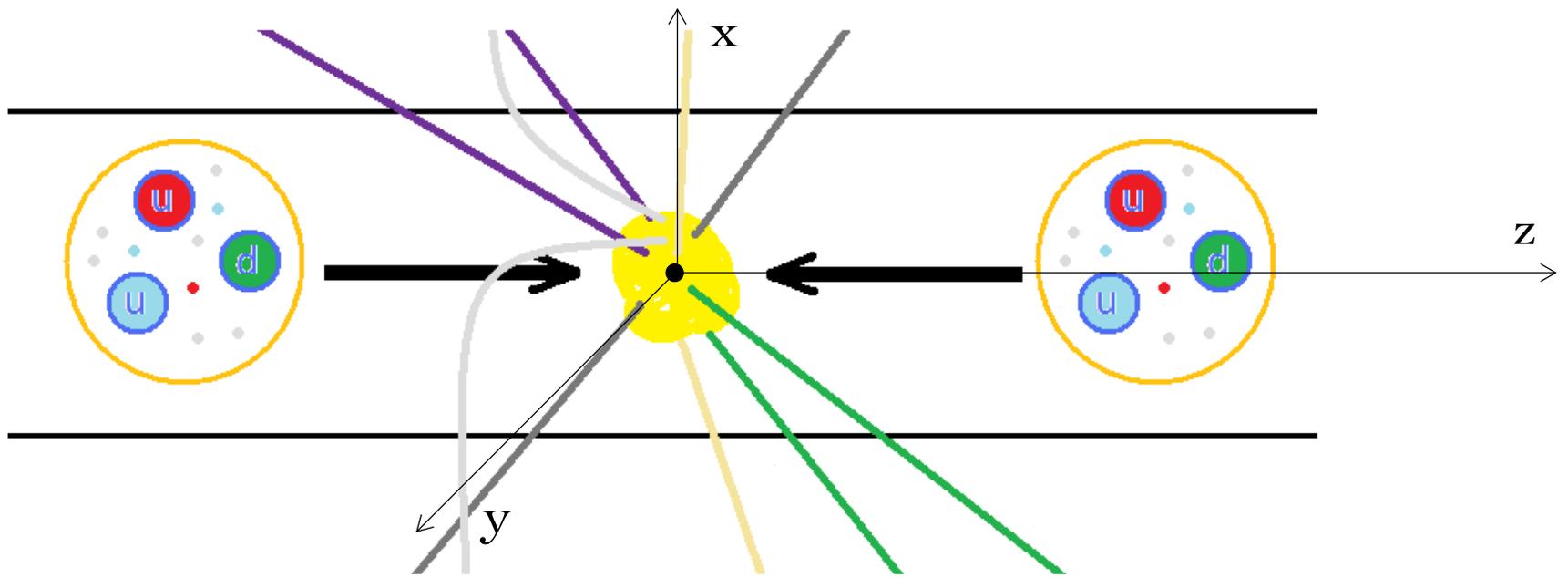


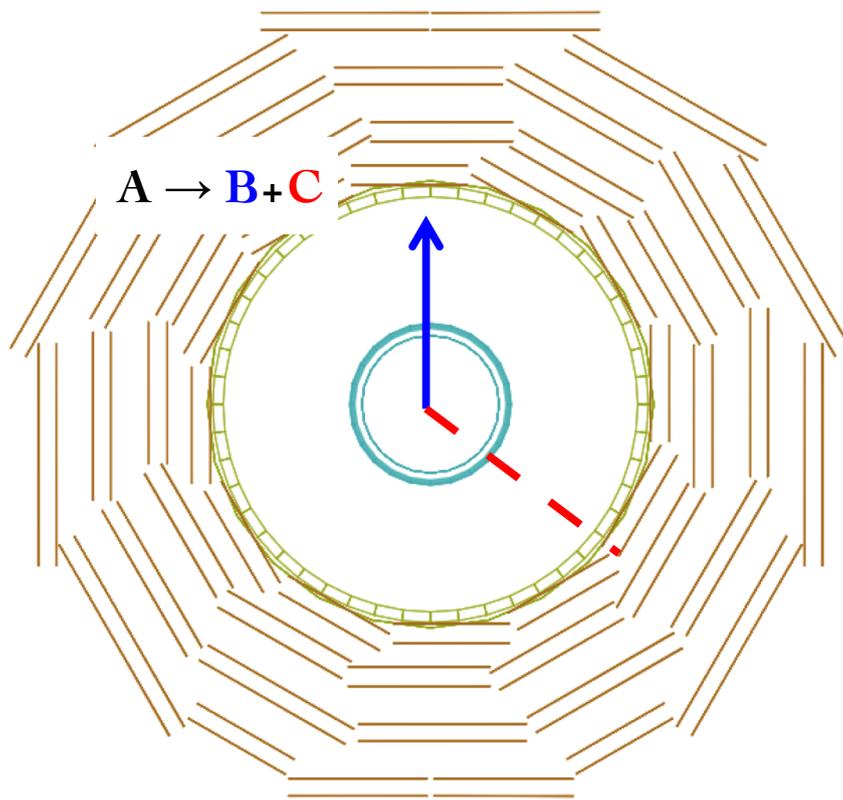
# Les collisions proton-proton

- Les protons de chaque faisceau (depuis 2015) ont une énergie de 6.5 TeV le long de l'axe z. L'énergie de la collision est  $2 \times 6.5 \text{ TeV} = 13 \text{ TeV}$
- Les particules qui constituent le proton ont seulement une fraction de son énergie
- Des nouvelles particules sont créées dans la collision. Ces particules:
  - ont toujours une masse plus petite que l'énergie de la collision
  - se désintègrent très rapidement
  - donnent toujours des produits de désintégrations qui ont une masse inférieure à la leur

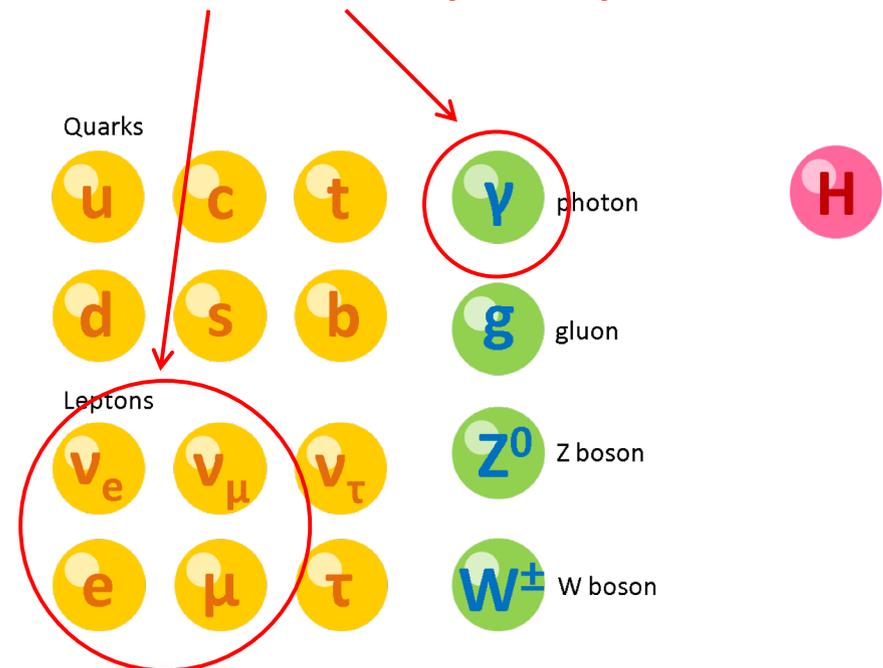


# Les collisions proton-proton

- Les particules créées dans les collisions se désintègrent très rapidement
- Ce n'est jamais la particule qu'on observe directement, mais ses produits de désintégration
- Ces produits sont des particules « ordinaires »



## Particules « ordinaires » pour aujourd'hui



Si on recherche une particule il faut :

- savoir quelles sont ses filles (connaître sa désintégration, modèle)
- chercher à observer ses filles

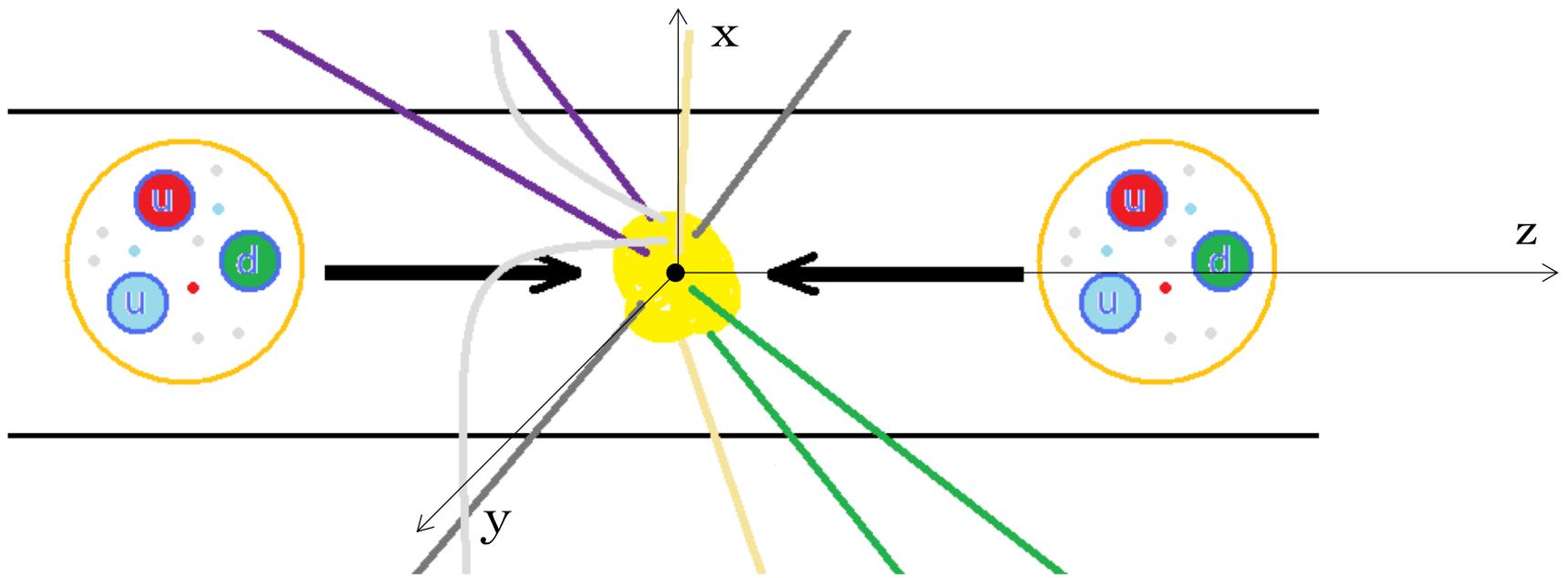
# Les collisions proton-proton

- Des lois de conservation imposent des contraintes sur quelles désintégrations sont possibles
- conservation de la charge électrique :  
la somme des charges électriques des produits de désintégration d'une particule est égale à la charge de la particule de départ
- conservation de l'énergie :

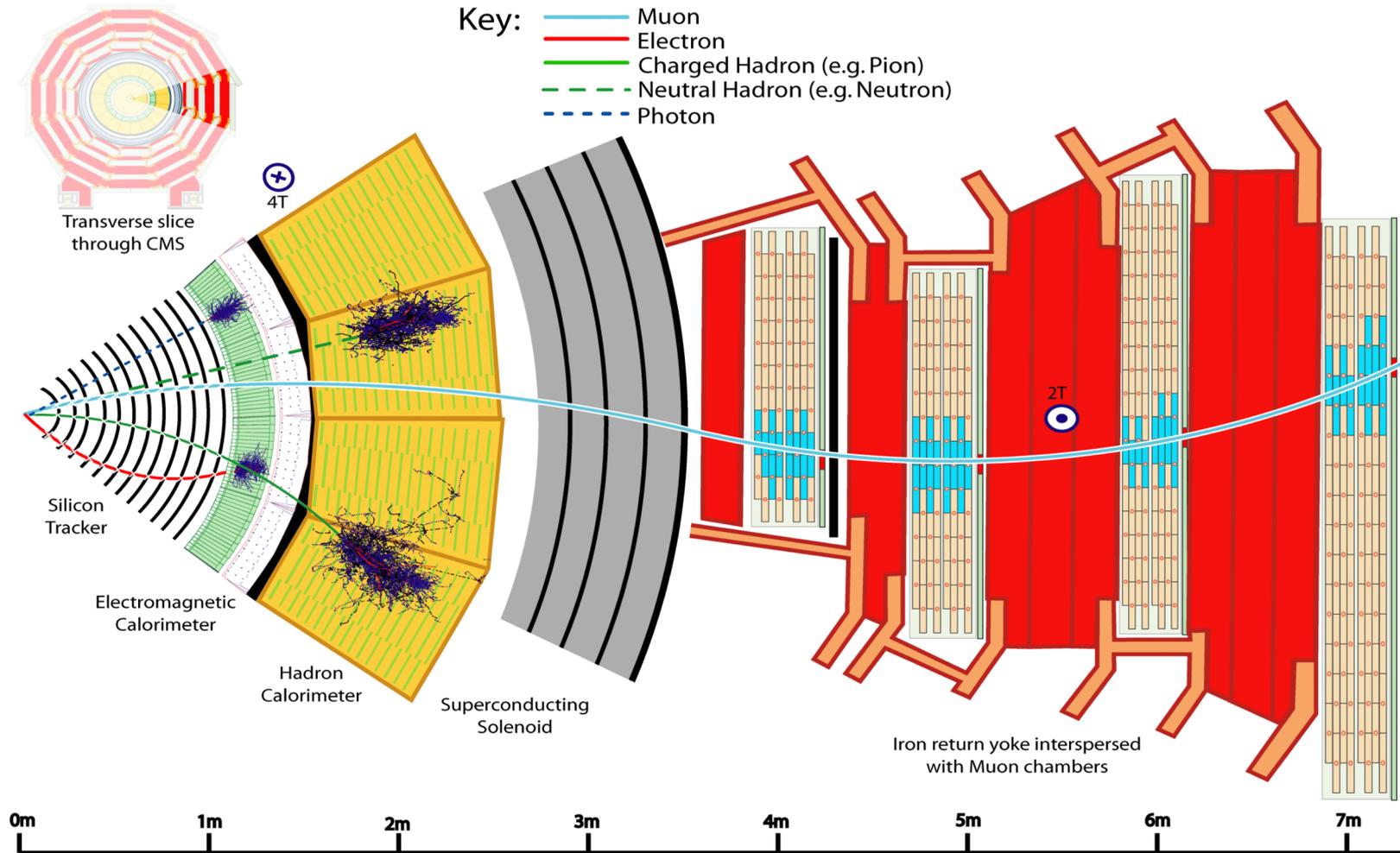
Etat initial, constituants des protons :  
énergie seulement le long de z



Etat final, produits de la collision :  
énergie seulement le long de z, donc  
l'énergie TOTALE dans le plan  
transverse x-y est ZERO

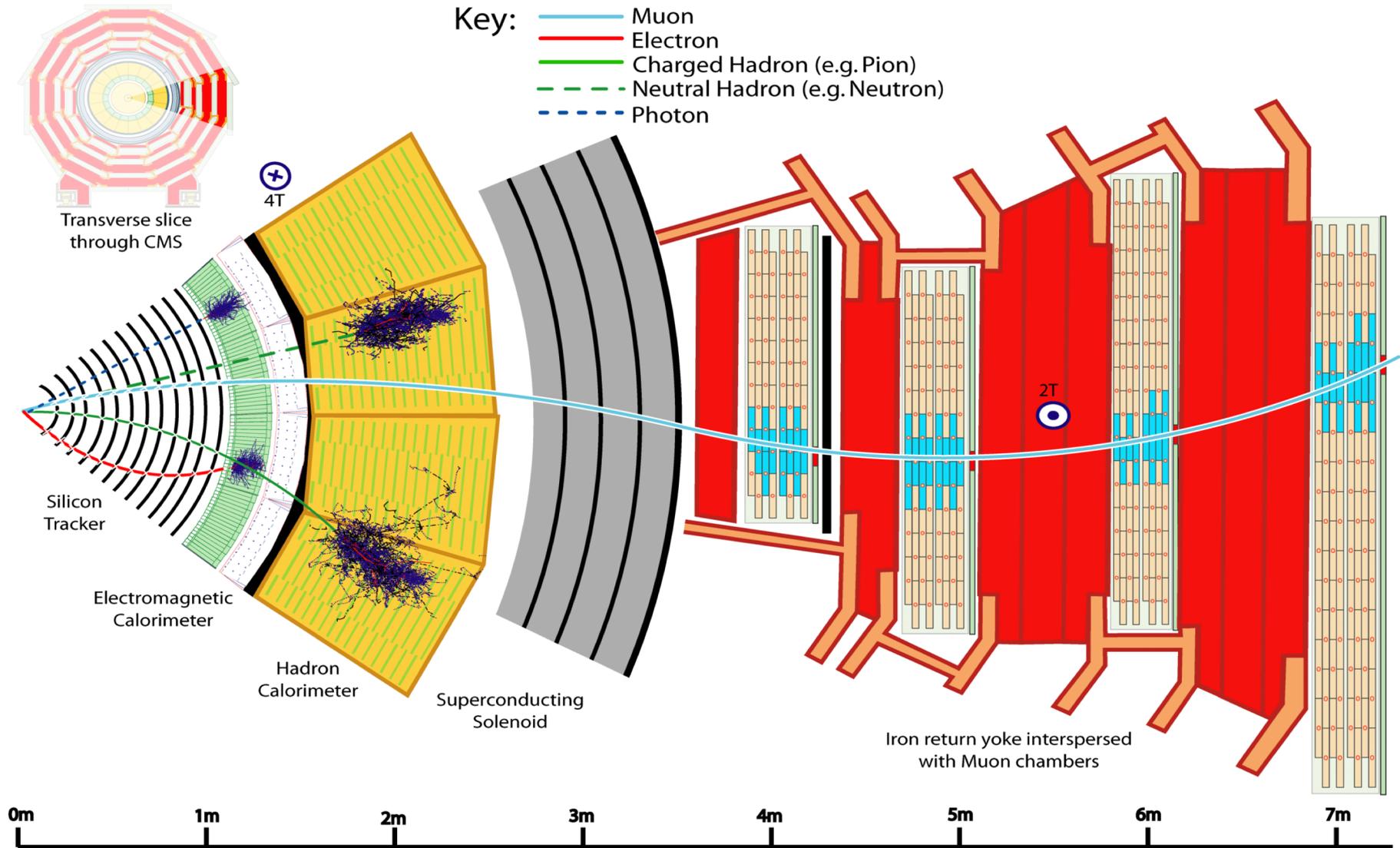


# Le détecteur CMS



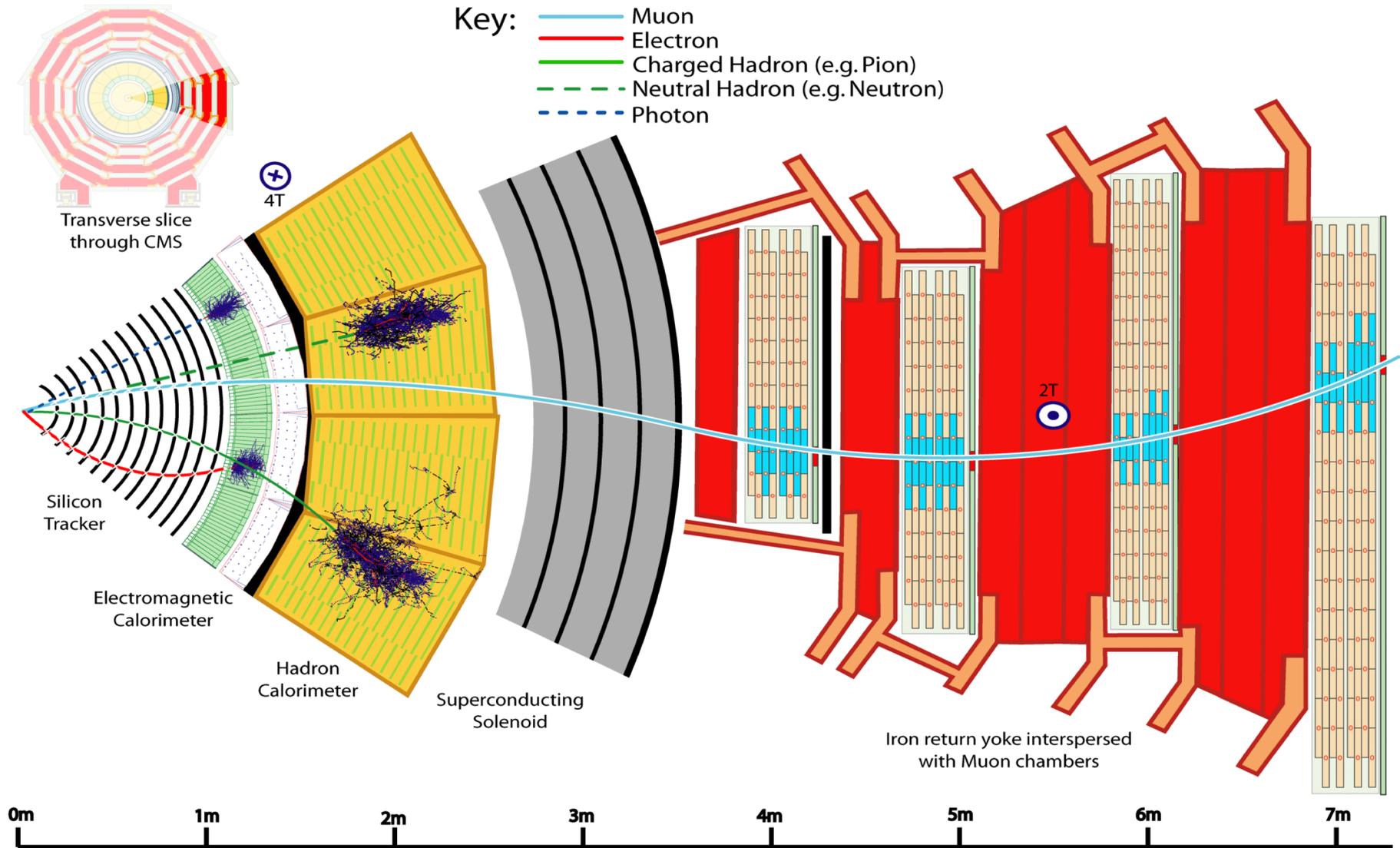
Les collisions produisent des particules au centre du détecteur  
Différents détecteurs sont sensibles à différents types de particules  
La trajectoire d'une particule chargée est courbée dans un champ magnétique

# Signature expérimentale : le muon



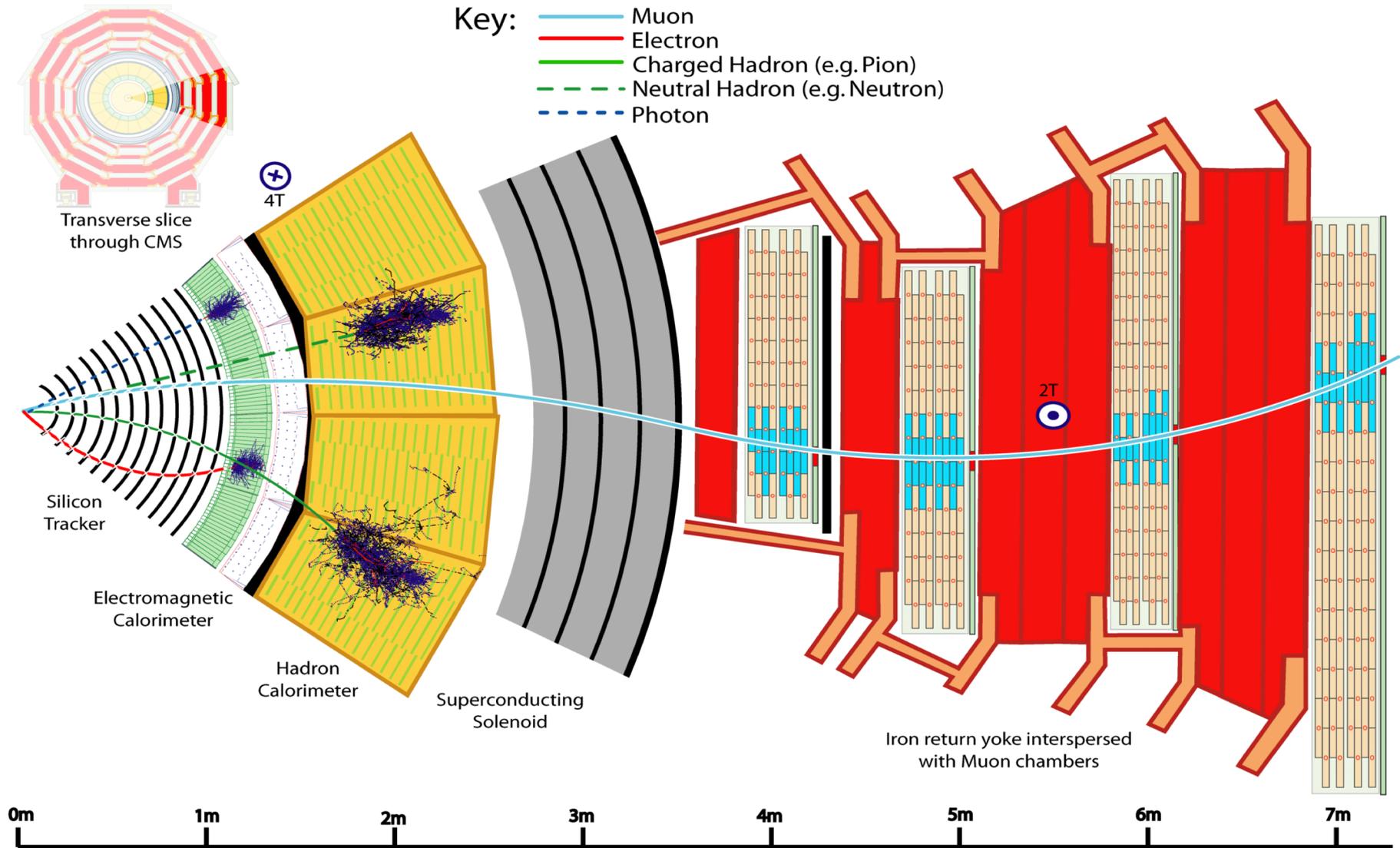
Muon ?

# Signature expérimentale : le muon



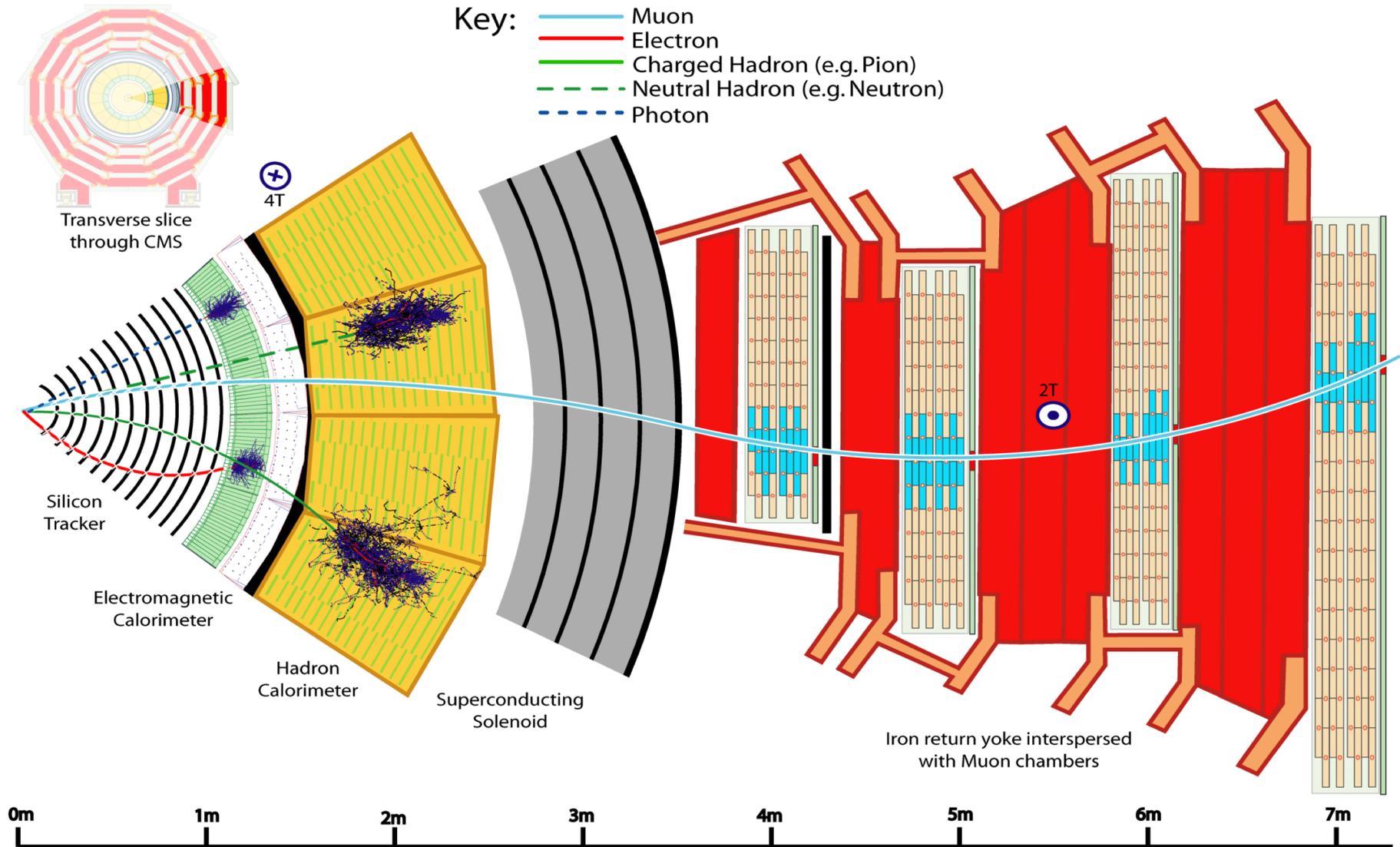
**Muon** : trace dans le trajectographe, peu de dépôt dans les calorimètres, trace dans les chambres à muons

# Signature expérimentale : l'électron



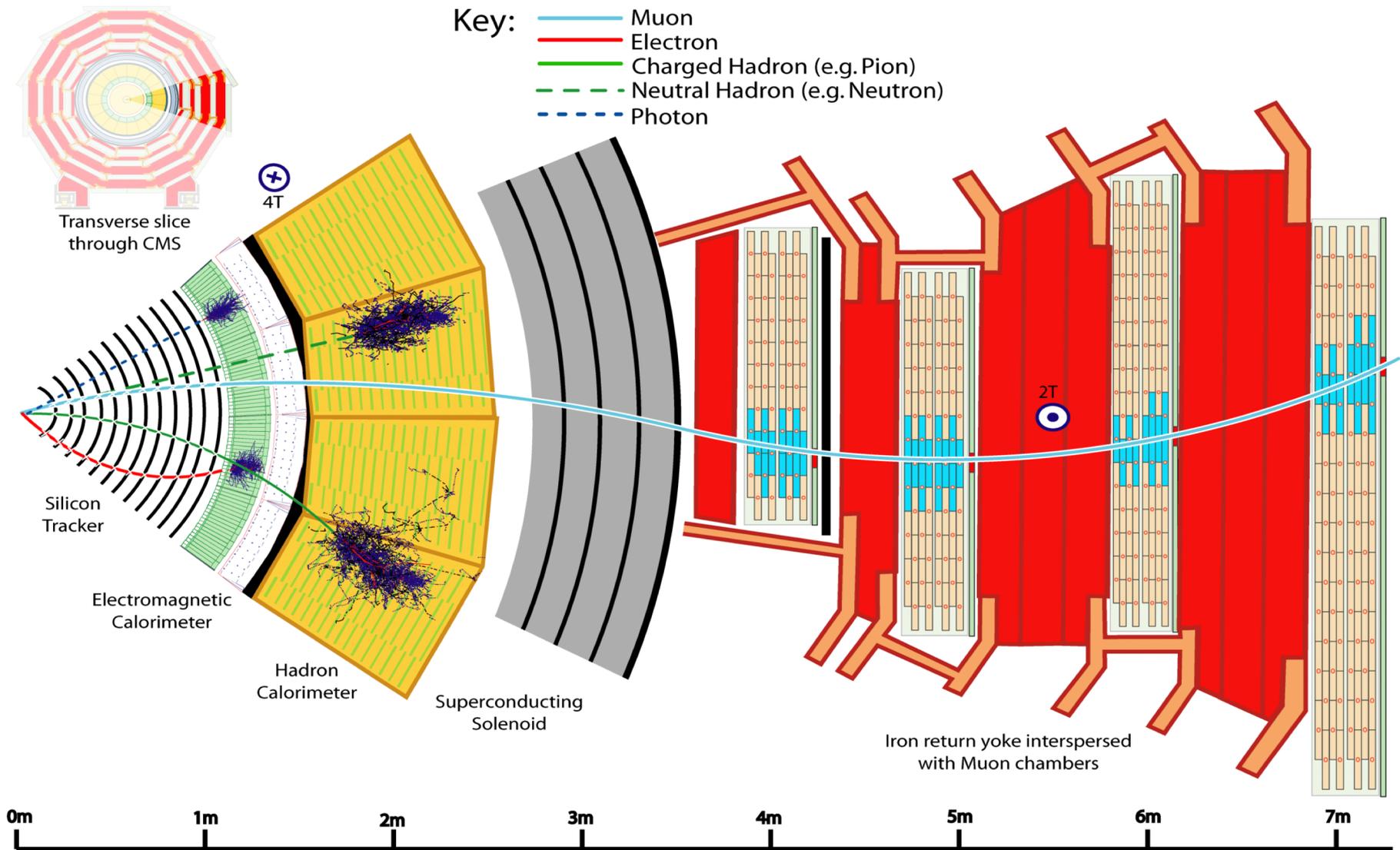
Electron ?

# Signature expérimentale : l'électron



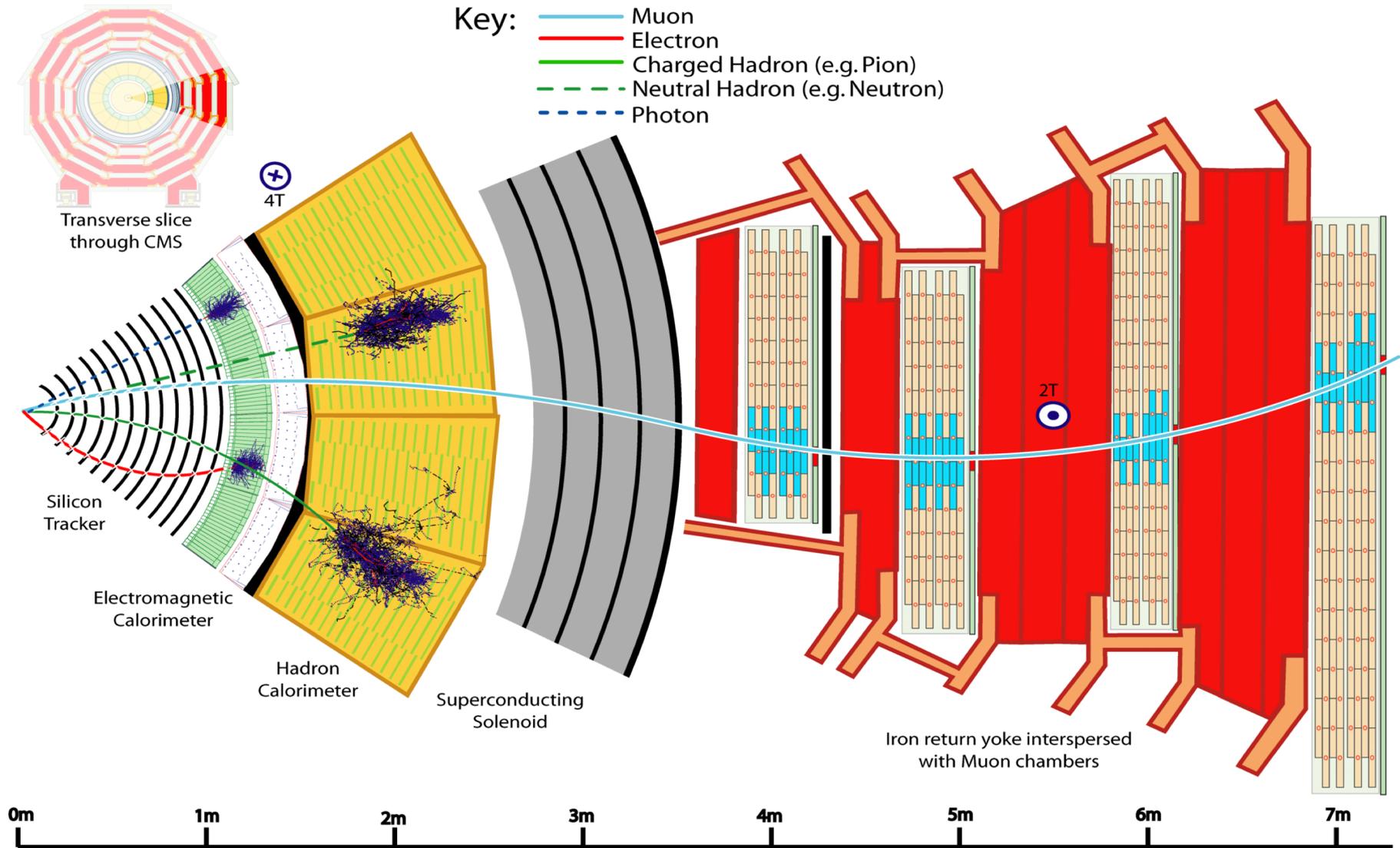
**Electron** : trace chargée dans le trajectographe et dépôt d'énergie dans le calo électromagnétique

# Signature expérimentale : le photon



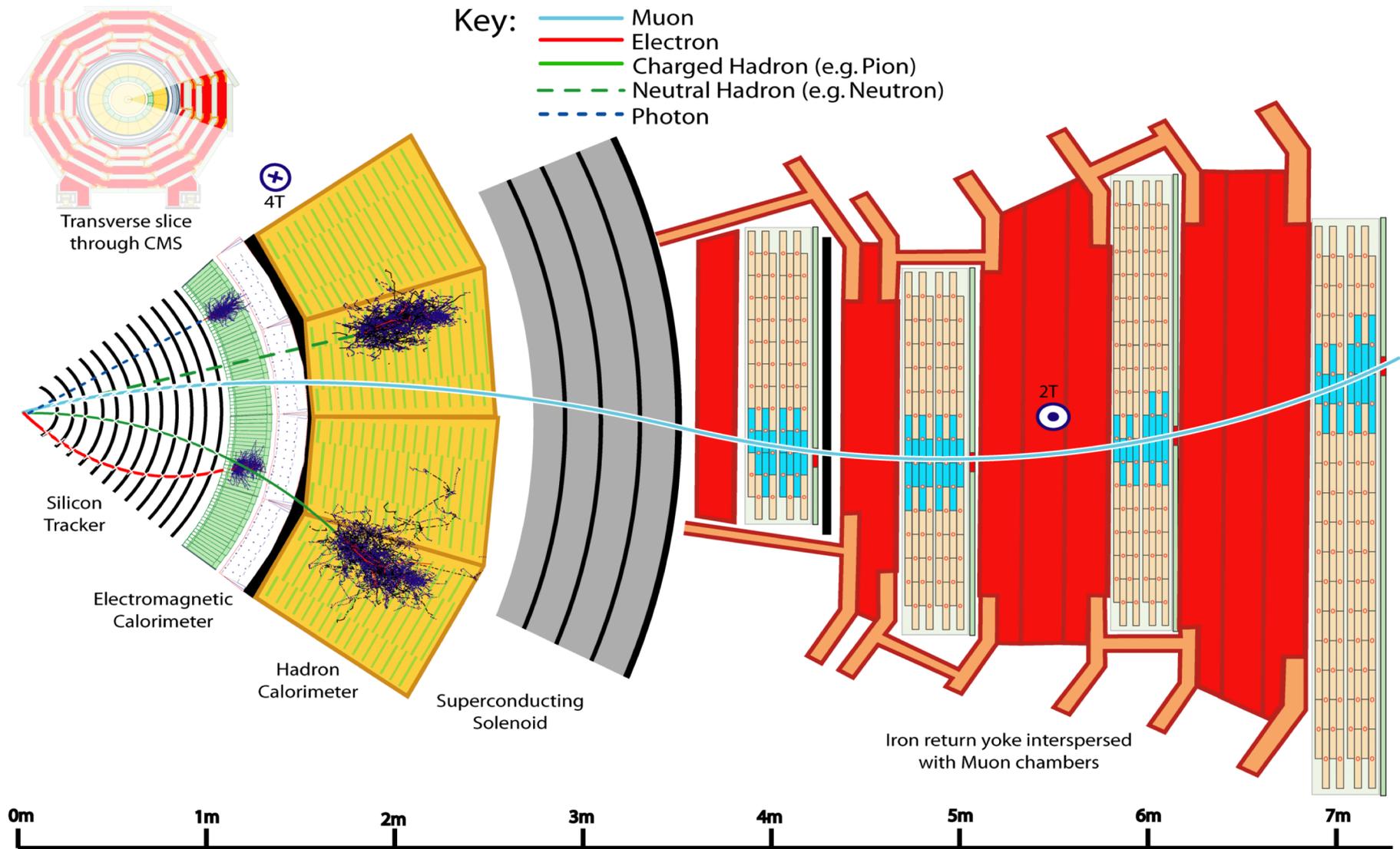
Photon ?

# Signature expérimentale : le photon



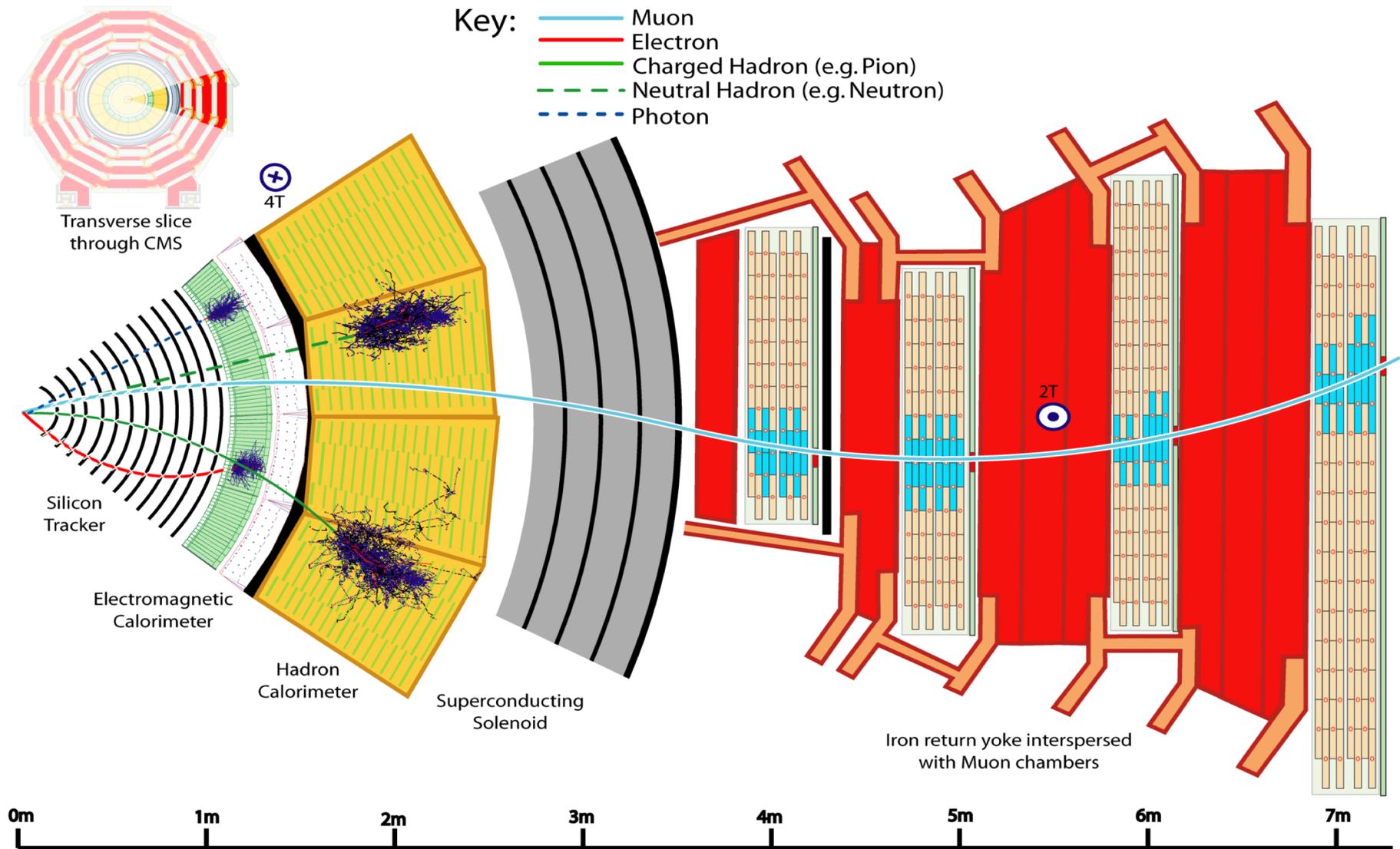
**Photon** : pas de trace chargée, dépôt d'énergie dans le calo électromagnétique

# Signature expérimentale : le neutrino



Neutrino ?

# Signature expérimentale : le neutrino



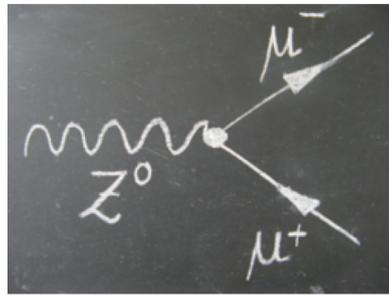
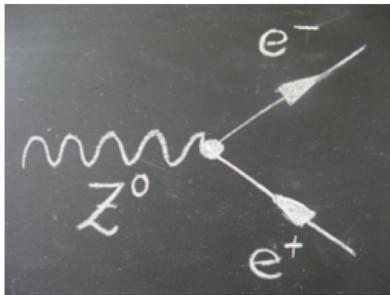
**Neutrino** : pas de trace ni dépôt d'énergie : le neutrino n'est pas détecté expérimentalement

# Qu'allons nous chercher ?

Aujourd'hui on va analyser des données récoltées pendant l'année 2012 avec le détecteur CMS.  
Parmi ces données on va chercher des Z et des W.

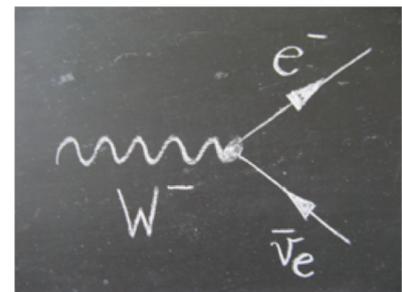
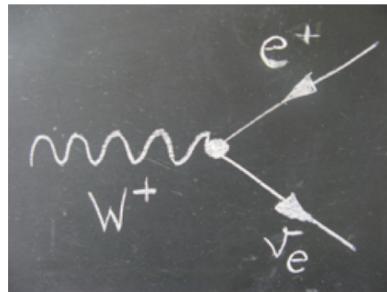
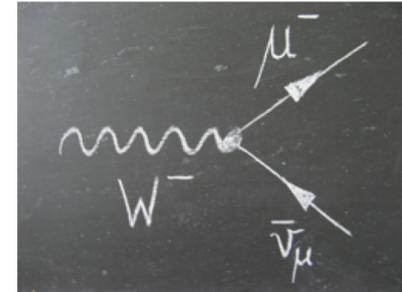
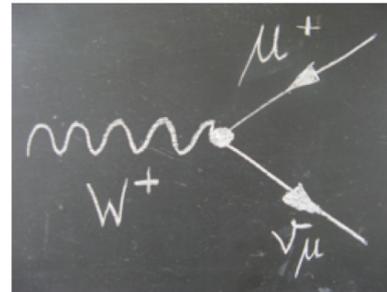
$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

les Z (ou autres particules neutres)  
se désintègrent en **2 leptons chargés**



$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$
$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$

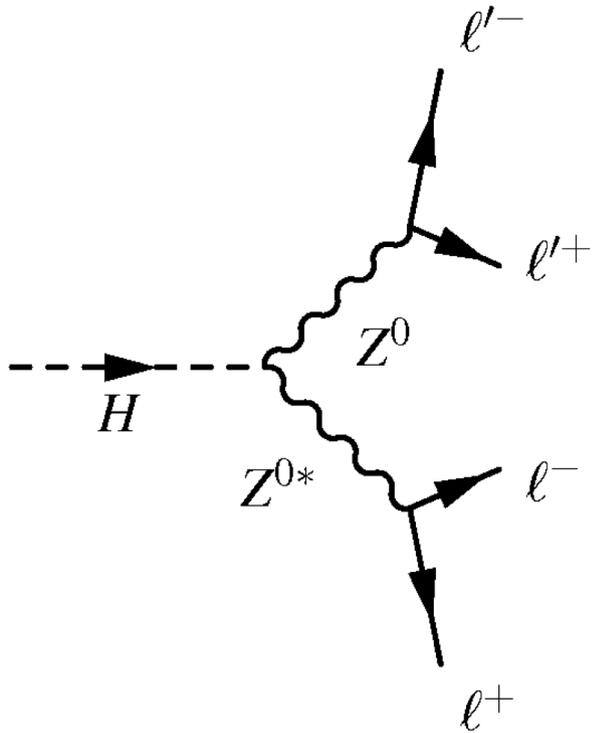
Les W se désintègrent en **lepton chargé et neutrino**



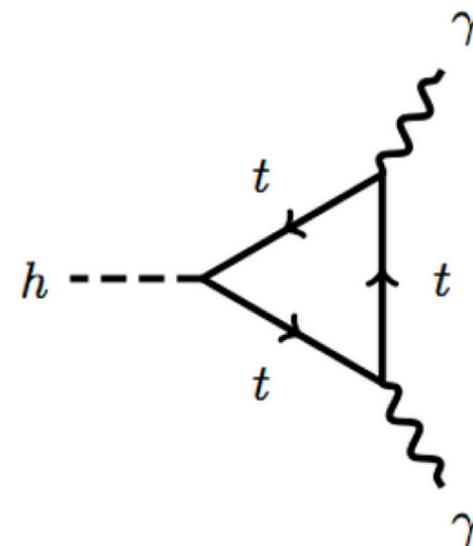
# Qu'allons nous chercher ?

..Et des Higgs

$$\begin{aligned} H^0 &\rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- \\ &\rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^- \\ &\rightarrow e^+ e^- e^+ e^- \end{aligned}$$

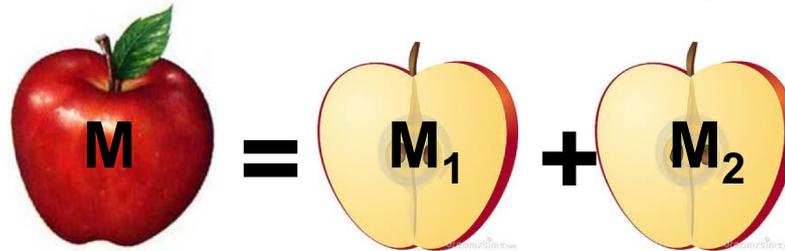


$$H^0 \rightarrow \gamma\gamma$$



# Masse invariante

D'un point de vue classique, la masse totale d'un système qui se désintègre est conservée (la masse initiale  $M$  est égale à la somme des masses finales  $M_1+M_2$ ):



Dans la physique des particules on doit tenir en compte les effets relativistes.

Masse et énergie sont deux concepts strictement liés

On ne va pas avoir  $M=M_1+M_2$  car dans la désintégration de l'énergie va aussi être libérée (la masse initiale n'est pas simplement égale à la somme des masses finales: une partie « se transforme » en énergie).

On peut mesurer **énergie  $E$  et impulsion  $(p_x, p_y, p_z)$**  (où l'impulsion d'une particule est définie comme  $\vec{p} = m\vec{v}$ ) des particules et introduire le nouveau concept de **masse invariante**:

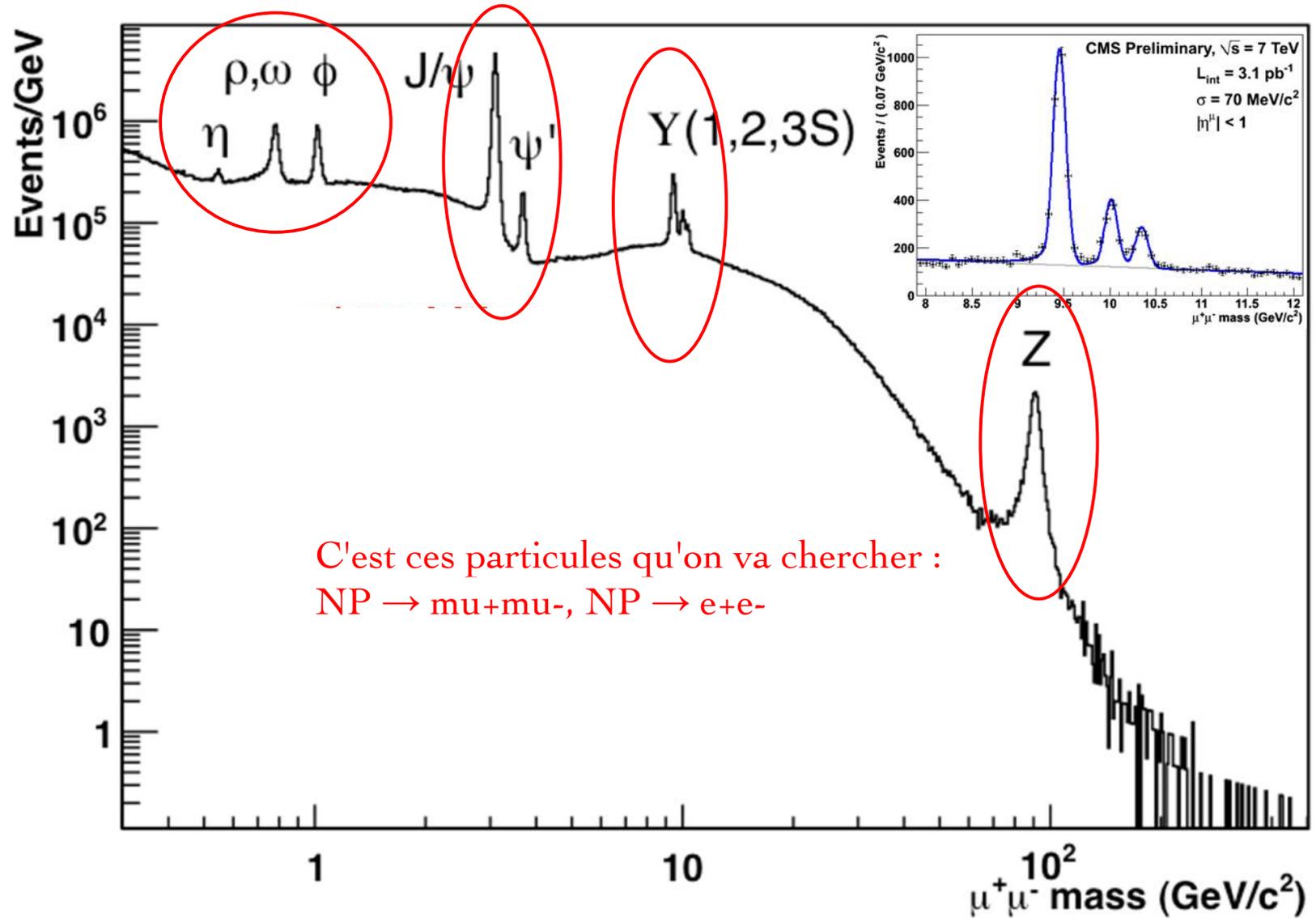
$$M^{inv}c^2 = \sqrt{E^2 - p_x^2c^2 - p_y^2c^2 - p_z^2c^2}$$

[Pour une particule d'impulsion nulle, c'est  $E=Mc^2$  !]

C'est la **masse invariante** qui est **conservée** lors d'une désintégration

# Masse invariante des deux leptons

Distribution de la masse invariante de paires de muons

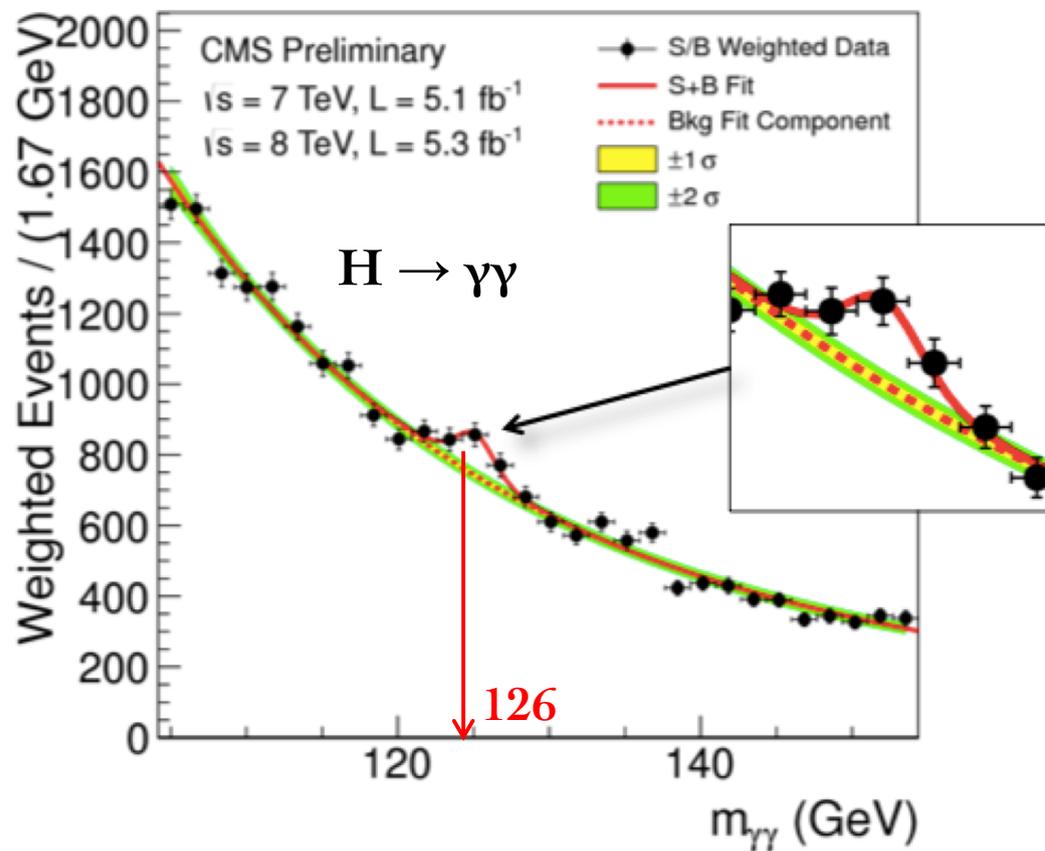


# Masse invariante de 2 photons/4 leptons

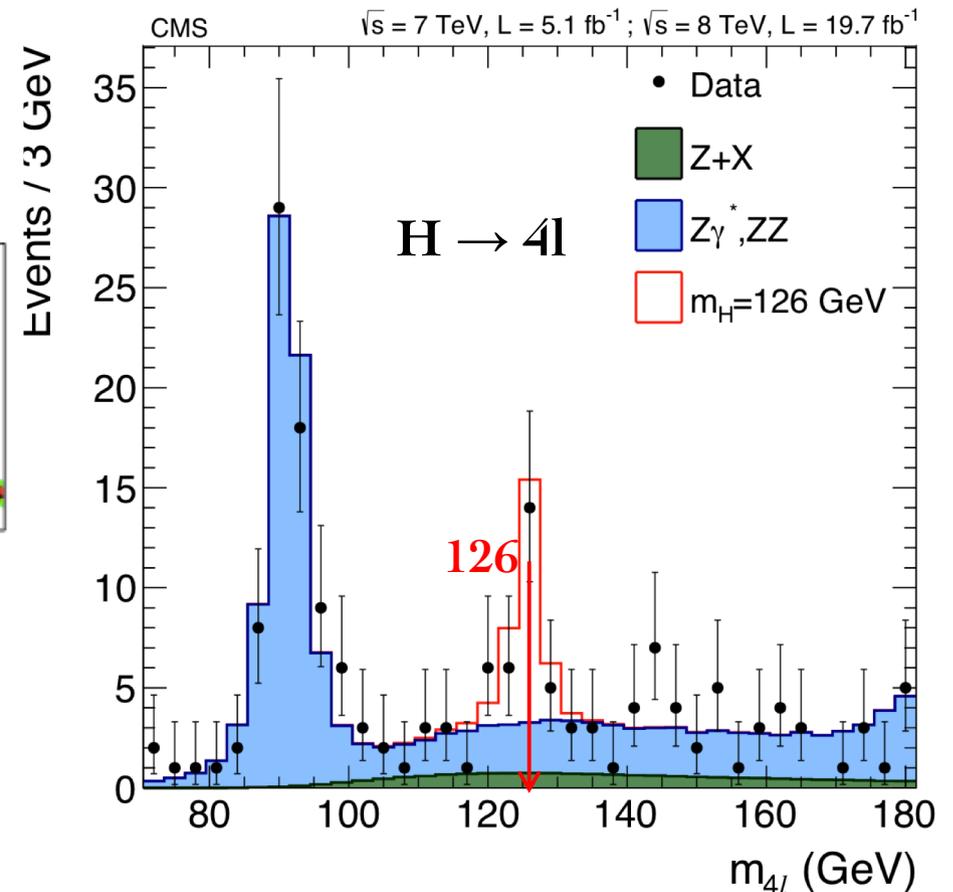
Recherche du Higgs : on ne connaissait pas sa masse, mais on savait qu'il se désintègre en

- 2 photons
- 4 leptons (e,  $\mu$ )

Distribution de la masse invariante de paires de photons



Distribution de la masse invariante de 4 leptons

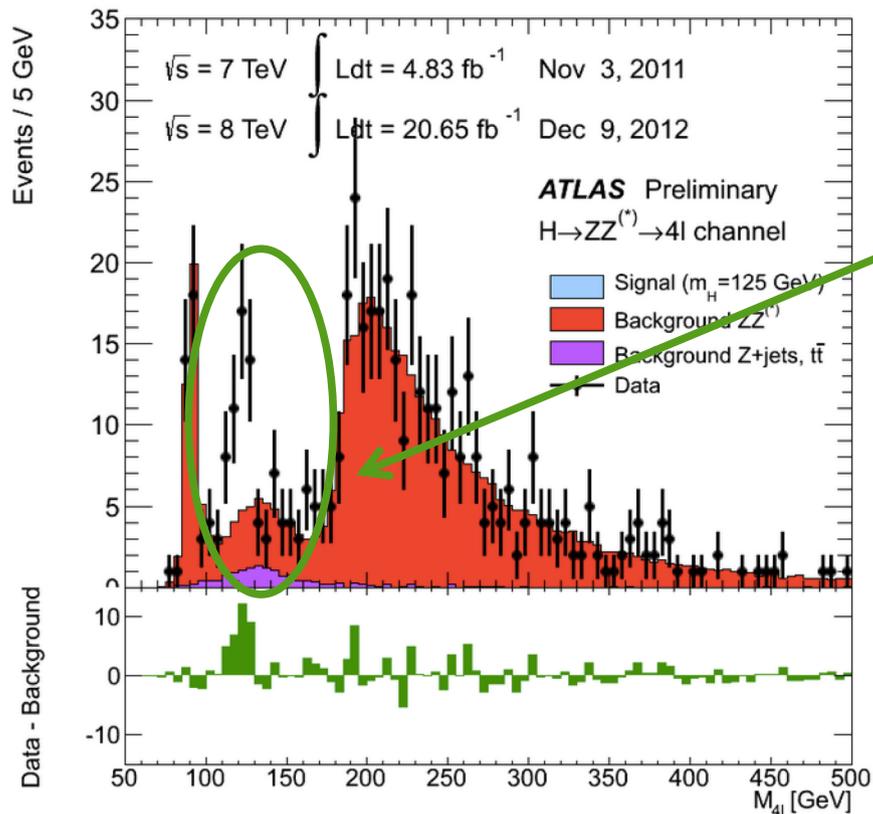


# Statistique !

Pour bien étudier les processus qui nous intéressent, on a besoin d'accumuler le plus grand nombre possible d'événements.

On découvre d'abord les phénomènes les plus probables, et on s'intéresse à ceux qui sont de plus en plus rares.

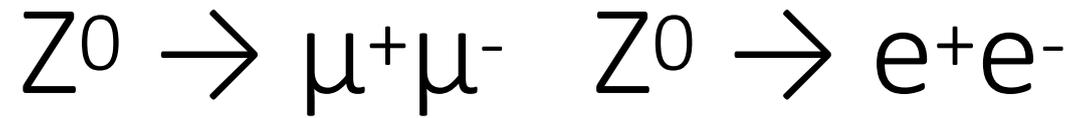
Chaque découverte dans notre domaine se fait par accumulation de données et passe par des évaluations de type statistique.



Présence d'une particule de masse  $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$  mise en évidence sur les données 2011 et 2012.

Accumulation des données le long des années 2011 et 2012 :

<http://cds.cern.ch/record/2230893/files/Higgs4l.gif>

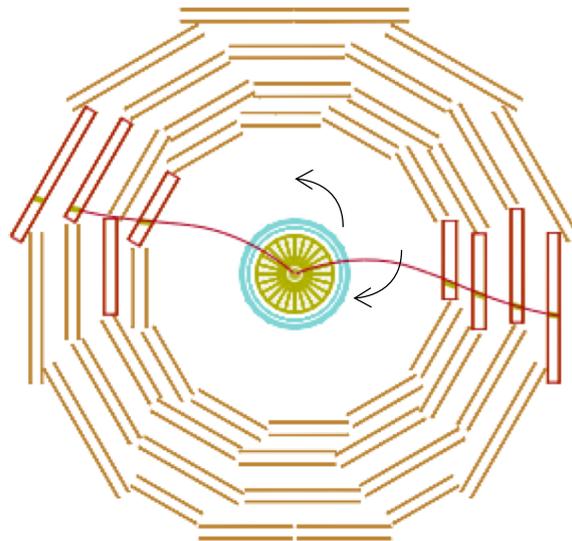


Particule neutre créée dans les collisions qui se désintègre en deux leptons, ( $\mu^+\mu^-$  ou  $e^+e^-$ )

- Les leptons ont la même saveur et charge opposée
- L'événement ne contient pas beaucoup plus que les deux leptons en question.
- Quantité conservée : la «masse» de la particule qui se désintègre est égale à la «somme » des «masses» des deux leptons

Observer la courbure dans la partie interne du détecteur pour déterminer la charge d'une trace

Trace courbée en sens inverse aux aiguilles d'une montre : charge négative ( $\mu^-$ )



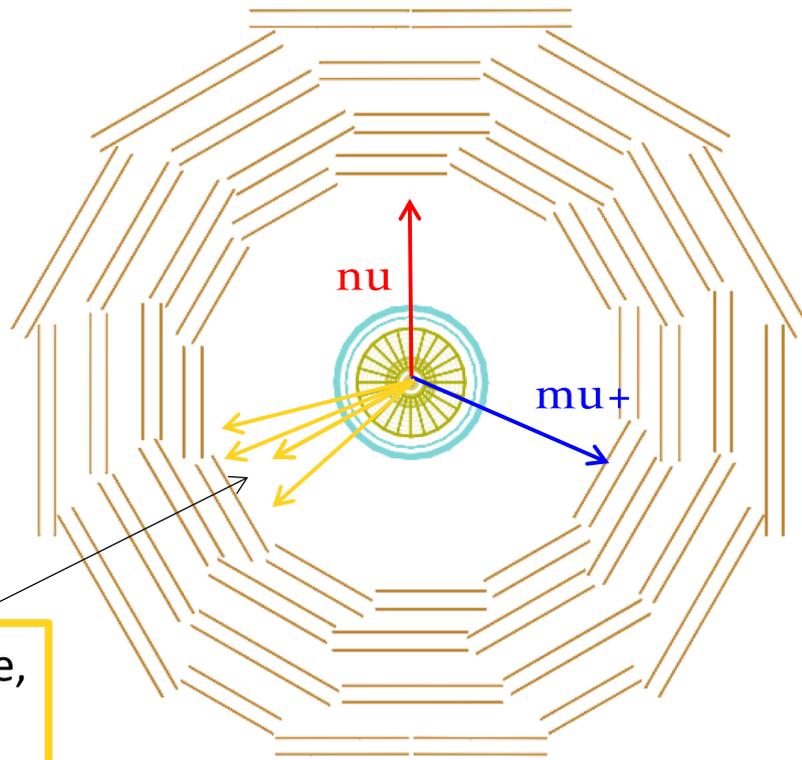
Trace courbée dans le sens des aiguilles d'une montre : charge positive ( $\mu^+$ )



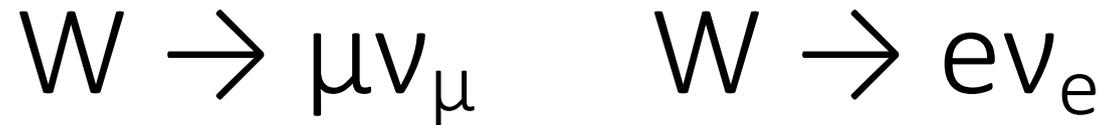
Processus qui nous intéresse :  $W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\mu}$

Particule chargée créée dans les collisions qui se désintègre en **lepton** et **neutrino**.

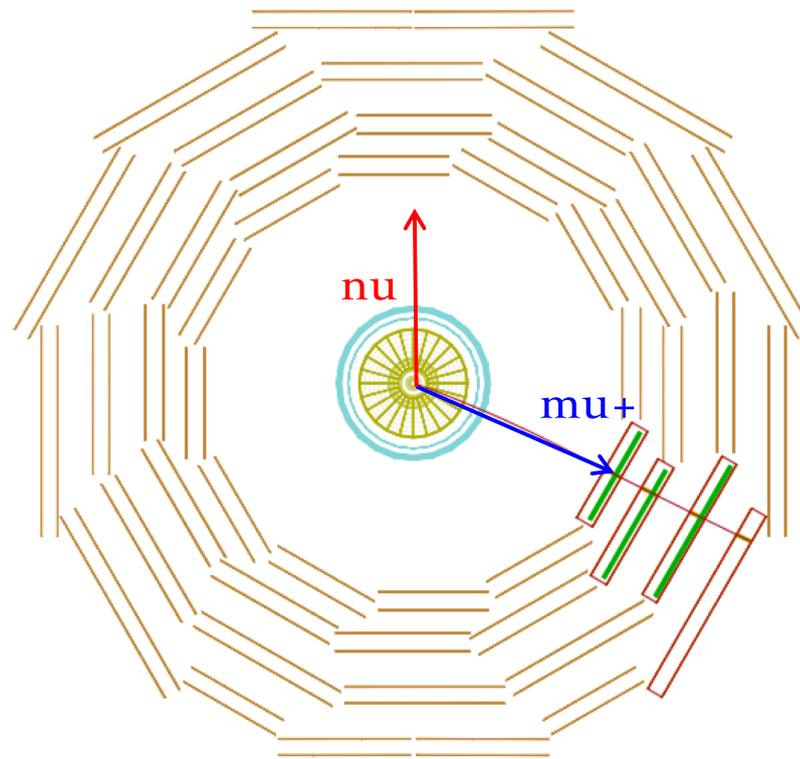
Le muon est détecté, le neutrino ne l'est pas



Possible activité additionnelle,  
ça nous intéresse pas  
aujourd'hui, **on ne va pas  
la regarder**



La charge du muon (courbure dans la partie intérieure du détecteur) détermine la charge du  $W$  qui s'est désintégré, là c'était un  $W^+$ .



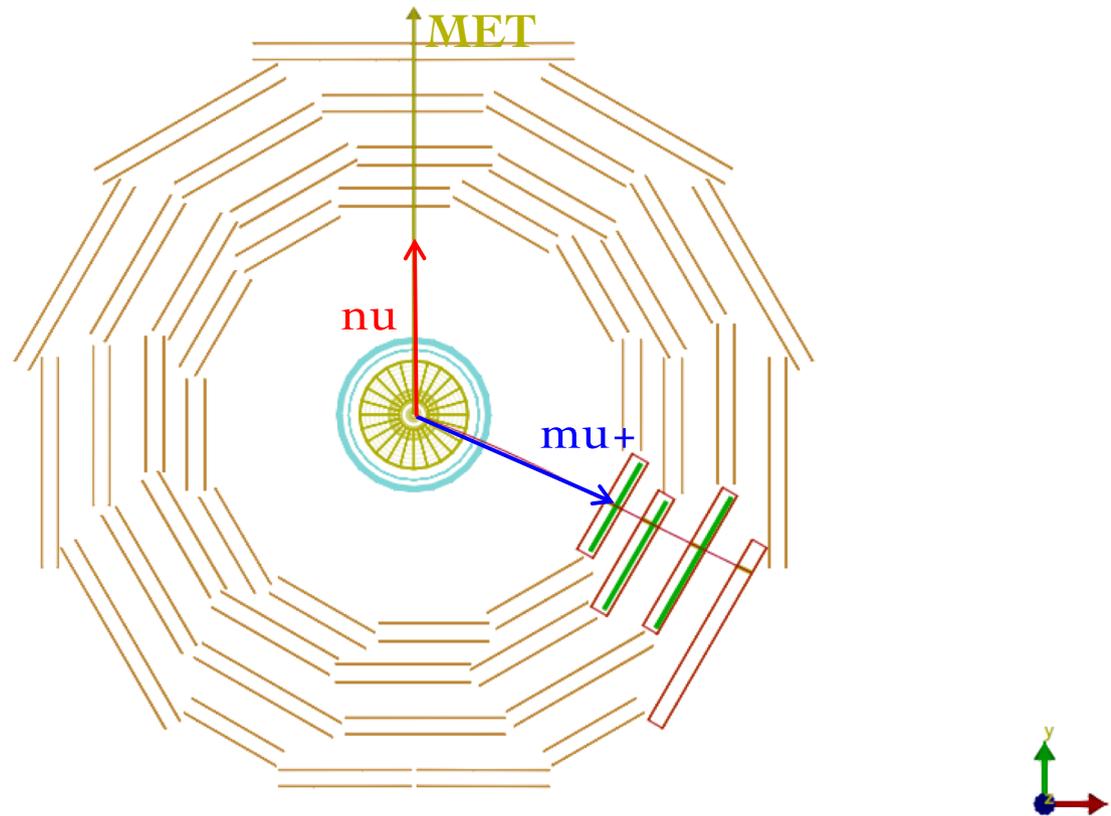
Le neutrino n'est pas observé.

Mais (lois de conservation) **l'énergie totale dans le plan transverse x-y est zéro !**

Si l'on mesure tous les dépôts d'énergie dans tout le détecteur et on en fait la somme vectorielle (en tenant compte de leur direction) on aura de **l'énergie transverse qui manque dans la direction du neutrino**. Elle manque car l'énergie du neutrino n'a pas pu être détectée



C'est ce qu'on appelle « énergie manquante transverse », Missing Et ou MET



Une particule chargée qui se désintègre en **lepton** et **neutrino** donne, du point de vue expérimental, un lepton de même charge et de l'énergie manquante

# Qu'allons nous chercher

---

Aujourd'hui on va analyser des vraies données récoltées avec le détecteur CMS.  
Parmi ces données on va chercher **trois types de particules**:

$Z^0$  (ou autre particule neutre)

$W^+ / W^-$

H

Si on recherche une particule il faut :

- savoir quelles sont ses filles (connaître sa désintégration, modèle)
- chercher à observer ses filles

# Qu'allons nous chercher : W, Z

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

les Z se désintègrent en **2 leptons**

- de charge opposée
- de même saveur (2 muons ou 2 électrons)
- pas beaucoup d'activité additionnelle dans l'événement

La masse invariante de la paire de leptons va ensuite nous dire si c'est vraiment un Z

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$
$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$

Les W se désintègrent en **lepton neutrino**

- un seul lepton dont la charge détermine la charge du W
- un neutrino, énergie manquante transverse MET dans le détecteur (MET > 20 GeV)

# Qu'allons nous chercher : H

$$\begin{aligned} H^0 &\rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- \\ &\quad \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^- \\ &\quad \rightarrow e^+ e^- e^+ e^- \end{aligned}$$

Le H peut se désintégrer en ZZ, chaque Z se désintègre en **2 leptons**

- de charge opposée
- de même saveur (2 muons ou 2 électrons)
- pas beaucoup d'activité additionnelle dans l'événement

La masse invariante des **4 leptons** dans l'état finale va ensuite nous dire quelle est la masse du H

$$H^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

Le H peut se désintégrer en  $\gamma\gamma$

- Les photons sont directement observés dans le détecteur
- pas beaucoup d'activité additionnelle dans l'événement

La masse invariante des 2 photons dans l'état finale va ensuite nous dire quelle est la masse du H

# Comment allons nous chercher, outils

Pour faire ça vous allez vous répartir en groupes de deux, chaque groupe aura à sa disposition un ordinateur avec :

- une page web pour visualiser et analyser les événements
- une page web où rentrer vos résultats

iSpy WebGL masterclass\_samples.ig:Events/Run\_1/Event\_13 [1 of 10]

HCAL Forward (-)   
Drift Tubes   
Cathode Strip Chambers   
Resistive Plate Chambers (barrel)   
Resistive Plate Chambers (+)   
Resistive Plate Chambers (-)   
▼ Imported   
▼ Provenance   
Event   
▼ Tracking   
Tracks (reco.)   
▼ ECAL   
Barrel Rec. Hits   
Endcap Rec. Hits

Back Events Table (Group 40) Mass Histogram (LyonB2017) Results (LyonB2017) Event Display

Masterclass: CERN-10Mar2017  
location: LyonB2017  
Group: 40

Instructions (also available as [screencast](#)):  
1. For each event, identify the final state and select a primary state candidate.  
    • For Higgs or Zoo candidate, no final state is chosen  
    • If you cannot decide between W+ and W-, choose W instead  
2. If you think the final state is a neutral particle (like a Z), but you don't know its exact type, select NP for "neutral particle."  
    Find its mass from the Event Display and enter it.  
3. Once you have selected everything, click "Submit".

In case of an error, double clicking the data line will reload it; you can then try it again.

Event index	Event number	Chosen Values	Mass
1	40-1	<input type="checkbox"/> Electron <input type="checkbox"/> Muon ( $\mu$ )	<input type="checkbox"/> W- <input type="checkbox"/> NP <input type="checkbox"/> W+ <input type="checkbox"/> W <input type="checkbox"/> Higgs <input type="checkbox"/> Zoo

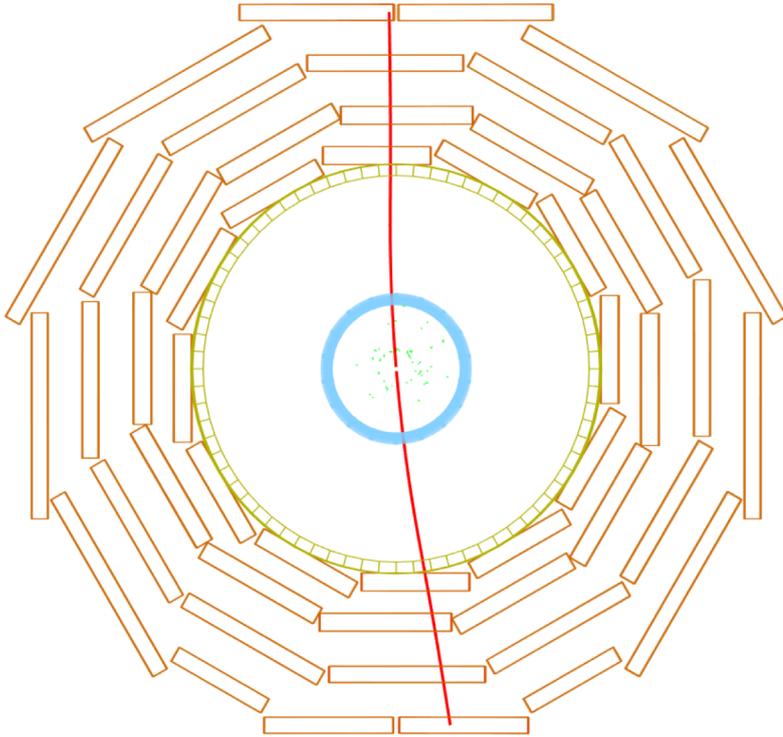
NP Mass:  GeV/c

Chaque binôme aura une liste de 100 événements : pour chacun vous devez dire si c'est :

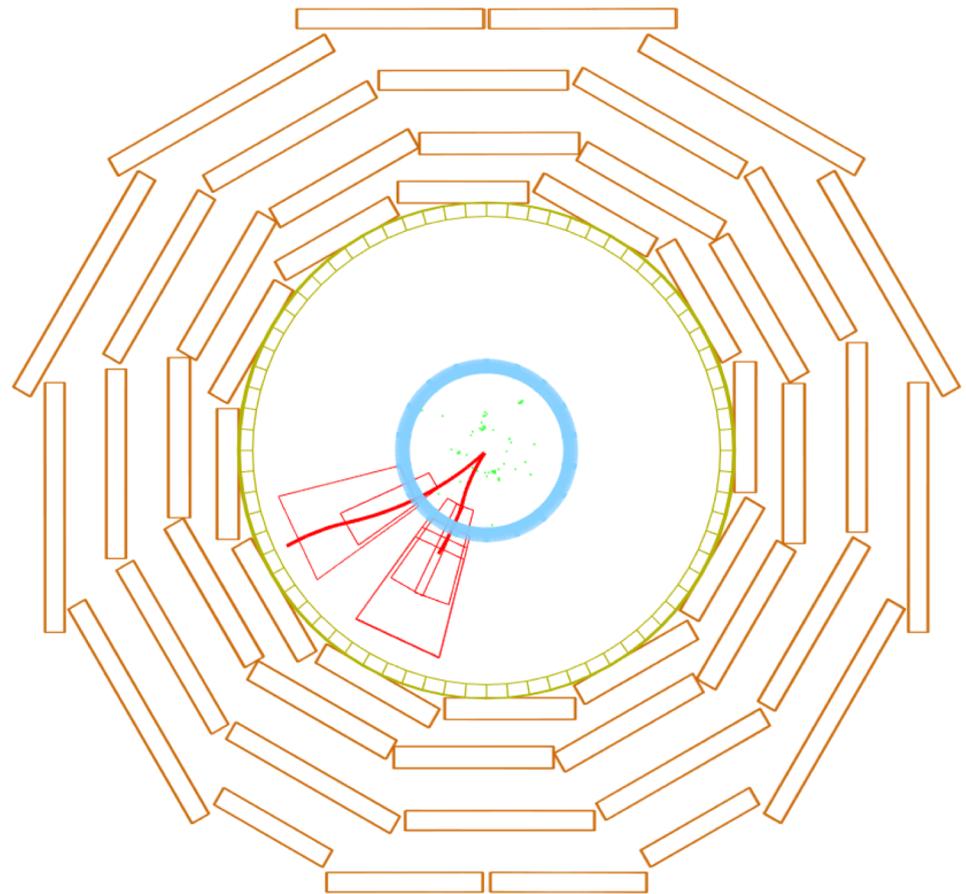
- un événement avec un W
- un événement avec une particule neutre
- un événement avec deux Z ou deux  $\gamma$
- rien de tout cela, ce qu'on appellera événement «zoo»

# Recherche d'une particule neutre ( $Z^0$ )

Événements avec deux leptons de la même saveur (muons électrons)

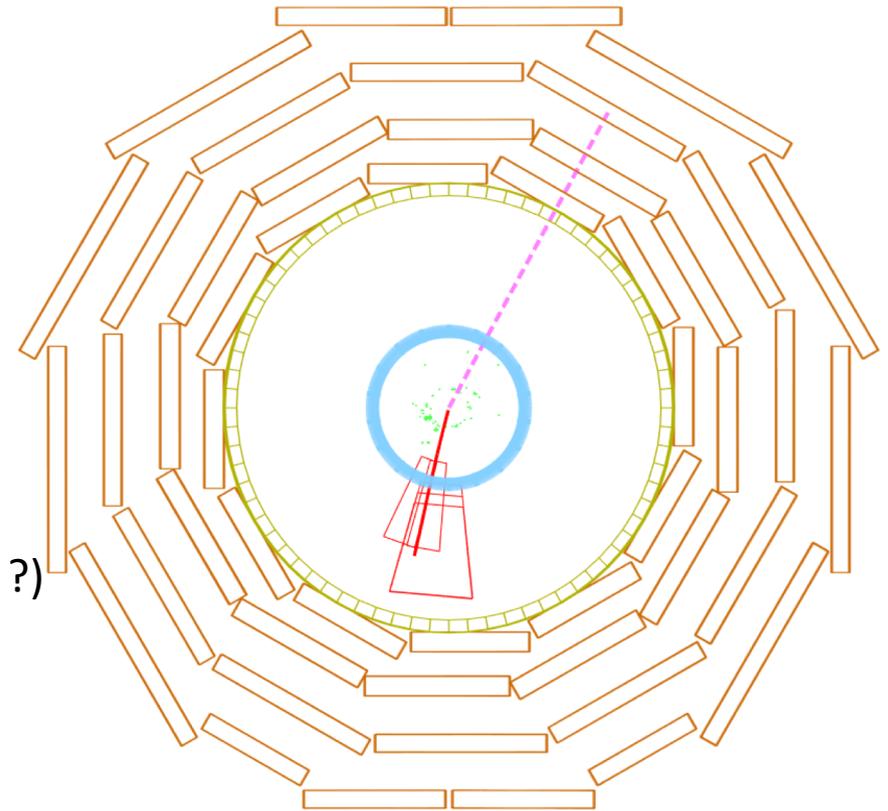
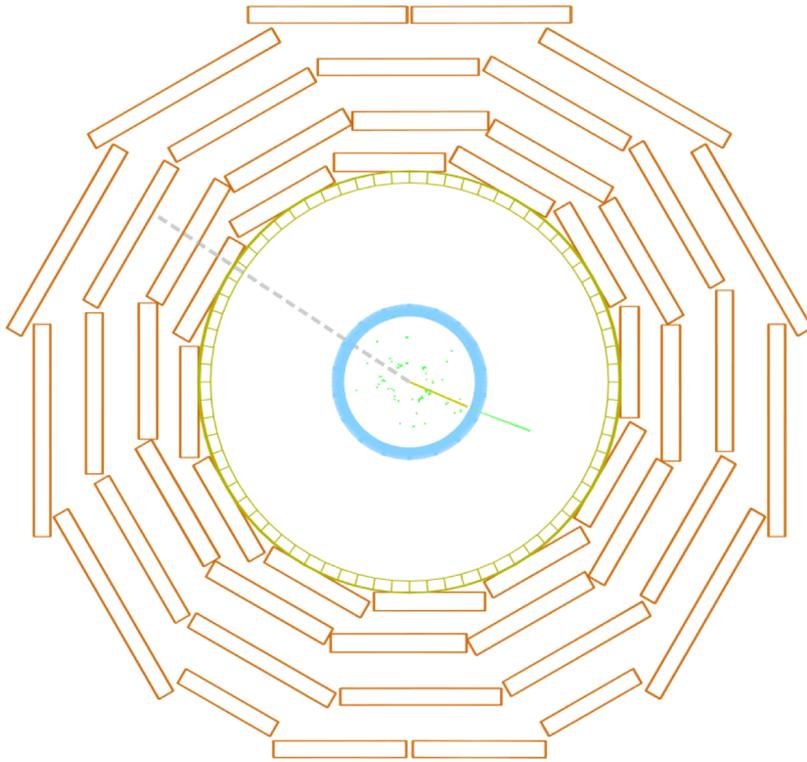


- 1) Il faut que la charge des leptons soit opposée
  - 2) Si  $MET < 20$  GeV
- c'est un **bon événement Z**



# Recherche du $W^+$ ou $W^-$

Événements avec un lepton et MET



- 1) Saveur du lepton (c'est un électron ou un muon ?)
- 2) charge du lepton
- 3) présence de  $MET > 20$
- 4) il n'y a pas d'autres leptons

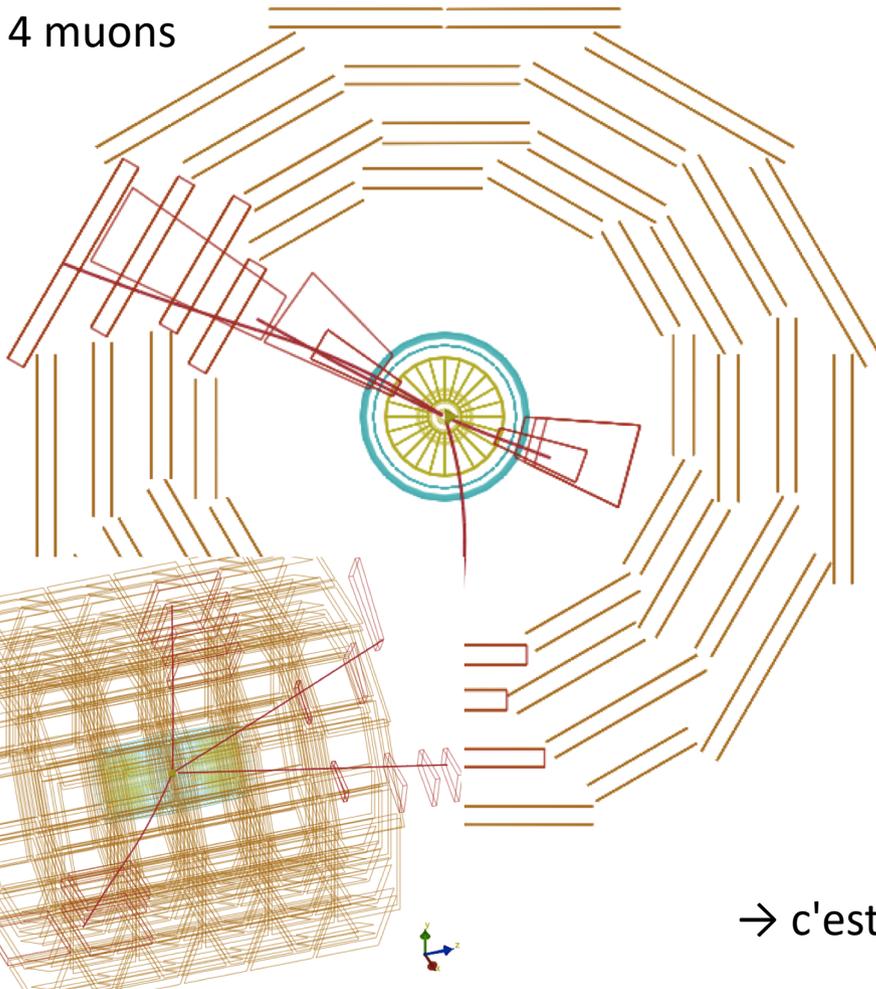
→ c'est un **bon événement W**

# Recherche du H

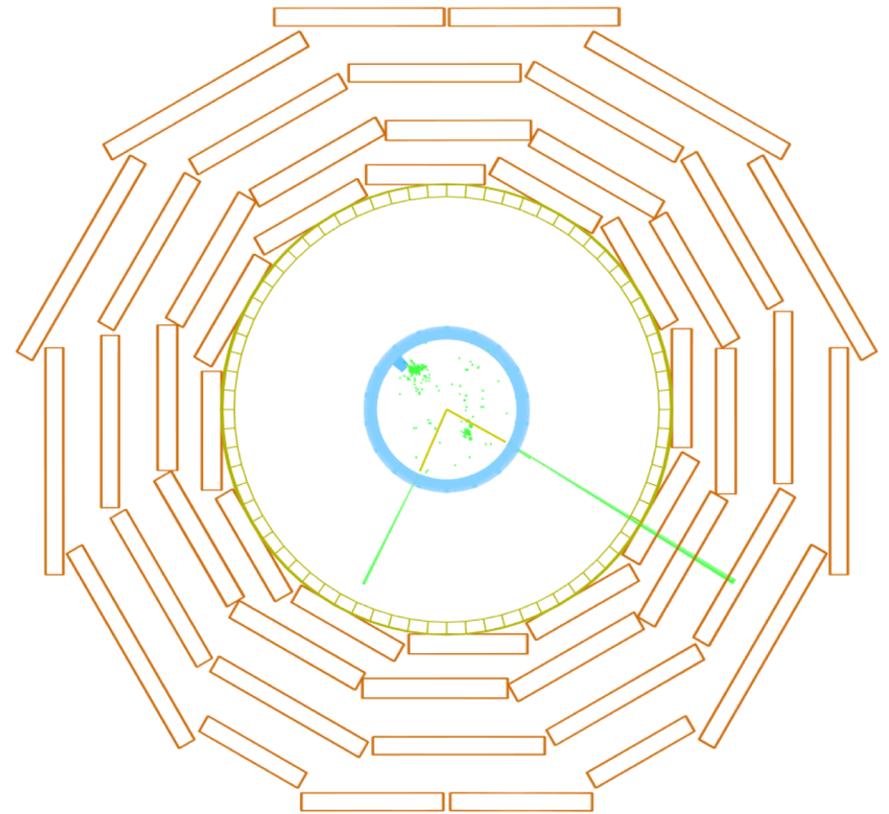
Événements avec

- 1) deux paires de deux leptons de même saveur et charge opposée (donc deux candidats Z)
- 2) MET < 20 GeV

4 muons



- 1) deux photons
  - 2) MET < 20 GeV
- c'est un **bon événement H**



→ c'est un **bon événement H**

# Classification des événements

Répétez cette analyse pour tous les événements de votre liste (100 événements par binôme), et pour chacun, déterminez si c'est :

- un événement avec un W (électron ou muon ?  $W^+$  ou  $W^-$  ?)
- un événement avec un Z
- un événement avec un H (deux Z ou deux photons)
- un événement «zoo»

Remplissez la page web en conséquence.

Back Events Table (Group 40) Mass Histogram (LyonB2017) Results (LyonB2017) [Event Display](#)

**Masterclass:** CERN-10Mar2017  
**location:** LyonB2017  
**Group:** 40

**Instructions** (also available as [screencast](#)):

1. For each event, identify the final state and select a primary state candidate.
  - For Higgs or Zoo candidate, no final state is chosen
  - If you cannot decide between  $W^+$  and  $W^-$ , choose  $W$  instead
2. If you think the final state is a neutral particle (like a Z), but you don't know its exact type, select NP for "neutral particle." Find its mass from the Event Display and enter it.
3. Once you have selected everything, click "Submit".

In case of an error, double clicking the data line will reload it; you can then try it again.

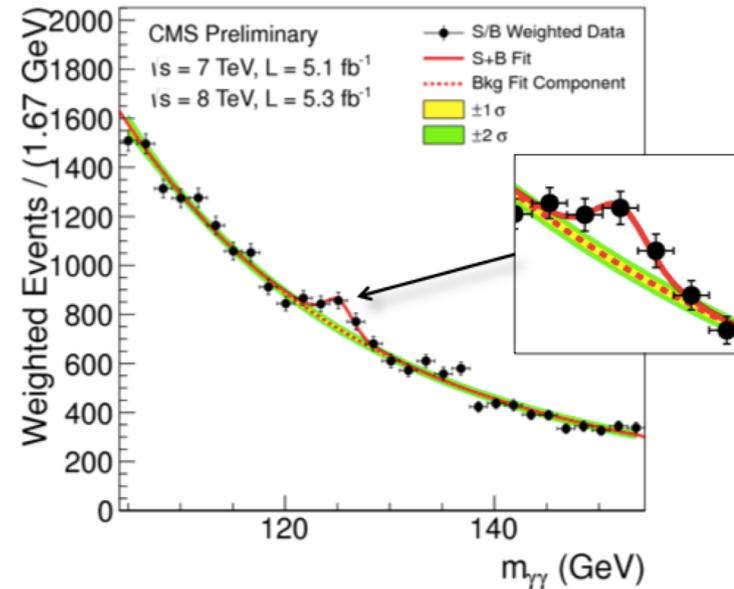
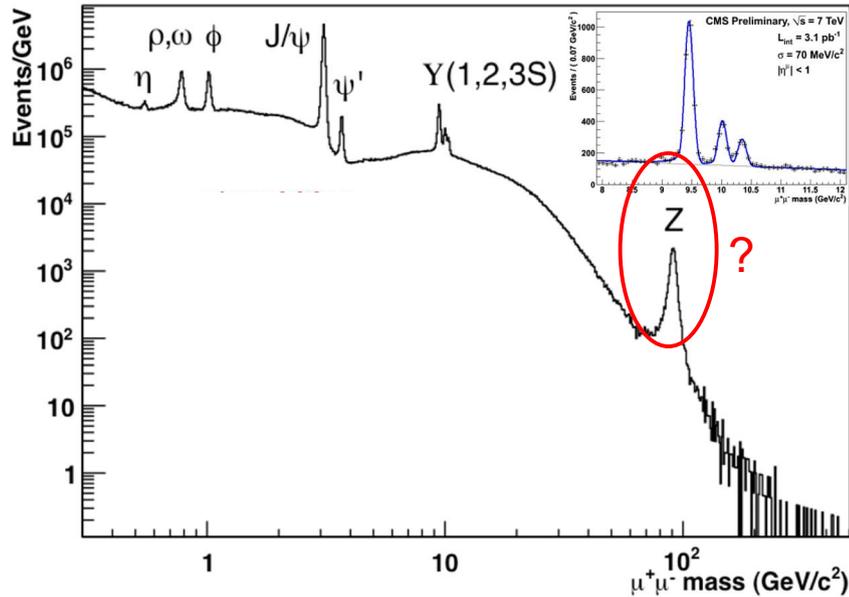
<b>Select Event</b> Event index: <input type="text" value="1"/> Event number: 40-1	<b>final state</b> <input type="checkbox"/> Electron <input type="checkbox"/> Muon ( $\mu$ )	<b>primary state candidate</b> <input type="checkbox"/> $W^-$ <input type="checkbox"/> $W^+$ <input type="checkbox"/> NP <input type="checkbox"/> W <input type="checkbox"/> Higgs <input type="checkbox"/> Zoo	NP Mass: <input type="text"/> Submit
--	--	---	---

Event index	Event number	Chosen Values	Mass
-------------	--------------	---------------	------

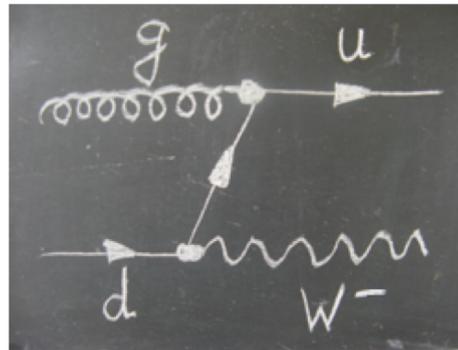
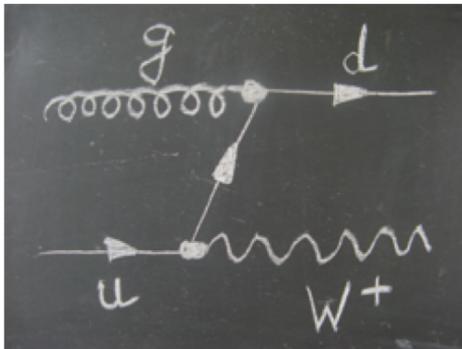
On va ensuite **mettre en commun les résultats de tous les binômes**, pour analyser la totalité des événements (importance d'accumuler de la statistique !)

# Objectif de l'exercice

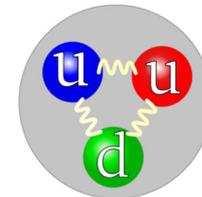
- Construire un spectre de masse invariante des paires de lepton, pour la recherche du Z et des 4 leptons/2 photons pour la recherche du Higgs



- Mesurer le rapport entre le nombre de W qui se désintègrent en  $e\nu$  et le nombre de W qui se désintègrent en  $\mu\nu$
- Mesurer le rapport entre le nombre de  $W^+$  et le nombre  $W^-$  produits dans les collisions proton-proton a CMS



Le rapport  $W^+/W^-$  donne une idée de la structure interne du proton...



---

backup

# Resultats

---

Dans la physique des particules on doit tenir en compte les effets relativistes.  
Masse et energie sont deux concepts strictement lies:

$$E^2 = m^2 c^4$$

Cette relation est valable pour une particule a repos.

Pour une particule qui a une vitesse on definit son impulsion  $\vec{p} = m\vec{v}$  et la relation devient:

$$E^2 = m^2 c^4 + |\vec{p}|^2 c^2$$

La masse d'une particule est donc liee a son energie et impulsion :

$$m c^2 = \sqrt{(E^2 - |\vec{p}|^2 c^2)}$$

Dans une desintegration (A→B+C) l'energie et l'impulsion se conservent:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_A = E_B + E_C \\ \vec{p}_A = \vec{p}_B + \vec{p}_C \end{array} \right. \quad \text{On peut donc determiner la masse de la particule A qui s'est desintegree a pa}$$

$$m_A c^2 = \sqrt{(E_A^2 - |\vec{p}_A|^2 c^2)} = \sqrt{(E_B + E_C)^2 - |\vec{p}_B + \vec{p}_C|^2 c^2}$$

On choisit les unites de mesure telles que on peut mettre c=1

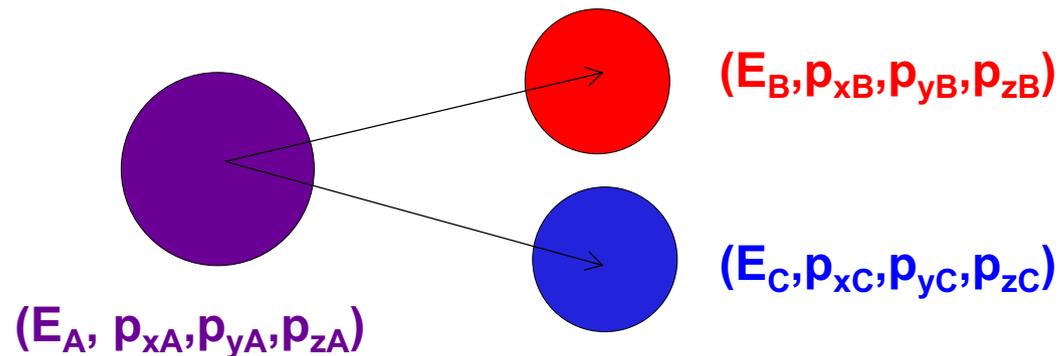
$$m_A = \sqrt{(E_B + E_C)^2 - |\vec{p}_B + \vec{p}_C|^2}$$



: particule cree dans la collision: elle se desintegre tres rapidement donc elle n'est pa



: produits de desintegration: **c'est eux qu'on observe dans le detecteur.** On peut m



La masse de la particule A est accessible:

$$m_A^2 = E_A^2 - p_{Ax}^2 - p_{Ay}^2 - p_{Az}^2 = (E_B + E_C)^2 - (p_{xB} + p_{xC})^2 - (p_{yB} + p_{yC})^2 - (p_{zB} + p_{zC})^2$$

L'operation **somme** est definie differement selon le type d'objet qu'on veut sommer.

Si on a une masse (quantite scalaire):  $M=M_1+M_2$

Si on a des vecteurs:

$$\vec{v}_1 = (x_1, y_1, z_1)$$

$$\vec{v}_2 = (x_2, y_2, z_2)$$

Et on ecrit:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

Faire la somme en ce cas la signifie:

$$\vec{v} = (x_1 + x_2, y_1 + y_2, z_1 + z_2)$$

On somme composante par composante.

Pour le calcul de la masse invariante aussi, on somme separement les energies et les compos