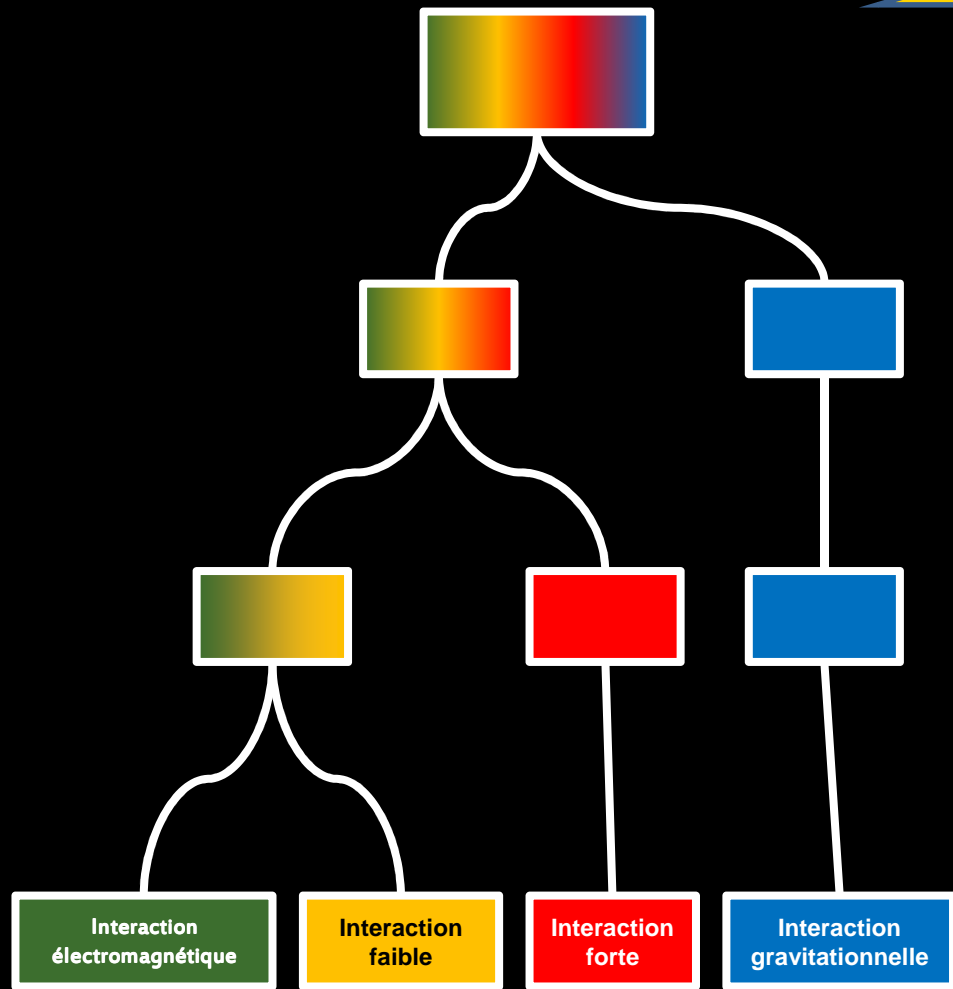


# Le grand collisionneur de hadrons (LHC) et l'expérience CMS



Masterclasses IPN Lyon, 2014, Seb. Viret



Unification ultime (Big-Bang): 1 interaction  
Niveau d'énergie:  $10^{19}$  GeV (on suppose)  
*Pas compris du tout...*

Grande unification: 2 interactions  
Niveau d'énergie: **1000 GeV** (on espère)  
*Pas encore compris*

Unification électrofaible: 3 interactions  
Niveau d'énergie: **100 GeV**  
*Pas trop mal compris*

Le monde qui nous entoure: 4 interactions  
Niveau d'énergie: **1 GeV**  
*Bien compris*

# BIG BANG

**$10^{32}$  degrés  $\approx 10^{19}$  GeV**

Période d'expansion rapide ?

**$10^{-43}$  secondes**

Les forces forte, électromagnétique et faible étaient encore confondues.  
Equilibre entre la matière et l'antimatière.  
L'univers est opaque.

**$10^{28}$  degrés  $\approx 10^{15}$  GeV**

La matière prend le dessus sur l'antimatière.  
Les forces faible et électromagnétique sont encore unifiées. Les quarks et les gluons existent sous forme de plasma. La symétrie générale est brisée.

**$10^{-35}$  secondes**

**$10^{15}$  degrés  $\approx 10^2$  GeV**

L'univers est surtout composé de photons, d'électrons, de positons, de neutrinos et d'anti-neutrinos.  
Rupture de la symétrie électrofaible. Les quarks commencent à s'assembler en protons et neutrons.

**$10^{-10}$  secondes**

**$10^{10}$  degrés  $\approx 1$  MeV**

On commence à trouver plus de protons que de neutrons. Les électrons et les anti-électrons se désintègrent en photons.

**1 seconde**

**$10^9$  degrés  $\approx 0.1$  MeV**

Noyaux atomiques légers comme l'hélium.  
L'univers est toujours principalement constitué de photons et de neutrinos.

**3 minutes**

**4000 degrés Kelvin**

Atomes légers.  
L'univers devient transparent

**$10^5$  années**

**10 degrés Kelvin**

Etoiles, galaxies, atomes lourds, molécules.  
Débuts de la vie.

**$10^9$  années**

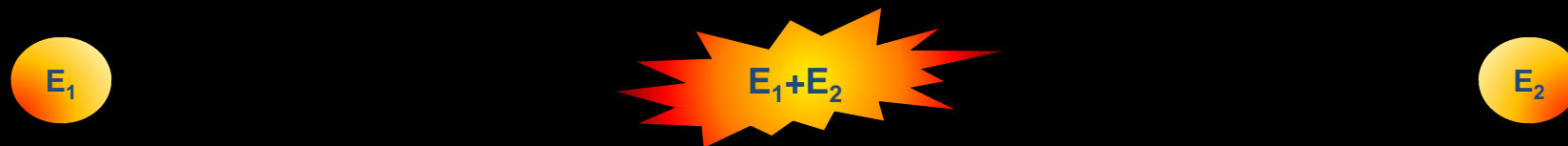
**2,7 degrés Kelvin**

**$10^{10}$  années**

## AUJOURD'HUI

Le LEP nous a emmenés jusqu'à  $10^2$  GeV.  
Le LHC nous emmènera un ordre de grandeur plus loin, jusqu'à  $10^3$  GeV.

- La physique que l'on veut comprendre aujourd'hui est au niveau du TeV (**1000 GeV**)
- **Question**: comment obtenir 1 TeV dans un petit espace (*la taille inférieure au proton*)?
- **Réponse**: en envoyant 2 particules de 500 GeV l'une contre l'autre.



→ **Problème**: énergie disponible dans particule au repos au mieux de  $E=mc^2=1$  GeV (*proton*)

→ **Solution**: accélérer les particules →

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Si  $v$  approche  $c$ ,  
 $E$  devient très élevée

→ **Exemple**: Au LHC, on a des protons avec  $E=7000\text{GeV} \Rightarrow v=0,999999991c$

→ *Seulement 11 km/h de moins que la vitesse de la lumière...*

→ *On va donc devoir accélérer beaucoup....*

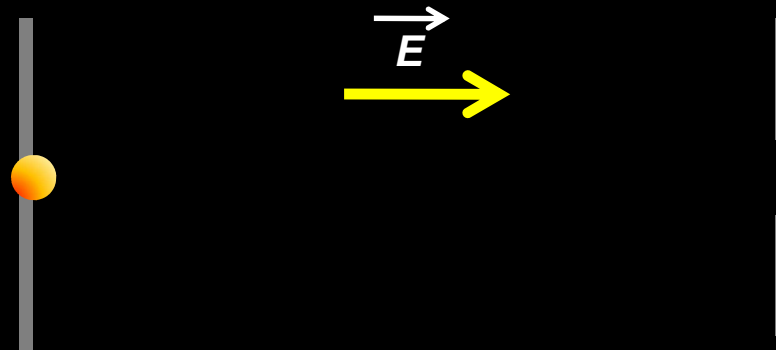
→ Pour accélérer une particule chargée (*proton, électron,...*), on la place dans **un champ électrique**

→ La particule y subit une accélération **a** proportionnelle à l'intensité du champ **E** :

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m} \quad \text{où } q \text{ est la charge de la particule, et } m \text{ sa masse}$$

→ En supposant que notre particule est initialement au repos, elle acquiert au bout d'un temps **t** une vitesse **v** :

$$\vec{v} = \vec{a} t$$



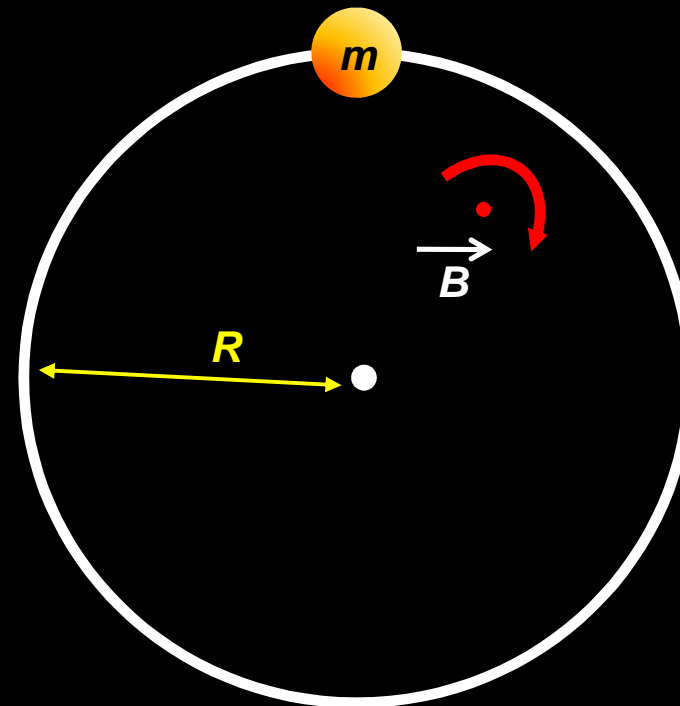
→ Pour atteindre une énergie de **7000 GeV**, il faut accélérer la particule en plusieurs fois

→ **Le plus simple, c'est de la faire tourner**, pour la faire repasser dans le même champ électrique.

→ Pour faire tourner une particule de charge  $q$ , on la fait passer dans un **champ magnétique  $B$** . Elle décrit alors un cercle de rayon  $R$  proportionnel à l'impulsion de la particule  $p$  et **inversement** à l'intensité de  $B$  :

$$R = \frac{p}{qB} = \frac{mv}{qB \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

→ Plus  $v$  approche de  $c$ , plus  $R$  est grand. **La taille de l'anneau dépend de la vitesse que l'on veut atteindre, et du champ magnétique que l'on est capable d'appliquer.**



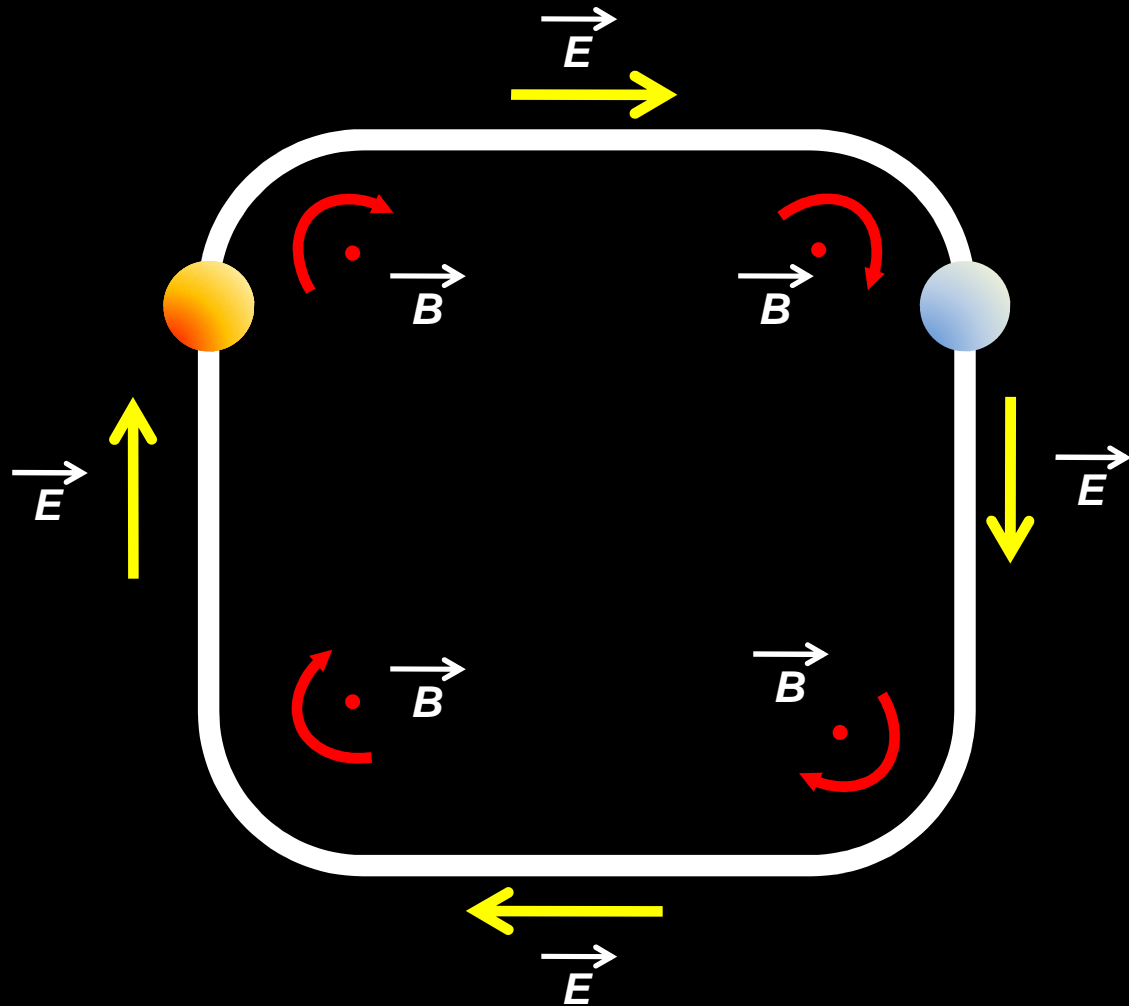
→ Cette fois on met tout ensemble

→ On commence par injecter une particule dans l'anneau

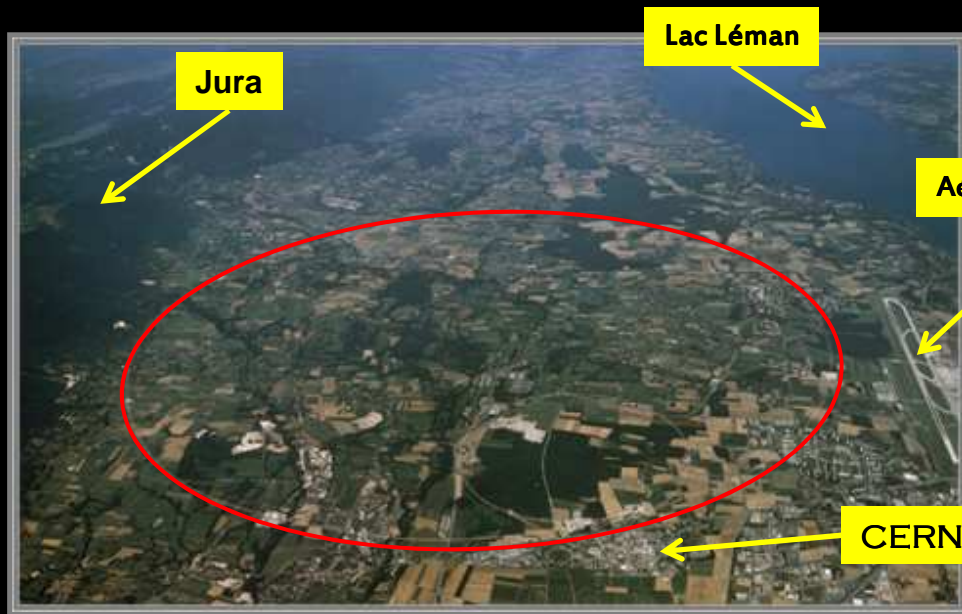
→ Elle accélère à chaque tour, et on synchronise le champ  $B$  pour qu'elle reste dans l'anneau (**synchrotron**)

→ Une fois qu'elle atteint sa vitesse de croisière, on maintient le système en jouant sur  $E$  et  $B$

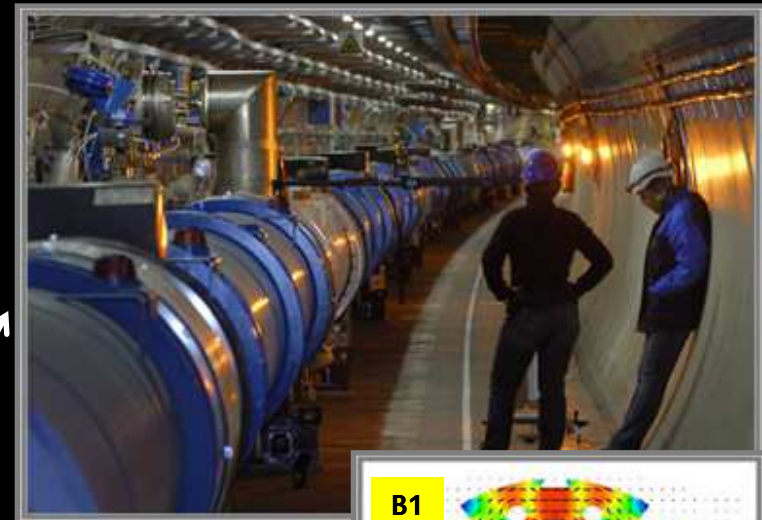
→ On peut aussi injecter une particule dans l'autre sens afin d'obtenir des **collisions**. **C'est ce qu'on fait au LHC.**







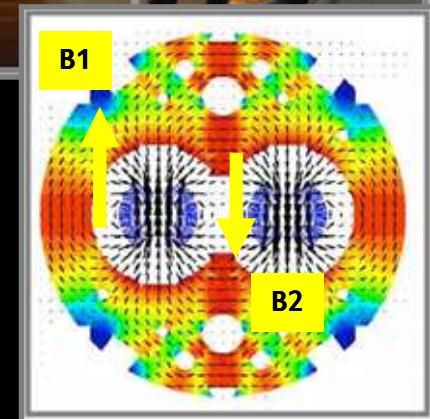
→ Le synchrotron le plus puissant jamais construit



→ Tunnel de **27 km de long**, situé 100m sous terre

→ Les particules sont guidées par plusieurs milliers **d'aimants**. **B** créé par des **circuits supraconducteurs (pas de perte d'énergie)**, refroidis à **1,9 K** (*plus froid que la température de l'univers*).

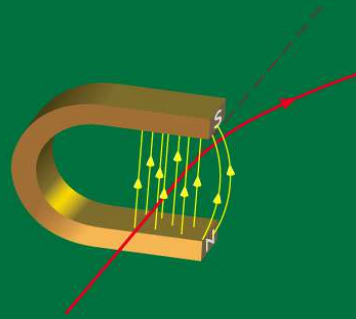
→ Ce champ magnétique **ultra-puissant** permet de guider simultanément **2 faisceaux de protons** (*particules de même charge*) dans des directions opposées.



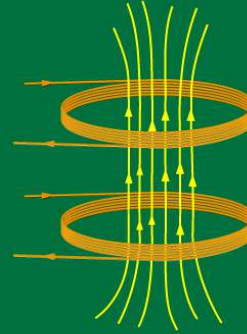
Tranche d'aimant



## Guidage des faisceaux

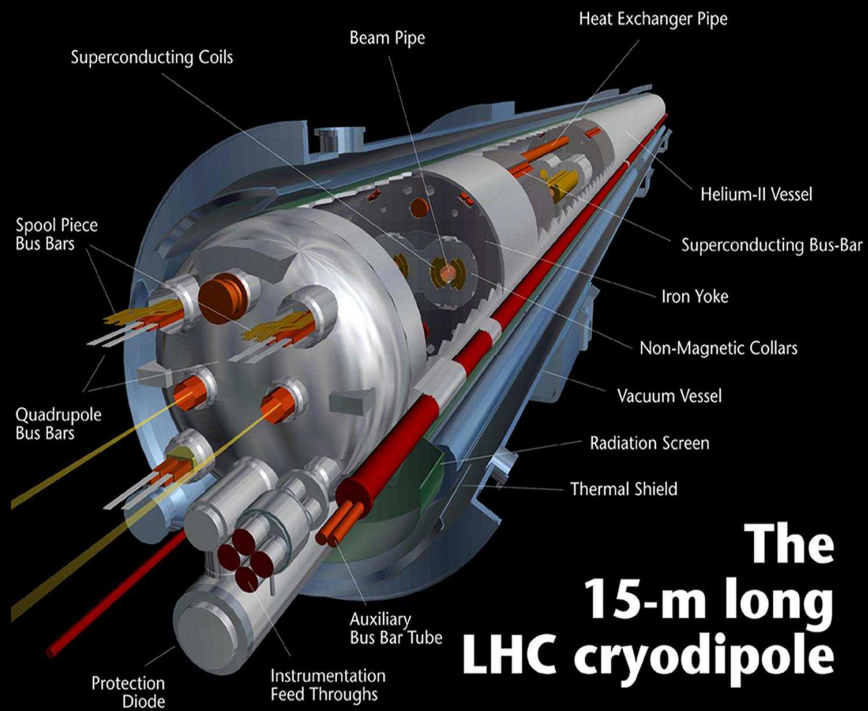


Un faisceau de particules chargées électriquement est dévié par un champ magnétique.



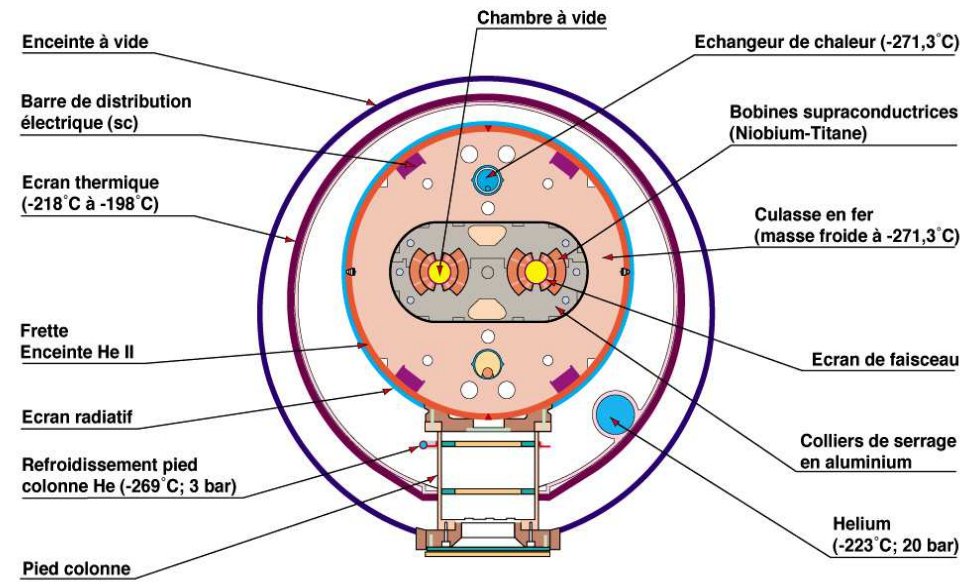
Une bobine parcourue par un courant électrique crée un champ magnétique perpendiculaire à son plan.

CERN AC - V9/9/1997

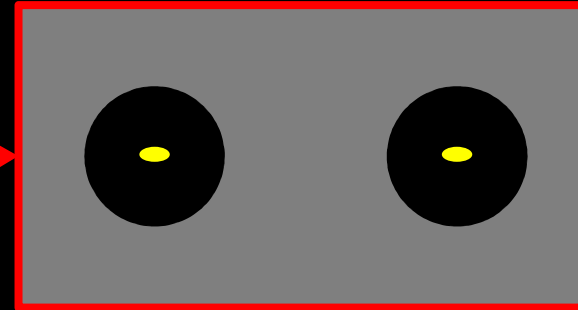
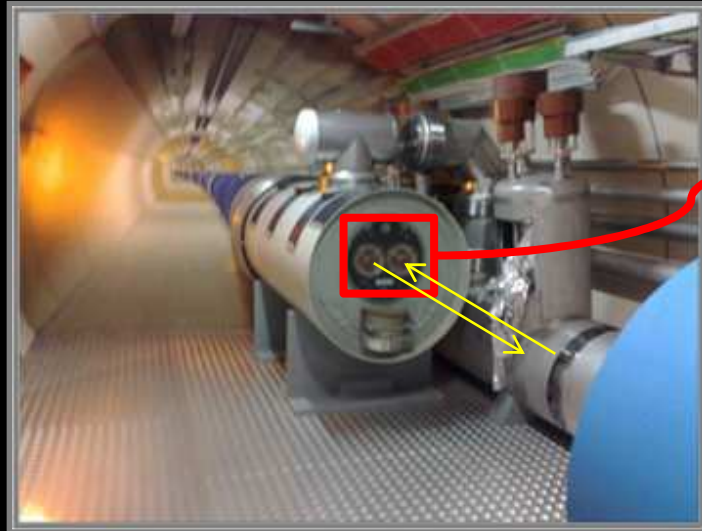


The  
15-m long  
LHC cryodipole

## Dipole LHC: Coupe transversale



CERN AC - HE107



→ Les deux faisceaux de protons très fins (**1/10 de cheveu, 15  $\mu$** ) passent dans les tubes où règne un vide ultra-poussé (**plus vide que l'espace**)

→ Chaque faisceau est une succession **de paquets de protons. 25 ns** entre chaque paquet (40 millions /s)

→ 1 faisceau du LHC, c'est environ **3000 paquets de 100 milliards de protons de 7 TeV**, soit une énergie totale de **400 MJ**

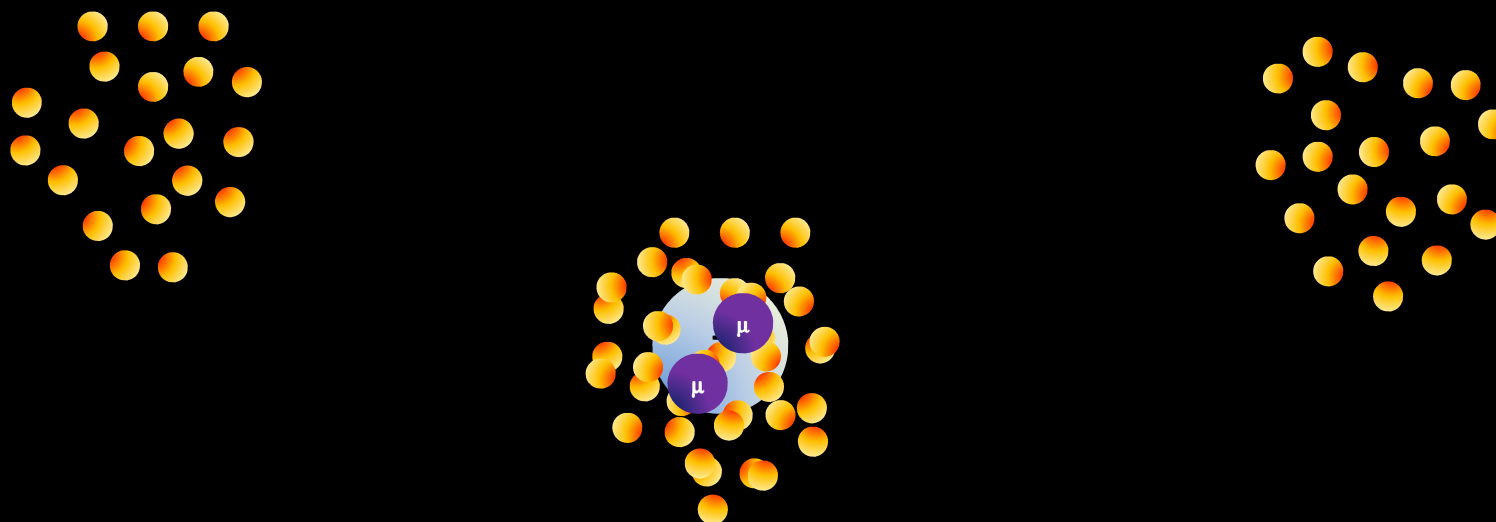
→ **A peu près un TGV lancé à 165km/h**

→ Pour quelque chose qui est 10 fois plus petit qu'un cheveu, ça fait pas mal...



→ Un paquet de protons fait **10000 tours par seconde (7x le tour de la Terre)**. Pour chaque paquet, on peut donc avoir **10000 collisions par seconde**

100 milliards de protons contre 100 milliards d'autres protons.



→ Protons bien plus petits que la taille des faisceaux. La plupart se croisent sans se voir, et il y aura en moyenne **seulement une dizaine d'interactions par croisement.**

→ Dans ces interactions, il y a peut-être celles qui nous intéressent

→ Pour savoir ce qui s'est passé, on place autour du lieu de la collision un **système de détection**. Un peu comme une caméra, mais en un peu plus compliqué...



# Les points de collisions du LHC



→ Les faisceaux se croisent à 4 endroits au LHC. Un détecteur est construit autour de chacun de ces points.

**ALICE**



**CMS**



**ATLAS**



**LHCb**

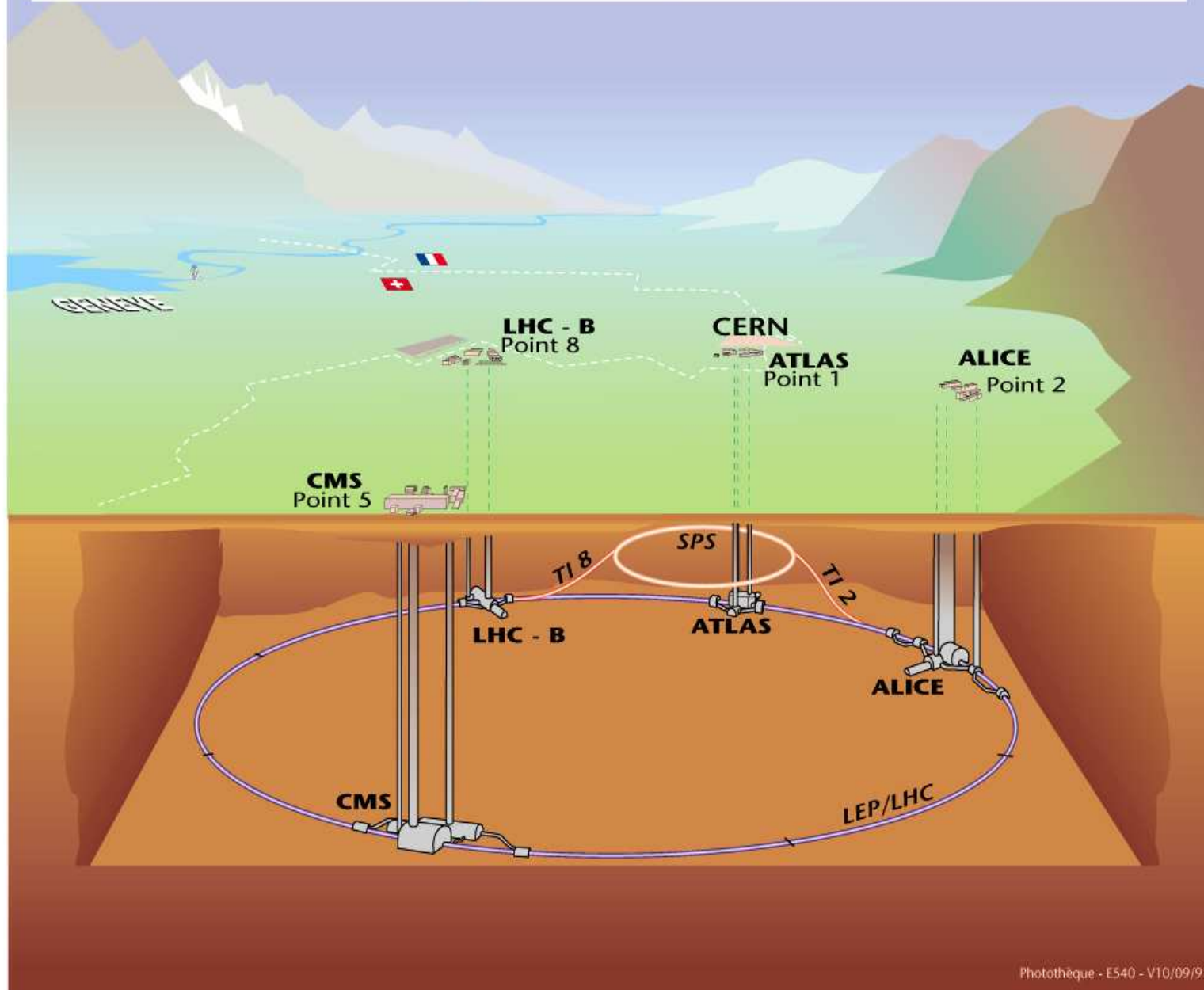


PLAY ▶

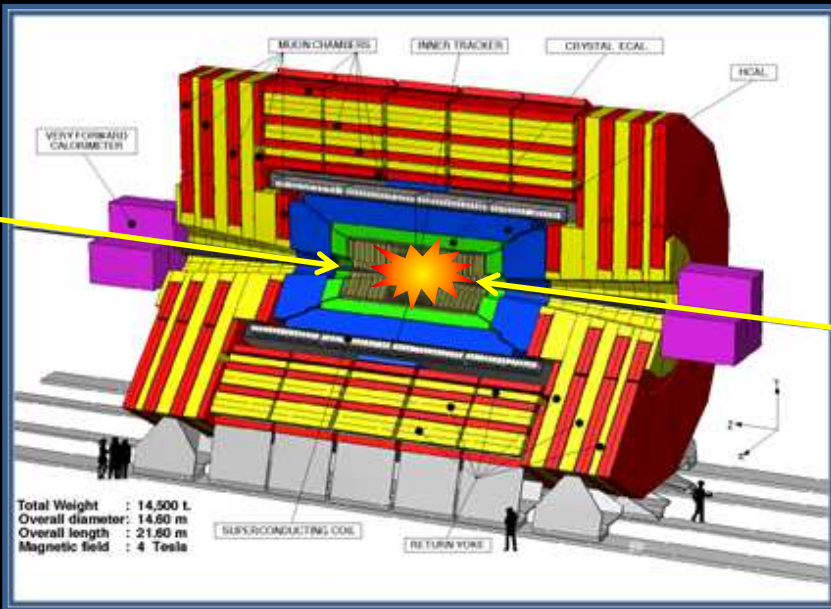
Large Hadron Collider



# Vue d'ensemble des expériences LHC.







→ ~ 14000 tonnes, 22 mètres de long

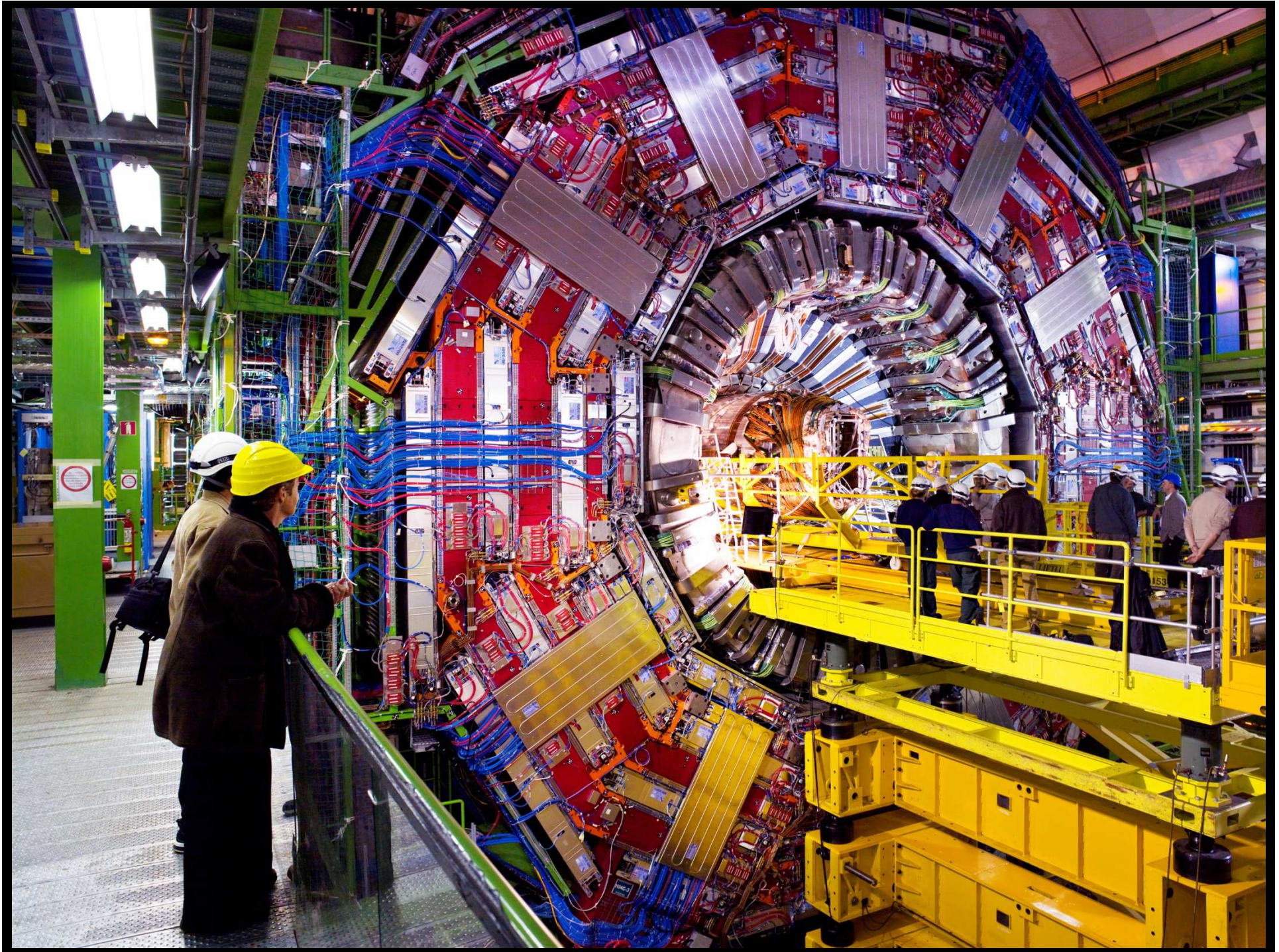
→ 2x plus petit qu'ATLAS, mais 2x plus lourd

→ Un assemblage complexe de sous-détecteurs, imbriqués les uns dans les autres.

→ Une collaboration de plusieurs milliers de personnes, venant de plusieurs dizaines de pays

→ Un peu comme un oignon, en plus compliqué quand même...







→ Pour reconstituer l'interaction d'origine, nous ne disposons que des particules qui survivent suffisamment longtemps pour passer dans le détecteur.



→ Les photons



→ Les électrons, les muons et leurs anti-particules respectives



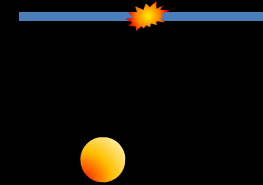
→ Les hadrons chargés (*proton, pions chargés,...*)



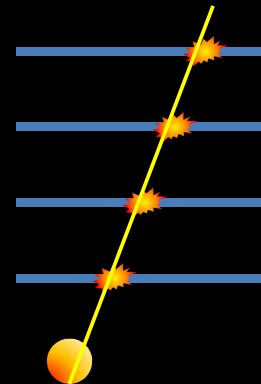
→ Les hadrons neutres (*neutron, pion neutre,...*)

**On doit deviner tout le reste à partir de ça.  
Identifier correctement ces particules est donc capital.**

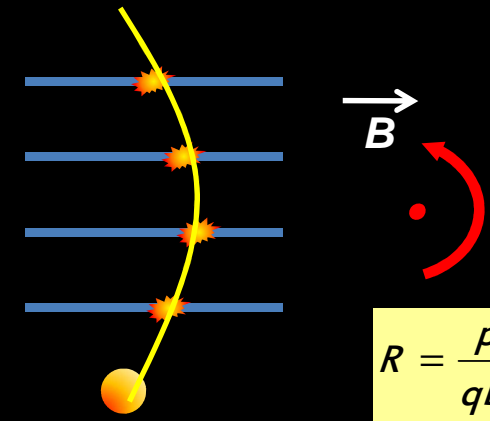
→ Les particules chargées interagissent avec le matériau qu'elles traversent (*par ionisation*). S'il y a peu de matériau traversé (*fine plaque*), on peut savoir où la particule est passée sans la détruire.



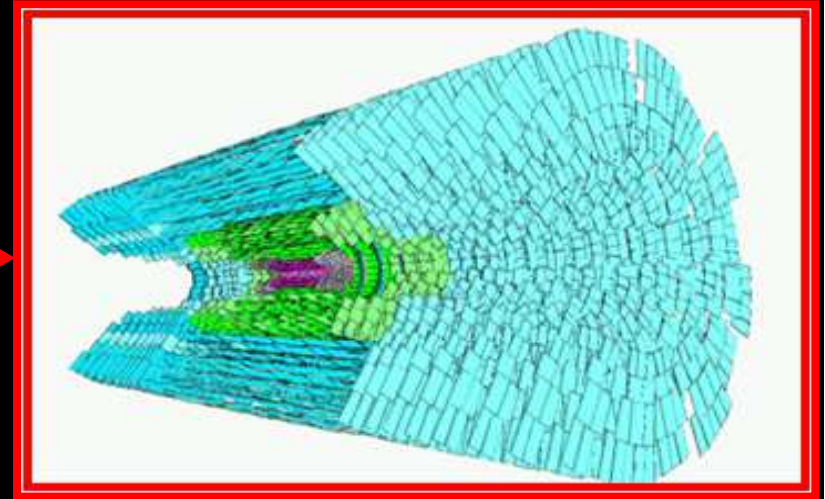
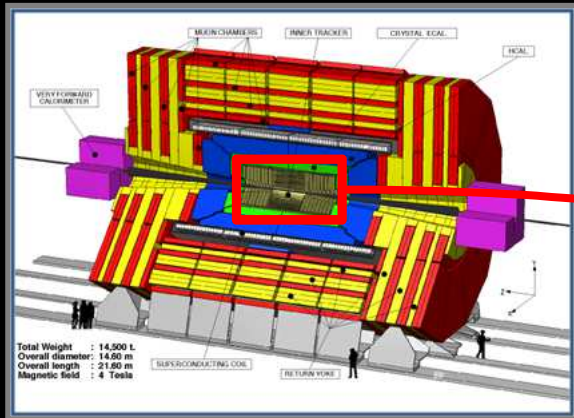
→ Si on met plusieurs couches, on peut **voir le trajet de la particule**, et donc savoir d'où elle vient.



→ Si en plus on ajoute un **champ magnétique**, on peut mesurer son **impulsion**, sa **charge**,...

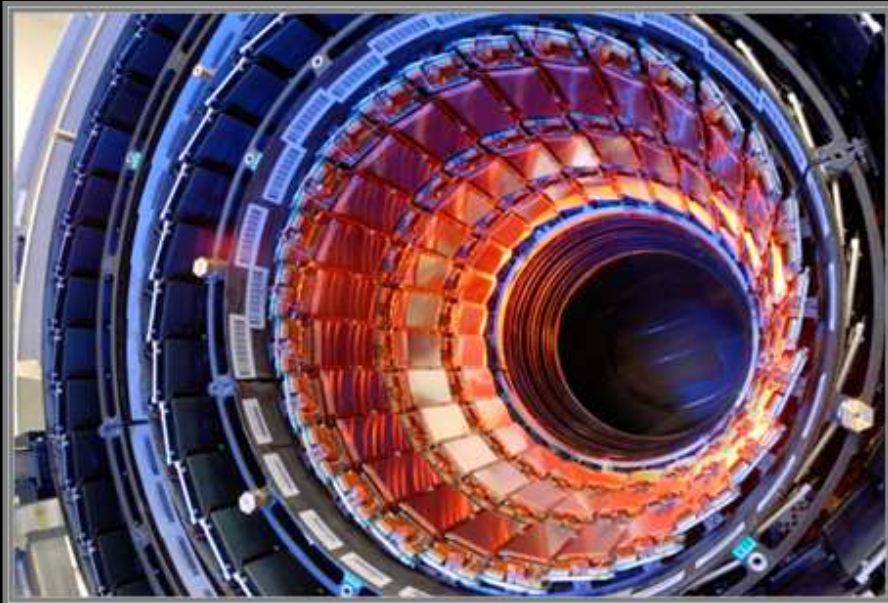
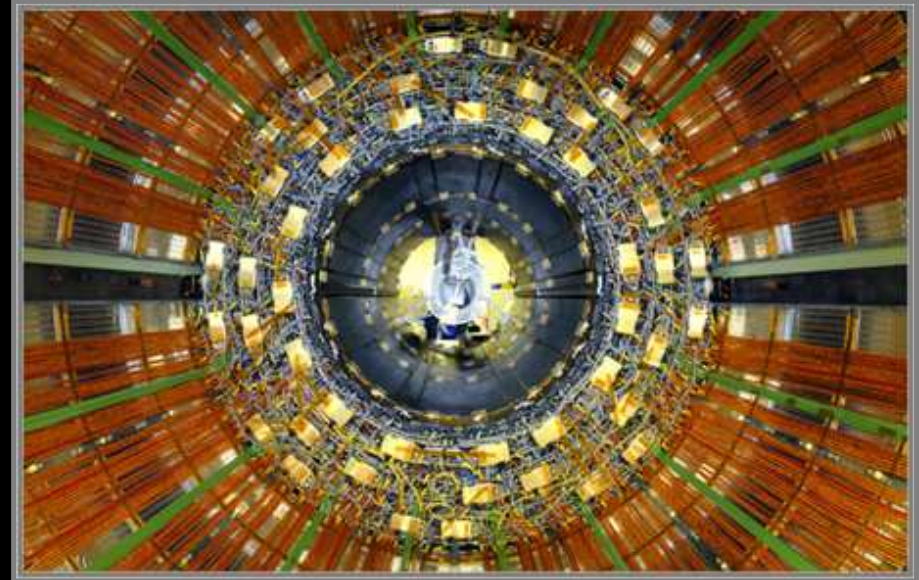


$$R = \frac{p}{qB}$$



- Le détecteur de traces de CMS entoure le point d'interaction (*première couche de l'oignon*).
- On essaye de **couvrir le maximum d'espace** pour perdre le moins possible d'information (**herméticité**).
- Plusieurs dizaines de milliers de plaques de détection en silicium (*à peu près la surface d'un court de tennis...*). Environ **75 millions** de canaux . **C'est le plus grand détecteur en silicium jamais construit.**
- Une particule chargée traversant ce détecteur laisse en moyenne une **dizaine de points de mesure**. Avec ça, on peut reconstruire les traces des particules, et leur origine, avec une **précision de quelques dizaines de microns** (*un peu moins que l'épaisseur d'un cheveu*)

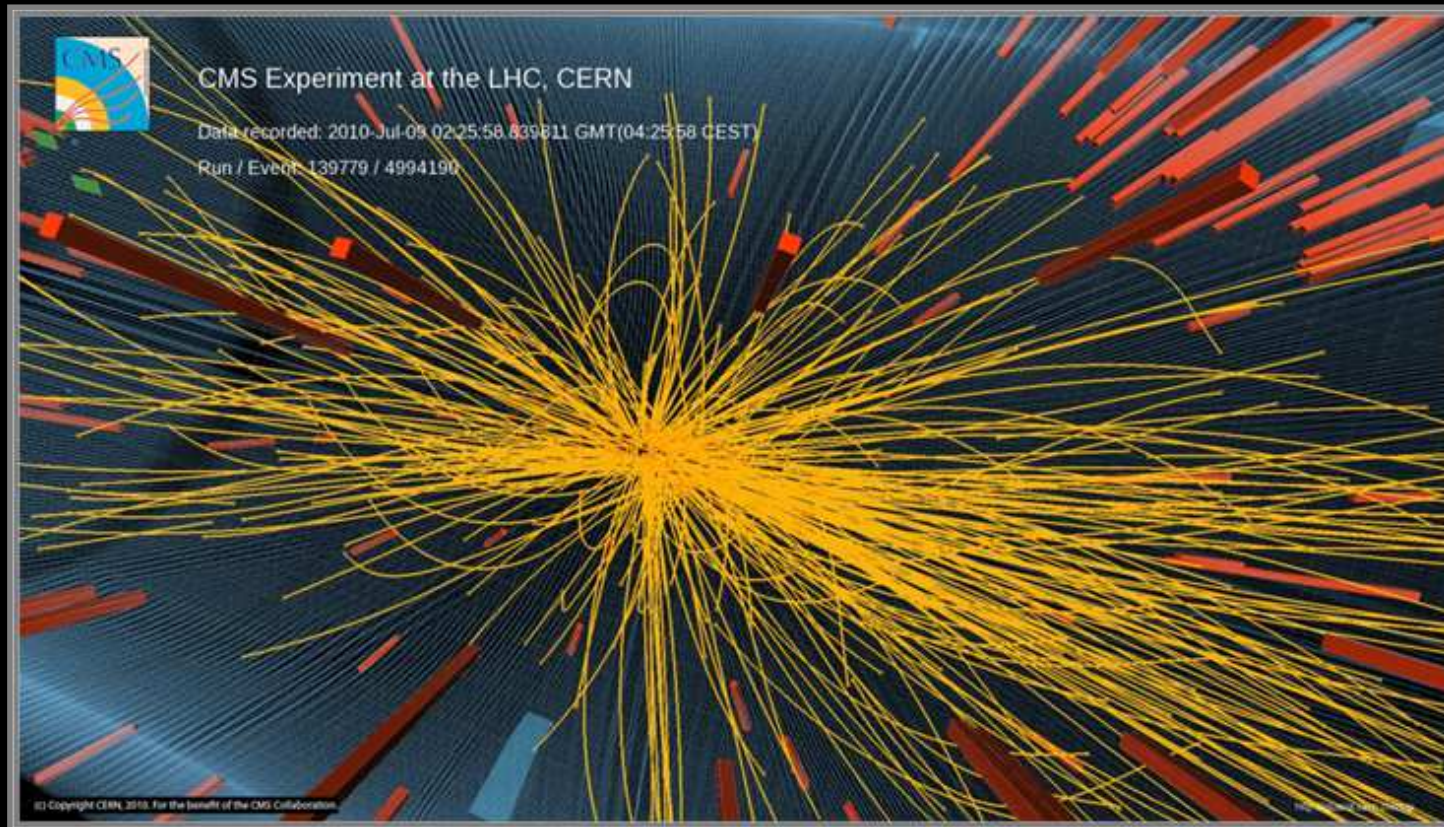
→ La construction d'un tel détecteur est un défi technique monumental



→ Plusieurs centaines d'ingénieurs et de techniciens ont travaillé pendant presque 20 ans....



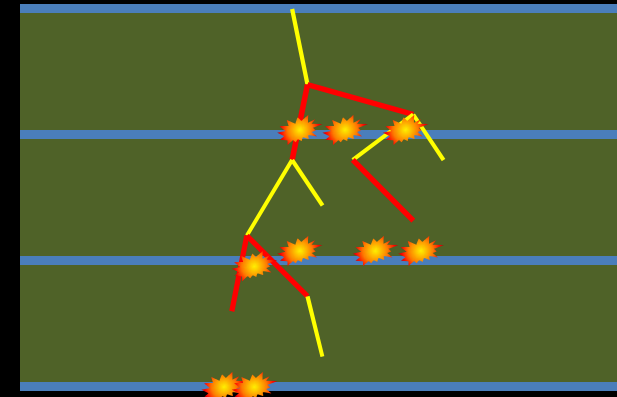
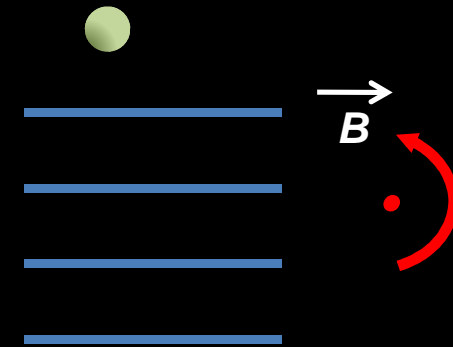
→ Mais au bout de 20 ans, on arrive à cela:



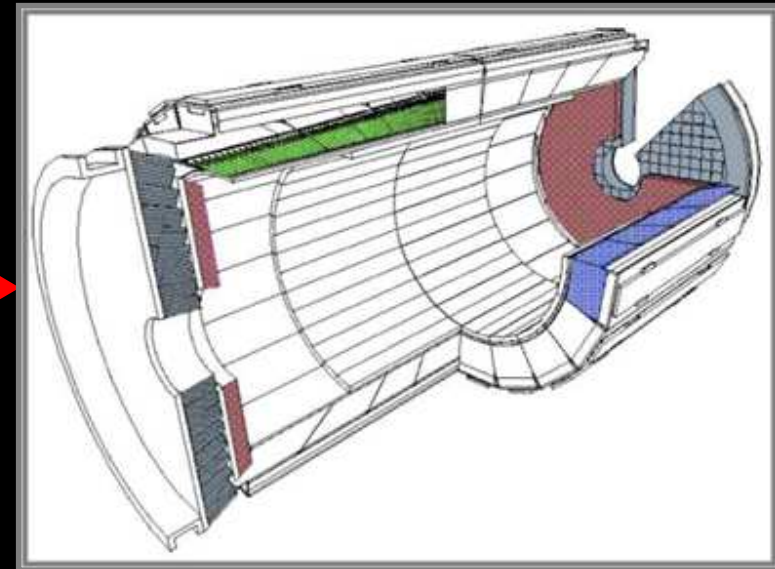
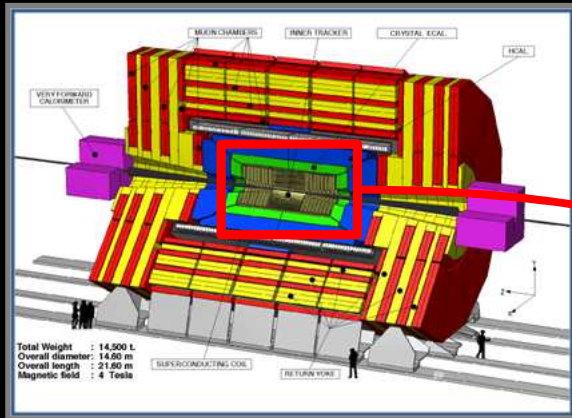
→ Pour reconstruire correctement toutes ces traces, des programmes informatiques spéciaux ont été développés.

→ L'informatique est aussi une composante importante dans ce type d'expérience.

- Les particules neutres passent dans un détecteur de traces sans en laisser...
- On va freiner /arrêter ces particules en les forçant à traverser un matériau très dense (*du plomb par exemple*).
- En freinant, les particules vont émettre d'autres particules que l'on va pouvoir détecter, et ainsi mesurer la quantité d'énergie déposée.
- Cette quantité d'énergie va nous mener directement à l'énergie de la particule initiale.
- **De la même façon, on mesure l'énergie des particules chargées.** Si on a l'**énergie** et l'**impulsion**, on peut reconstruire la masse de la particule, et l'identifier.



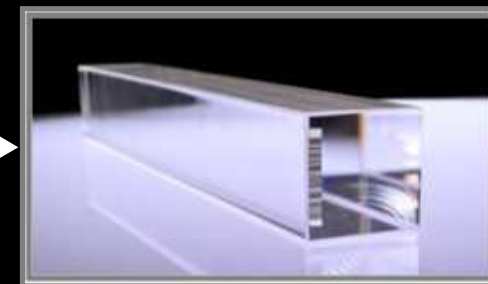
→ **Ces détecteurs d'énergie sont les CALORIMETRES**



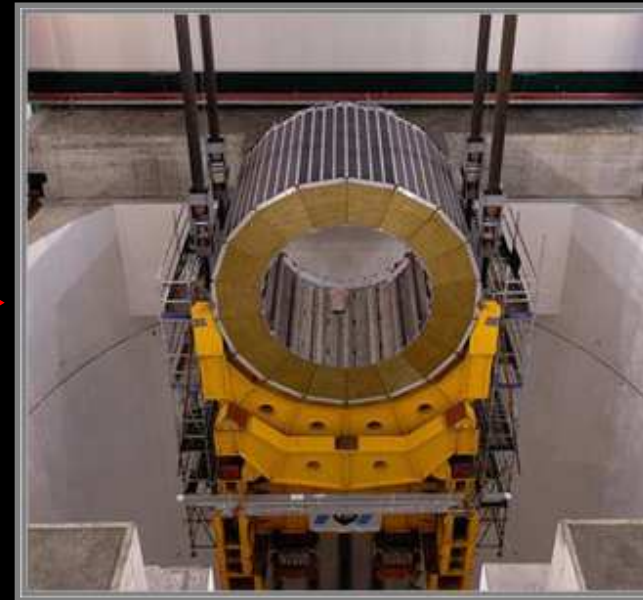
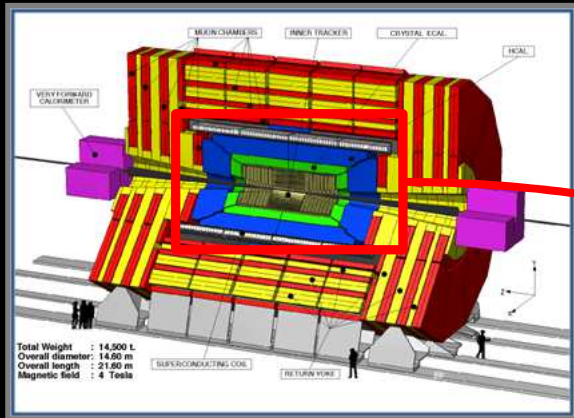
→ Le calorimètre électromagnétique entoure le détecteur de traces (*deuxième couche de l'oignon, en vert*).

→ Il permet d'arrêter les électrons et les photons (*qui freinent plus vite que les autres particules*)

→ Assemblage de **75000 cristaux de tungstate de plomb** (*PbWO<sub>4</sub> matériau très dense*)





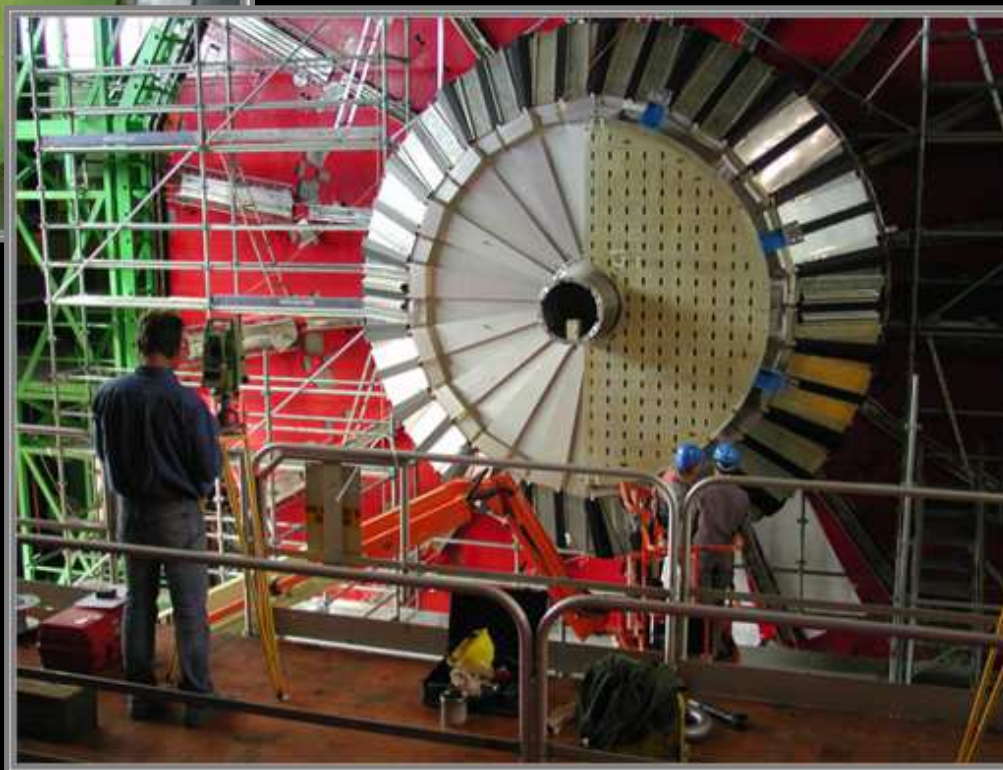
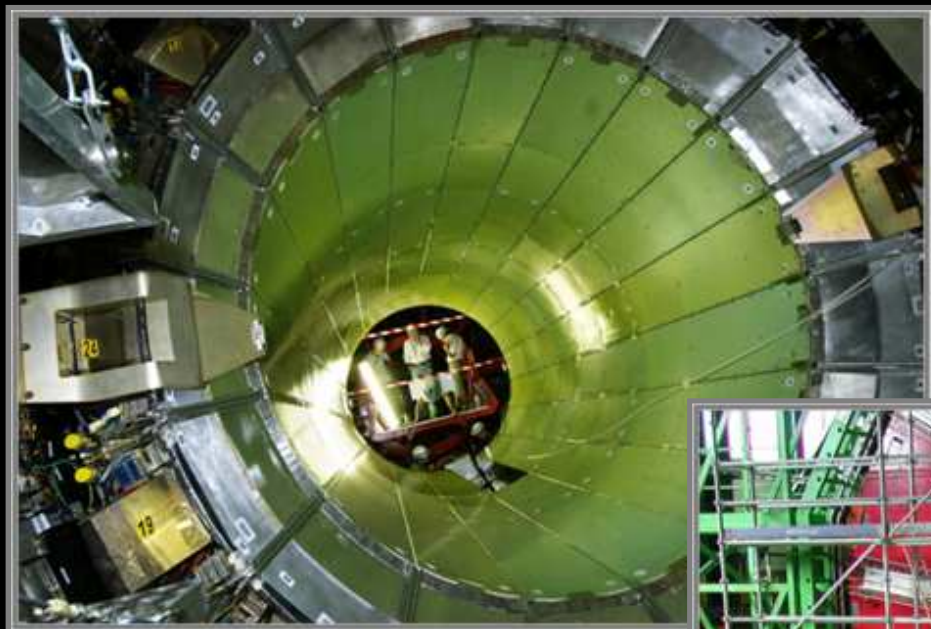


→ Le calorimètre hadronique entoure le précédent (troisième couche de l'oignon, *en bleu*).

→ Comme son nom l'indique, il permet d'arrêter les **hadrons** (*neutrons, protons,...*)

→ Assemblages de **plaques de bronze**







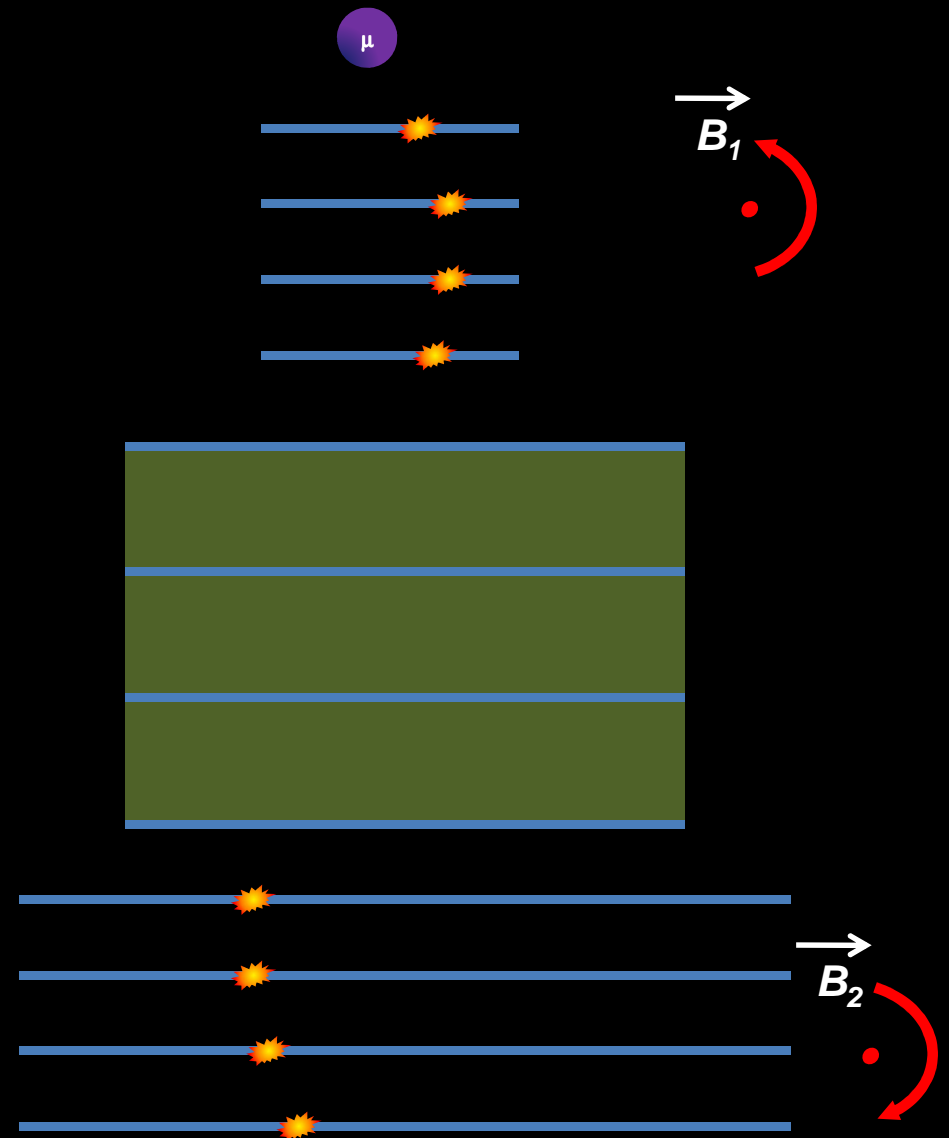


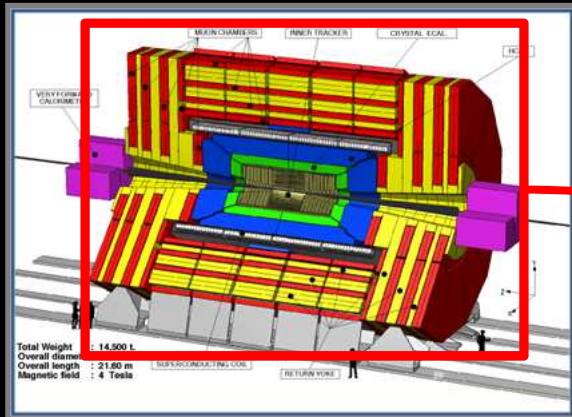
Le calorimètre hadronique est entouré par un aimant très puissant (**solénoïde**) qui permet de courber les trajectoires des particules



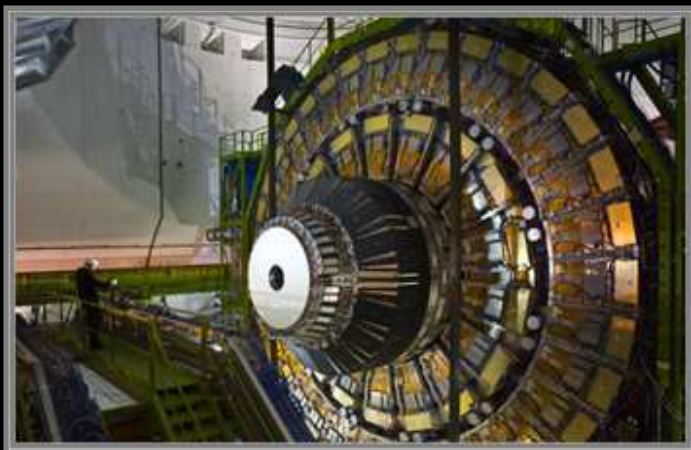


- Les calorimètres ne suffisent pas à arrêter les muons, qui 'freinent' moins que les électrons.
- On place donc un autre détecteur de traces (**SPECTROMETRE A MUONS**), après les calorimètres, pour mesurer à nouveau les propriétés des muons
- Un **second champ magnétique**, (le champ de retour du premier), courbe la trajectoire des muons dans l'autre sens
- Avec tout cela, on a une **très bonne identification des muons**. C'est très utile pour trier les interactions





- C'est la dernière couche (en **rouge** et **jaune**), donc la plus imposante
- Les détecteurs sont à l'intérieur de la structure du deuxième aimant

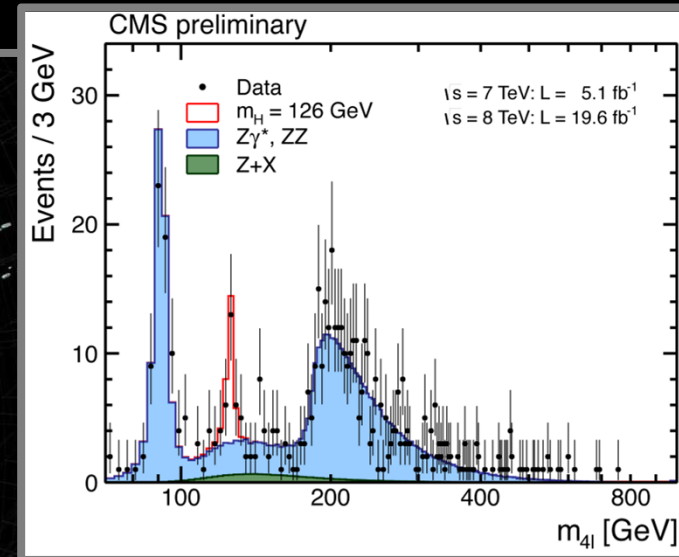
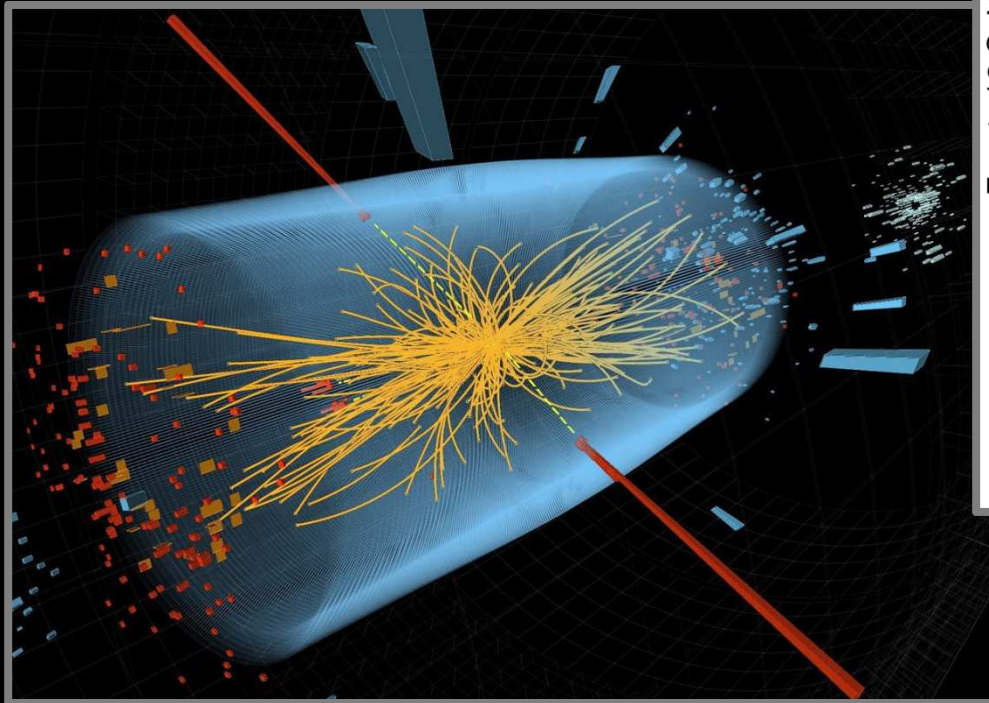


- Ce n'est pas tout de fabriquer un détecteur, il faut le faire fonctionner
- Il y a environ **30 millions de collisions chaque seconde**, nous ne pouvons en garder que **quelques centaines**.
- Il faut décider lesquelles en très peu de temps, et donc être capable d '**analyser les données du détecteur en temps réel**. Ce tri est assuré par plusieurs centaines d'ordinateurs fonctionnant en parallèle.



- **1CD de données chaque seconde, 7J/7, 24H/24...**
- Ces données sont distribuées dans les laboratoires du monde entier pour y être stockées et analysées (grille de calcul)
- **C'est un travail qui prendra plusieurs années**

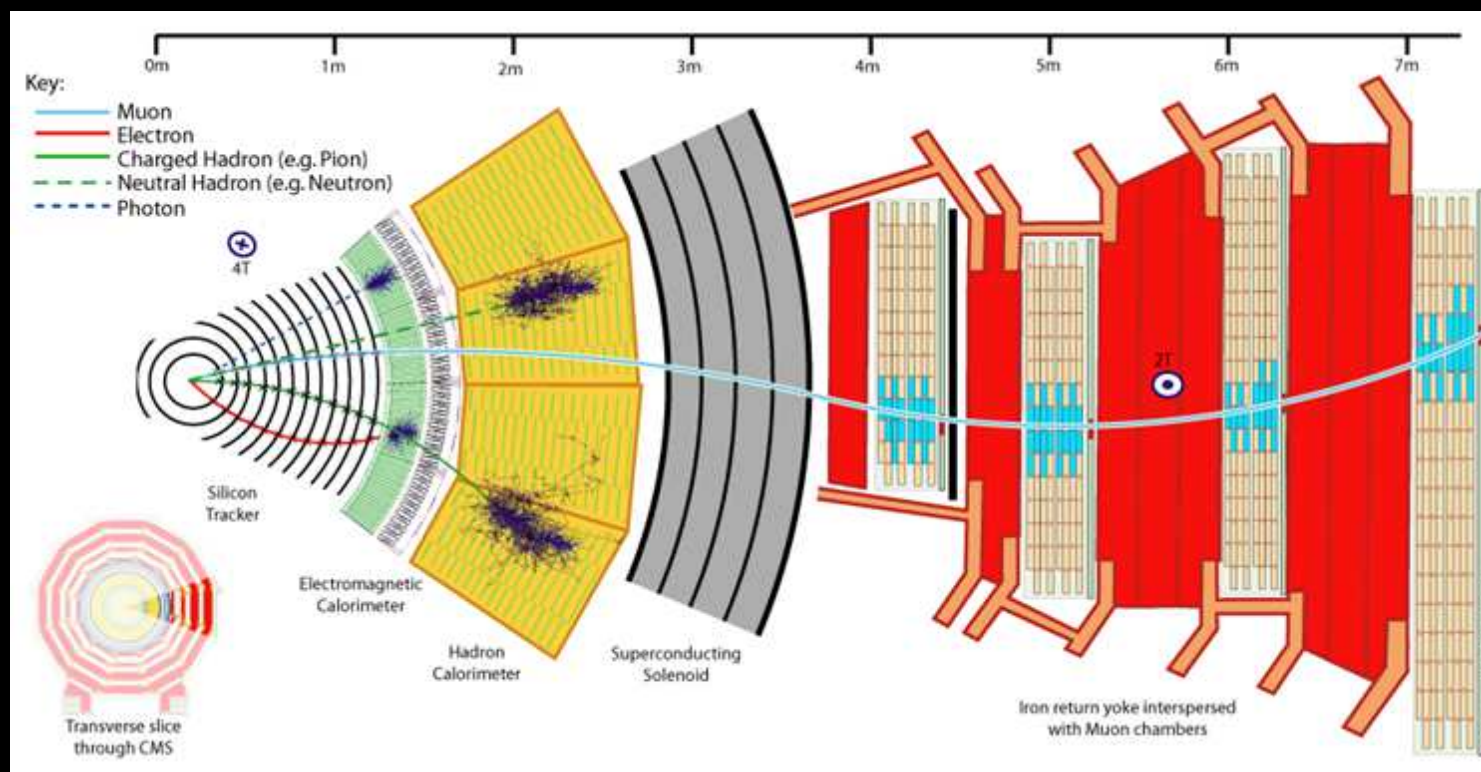
Le projet LHC fonctionne enfin après plus de 20 ans d'efforts



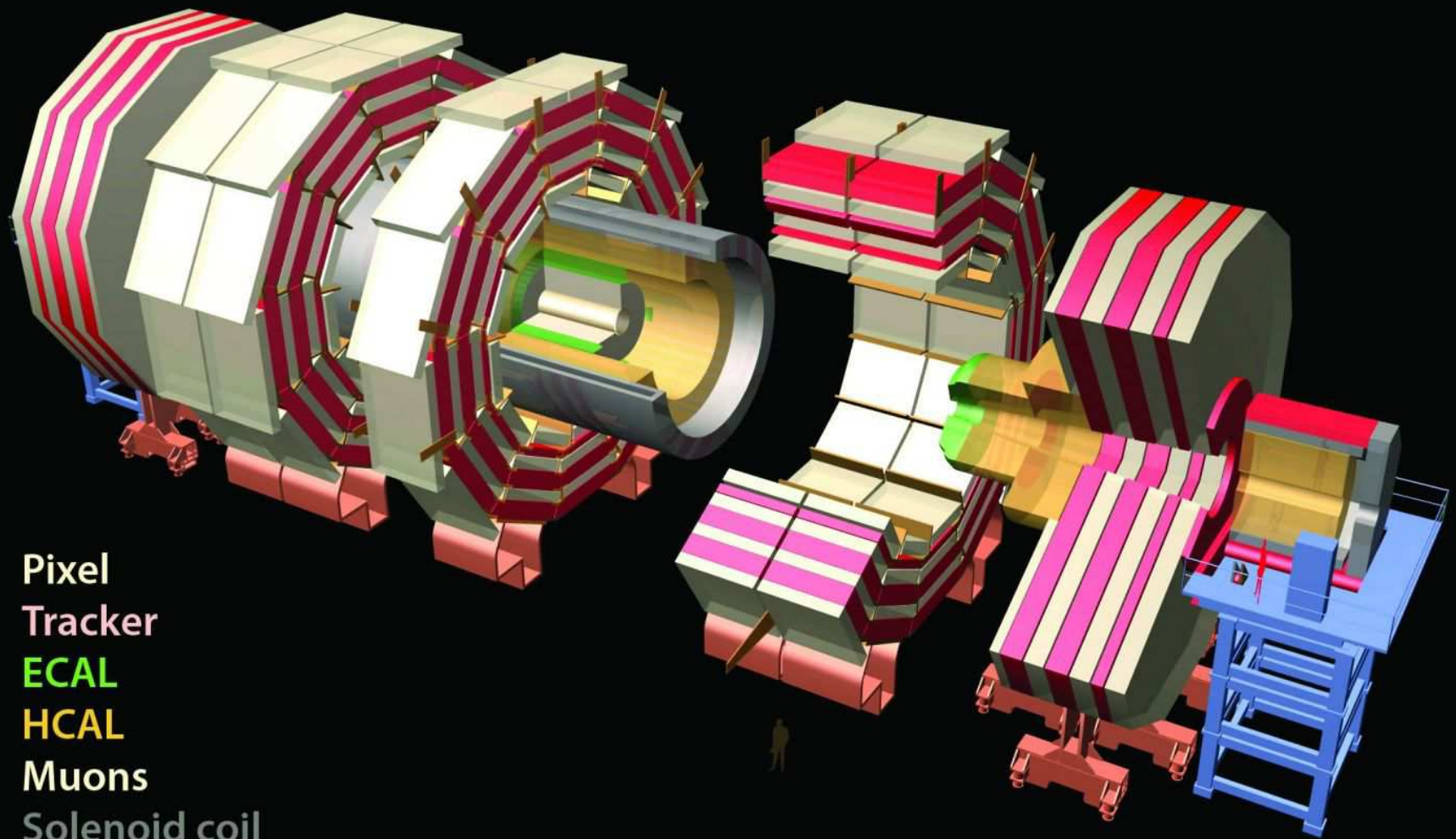
La récolte a commencé...

Backup





Les différentes couches



Pixel  
Tracker  
ECAL  
HCAL  
Muons  
Solenoid coil

Total weight 12500 t, Overall diameter 15 m, Overall length 21.6 m, Magnetic field 4 Tesla