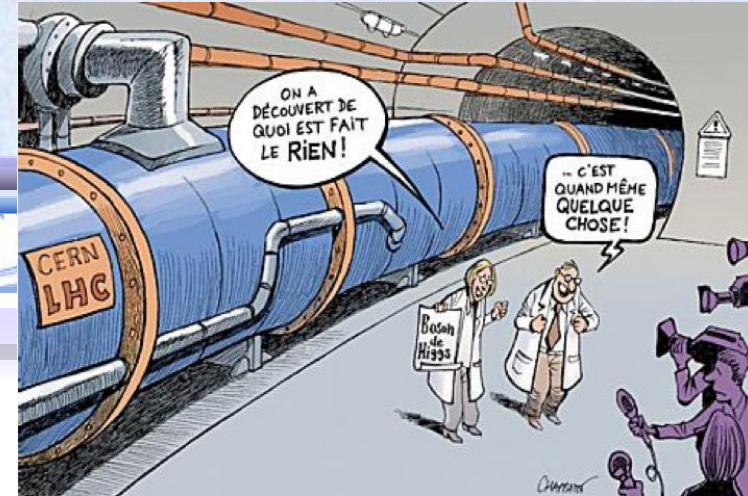


# Un exemple de détecteur : CMS



*Bruno Alves, 13/02/2023*

⚓ Large Hadron Collider : LHC

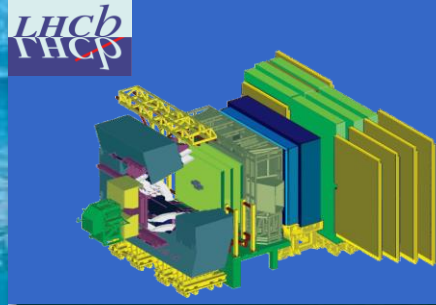
⚓ Compact Muon Solenoid : CMS

*Slide credits: Florian Beaudette, Jona Motta*

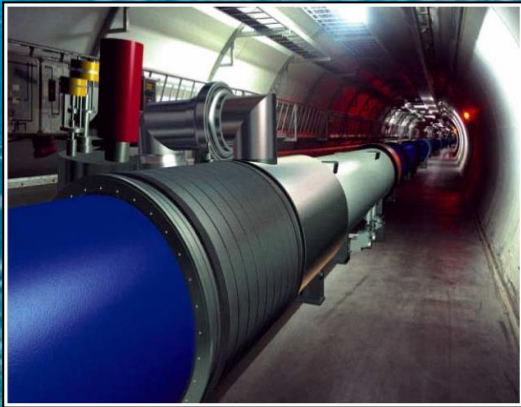
# LHC

## Large Hadron Collider

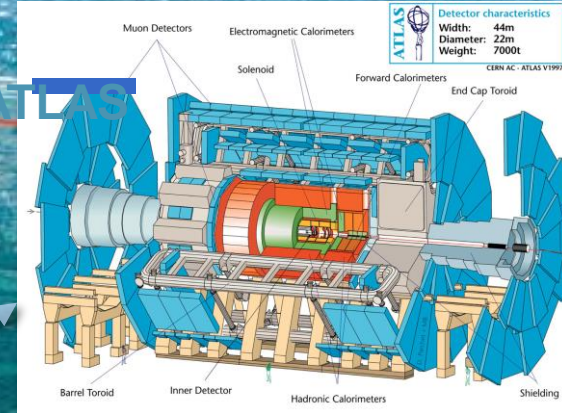
pp, physique du B  
Violation de CP



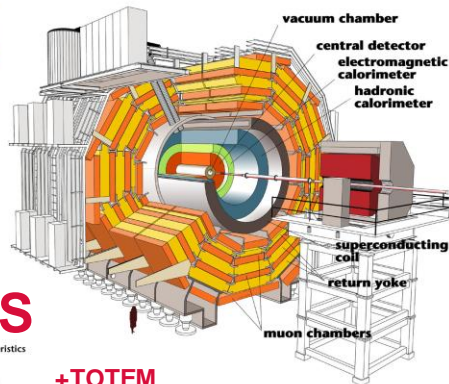
LHC : 27 km  
100m sous terre



Exp. généralistes,  
pp, ions lourds



Ions lourds



### CMS

Detector characteristics  
Width: 22m  
Diameter: 15m  
Weight: 14'500t

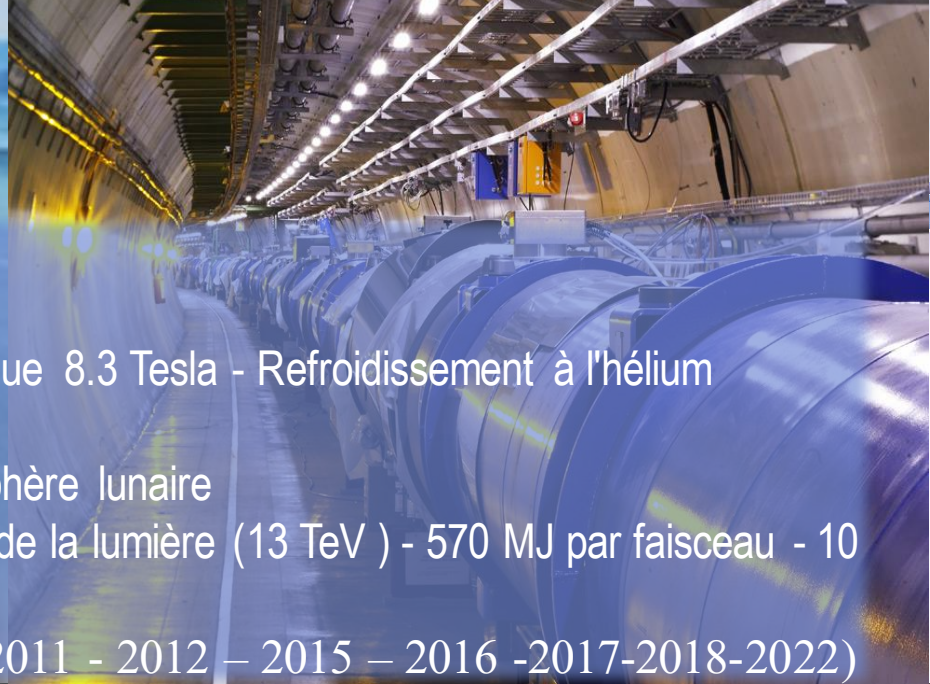
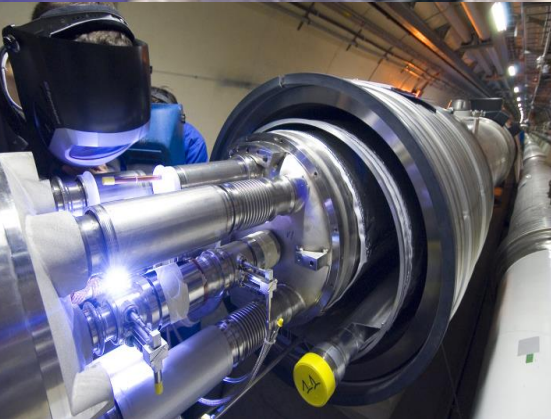
+TOTEM

# Du virtuel ...

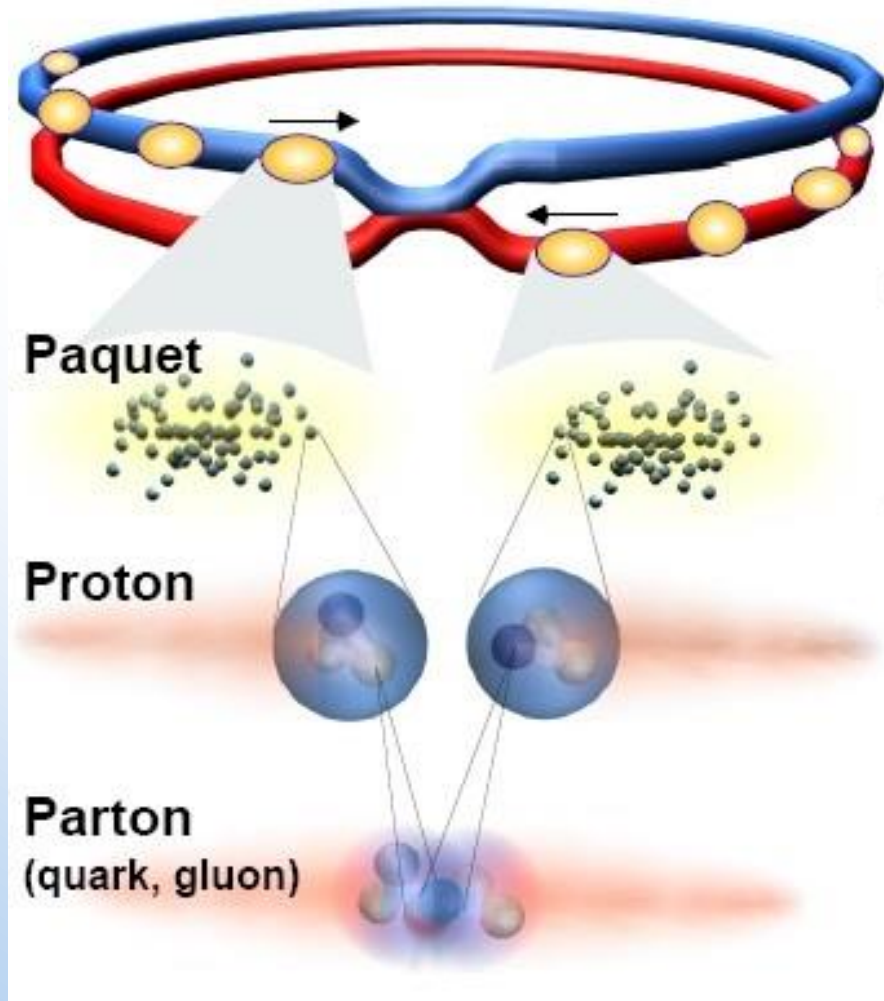
## ➤ Une machine au superlatif

- 27 km de circonférence - 100 m sous terre
- 9600 aimants supraconducteurs - Champ magnétique 8.3 Tesla - Refroidissement à l'hélium superfluide à  $-271^{\circ}$  C (1.9 K)
- Vide poussé : pression 10 x plus faible que l'atmosphère lunaire
- Les protons circulent à 99.9999986% de la vitesse de la lumière (13 TeV) - 570 MJ par faisceau - 10 microns aux points de croisement
- 2022 : 10<sup>ème</sup> démarrage (2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2015 - 2016 - 2017-2018-2022)

... au réel



# LHC Accélérateur et collisionneur



Proton-Proton	2808 × 2808 paquets
Protons/paquet	$10^{11}$
Energie des faisceaux	13 TeV ( $13 \cdot 10^{12} \text{eV}$ )
Luminosité	$2 \cdot 10^{34} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
Taux des croisement	40 MHz
Collisions $\approx$	$10^7 - 10^9 \text{Hz}$

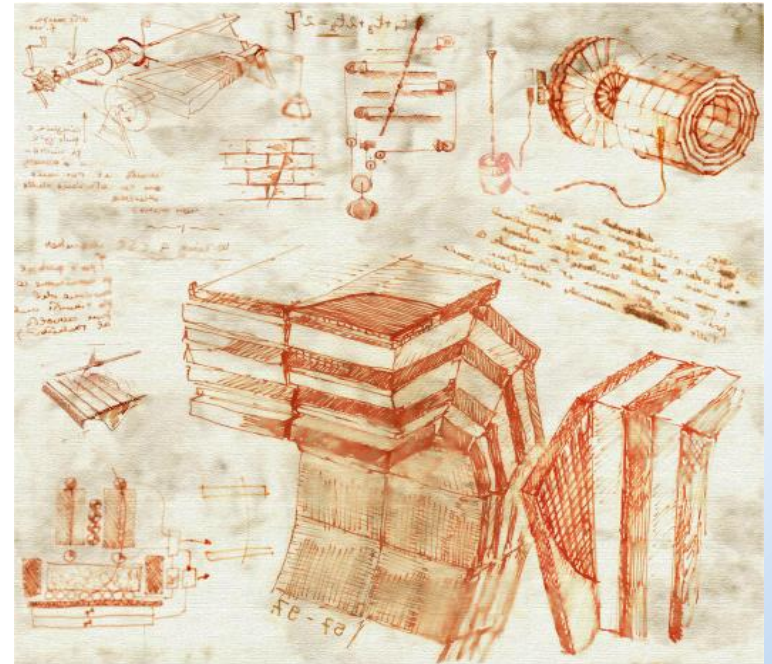
# Détection

## ⚓ Collision → création de particules

- 💬  $E=mc^2$  → correspondance énergie-matière
- 💬 Les particules produites sont instables et se désintègrent

## ⚓ But du détecteur

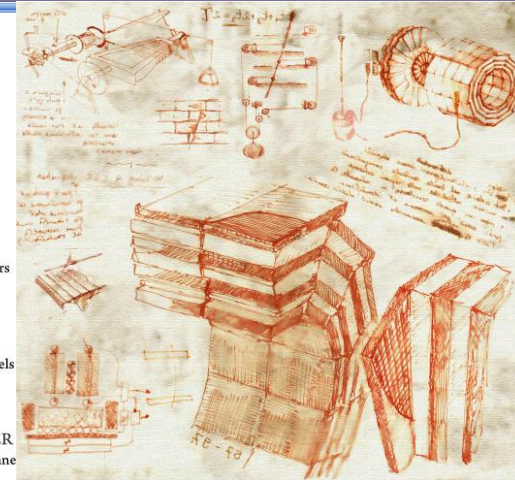
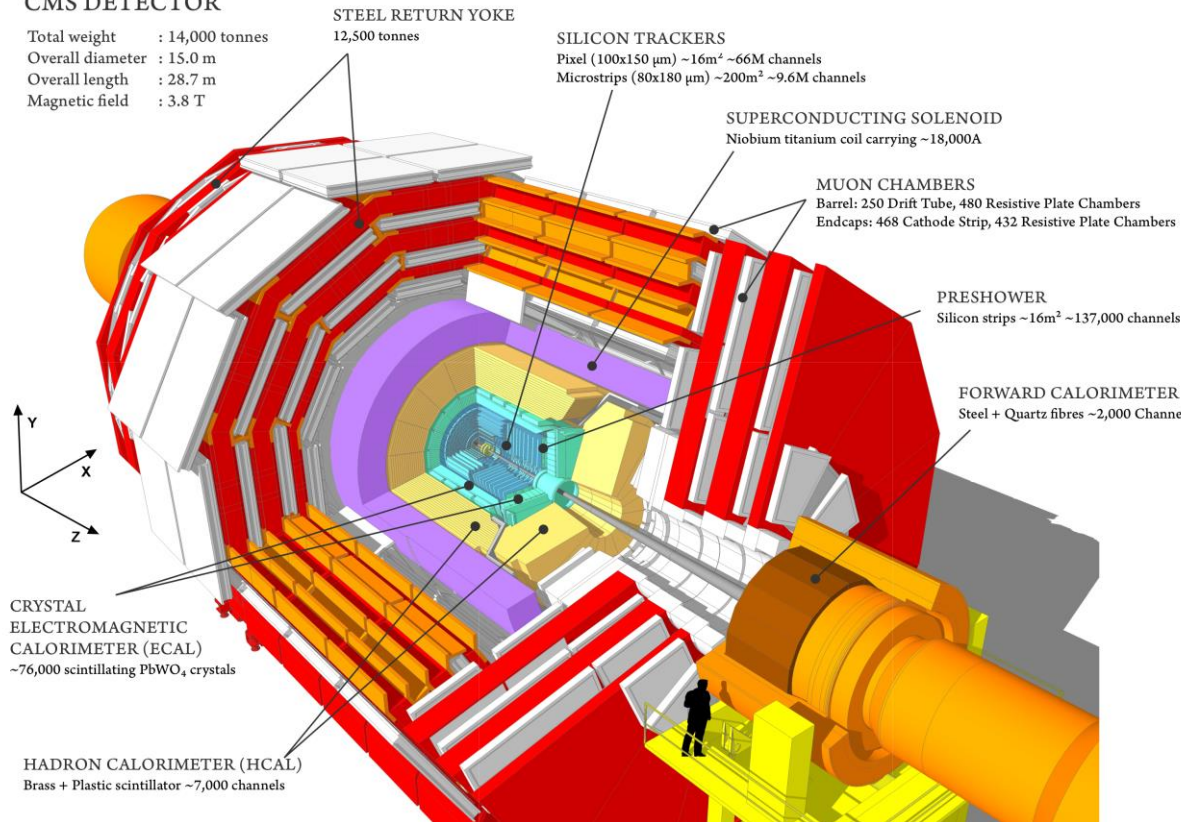
- 💬 Identification des particules
- 💬 Mesure de leur position, trajectoire, quantité de mouvement, charge, masse
- 💬 En général plusieurs sous-couches de détection : une pour chaque type de particule



# CMS

## CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T



Projet proposé en 1990

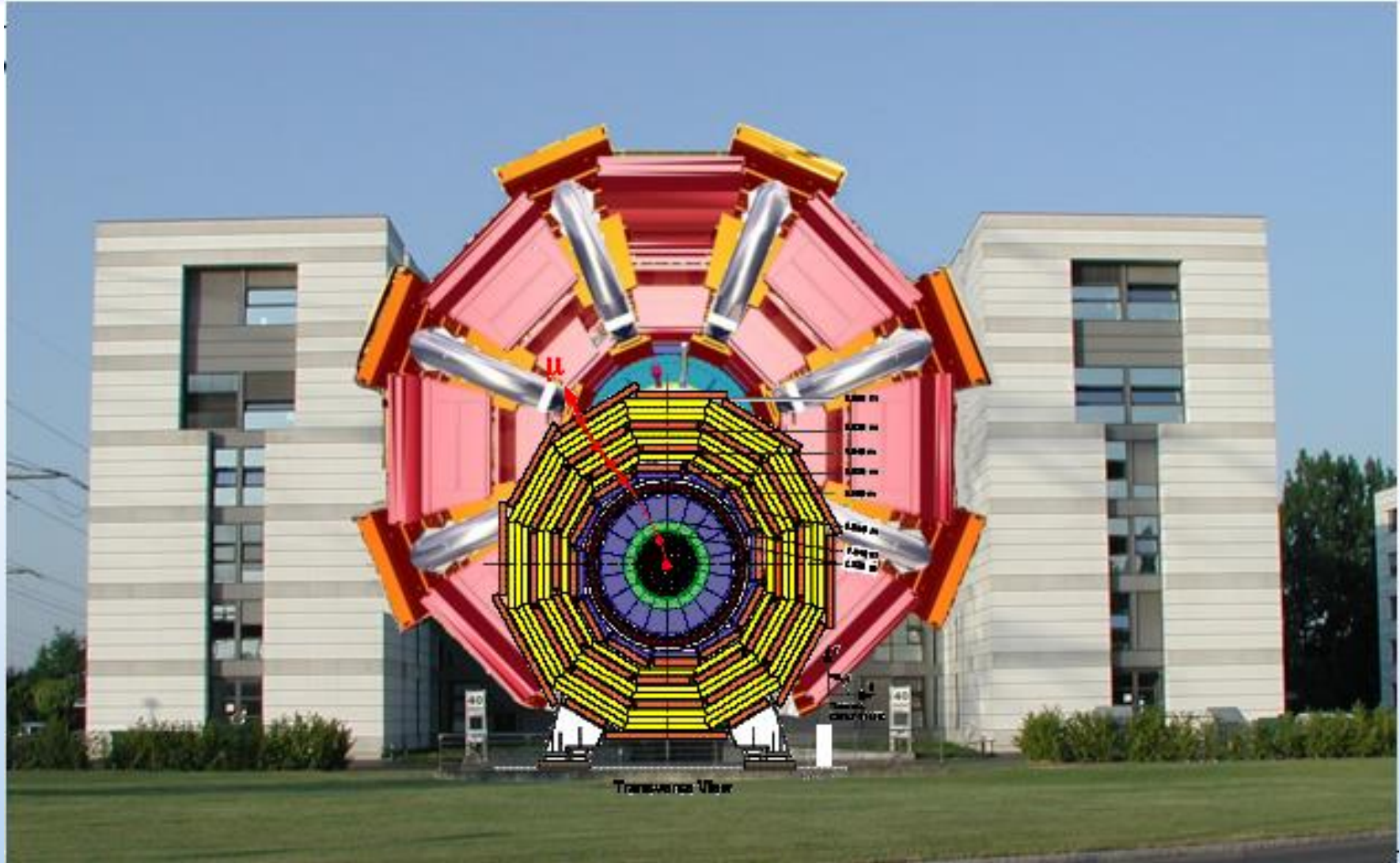
42 pays, plus de 3800 scientifiques

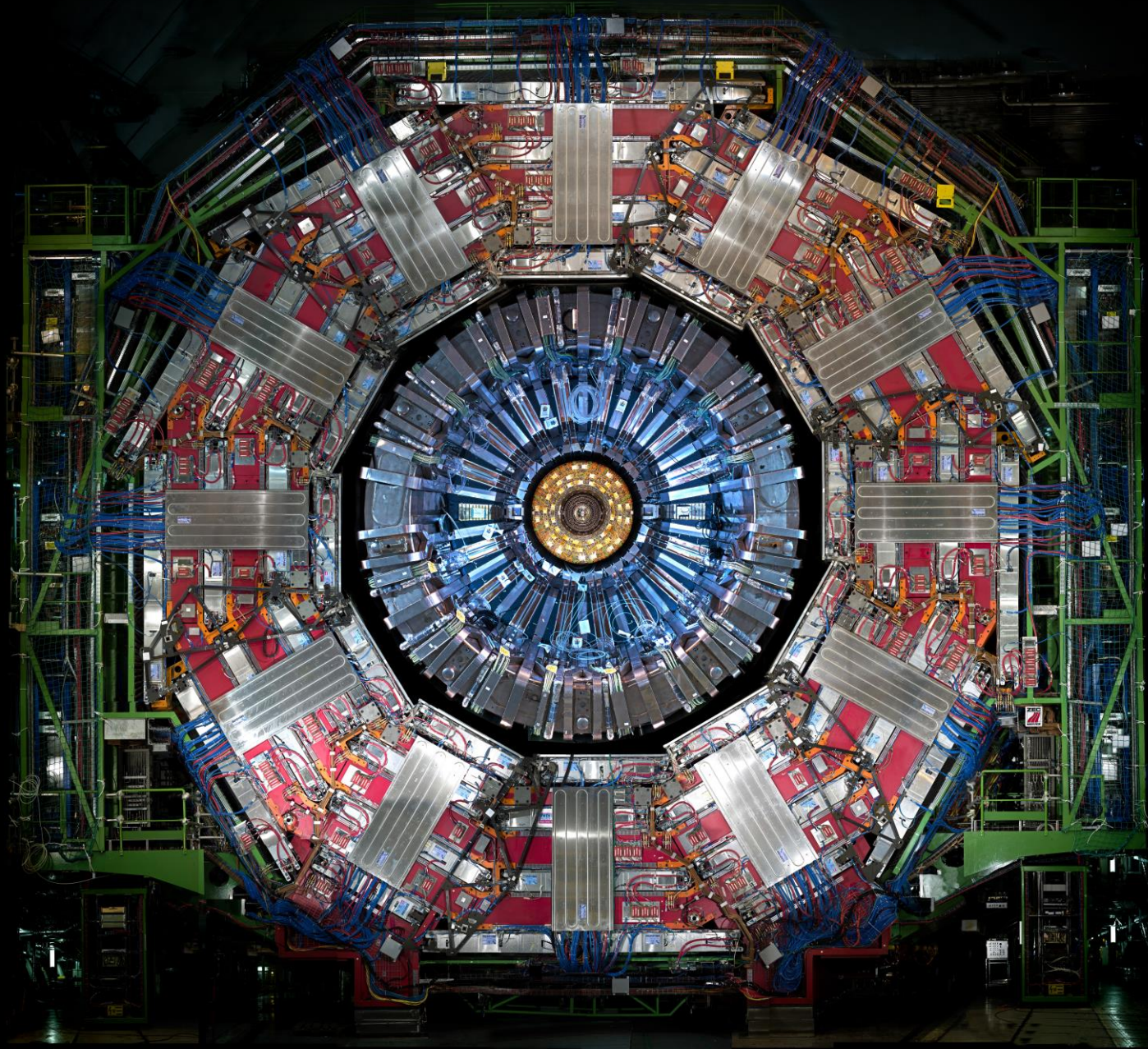
30 m de long, 15 m de haut



**Détecteur** : réponse rapide, grande granularité (15 M canaux), résistance radiations, herméticité

# « Compact »



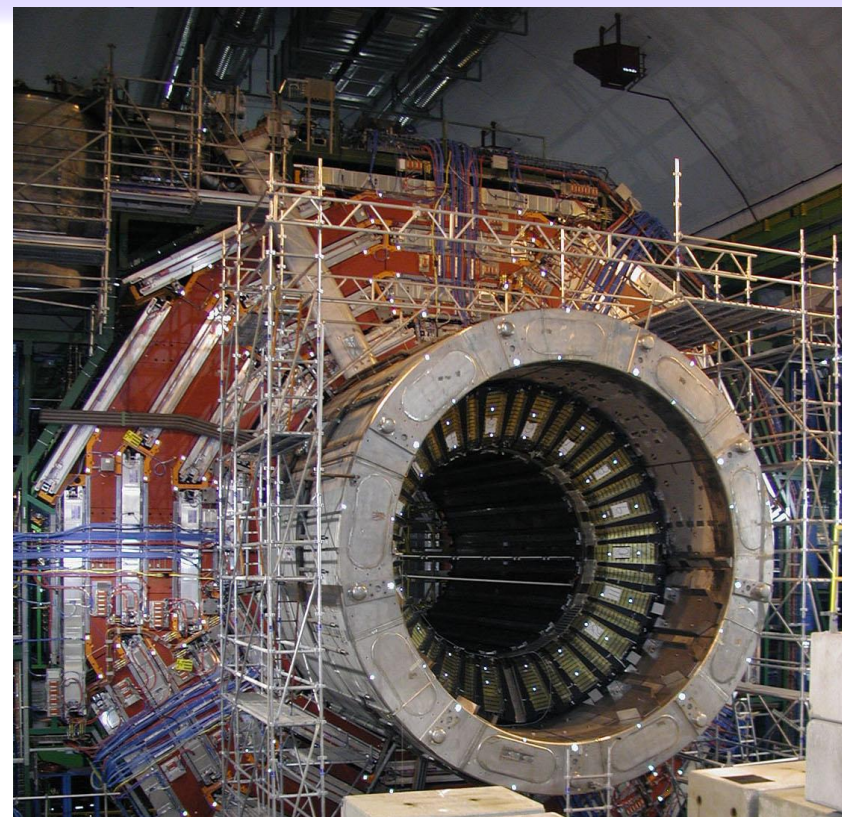
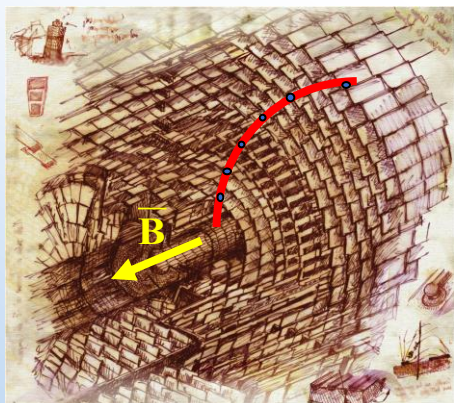




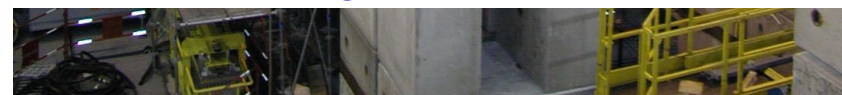
# Champ magnétique

## ⚓ Principe

- Utilisation d'un champ magnétique pour courber la trajectoire des particules chargées
- Mesure de la quantité de mouvement des particules : plus elle est grande, moins les trajectoires sont courbées
- CMS : 3.8 Tesla ( $100000 \times$  le champ magnétique terrestre)



- Aimant supra-conducteur
- Intensité:  $\sim 19000$  A
- Energie stockée: 2.5 GJ

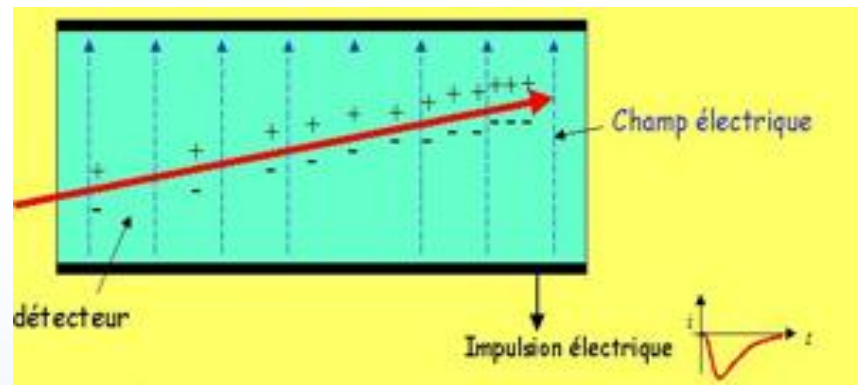


# Trajectographe

⚓ Particules détectées : toutes les particules chargées (électrons, pions, muons, ...)

⚓ Principe de détection

- 💬 Ionisation des atomes du milieu par des particules chargées
- 💬 Récupération des charges créées

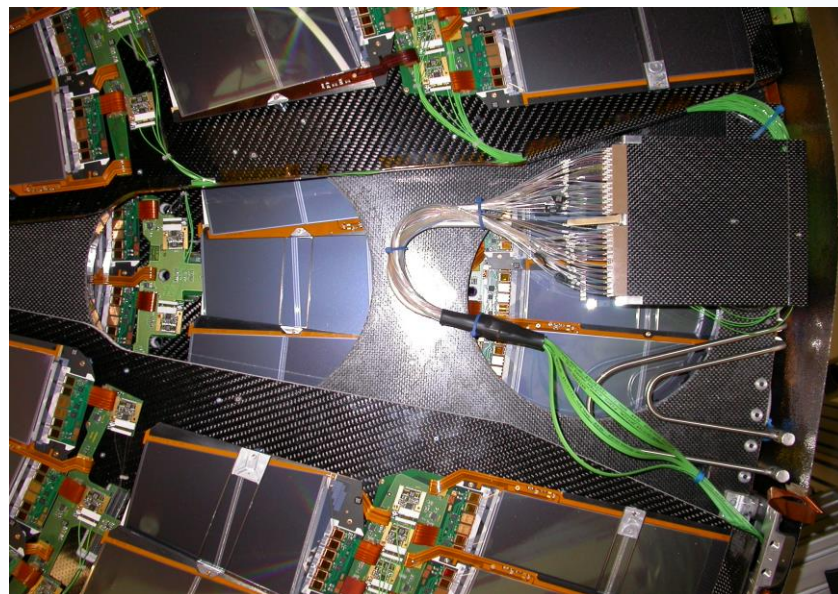
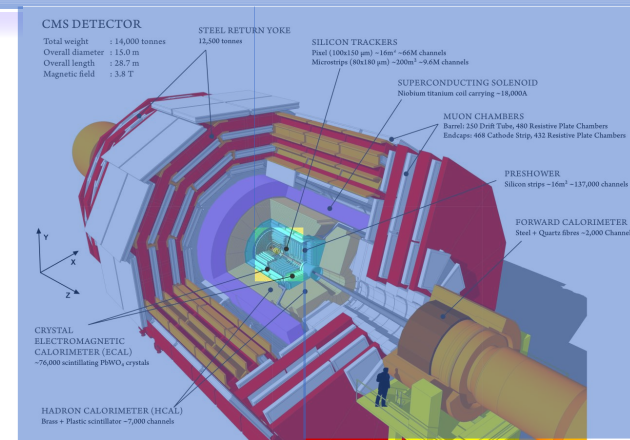
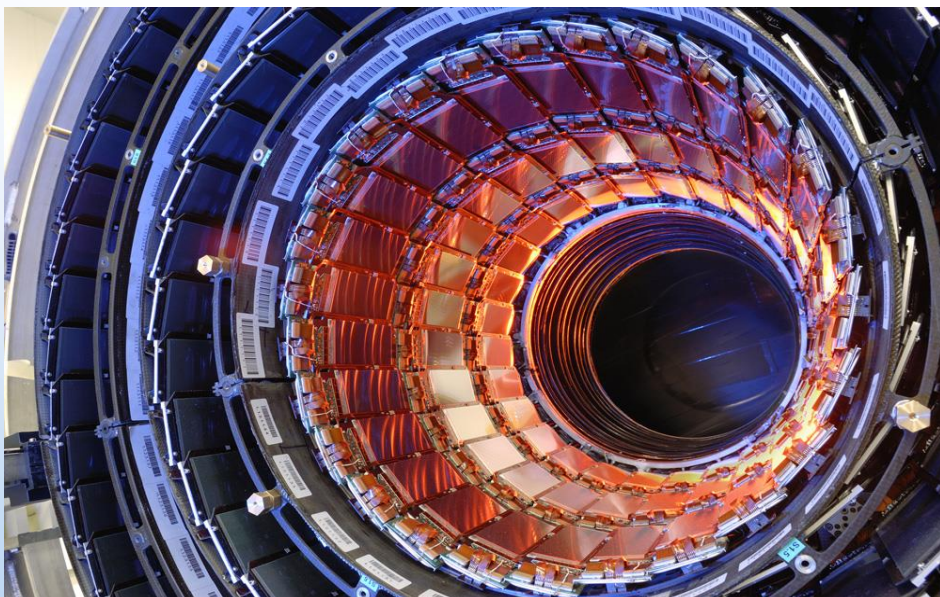


- 💬 Plusieurs couches successives
- 💬 ⇒ Reconstruction de la trajectoire de la particule chargée

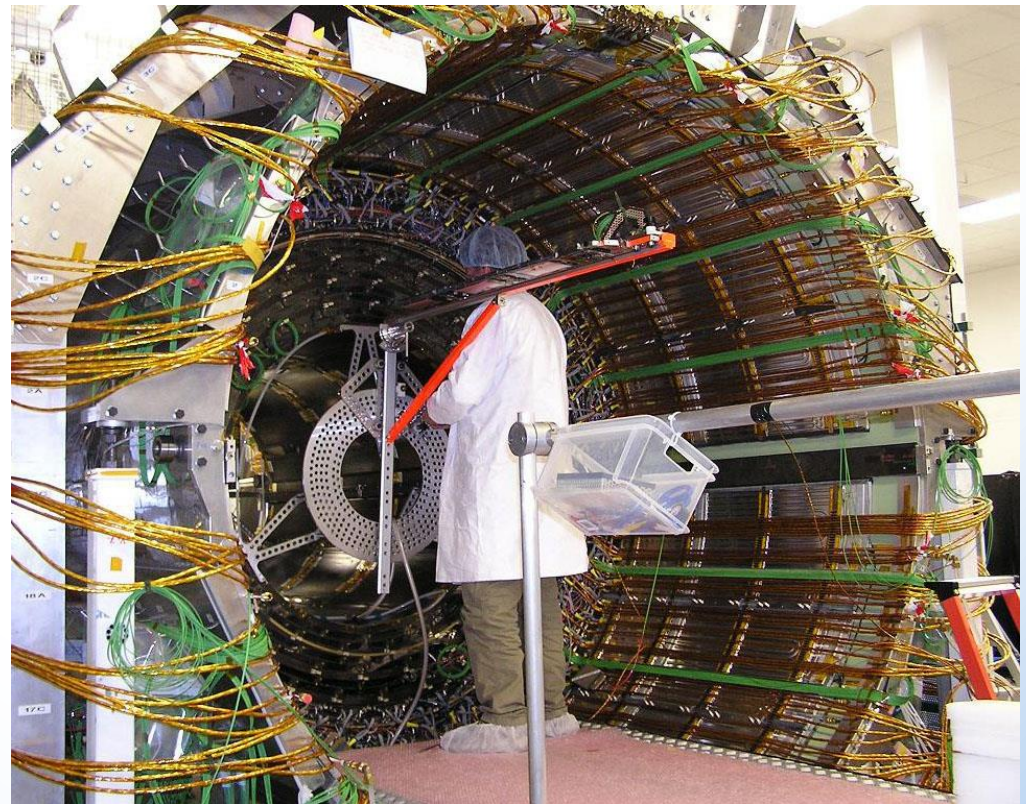
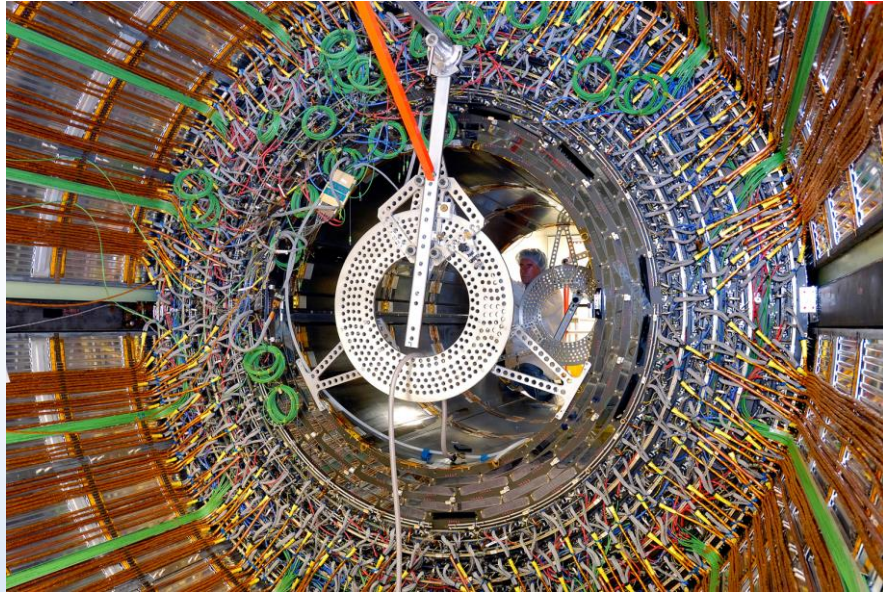
# Trajectographe

## ⚓ Trajectographe en silicium (200 m<sup>2</sup>)

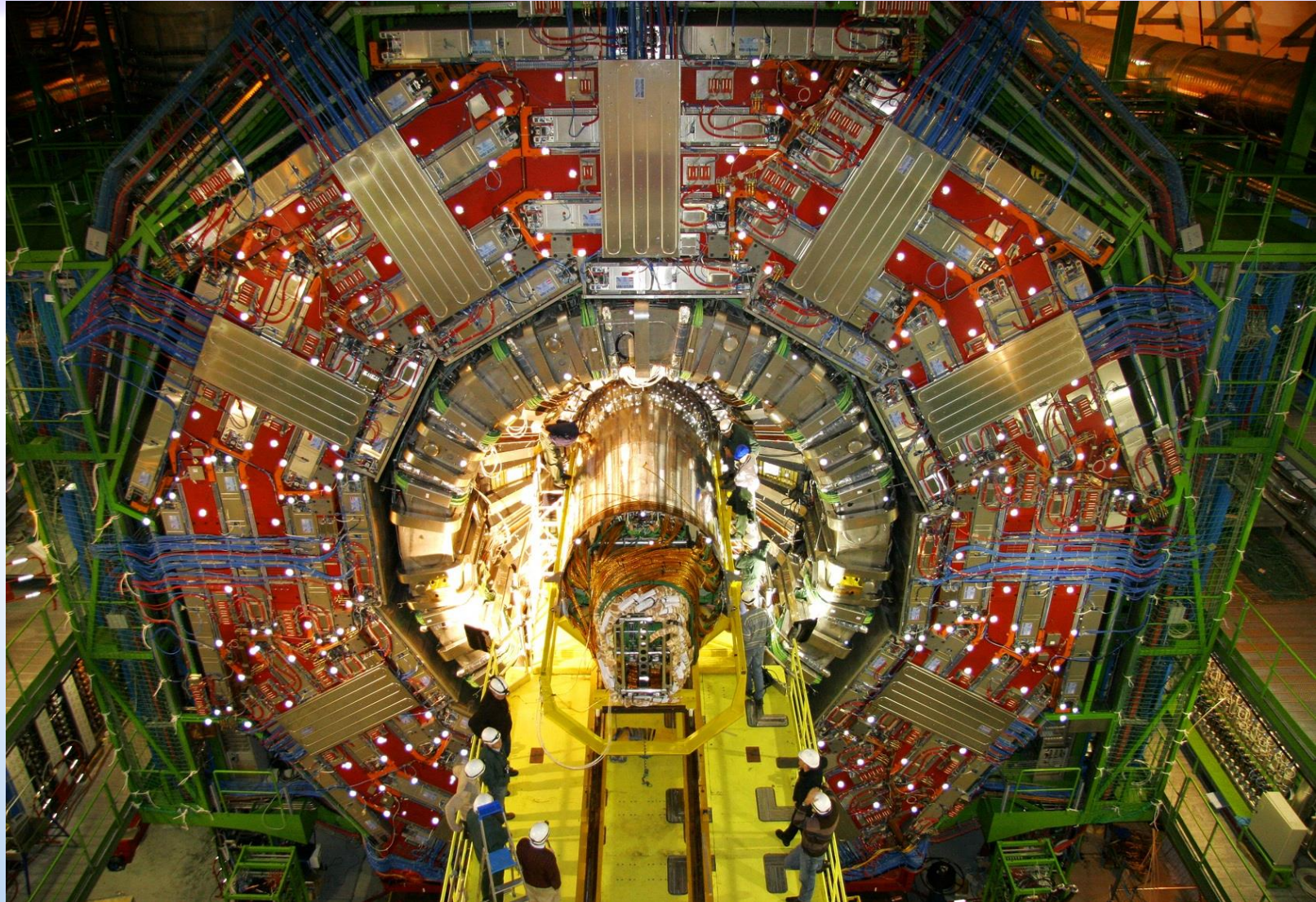
- 🗨️ Au plus près des collisions
- 🗨️ Dans champ magnétique intense 3.8 Tesla
- 🗨️ > 70 Millions de canaux



# Trajectographe



# Insertion du trajectographe



# Calorimètre électromagnétique

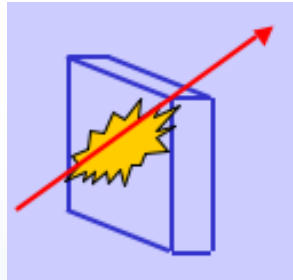
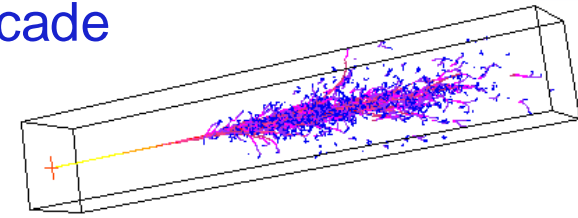
⚓ Particules détectées : électrons (première particule élémentaire découverte) et photons

⚓ Principe de détection

💬 Matériaux très denses : déclenchement d'une cascade électromagnétique (électrons et photons)

💬 Scintillateurs :

- Atomes excités → émission de lumière
- Récupération de la lumière → mesure de l'énergie récoltée par le scintillateur

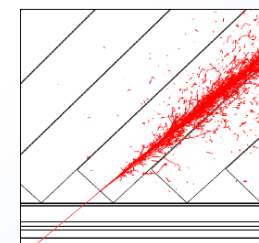
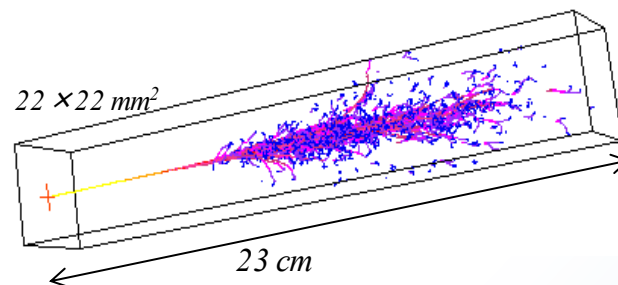
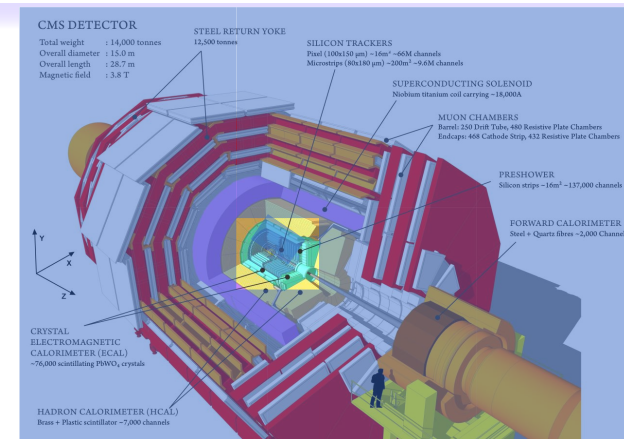


💬 Perte totale d'énergie de l'électron ou du photon dans le calorimètre électromagnétique :  
mesure par l'énergie récoltée de l'énergie de la particule incidente

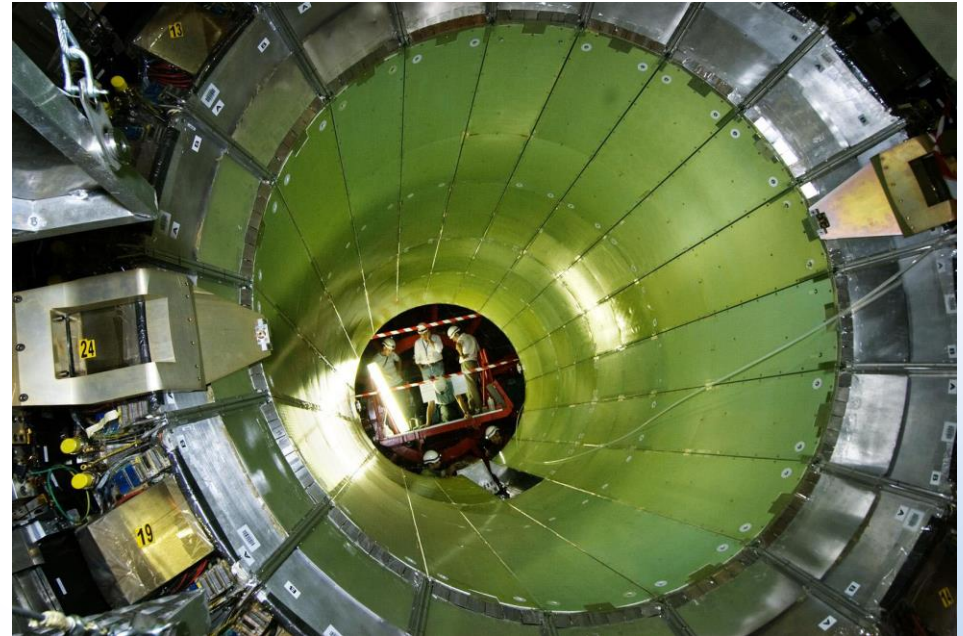
# Calorimètre électromagnétique

## Détection des électrons et photons

- Cristaux scintillants de tungstate de plomb ( $\text{PbWO}_4$ ) 75848



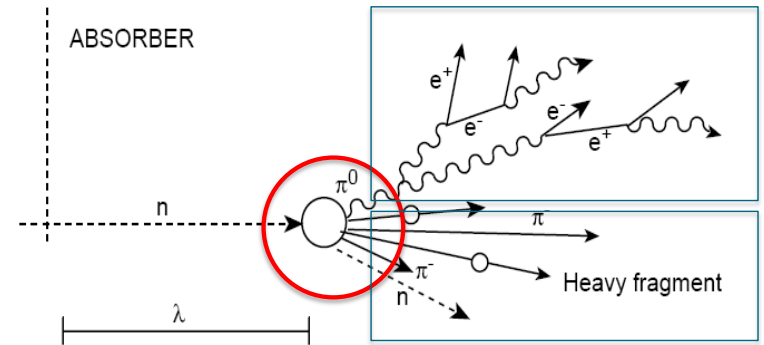
# Calorimètre électromagnétique





# Calorimètre hadronique

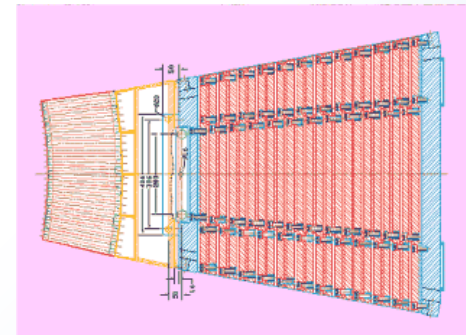
- ⚓ Particules détectées : hadrons (pions, neutrons, quarks sous forme de jets...)
- ⚓ Principe de détection



## 🗨 Couches successives :

- matériaux denses (absorbeurs) qui déclenchent une cascade hadronique
- matériaux de détection (scintillateurs) qui récoltent l'énergie

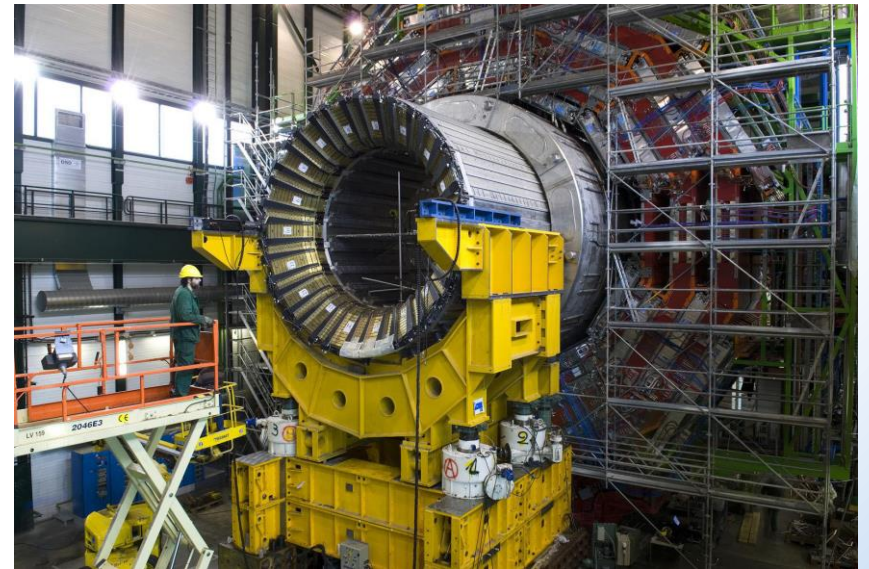
## 🗨 Perte totale d'énergie du hadron dans le calorimètre hadronique : mesure par l'énergie récoltée de l'énergie de la particule incidente



# Calorimètre hadronique



# Calorimètre hadronique

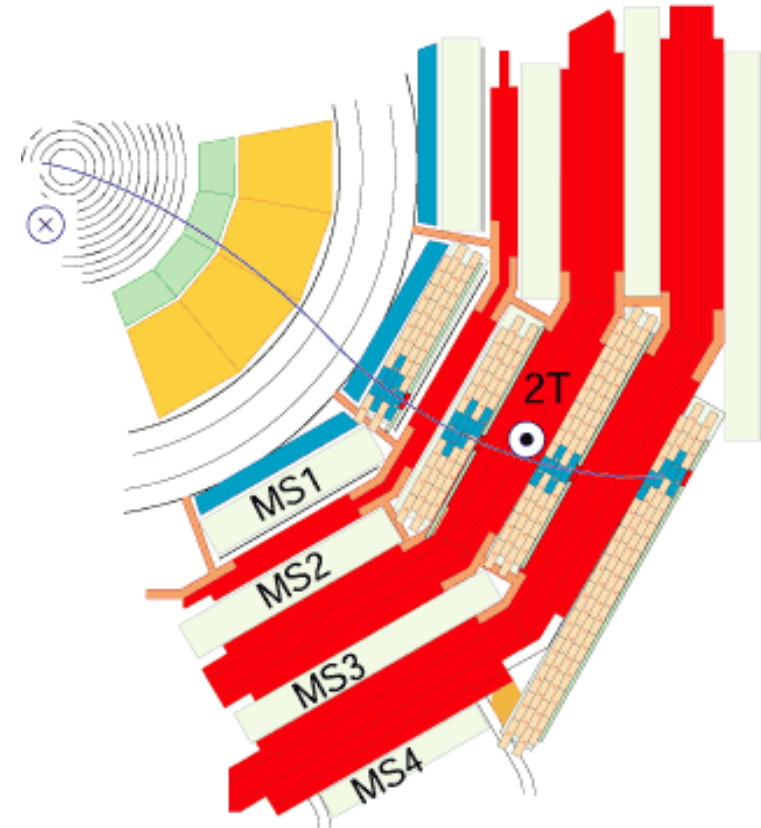


# Détecteurs à muons

⚓ Particules détectées : muons

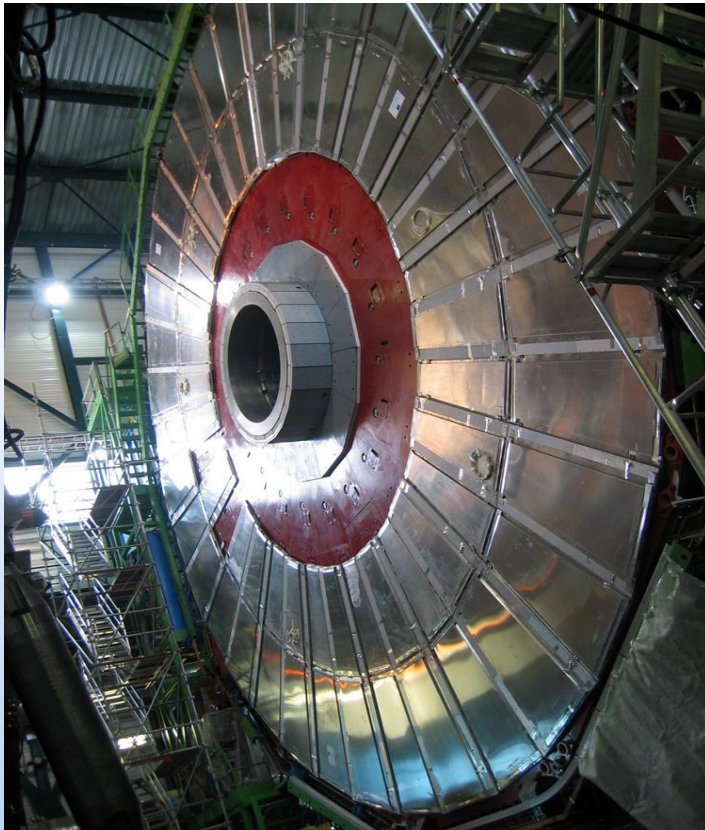
⚓ Principe de détection

- 💬 Plusieurs stations qui calculent la trajectoire par ionisation
- 💬 Champ magnétique de 2 Tesla au milieu des stations → trajectoires courbées, calcul de la quantité de mouvement
- 💬 Muons interagissent peu : non stoppés par le détecteur → détecteurs à muons à l'extérieur des autres sous-détecteurs
- 💬 Association avec info trajectographe

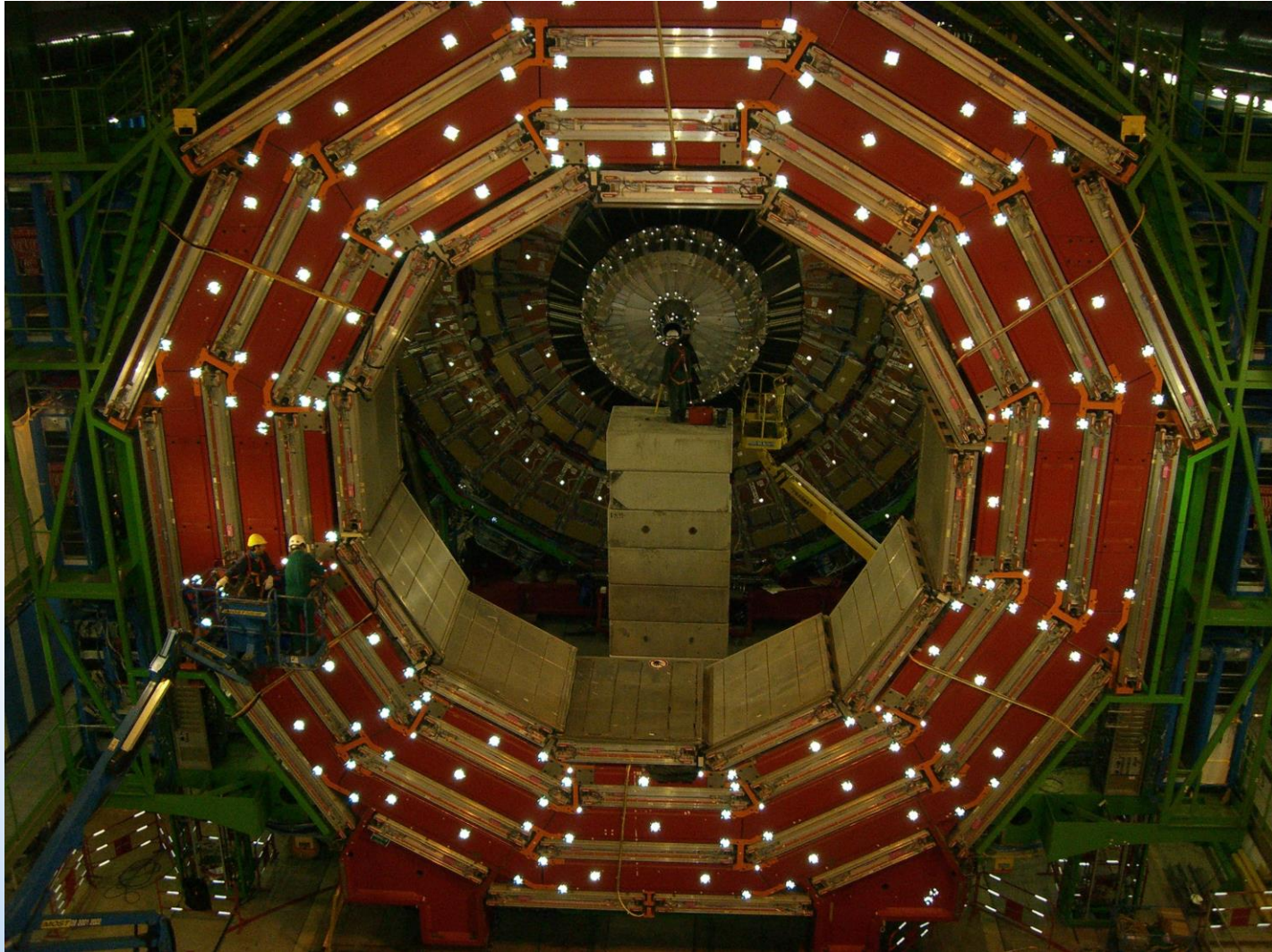


# Détecteurs à muons

⚓ Particules détectées : muons



# Détecteurs à muons

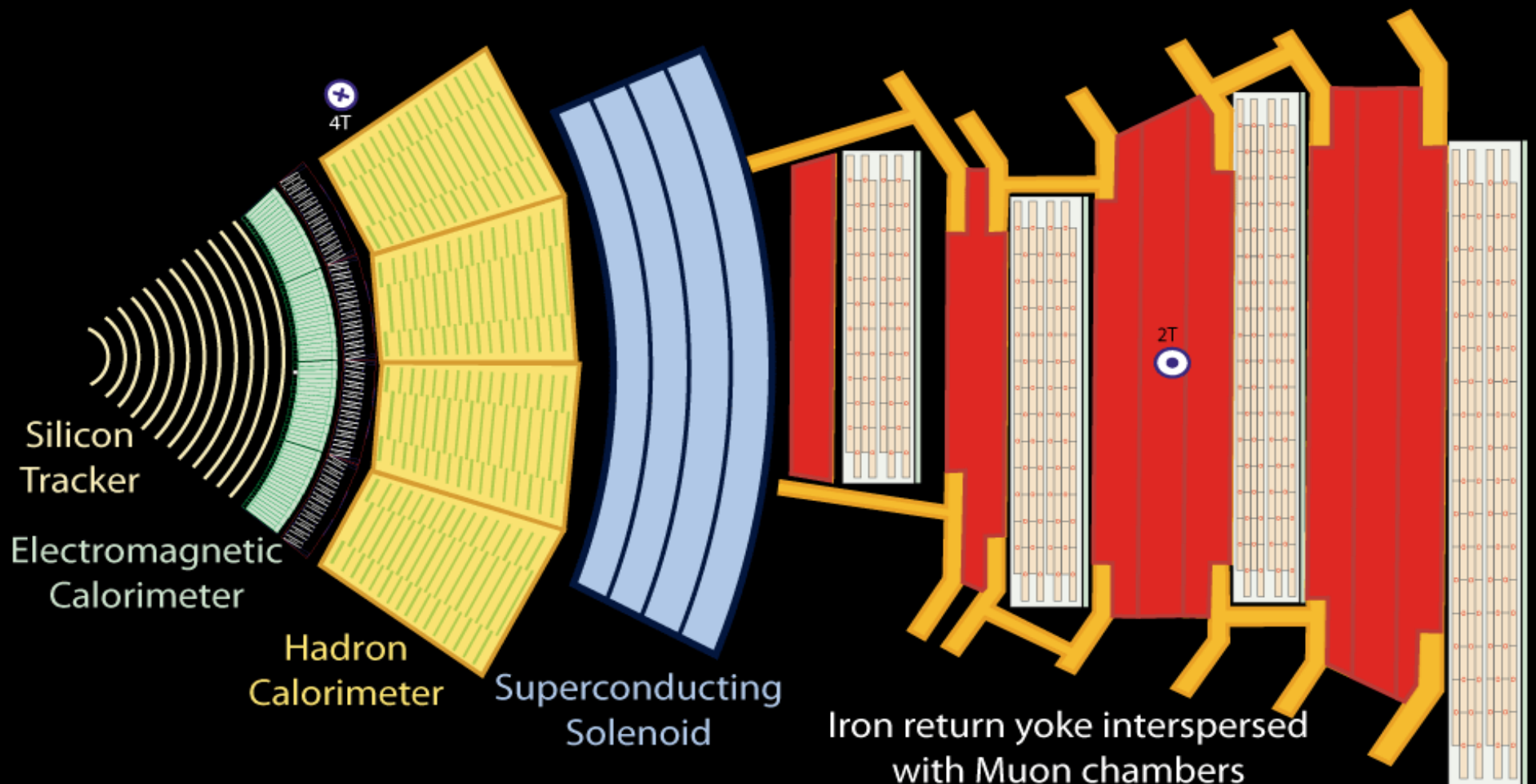


# CMS en fonctionnement



## ➤ Prise de données

- Nov-déc 2009 : 900 GeV et 2.46 TeV
- 2010 - 2011 : 7 TeV
- 2012 : 8 TeV
- 2015 : 13 TeV
- 2016 : 13 TeV
- 2017 : 13 TeV
- 2018 : 13 TeV
- 2022 : 13.6 TeV
- 2023: ...

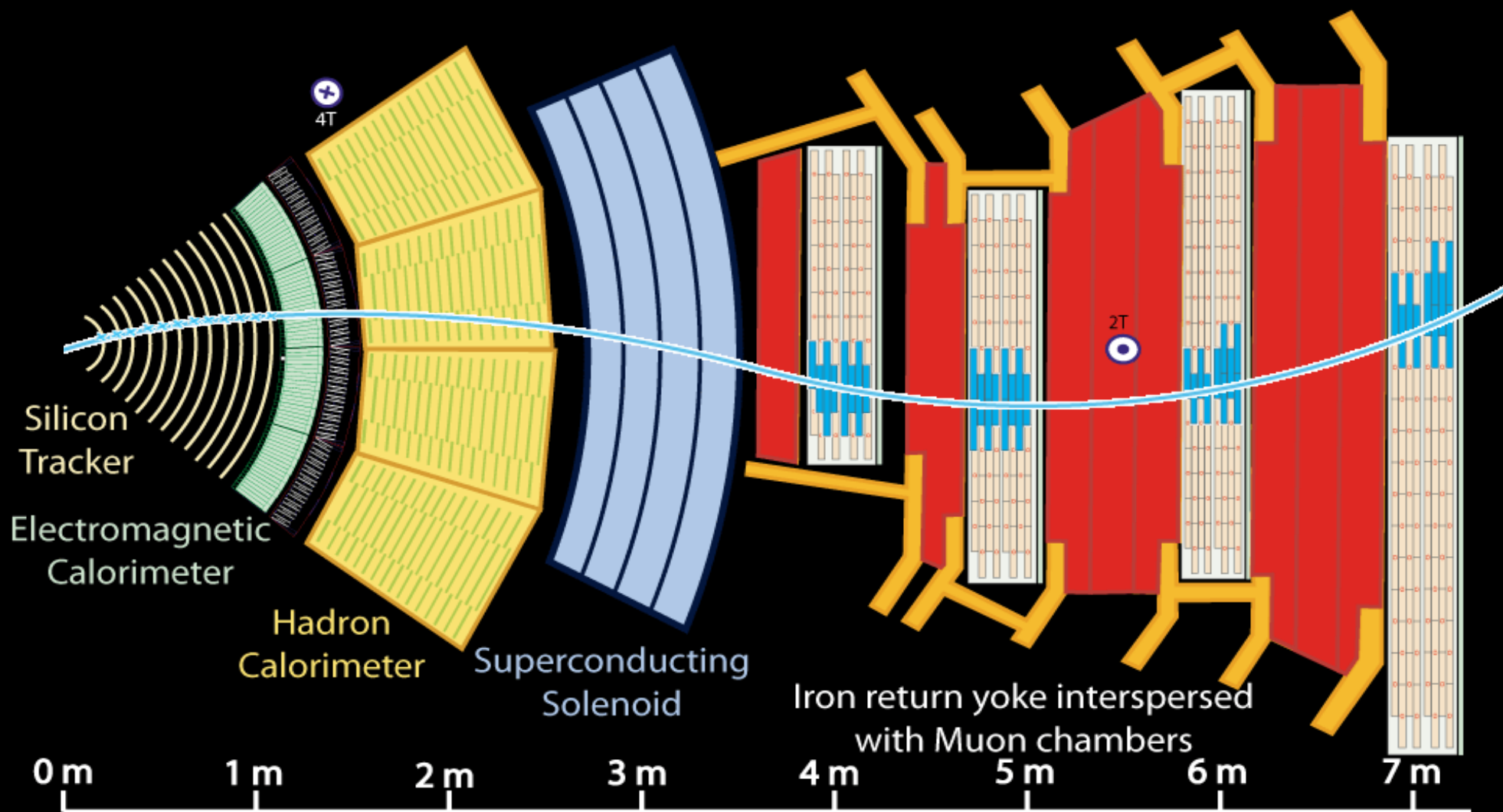


0 m    1 m    2 m    3 m    4 m    5 m    6 m    7 m

Key:

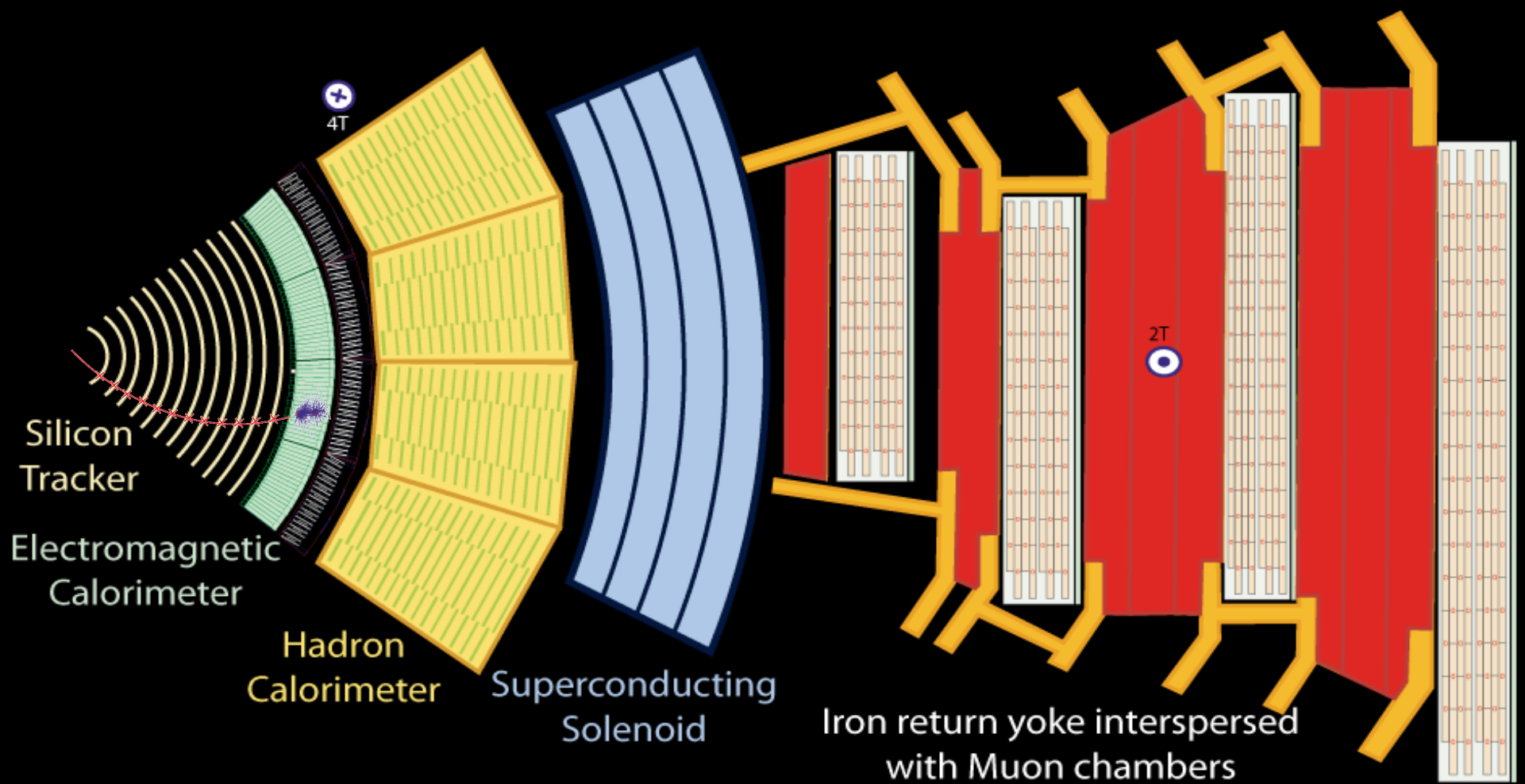
- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon





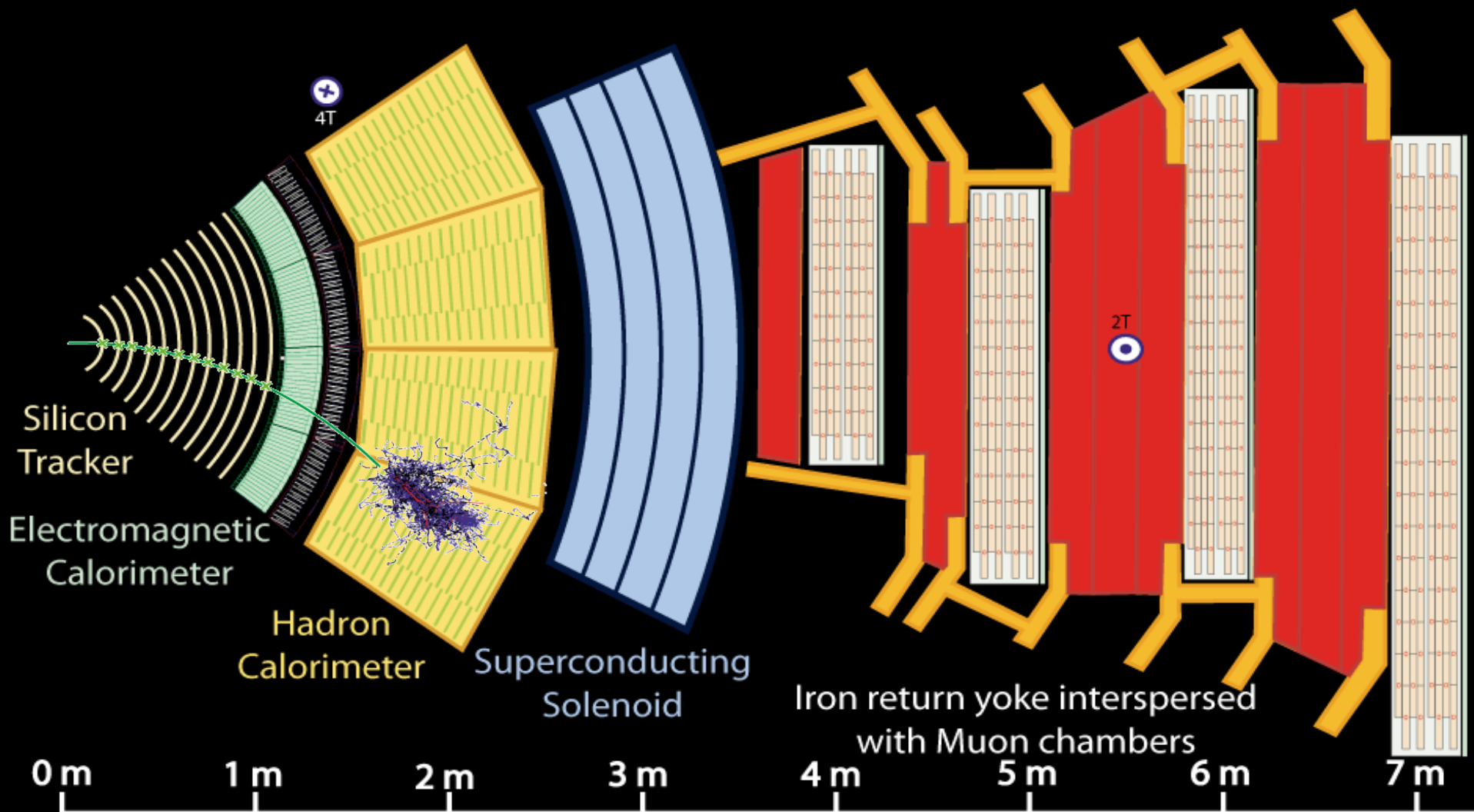
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

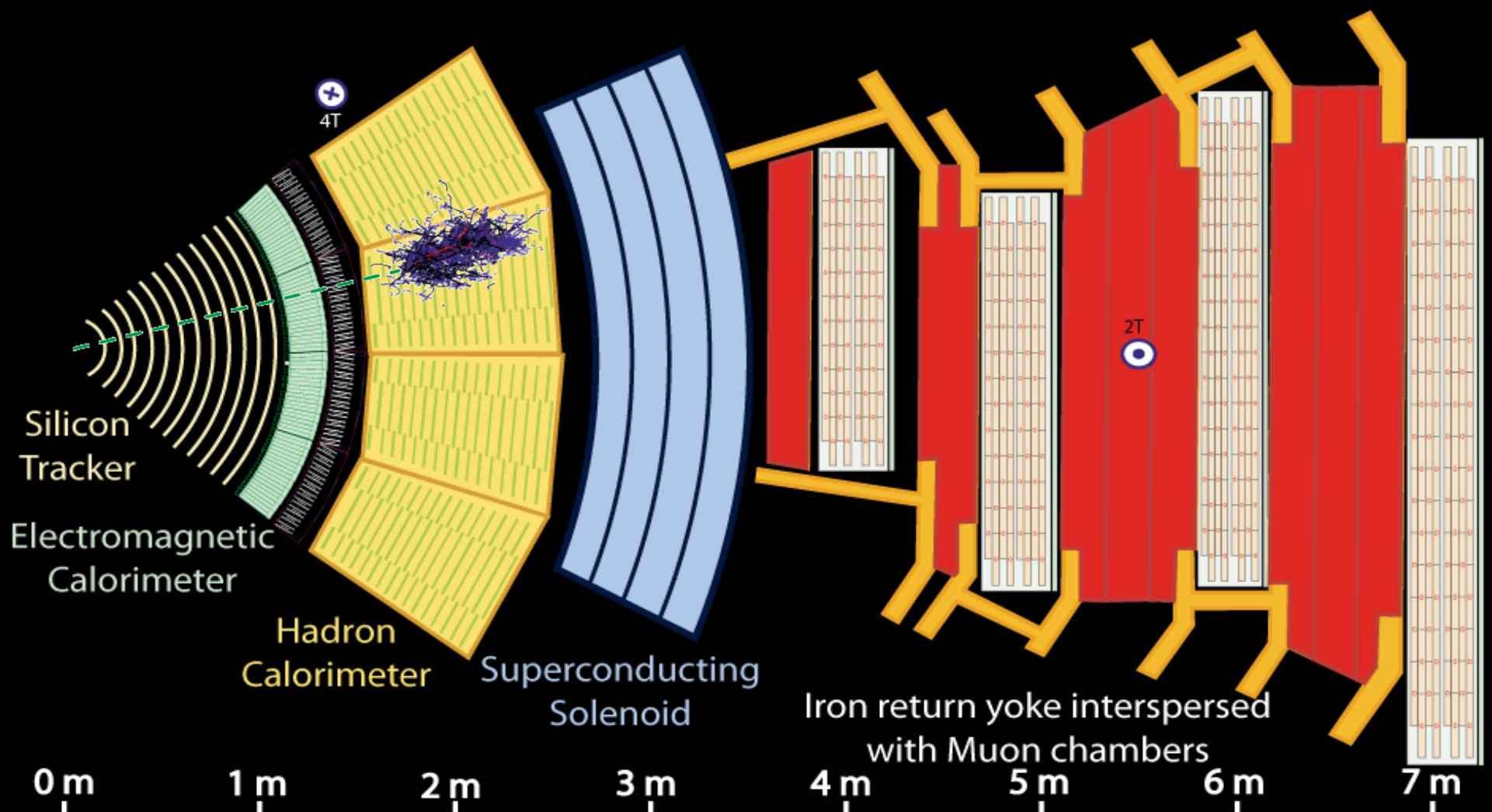
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

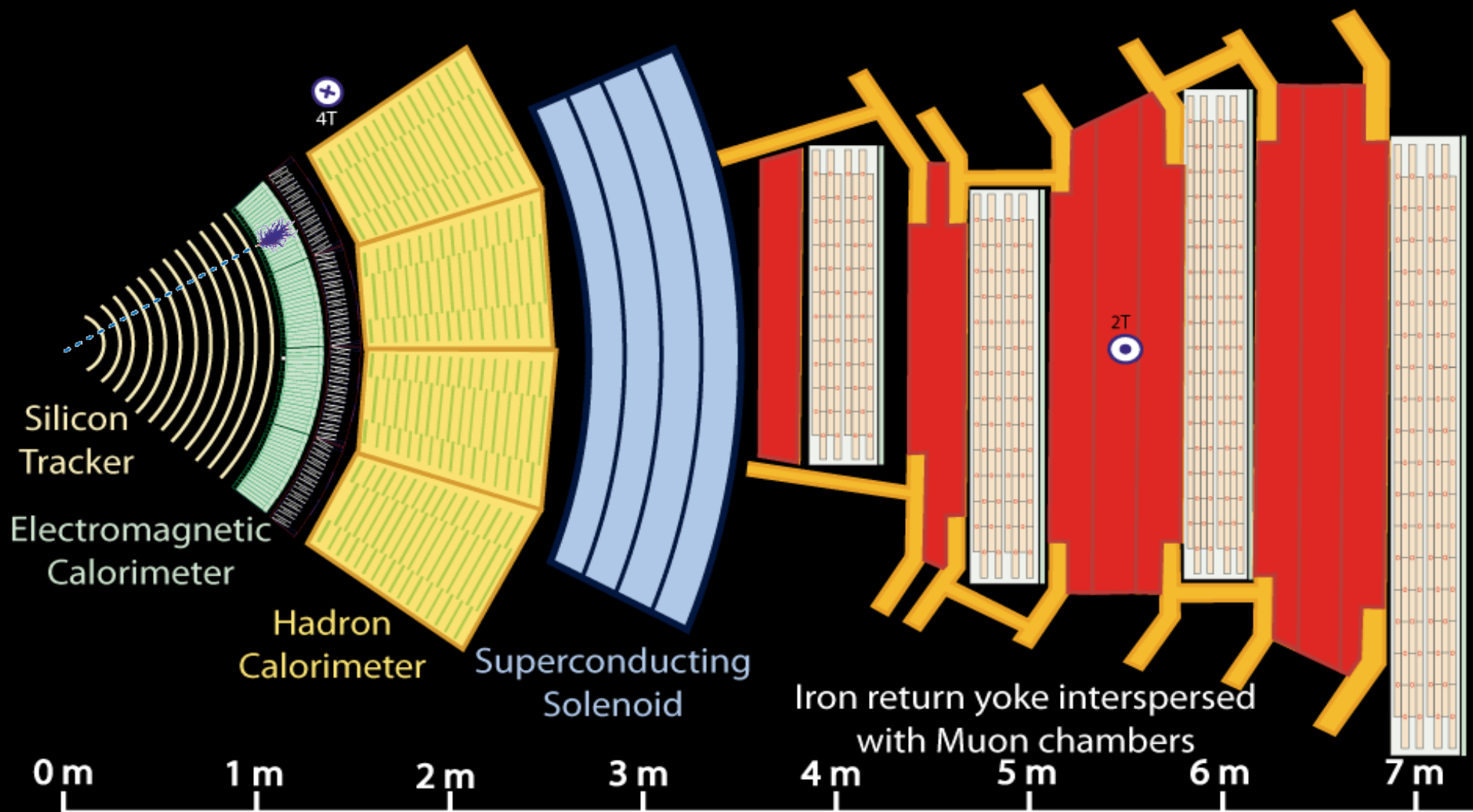
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

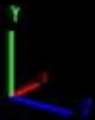
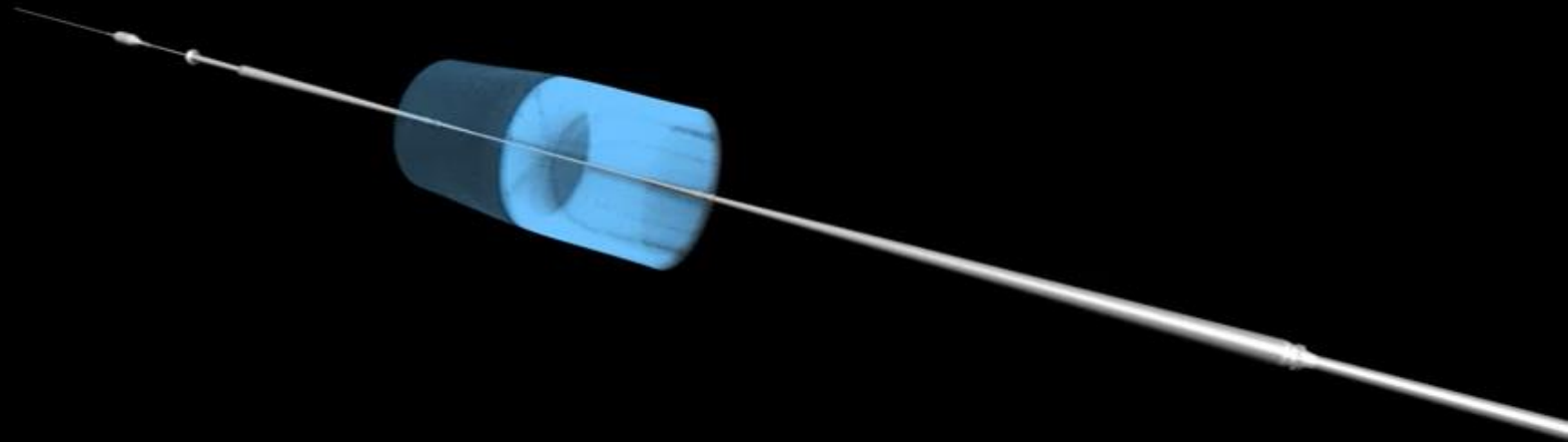
# Une collision typique au LHC



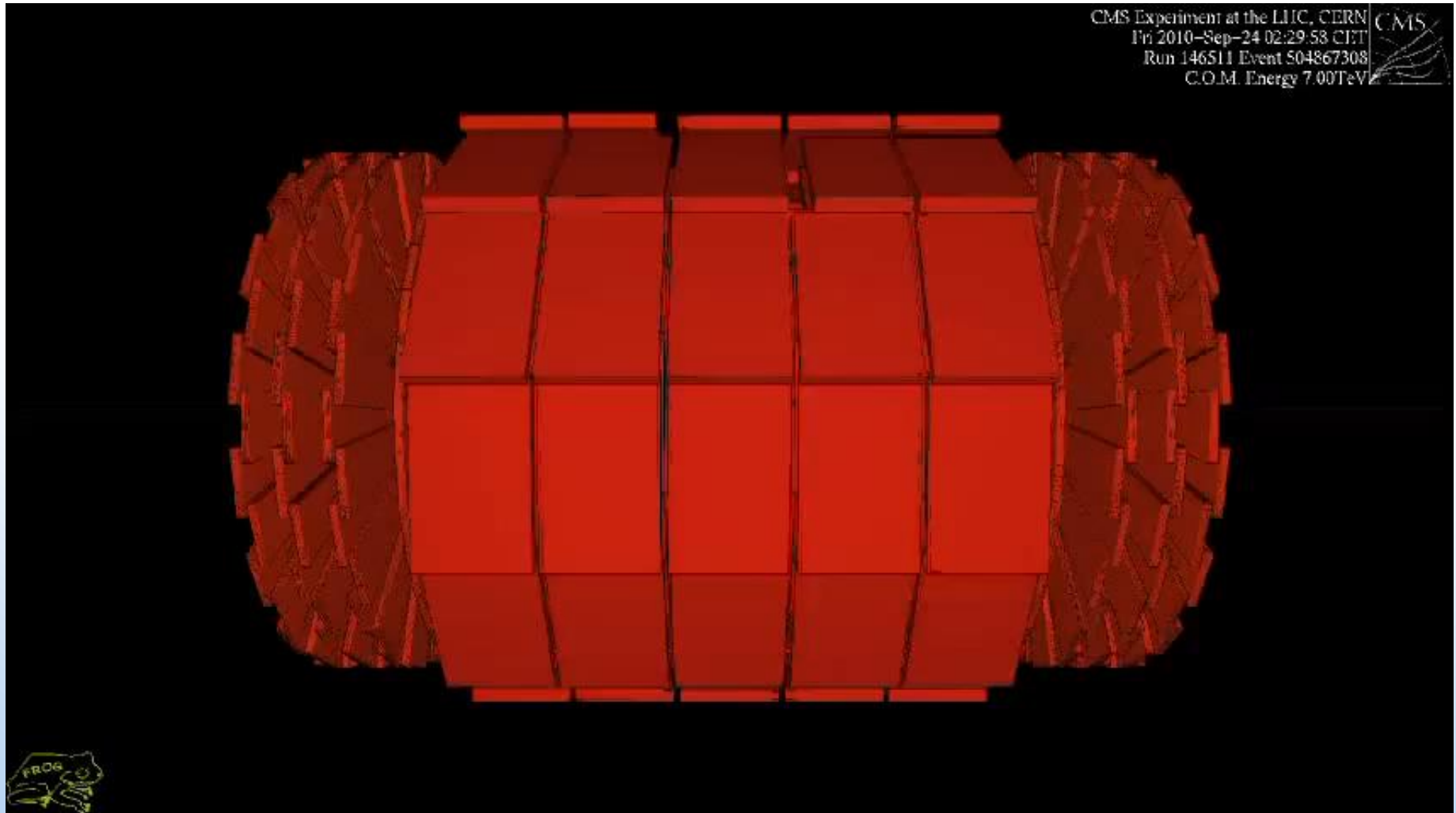
CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2015-Jun-03 08:48:32.279552 GMT

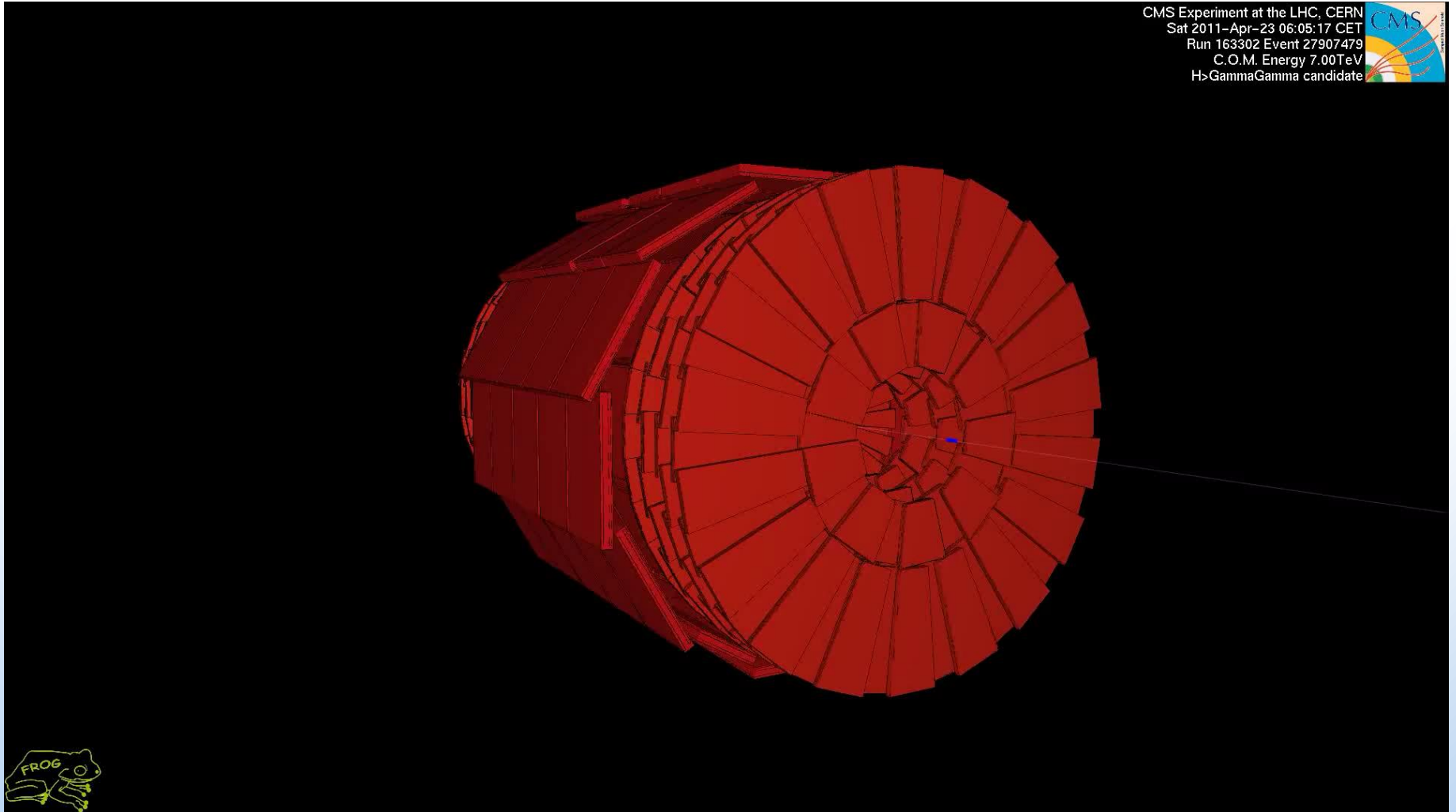
Run / Event / LS: 246908 / 77874559 / 86



$ZZ \rightarrow 4\mu$



# Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

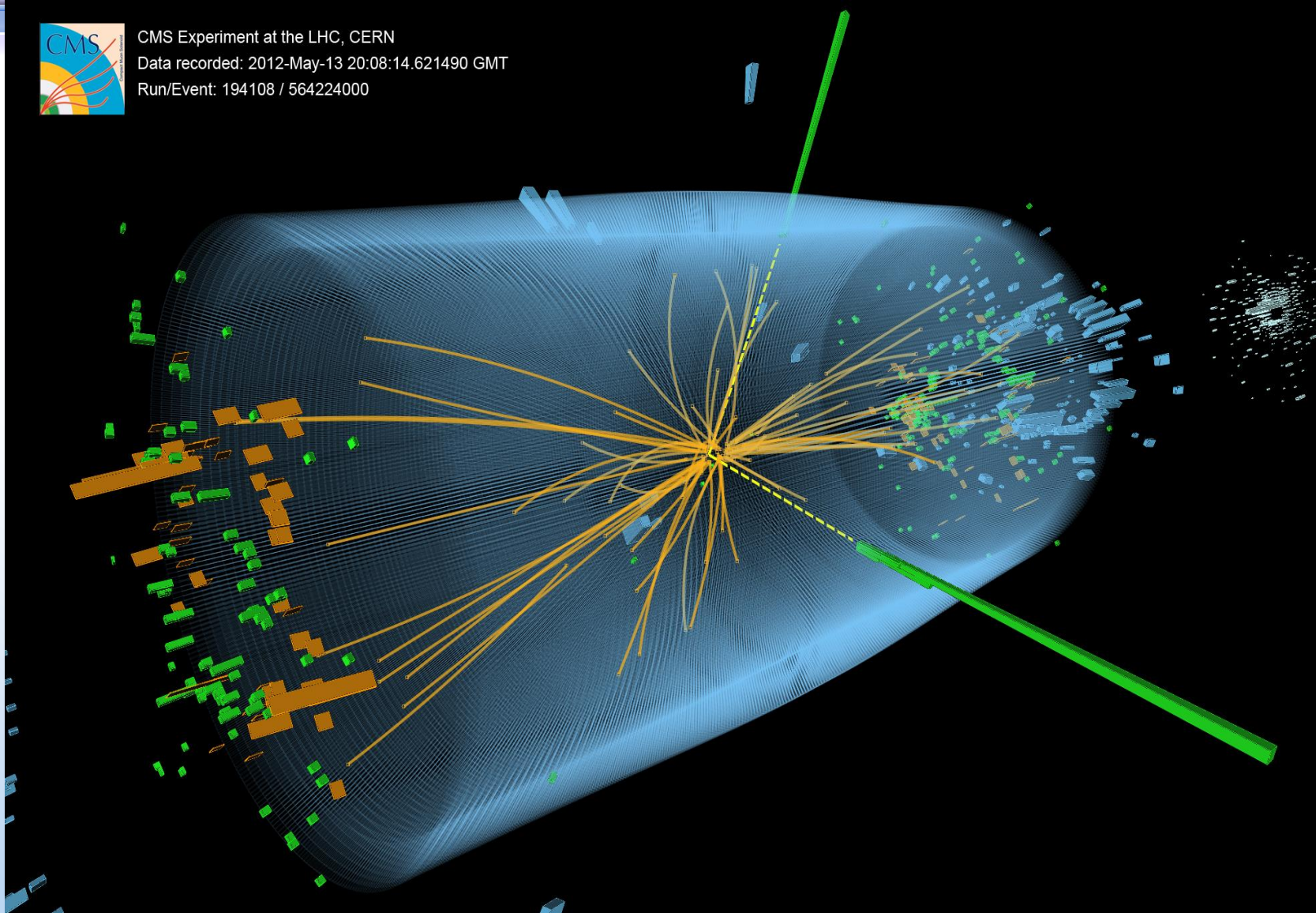




# Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$



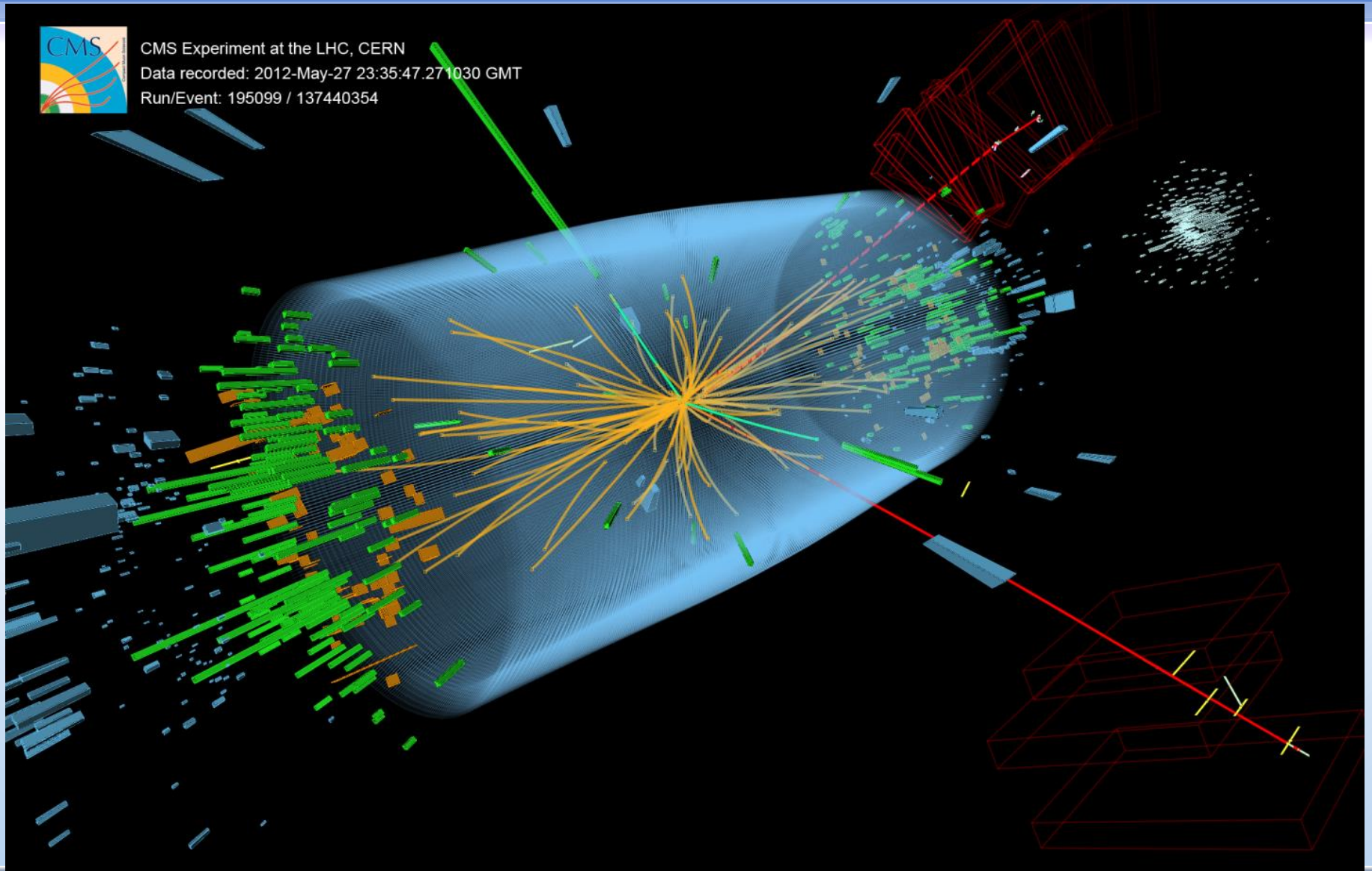
CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000



# Candidat $H \rightarrow 2e2\mu$



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT  
Run/Event: 195099 / 137440354



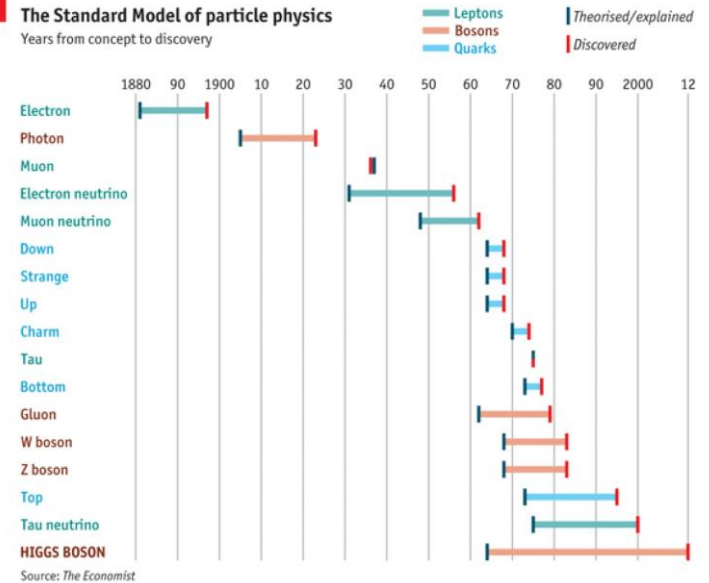
# Boson de Higgs

1964 : Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

- donner masse aux autres particules
- **Boson de Higgs**
- Masse paramètre libre du modèle standard
  - Contraintes théoriques:  $\lesssim 1 \text{ TeV}$

The Standard Model of particle physics

Years from concept to discovery

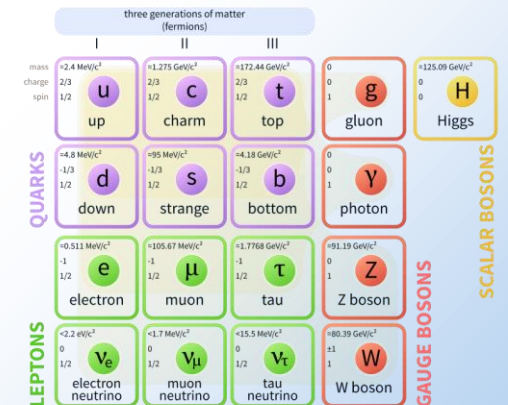


2012 : Découverte d'un nouveau boson

2015 : Boson de Higgs du modèle standard

$$m_H = 125.09 \pm 0.24 (\pm 0.21 \text{ (stat.)} \pm 0.11 \text{ (syst.)}) \text{ GeV}$$

Standard Model of Elementary Particles



# Des événements rares



@ 125 GeV

~1 Higgs produits / 2 milliard collisions



Chercher une aiguille ...

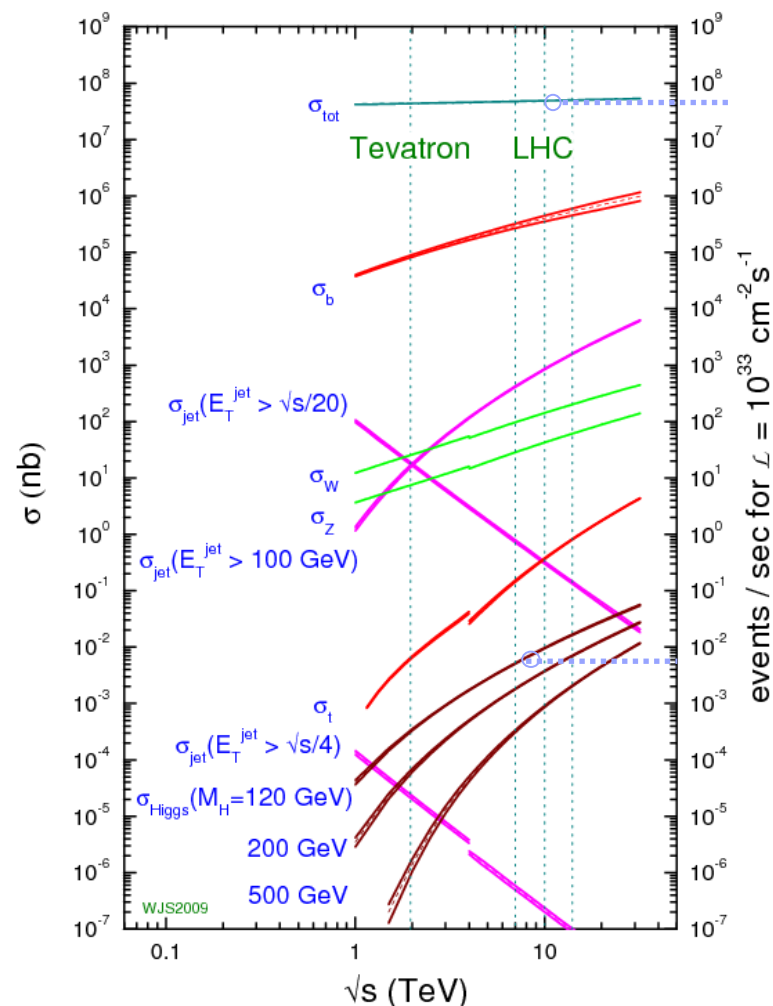
- Parallélépipède rectangle de 1mm × 1mm × 4cm
- dans une botte de foin de ~80 m<sup>3</sup> (~4.3 m de coté)



Importance du système de déclenchement

- Première sélection d'événements

proton - (anti)proton cross sections



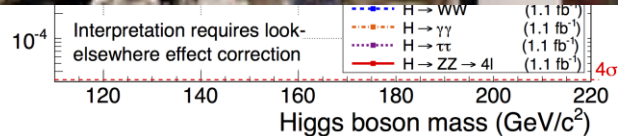
# Découverte du boson de Higgs

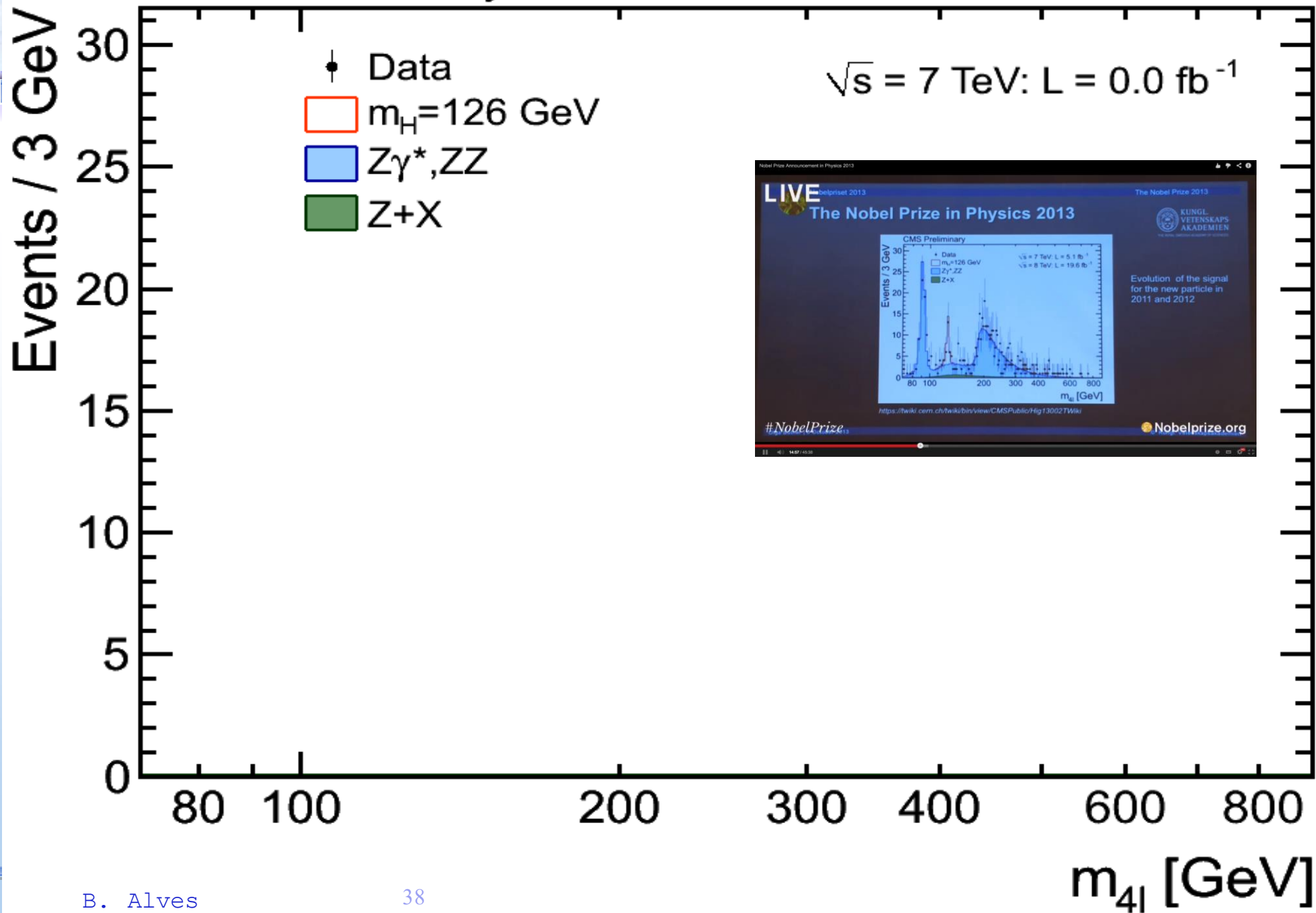
juillet 2011

décembre 2011

4 juillet 2012

Limites sur la section efficace relative au modèle standard

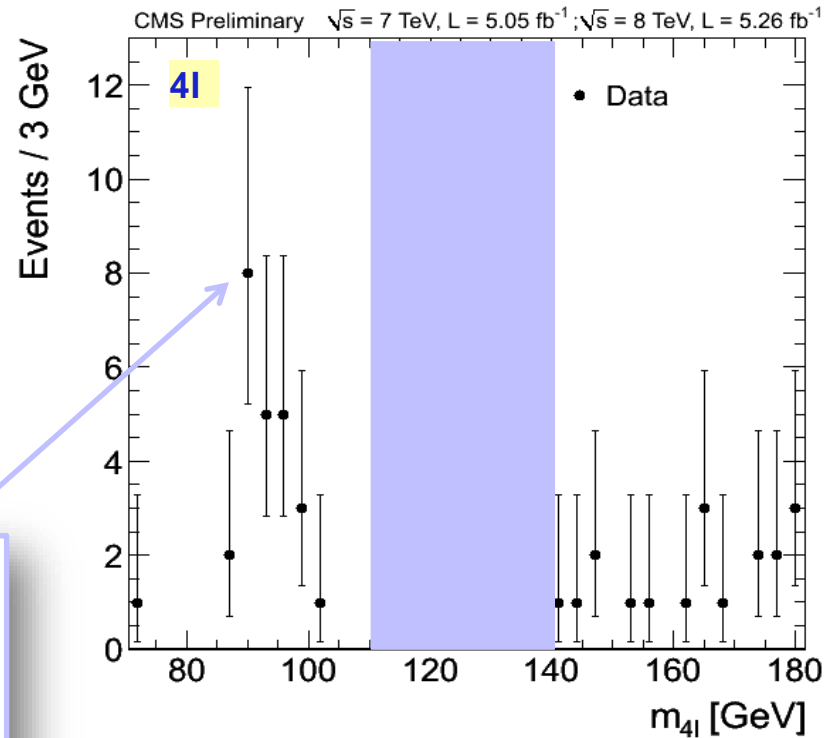
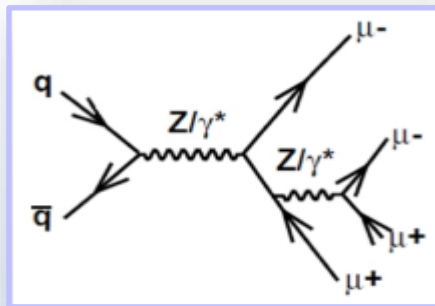




# Observation $H \rightarrow 4l$

## ⚓ Distribution $m_{4l}$

- 🗨️ Zone basse masse
- 🗨️ Données combinées
- 🗨️ *Blinded*
- 🗨️ Avec signal attendu  
 $m_H = 126 \text{ GeV}$



# *Cet après-midi*

Ce sera votre tour !



