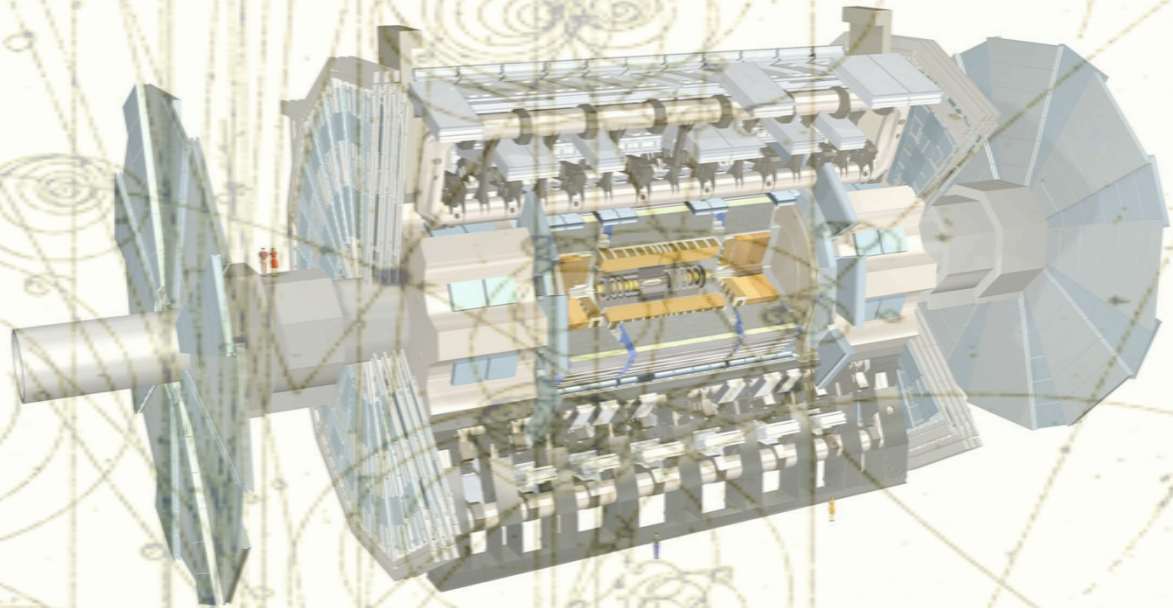


# Le détecteur ATLAS au LHC (et les autres...)



Narei Lorenzo Martinez, Nikola Makovec  
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire  
13 mars 2012

# Introduction

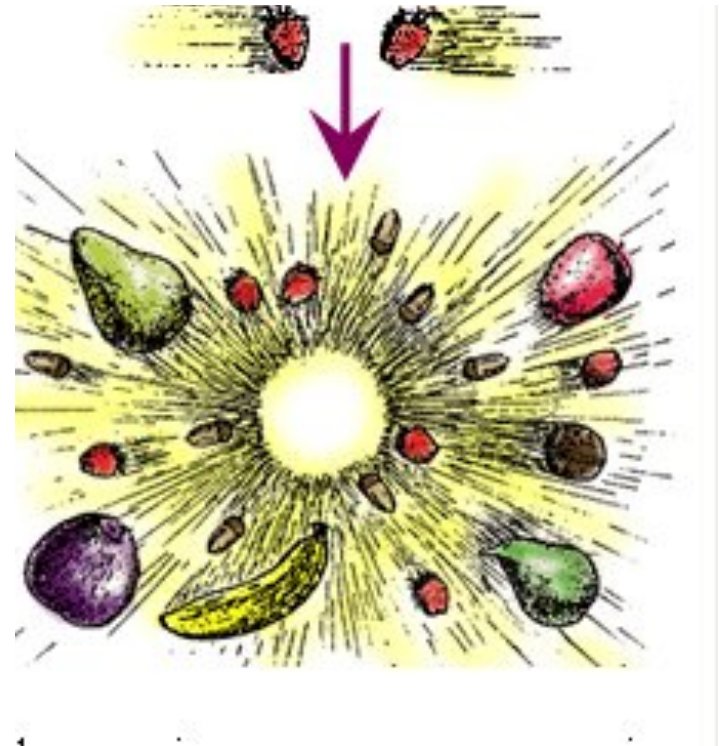
- Il y a 4 détecteurs au LHC (Large Hadron Collider) : **ATLAS**, **CMS**, **LHCb** et **ALICE**
- Pourquoi ont-ils été construits, quelles sont leurs caractéristiques, leurs différences, leurs points communs... ?
- ATLAS est une expérience généraliste rassemblant 1800 physiciens et ingénieurs de 37 pays différents qui a pour mission de tester le Modèle Standard en découvrant notamment le boson de Higgs et d'explorer de nouvelles théories comme la SuperSymétrie.

C'est ce qu'on va voir dans la suite



# Pourquoi construire des détecteurs ?

- Pour tester la théorie actuelle de la physique des particules (Le Modèle Standard), il faut faire des **expériences**.
- Pour cela, on fait des collisions entre deux faisceaux de protons et on regarde **tout** ce qu'il y a dans l'état final afin de comprendre ce qui s'est passé et vérifier si cela correspond à la théorie.
- Les protons proviennent de bouteilles d'hydrogène !
- Mais les particules dans l'état final sont **TRES petites** (1000 milliards de fois plus petites qu'une fourmi) et pour certaines très **instables** (durées de vie très courtes)
- Comment va-t-on les détecter ?



Construction de détecteurs spécifiques pour observer ou reconstituer le passage d'une particule.

# Comment doit être le détecteur ?

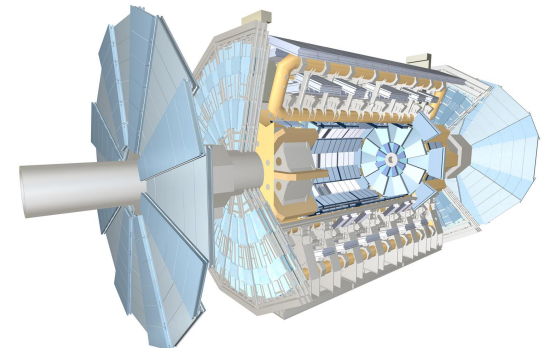
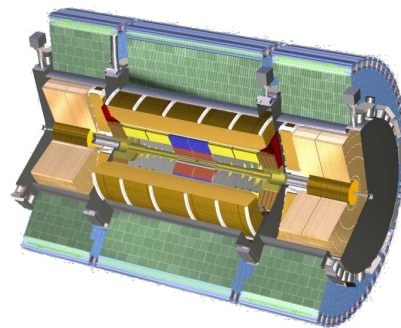
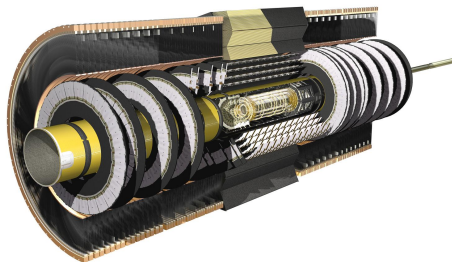
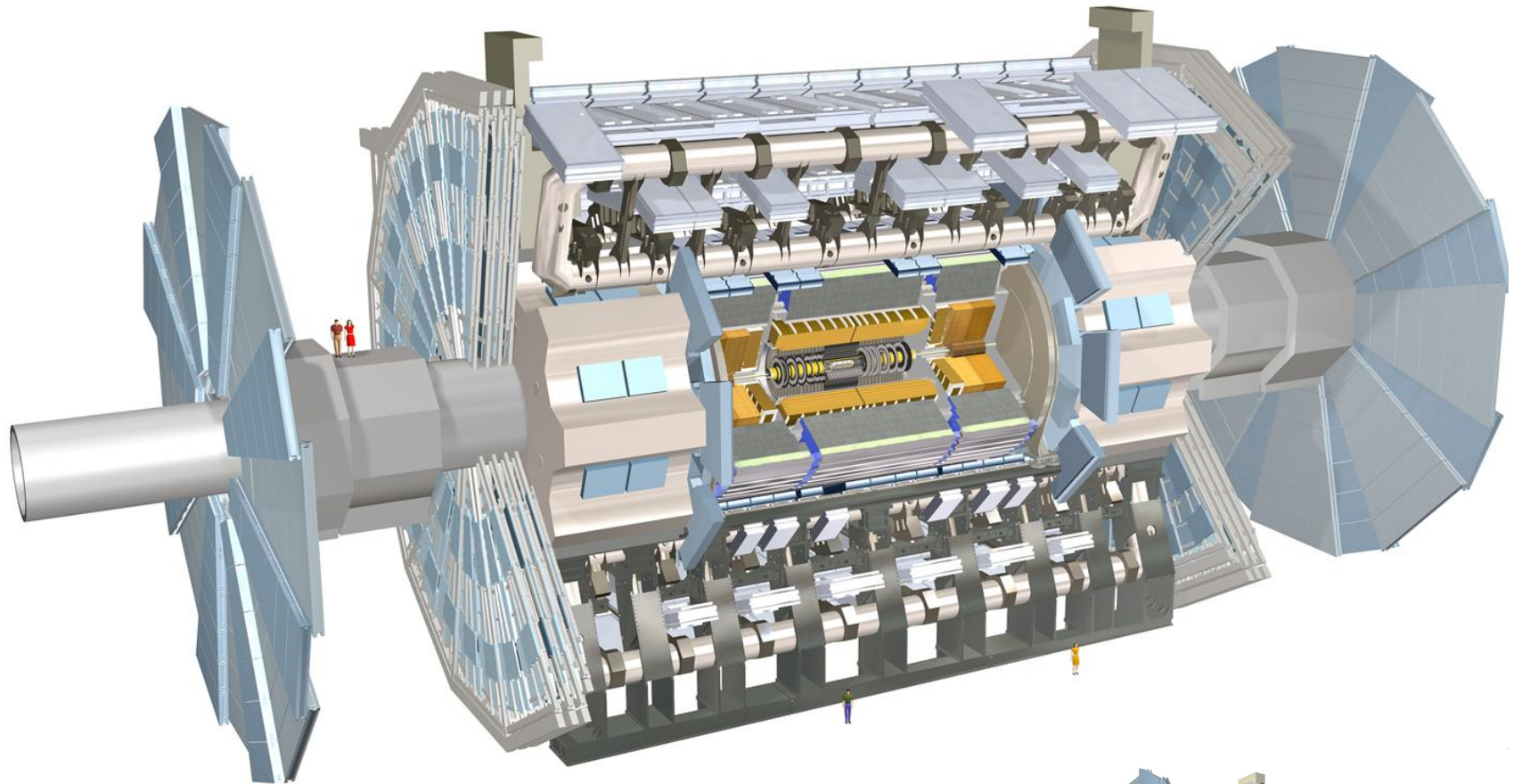
- On doit pouvoir détecter et reconnaître des centaines de particules différentes
- On va utiliser leurs caractéristiques :
  - Trajectoire
  - Charge électrique
  - Vitesse (ou plutôt quantité de mouvement =  $M \times V$ )
  - Masse
  - Energie
  - Mode d'interaction avec la matière



# Le détecteur Atlas

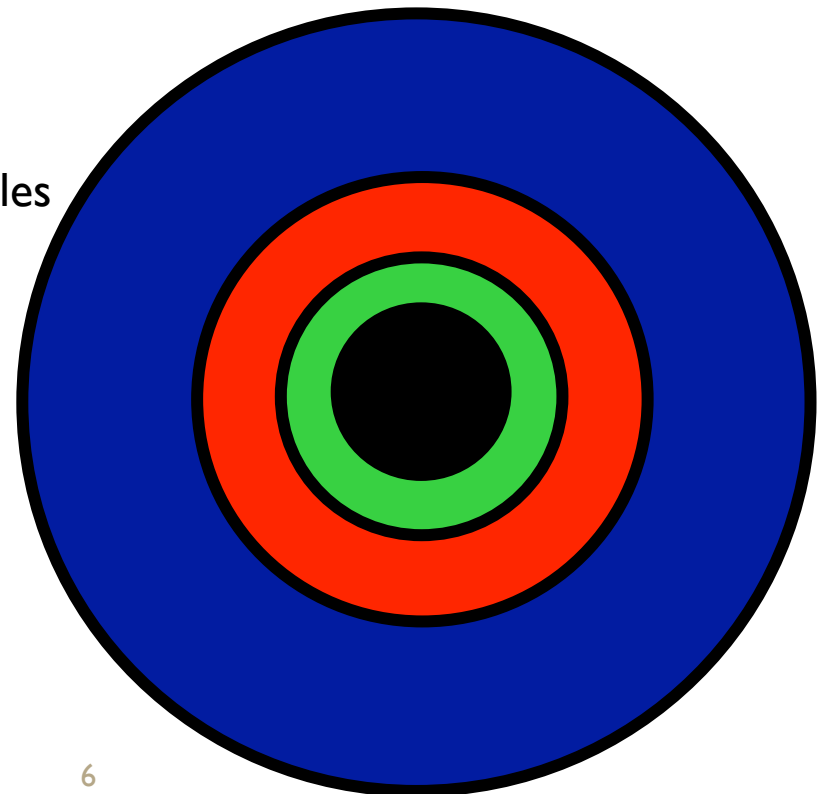
Diamètre: 25m  
Longueur: 46m  
Poids: 7000 tonnes

3000 km de câbles  
100 millions de canaux

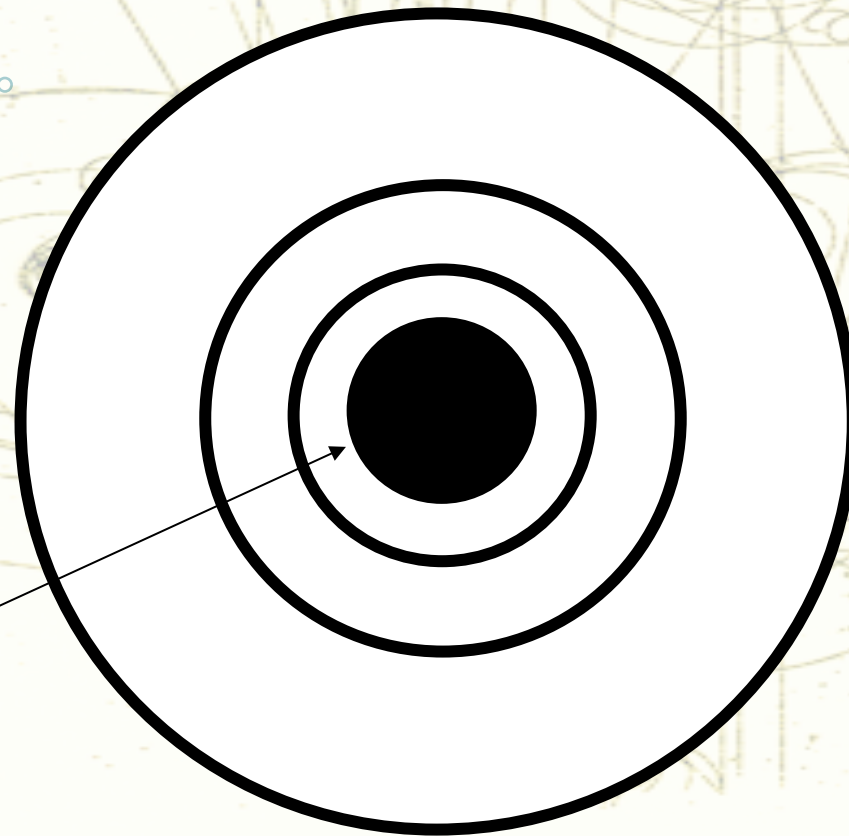


# Structure d'un détecteur

- Structure en poupée russe
- Chaque couche a une fonction précise
  - Trajectographe(s)
    - Sui(ven)t les particules chargées
  - Calorimètre(s)
    - Mesure(nt) les énergies des particules (sauf muons et neutrinos)
  - Détecteurs de muons

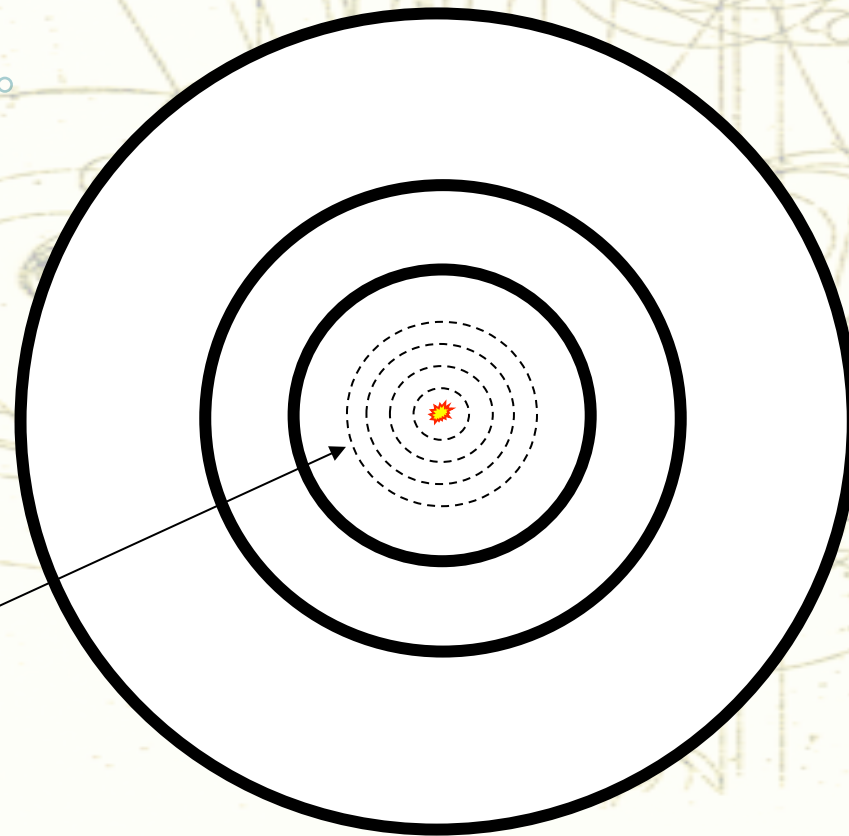


# MESURE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES CHARGÉES



Le trajectographe

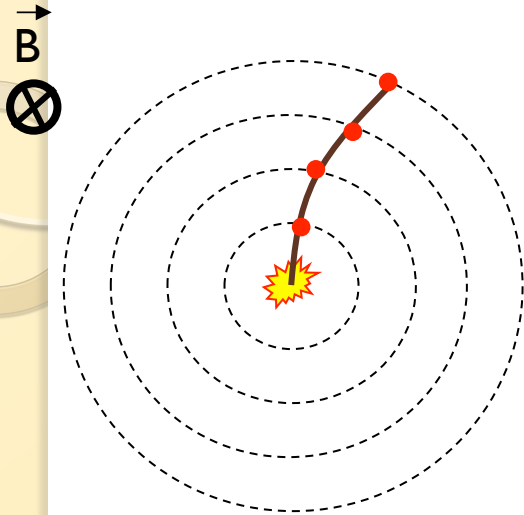
# MESURE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES CHARGÉES



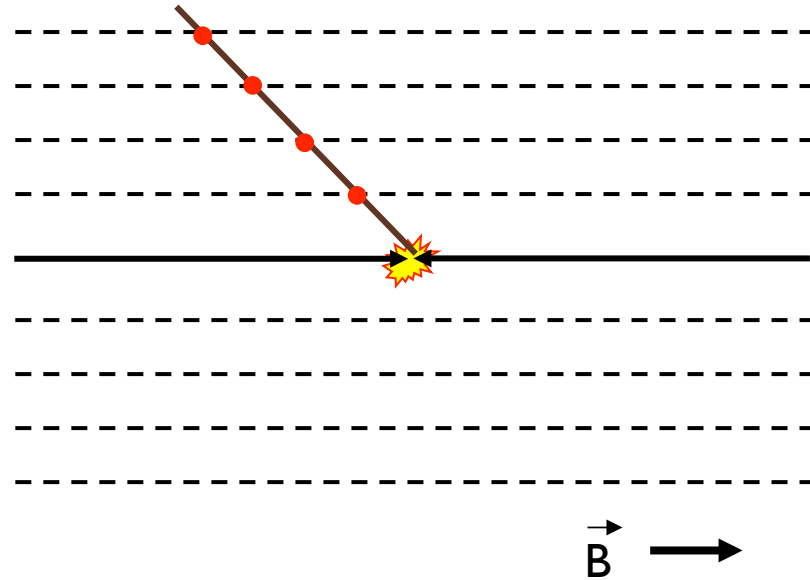
Le trajectographe



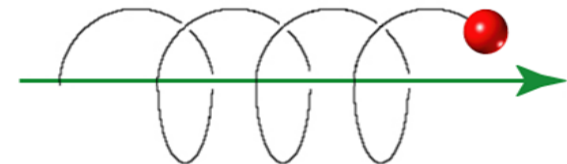
# Le trajectographe



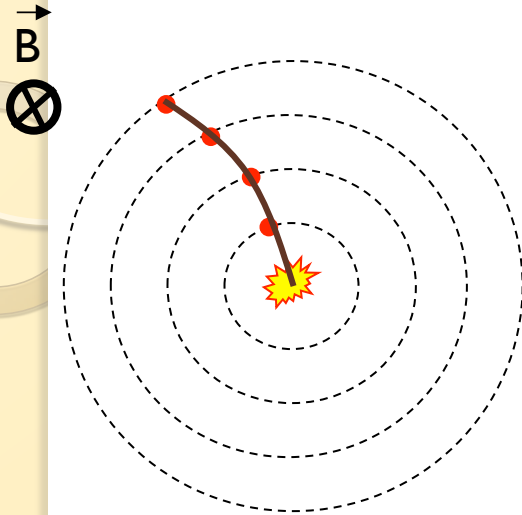
Un électron



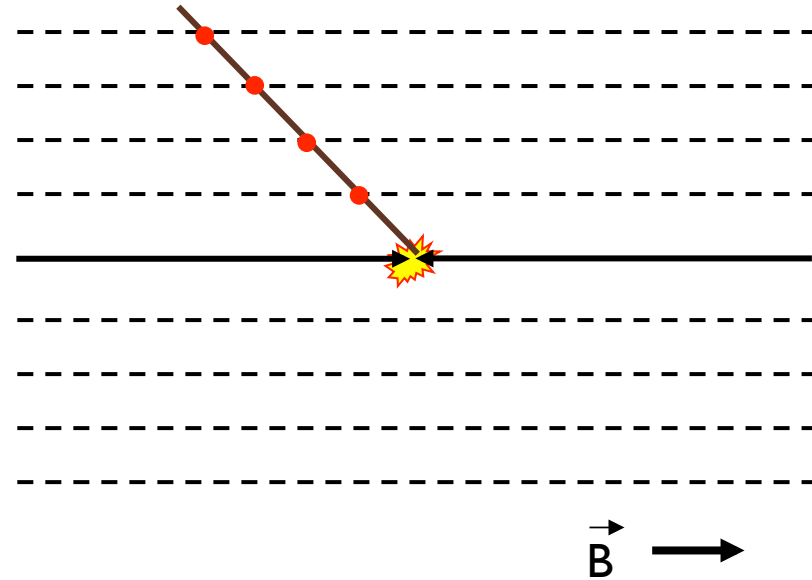
- Pour mesurer la charge et la vitesse, on va utiliser un aimant
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
- Rayon de courbure  $R=mv/qB$



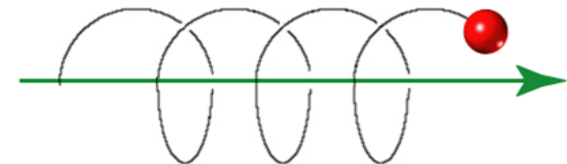
# Le trajectographe



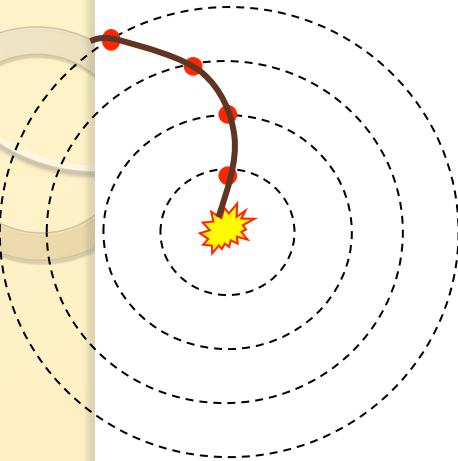
Un anti-électron=positron



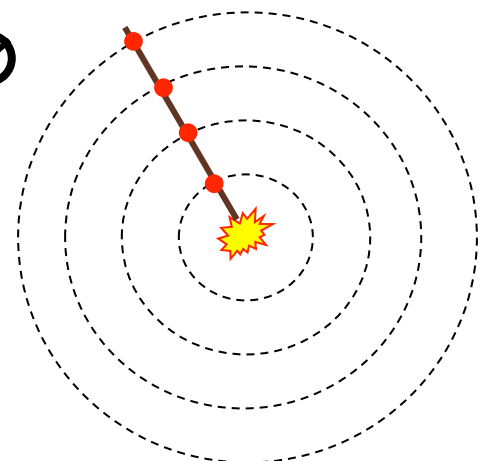
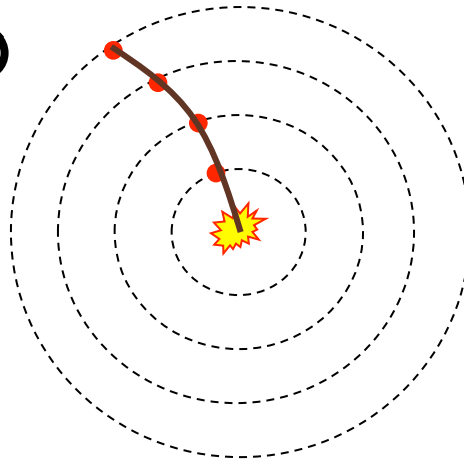
- Pour mesurer la charge et la vitesse, on va utiliser un aimant
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
- Rayon de courbure  $R=mv/qB$



# Le trajectographe

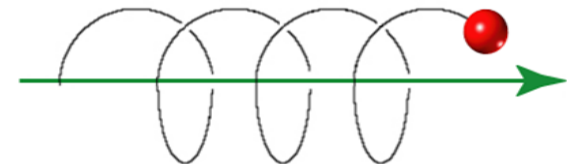


Plus lent



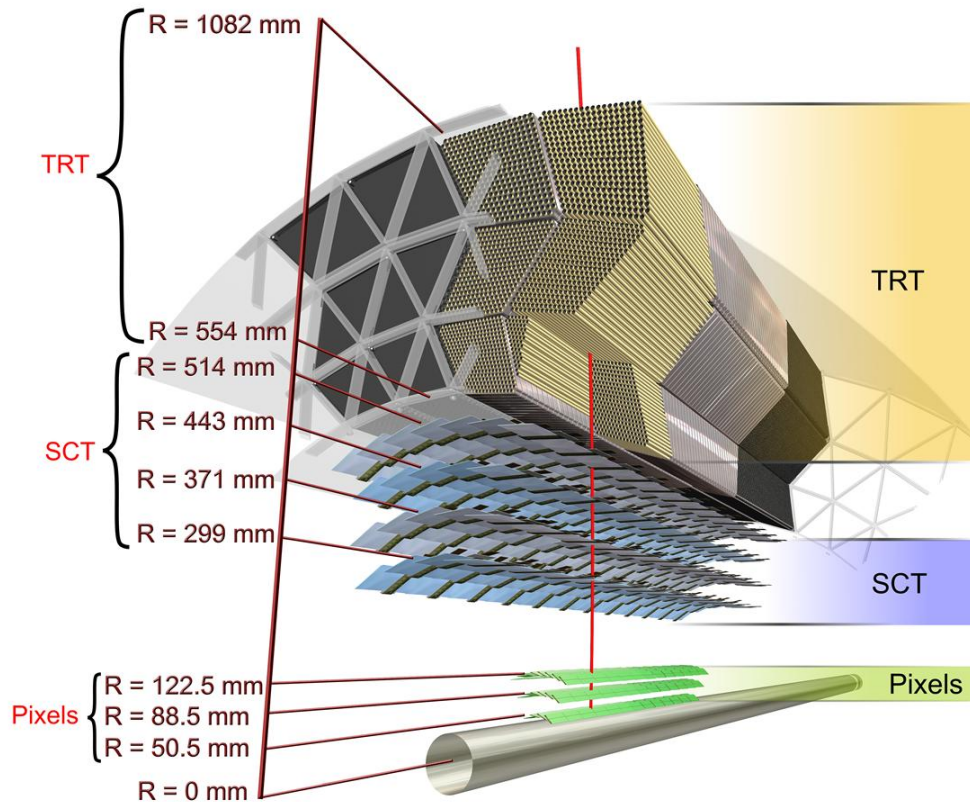
Plus rapide

- Pour mesurer la charge et la vitesse, on va utiliser un aimant
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
- Rayon de courbure  $R=mv/qB$



# Les trajectographes d'ATLAS

Dans ATLAS détecteur de traces est divisé en trois parties



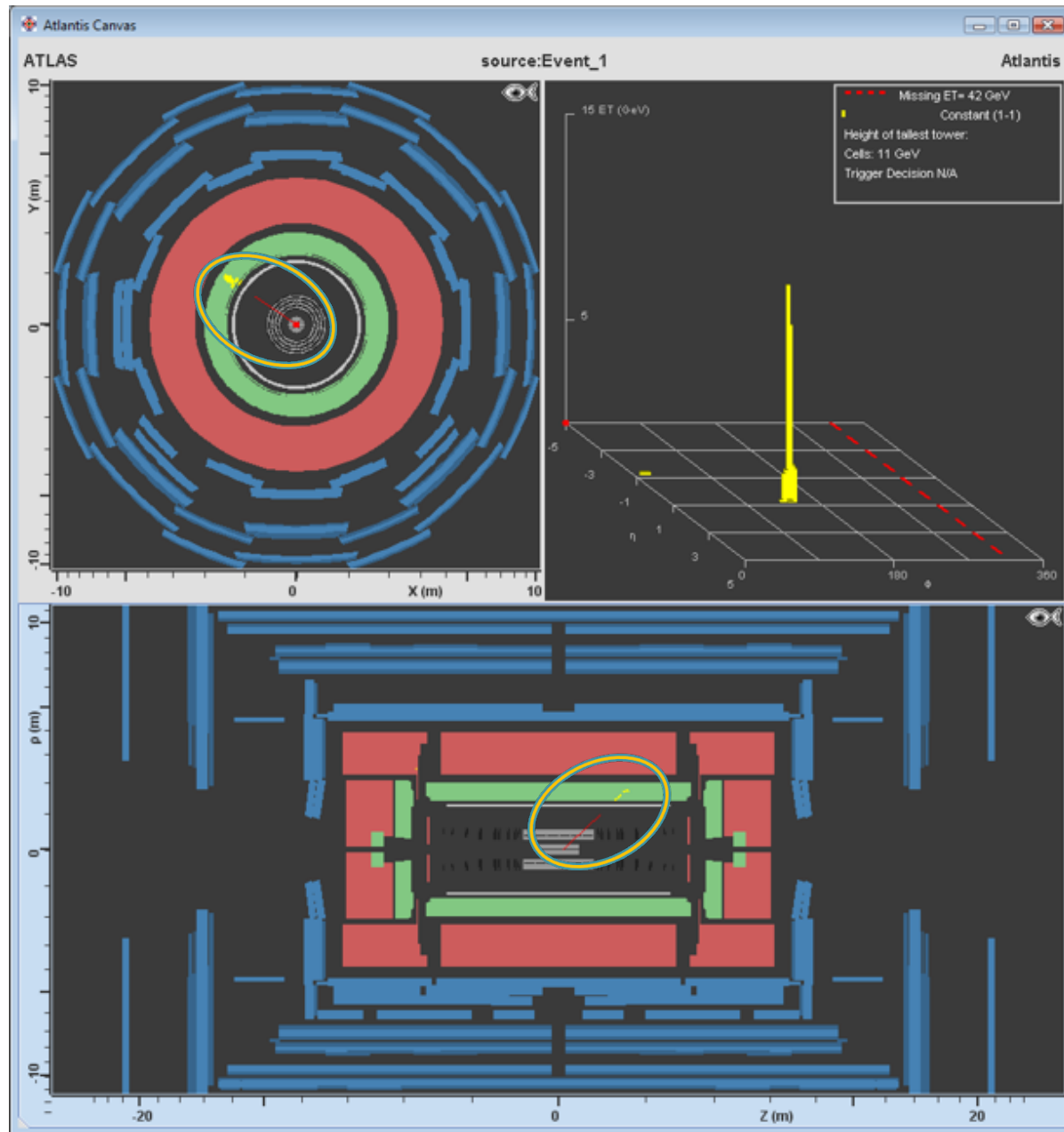
• Détecteurs pixel : 140 millions de pixels carrés de silicium. Placé très près du faisceau pour minimiser sa taille (son coût est très élevé).

• Détecteur à bandes SCT (SemiConducteur Tracker) : il s'agit maintenant de 5 millions de bandes de  $80\mu\text{m}$  de largeur et de quelques centimètres de longueur disposées en cylindre.

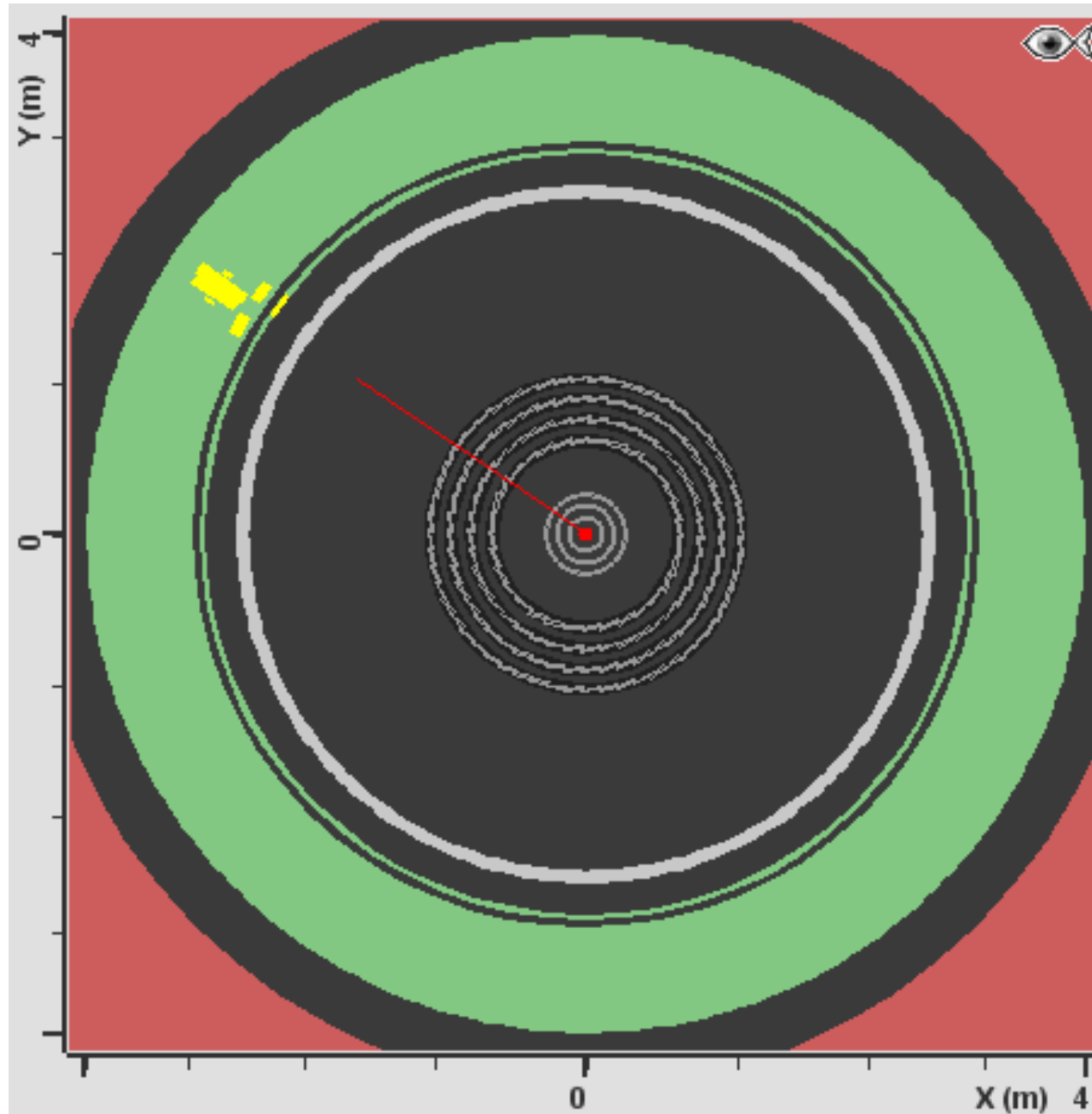
Moins précis que pixels.

• Détecteur de radiation de transition (TRT - Transition Radiation Tracker) : composé de 400 000 tubes de 4mm de diamètre et de 1,44m de long. Dans chacun de ces tubes est inséré un fil métallique. Une différence de potentiel est appliquée entre le fil et le tube, ce qui permet la génération d'un signal lors du passage d'une particule chargée.

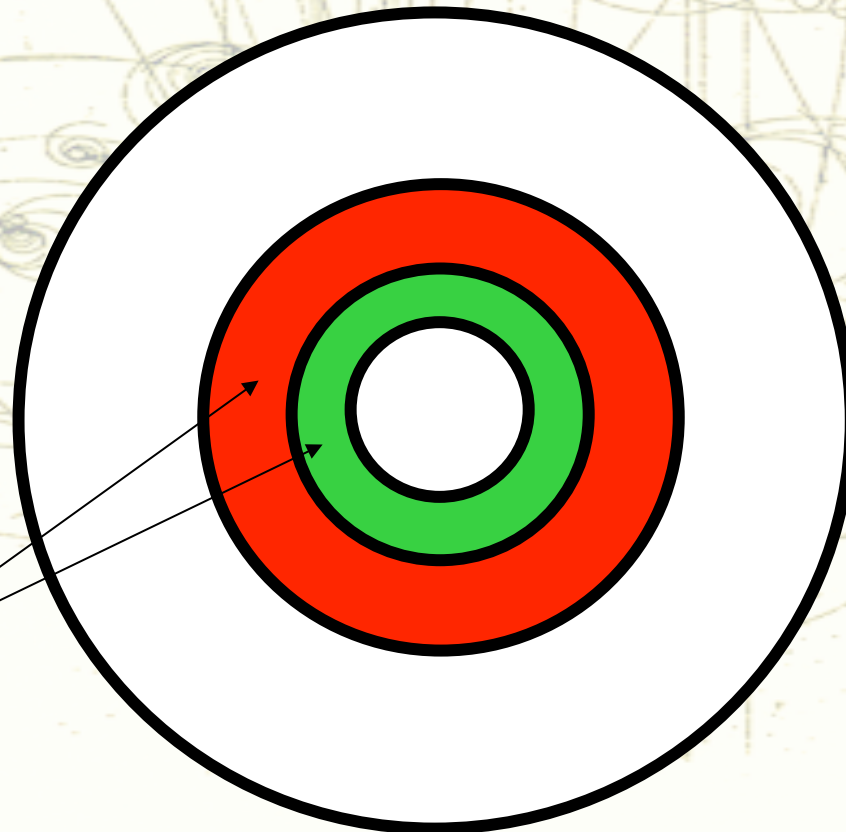
# Comment voit-on les traces dans ATLAS?



# Comment voit-on les traces dans ATLAS?



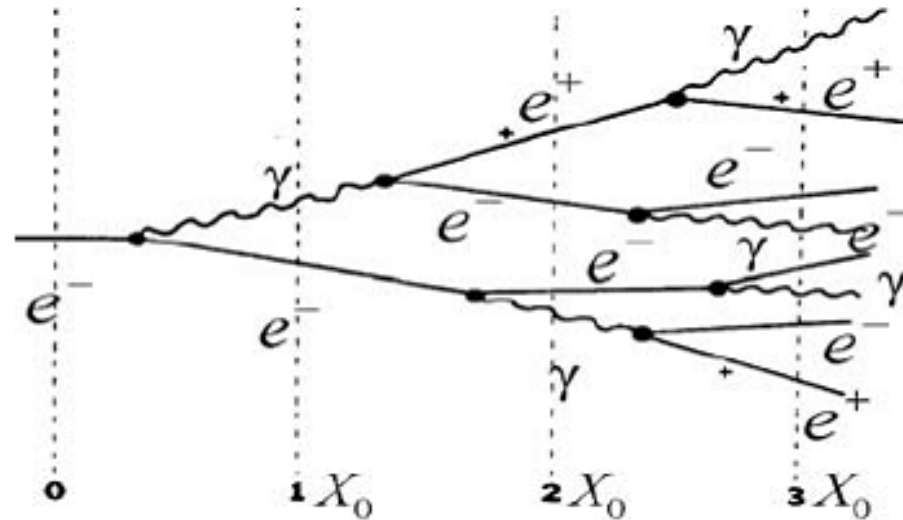
# MESURE DE L'ÉNERGIE DES PARTICULES



Les calorimètres

# Fonctionnement d'un calorimètre

- Pour mesurer l'énergie, on arrête la particule avec de la matière  $\Rightarrow$  détecteur dense

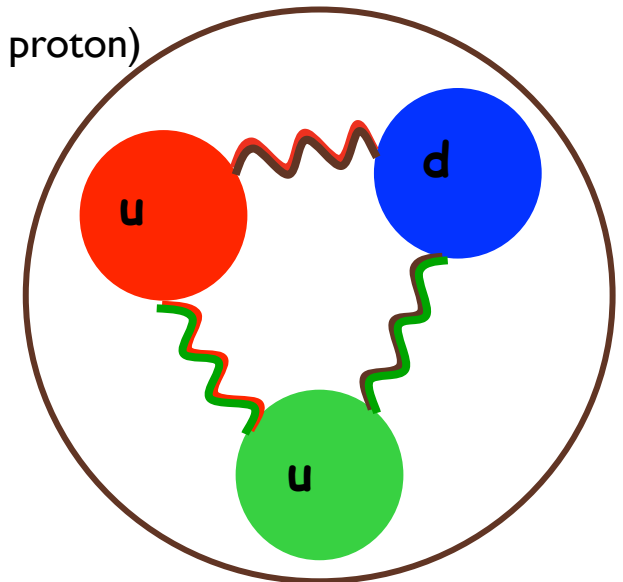


- Les particules “filles” ainsi produites vont laisser un signal dans les parties actives du calorimètre
- par ionisation par exemple (la particule chargée arrache sur son passage un électron à un noyau.)

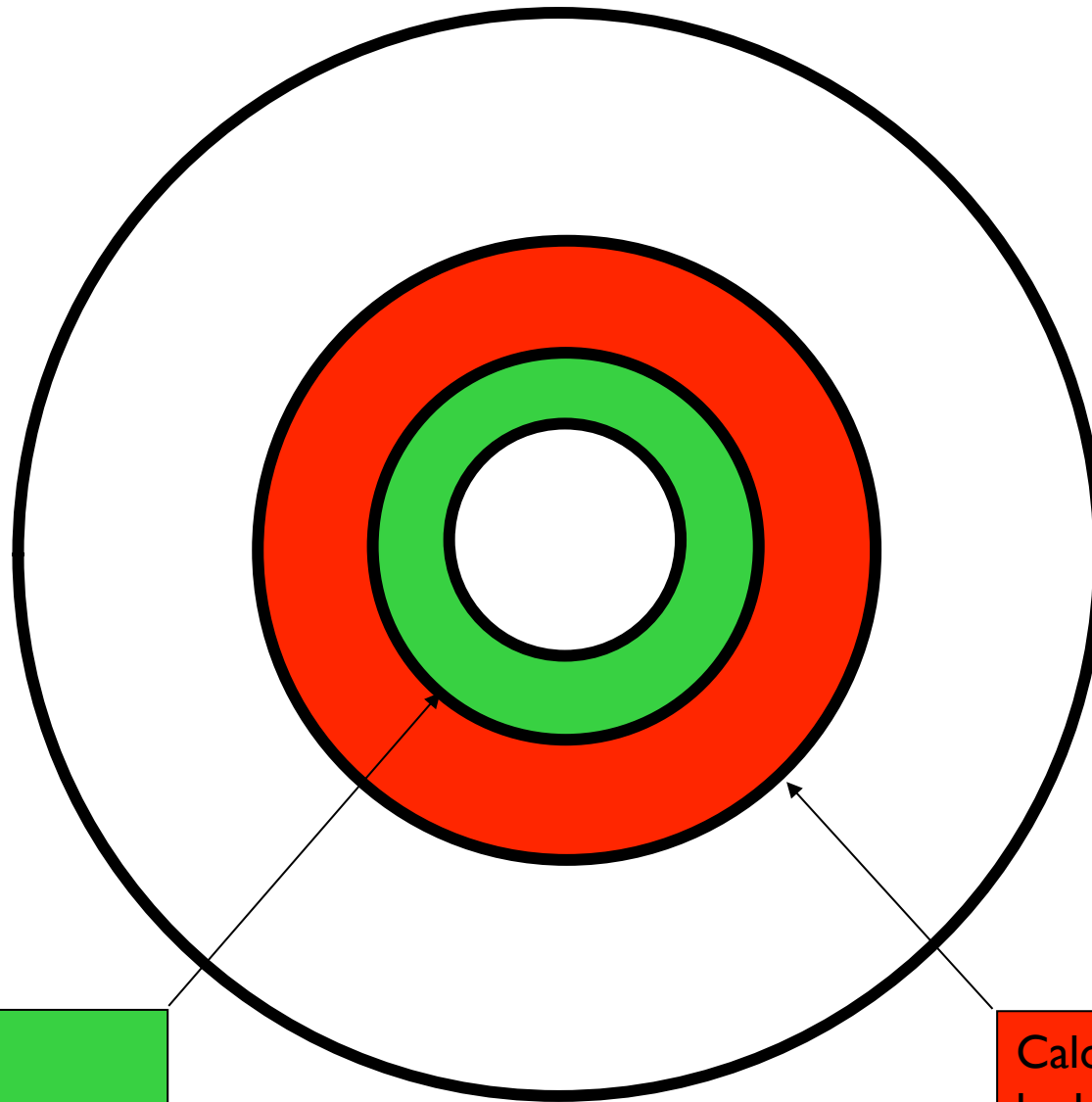


# Fonctionnement d'un calorimètre

- Les particules interagissant avec les calorimètres peuvent être classées en 2 catégories:
  - Particules électromagnétiques:
    - électrons et photons
    - Ces particules interagissent beaucoup → peu de matière suffit pour les arrêter
  - Les hadrons:
    - Hadrons: particules composites faites de quarks (ex: proton)
    - Ces particules interagissent moins
      - il faut plus de matière pour les arrêter



# Les Calorimètres

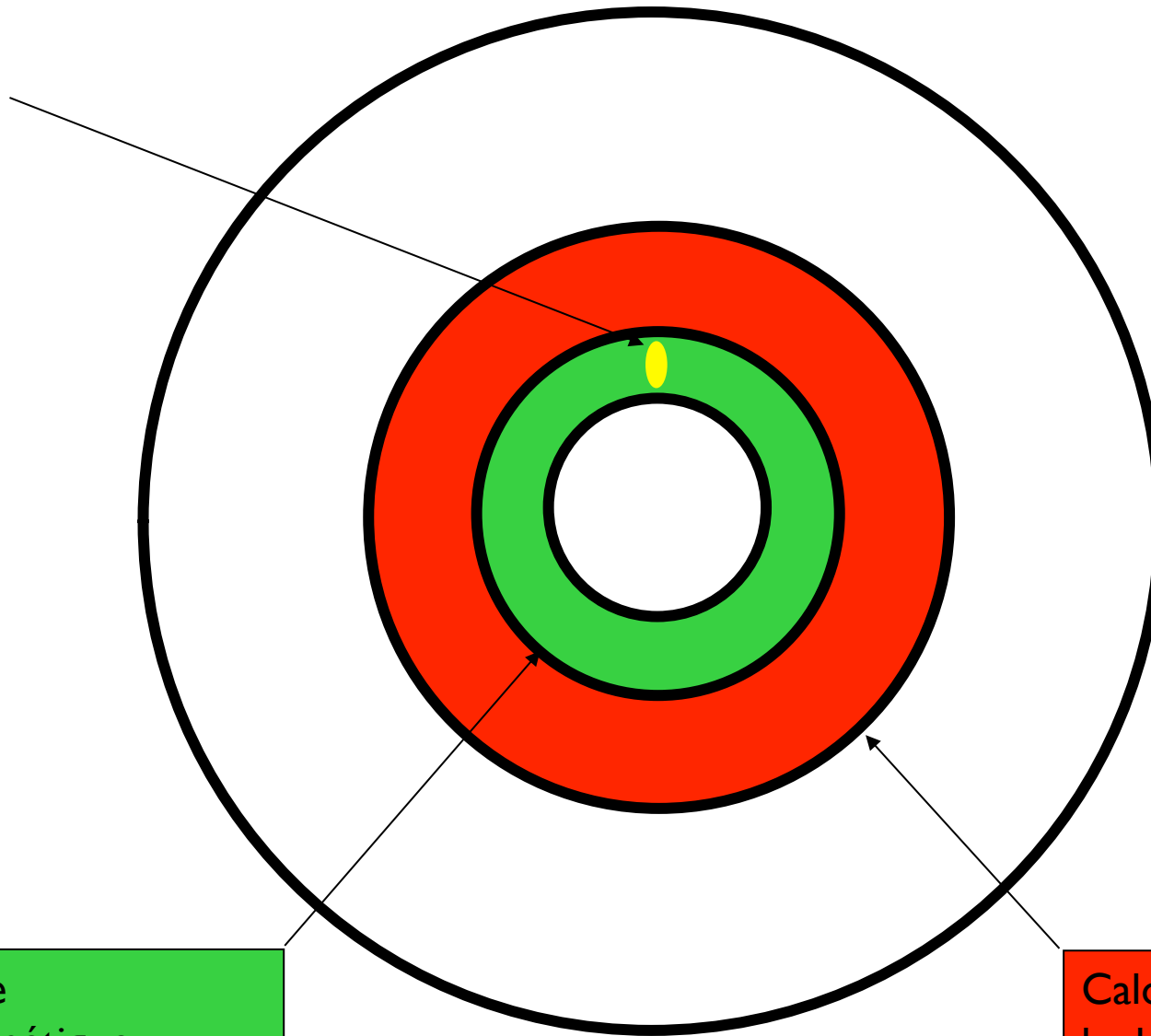


Calorimètre  
électromagnétique

Calorimètre  
hadronique

# Les Calorimètres

Electron  
ou photon

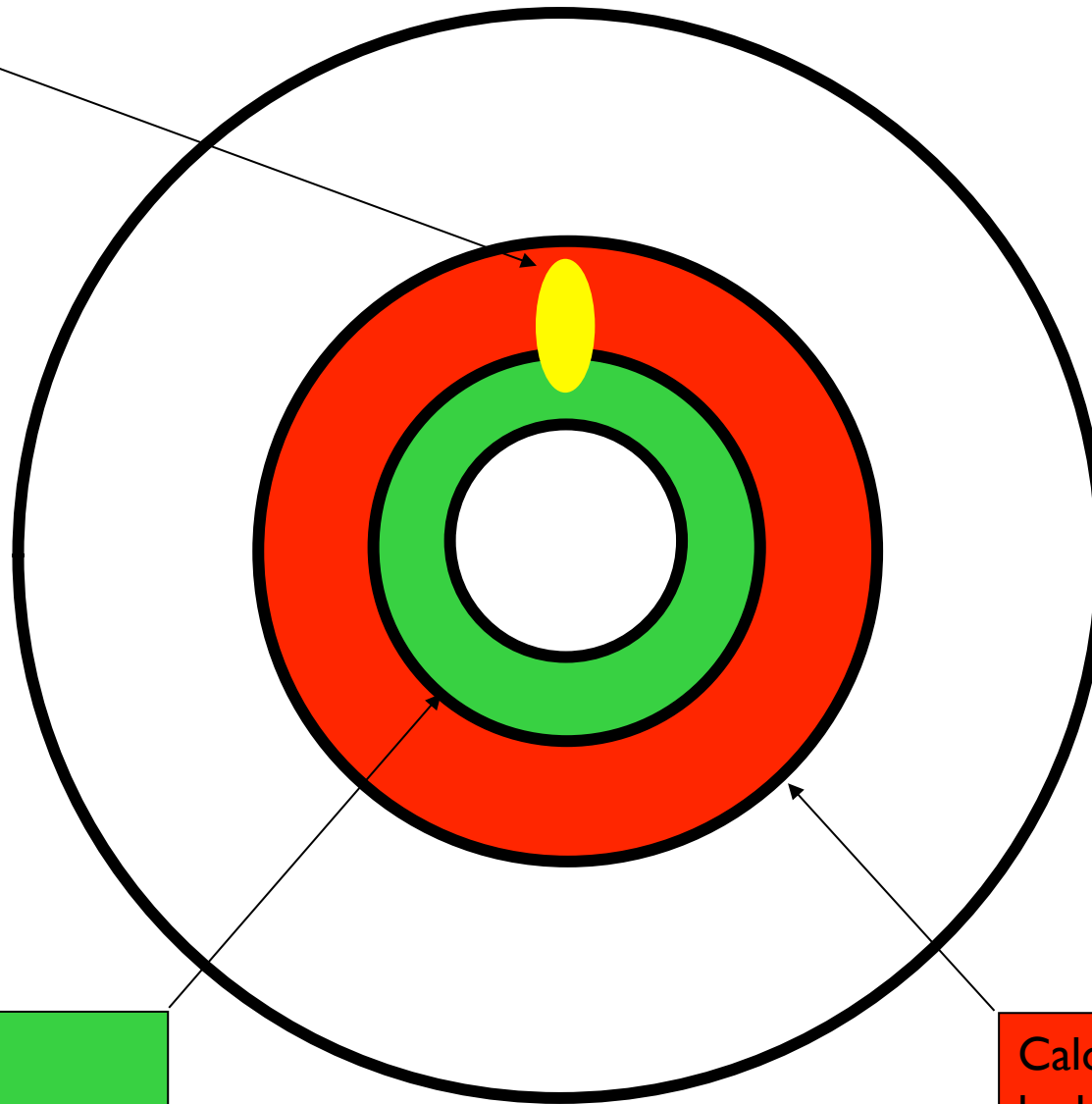


Calorimètre  
électromagnétique

Calorimètre  
hadronique

# Les Calorimètres

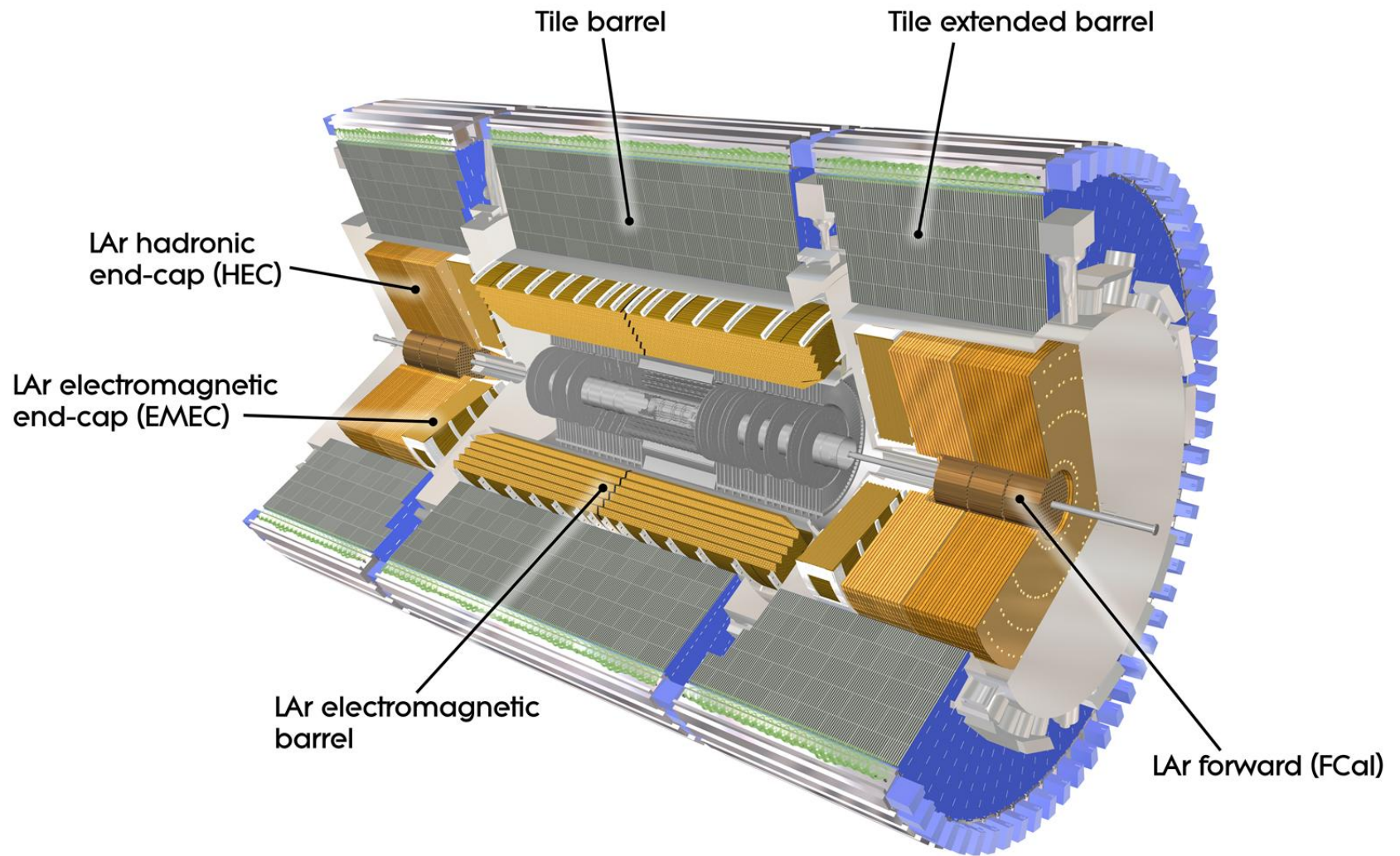
Hadron



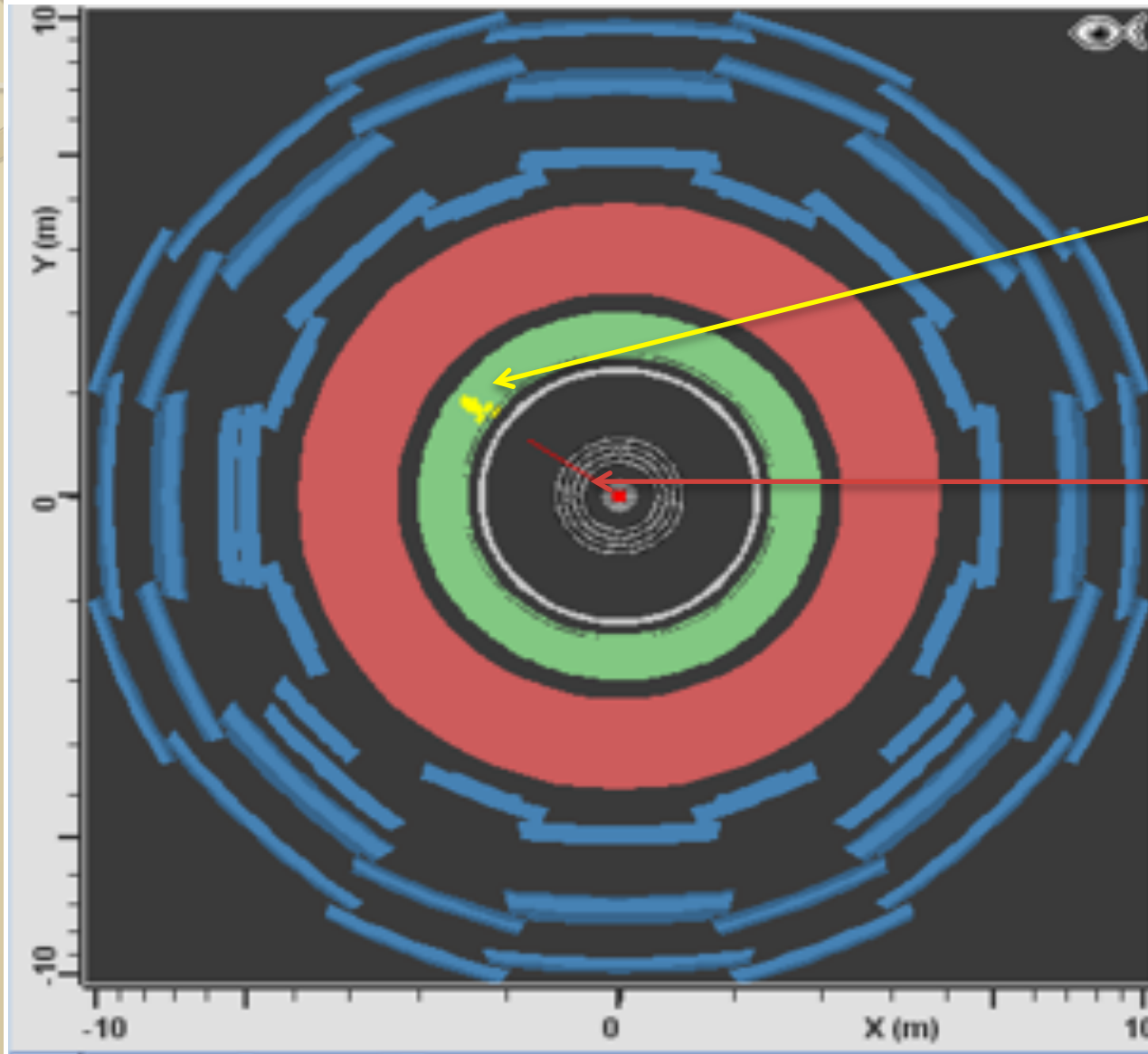
Calorimètre  
électromagnétique

Calorimètre  
hadronique

# Les Calorimètres d'ATLAS



# Comment voit-on un électron dans ATLAS?



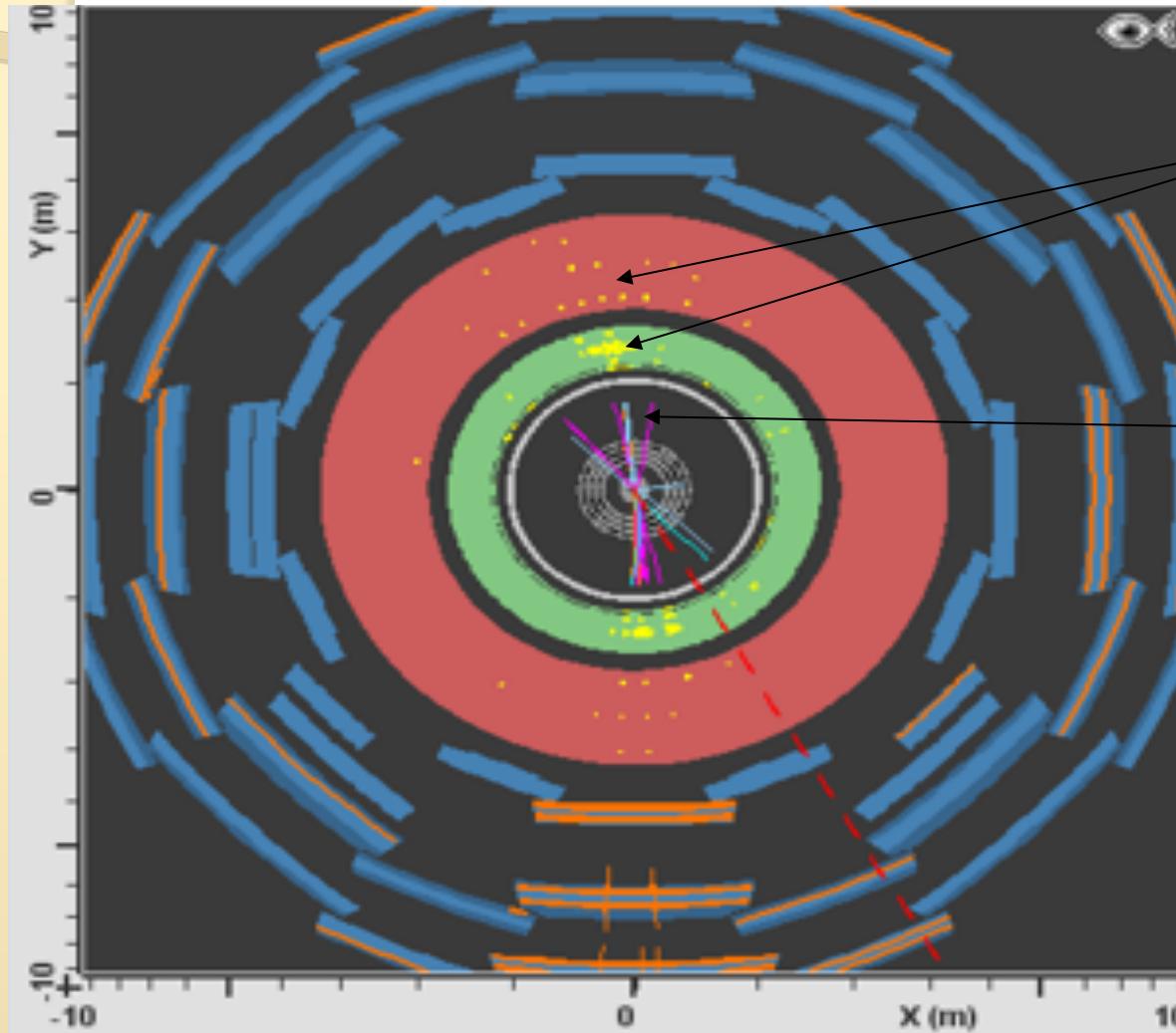
Dépot d'énergie dans le calorimètre électromagnétique

Une seule trace visible dans le détecteur alignée avec l'énergie mesurée dans le calorimètre

# Comment voit-on un quark dans ATLAS?

# Comment voit-on un ~~quark~~ jet dans ATLAS?

- Les quarks n'existent pas à l'état libre!  
⇒ Jet: groupe de hadrons allant dans la même direction que le quark initial

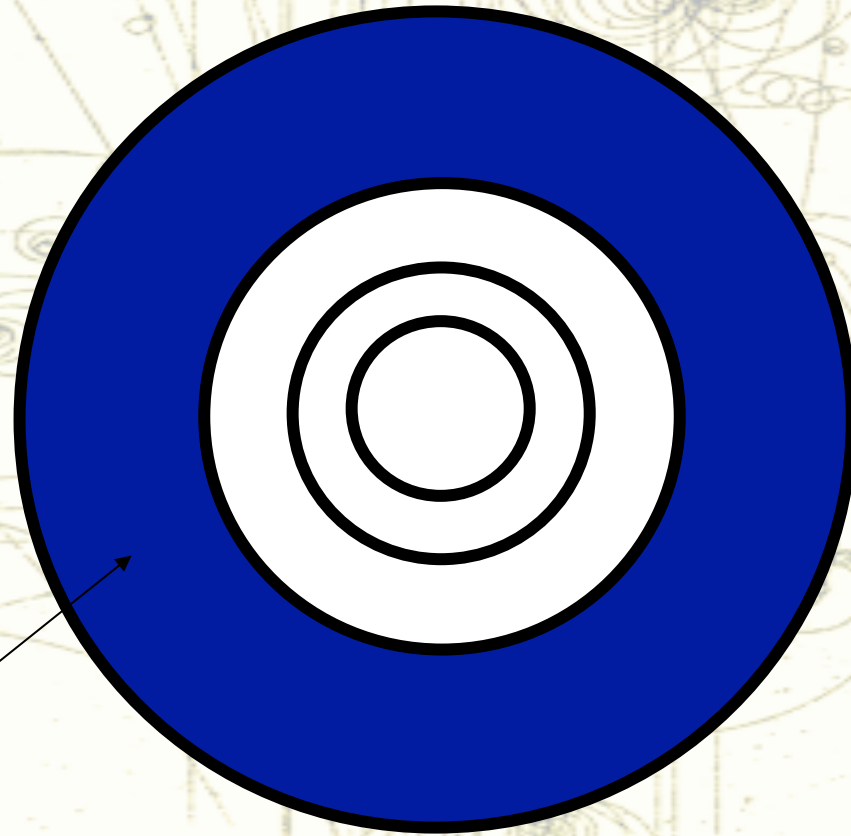


Dépot d'énergie  
dans les deux  
calorimètres

Plusieurs traces



# DETECTER LES MUONS...



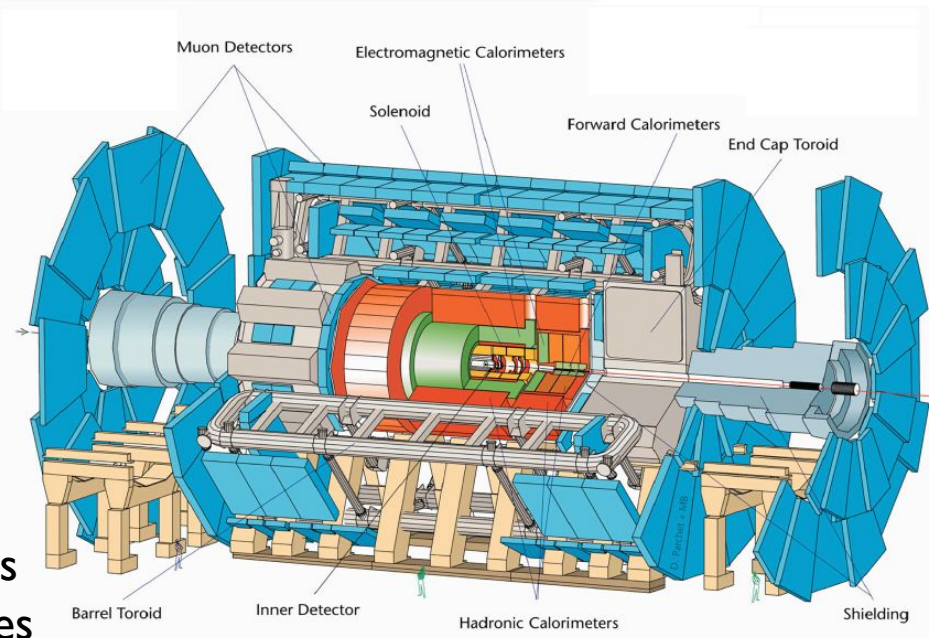
Détecteur à muons

- Les muons sont des particules importantes car elles font souvent partie des signatures des événements intéressants.
- Ce sont des particules chargées, on les voit dans le détecteur de traces (variété d'électron, plus massifs)
- Mais ne s'arrêtent dans aucun des deux calorimètres
- On construit des chambres à muons qui mesurent de façon très précise la vitesse et la trajectoire de ces particules (précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu !!)

## Et dans ATLAS ?

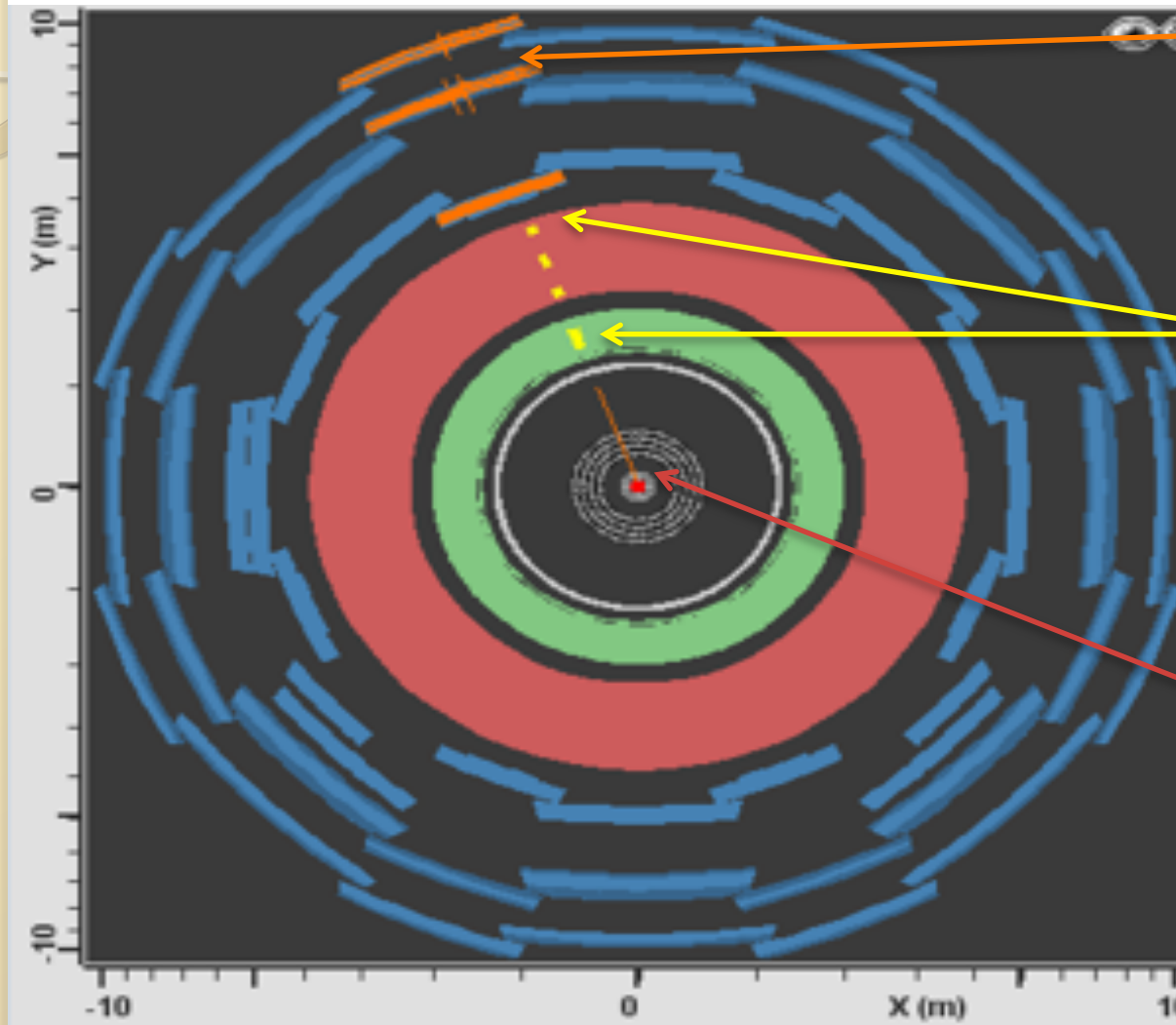
Le système à muons se compose

- D'aimants toroïdaux.
- Tubes à dérives : un signal y est généré lors du passage d'un muon
- Chambre à rubans cathodiques : elle détecte les muons proches du faisceau. La position des muons est connue avec une précision de 0,1 mm.
- Chambre à plaques résistives et chambre multifils extraplate : ces parties du détecteur permettent la sélection des événements en temps réel. (on ne garde que 100 événements/s sur 1 milliard !)



Systeme à muon en bleu

# Comment voit-on un muon dans ATLAS ?

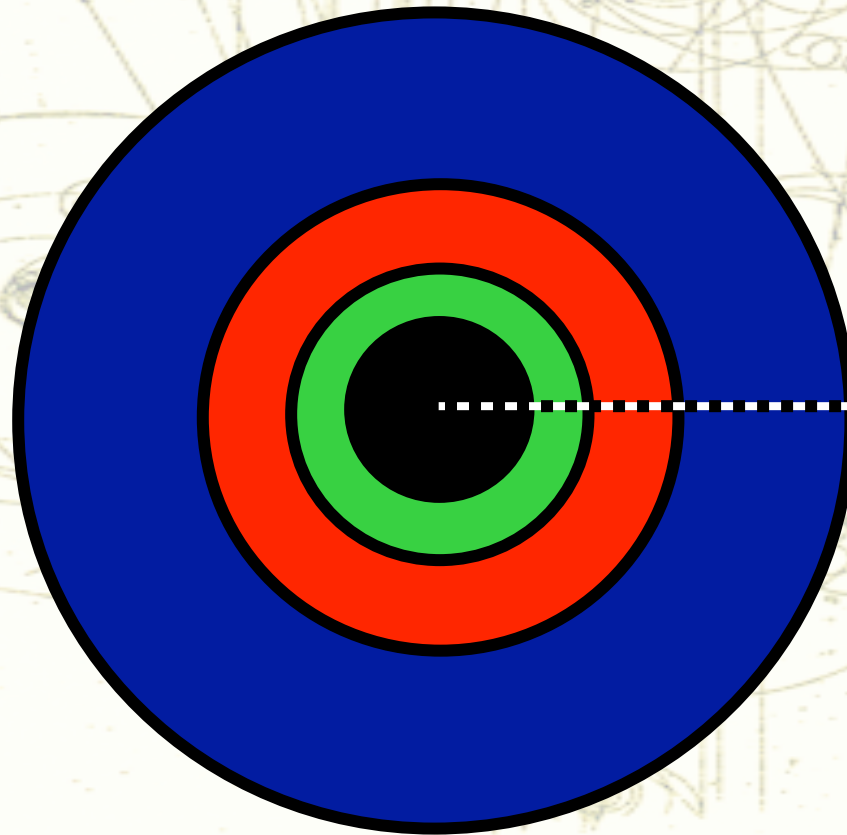


Chambres à muons touchées

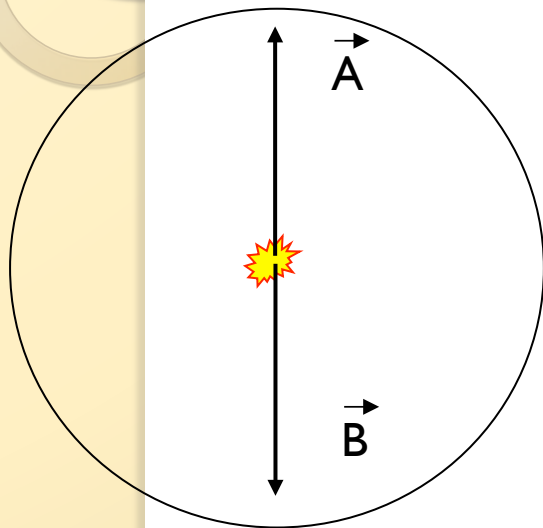
Faibles dépôts d'énergie dans les calorimètres électromagnétique et hadronique

Trace visible dans le détecteur de traces

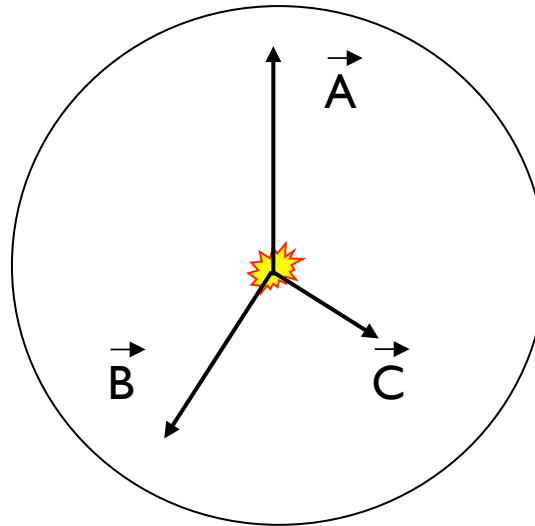
# ET LE NEUTRINO ?



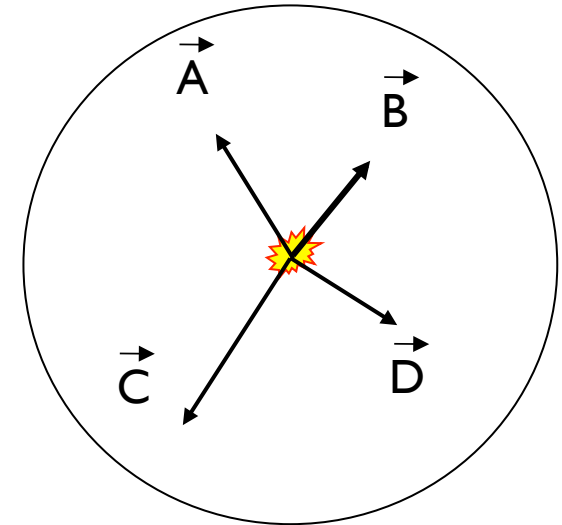
# L'énergie transverse manquante



$$\vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} \\ \vec{A} + \vec{B} = 0$$



$$\vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} \\ \vec{A} + \vec{B} + \vec{C} = 0$$



$$\vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} + \vec{\phantom{A}} \\ \vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D} = 0$$

- Conservation de l'impulsion dans le plan transverse au faisceau

# L'énergie transverse manquante

- Exemple d'événement où l'énergie dans le plan transverse est conservée

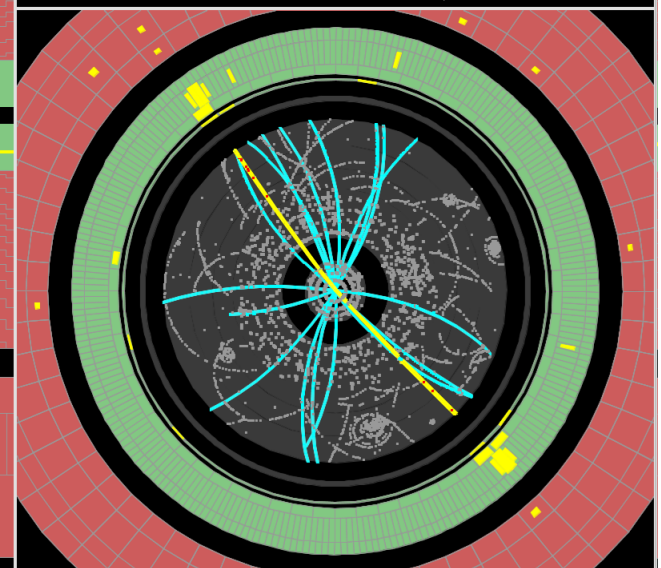
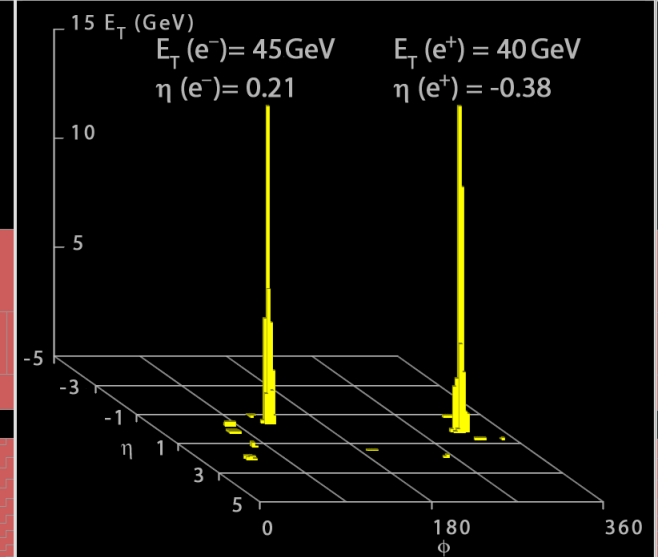


Run Number: 154817, Event Number: 968871

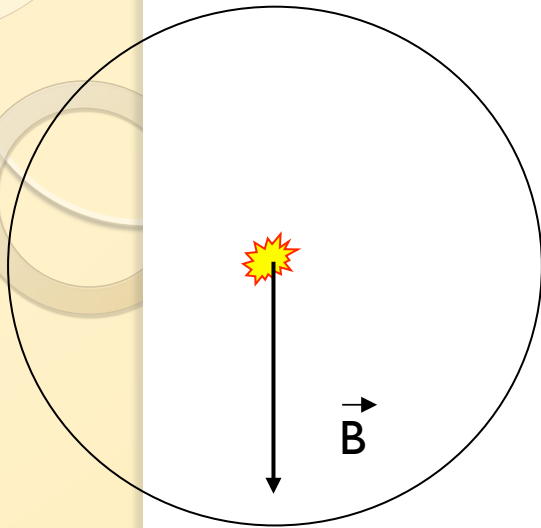
Date: 2010-05-09 09:41:40 CEST

$M_{ee} = 89 \text{ GeV}$

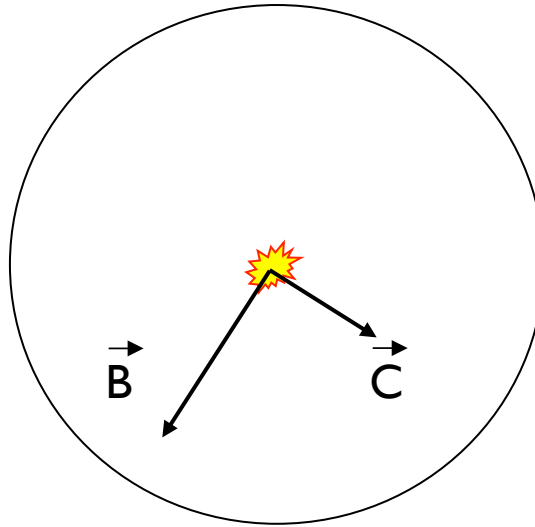
$Z \rightarrow ee$  candidate in 7 TeV collisions



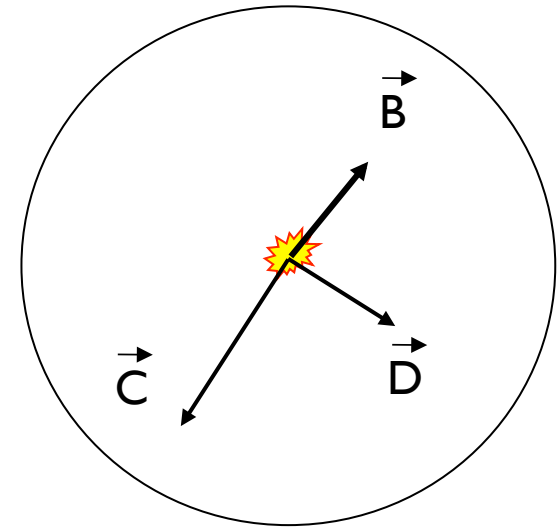
# L'énergie transverse manquante



$$\vec{B} \neq 0$$



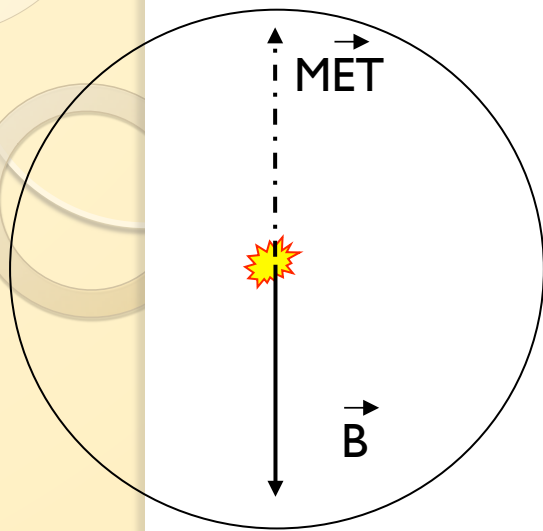
$$\vec{B} + \vec{C} \neq 0$$



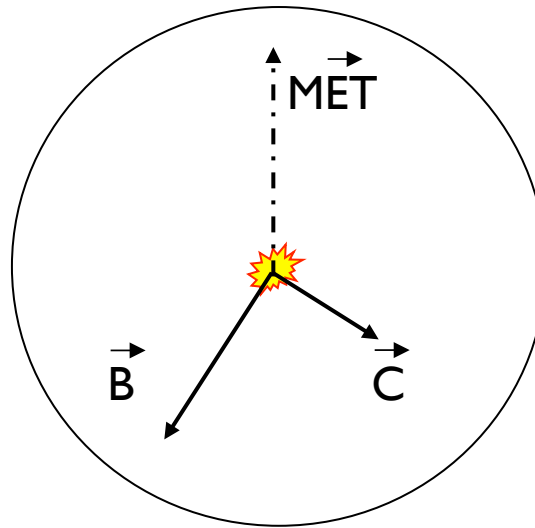
$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} \neq 0$$

- Le neutrino ne laisse pas de trace dans le détecteur interne (neutre) et ne dépose pas d'énergie dans le calorimètre (interagit très faiblement avec la matière)
- Si la particule A est un neutrino l'impulsion dans le plan transverse au faisceau ne semble plus être conservée

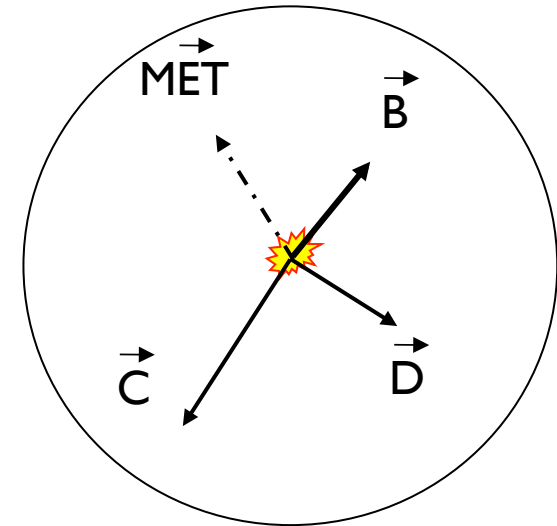
# L'énergie transverse manquante (MET)



$$\vec{B} = -\vec{MET}$$



$$\vec{B} + \vec{C} = -\vec{MET}$$



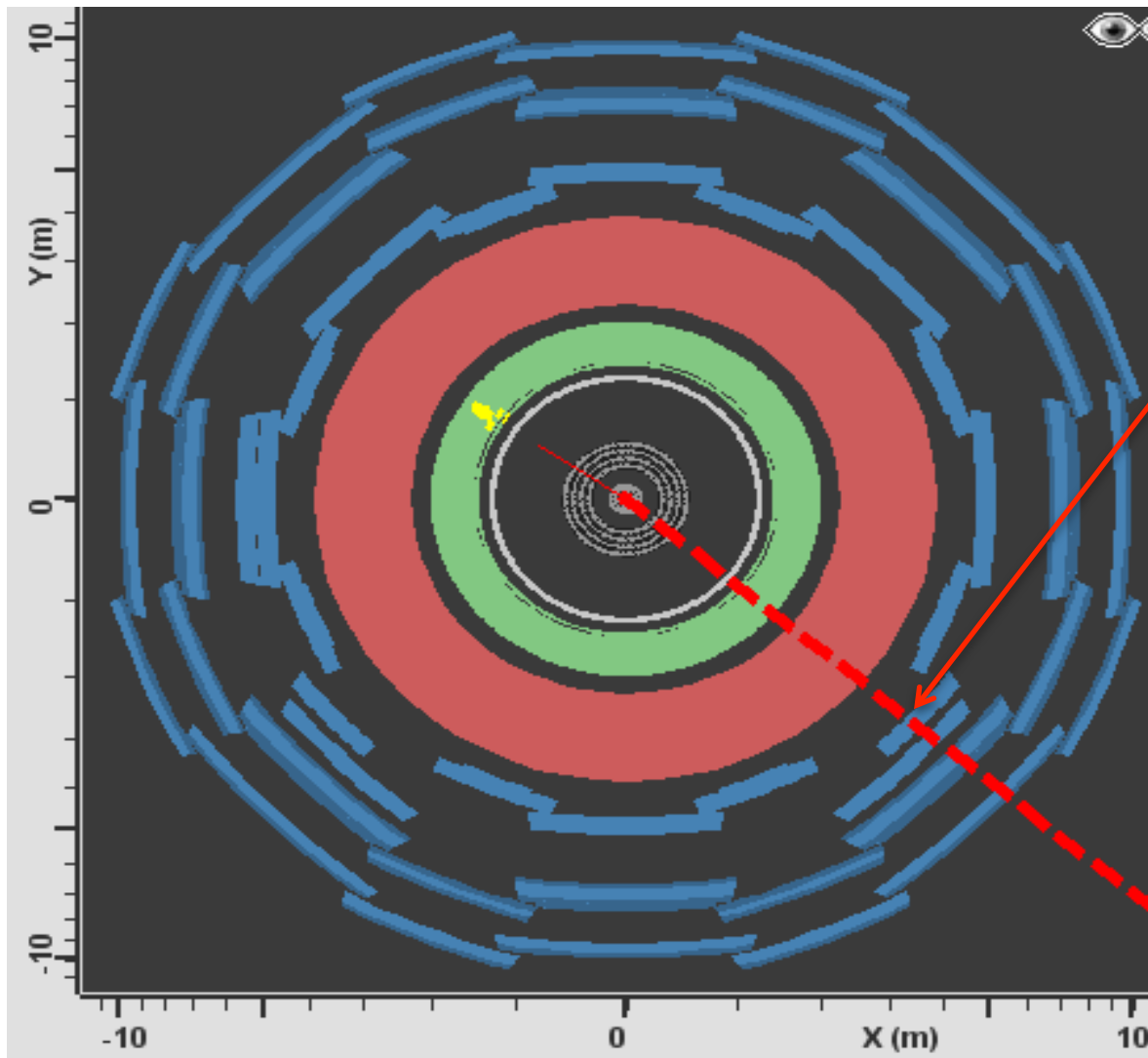
$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} = -\vec{MET}$$

- La non-conservation de l'impulsion dans le plan transverse au faisceau est une indication de la presence d'un neutrino

$$\vec{MET} \neq 0 \Rightarrow \text{Presence d'un neutrino}$$



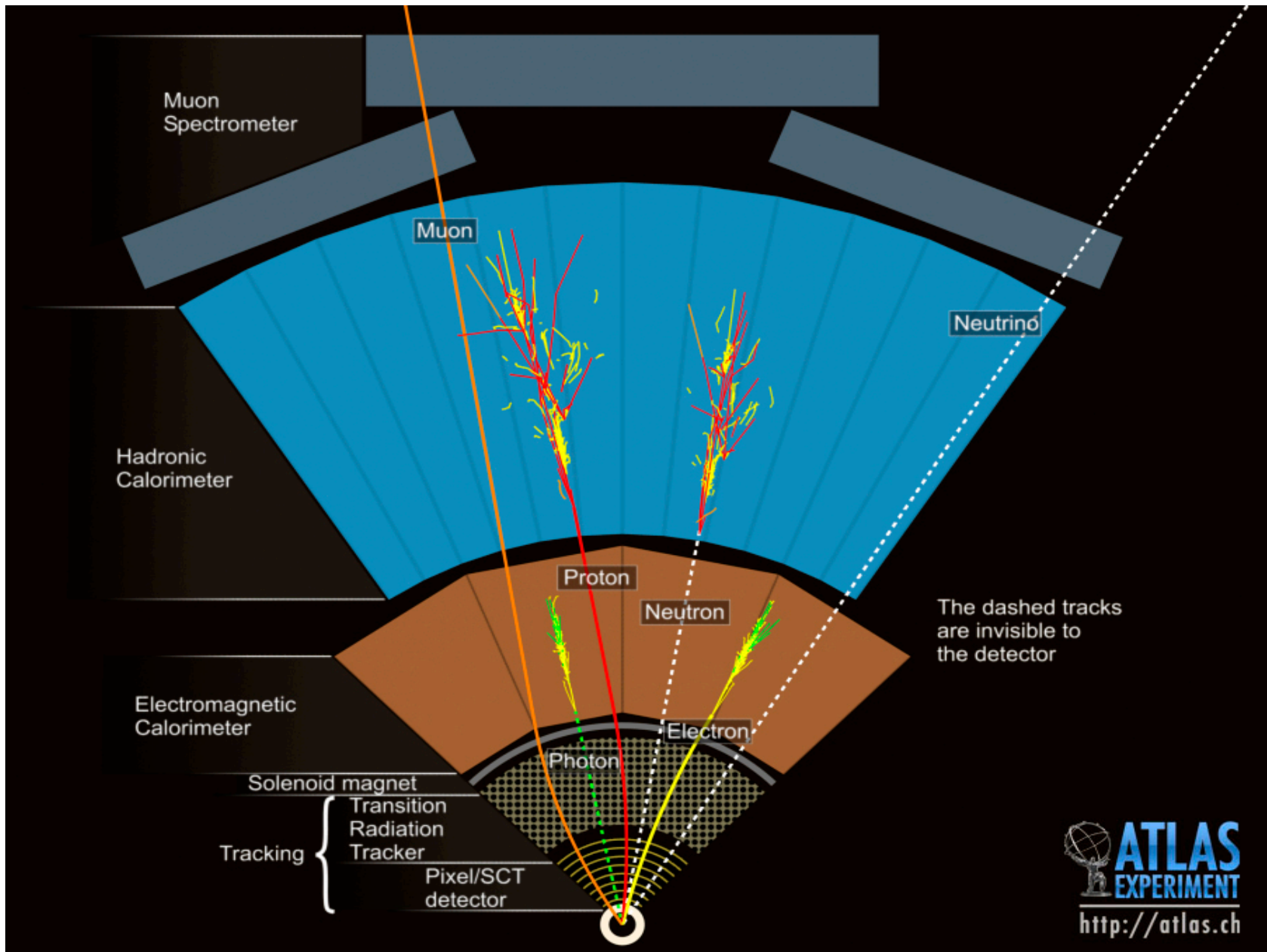
# L'énergie transverse manquante



Direction de l'énergie transverse manquante : peut indiquer la direction du neutrino !

*Dans cet exemple, le neutrino est dos à dos avec la particule chargée*

# Résumé...

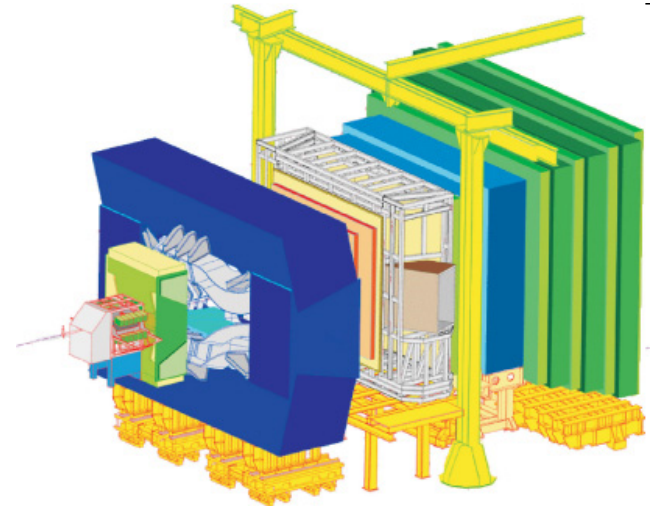
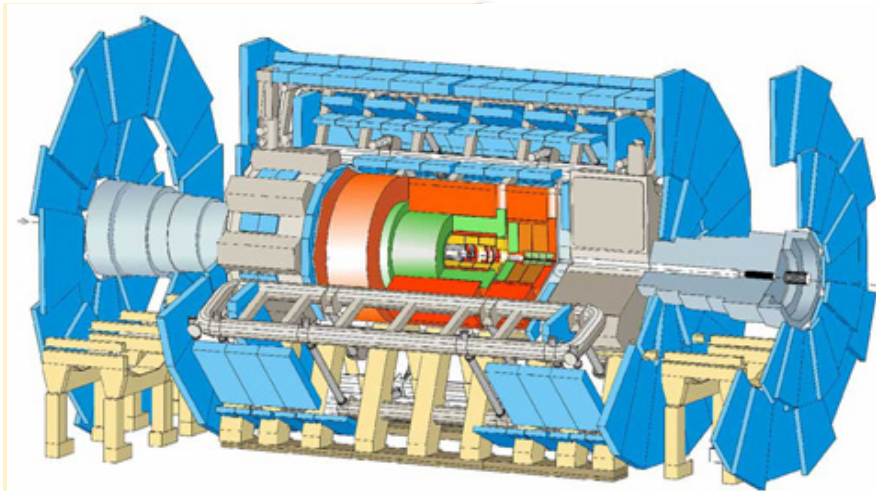


# Conclusion

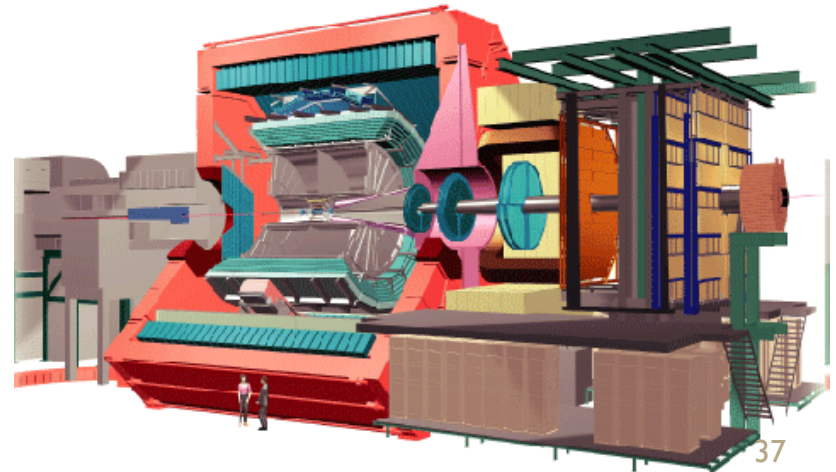
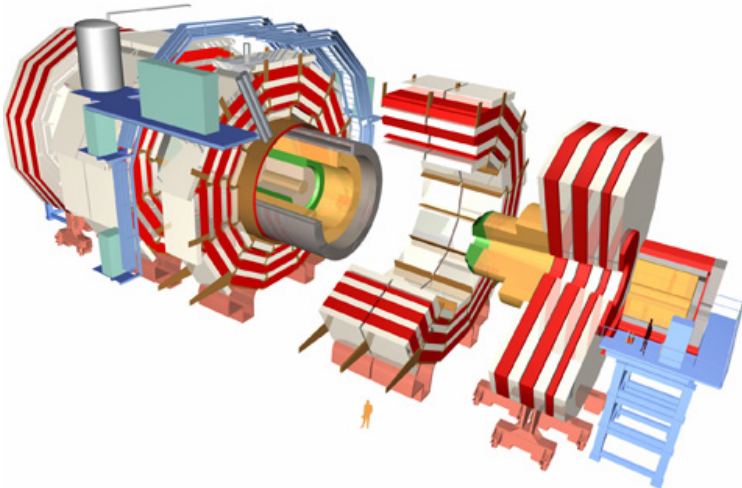
- ❖ On a besoin de détecteurs pour tester nos modèles théoriques et pour rechercher la nouvelle physique.
- ❖ Ils servent à reconstruire toute l'histoire de la collision entre les deux protons en utilisant les caractéristiques des particules produites pour les identifier.
- ❖ Ils doivent donc avoir une grande précision pour une bonne qualité des mesures.



# **ANNEXES**



# ET LES AUTRES DÉTECTEURS DU LHC ?



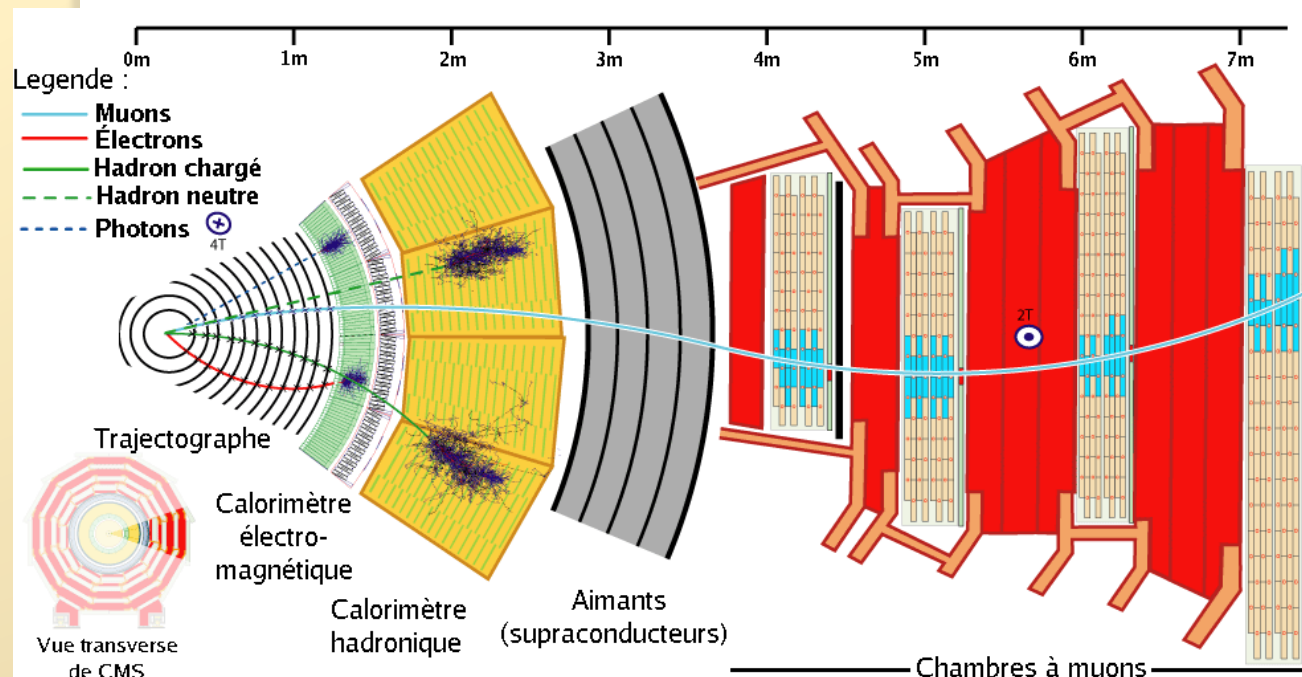
# CMS (Compact Muon Spectrometer)

Expérience généraliste rassemblant plus de 2000 physiciens répartis dans 39 pays qui cherche à confirmer le modèle standard de la physique des particules, notamment en trouvant le boson de Higgs, mais aussi à découvrir quelque chose au delà de ce modèle (test d'autres modèles comme la SuperSymétrie)

## Même schéma de détection qu'Atlas.

Les différences :

- Compact : deux fois plus petit qu'Atlas pour un poids deux fois plus élevé
- Aimant solénoïde supraconducteur le plus grand et le plus puissant jamais construit qui fournit un champ de 4T



- Trajectographe en silicium, situé au centre
- Calorimètre électromagnétique constitué de 8000 cristaux de tungstate de Plomb

# LHCb (Large Hadron Collider Beauty)

Expérience rassemblant 660 scientifiques dispersés dans 15 pays qui a pour but de répondre à la question : pourquoi l'antimatière semble t'elle avoir disparu ? Pour cela elle va étudier la différence entre matière et antimatière artificiellement créée au LHC avec des quarks beauté.

C'est un détecteur spécialisé dans la détection des particules contenant un quark b contrairement à CMS et ATLAS qui sont polyvalents. Ces particules sont souvent émises à bas angles (près du faisceau). Ce détecteur fait 21 mètres de long, pèse 5600 tonnes.

Deux détecteurs RICH1 et RICH2 qui permettent d'identifier les particules avec des miroirs en carbone

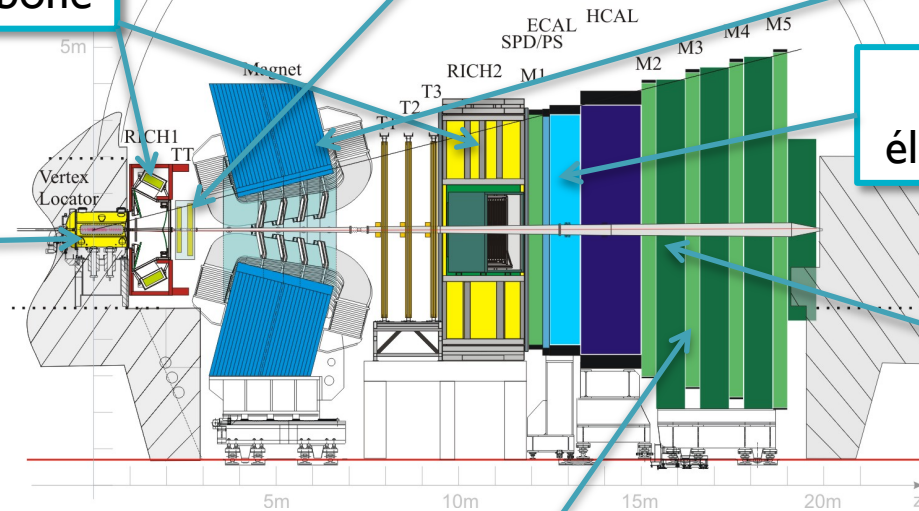
Un trajectographe pour retrouver la trajectoire des particules

Aimant dipolaire qui courbe la trajectoire

Calorimètre électromagnétique

Calorimètre hadronique

Détecteur de Vertex à 1.6cm du faisceau >VELO (Vertex Locator)->précision d'une dizaine de micromètres



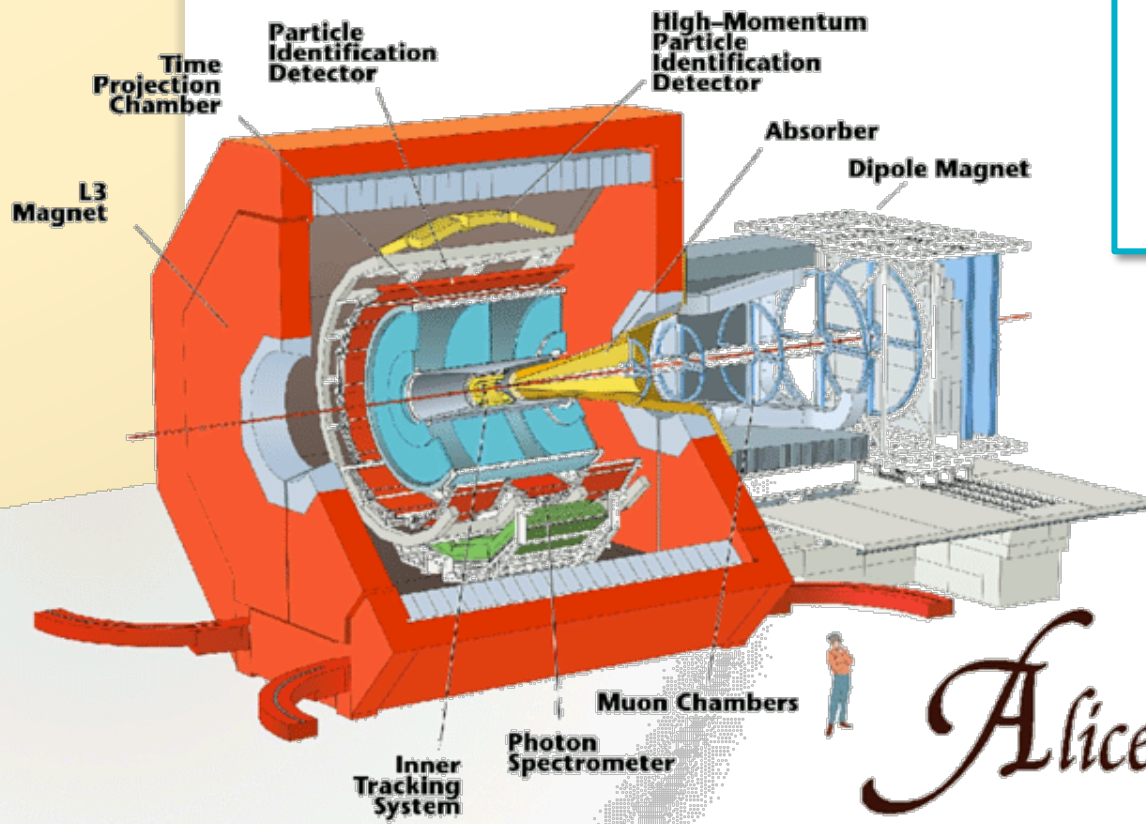
Détecteur à muon

# ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

Expérience rassemblant plus de 1000 physiciens et ingénieurs de 30 pays différents qui cherche à recréer l'état extrême de température (100 000 fois plus grande que celle qui règne au centre du soleil) et de densité nucléaire (comprimer en exerçant une pression équivalente à 100 fois le poids de la Terre sur une tête d'épingle ! ) qui aurait existé quelques microsecondes après le Big Bang afin de mieux comprendre l'état de la matière aux premiers instants de l'Univers.



Pour cela collisions entre ions lourds  
Dans un noyau de Plomb ->82 protons->énergie mise en jeu est 82 fois plus grande que celle obtenue dans ATLAS!!)

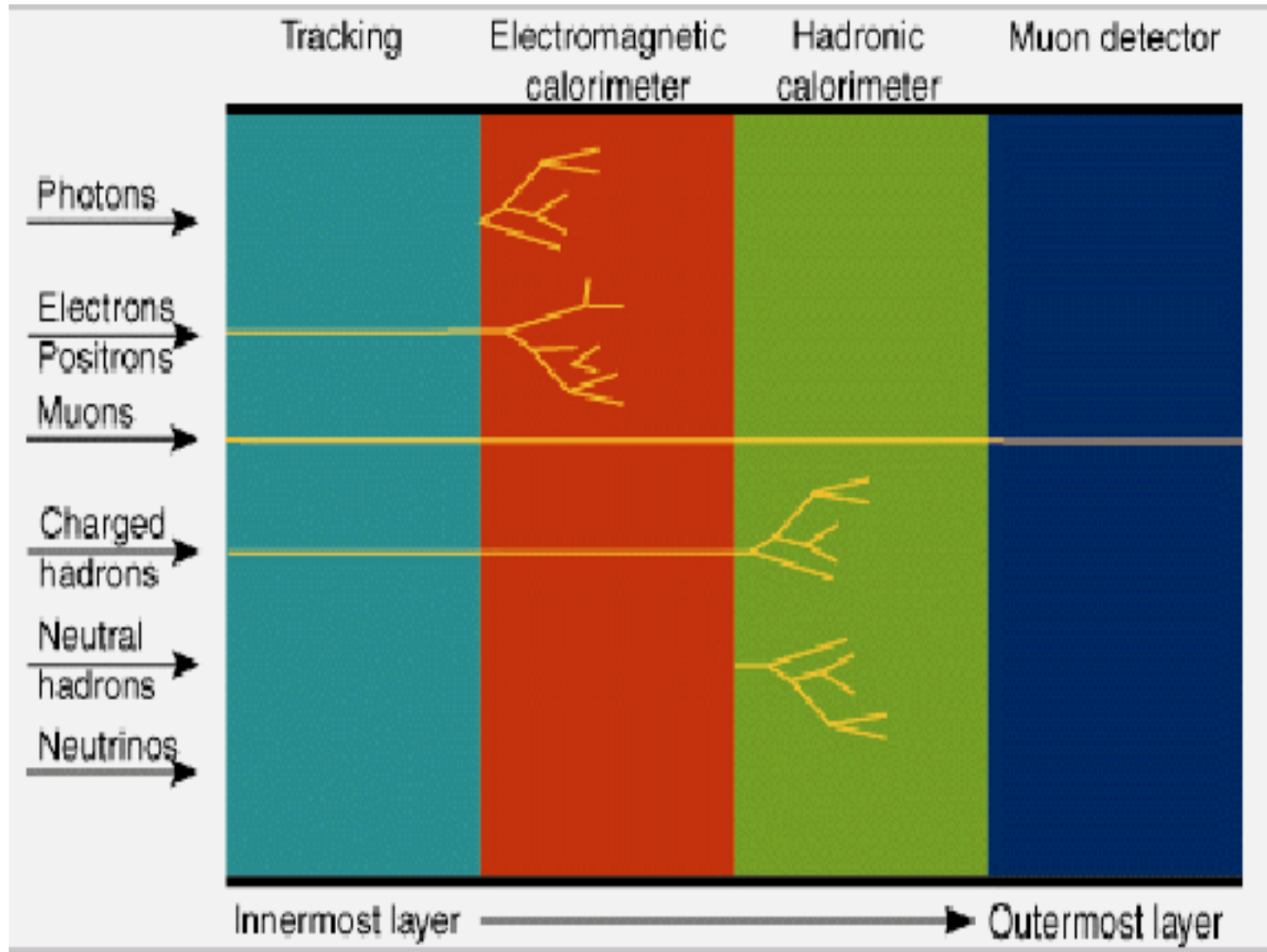


Se compose :

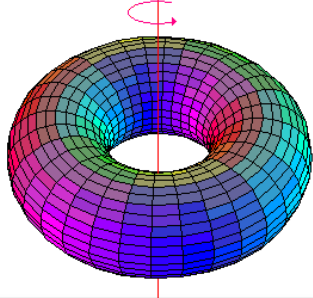
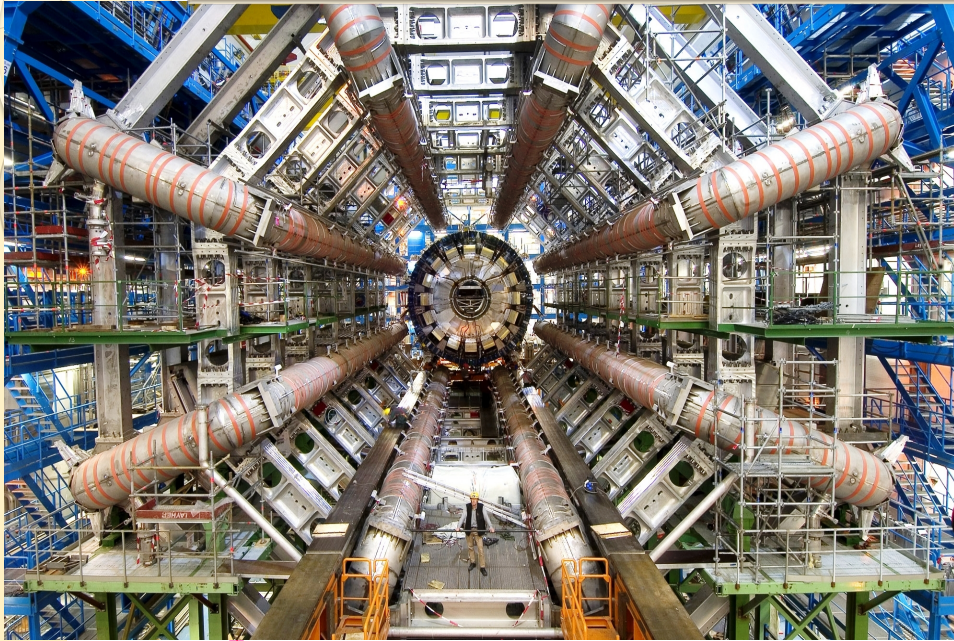
- Un détecteur d'interaction qui signale exactement quand la collision a eu lieu.
- Aimants et un trajectographe
- Un détecteur d'identification de particules
- Un calorimètre
- Et un détecteur à muons



# Résumé



## Et dans ATLAS ?



Aimant **toroidal**

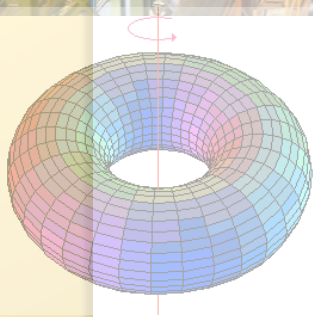
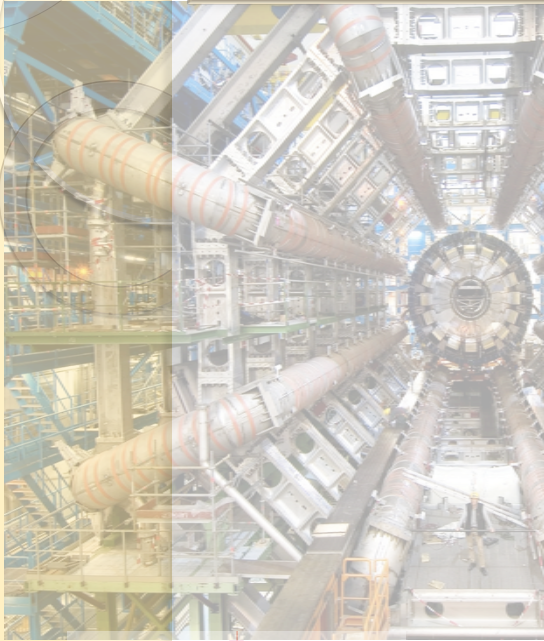


Aimant **solénoïdal**

L'ensemble du système magnétique pèse 1300 tonnes et est refroidi à  $-269^{\circ}\text{C}$ . Ce refroidissement nécessite 40 jours.

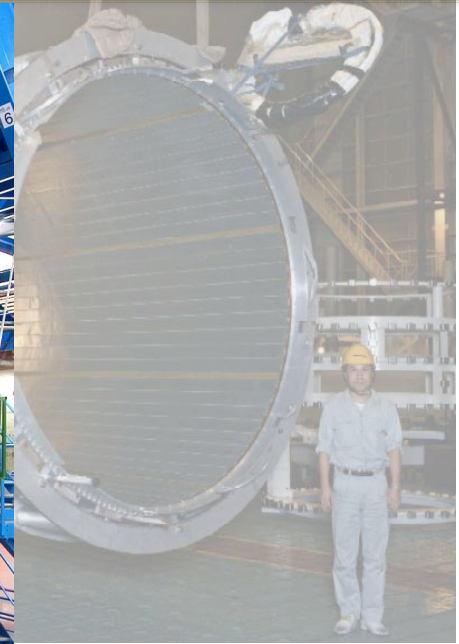
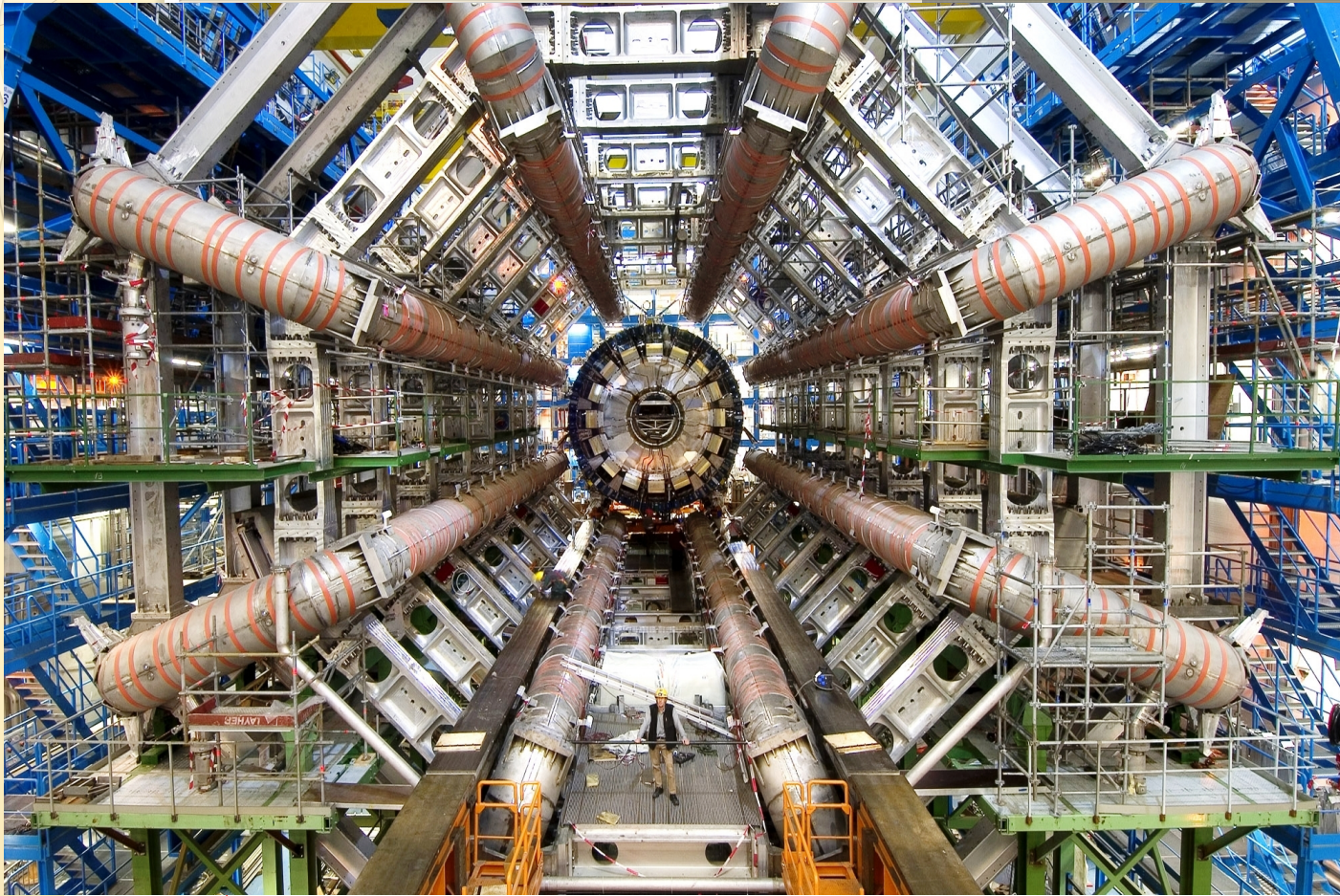
L'énergie totale stockée dans ces aimants (1600MJ) est équivalente à l'énergie nécessaire pour faire 25 fois le tour de la Terre à vélo !!

## Et dans ATLAS ?



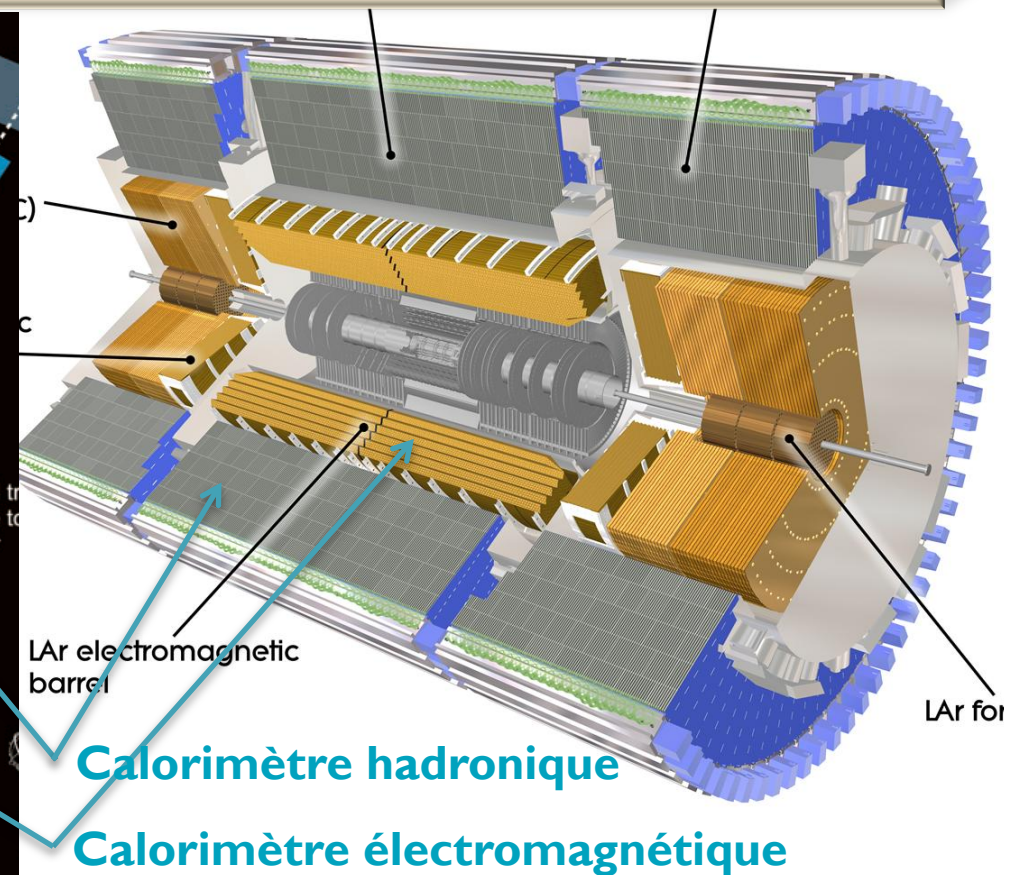
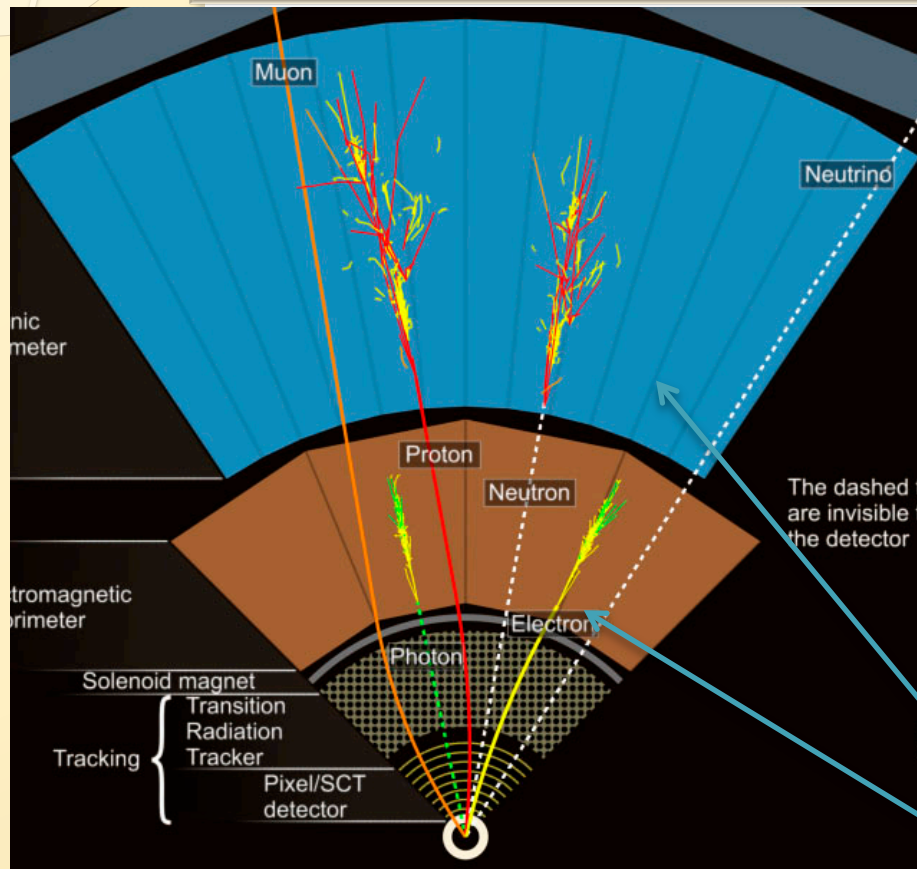
Un solénoïde central de 2 Teslas (40 000 fois le champ magnétique terrestre !!) entoure le détecteur interne. Le champ magnétique produit est parallèle au faisceau

## Et dans ATLAS ?



8 bobines supraconductrices de 25 m de long sur 5 de large (le plus grand aimant au monde !!) enfermées dans un cryostat. Cela crée un champ magnétique toroïdal de 4T perpendiculaire au faisceau de protons (champs 80 000 fois supérieur au champs terrestre !)

# Et dans ATLAS ?



La partie qui mesure l'énergie s'appelle le CALORIMETRE (vient de *calor* : "chaleur"). Il est divisé en deux parties :

- la partie électromagnétique (arrête particules interagissant beaucoup)
- la partie hadronique (arrête les particules interagissant moins)

# Et dans ATLAS ?

## 1- Partie électromagnétique

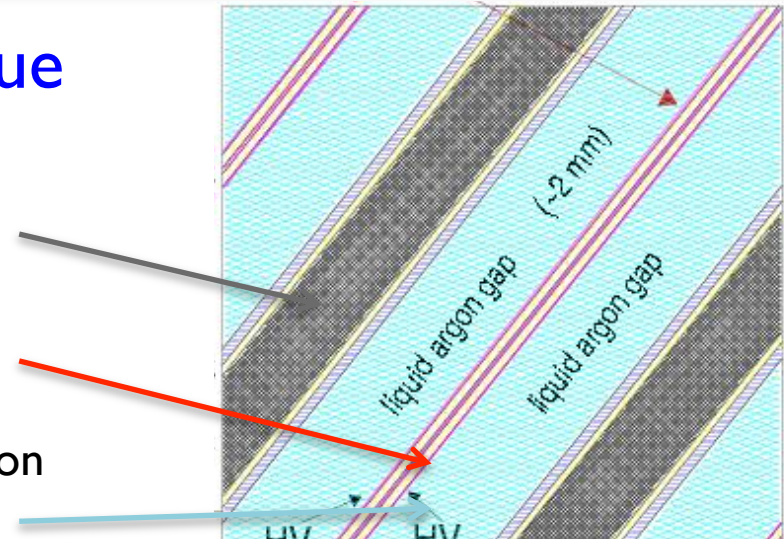
Divisée en plusieurs parties :

-partie absorbante en Plomb pour arrêter particules : des gerbes vont s'y former

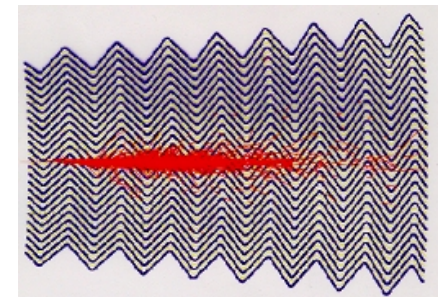
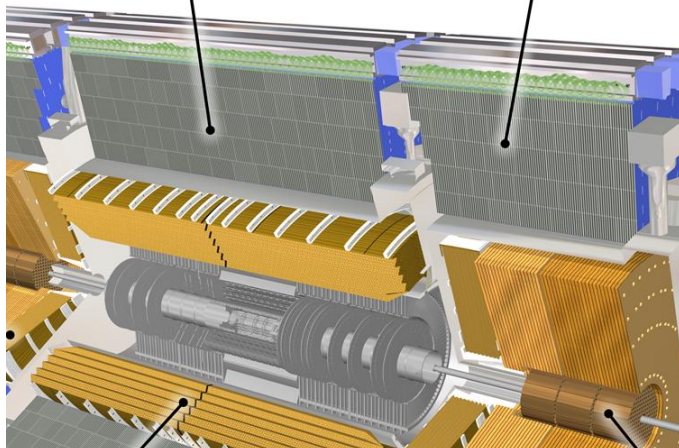
-**des électrodes** pour créer une ddp (très haute tension : 2000V sur 2 mm !!)

Ces deux parties sont en forme d'accordéon

- Le tout baigne dans **une partie active d'Argon liquide à  $-185^{\circ}\text{C}$**  qui va être ionisée par particules de la gerbe



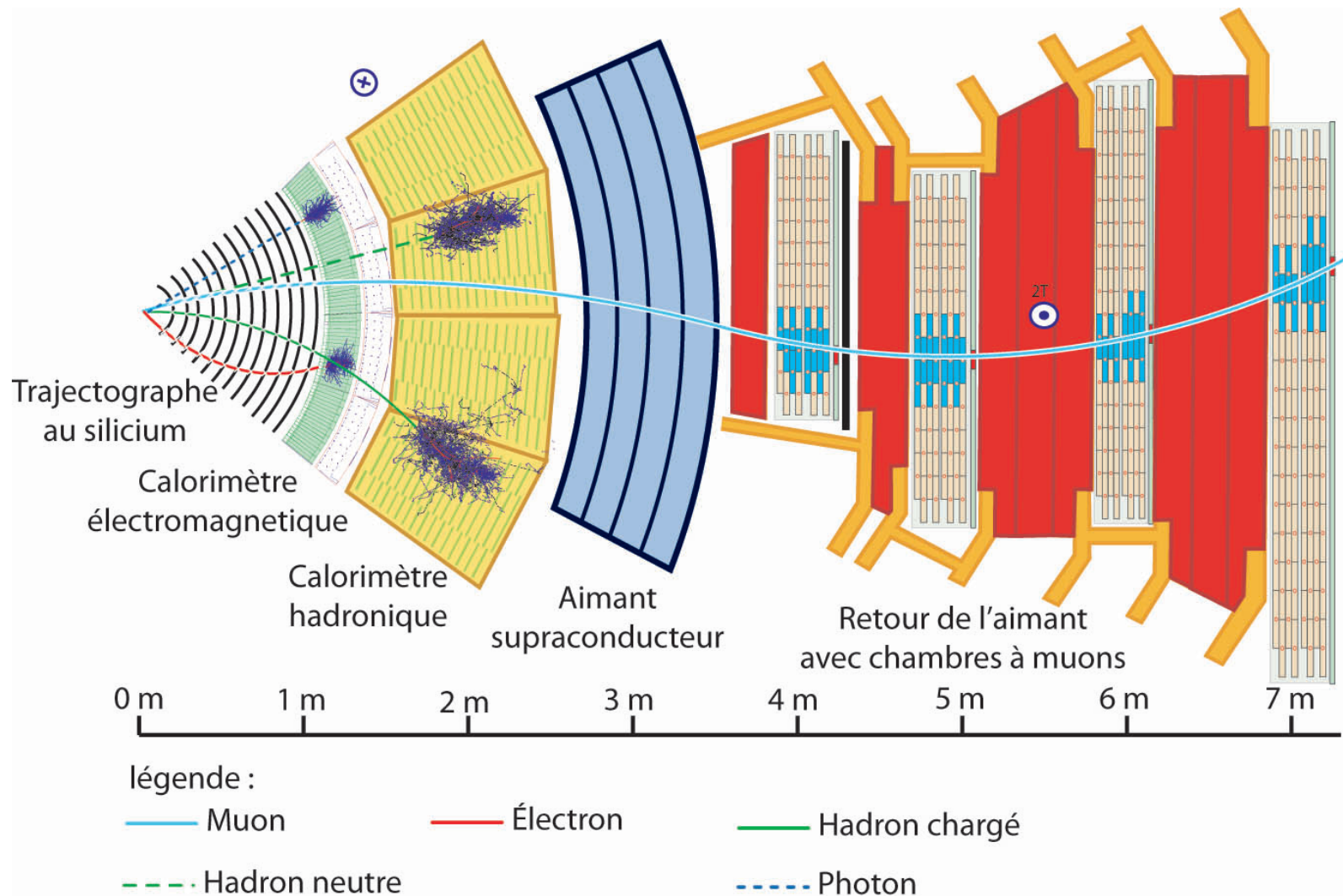
## 2- Partie hadronique



-Absorbeurs en fer pour stopper les particules (600000 plaques de 3 mètres de long !)

-Et scintillateurs pour mesurer l'énergie (400000 tuiles en polystyrène transparent)

# Résumé...



Ceci est la forme générique d'un détecteur de particules (forme cylindrique). La structure interne est « en poupées russes » : le détecteur de trace au centre, puis les calorimètres, et enfin le détecteur de muons.