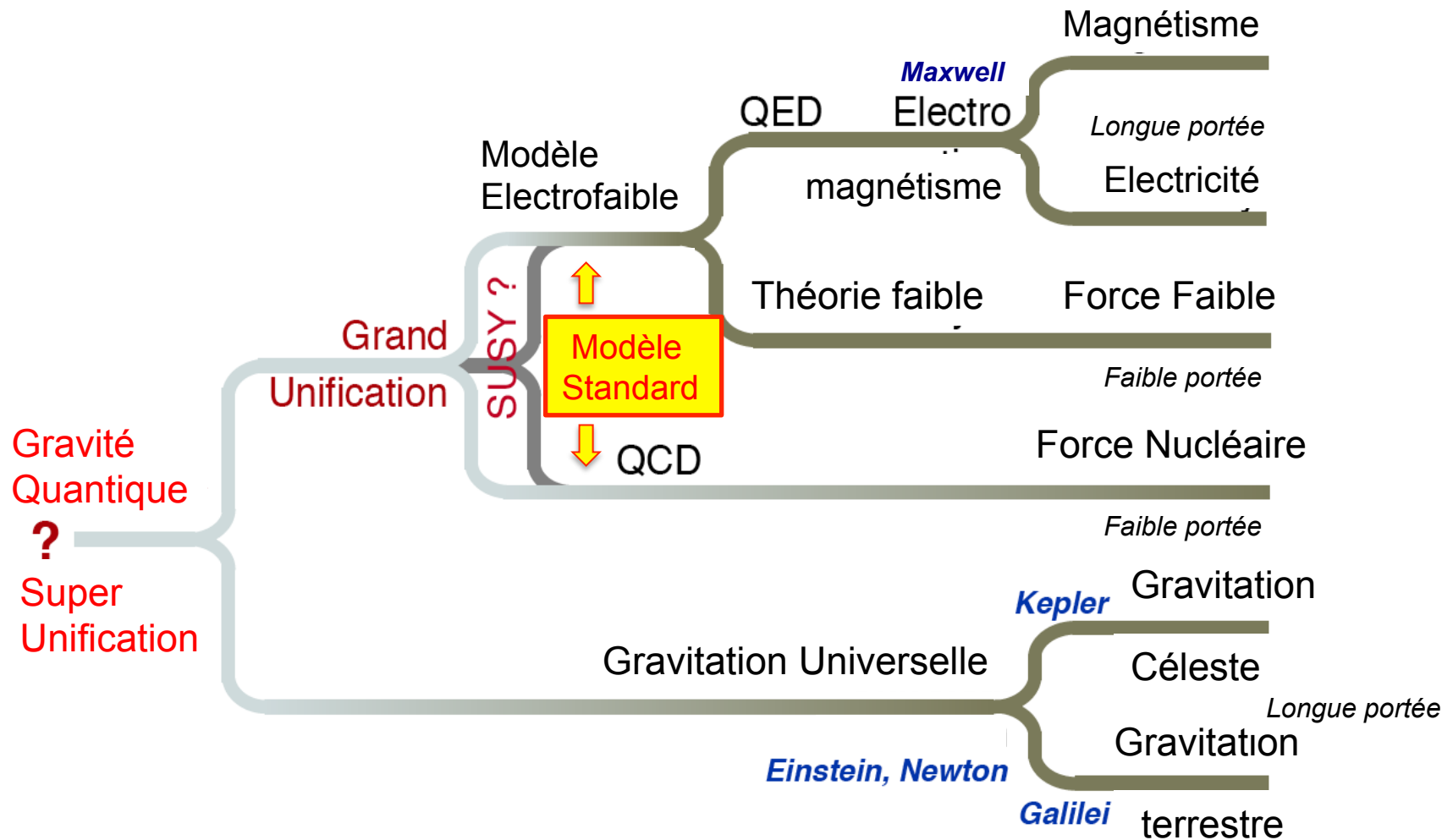
Ces forces correspondent à l'échange de quanta qui se matérialisent sous forme de particules qui sont toutes des bosons:

Photon = γ = lumière masse nulle => longue portée

Bosons W, Z massifs => courte portée



L'unification des forces



Les forces électromagnétiques, faibles et fortes sont unifiées dans une théorie unique: le **Modèle Standard**

Le Proton Synchrotron (PS) de 27 GeV

1957



1959



Inauguré en 1959, le PS est le premier « grand accélérateur » construit pour la communauté de physiciens Européens : 628m circonférence, 100 aimants dipolaires

Il a permis de nombreuses contributions à la physique des interactions faibles et fortes

Il est encore en fonctionnement, et le cœur du complexe d'accélérateurs du CERN

2014



Une découverte majeure au PS

L'interaction faible (responsable des désintégrations β) prédisait la production de muons dans l'interaction de neutrinos avec la matière: **courant chargé**, échange de $W^\pm$

$$\nu_\mu N \rightarrow \mu^- X$$

Une des conséquences de l'**unification des interactions faibles et électromagnétiques** est l'existence d'interaction sans muon: **courant neutre**, échange de Z^0

Les courants neutres ont été découverts au CERN dans la chambre à bulles Gargamelle en 1973:

$$\begin{aligned}\nu_\mu N &\rightarrow \nu_\mu X \\ \nu_\mu e &\rightarrow \nu_\mu e\end{aligned}$$

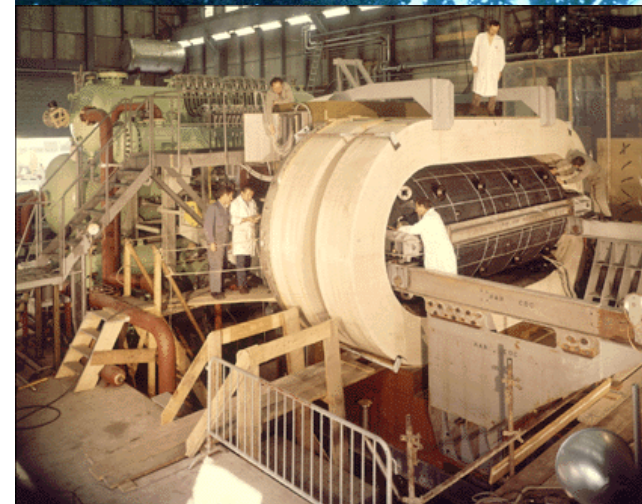
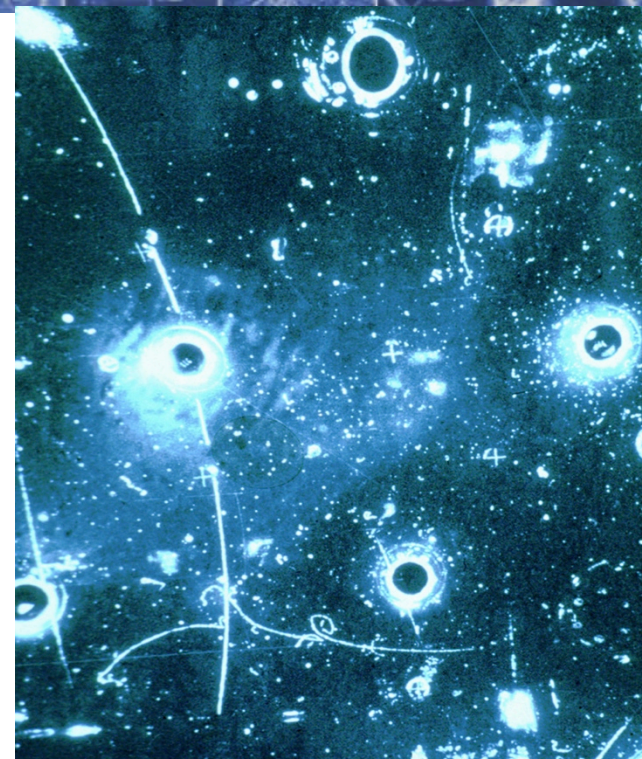


André Lagarrigue (FR)
1924-1975



1^{re} confirmation de l'unification des interactions

Nobel 1979 S.Glashow, A. Salam & S.Weinberg





Les Anneaux d'Intersection & Stockage (1971-1984)

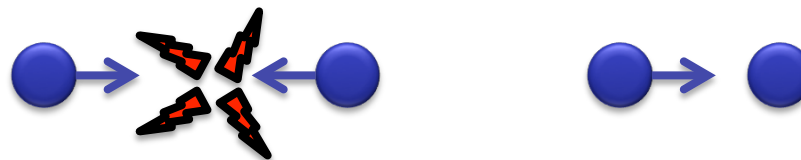
19

ISR (Intersecting Storage Rings) : **premier collisionneur de hadrons**

- proton-proton
- proton-antiproton
- ions-ions

2 anneaux de 450 m chacun.

Permet d'atteindre une énergie beaucoup plus grande que sur une cible fixe



Exploration de la structure du proton (quarks)



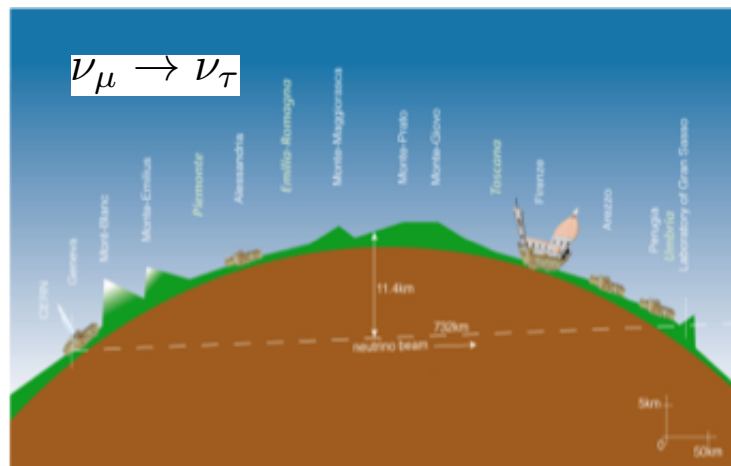
Super Proton Synchrotron (SPS, 1977)

7 km de circonférence, 744 aimants dipolaires,
E=450 GeV

Premier accélérateur souterrain du CERN (-40m)
Encore en fonctionnement et **injecteur du LHC**

Les expériences au SPS ont permis (entre autre):

- d'approfondir la connaissance de l'interaction faible (faisceaux de neutrinos & muons)
- d'étudier des désintégrations rares (kaons, étude symétrie matière-antimatière CP)
- une première évidence d'un nouvel état primordial de la matière (quark-gluon plasma)
- l'observation d'oscillations de neutrinos en envoyant un faisceau vers l'Italie



Hall expérimental EHN1 du SPS

Le SppbarS (collisionneur proton-antiproton)

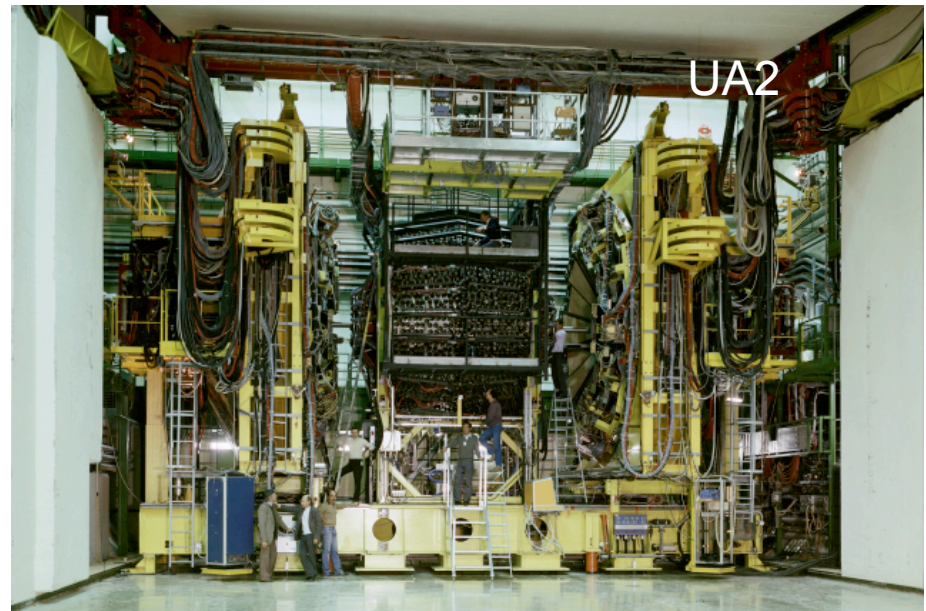
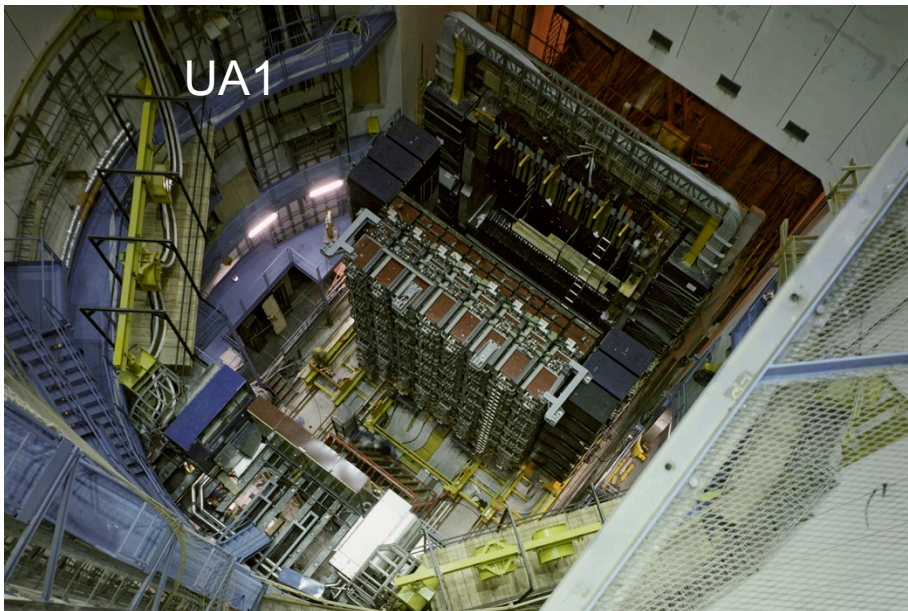
En 1979, **Carlo Rubbia** propose d'utiliser le SPS comme anneau de collision proton-antiproton: Cela devrait permettre de produire les bosons W et Z grâce aux collisions de quarks (proton) contre les antiquarks (antiproton)

$$u\bar{d} \rightarrow W^+ \quad \bar{u}d \rightarrow W^- \quad u\bar{u} \rightarrow Z^0 \quad d\bar{d} \rightarrow Z^0$$

Défis:

- produire assez d'antiprotons -> anneau spécifique de stockage d'antiprotons AA
- concentrer les antiprotons en faisceau -> refroidissement stochastique (S.Van der Meer)

Deux grandes expériences de taille inédite (& > 200 physiciens) sont construites en moins de 3 ans



Découverte des bosons W et Z

22



Volume 126B, number 5

PHYSICS LETTERS

7 July 1983

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF LEPTON PAIRS OF INVARIANT MASS AROUND $95 \text{ GeV}/c^2$ AT THE CERN SPS COLLIDER

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland

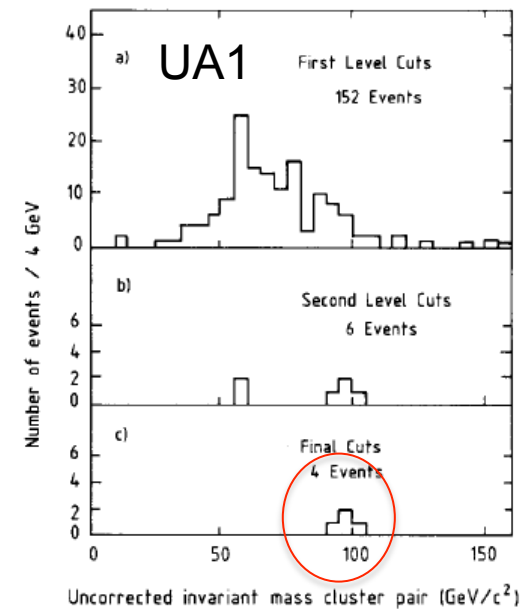
Volume 129, number 1,2

PHYSICS LETTERS

15 September 1983

EVIDENCE FOR $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ AT THE CERN $\bar{p}p$ COLLIDER

The UA2 Collaboration



Nobel 1984 C.Rubbia & S. Van der Meer

LEP (Large Electron Positron) 1989-2000



Pour étudier avec précision Z et W et tester le modèle standard, il est préférable d'étudier des collisions électron-positon.

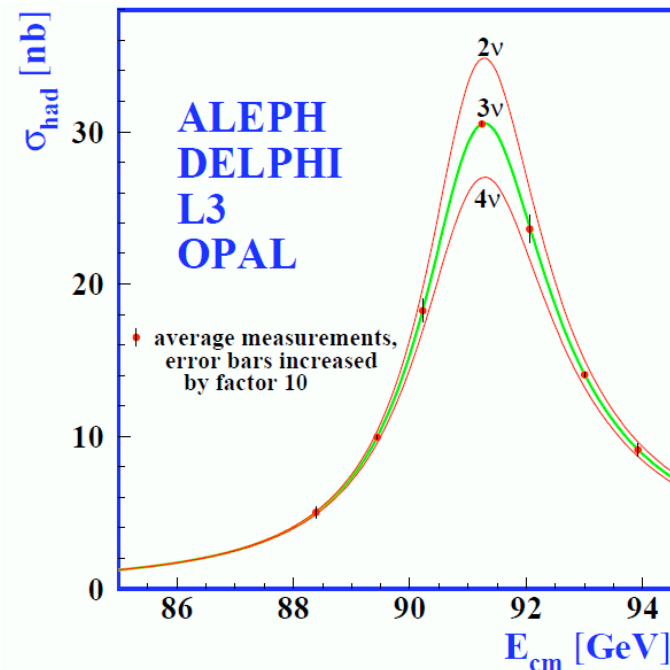
Le CERN construit un accélérateur circulaire géant de 27km à 100 mètres sous terre.



Avec ses mesures de grande précision le LEP a permis de définitivement consolider la théorie du Modèle Standard et ouvert la voie au futur. Parmi les faits marquants:

- Mesure ultra-précise de la masse du boson Z : $M_Z = 91187.6 \pm 2.1 \text{ MeV}$
- Preuve de l'existence de 3 neutrinos
- Mesures indirectes
prédiction de la masse du quark top à $172 \pm 23 \text{ GeV}$; découvert par la suite au Tevatron (USA) à 176 GeV

Accord des mesures de production du Z avec un nombre de 3 neutrinos



Le boson de Higgs

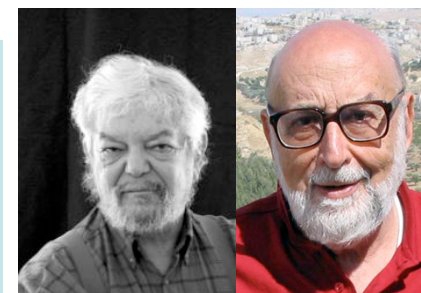
La théorie unifiée ne rendait pas compte de plusieurs éléments:

- Comment les forces électromagnétiques et faibles se sont-elles découplées et ont abouti à des forces si différentes (*brisure de symétrie électrofaible*).
- Pourquoi le photon est-il de masse nulle alors que les bosons W/Z sont massifs?
- **Pourquoi les constituants fondamentaux sont-ils massifs?**

En 1964 **Brout, Englert et Higgs** ont proposé un mécanisme qui explique la brisure de symétrie électrofaible : le champ de Higgs

- L'interaction avec ce champ permet aussi de donner une masse aux quarks et aux leptons chargés
- **Les fluctuations du champ donnent naissance au boson de Higgs**
- Dans la version la plus simple du mécanisme, cette particule est un boson unique neutre de spin 0 (scalaire)

Le boson de Higgs est la pièce manquante du Modèle Standard





Le boson de Higgs

Situation à la fin de l'exploitation du LEP

- La masse du boson de Higgs (s'il existe) est à priori inconnue.
 - La théorie nous donne une limite de l'ordre de 1000 GeV (= 1 TeV)
 - Les mesures du LEP donnent une limite inférieure de 114 GeV et semblent indiquer une préférence indirecte pour une masse légère (< 200 GeV)
- Le boson de Higgs préfère se coupler aux particules lourdes: il serait très peu produit dans des collisions électron-positon. La production attendue dépend de la masse mais est en tout cas très faible et nécessite un très grand nombre de collisions.

Pour pouvoir produire en abondance le boson de Higgs et couvrir un large domaine de masse possible, il faut revenir à un **collisionneur de protons** à la plus haute énergie possible, *compatible avec une réutilisation du tunnel du LEP*.

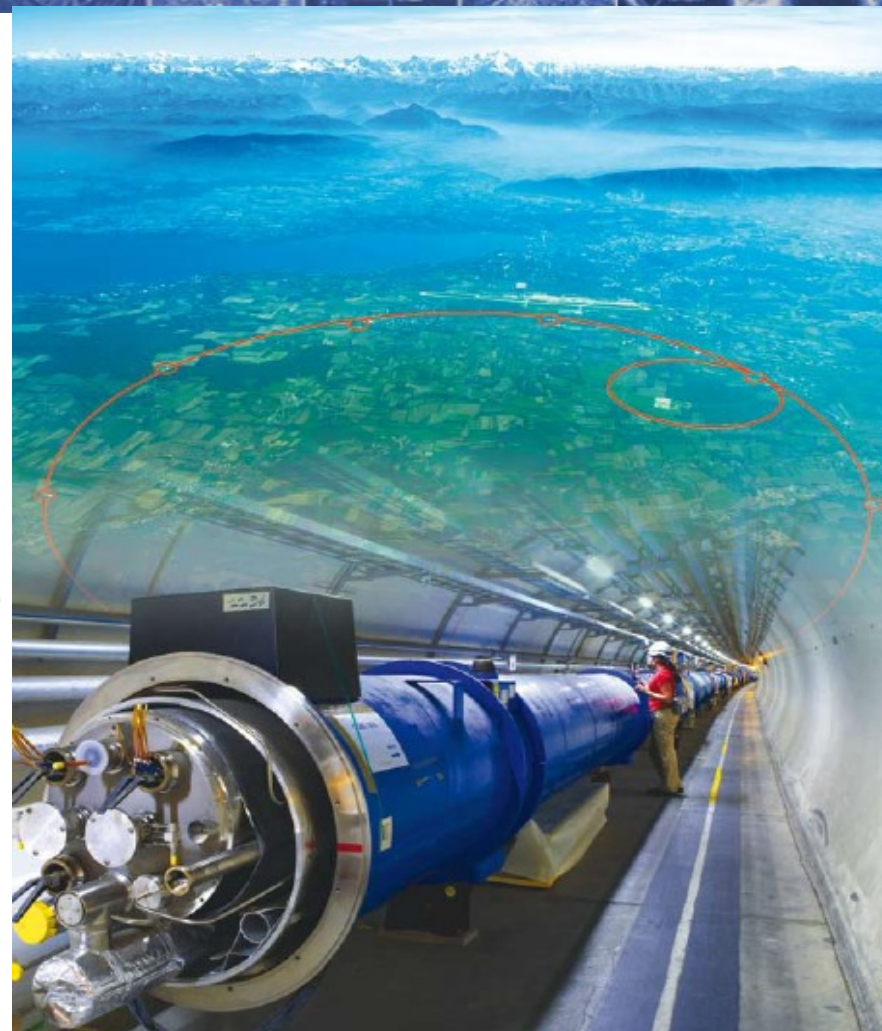
Le LHC et ses expériences ont été construits avec le but explicite de découvrir le mécanisme de brisure de symétrie et le boson de Higgs.



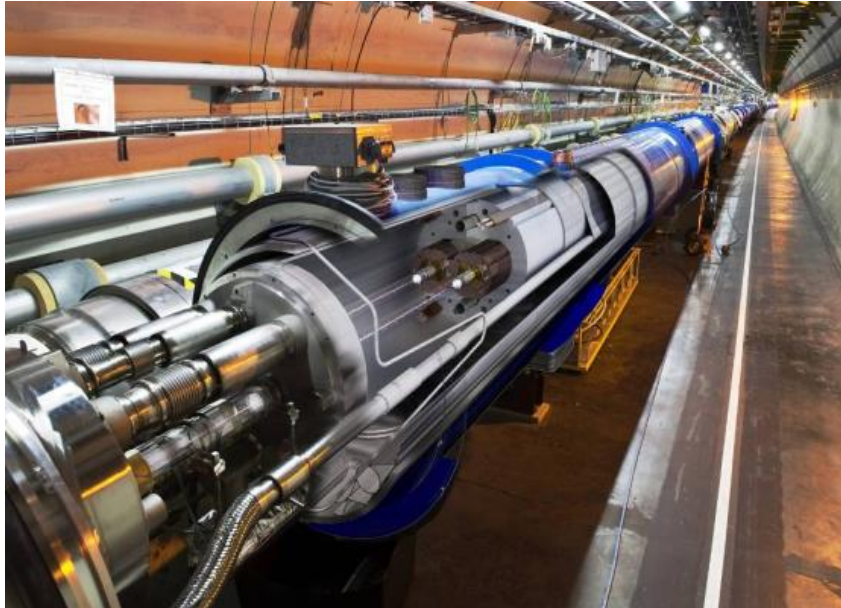
Le LHC (Large Hadron Collider)

**Un collisionneur:
proton-proton
7 TeV – 7 TeV
(4 TeV – 4 TeV en 2010-2012)**

1983	: Etudes conceptuelles préliminaires
1988	: Premiers modèles d'aimants (faisabilité)
1994	: Approbation par le Conseil du CERN
1996-1999	: Industrialisation des productions de série
1998	: DUP & début du génie civil
1998-2000	: Passation des principaux marchés
2004	: Début de l'installation dans le tunnel
2005-2007	: Installation des aimants dans le tunnel
2007	: Test fonctionnel du premier secteur
2008-2009	: Fin de la mise en service
2010-2035	: Exploitation pour la physique



Un projet de 50 ans !



Les spécifications de nombreux systèmes dépassaient le plus souvent l'état de l'art.

Il a fallu mener de longs programmes de R&D avec de nombreux instituts et industries du monde entier.

- ◆ Aimants supraconducteurs à champ élevé: 8.3 T (1232 aimants dipolaires de 15 m)
- ◆ Le plus grand système d'aimant supraconducteurs (~10'000 aimants)
- ◆ La plus grande installation cryogénique 1.9 K (hélium superfluide, 150 tonnes
- ◆ Hélium Liquide pour refroidir 37'000 tonnes)
- ◆ Ultra-vide cryogénique pour les faisceaux de particules (10^{-13} atm, 10 fois plus faible que sur la lune)
- ◆ Des forts courants électriques contrôlés avec une grande précision (jusqu'à 13 kA)
- ◆ Une très grande précision pour les convertisseurs de puissance (niveau du ppm)
- ◆ Un système de protection ultra-fiable pour les aimants et les équipements
(énergies stockées: magnétique > 10 GJ, dans les faisceaux >700 MJ)

Energie magnétique stockée dans les aimants: 11.3 GJoules

10 GJoule $\approx$ volant à 700 km/h



10 GJ $\equiv$ 55 km/h

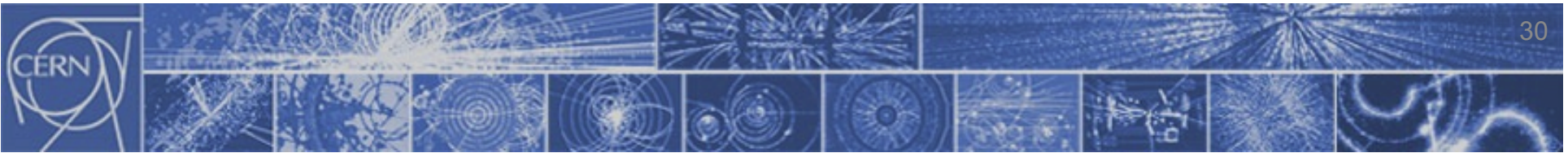
Energie stockée dans les faisceaux: 720 MJoules

700 MJ suffisant pour fondre 1 tonne de cuivre

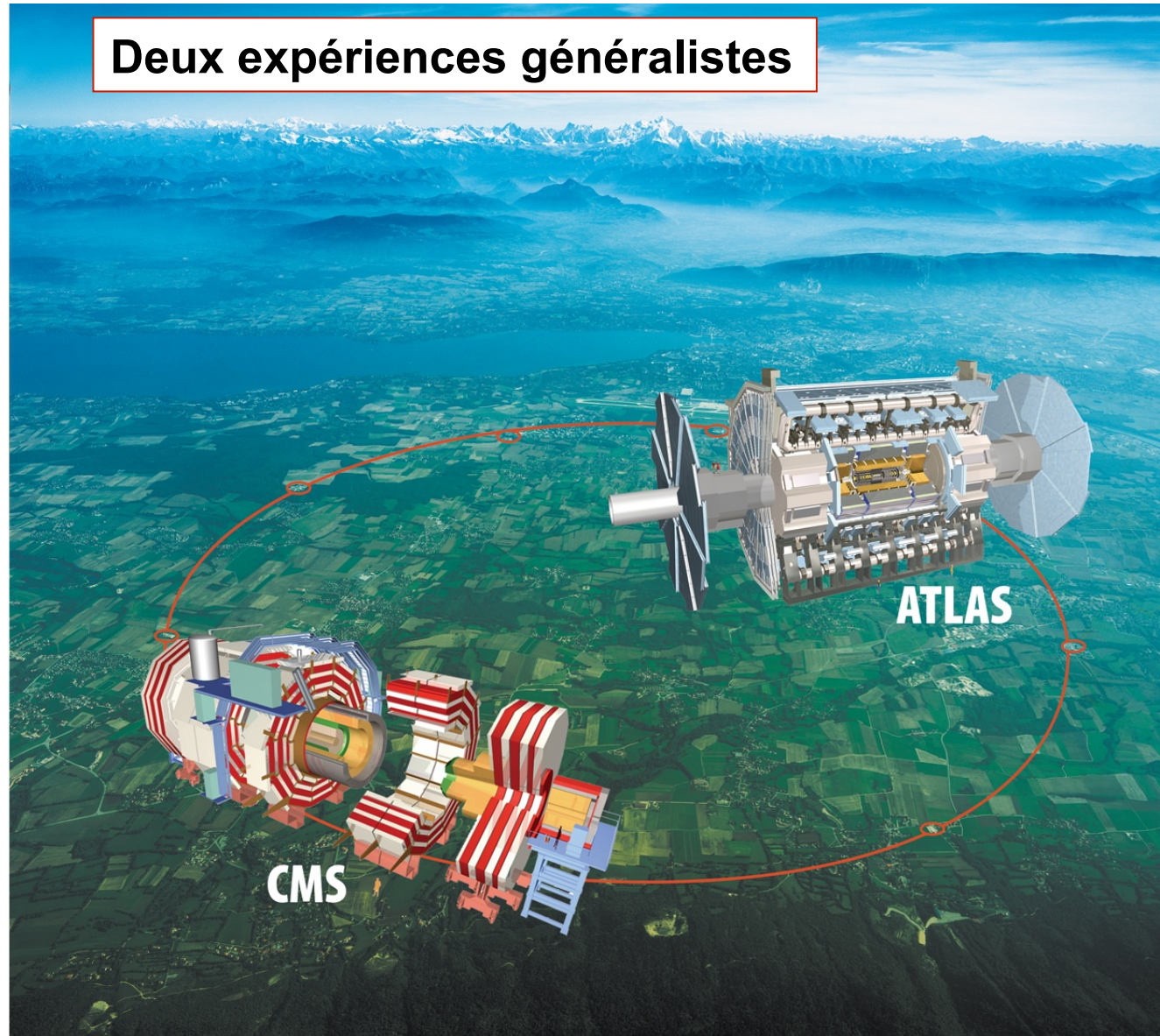


Equivalent à 90 kg de TNT
par faisceau

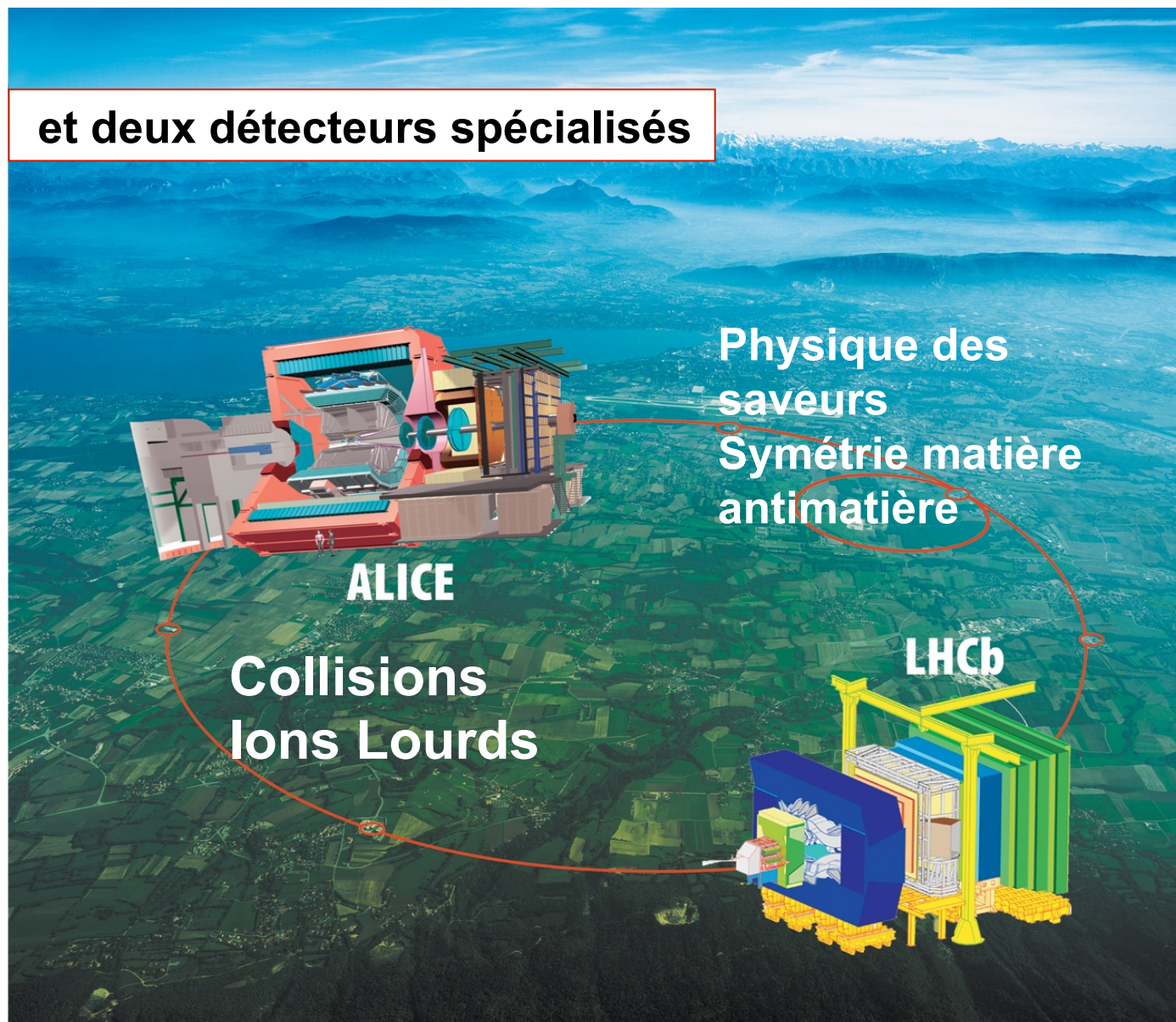




Deux expériences généralistes



et deux détecteurs spécialisés



Les laboratoires Français dans les expériences LHC

Implication forte dans le programme expérimental du LHC

ALICE:

7 instituts, >100 membres

CEA Saclay

LPC Université de Clermont Ferrand - CNRS/IN2P3

LPSC Université de Grenoble - CNRS/IN2P3

SUBATECH Université de Nantes - CNRS/IN2P3

IPN Orsay Université de Paris Sud - CNRS/IN2P3

IPHC Université de Strasbourg - CNRS/IN2P3

INPL Université de Lyon - CNRS/IN2P3



ATLAS:

7 instituts, >300 membres

CEA Saclay

LAPP Annecy Université de Savoie - CNRS/IN2P3

LPC Université de Clermont Ferrand - CNRS/IN2P3

LPSC Université de Grenoble - CNRS/IN2P3

CPPM Marseille Université de la Méditerranée - CNRS/IN2P3

LAL Orsay Université de Paris Sud - CNRS/IN2P3

LPNHE Université de Paris VI et VII - CNRS/IN2P3



CMS:

4 instituts, >150 membres

CEA Saclay

LLR Ecole Polytechnique - CNRS/IN2P3

IPHC Université de Strasbourg - CNRS/IN2P3

INPL Université de Lyon - CNRS/IN2P3



LHCb:

5 instituts, >100 membres

LAPP Annecy Université de Savoie - CNRS/IN2P3

LPC Université de Clermont Ferrand - CNRS/IN2P3

CPPM Marseille Université de la Méditerranée - CNRS/IN2P3

LAL Orsay Université de Paris Sud - CNRS/IN2P3

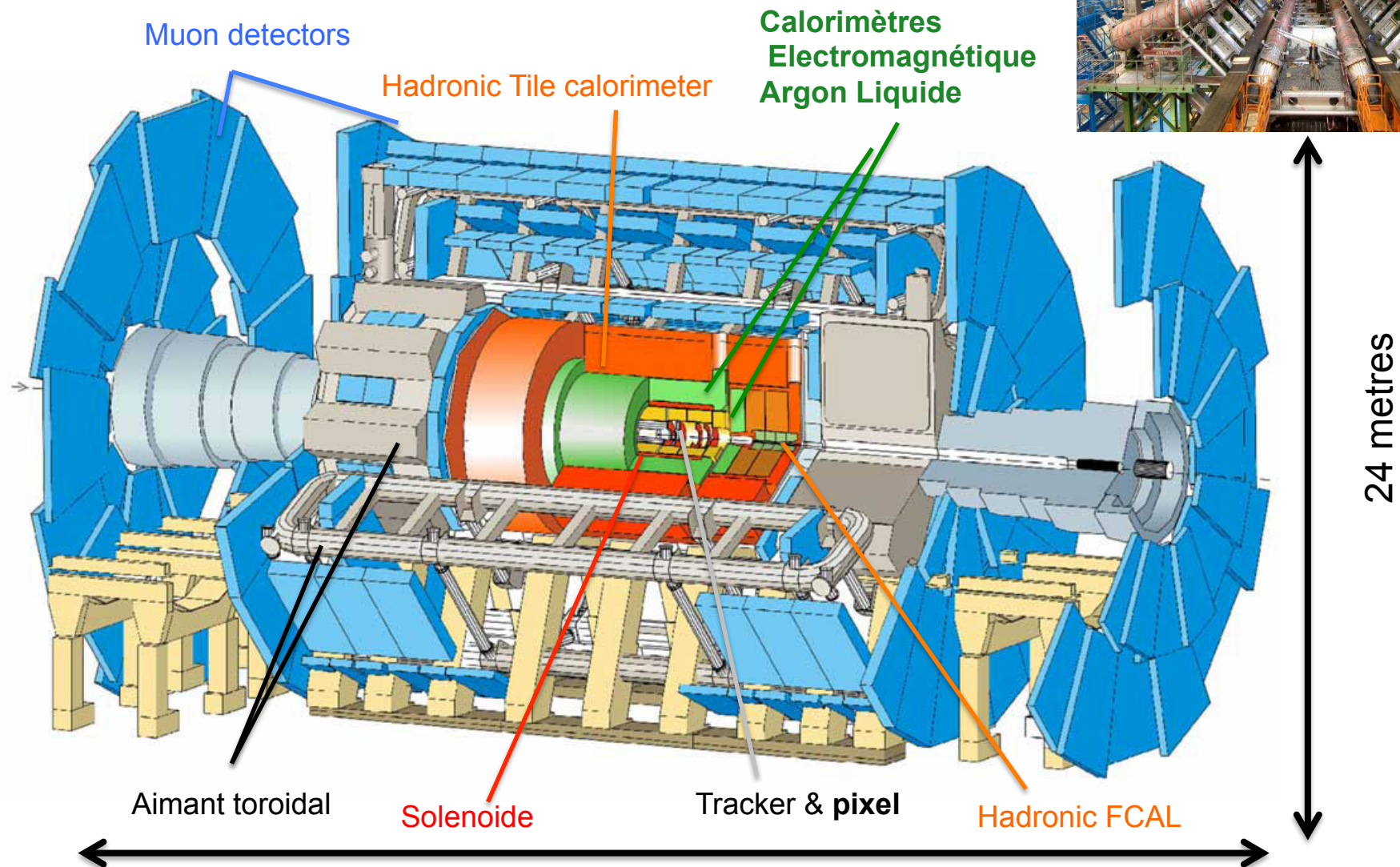
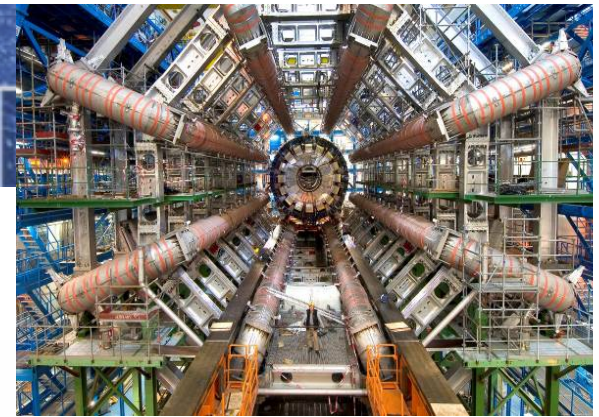
LPNHE Université de Paris VI et VII - CNRS/IN2P3



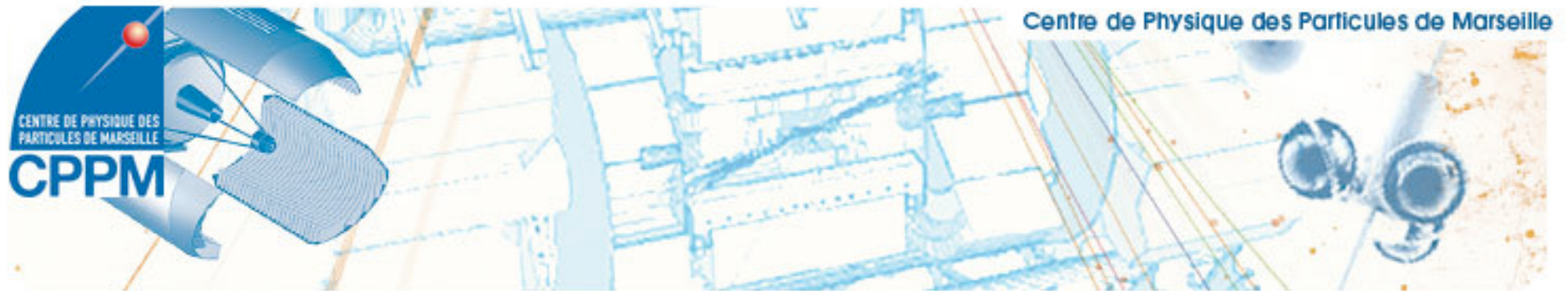
Les physiciens français sont en première ligne dans l'analyse des données



Vue éclatée de ATLAS



100 millions canaux ,
3000 physiciens



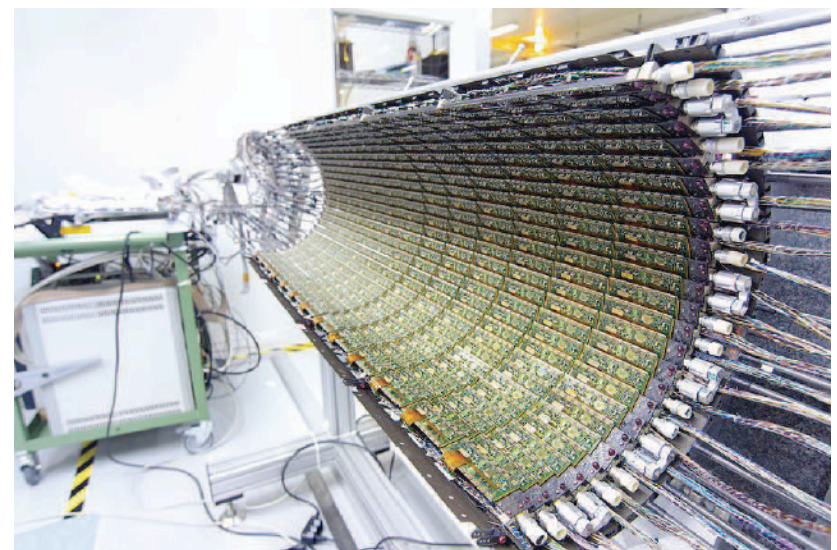
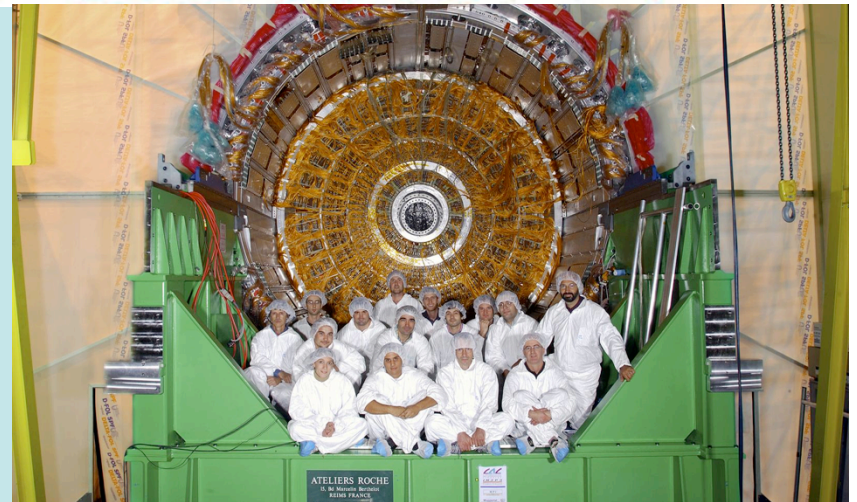
Contribution du CPPM à ATLAS

trentaine de physiciens, ingénieurs, doctorants et post-doctorants

- Maître d'œuvre des bouchons du calorimètre électromagnétique
- Responsable de l'assemblage et du test de 30% des échelles du détecteur à pixels
- Co-responsable de la conception et de l'implémentation du filtrage d'évènements

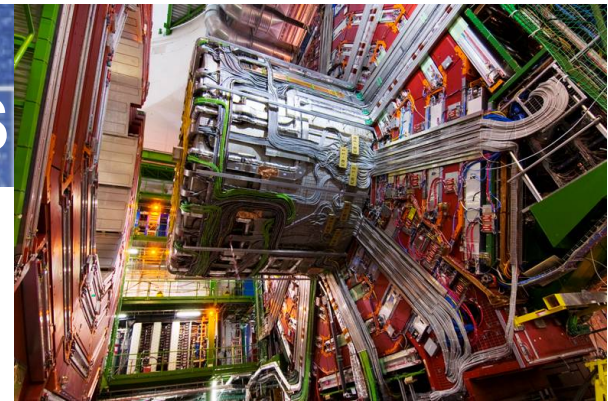
Physique

- Quark top
- Production associée du boson de Higgs WH, ttH
- Recherche de Physique au delà du Modèle Standard:
 - Higgs $H^\pm$
 - Resonances de haute masse
 - Supersymétrie
- ...





Vue éclatée de CMS



CMS Detector

Pixels
Tracker
ECAL
HCAL
Solenoid
Steel Yoke
Muons

SILICON TRACKER
Pixels ($100 \times 150 \mu\text{m}^2$)
~1m² ~66M channels
Microstrips (80-180 μm)
~200m² ~9.6M channels

**CRYSTAL ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)**
~76k scintillating PbWO₄ crystals

PRESHOWER
Silicon strips
~16m² ~137k channels

STEEL RETURN YOKE
~13000 tonnes

**SUPERCONDUCTING
SOLENOID**
Niobium-titanium coil
carrying ~18000 A

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + plastic scintillator
~7k channels

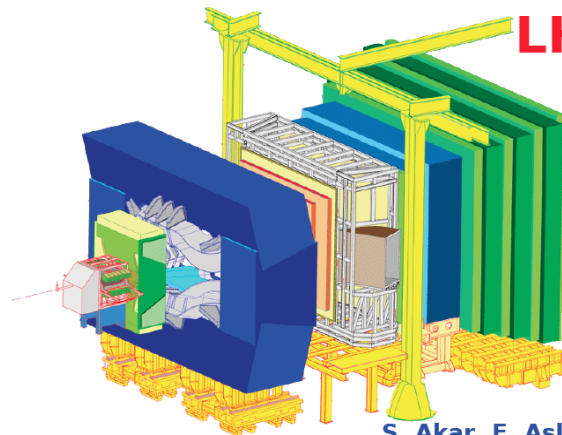
**FORWARD
CALORIMETER**
Steel + quartz fibres
~2k channels

MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube & 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip & 432 Resistive Plate Chambers

Total weight : 14000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



- L'asymétrie matière-antimatière est un puzzle que le Modèle Standard est incapable d'expliquer dans sa totalité. Recherche de nouvelles sources d'asymétrie est une nécessité
- C'est un des buts de LHCb qui étudie les désintégrations de mésons B



LHCb - CPPM

S. Akar, E. Aslanides, J.-P. Cachemiche,
J. Cogan, P.-Y. Duval, F. Hachon,
M. Jevaud, W. Kanso, R. Le Gac,
O. Leroy, G. Mancinelli, A. Mordà, F. Rethore,
J. Serrano, A. Tsaregorodtsev

Le CPPM a été responsable du déclenchement sur les muons (Level-0) et a contribué à l'analyse de deux modes importants:

$B_s \rightarrow \mu\mu$ (la désintégration la plus rare jamais observée BR $3 \cdot 10^{-9}$)

$B_s \rightarrow J/\psi \phi$

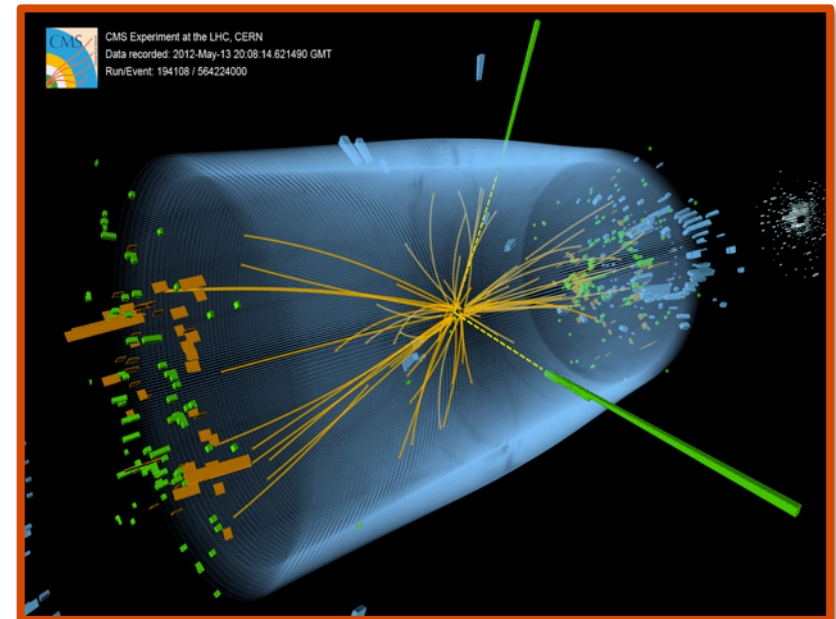
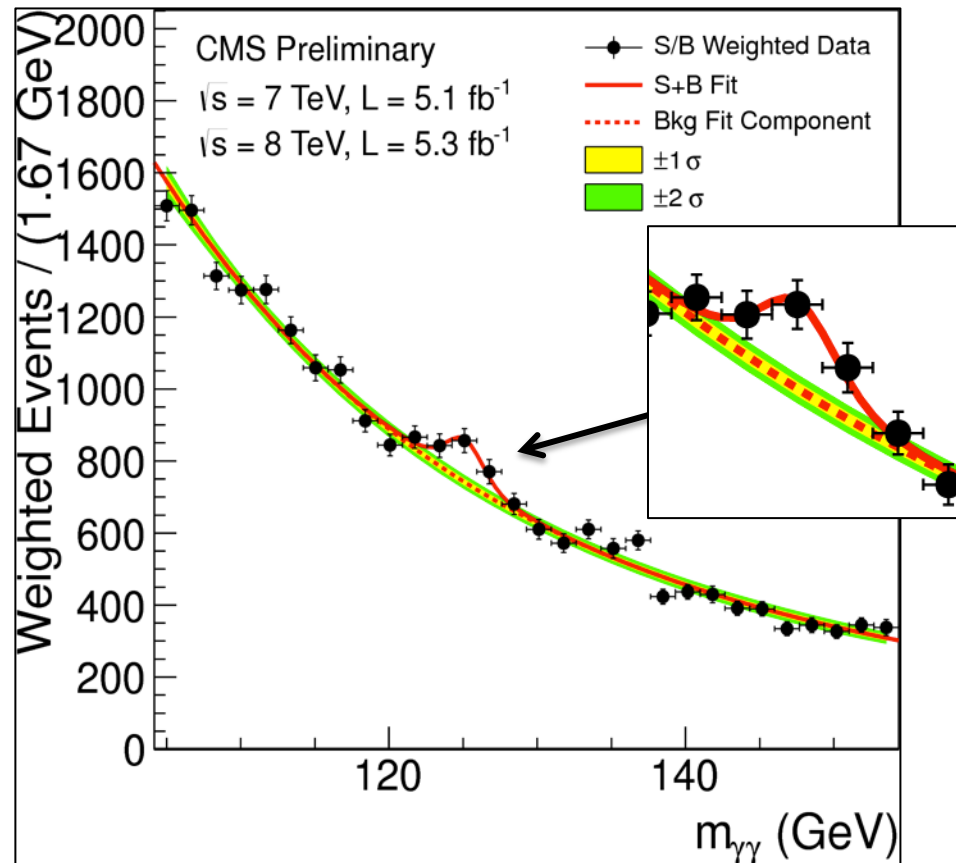
En 2019, un nouveau déclenchement, 40x plus rapide sera mis en place, permettant de décupler les possibilités de LHCb.

Le CPPM est un des acteurs majeurs pour la nouvelle architecture.

Le 4 Juillet 2012... après 20 années de travail

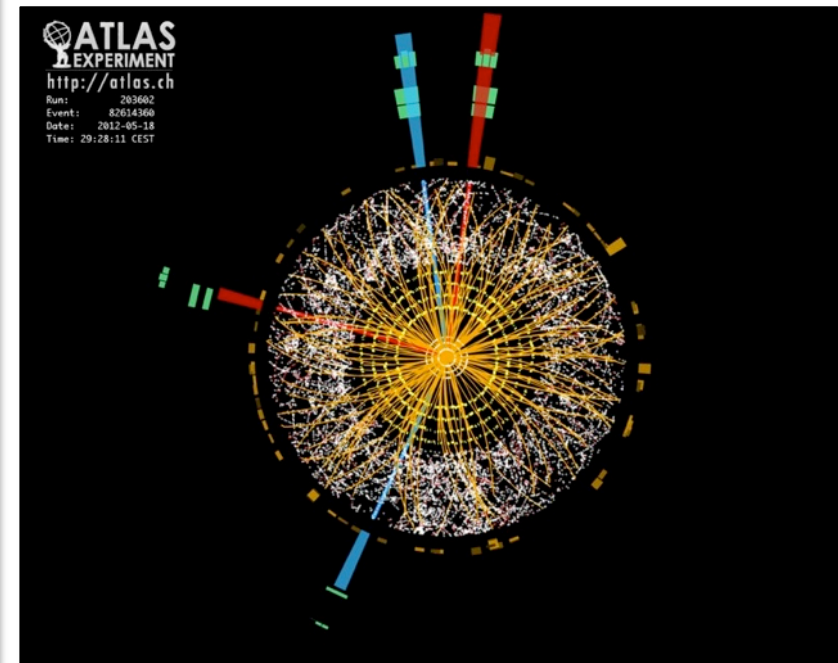
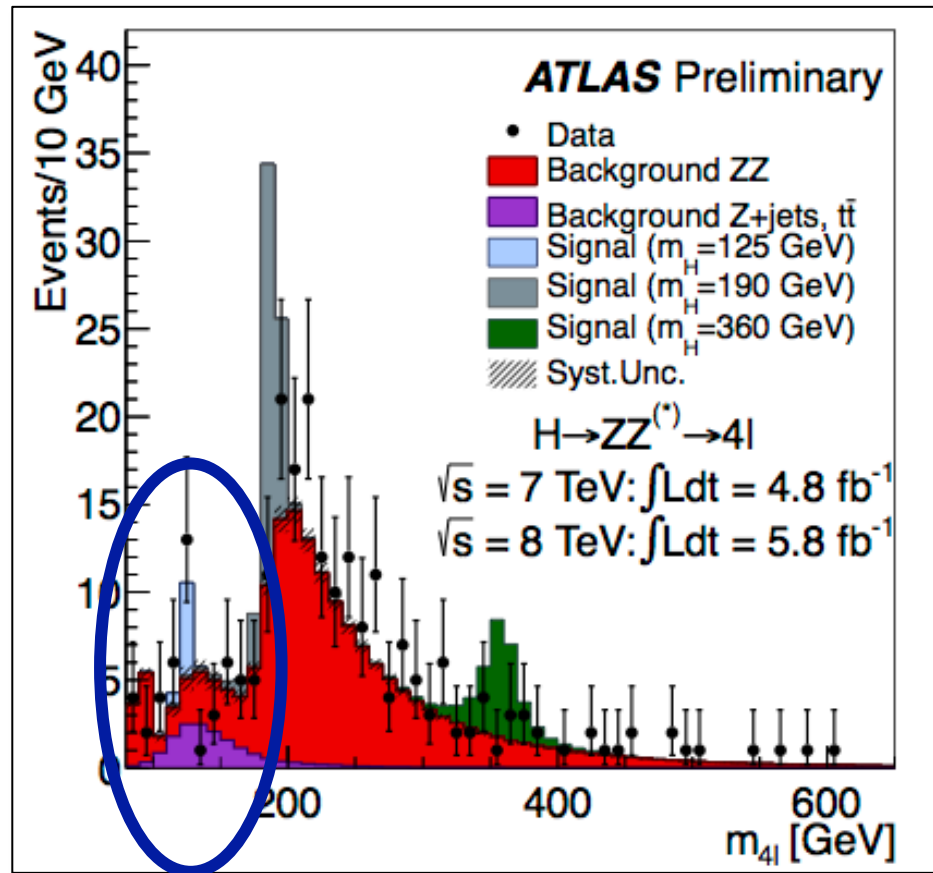
ATLAS et CMS ont dévoilé l'évidence d'un boson à la masse de 125 GeV

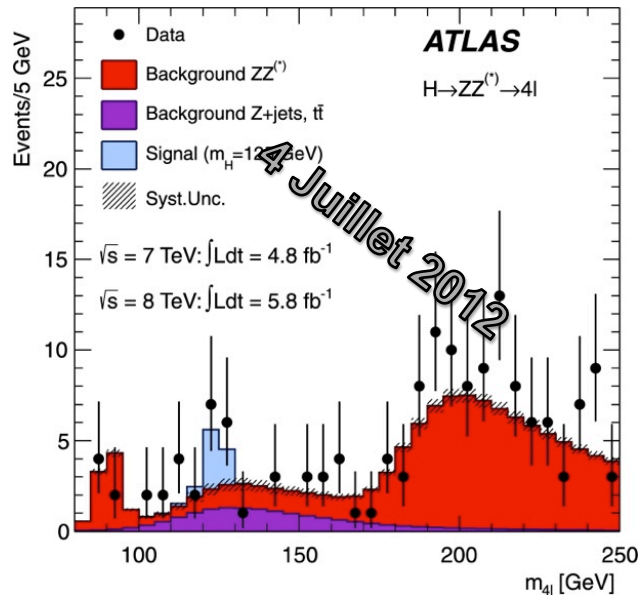
Désintégration $H \rightarrow \gamma\gamma$



4 Juillet 2012 (suite)

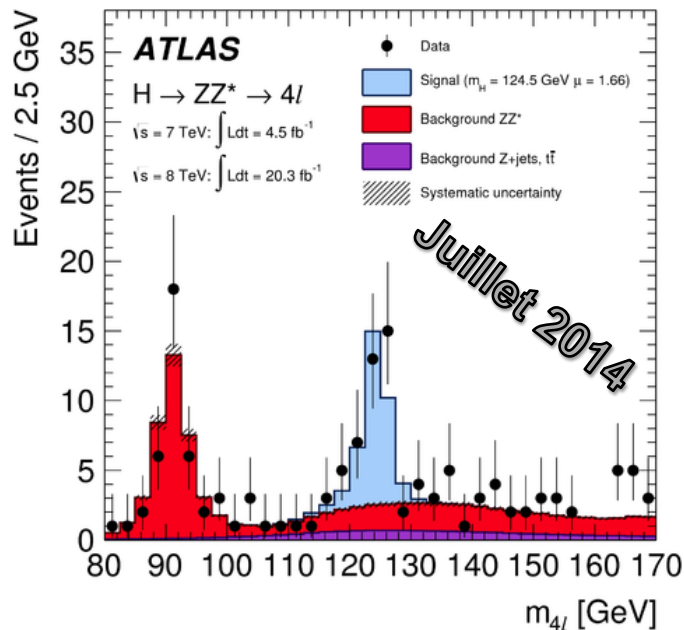
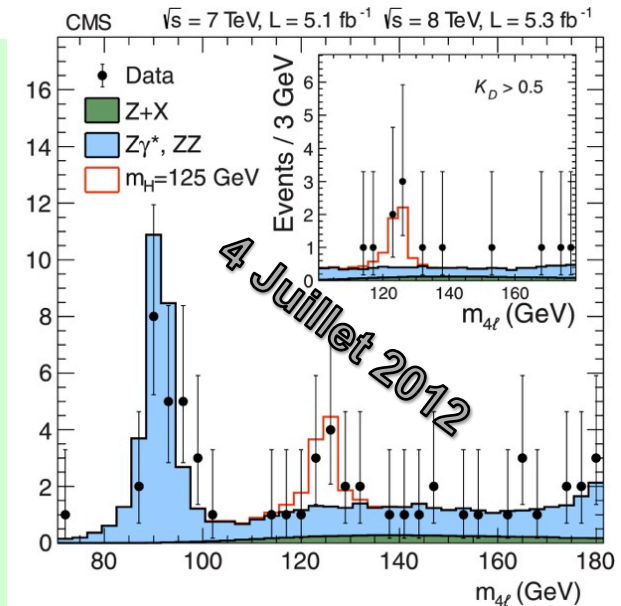
Désintégration $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow (\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-)$ ou $(\mu^+\mu^-e^+e^-)$ ou $(e^+e^-e^+e^-)$





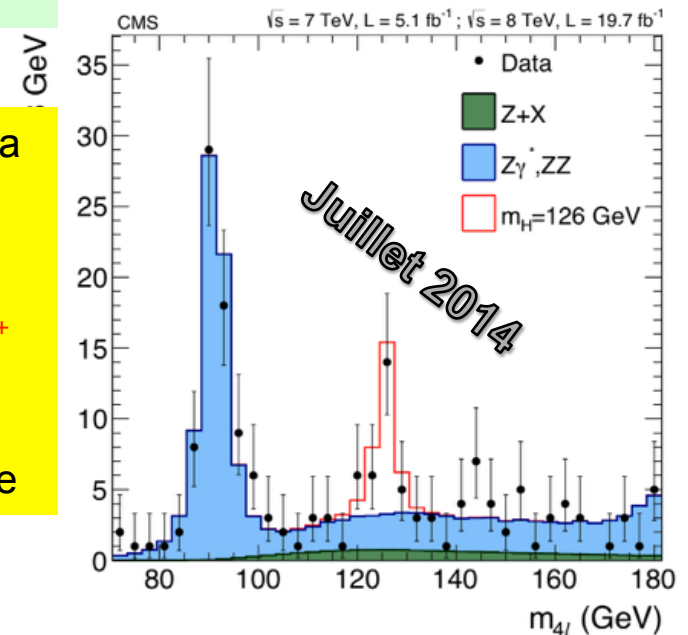
Les expériences ont accumulé des données jusqu'à la fin 2012
 (x 2.5 par rapport à mi 2012)
 et affiné leurs analyses

-augmentation de la certitude de l'observation
 -accès à plus de canaux de désintégrations
 -mesure des propriétés de la nouvelle particule



Les nombres quantiques de la nouvelle particule sont en accord avec ceux attendus pour le boson de Higgs du Modèle Standard : scalaire 0^+

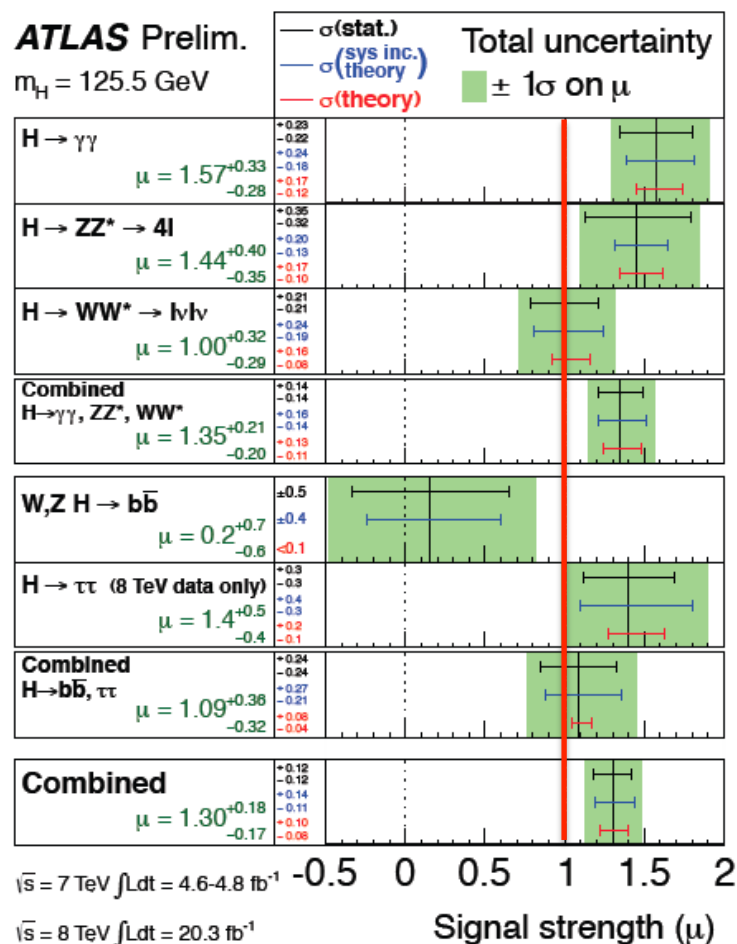
Les autres hypothèses sont exclues à $> 97\%$ de confiance



Force du signal du Boson de Higgs

Une fois connue sa masse, le Modèle Standard prédit exactement les propriétés du Boson de Higgs (production, modes de désintégration).

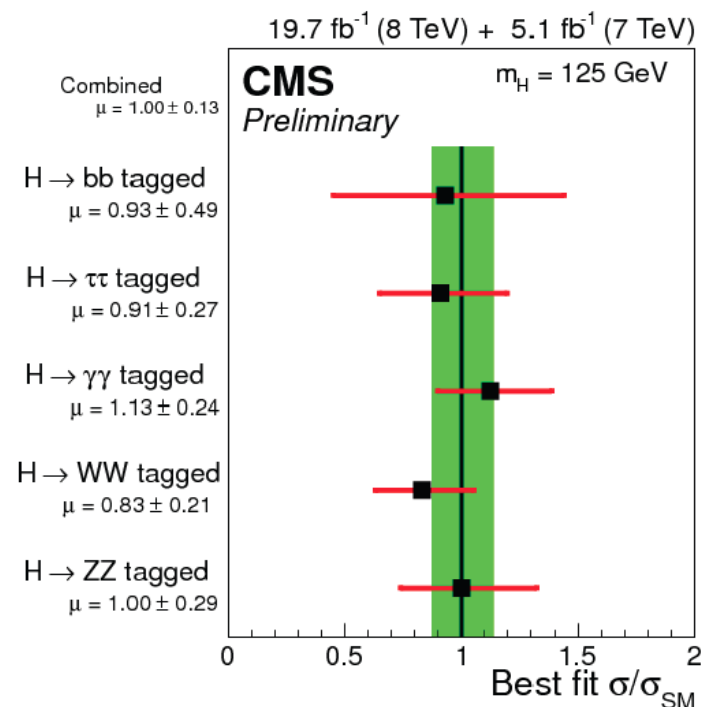
Les observations sont toutes compatibles avec le signal du boson de Higgs attendu dans le Modèle Standard



$$\mu_{\text{ATLAS}} = 1.30 \pm 0.17 \text{ (stat+syst+theo) à } 125.5 \text{ GeV}/c^2$$

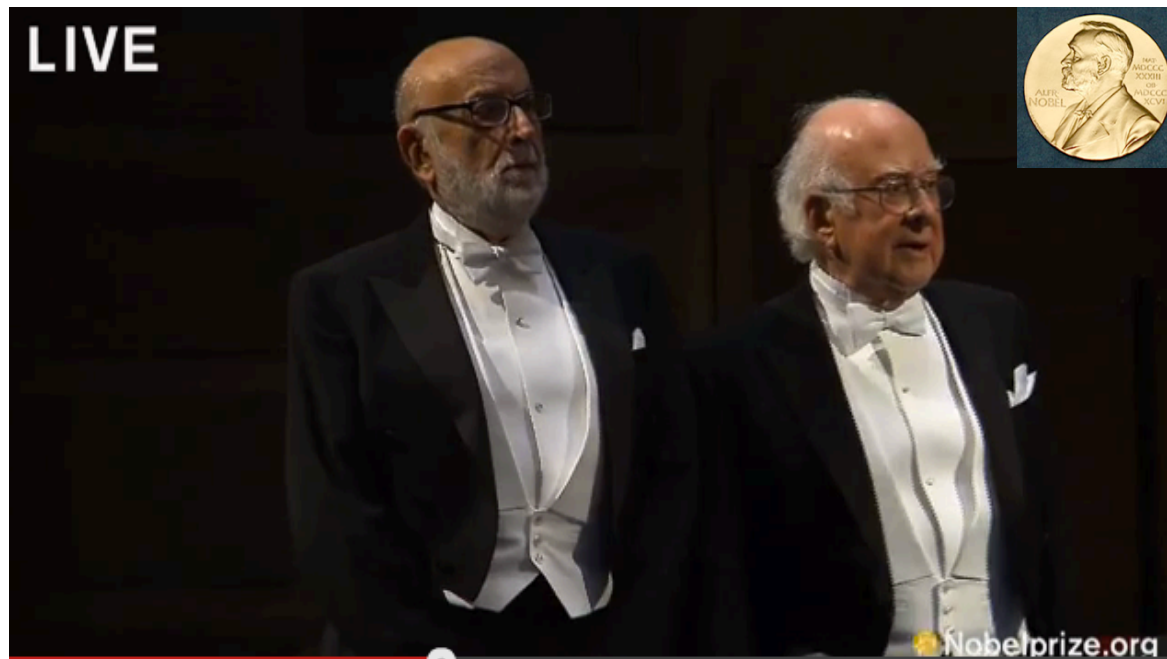
$$\mu_{\text{CMS}} = 1.00 \pm 0.13$$

(μ doit être égal à 1 pour le Boson de Higgs standard)





A ce stade, **toutes les mesures sont compatibles avec l'observation du Boson de Higgs qui consolide le Modèle Standard des Particules**

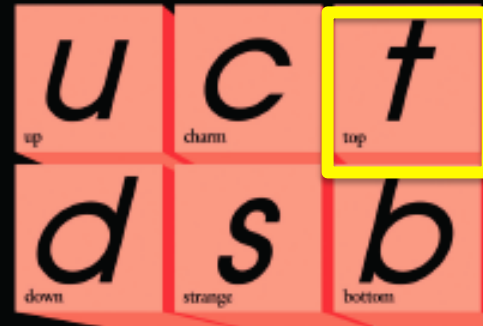


Stockholm, 10 décembre 2013

“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**”

Résumé : faits marquants de l'apport du CERN à la compréhension des éléments fondamentaux et leur interactions

Quarks

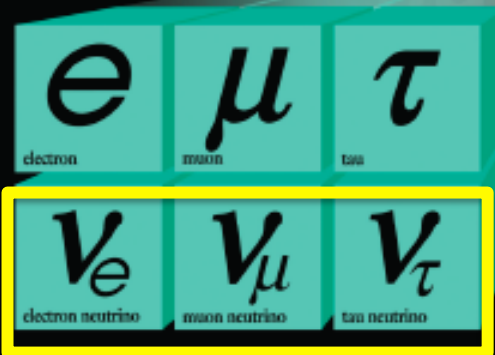


Prédiction masse du top

Forces



Découverte des W, Z (+courants neutres), Higgs



Nombre de neutrinos

Leptons

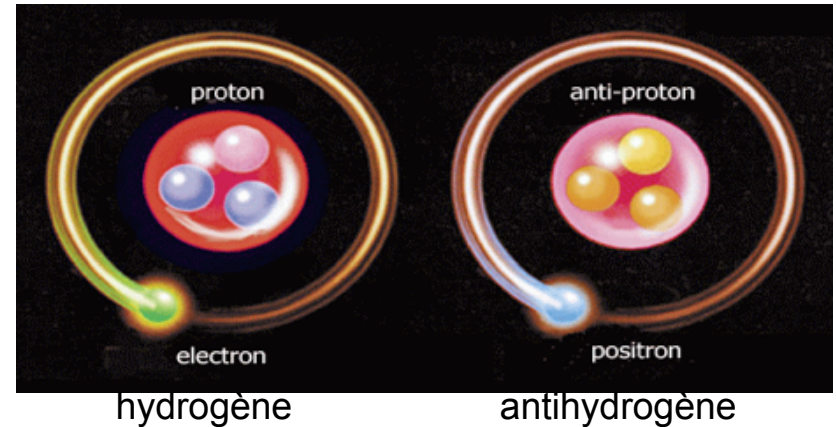
Plus beaucoup d'autres résultats dont je n'ai pas le temps de parler !

LE CERN n'est pas que le royaume de la physique des hautes énergies !

Physique de l'antimatière

Création et piégeage d'atomes d'antihydrogène pour comparer leurs propriétés aux atomes « normaux »

2016-17: mesure de la gravitation de l'antimatière (nouvelle expérience de Galilée) !!!

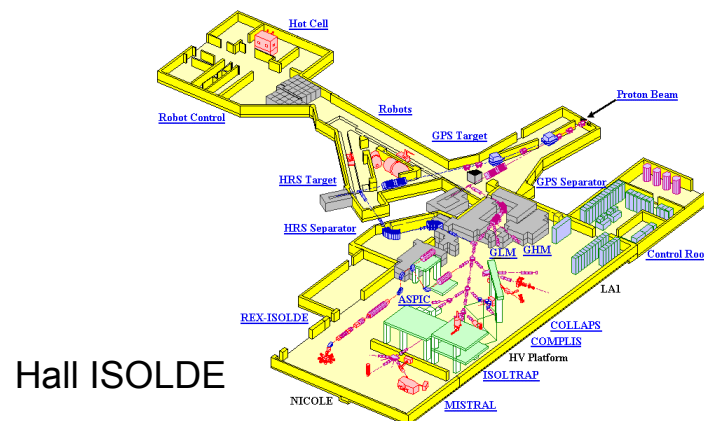


Physique des ions radioactifs (ISOLDE) et des neutrons (nTOF)

Astrophysique

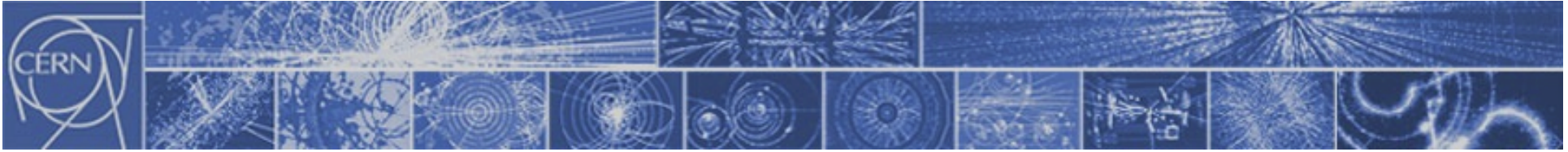
Physique du noyau

Physique du solide et biologie



Hall ISOLDE





CERN et Société

Applications et Retour Industriel

Formation

Rassembler les peuples

Applications: accélérateurs

Le CERN a développé une série impressionnante d'accélérateurs: PS, ISR, SPS, Spbar, LEP, LHC
Technologies innovantes (aimants, supraconductivité)

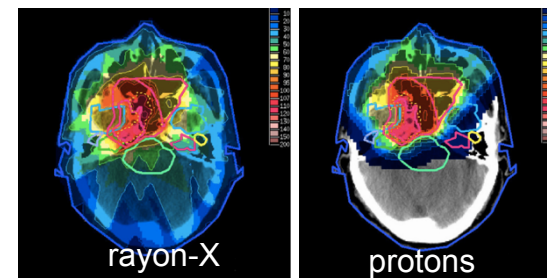
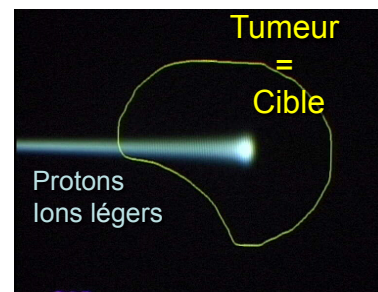
Instrumentation et contrôles

Transfert vers l'industrie (ex: 1/3 des aimants LHC ont été fabriqués par Alstom)

Ces développements sont utilisés bien au delà la physique des Hautes Energies

~30000 accélérateurs dans le monde, 97% dans l'industrie et les hôpitaux

- Source de rayonnement synchrotron : matériaux, microélectronique, structure moléculaire pour biologie et industrie pharmaceutique
- Aimants supraconducteurs pour les IRM
- Production de radio-isotopes
- Thérapie du cancer avec les protons



Leadership en
Europe et au
Japon.

>100'000 patients à travers le monde (45 unités de traitement)
>50'000 patients en Europe (14 unités)

Applications: détecteurs de rayonnement



Georges Charpak



1992



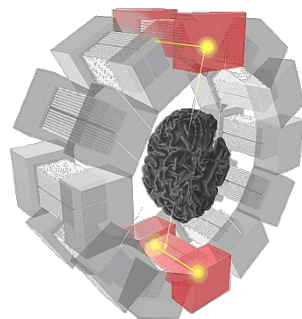
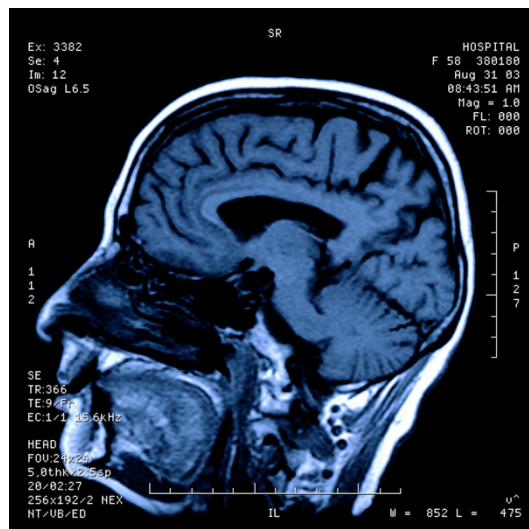
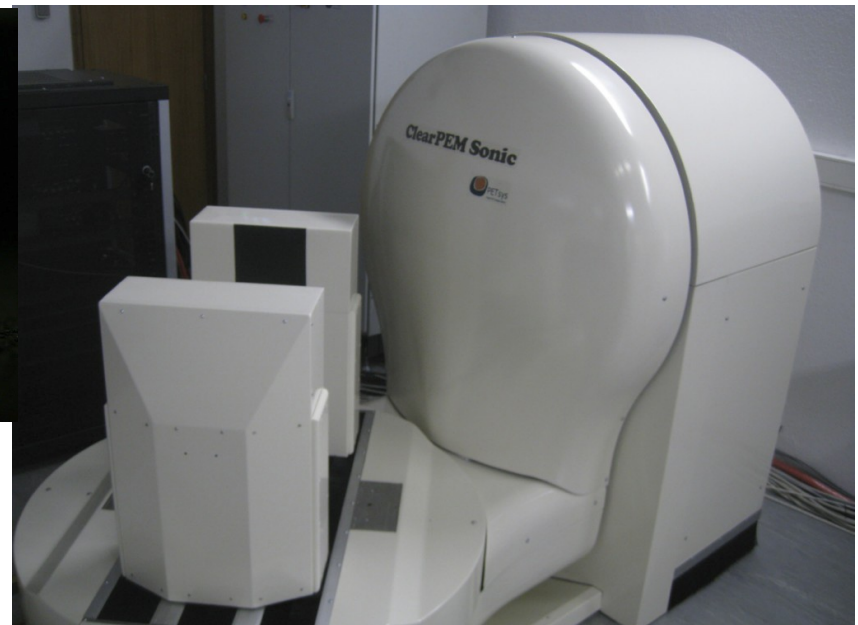
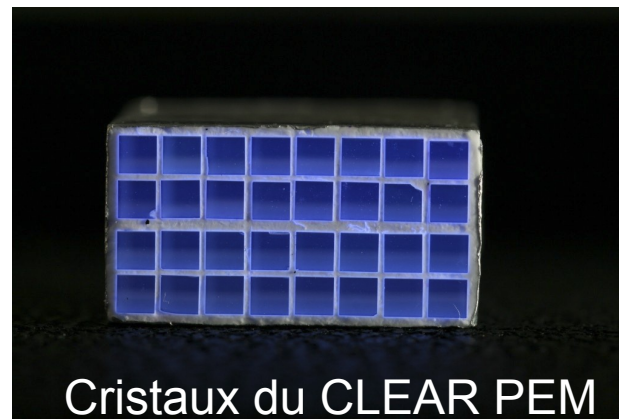
La détection de particules pour les expériences a été une source de progrès essentiels dans la détection des rayonnements ionisants.

- La chambre proportionnelle multi-fil inventée par Charpak en 1964 et ses développements récents (Micro Pattern Gas Detectors)
- Les scintillateurs inorganiques utilisés pour le calorimètre de CMS

Ces détecteurs sont à la source de **l'imagerie médicale** utilisée dans les scanners à rayons X ou les TEP (tomographes électrons positons)

Les progrès permettent en particulier de diminuer la dose de rayonnement aux patients

PET Scanner



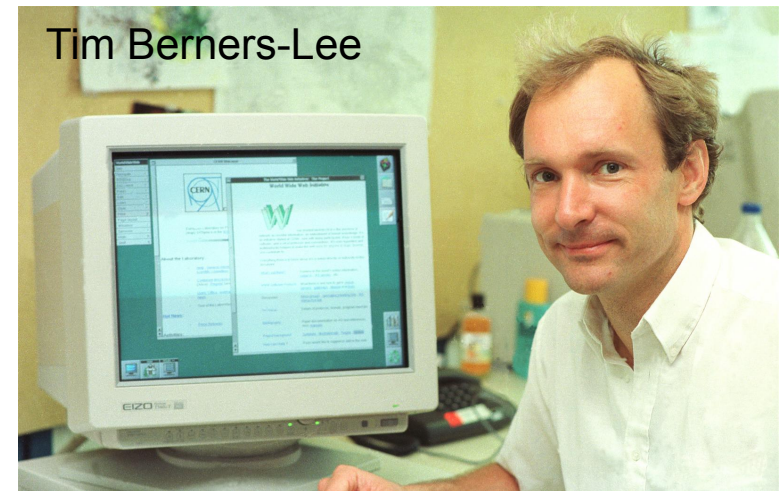
**CLEAR PEM à l'hôpital Nord de Marseille
développé par des équipes travaillant au CERN**

CERIMED

Centre Européen de Recherche en Imagerie Médicale
Campus de la Timone

Les expériences produisent de plus en plus de données qu'il faut **stocker**, **traiter** et **partager** dans le monde entier.

Le CERN a inventé ou poussé le développement industriel de nouveaux concepts dans les technologies de l'information



WWW inventé au CERN en 1990

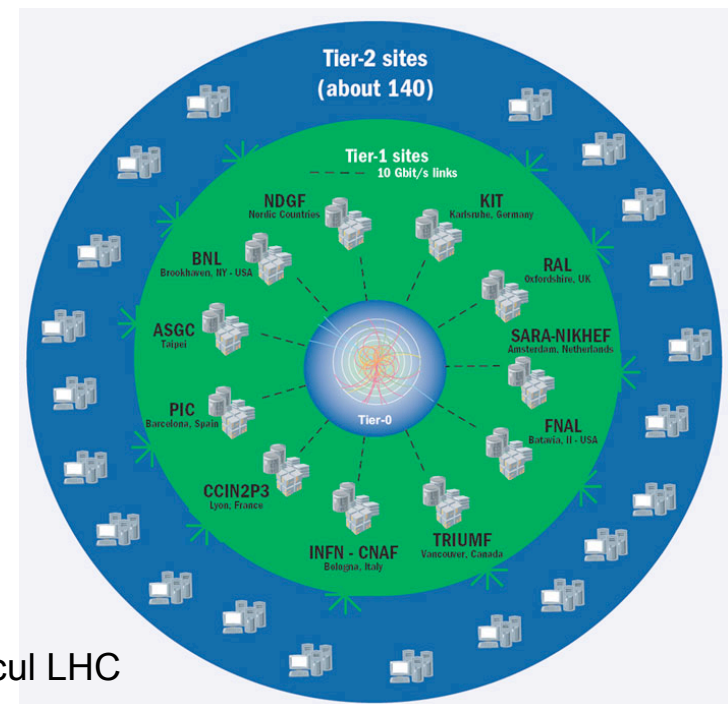
Tim Berners-Lee employé du CERN

Calcul distribué

prototypé pour les expériences LEP 1990

Grille de Calcul

pour les expériences LHC:
Réseau de ~200000 PC's interconnectés
dans 170 centres et 36 pays:
précurseur du CLOUD



Grille de Calcul LHC

CLOUD : une expérience sur le climat

Etude de l'effets des rayons cosmiques sur la formation des nuages

(rayons cosmiques "simulés" par un faisceau de particules, nuages formés dans une chambre climatique)

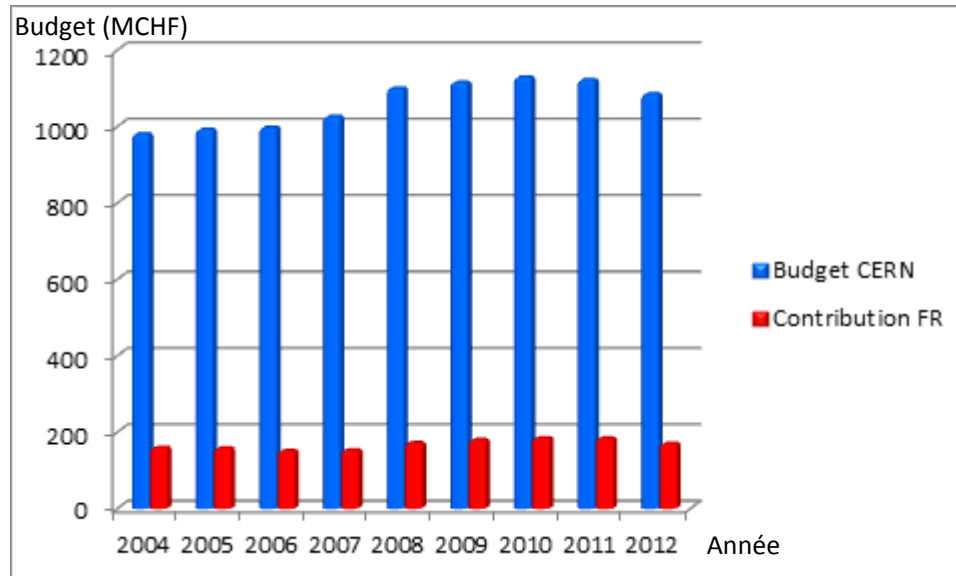




62 contrats
industriels
> 1 MCHF
pour un total de
> 645 MCHF

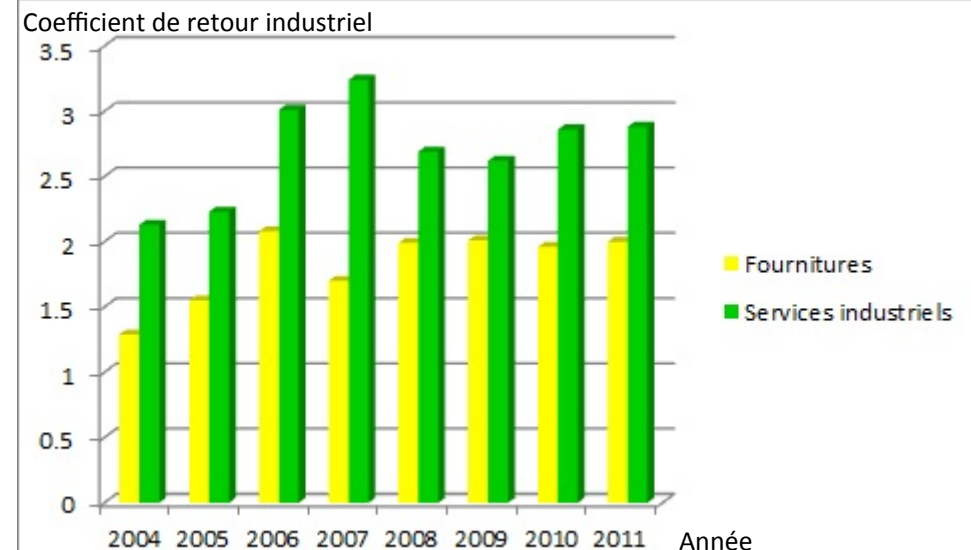
ALSTOM MAGNETS & SUPERCONDUCTORS SA - JEUMONT INDUSTRIE	Cold masses of the superconducting dipole magnets for the LHC.	115 585 365
L'AIR LIQUIDE	23.4 KM LONG COMPOUND CRYOGENIC HELIUM DISTRIBUTION LINE	86 856 319
ALSTOM S.A.	Supply of the dipole inner layer SC cable (1)	56 392 507
ALSTOM S.A.	Supply of the dipole outer layer superc. cable (2)	54 100 659
TAYLOR WOODROW LTD-AMEC CIVIL ENG.LTD-SPIE BATIGNOLLES	LHC Civil engineering construction package (03)	45 786 097
ALSTOM ENERGIE SA - JEUMONT INDUSTRIE	SUPPLY OF THIRTY COLD MASSES OF DIPOLE MAGNETS	38 696 688
INTERTEC CONTRACTING(DK)CEGELEC CENTRE EST(FR)AMEC SPIE FR	Assembly of LHC Cryomagnets on the CERN Site	27 474 427
AMEC SPIE/F-CONTROLMATIC/DE	ELECTRICAL INSTALLATION WORK	23 878 840
AIR LIQUIDE	Supply & instal. of 2 cryogenic helium refrigerators for LHC	16 414 231
INEO-ENDEL-GTI	Assembly of the LHC interconnections in the tunnel	14 360 807
L'AIR LIQUIDE	SUPPLY AND INSTALLATION OF 4 HELIUM REFRIG. UNITS	13 687 268
JEHIER SA	Multi-layer insulation (MLI) for the LHC dipole cryomagnets	13 278 296
TEERAG-ASDAG, C.BARESEL AG, LOCHER & CIE AG	LHC Civil engineering construction (package 01)	11 502 748
EDF & KNIGHT PIESOLD	Civil Engineering Consultancy Services Package 01	8 865 401
AIR LIQUIDE DTA/FR - 40-30/FR - LAMERS/NL	Vacuum Support Activities on the CERN site.	8 840 646
L'AIR LIQUIDE	CRYOGENIC INTERCONNECTION BOXES FOR THE LHC	7 087 706
AIR LIQUIDE	Capacity upgrade of existing LEP2 helium refrig.	5 735 668
AMSE (FR)/ FABRICOM SA (BE)/ PRE-ELECTROMONTAZ (PL)	Installation and removal of Cables for Particle Accelerators	4 378 920
CIRTEM/E.E.I	Supply of Four-Quadrant Switch-mode Power Converters	4 118 501
ALSTOM S.A.	SUPPLY OF WORLDWIDE FIELDBUS ELECTRONIC COMPONENTS AND ASSOCIATED SOF	4 072 670
SERCO FACILITIES MANAGEMENT- INEO ALPES - GERARD PERRIER IND	Essai d'échantillons de fils et câbles supraconducteurs	3 995 489
ASSYSTEM FRANCE - SAPHYMO GMBH	SUPPLY, INSTALLATION AND MAINTENANCE OF RADIATION MONITORING SYSTEMS	3 976 282
ALSTOM S.A.	Supply of enamelled superconducting wire for the LHC magnets	3 764 542
G.E.I.E GEMATEC (ELYO, SCHMEINK-COFR., DELATTRE-L., BELLEU)	Maintenance, exploitation et petits travaux d'installation pour les syst. de refroidi	3 608 747
AMEC SPIE COMMUNICAT/FR + MELOTTE INSTALLATIETECHNIEK B.V/NL	SUPPLY OF A CERN SAFETY ALARM MONITORING SYSTEM	3 561 126
THALES INDUSTRIAL SERVICES	Supply of 400 MHz, 300 kW cw klystrons for LHC	3 438 817
D.B.S. TECHNIQUE	Transport and Handling Services	3 289 645
L'AIR LIQUIDE	12 cryogenic feed boxes for the test of the LHC magnets	3 190 145
AIR ET CHALEUR-DSD-SPIE TRINDEL	HEATING COOLING VENTILATION SURFACE BULDINGS LHC	3 097 240
SOCIETE DES CERAMIQUES TECHNIQUES (SCT) USF (US FILTER COMP)	Instrumentation Feedthrough Cover Flanges	3 095 804
ALSTOM ENERGIE SA - JEUMONT INDUSTRIE	SUPPLY OF SUPERCONDUCTING COLLARED COILS	2 367 704
CENTRE ELECTRONIQUE DE LAVAL	Supply of 60A, 8V Four Quadrant Switch-mode Power Converters	2 201 304
SERCO FACILITIES MANAGEMENT/NL - GPI/FR - INEO ALPES/FR	Technical services for work of components of CERN Particle A	2 116 321
CICERON	Location de camion-grues avec chauffeur	2 115 006
INSTITUT DE SOUDURE (IS)	Inspections of Welds Executed at CERN on LHC Equipment	1 979 043
CERCA	Supply of LHC Collimators	1 961 367
COSSEC - WATERMANN INTERNATIONAL	Mission coordination securite, sante, cond.travail pour Lhc	1 945 709
ENDEL/FR + AXIMA/BE + GTI/NL	Operation and Maintenance of cooling and ventilation	1 920 029
DATE DEVELET APPLIC.DES TECHNIQ.DE L'ENERGIE	SUBCOOLING HELIUM HEAT EXCHANGERS FOR LHC	1 900 904
GROUPE SCHNEIDER	Framework cond.of program. logic control.&automation product	1 888 869
AMEC SPIE/FR, WINTER GMBH/DE	Supply and Instal. of Automatic Gas Detection Systems	1 816 124
GTD/ES-CEGELEC/FR-ALSTOM S&S/BE	CONTROL SYSTEM FOR LHC CRYOGENICS	1 814 829
SETIC S.A.S.	Supply of one machine for manufacturing superconducting cables for LHC	1 800 291
CONSORTIUM SETIS (LEADER), INTROTECH BV, MAP GEOMATIQUE	Geometrical Metrology of the LHC Cryo-Magnets	1 757 696
SPIE-TRINDEL	Travaux de maintenance du système de commande des ISR (câblage électronique €	1 713 098
CEGELEC CENTRE EST(FR) CEGELEC B.V. (NL) SEMER (FR)	SUPPLY, INSTALLATION, COMMISSIONING AND MAINTENANCE OF THE LHC ACCESS	1 600 957
CEGELEC	DESIGN, SUPPLY, INSTALLATION AND MAINTENANCE OF THE LHC ACCESS CONTROL	1 556 426
SGS FRANCE	IS for Vacuum work for the CERN Accelerators	1 399 092
SADE - CIE GEN. DE TRAVAUX D'HYDRAULIQUE	LHC/DETOURNEMENT CONDUITES...	1 327 165
SIGMAPHI S.A.	SC Corrector Magnets MCBX for the inner triplets of the LHC	1 311 324
AMEC SPIE AC SA (EX AIR CHALEUR SA)	SUPPLY, INSTALLATION AND MODIFICATION OF AIR-HANDLING SYSTEMS FOR LHC	1 260 390
METAREG	Travaux de serrurerie, menuiserie métallique et charpente	1 228 679
HAZEMEYER SA	TABLEAUX DE DISTRIBUTION BASSE TENSION 400V	1 220 183
JEHIER SA	Supply of Multi-Layer insulation (MLI) for the SSS	1 204 077
ALSTOM S.A.	SUPPLY OF SUPERCONDUCTING MULTI WIRE CABLE	1 181 742
G.T.D / ES - CETE APAVE / FR	Coordination sécurité&santé pendant installation projet LHC	1 171 728
SGS QUALITEST, SGS GOTTFELD, LOGITEST, AMEC SPIE	IS for Vacuum work for the CERN Accelerators	1 165 906
SIGMAPHI S.A.	Supply of resistive coils for the ALICE muon arm dipole magn	1 106 468
L'AIR LIQUIDE	Supply and installation of a PRE-SERIES TEST CELL	1 059 051
SIMRAD OPTRONICS ICARE (ICARE SA)	Blanket purchase contract for automatic air-sampling systems for fire and gas dete	1 055 261
TECPHY S.A. (GROUPE H.T.M.)	SUPPLY OF 21 VACUUM TANKS FOR LHC SUP.CAVI	1 008 467

La France et le CERN – retour industriel



**Contribution française
15% - 16% du budget**

Coefficient de retour industriel
Rapport entre le pourcentage des achats
avec une **origine française** et le
pourcentage de la **contribution française**
au budget du CERN.



Jeunes Chercheurs

CERN School of High Energy Physics
CERN School of Computing
CERN Accelerator School



Etudiants (licence, Master)
Programme des étudiants d'été
~250 étudiants/an



CERN Teacher Schools
Programmes nationaux et
internationaux: professeurs du
secondaire

Master Classes
234 événements par vidéo en 2013



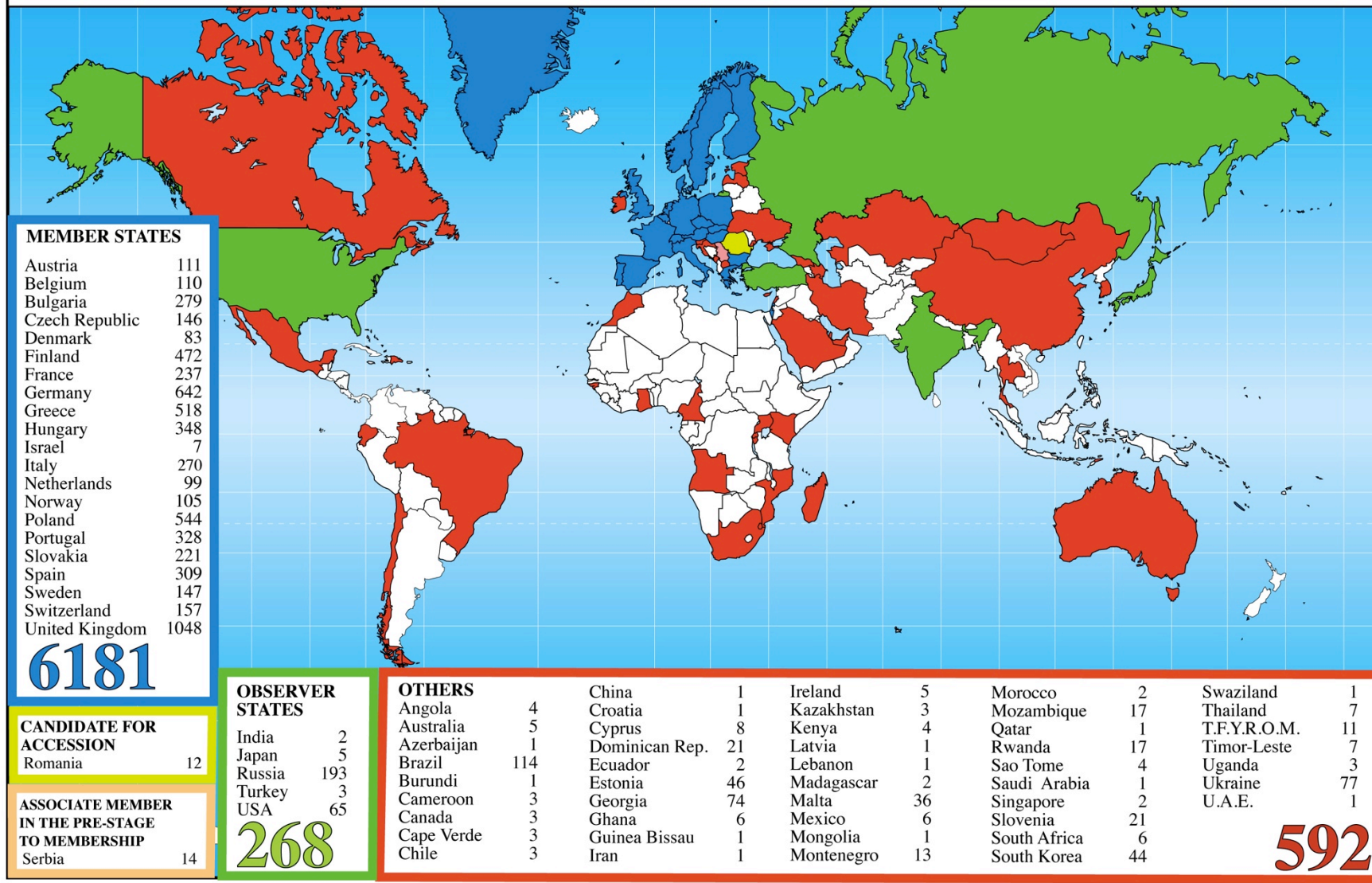
← Attirer les jeunes vers la science
à travers leurs professeurs



Programme pour les professeurs de physique de l'enseignement secondaire

53

Teacher Programme Participants 1998 - 2013 (Total: 7067)



Visites, expositions

<http://outreach.web.cern.ch/outreach/FR/index.html>



Expositions

Proche de la réception du CERN l'exposition Microcosm raconte l'aventure scientifique du CERN.



Visites guidées

100000 visiteurs par an

Venez découvrir la recherche fondamentale en pénétrant au coeur du plus grand laboratoire de physique des particules du monde.



Passeport Big Bang Parcours vélo

- Un parcours touristique et scientifique composé de dix plateformes d'exposition au-dessus de l'anneau du LHC dans le Pays de Gex et le Canton de Genève. Les plates-formes expliquent les recherches menées au CERN et sont reliées par 54 kilomètres d'itinéraires cyclables balisés. Les visiteurs peuvent participer à un jeu de piste, la "Mission LHC", grâce à des bornes interactives sur chaque plateforme.



Expositions itinérantes

La possibilité de rencontrer le CERN au travers d'exposition circulant dans de nombreux pays. Peut-être près de chez vous ?



Rassembler nations et cultures

Fidèle à l'esprit de sa création, le CERN est à la pointe du rassemblement des nations et de la promotion de la paix

Collaboration au delà du rideau de fer dès 1959

Yougoslavie un des 12 états fondateurs

Accord avec JINR-Dubna en 1959,

Premier accord avec l'URSS 1964, contribution au LHC 1996

Inclusion des pays de l'Est avant l'Union Européenne

PL 1991, HU 1992, CZ+SL 1993, BG 1999,

Roumanie en cours, Serbie associée en 2012

Accords de coopération avec l'Asie :

Inde and Chine contribuent aux expériences depuis 1970

Accord avec le Japon depuis LEP

Accord avec la Chine en 1988

Accords de coopération avec les USA, le Canada...

Projet Européens HELEN et Eplanet avec l'Amérique Latine

....

Au CERN, étudiants d'été Israéliens et Palestiniens font la fête ensemble,

Pakistanaï et Indiens, Américains et Iraniens travaillent ensemble.

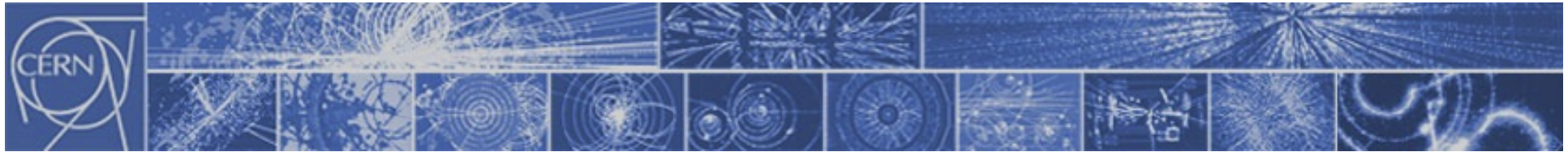
Le CERN a obtenu un siège d'observateur à l'ONU en décembre 2012



Matériel soviétique arrivant au CERN en 1977



Délégation Chinoise au CERN en 1973



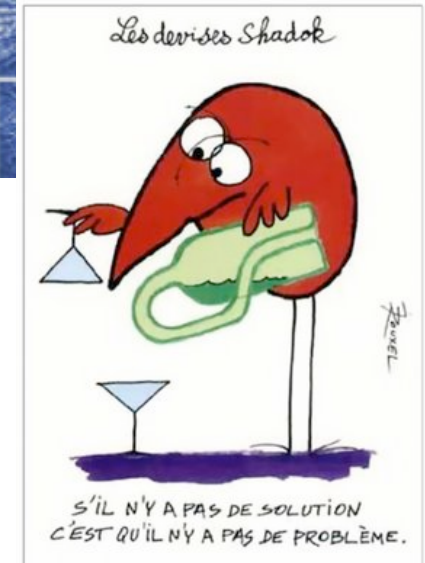
Le Futur



Questions sans réponse

Est ce que la découverte du Boson de Higgs sonne la fin de la recherche en physique de l'infiniment petit?

NON !



Il reste encore bien des mystères à élucider ! Quelques exemples:

En physique des particules:

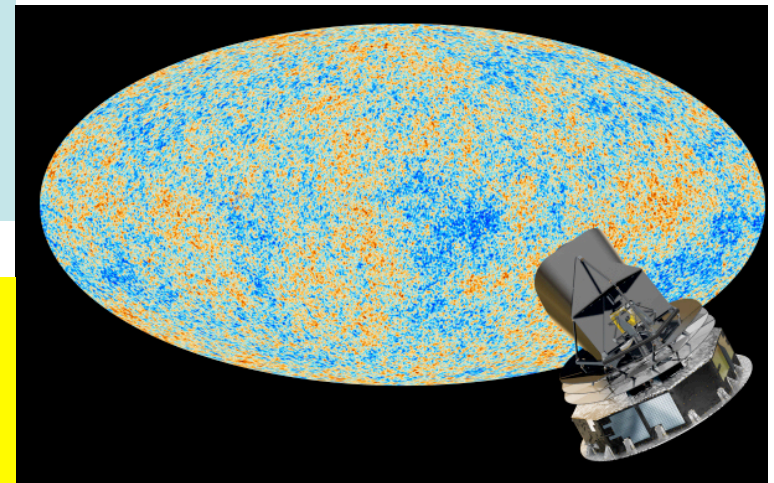
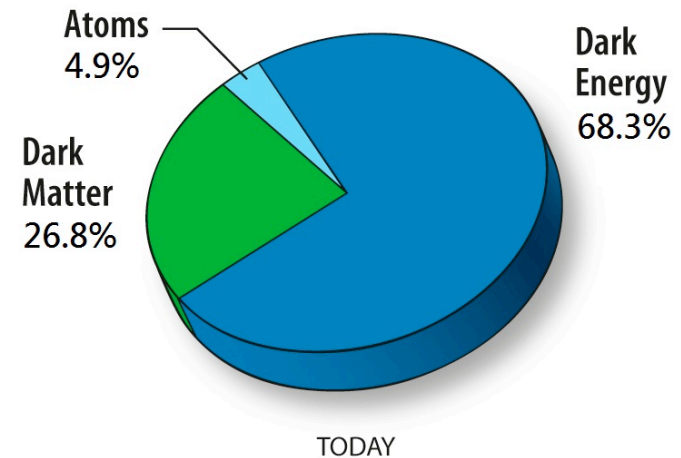
- **l'unification des forces** fortes et électrofaibles n'est pas démontrée.
- **la gravitation** n'est pas incluse dans le Modèle Standard, et nul ne comprend pourquoi elle est si faible (10^{17}) par rapport aux autres forces.
 - Certains théoriciens pensent qu'il y a des dimensions supplémentaires microscopiques (extra-dimensions) qui sont responsables de cette dilution.
- Les expériences récentes ont montré que **les neutrinos ont une masse**, ce qui n'est pas inclus dans le Modèle Standard.
- **La masse du boson de Higgs** ne peut être comprise en l'absence d'une nouvelle physique à une échelle proche du TeV.

Questions sans réponse (2)

En cosmologie

- Dans les années 70, on s'est aperçu que les bras des galaxies spirales tournaient trop vite.
Indication de matière non visible qui augmente la force de gravitation.
- De nombreuses observations ont confirmé l'existence de cette « **matière noire** » qui est **5x plus abondante que la matière ordinaire**. Depuis, les observations des satellites ont montré l'existence d'une **Energie Noire** encore plus importante !
- Pourquoi l'**antimatière** a-t-elle disparu de notre univers?

Les modèles théoriques qui tentent de répondre à ces questions prévoient l'existence de Nouvelle Physique. La grande majorité prédisent l'existence de nouvelles particules à l'échelle du TeV, peut être accessible au LHC



Satellite Planck ESA



La Stratégie Européenne



1. 2015: Pousser le LHC à son énergie maximale

Le LHC va atteindre son énergie nominale 7-7 TeV

A cette énergie, la probabilité de découvrir une nouvelle particule de 2 TeV est 20x plus grande qu'à l'énergie actuelle.

2. 2023: augmenter le nombre de collisions d'un facteur 5 (HL-LHC)

Etude précise (à quelques %) des désintégrations du Boson de Higgs pour traquer toute anomalie. Continuer la chasse à la Nouvelle Physique.

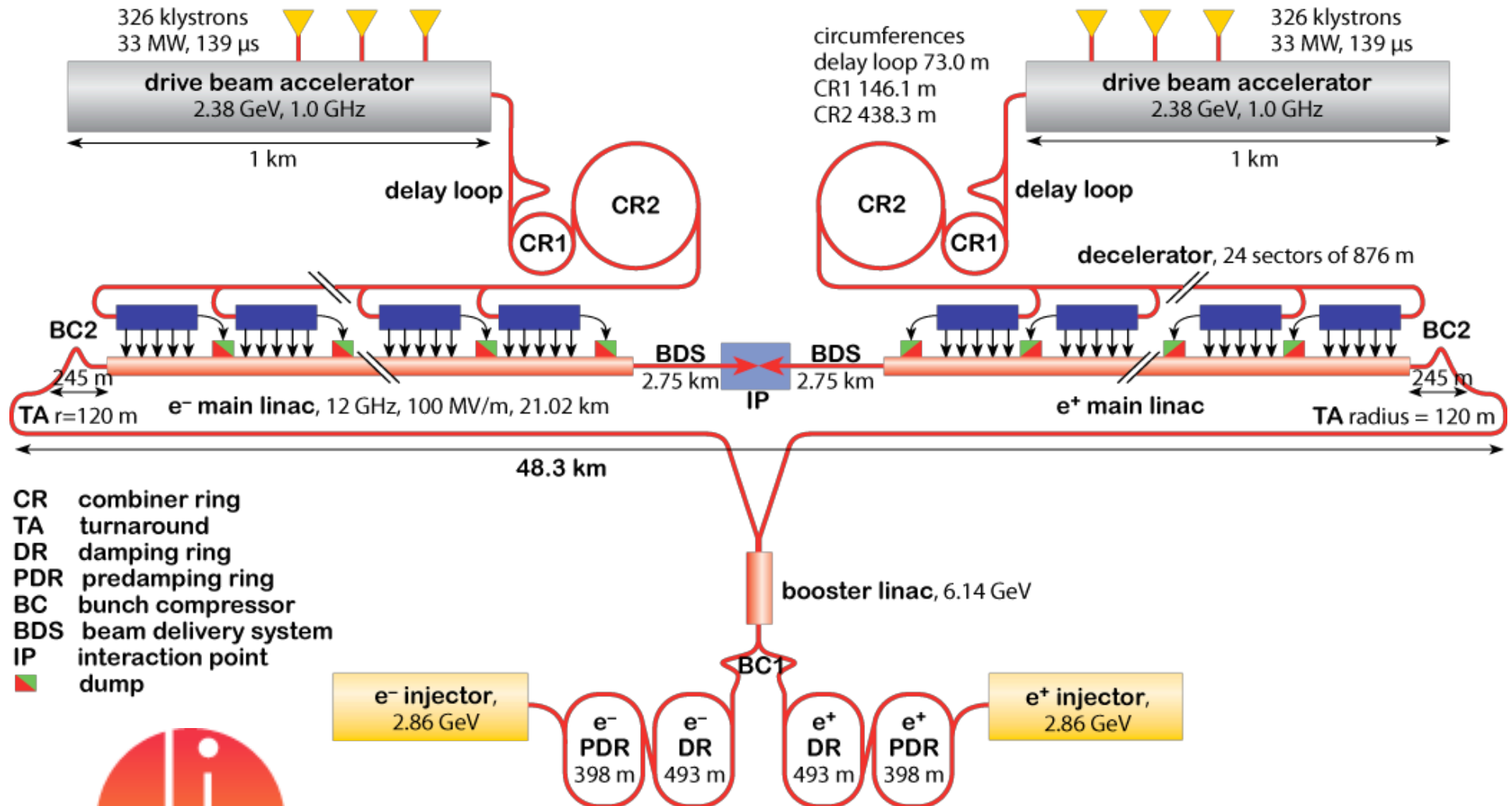
En 2035, le LHC aura accumulé 100x plus de données que fin 2012

3. Etudier les accélérateurs du futur pour > 2035

Deux projets en cours d'étude:

- i) collisionneur électron-positon de 3 TeV de 50 km
- ii) Tunnel circulaire de 100 km qui permettrait d'inclure un collisionneur proton-proton (Fcc-hh) de 50-50 TeV (et un éventuellement collisionneur électron position (Fcc-ee) produisant des millions de bosons de Higgs).

Cette stratégie (unanimentement acceptée par le Conseil du CERN en 2013) est en phase avec les stratégies en Amérique et en Asie, car la science lourde devient nécessairement globale.



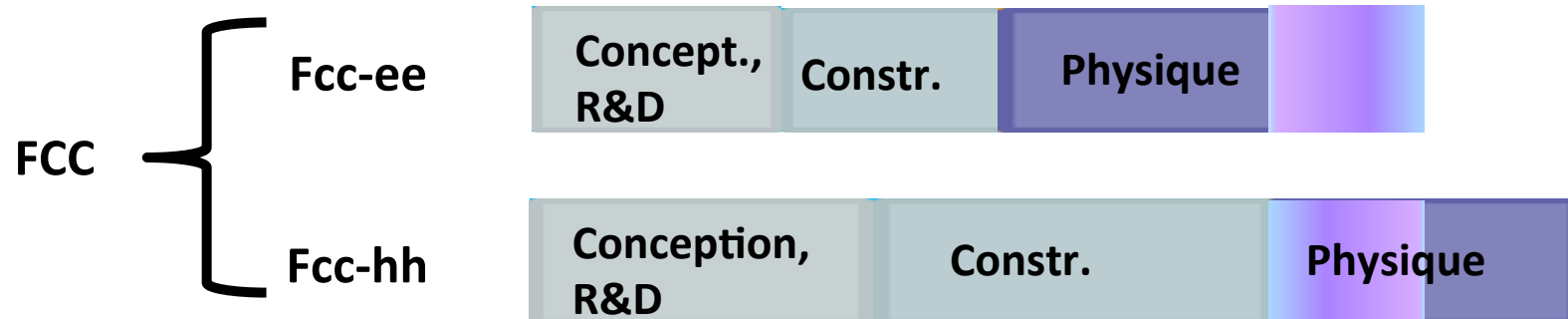
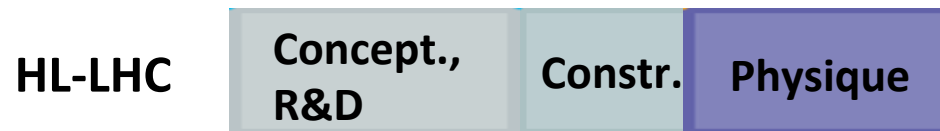
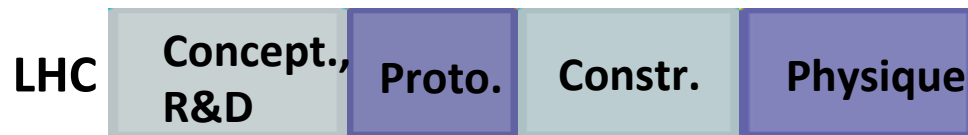
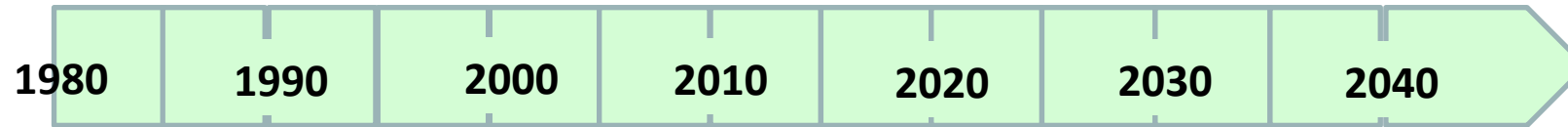
Projet CLIC: Linéaire pour collisions e⁺e⁻ à 3 TeV



FCC : Future Collisionneur Circulaire



Un calendrier possible





Conclusions

Le CERN est un exemple (rare !) de réussite de collaboration Européenne pavée de découvertes et de contributions de premier plan à la recherche fondamentale.

En mettant leurs forces en commun. Les Européens ont réussi à reprendre le leadership dans la physique expérimentale des Hautes Energies.

La recherche fondamentale au CERN est riche de retombées dans la société, contribue au progrès technologique, à la formation des générations futures et à l'attraction des jeunes vers les métiers scientifiques

Le CERN dépasse maintenant les contours de l'Europe, s'ouvrant en particulier aux pays émergents. La globalité est une condition nécessaire à la science « lourde » qui nécessite de grandes infrastructures. La science est un excellent moyen de rassembler les peuples et les cultures et contribuer à la paix.

Une étape a été franchie avec la découverte du Boson de Higgs, mais de nombreuses questions restent ouvertes sur notre connaissance de l'Univers et de ses lois fondamentales : l'avenir est riche et prometteur !