

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



MasterClasses IPN Lyon, 2019

→ La physique que l'on veut comprendre aujourd'hui est au niveau du TeV (**1 000 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 $E = 13\,000$ GeV $\Rightarrow v = 0,999999997c$

→ *Seulement 3 km/h de moins que la vitesse de la lumière...*

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

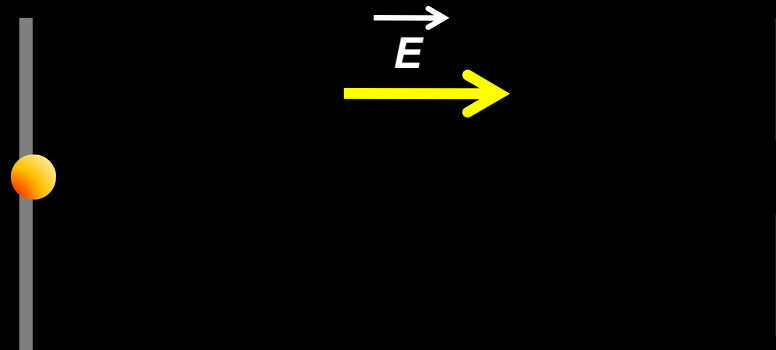
→ Pour accélérer une particule chargée (*proton, électron, ...*), on la place dans **un champ électrique**

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

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

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

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



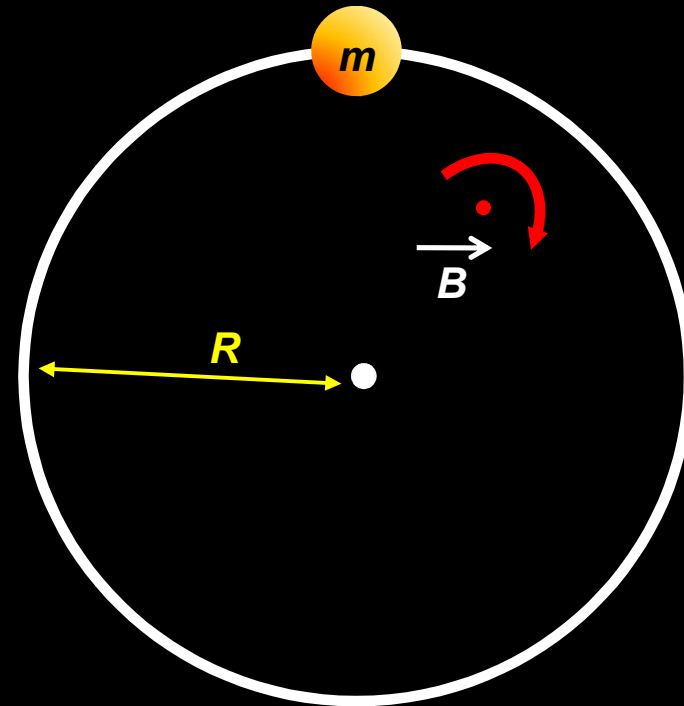
→ Pour atteindre une énergie de **13 000 GeV**, il faut accélérer la particule en plusieurs fois

→ **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.**



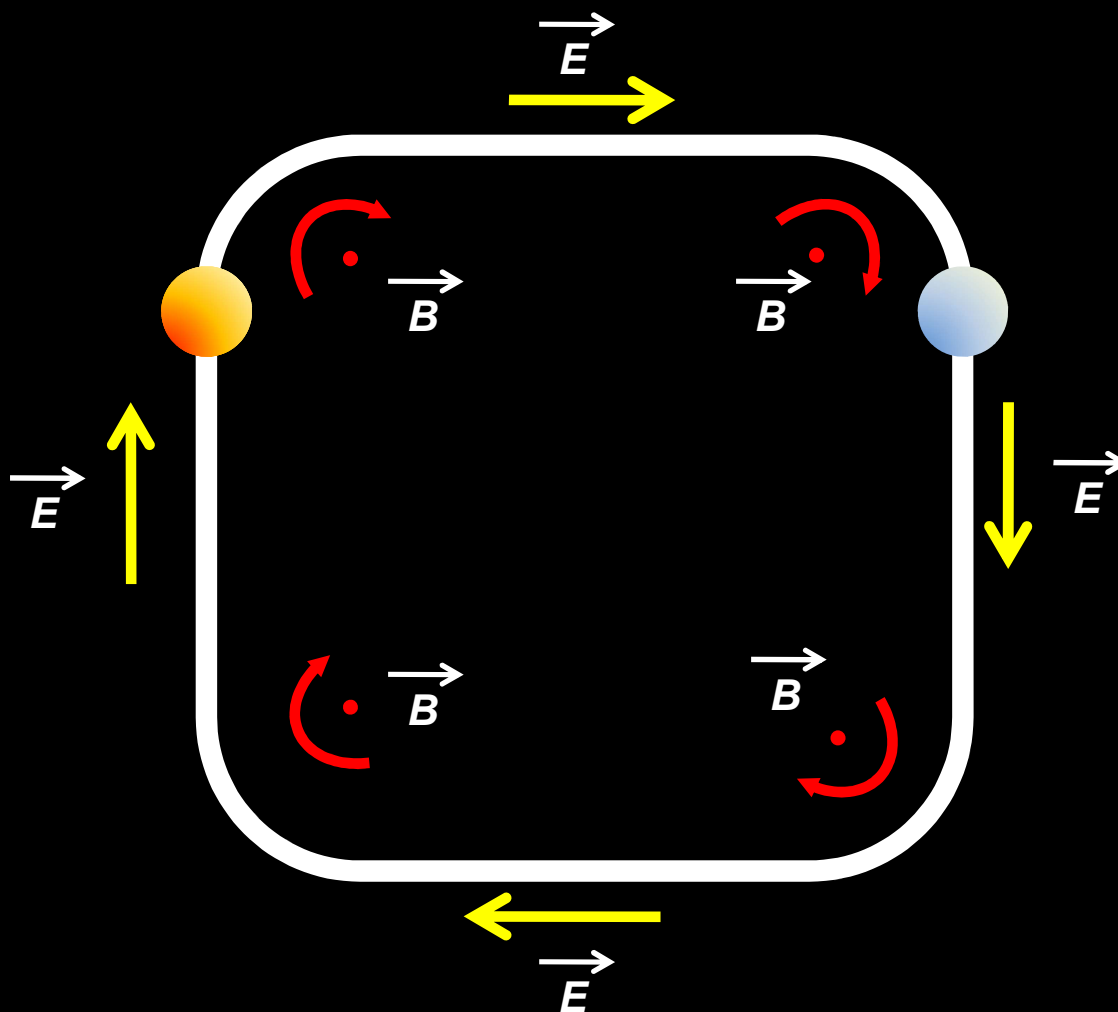
→ Cette fois on met tout ensemble

→ 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**)

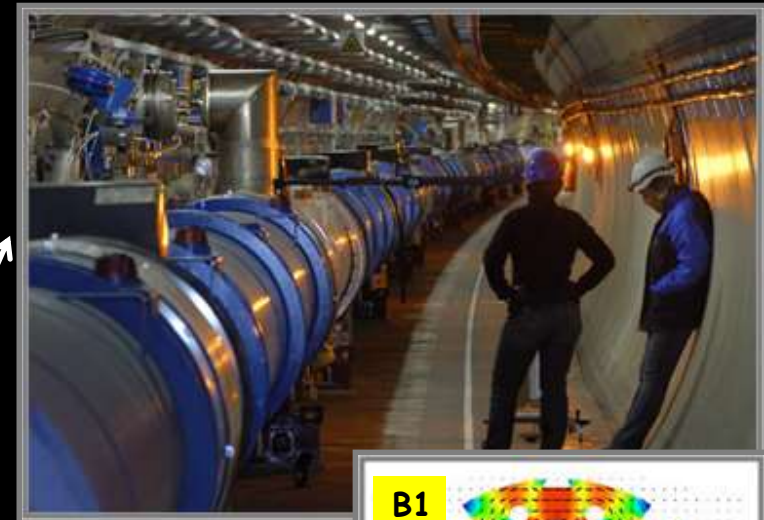
→ Une fois qu'elle atteint sa vitesse de croisière, on maintient le système en jouant sur E et B

→ 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

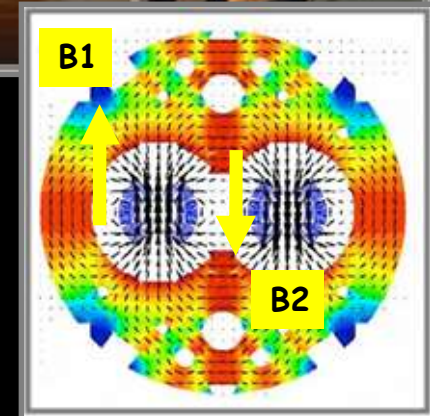


→ Tunnel de **27 km de long**, situé 100 m sous terre

→ Les particules sont guidées par 1200 **aimants** de 8,4 T créés par des **circuits supraconducteurs (pas de perte d'énergie)**, refroidis à **1,9 K** (*plus froid que la température de l'univers*).

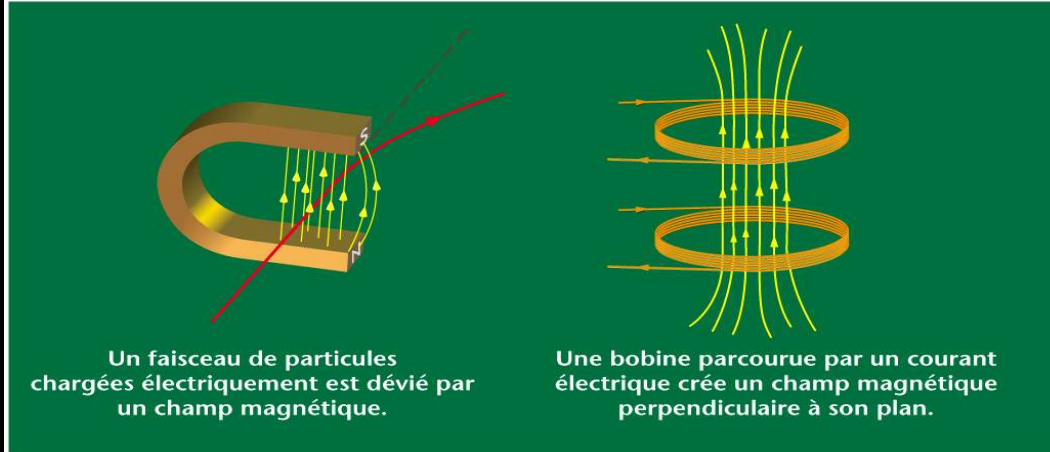
Consommation du CERN : canton de Genève (500 000 personnes)

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

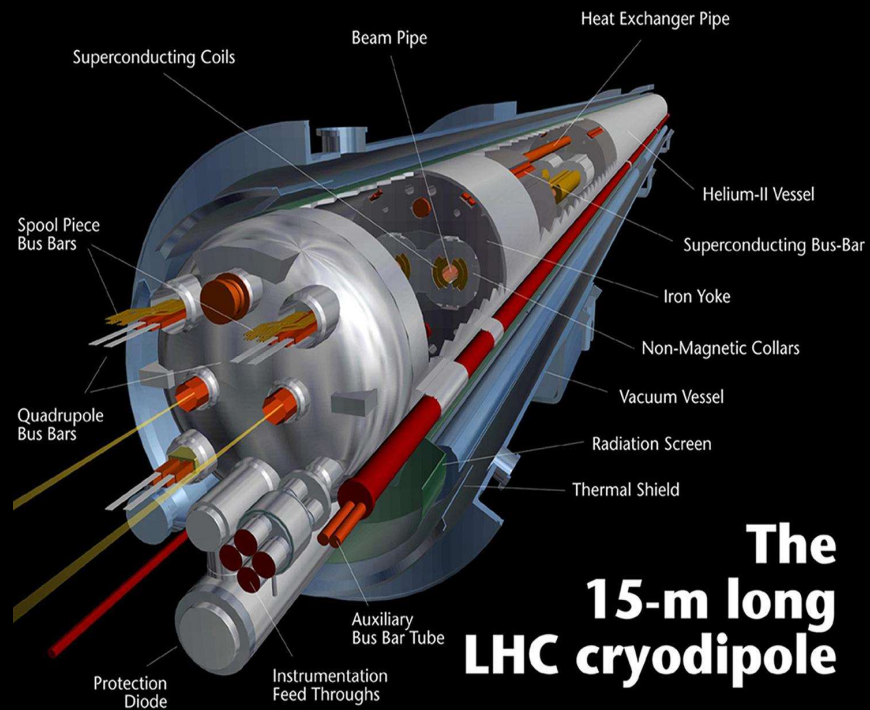


Tranche d'aimant

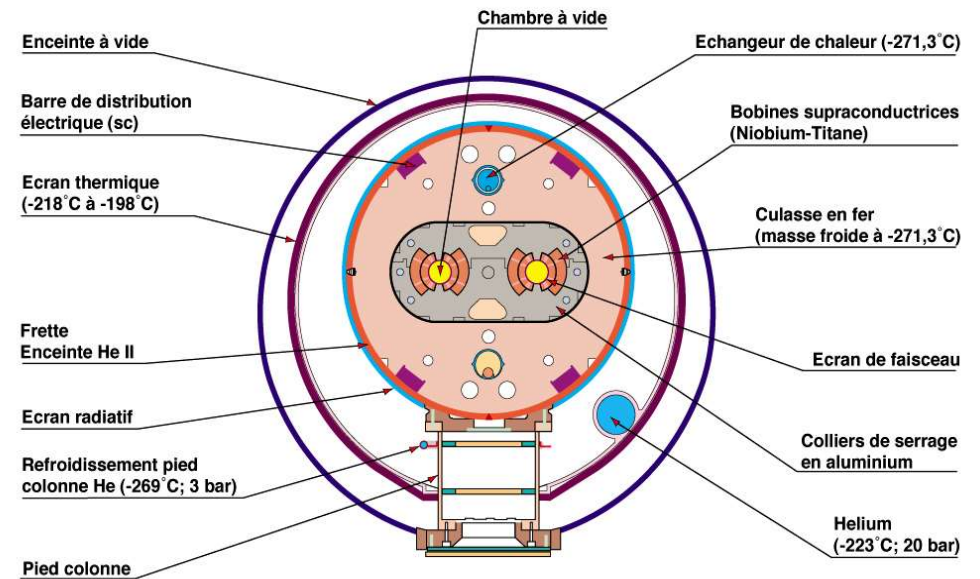
Guidage des faisceaux

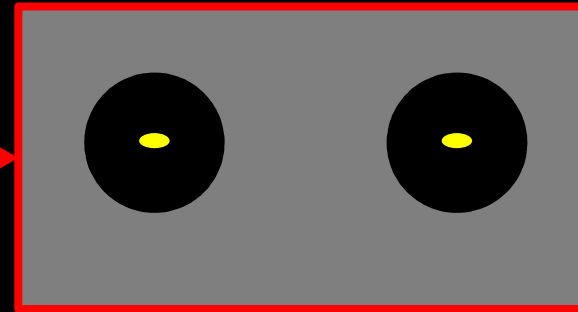
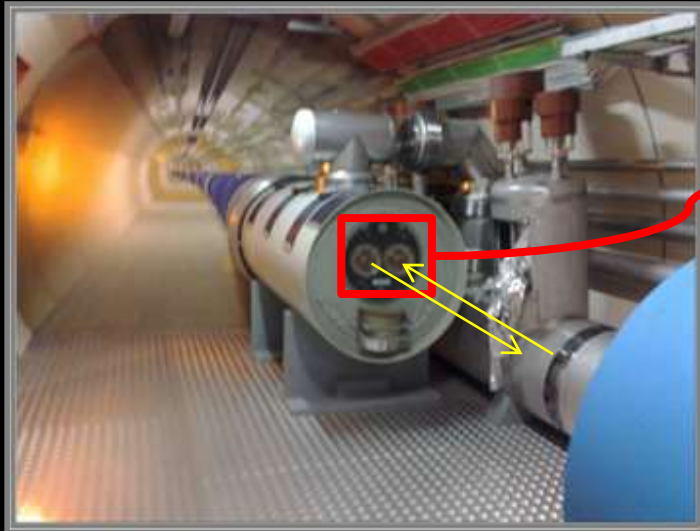


Dipole LHC: Coupe transversale



The
15-m long
LHC cryodipole





→ Les deux faisceaux de protons très fins (**1/10 de cheveu, 15 μ**) 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 13 TeV**, soit une énergie totale de **600 MJ**

→ **A peu près un TGV lancé à 300 km/h**

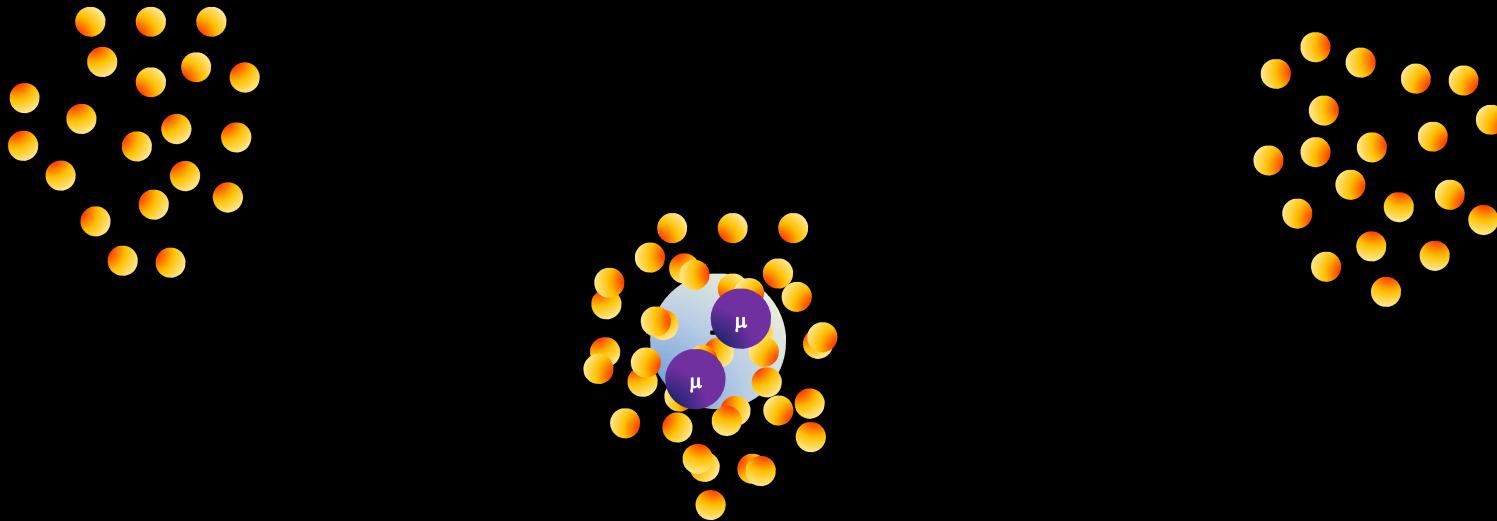
→ Pour quelque chose qui est 10 fois plus petit qu'un cheveu...

→ 1 faisceau « vit » plusieurs heures (**aller-retour Terre-Neptune**).



→ Un paquet de protons fait **10 000 tours par seconde (7 x tour de la terre)**. Pour chaque paquet, on peut avoir **10 000 collisions par seconde**

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



→ Les protons sont bien plus petits que la taille des faisceaux. La plupart se croisent sans se voir. Il y aura en moyenne **seulement une vingtaine 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



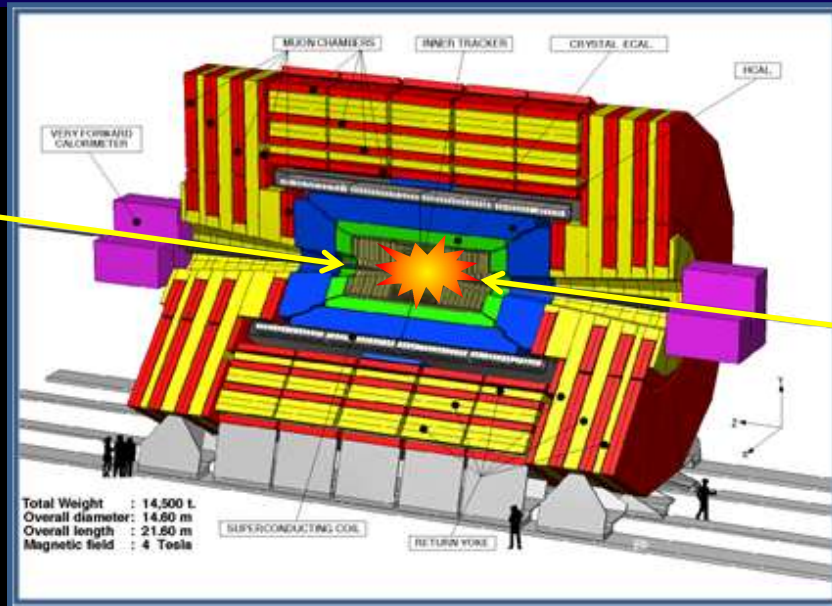
ATLAS



LHCb

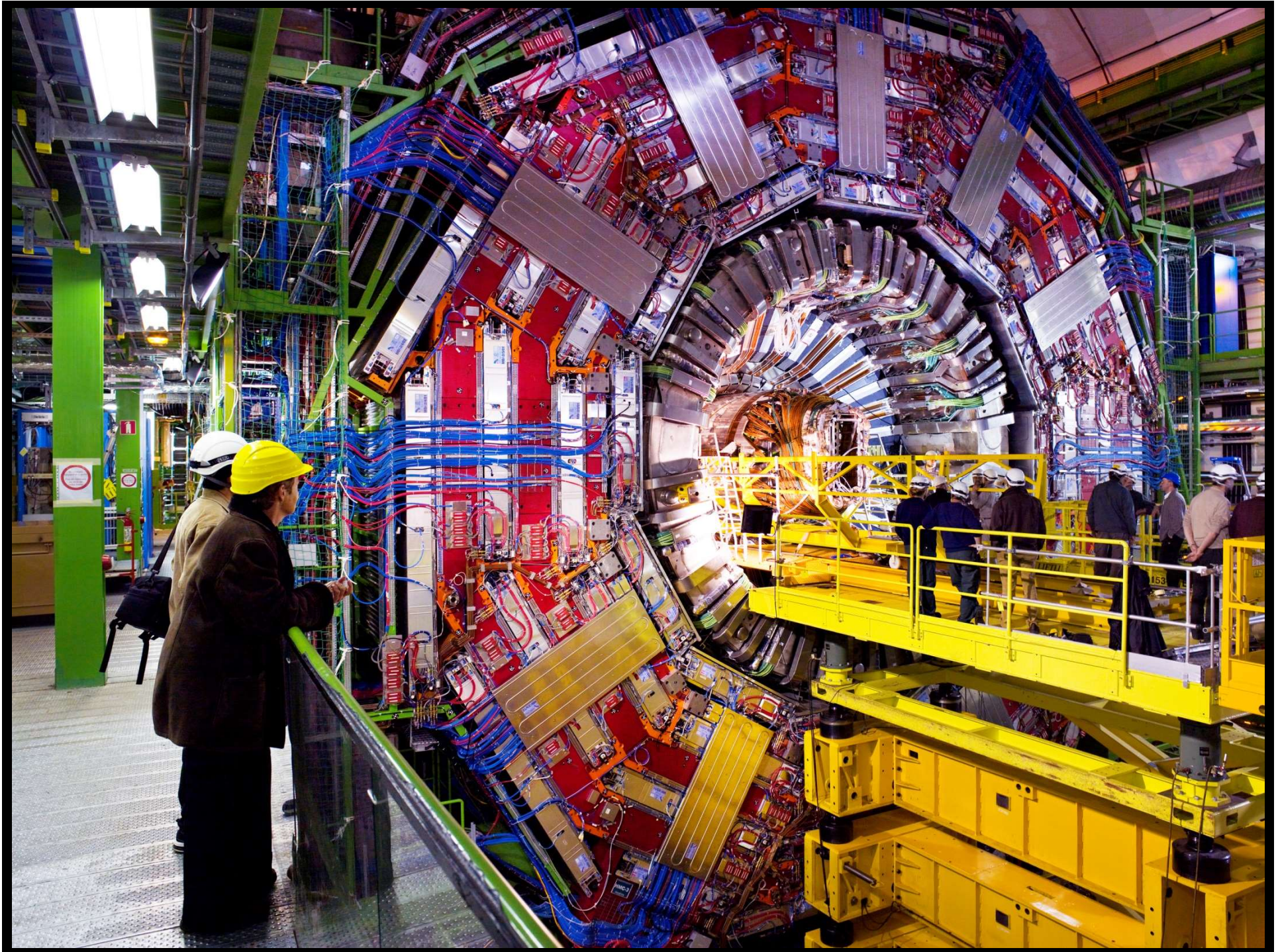


CMS en quelques mots



- ~ 14 000 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,...*)

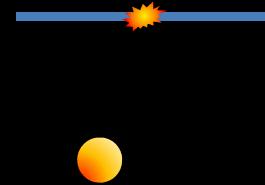


→ Les hadrons neutres (*neutron, pion neutre,...*)

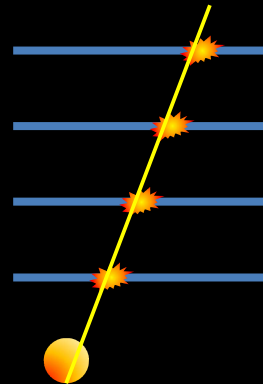
**On doit deviner tout le reste à partir de ça.
Identifier correctement ces particules est donc capital.**

Identifier les particules chargées

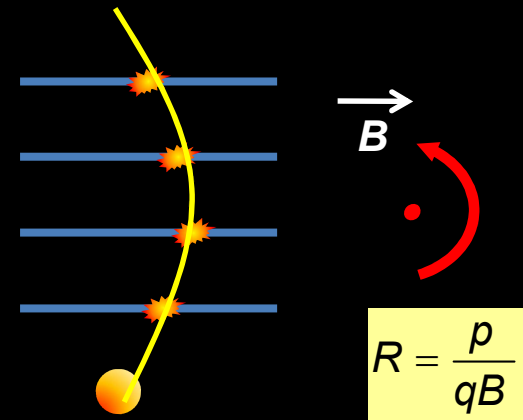
→ Les particules chargées interagissent avec le matériau qu'elles traversent (*par ionisation*). S'il y a peu de matériau traversé (*fine plaque*), on peut savoir où la particule est passée sans la détruire.



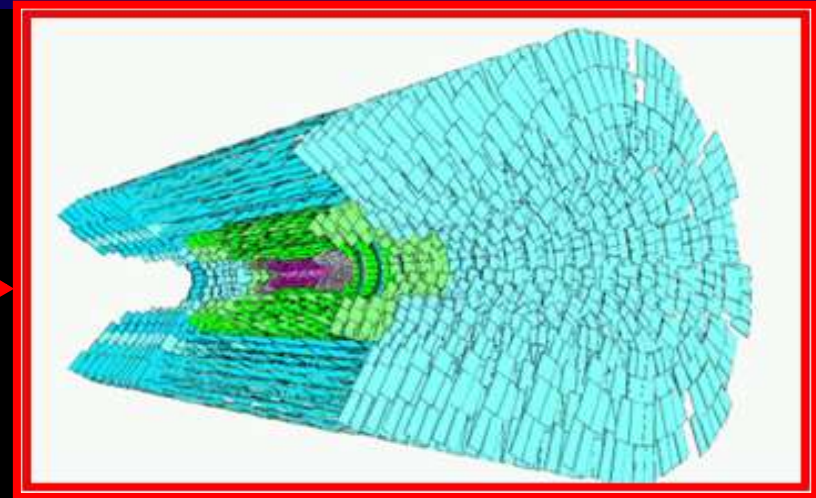
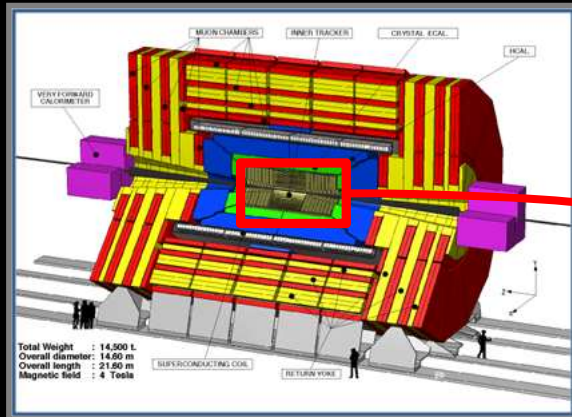
→ Si on met plusieurs couches, on peut **voir le trajet de la particule**, et donc savoir d'où elle vient.



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

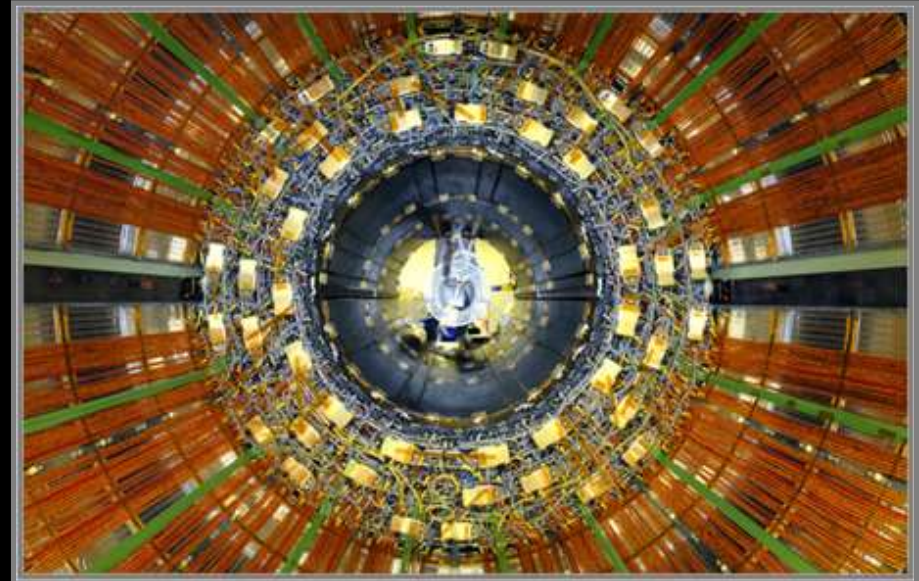
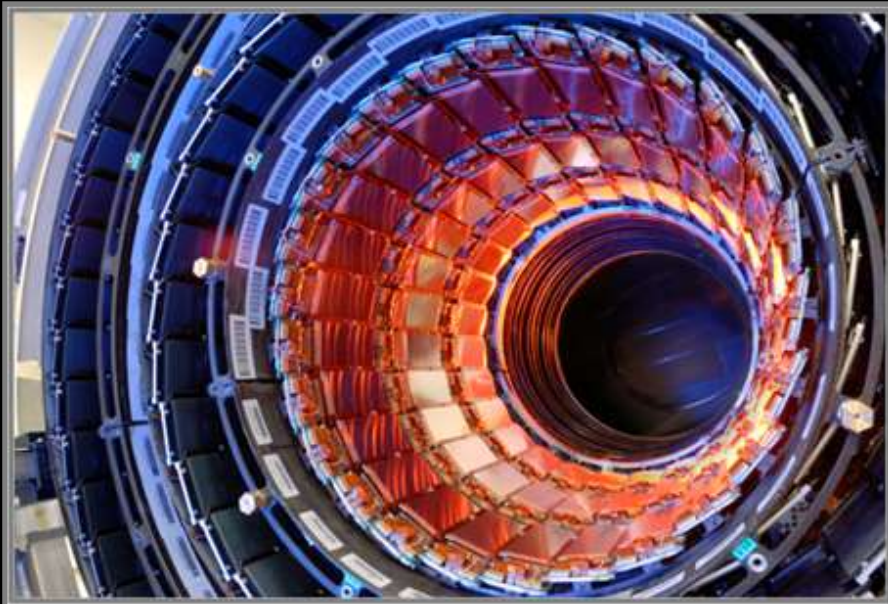


$$R = \frac{p}{qB}$$



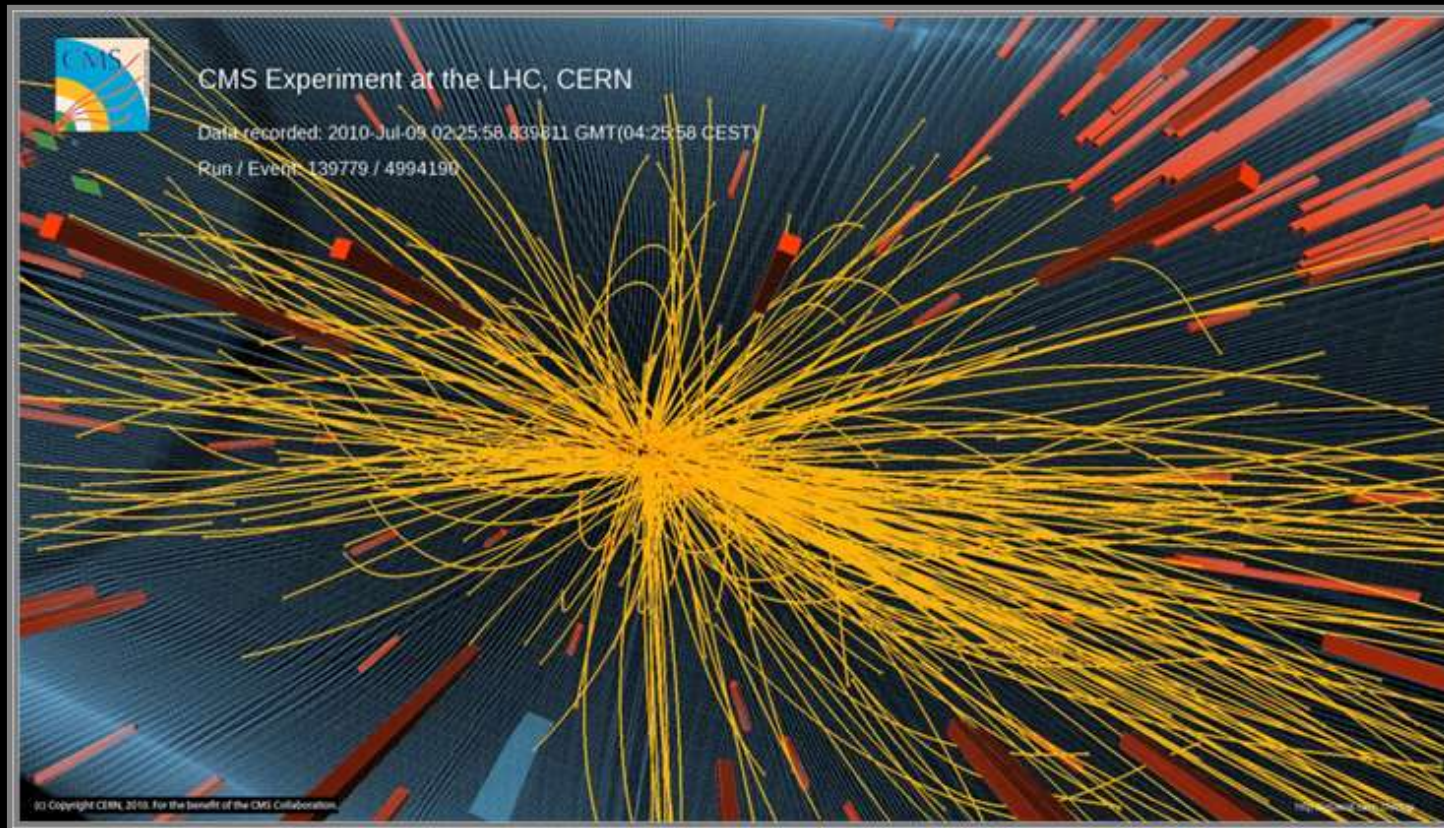
- Le détecteur de traces de CMS entoure le point d'interaction (*première couche de l'oignon*).
- On essaye de **couvrir le maximum d'espace** pour perdre le moins possible d'information (**herméticité**).
- Plusieurs dizaines de milliers de plaques de détection en silicium (*à peu près la surface d'un 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:



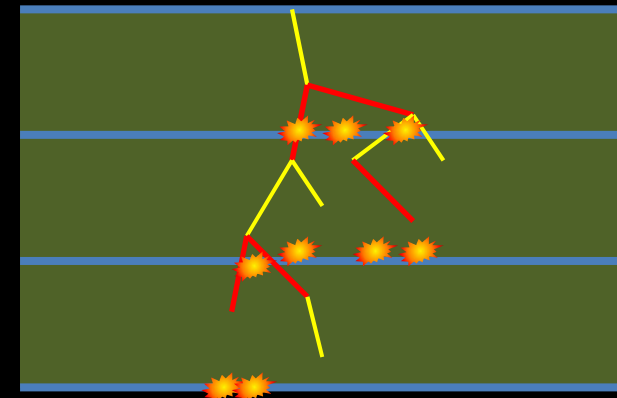
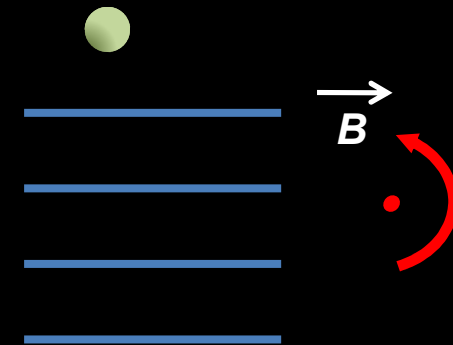
→ Pour reconstruire correctement toutes ces traces, des programmes informatiques spéciaux ont été développés.

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

Identifier les particules neutres (et aussi les particules chargées)

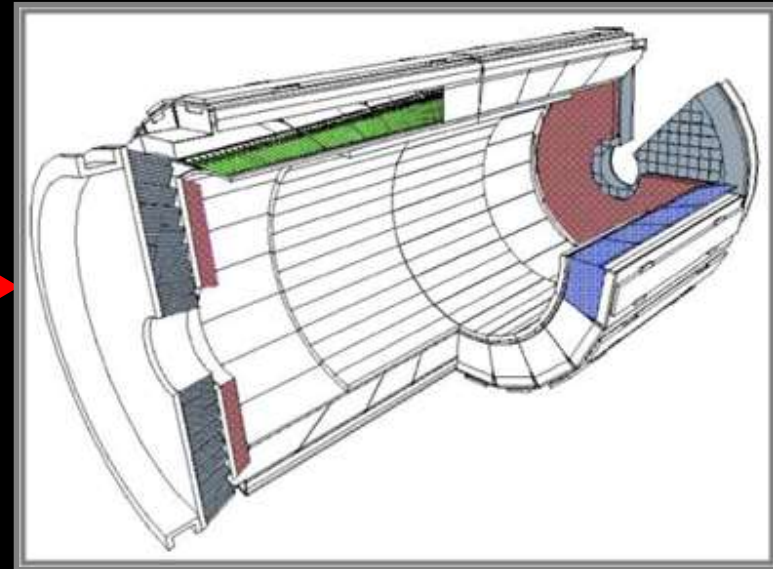
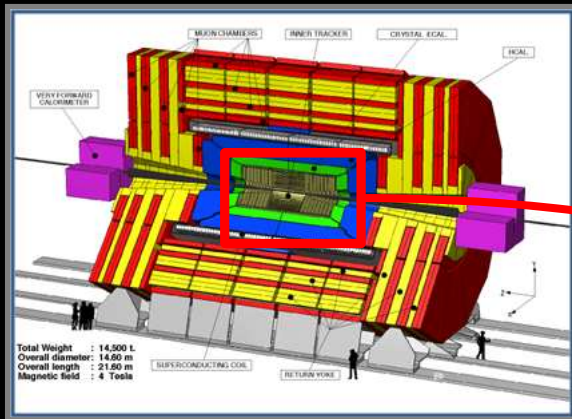


- Les particules neutres passent dans un détecteur de traces sans en laisser...
- On va freiner /arrêter ces particules en les forçant à traverser un matériau très dense (*du plomb par exemple*).
- En freinant, les particules vont émettre d'autres particules que l'on va pouvoir détecter, et ainsi mesurer 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**

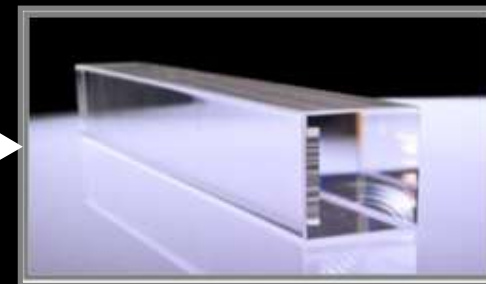
Les calorimètres de CMS

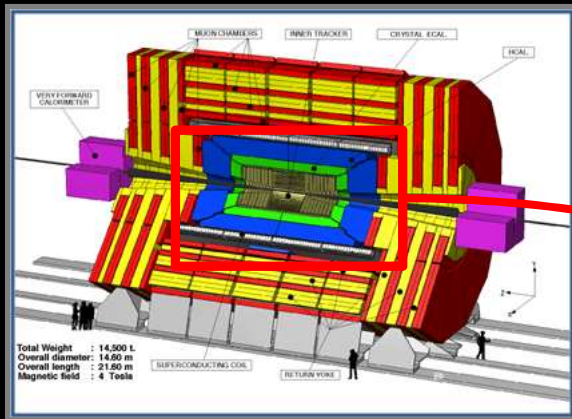


→ Le calorimètre électromagnétique entoure le détecteur de traces (*deuxième couche de l'oignon, en vert*).

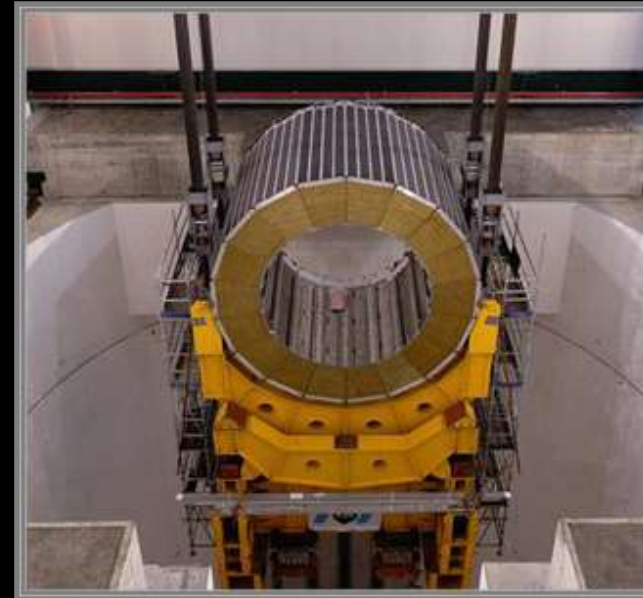
→ Il permet d'arrêter les électrons et les photons (*qui freinent plus vite que les autres particules*)

→ Assemblage de **75 000 cristaux de tungstate de plomb** (PbWO_4 , matériau très dense)





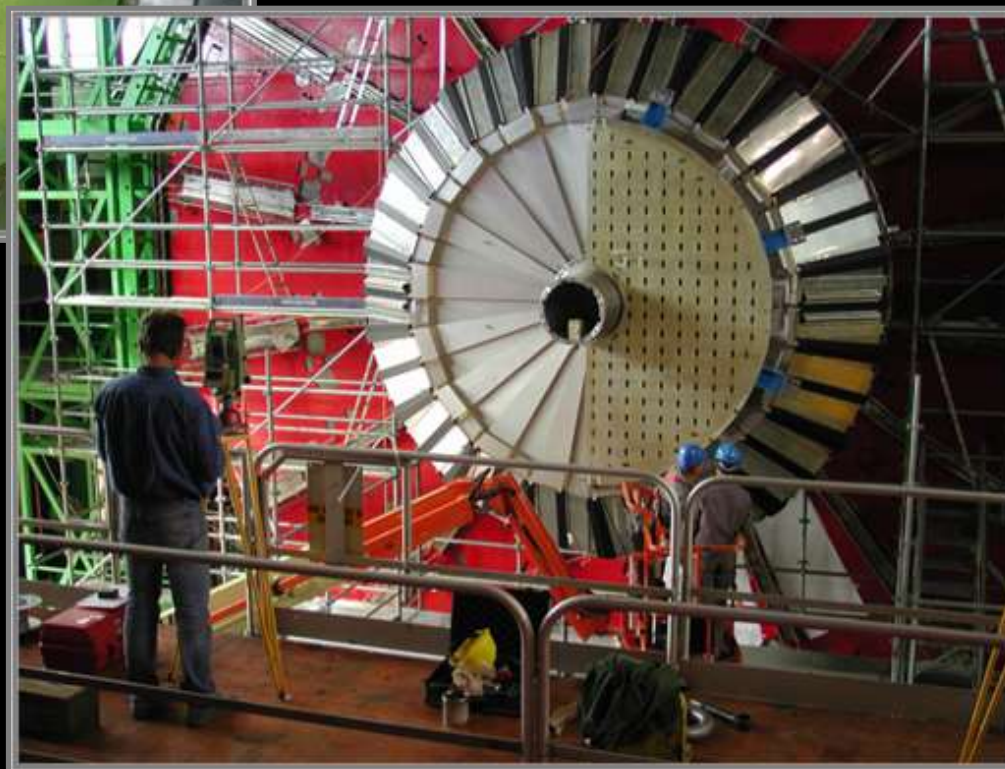
→ Le calorimètre hadronique entoure le précédent (troisième couche de l'oignon, *en bleu*).



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

→ Assemblages de **plaques de bronze (Cu, Sn)**



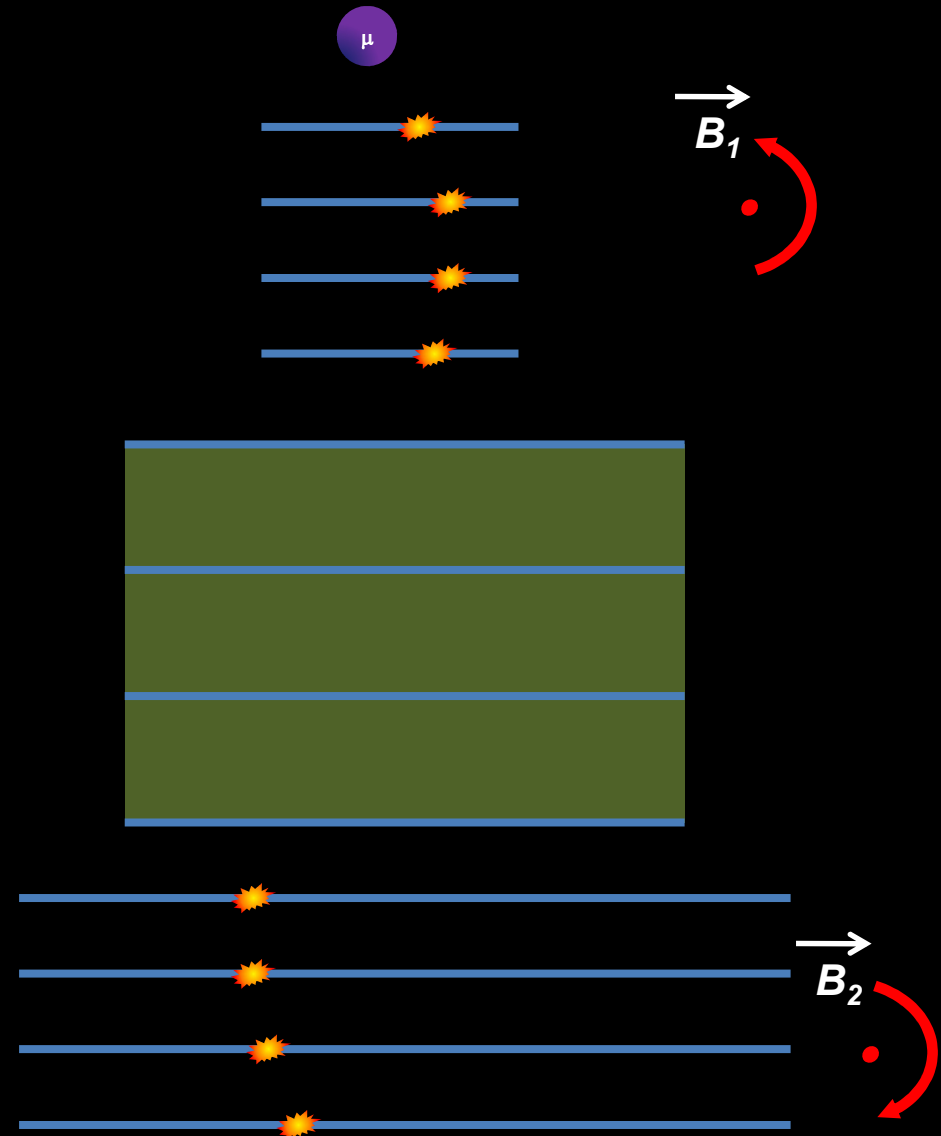




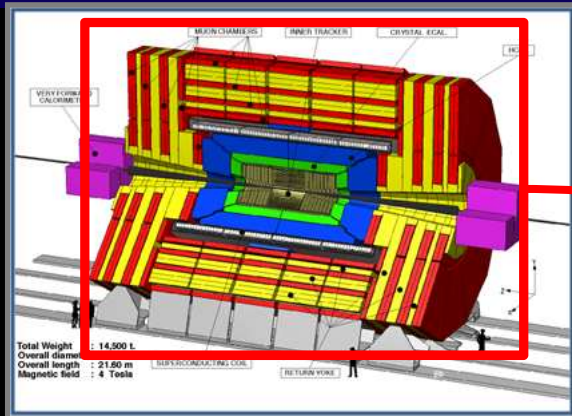
Le calorimètre hadronique est entouré par un aimant très puissant (**solénoïde**) qui permet de courber les trajectoires des particules.



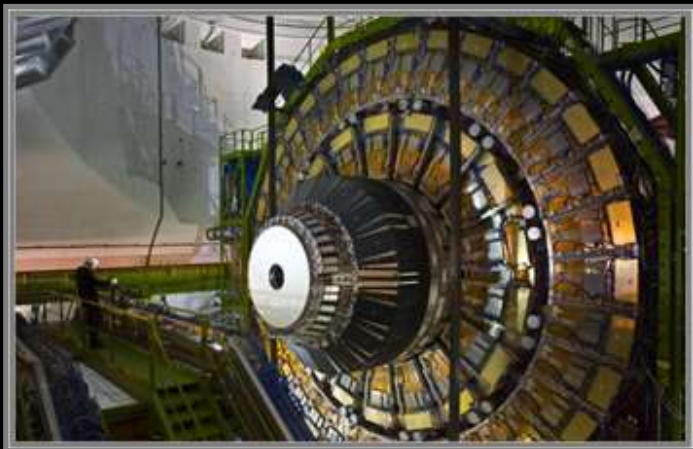
- Les calorimètres ne suffisent pas à arrêter les muons, qui '*freinent*' moins que les électrons.
- On place donc un autre détecteur de traces (**SPECTROMETRE A MUONS**), après les calorimètres, pour mesurer à nouveau les propriétés des muons
- Un **second champ magnétique**, (le champ de retour du 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



Le spectromètre à muons



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

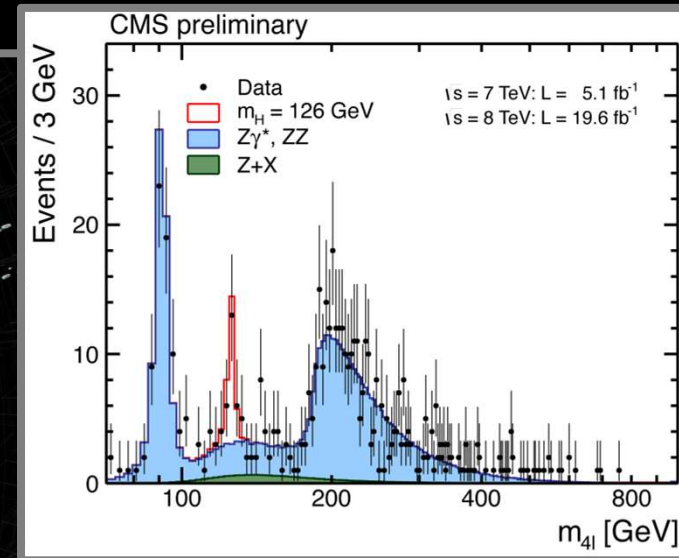
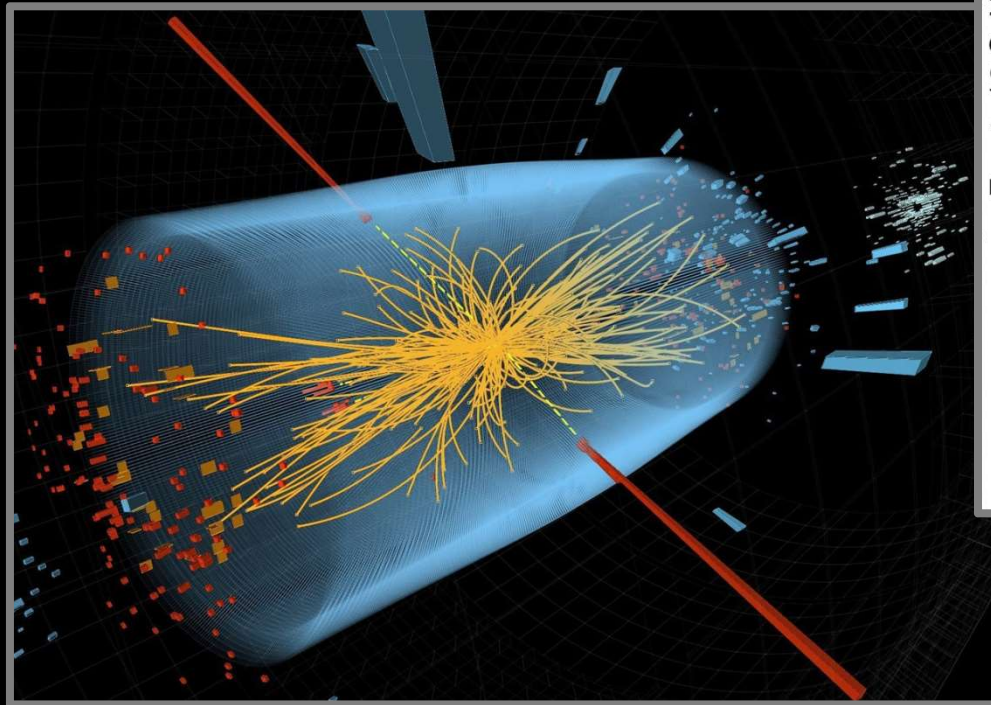


- Ce n'est pas tout de fabriquer un détecteur, il faut le faire fonctionner
- Il y a **plusieurs millions de collisions chaque seconde**, nous ne pouvons en garder que **quelques centaines**.
- Il faut décider lesquelles en très peu de temps, et donc être capable d '**analyser les données du détecteur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



- **10 GiO 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 prend plusieurs années.**

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



La récolte a commencé...

La suite s'annonce encore plus passionnante...

