

# La saga du LHC

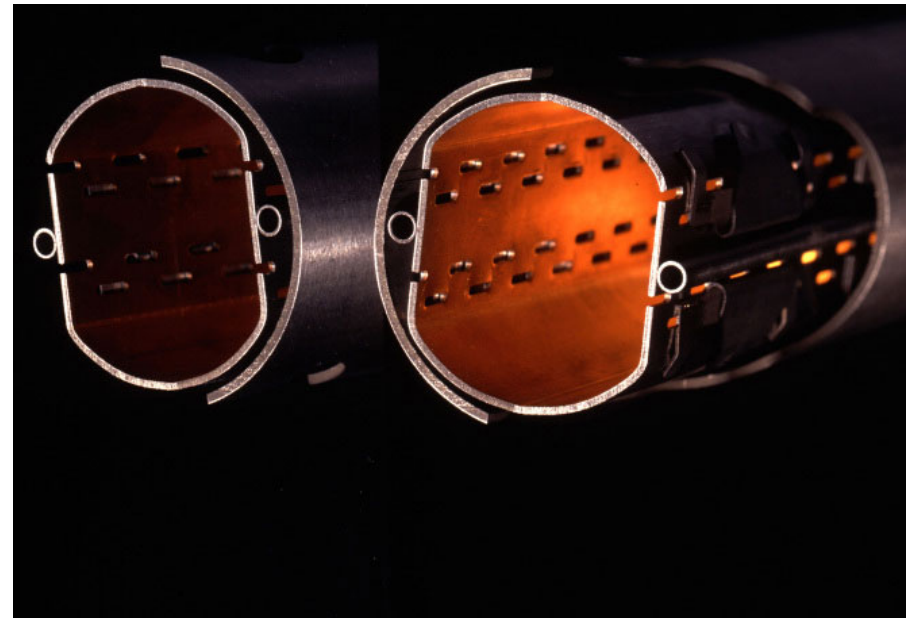
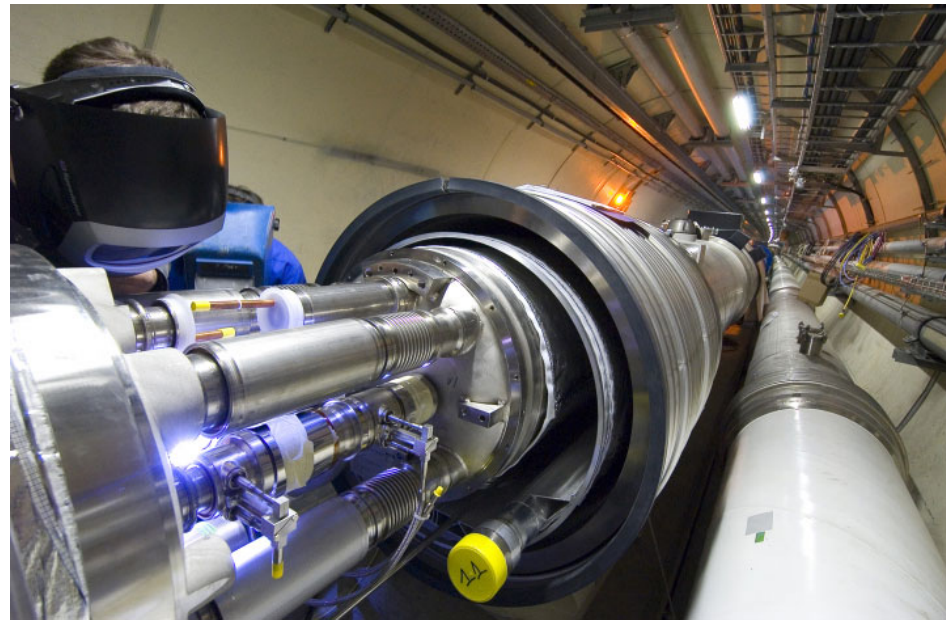
## le Grand Collisionneur de Hadrons

# Le champ de course le plus rapide de la planète



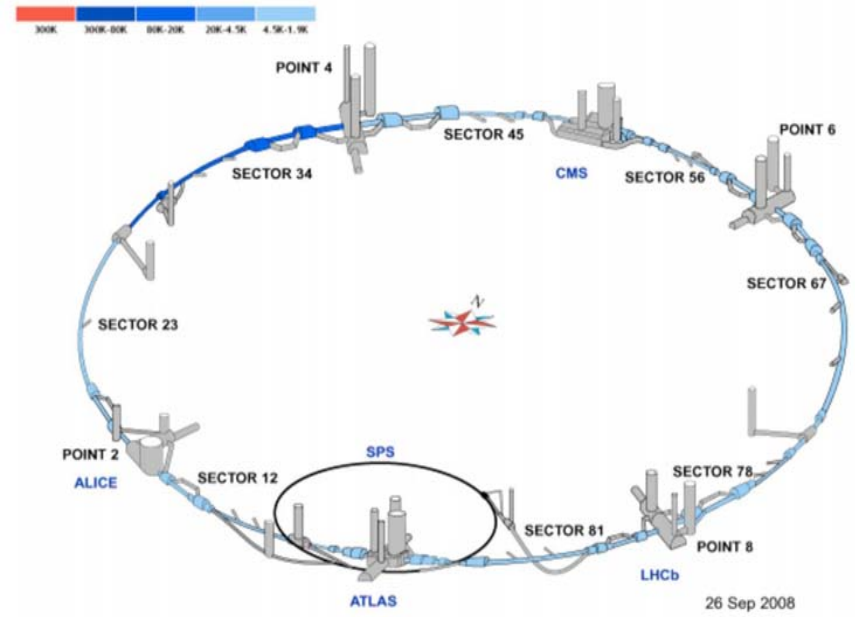
Plusieurs milliers de milliards de protons vont voyager à 99.9999991% de la vitesse de la lumière dans un anneau de 27 km de long à raison de 11 000 tours par seconde.

# L'espace le plus vide de tout le système solaire



Pour accélérer des protons à une vitesse proche de celle de la lumière, on a besoin d'un vide similaire à celui de l'espace intersidéral. La pression atmosphérique dans le LHC est dix fois plus faible que sur la lune.

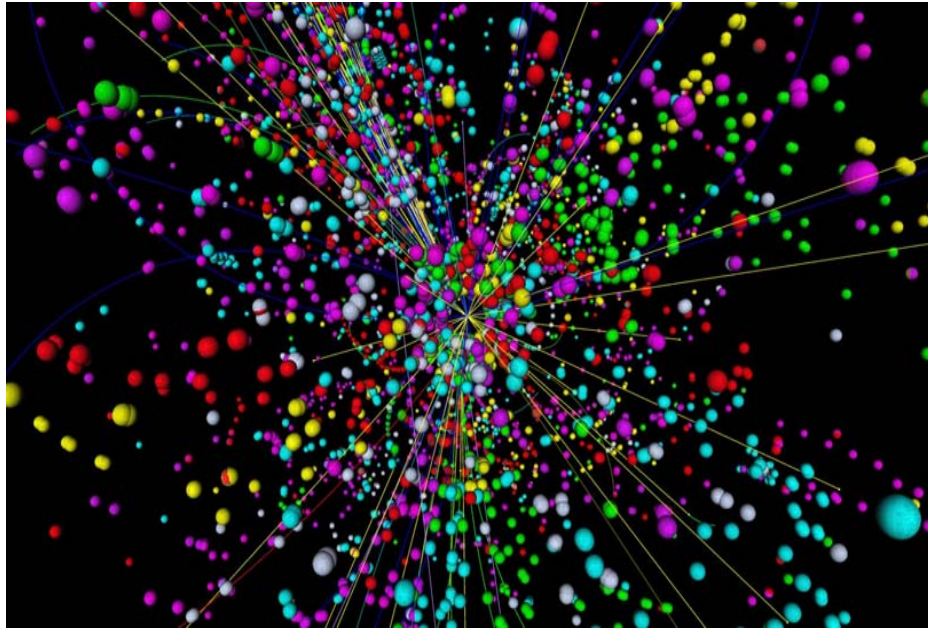
# L'un des endroits le plus froid de l'Univers ...



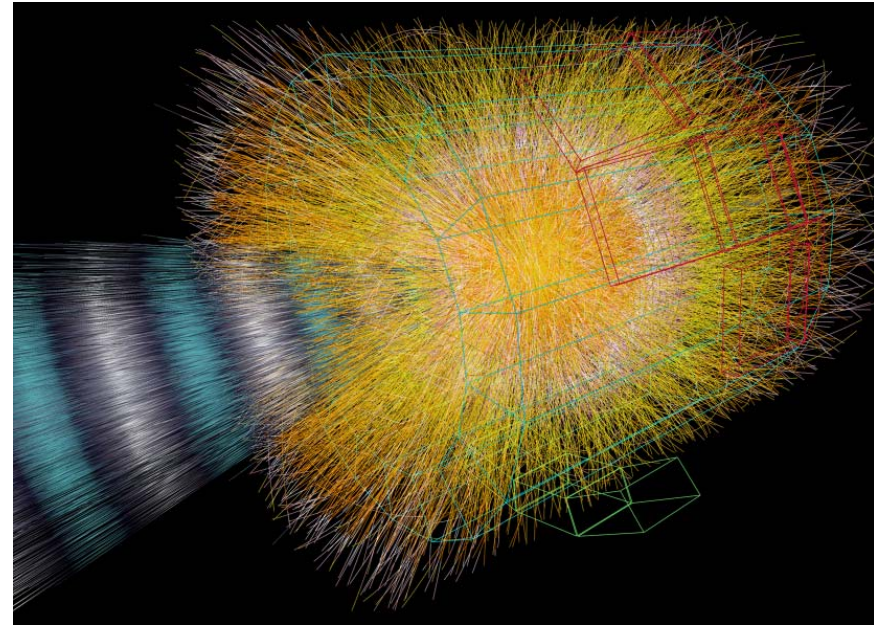
Avec une température de -271 degrés Celsius, soit 1.9 degrés au-dessus du zéro absolu, le LHC est plus froid que l'espace interstellaire.

120 tonnes d'Hélium superfluide sont nécessaires pour refroidir les 9 600 aimants supraconducteurs du LHC.

# L'un des endroits les plus chauds de la Galaxie ...



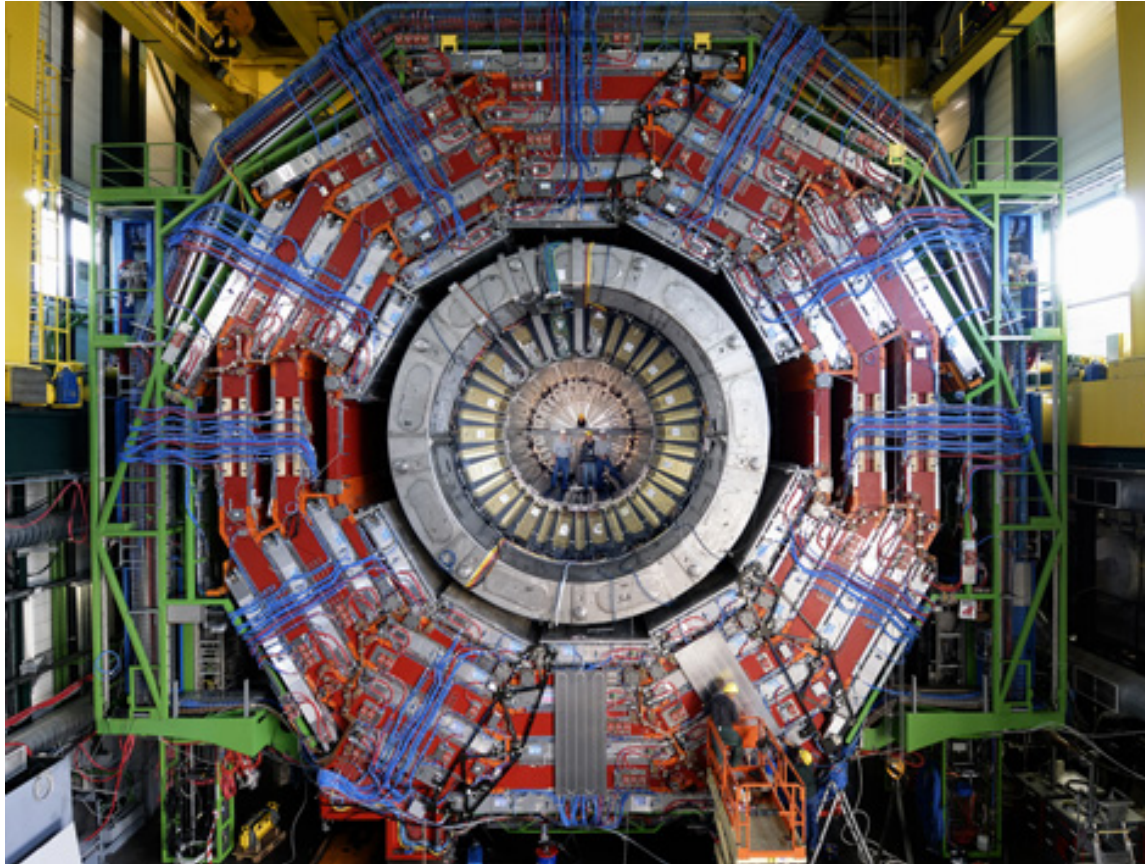
Simulation d'une collision dans l'expérience CMS



Simulation d'une collision dans l'expérience ALICE

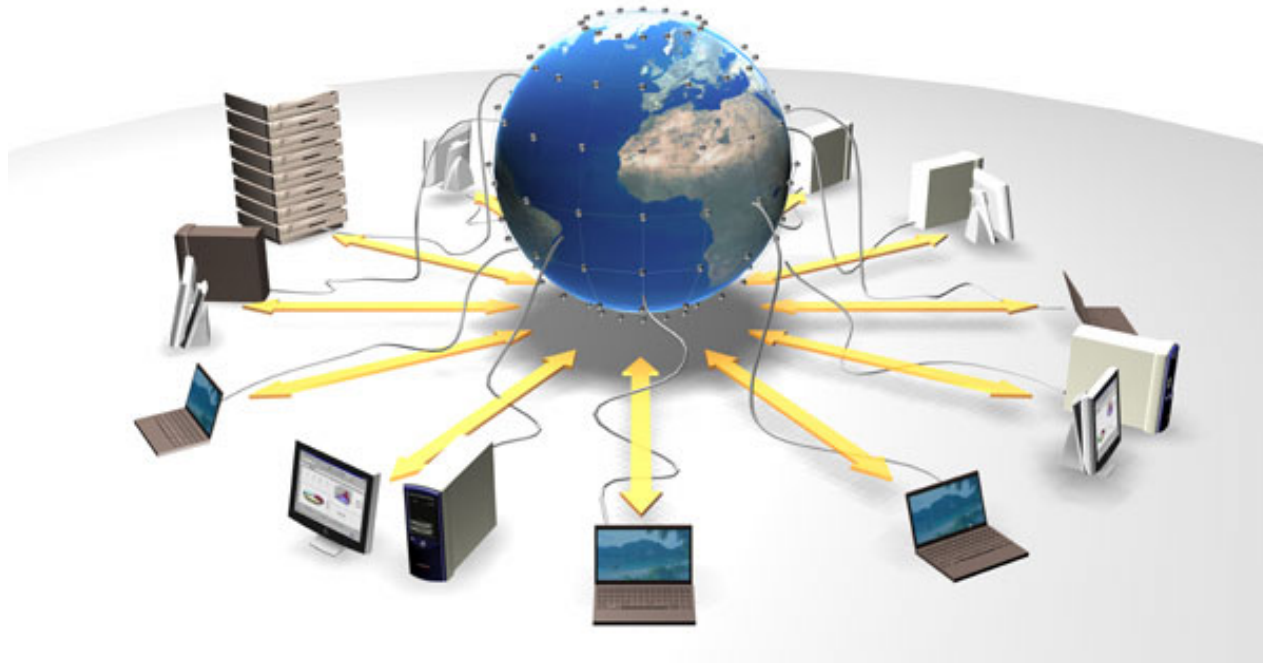
Quand deux faisceaux de protons entrent en collision, ils créent dans un petit volume une température au moins un milliard de fois plus élevée qu'au coeur du Soleil.

Les détecteurs les plus grands et les plus complexes jamais construits ...



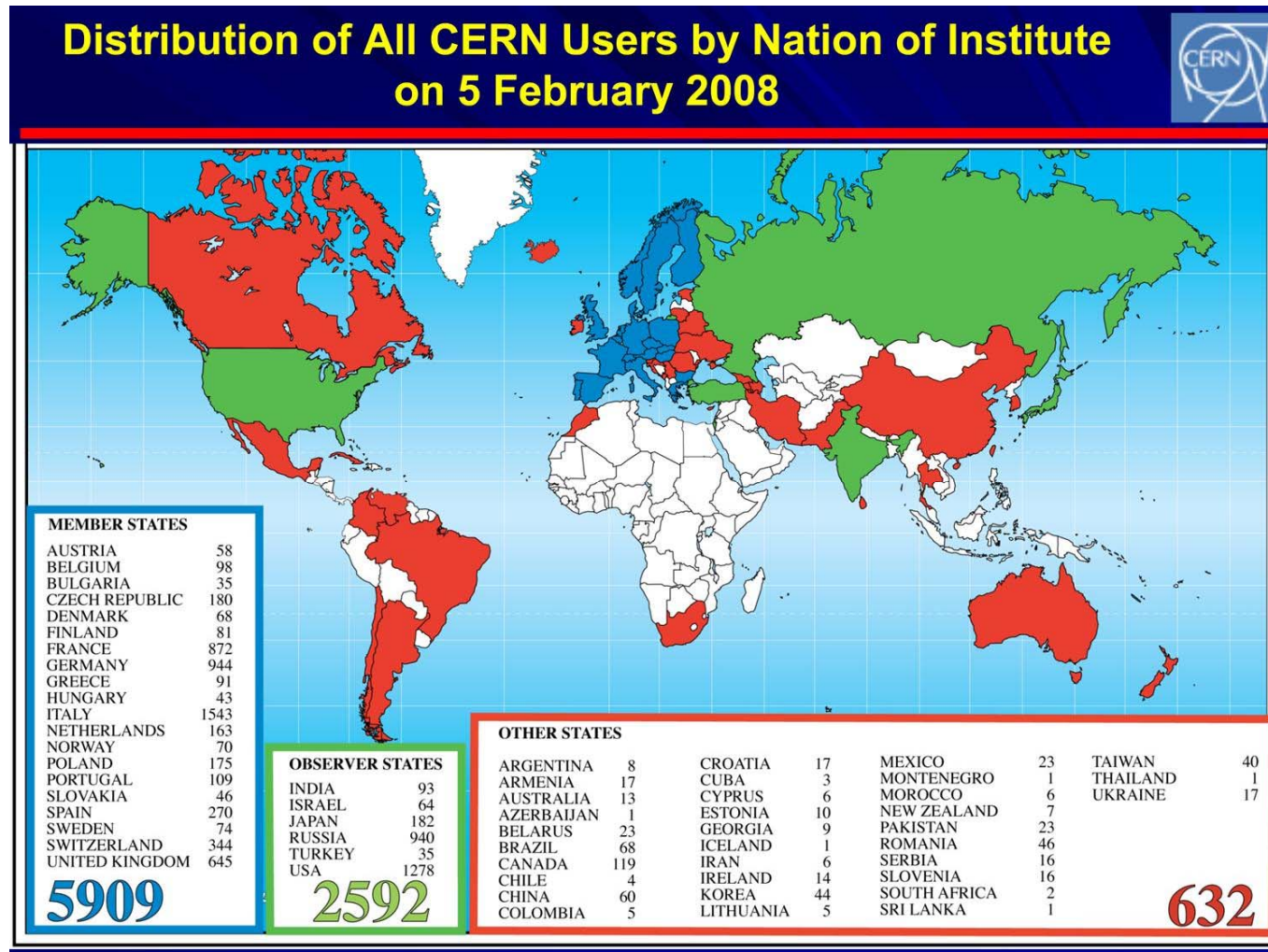
Pour sélectionner et enregistrer les signaux de 600 millions de collisions par seconde, les scientifiques ont construit d'immenses détecteurs pour mesurer les plus petites particules avec une précision extraordinaire.

# L'ordinateur le plus câblé du monde ...



Des dizaines de milliers d'ordinateurs dispersés de part le monde vont analyser les données du LHC grâce à une Grille de Calcul mondiale : une nouvelle révolution qui fait suite à celle du Web au Cern.

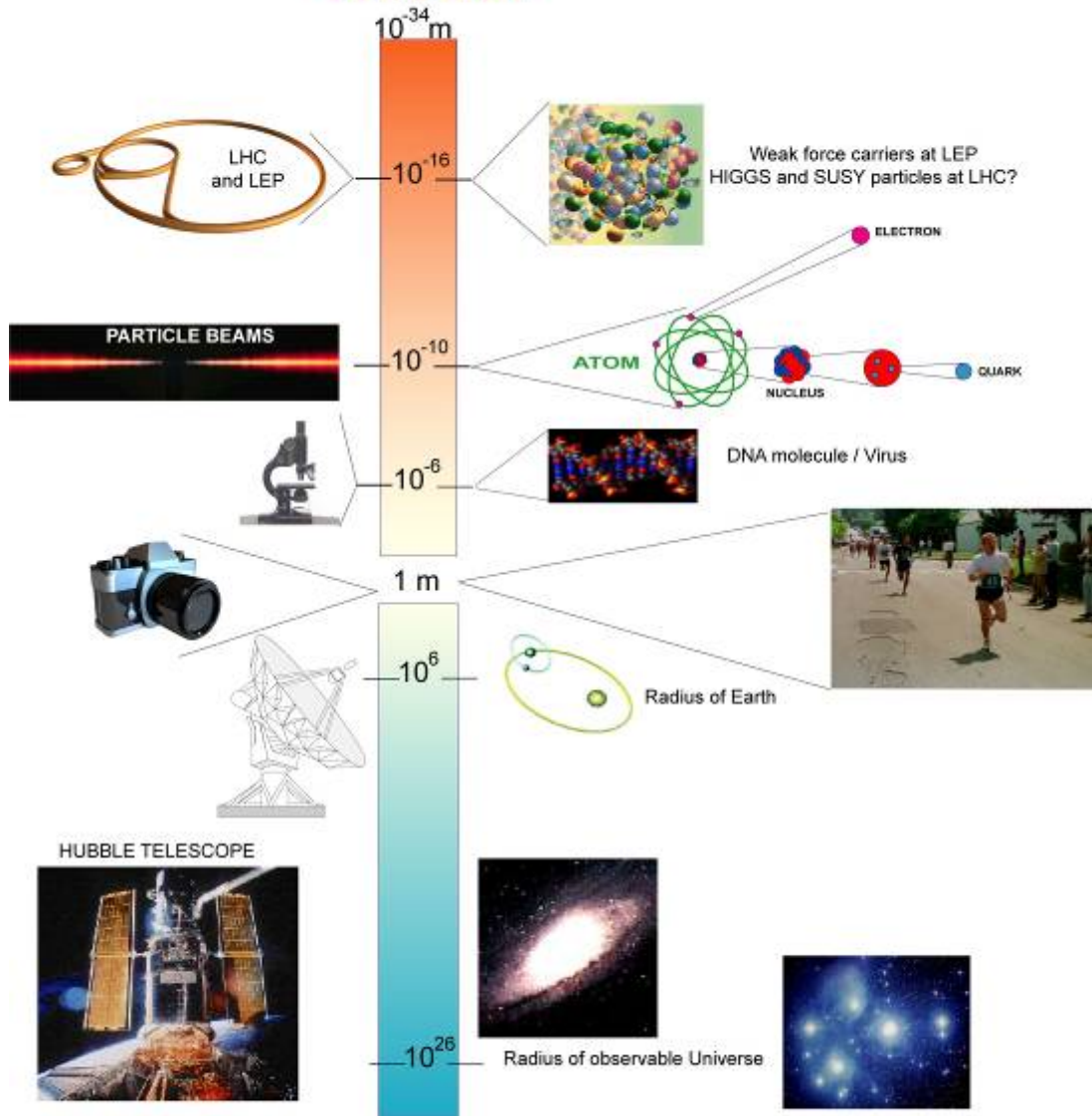
Chaque jour, près de 6 000 scientifiques du monde entier contribuent à la recherche auprès du LHC.



20 états membres Européens et 60 pays associés collaborent au Cern.

Et pourquoi ?

## The BIG BANG

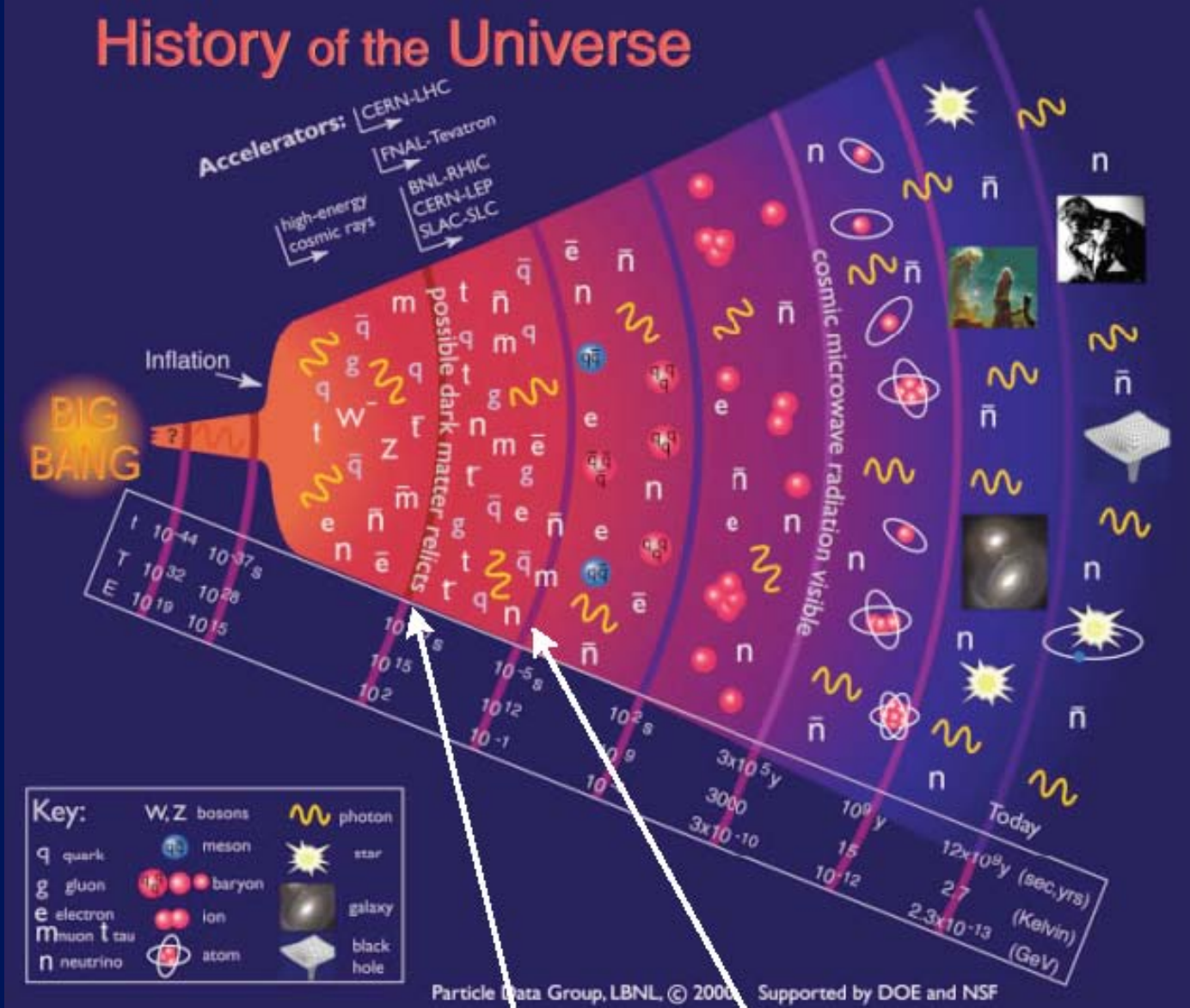


The Universe

Les équipements d'observation doivent être adaptés à la taille des objets.

Seuls les accélérateurs de particules sont adaptés aux objets les plus fins de l'univers.

# History of the Universe



**Physique**

temps

température

taille de l'univers

**Higgs ?**

$10^{-25}$  s

$10^{15}$  °C

300M km

**Plasma quark-gluon ?**

$10^{-6}$  s

$10^{12}$  °C

taille du système solaire

Après plus de 50 ans d'expériences (*et plus de 30 prix Nobel*), le monde connu se réduit à un nombre limité de particules et la théorie (le modèle standard) a été vérifiée au pour mille près.

En fait l'univers connu est encore plus simple ...

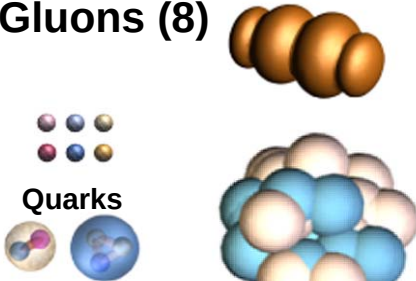
### Leptons

Electric Charge

|          |    |   |                   |
|----------|----|---|-------------------|
| Tau      | -1 | 0 | Tau Neutrino      |
| Muon     | -1 | 0 | Muon Neutrino     |
| Electron | -1 | 0 | Electron Neutrino |

### Strong

**Gluons (8)**



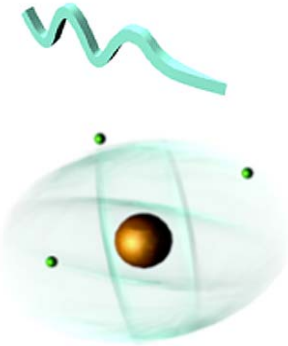
**Quarks**

**Mesons**  
**Baryons**

**Nuclei**

### Electromagnetic

**Photon**



**Atoms**  
**Light**  
**Chemistry**  
**Electronics**

### Quarks

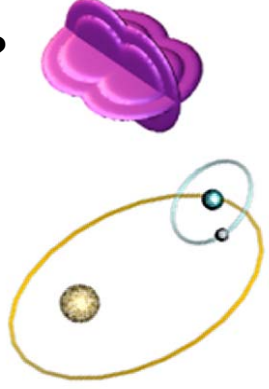
Electric Charge

|         |      |     |       |
|---------|------|-----|-------|
| Bottom  | -1/3 | 2/3 | Top   |
| Strange | -1/3 | 2/3 | Charm |
| Down    | -1/3 | 2/3 | Up    |

each quark: *R*, *B*, *G* 3 colours

### Gravitational

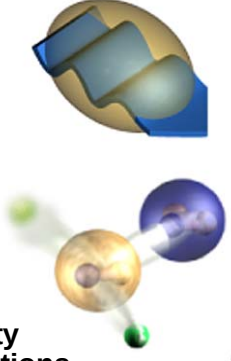
**Graviton ?**



**Solar system**  
**Galaxies**  
**Black holes**

### Weak

**Bosons (W,Z)**

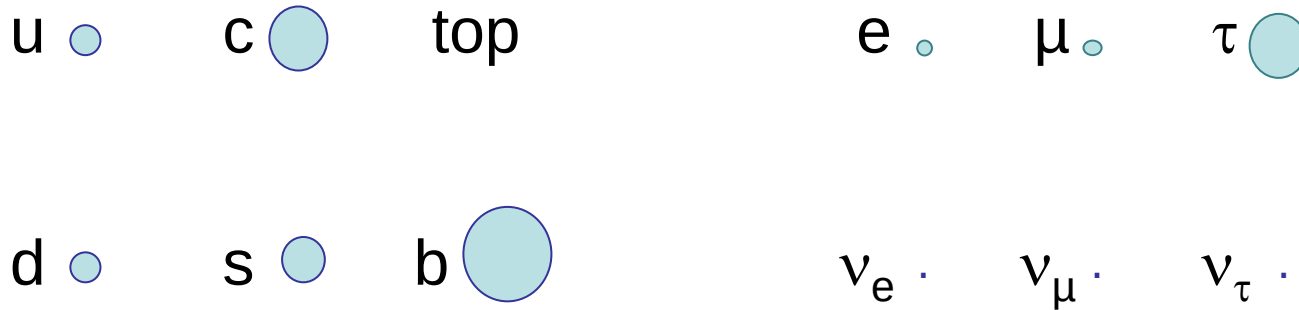


**Neutron decay**  
**Beta radioactivity**  
**Neutrino interactions**  
**Burning of the sun**

Tout ceci est  
bien beau ...

**MAIS**

# On ne comprend pas l'origine de la masse des particules



quarks

leptons

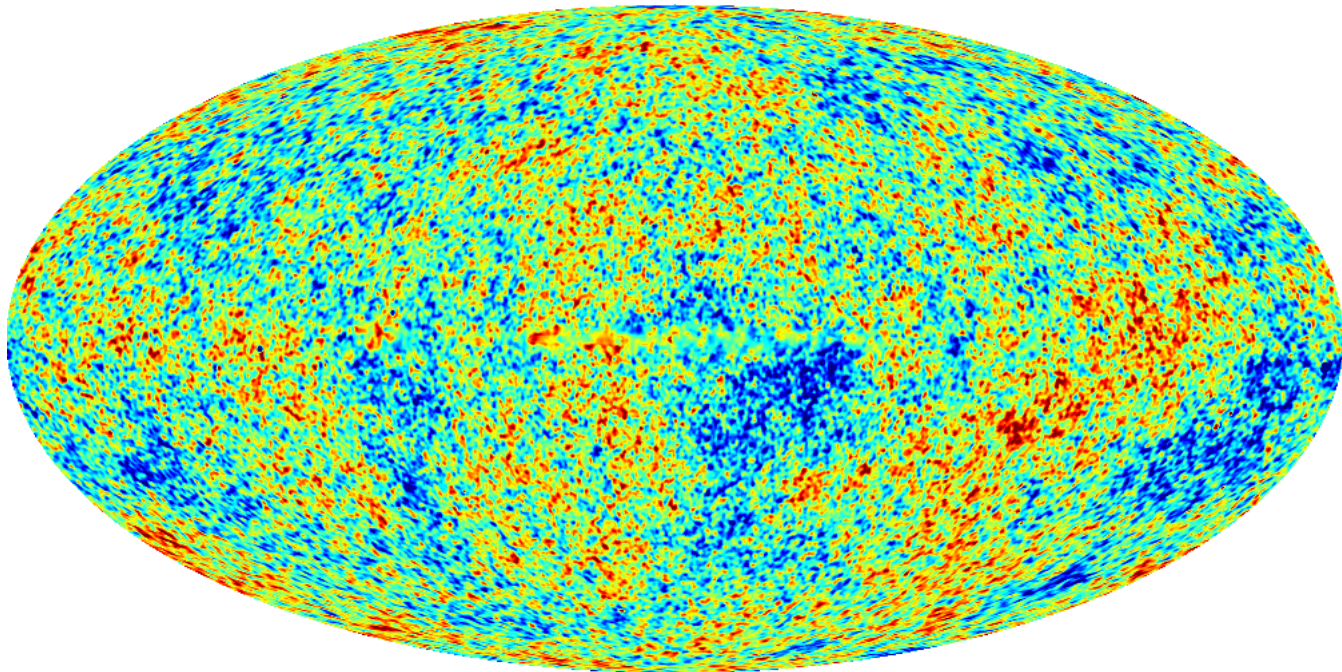
La raison en serait l'existence d'une nouvelle particule, appelée le “**boson de Higgs**”

**A l'origine du Big Bang** : matière et antimatière ont été créées en quantité égale

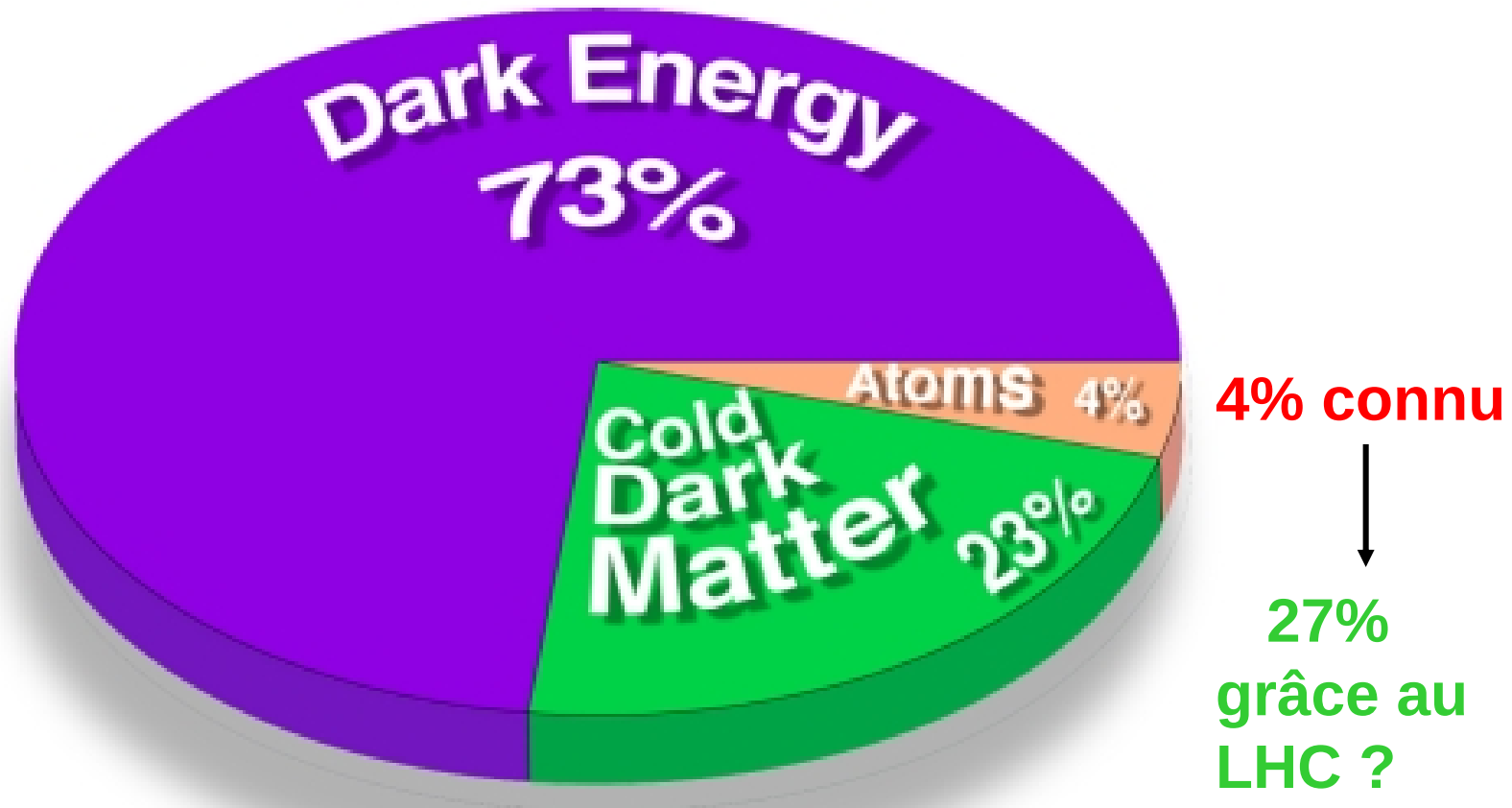
**Maintenant** : nous existons et l'antimatière a disparu de l'univers (sauf en laboratoire)

*Où toute cette antimatière est-elle passée ?*

Un phénomène appelé “violation de CP” pourrait en être la raison



en fait on ne connaît pas grand-chose de l'univers ...



Un nouveau type de particules, les particules “supersymétriques”, pourrait expliquer la matière noire (mais PAS l'énergie sombre !)

Les détecteurs au LHC doivent être  
prêts à toute éventualité :  
tester des théories au-delà du modèle standard  
(supersymétrie, dimensions supplémentaires, ...)  
et même l'inattendu !

Comment y arriver ?

# 15 ans de préparation et de construction, au moins 10 ans d'exploitation

**1984 - 1987** : première conférence sur le principe du LHC, machine proton-proton, en tant que projet d'avenir du CERN

**1989 - 2000** : exploitation du LEP au CERN, machine électron-positron

**1992 - 1994** : conception des expériences, approbation du LHC

**1996 - 1998** : approbation des expériences ALICE, ATLAS, CMS et LHCb

**1998** : début de la construction

**2000** : début de la construction de CMS en surface

**2003** : la caverne d'ATLAS est prête, construction d'ATLAS en profondeur

**2005** : la caverne de CMS est prête

**2008** : les expériences sont construites et prêtes pour les premiers faisceaux

**~2012** : l'intensité nominale des faisceaux devrait être atteinte

**~2018 - 2020** : l'intensité sera encore augmentée d'un facteur 10

# Les moyens de cette entreprise

**1. Accélérateurs** : des machines capables d'accélérer des particules à très haute énergie pour provoquer des collisions avec d'autres particules.

**2. Détecteurs** : des instruments gigantesques pour enregistrer les particules issues des collisions.

**3. Ordinateurs** : pour collecter, stocker, distribuer et analyser les énormes lots de données produites par les détecteurs.

**4. Personnes** : seule une collaboration de milliers de chercheurs, d'ingénieurs et de personnel technique peut concevoir, construire, utiliser et exploiter ces incroyables instruments.



Le tunnel de 27 km du LHC est 100 m sous terre

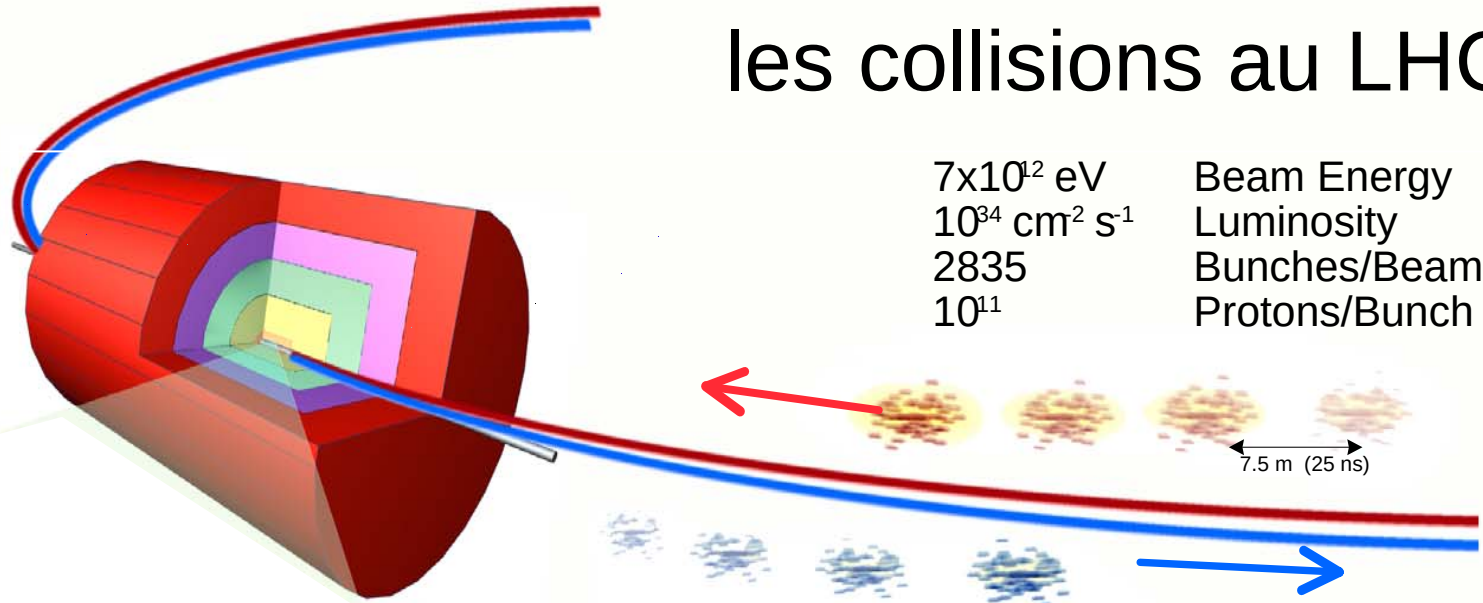


Aimant dipôle :  
15 m de long, 35 t  
bobine supra NbTi  
(Niobium-Titane)  
température 1.9 K  
courant de 11 700 A

*Les filaments de  
NbTi sont 10 fois  
plus fins qu'un  
cheveu ( $7\ \mu\text{m}$ ) !*

Les protons sont accélérés par de puissants  
champs électriques et canalisés le long de leurs  
trajectoires circulaires par 1232 aimants dipôles  
supraconducteurs.

# les collisions au LHC



$7 \times 10^{12}$  eV  
 $10^{34}$  cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>  
2835  
 $10^{11}$

Beam Energy  
Luminosity  
Bunches/Beam  
Protons/Bunch

**7 TeV** **Proton** **Proton**  
colliding beams

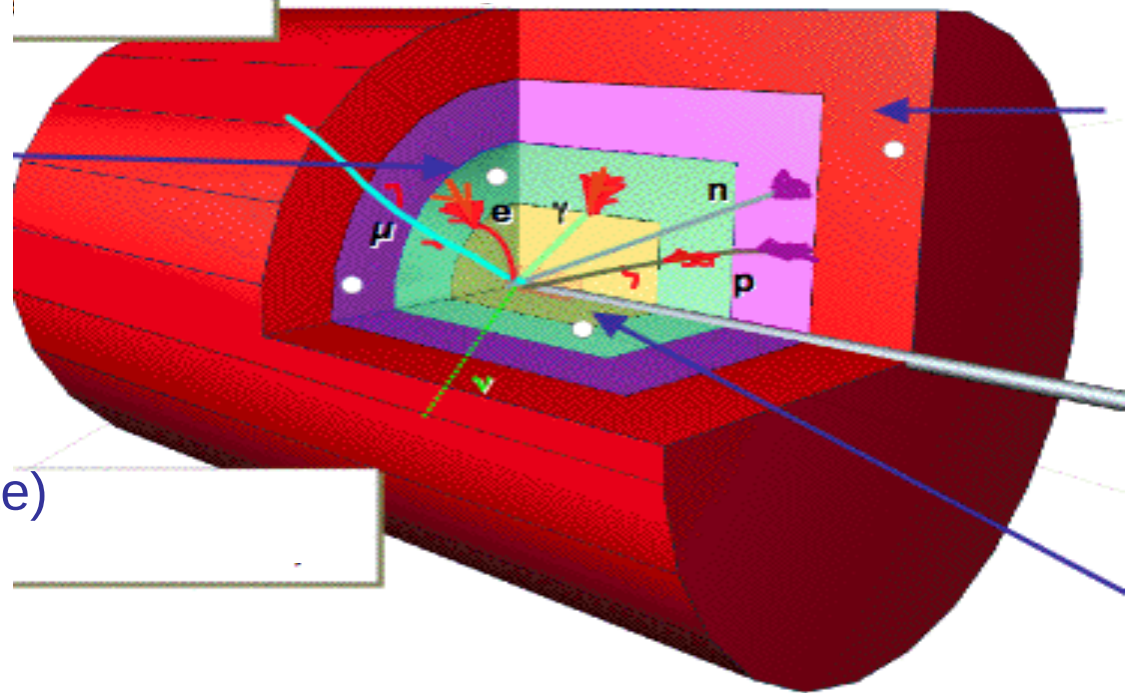
# Les détecteurs

## Des défis technologiques :

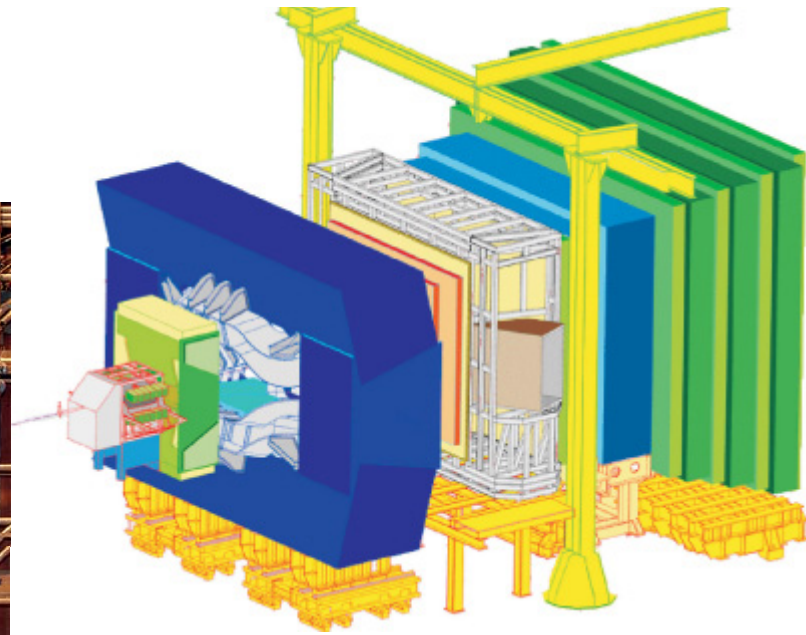
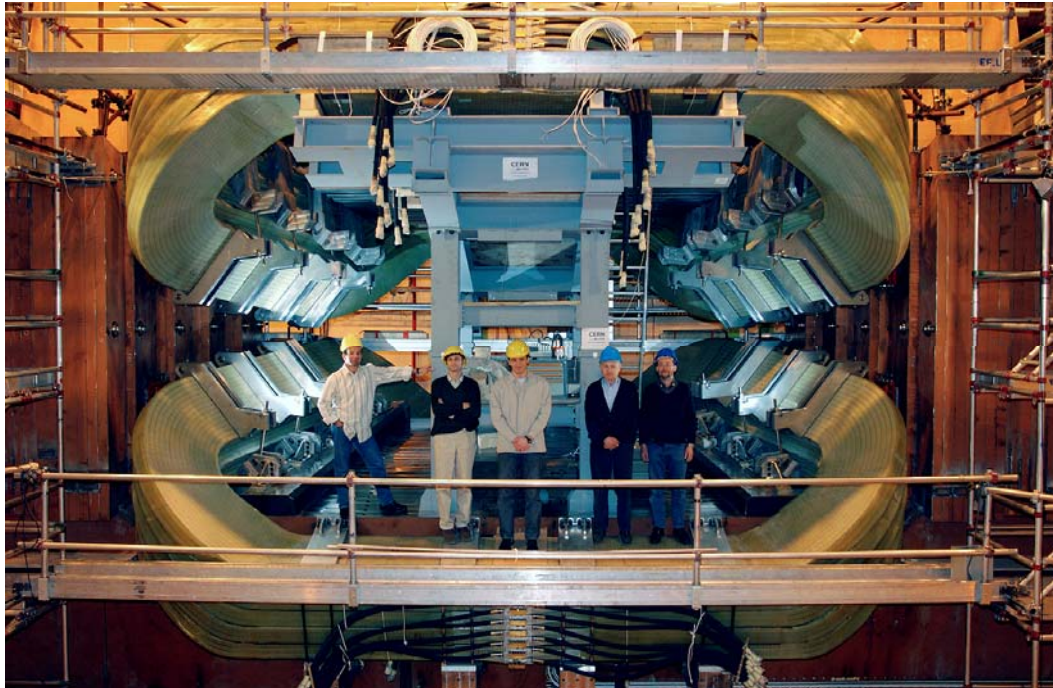
- rapides : 600 millions d'interactions par seconde
- précis : 1000 traces toutes les 25 ns  $\Rightarrow$  100 millions de canaux de lecture
- résistants aux radiations, aussi bien les détecteurs que l'électronique

## Conçus en couches (d'oignon) successives :

Photons,  
Electrons,  
Muons,  
Quarks et Gluons  
(jets de particules)  
Neutrinos  
(énergie transverse manquante)

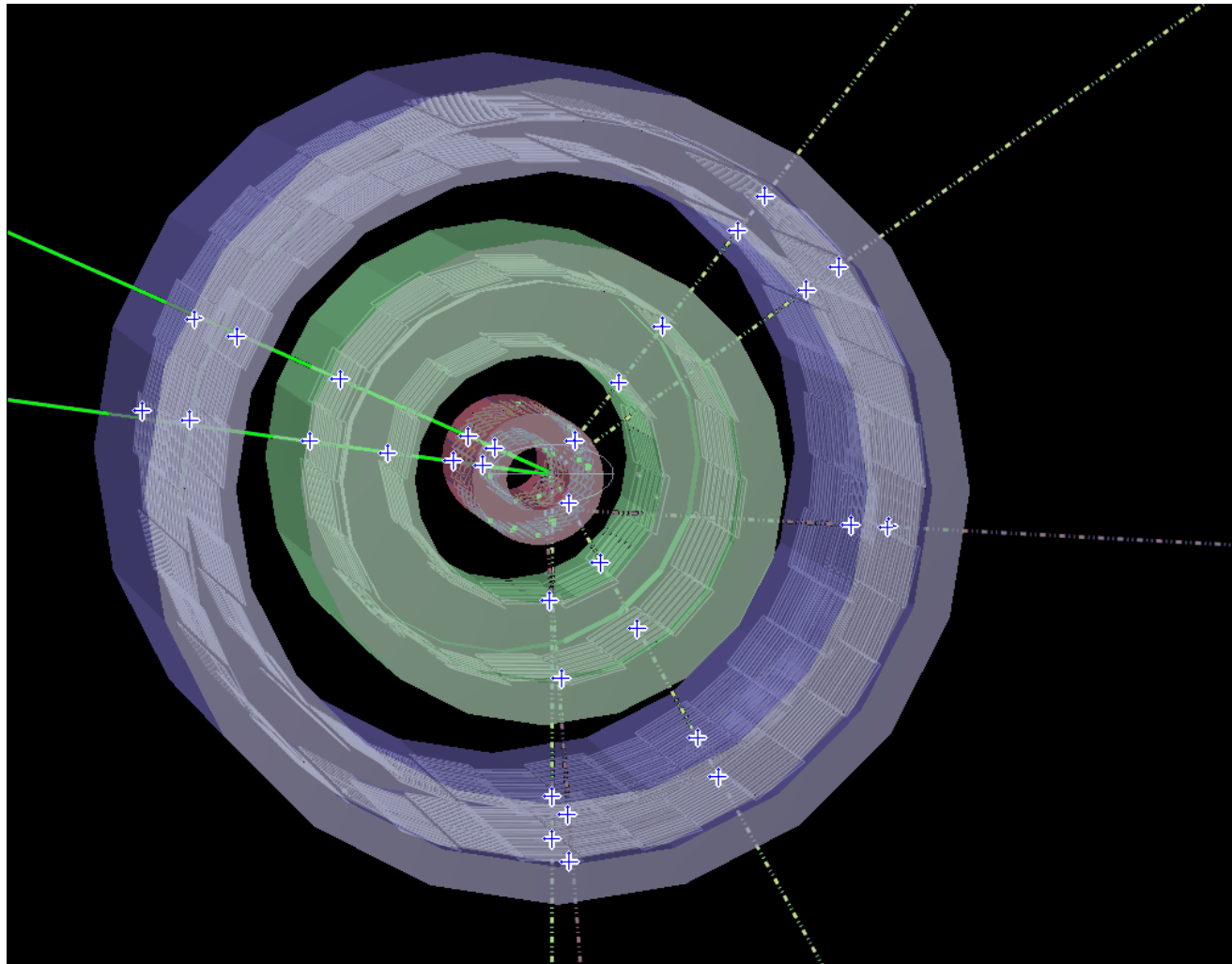


L'expérience **LHCb** : spécialement conçue pour étudier les subtiles différences entre matière et antimatière, *et peut-être comprendre pourquoi toute l'antimatière a disparu de l'univers depuis le Big Bang !*

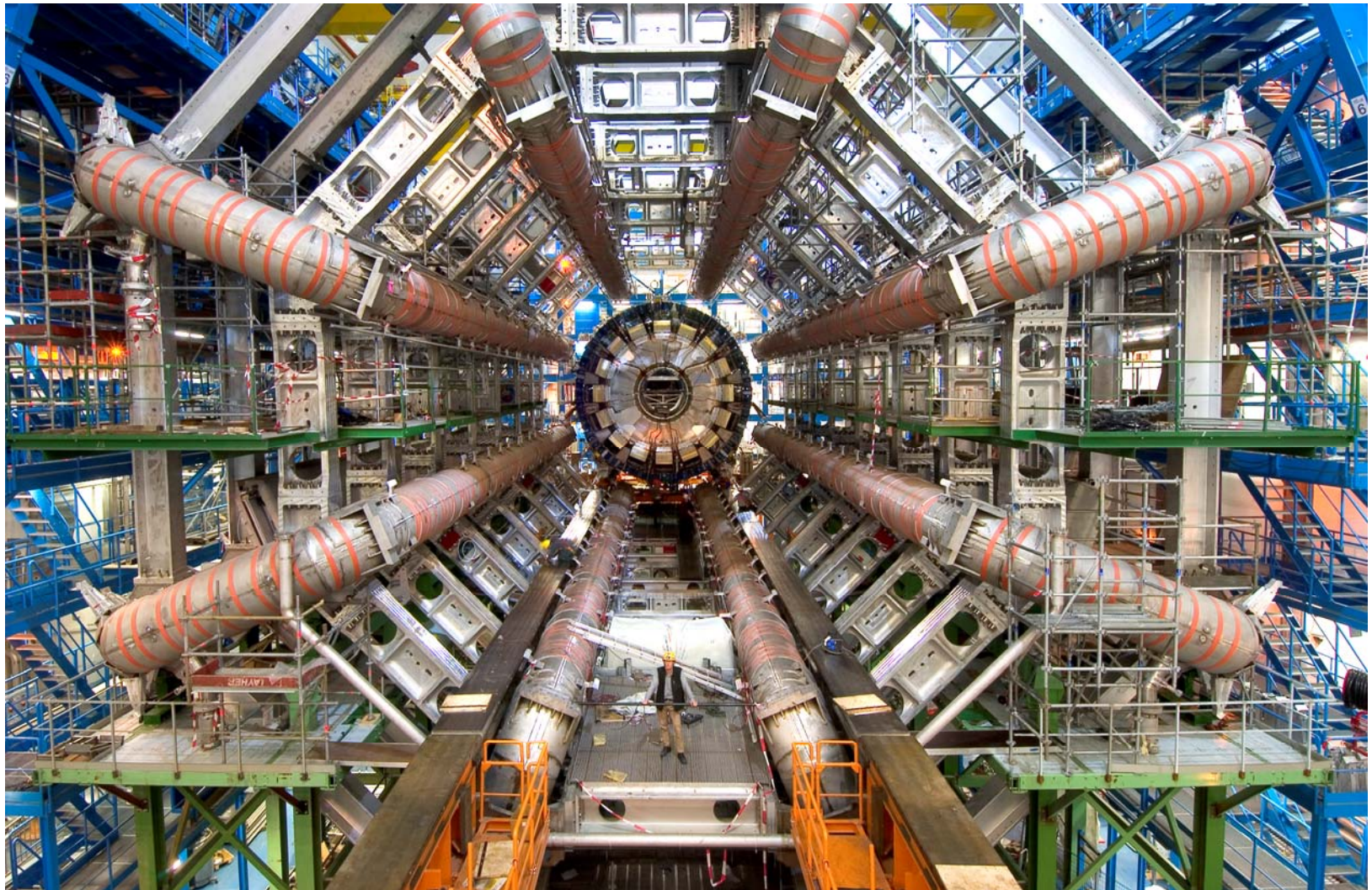


5 600 t  
21m de long  
13m x 10m de section  
700 scientifiques

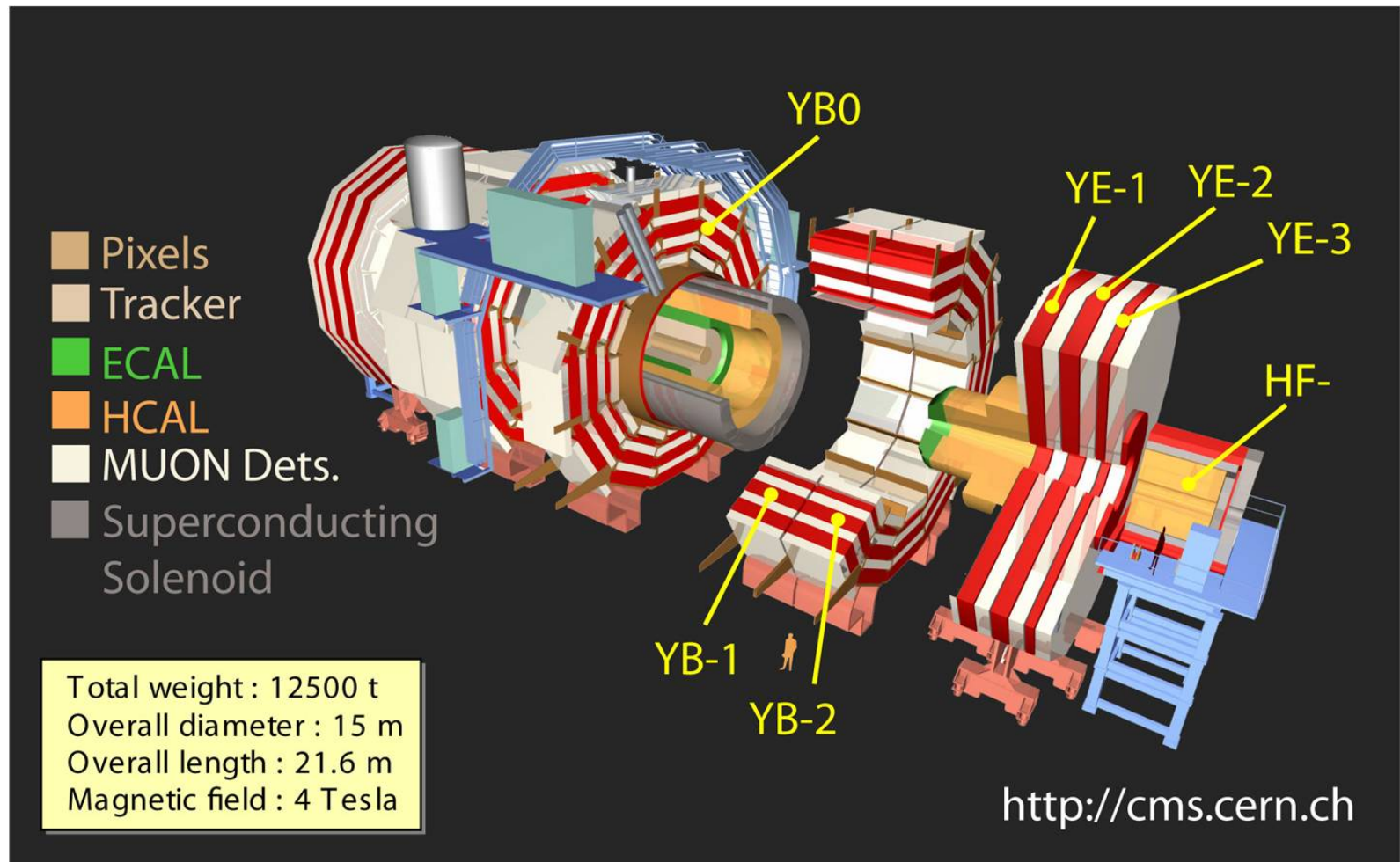
Le LHC peut aussi accélérer des noyaux de plomb,  
afin d'étudier une nouvelle forme de matière,  
le *plasma quark-gluon* qui aurait existé au début de l'univers :  
**ALICE** est spécialement conçue pour l'étudier !



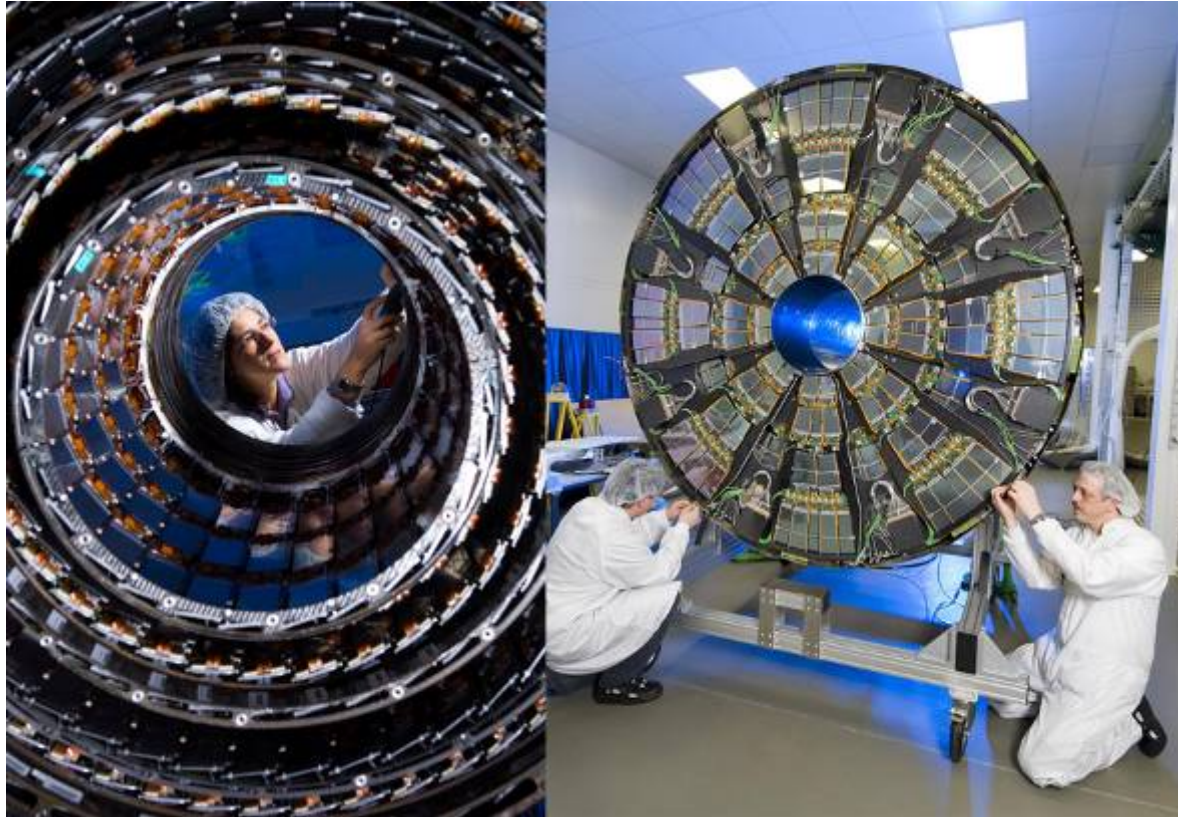
L'expérience **ATLAS**, *haute comme un immeuble de six étages* :  
7 000 t, 24 m de diamètre, 45 m de long, 2500 scientifiques  
2 aimants, *construite dans sa caverne*



L'expérience **CMS** (un Solénoïde "Compact " à Muons)  
12 500 t , 15 m de diamètre, 21 m de long, 2000 scientifiques  
champ magnétique de 4 Tesla  
*construite en surface, puis descendue par tranches*



# Trajectographe au silicium



Des détecteurs au silicium finement segmentés (micropistes et pixels) permettent de reconstruire les traces des particules chargées et d'en mesurer leurs impulsions.

*Un appareil photo de 70 Mega pixels prenant 40 millions d'images par seconde !*

*La surface totale des détecteurs silicium couvre 200 m<sup>2</sup> ! et le taux de détecteurs défectueux n'est que de un pour mille ! Les détecteurs silicium fonctionneront à -10 °C afin de limiter leur vieillissement dû aux radiations.*

**But :** mesurer trajectoire et impulsion des particules chargées

# Calorimètre Électromagnétique (ECAL)

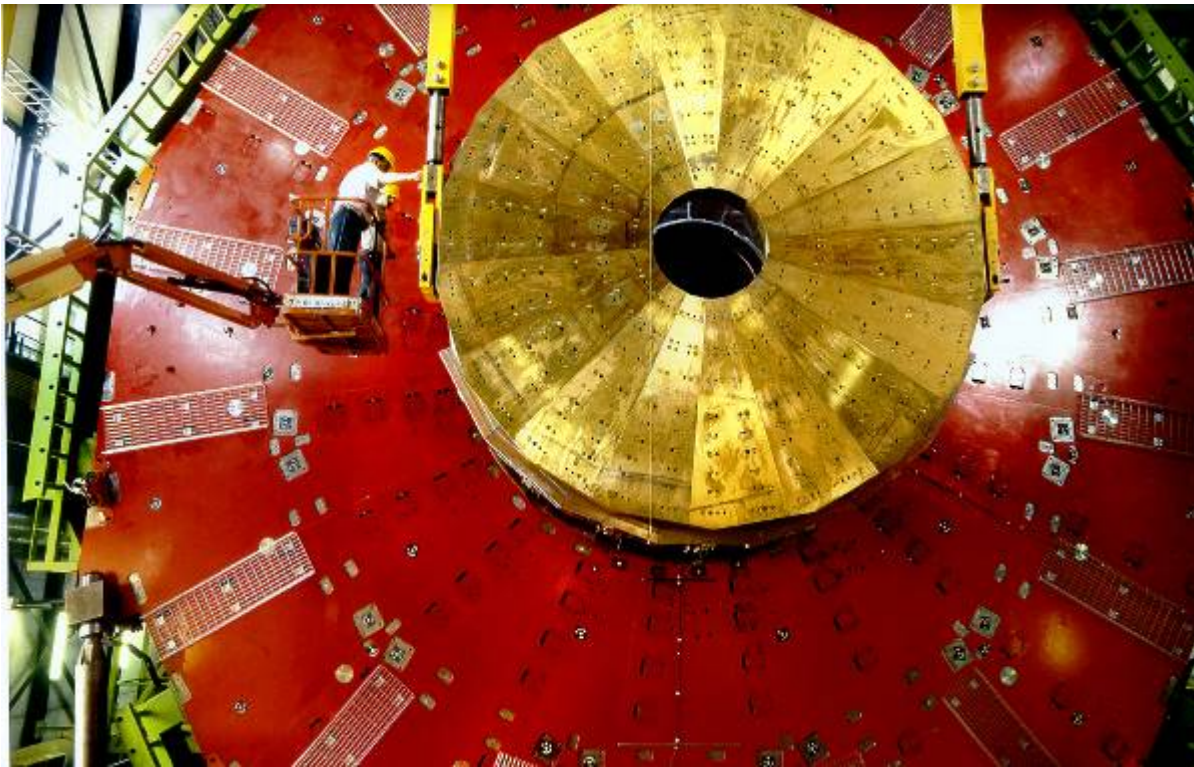


80000 cristaux de  $\text{PbWO}_4$   
(tungstate de plomb)  
produisent de la lumière  
au passage de particules  
incidentes ( $e^\pm$ ,  $\gamma$ ) .  
La quantité de lumière est  
proportionnelle à l'énergie  
de ces particules.

*~80% de métal,  
et pourtant transparent !*

**But :** identifier et mesurer l'énergie et la direction  
des électrons, positrons et photons

# Calorimètre Hadronique (HCAL)



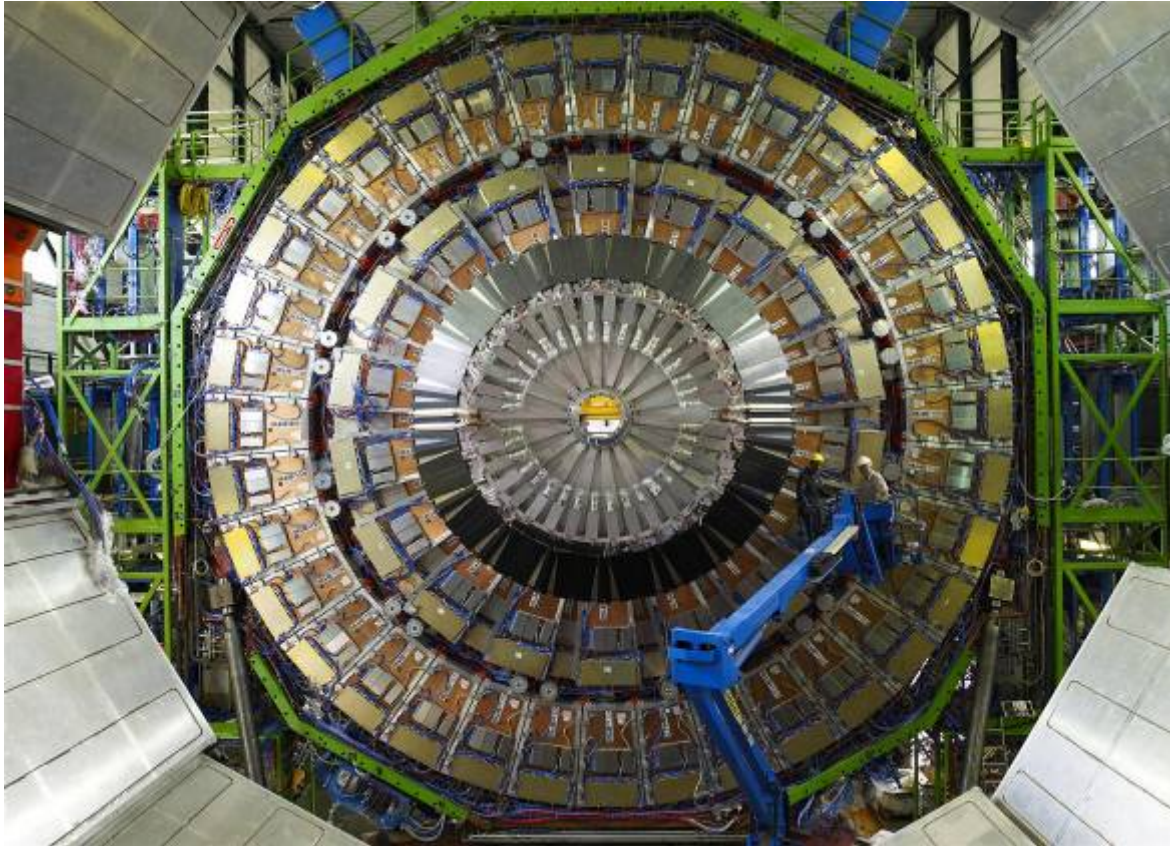
Des couches de matériau dense (cuivre et acier) intercalés par des plans de scintillateurs plastiques ou de fibres de quartz.

*Le cuivre des bouchons du HCAL a été récupéré sur des navires de guerre Russes !*

**But :** mesurer l'énergie des jets de hadrons (protons, pions, ...)



# Détecteur à Muons



CMS utilise trois types de détecteurs à muons : tubes à dérives, chambres à pistes cathodiques ou à plaques résistives.

*La surface totale de ces détecteurs couvre celle d'un terrain de football : 6 000 m<sup>2</sup>*

**But:** identifier les muons et mesurer leur impulsion

# Solénoïde Supraconducteur



*C'est le plus grand aimant supraconducteur du monde: 14 m de long, 6 m de diamètre interne, 12 000 t.*

*Des fils en Niobium-Titane (1 million de km !) refroidis à  $-269^{\circ}\text{C}$  parcourus par un courant de 20 000 A induisent un champ magnétique de 4 Tesla : 100 000 fois plus que le champ magnétique terrestre*

***But :*** créer un champ magnétique pour courber la trajectoire des particules chargées

# Support mécanique

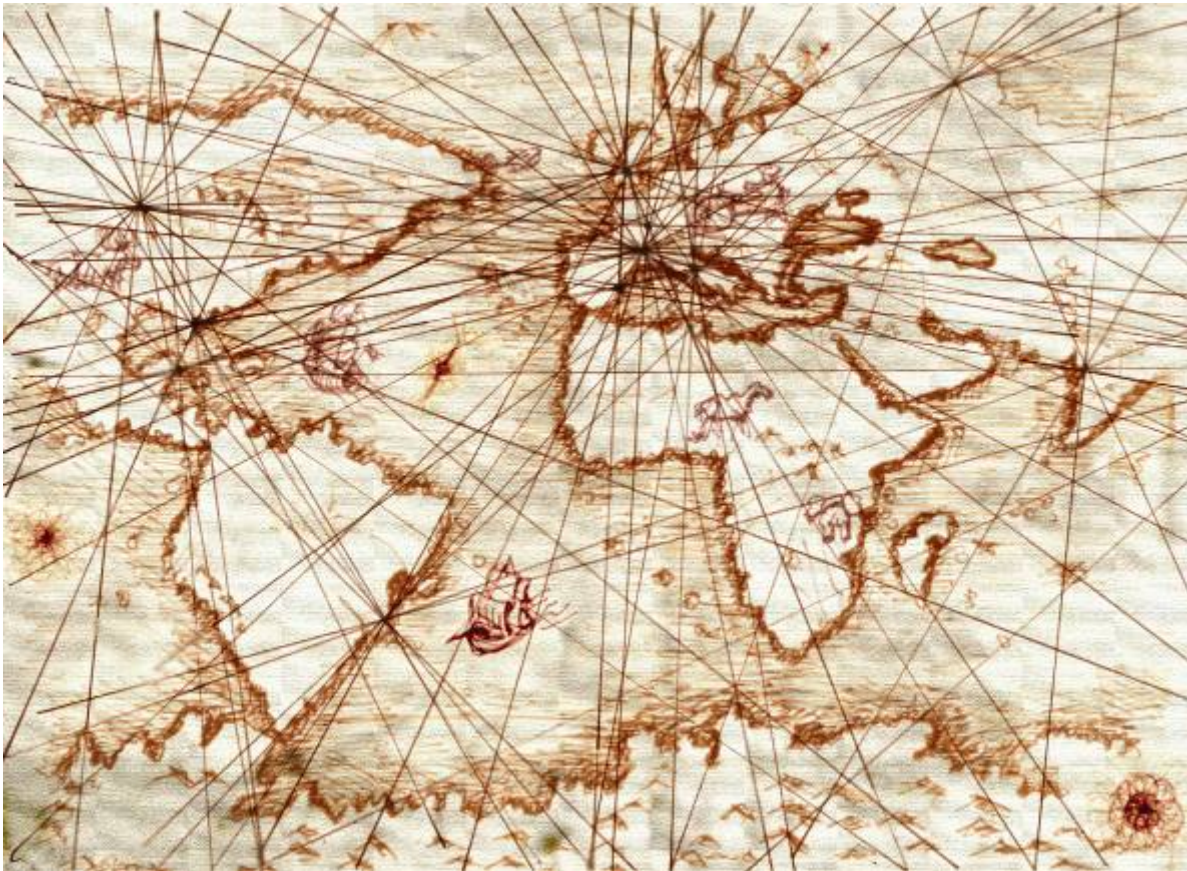


CMS utilise plus de 10 000 tonnes d'acier. En comparaison, la tour Eiffel n'en compte que 7 000 tonnes !

*Ce "sabot" a été fabriqué au Pakistan, puis a voyagé par train, bateau et camion jusqu'au CERN !*

**But :** permet de fermer les lignes de champ magnétique et constitue le "squelette" de CMS

# CMS : une collaboration internationale



38 Pays  
155 Instituts  
plus de 2000 chercheurs  
et ingénieurs  
près de 450 doctorants

***But :*** concevoir, construire, assembler, tester  
et faire fonctionner CMS

# Assemblage et descente

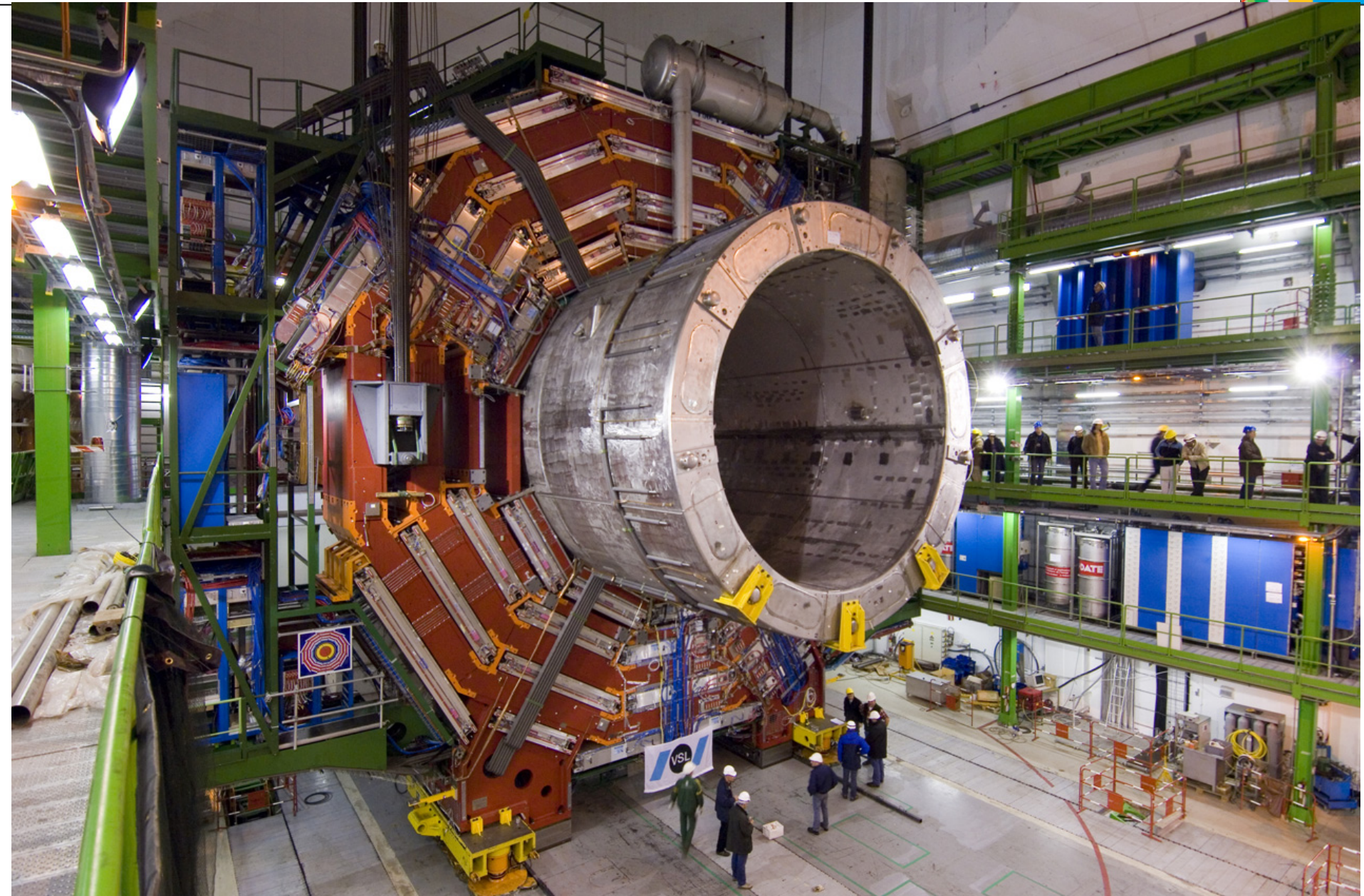
Les différents détecteurs ont été élaborés, assemblés et testés de part le monde avant d'être menés au CERN.

Les grands morceaux ont été assemblés en surface avant d'être descendus 100 m sous terre.

28 Février 2007 : descente de la bobine de CMS (1920 t)

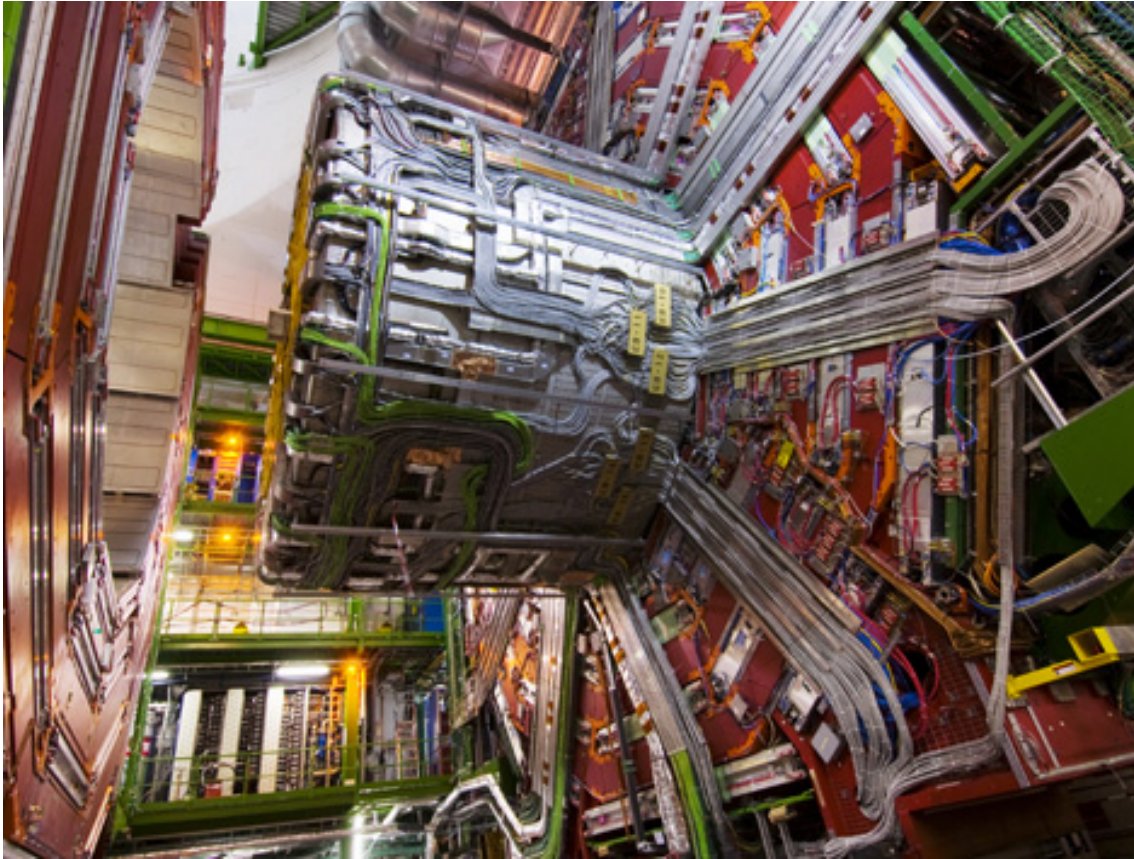


28 Février 2007 : descente de la bobine de CMS (1920 t) : 10 h



# CMS dans sa caverne

<http://cms-project-cmsinfo.web.cern.ch/cms-project-cmsinfo/Media/CMSeye/cam8.html>



Tout les détecteurs sont désormais installés sous terre.

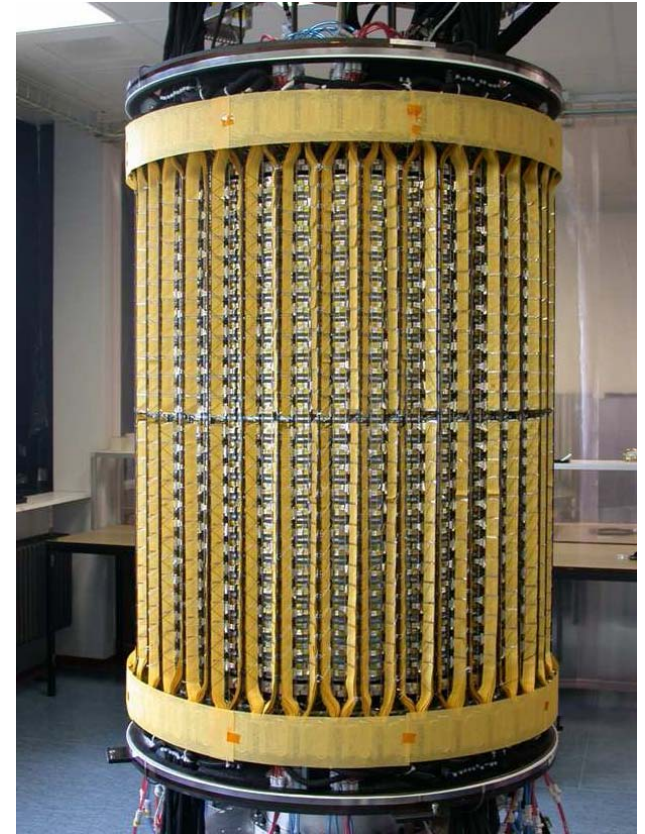
*Le câblage électrique et l'installation des tuyauteries de refroidissement (près de 250 km) a requis 50 000 heures de travail, rien que pour la partie centrale !*

**But :** être prêt pour la prise de données

# Implication de l'IPHC dans CMS et ALICE : les trajectographes silicium



ALICE : deux couches du  
trajectographe central



CMS : détecteurs sensibles et pétales  
d'un des bouchons du trajectographe

*Plus de 100 personnes du laboratoire  
(chercheurs, ingénieurs, techniciens,  
doctorants) ont œuvré à cet effort  
depuis 16 ans !*

# Implication de l'IPHC (suite)

*La période de R&D ne s'est pas déroulée sans efforts : plusieurs techniques ont été développées, testées et comparées avant de finalement choisir un trajectographe tout silicium dans CMS !*

Les compétences des équipes techniques ont porté sur :

- la conception et les bancs de test des détecteurs,
- l'électronique et microélectronique de lecture,
- les microsoudures de précision (~10 millions réalisées) et leurs tests,
- l'assemblage des détecteurs finals et les tests de qualification avant leur envoi au CERN,
- l'acquisition et le contrôle en ligne des détecteurs installés.

*Dans CMS, la construction des pétales en silicium a nécessité la collaboration de sept instituts !*

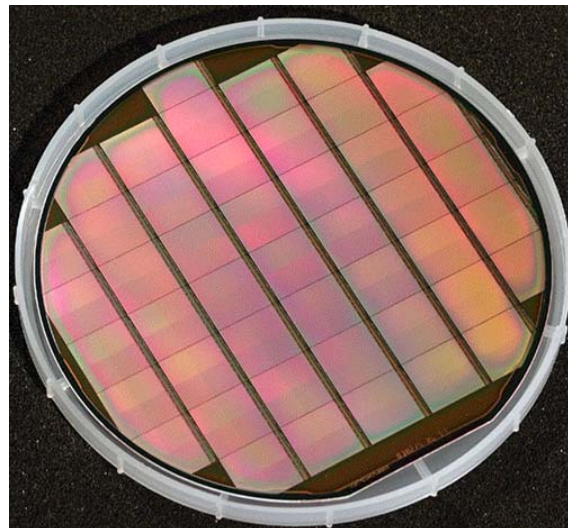
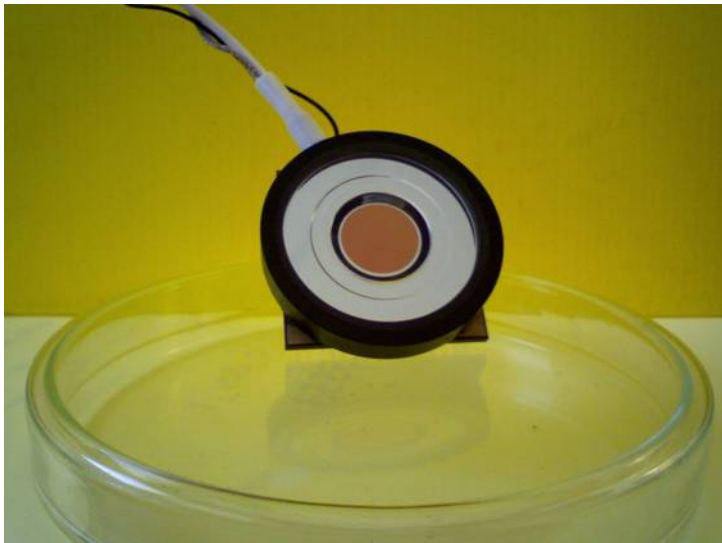
Actuellement les 2 groupes CMS et ALICE comptent une trentaine de chercheurs et ITA, dont quatre personnes en permanence au CERN. L'accent porte sur la mise en route des détecteurs, la préparation à la prise de données et aux recherches de physique.

# Les retombées du LHC

Transferts de technologie : la R&D en physique des particules impose souvent des contraintes à la limite des connaissances techniques. Des échanges soutenus avec l'industrie sont nécessaires (projets communs, brevets, production en série).

Des applications variées :

- accélérateurs : ultravide, cryogénie, cavités hyperfréquences, hadron-thérapie, ...
- sources : radioprotection, mesures environnementales, ...
- traitement des matériaux : tenue aux radiations, gravure nanométrique, ...
- biomédical : imagerie X et gamma, tomographie à émission de positrons, ...
- informatique : réseaux, traitement d'images, calcul scientifique, ...



*Photosenseur  
CMOS pour  
l'imagerie  
biomédicale  
(IPHC Strasbourg)*

# L'IPHC dans la Grille de calcul

L'IPHC est centre de calcul de niveau 2 pour la Grille.

A ce titre, il fournit du temps de calcul et de l'espace de stockage pour la communauté mondiale des physiciens CMS et ALICE.

Il satisfait également les besoins locaux pour CMS et ALICE, ainsi que pour d'autres groupes de l'IPHC : Agata (physique nucléaire), Cmos (microélectronique), Imabio (imagerie), Ramses (radioprotection), etc...

Ressources déjà engagées :

2007 : 50 coeurs, 60 TB

2008 : 180 coeurs, 180 TB

2009 : 700 coeurs, 280 TB,

*(une pile de CD de 400 m de haut !)*



avec l'apport financier du laboratoire et de la région Alsace  
ainsi que le personnel CNRS (3 ingénieurs)

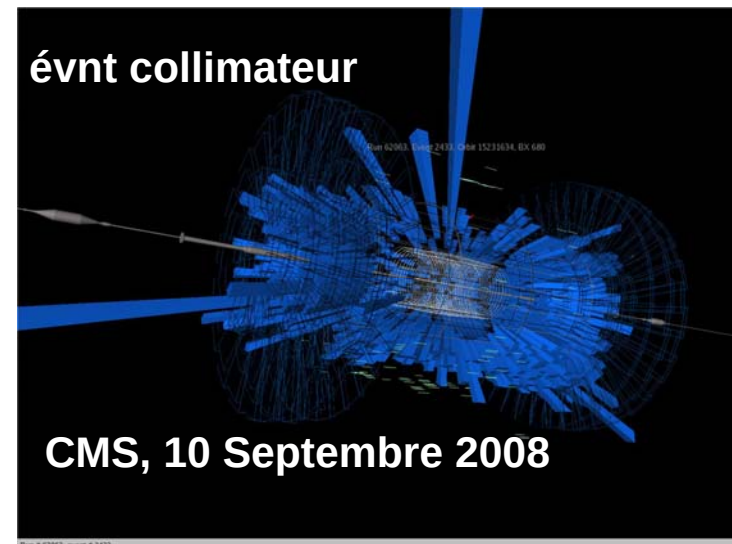
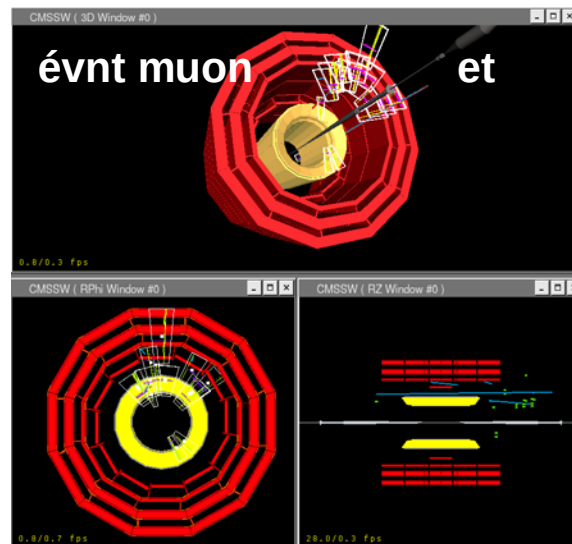
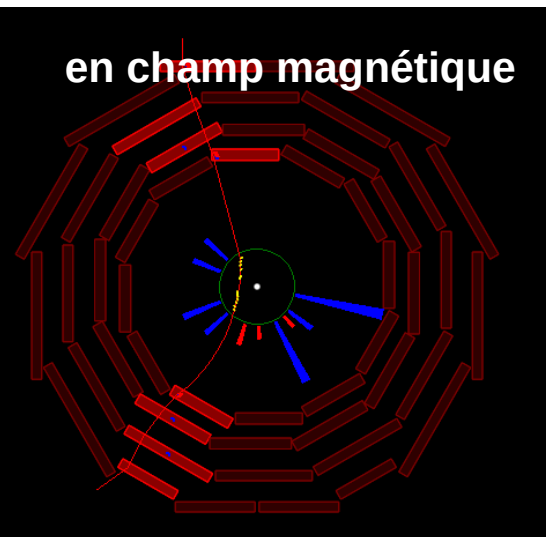
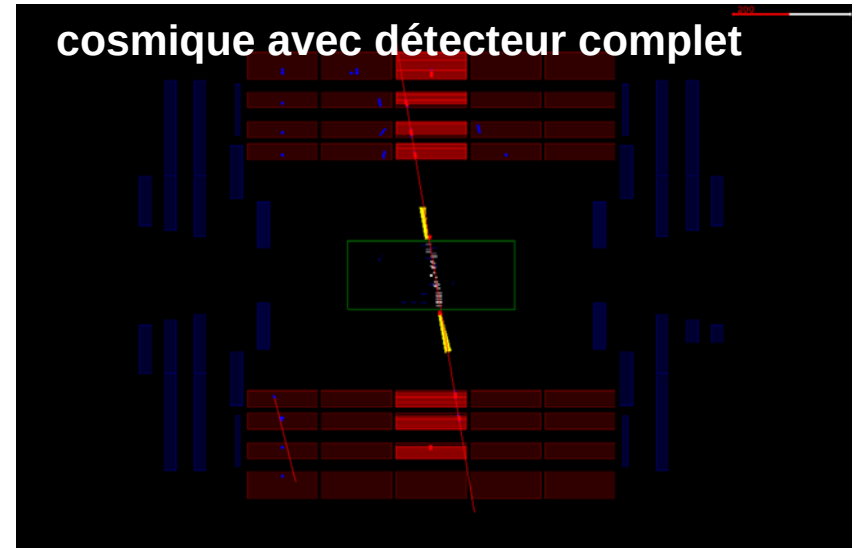
gros travaux d'infrastructure cette année :

extension de la salle informatique, climatisation, travaux électriques et onduleur



baie de  
calcul et de  
stockage

CMS et ALICE prennent des données de rayons cosmiques,  
ont vu les premiers faisceaux (le 10 Septembre)  
... et attendent les premières collisions (en 2009)



# EXPOSITION

# LHC...

## L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

Explorez les plus profonds secrets de la matière

Du 13 au 25 octobre 2008

Au Palais Universitaire de Strasbourg

Ouvert du lundi au samedi de 9h à 18h

Entrée libre

<http://iphc.cnrs.fr/expoLHC>

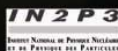
**Conférences à 18h chaque jeudi  
d'octobre à l'Institut de Physique de  
l'ULP, amphi Fresnel (3, rue de  
l'université - 67000 Strasbourg)**

**Peut-on voyager dans le temps ?  
Etienne Klein (CEA) - 02 octobre 2008**

**LHC : vers une nouvelle physique ?  
Daniel Treille (CERN) - 09 octobre 2008**

**Le LHC : repousser les limites  
Jean-marie Brom (IPHC-CNRS/IN2P3) -  
16 octobre 2008**

**Le défi informatique du LHC  
Fairouz Malek (LPSC-CNRS/IN2P3) -  
23 octobre 2008**



composition: Jonathan Rappaport, photo: C. Cerni / Photomedia (img)