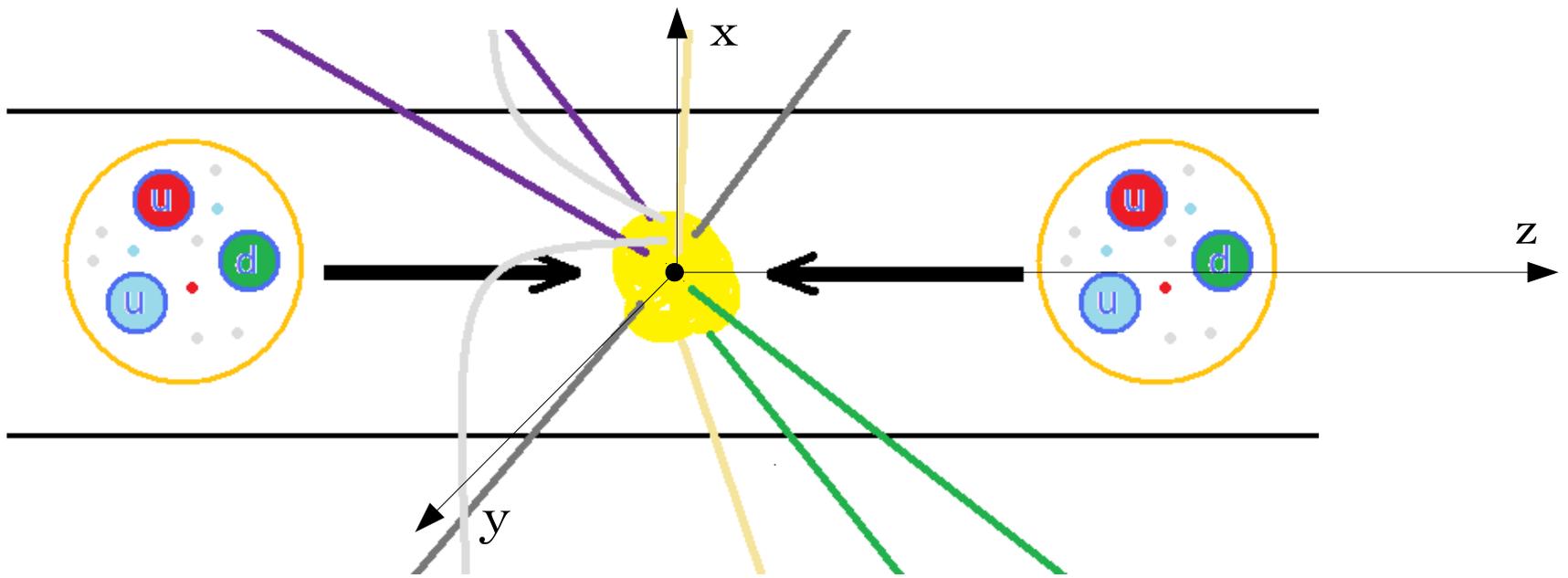


Les collisions proton-proton

- Les protons de chaque faisceau (pour l'année 2012) ont une énergie de 4 TeV le long de l'axe z. L'énergie de la collision est $2 \times 4 \text{ TeV} = 8 \text{ TeV}$
- 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



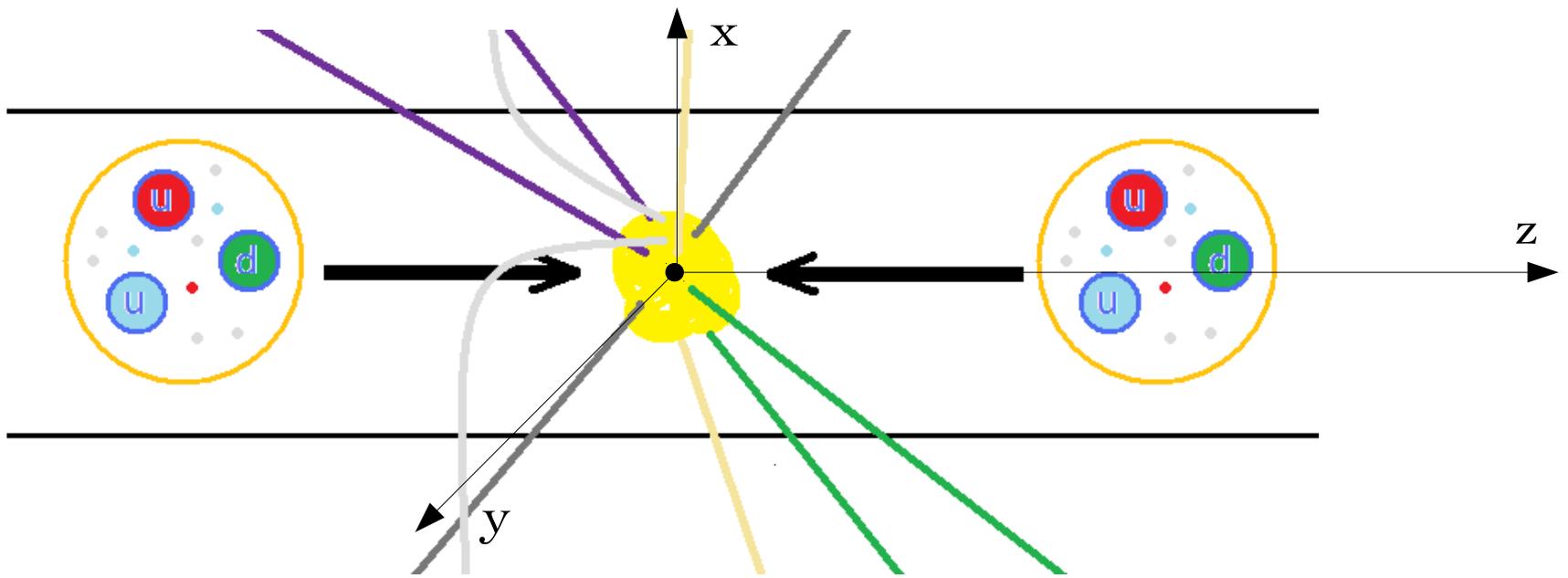
Les collisions proton-proton

- 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 :

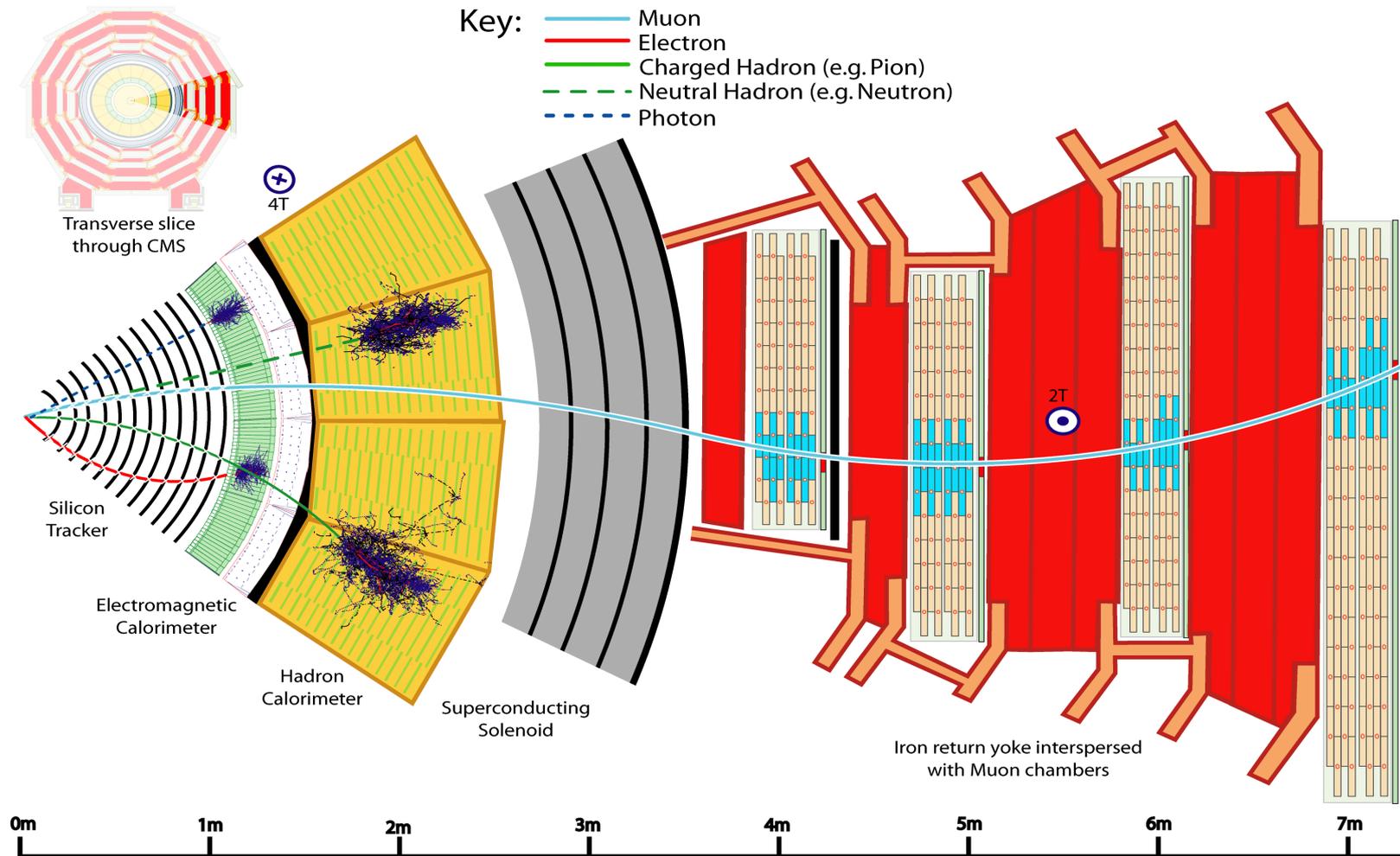
Etat initial, constituants des protons :
énergie seulement le long de z



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

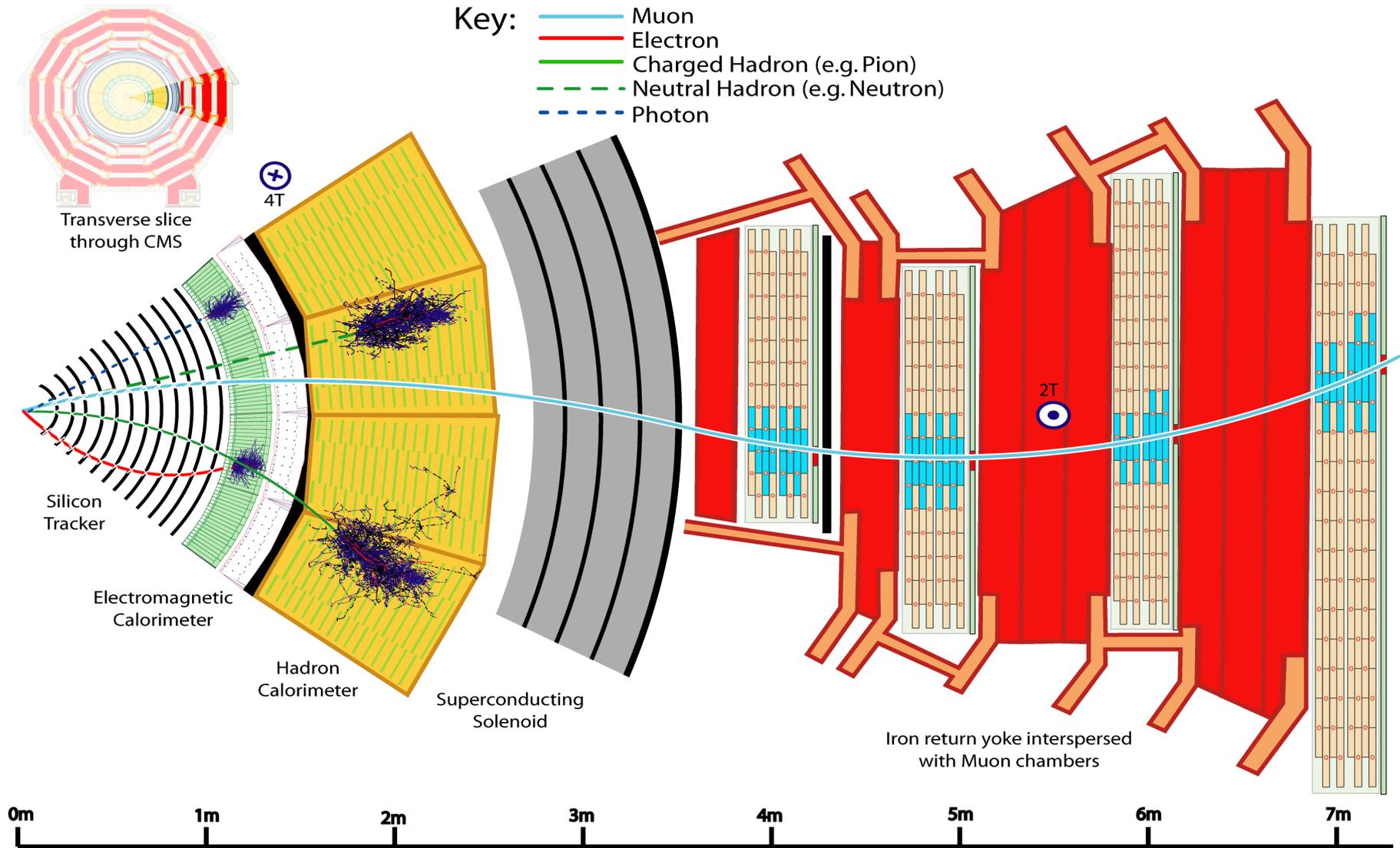


Le détecteur CMS



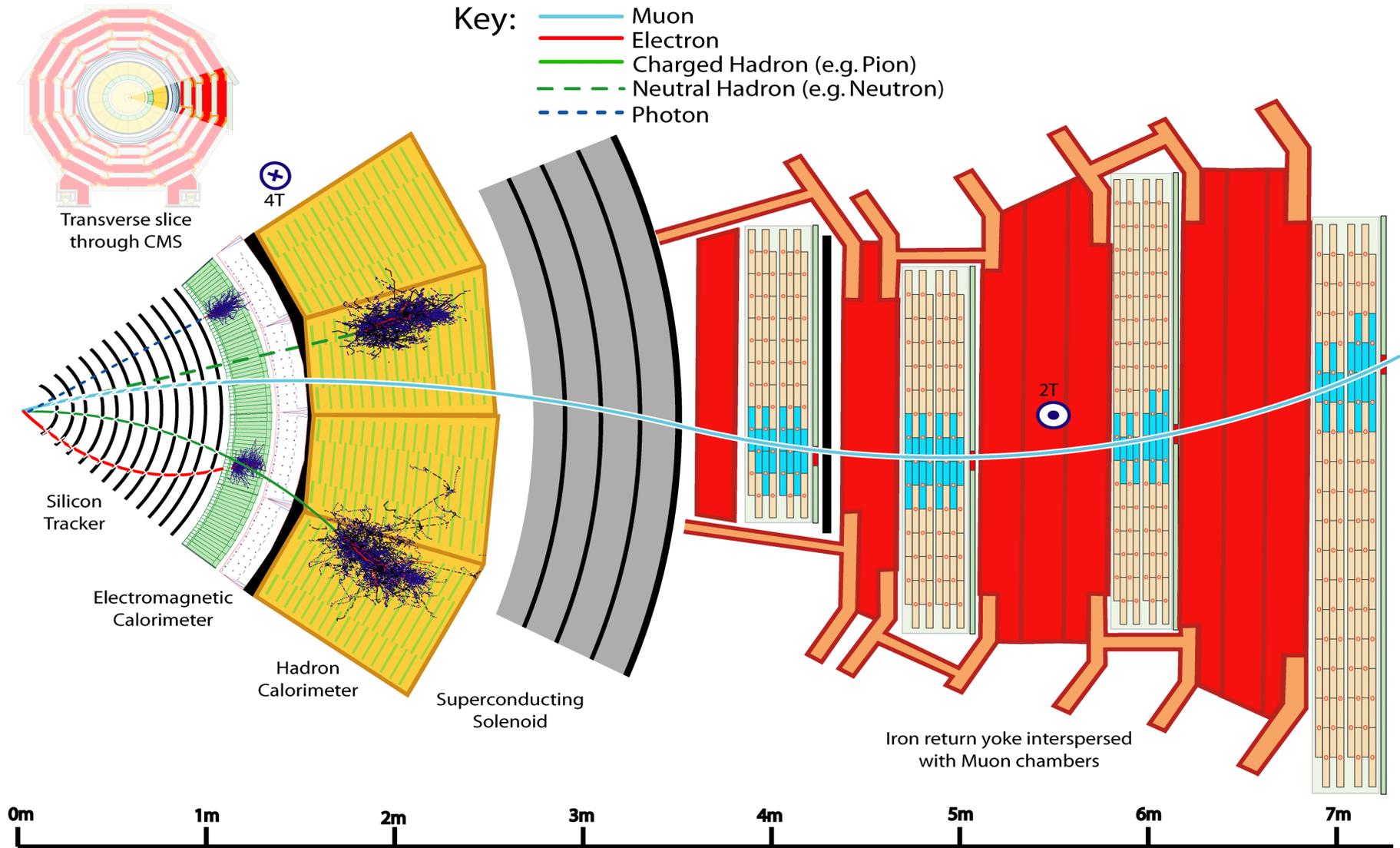
Les collisions produisent des particules au centre du détecteur
Différents détecteurs sont sensibles à différents types de particules
La trajectoire d'une particule chargée est courbée dans un champ magnétique

Signature expérimentale : le muon



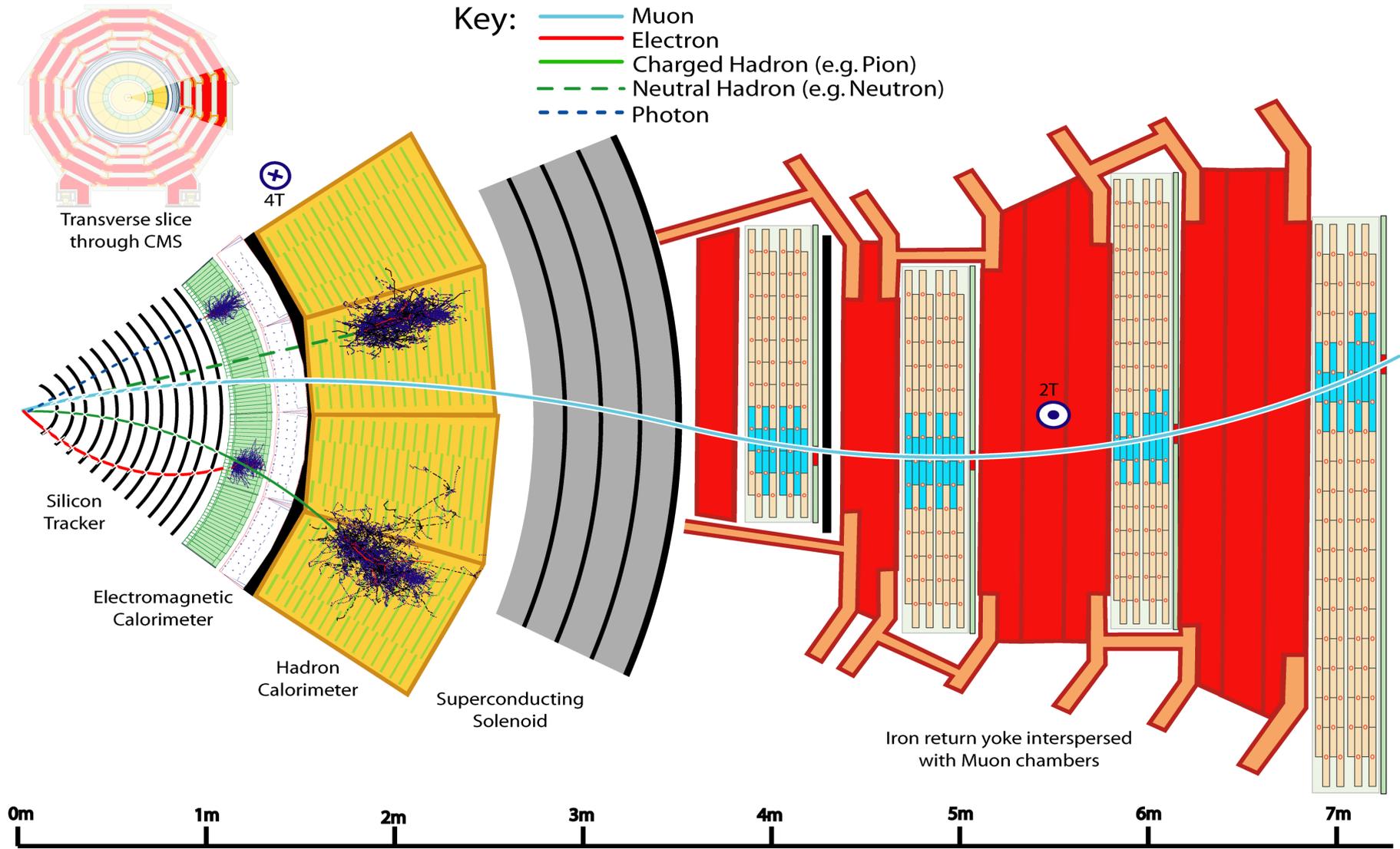
Muon ?

Signature expérimentale : le muon



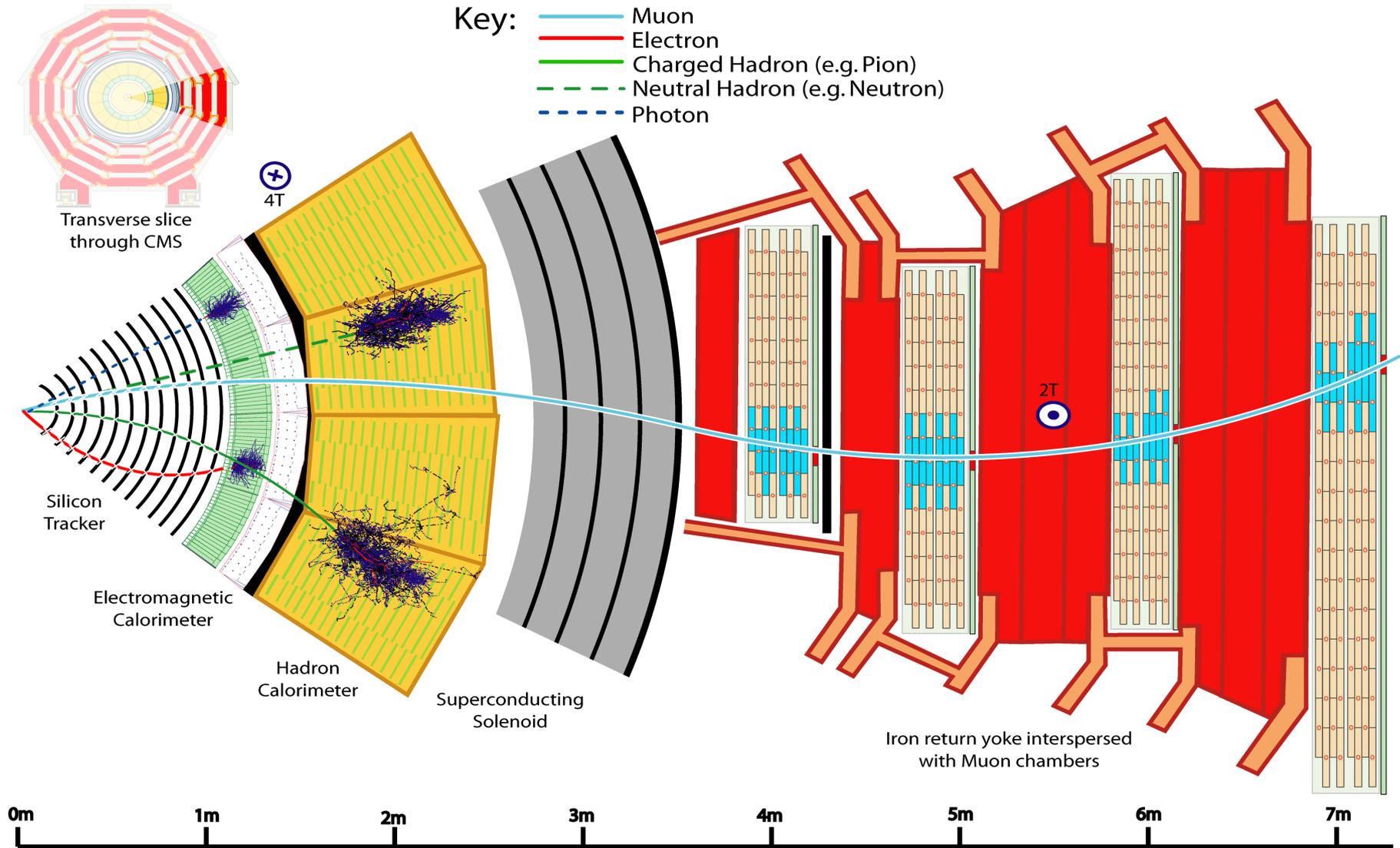
Muon : trace dans le trajectographe, peu de dépôt dans les calorimètres, trace dans les chambres à muons

Signature expérimentale : l'électron



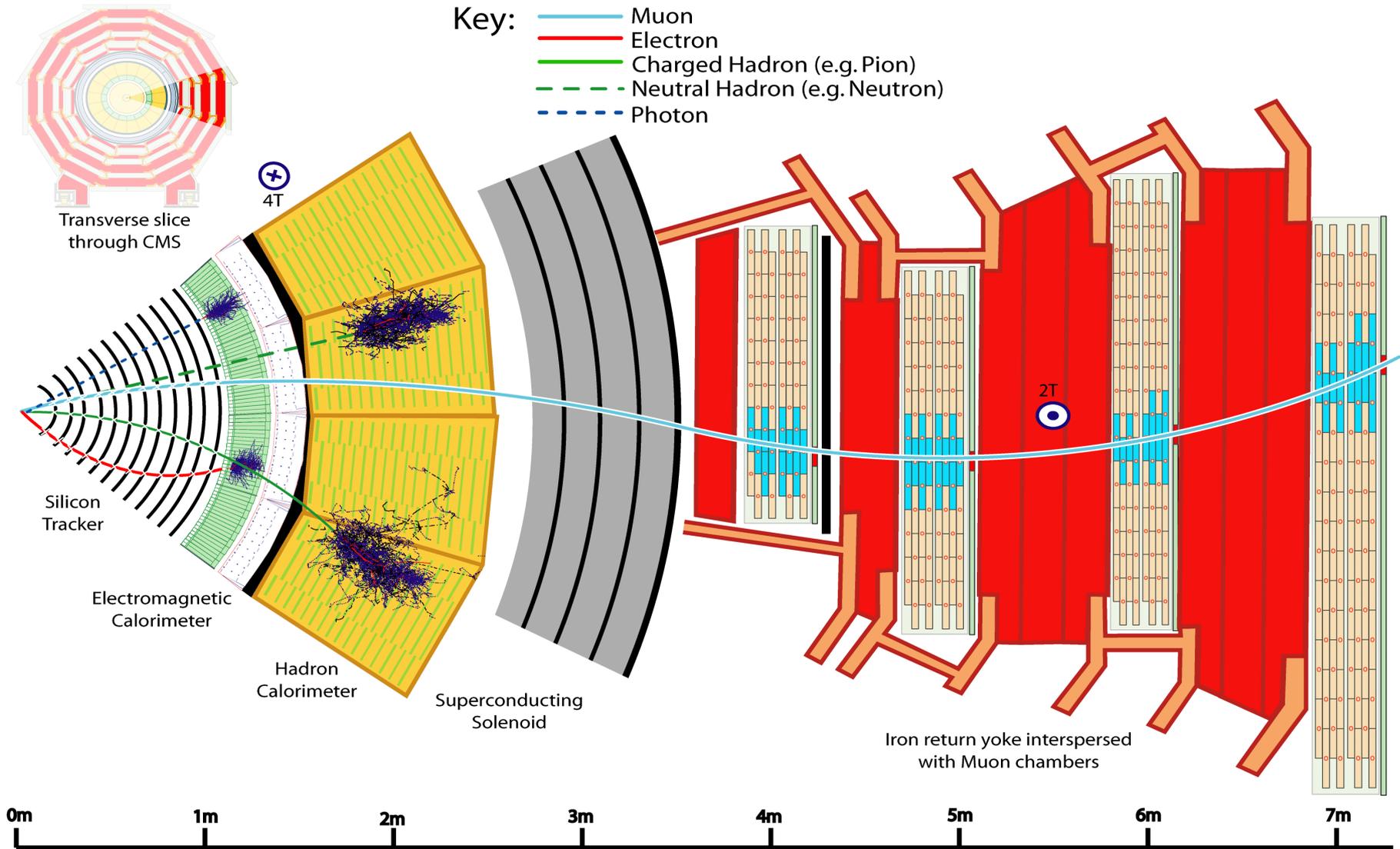
Electron ?

Signature expérimentale : l'électron



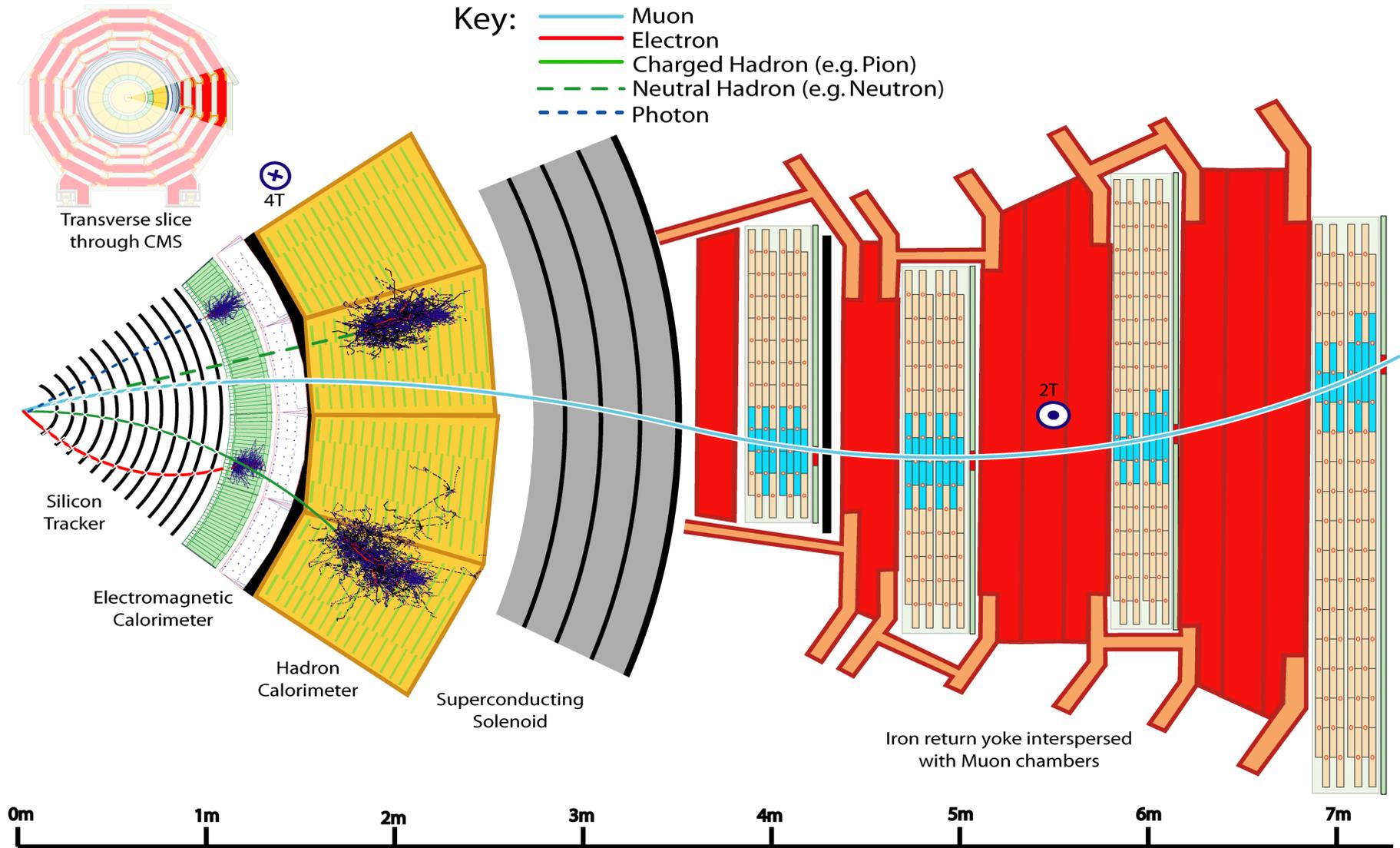
Electron : trace chargée dans le trajectographe et dépôt d'énergie dans le calo électromagnétique

Signature expérimentale : le neutrino



Neutrino ?

Signature expérimentale : le neutrino



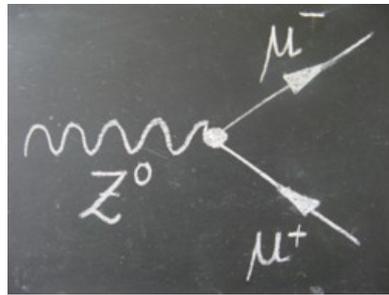
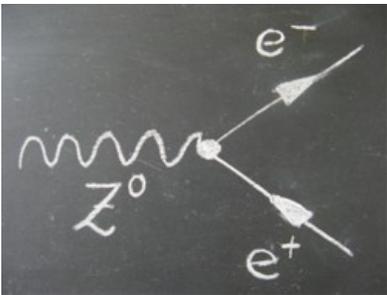
Neutrino : pas de trace ni dépôt d'énergie : le neutrino n'est pas détecté expérimentalement

Qu'allons nous chercher ?

Aujourd'hui on va analyser des données récoltées pendant l'année 2011 avec le détecteur CMS.
Parmi ces données on va chercher deux types d'événements :

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

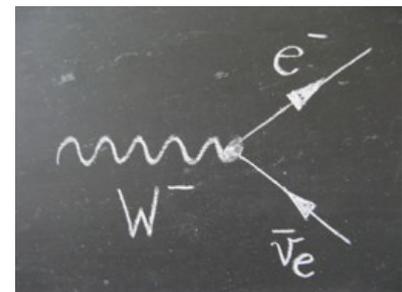
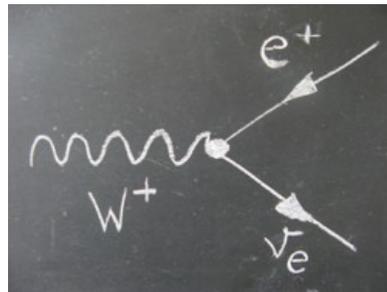
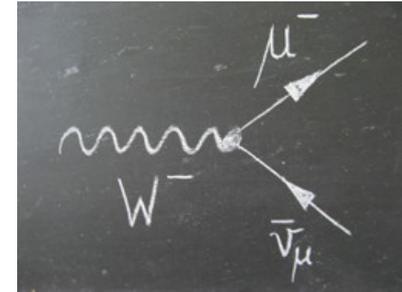
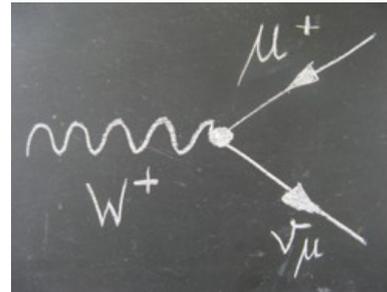
les Z se désintègrent en 2 leptons



$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

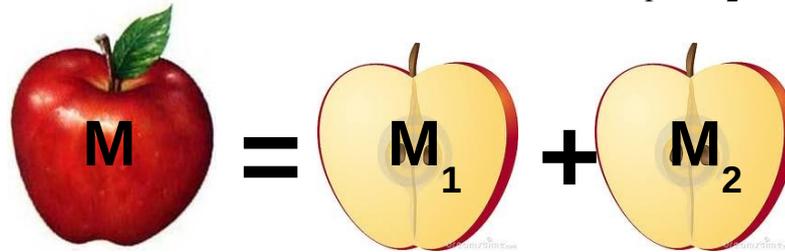
$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$

Les W se désintègrent en lepton neutrino



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**:

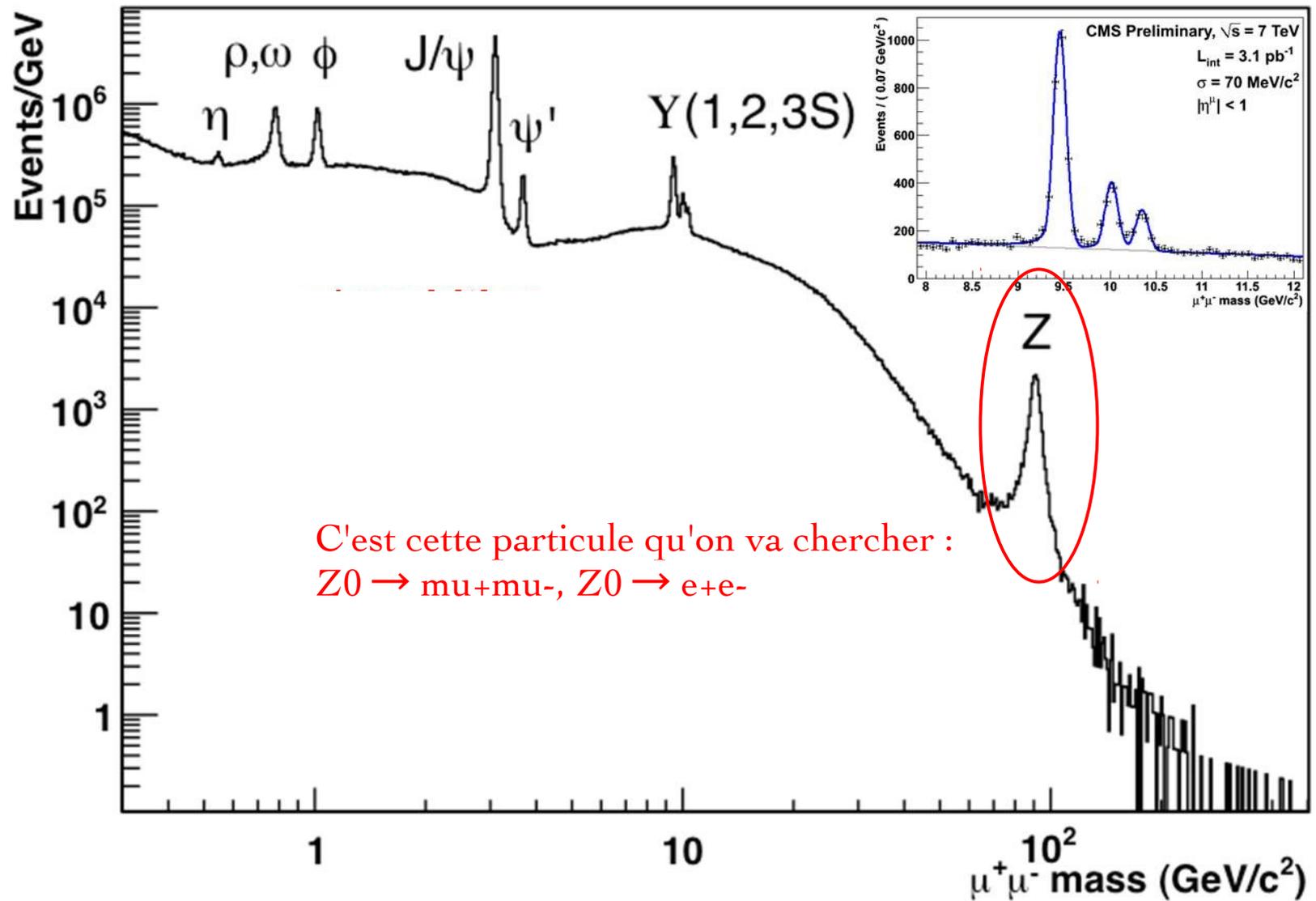
$$M^{inv} c^2 = \sqrt{E^2 - p_x^2 c^2 - p_y^2 c^2 - p_z^2 c^2}$$

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

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

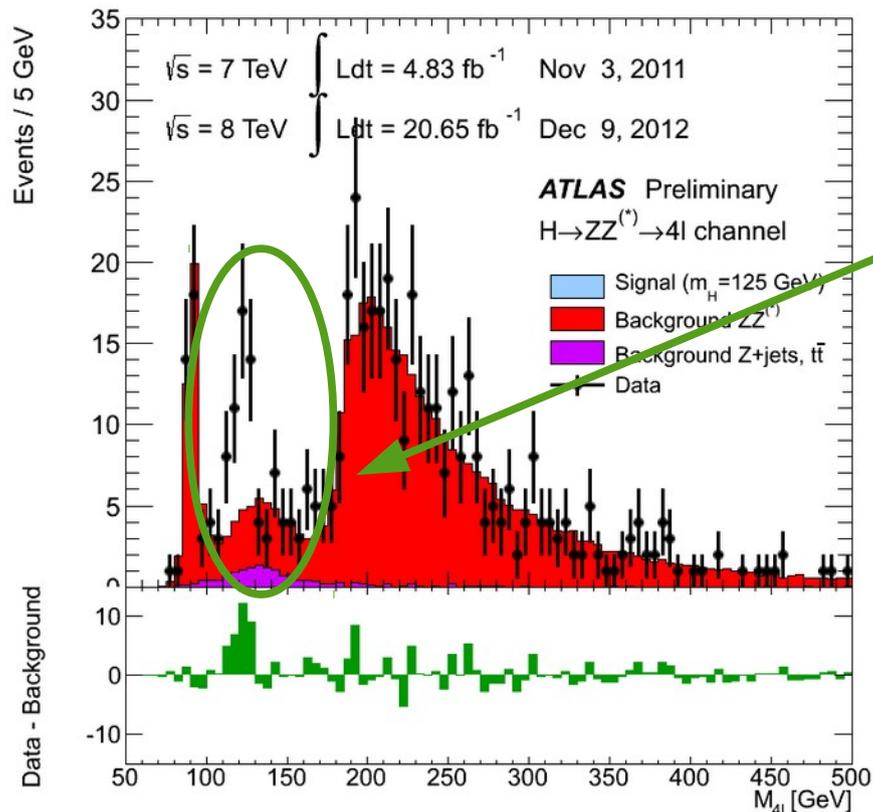
Masse invariante des deux leptons

Distribution de la masse invariante de paires de muons



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 :

[/Users/sordini/Desktop/4l-FixedScale-NoMu](#)

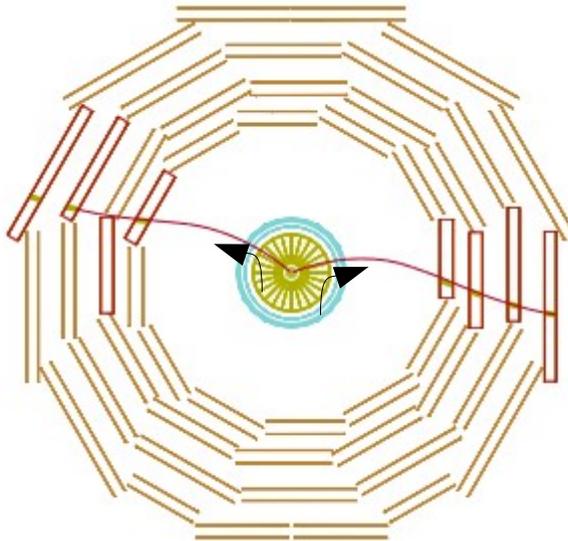


Particule neutre créée dans les collisions qui se désintègre en deux leptons, ($\mu^+ \mu^-$ ou $e^+ e^-$)

- Les leptons ont la même saveur et charge opposée
- L'événement ne contient pas beaucoup plus que les deux leptons en question.
- Quantités conservées : 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 (μ^-)

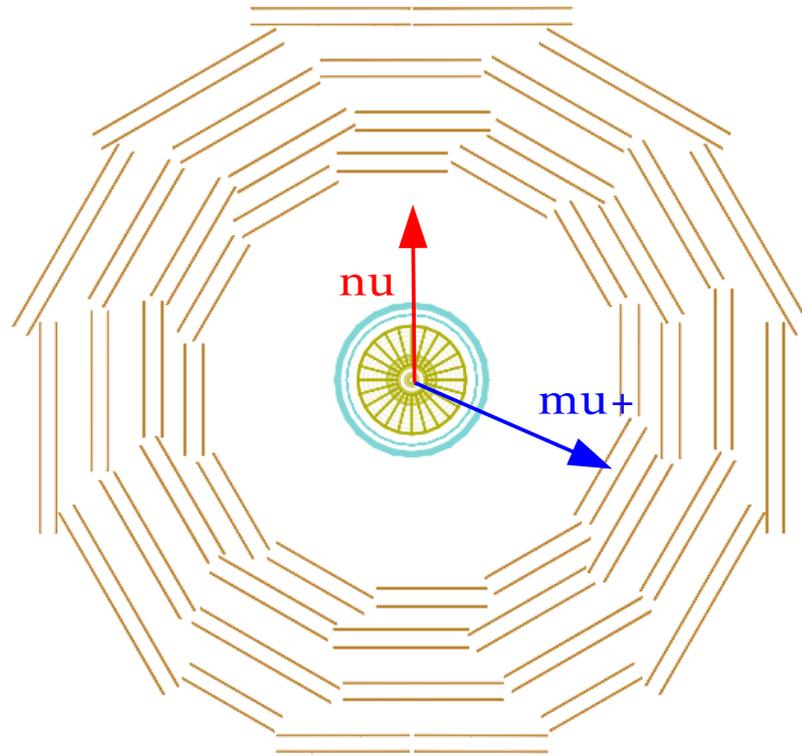


Trace courbée dans le sens des aiguilles d'une montre : charge positive (μ^+)

$$W \rightarrow \mu \nu_{\mu} \quad W \rightarrow e \nu_e$$

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

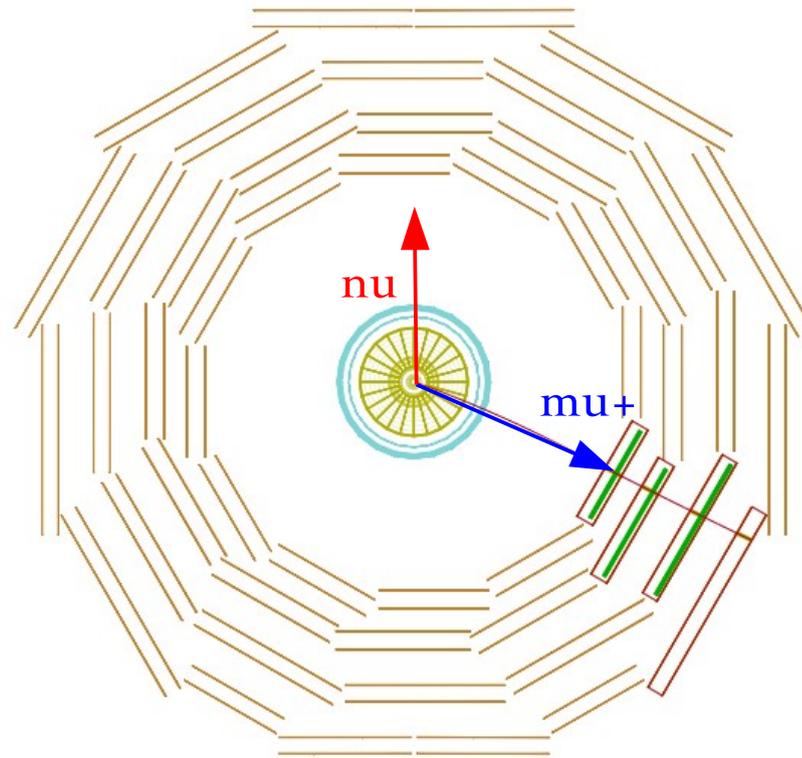
$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\mu}$$



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



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^+ .



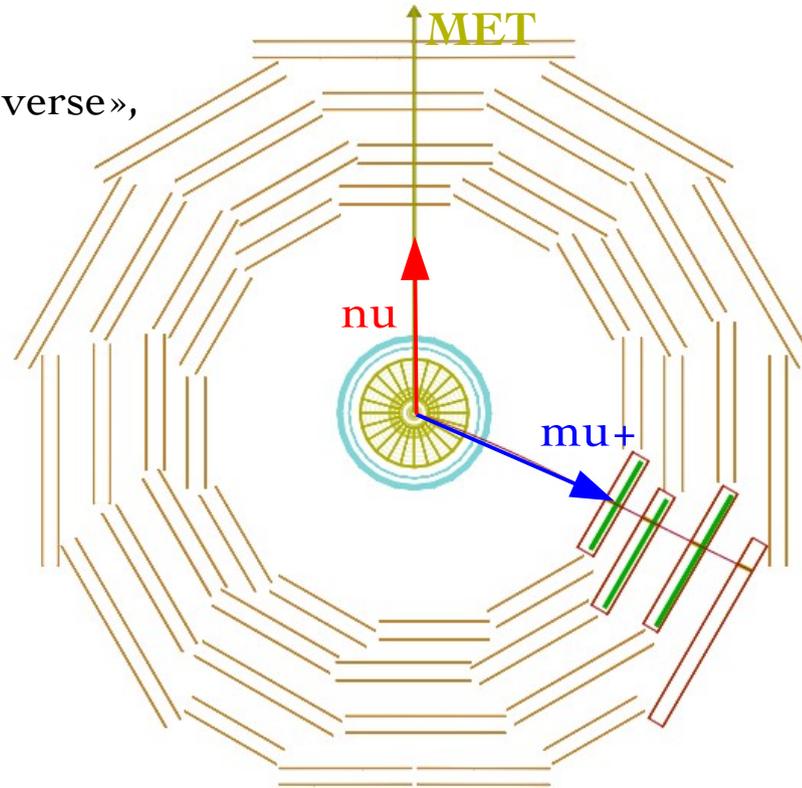
Le neutrino n'est pas observé.

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

Si 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 données récoltées pendant l'année 2012 avec le détecteur CMS.
Parmi ces données on va chercher deux types d'événements :

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

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 (MET < 20 GeV)

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

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

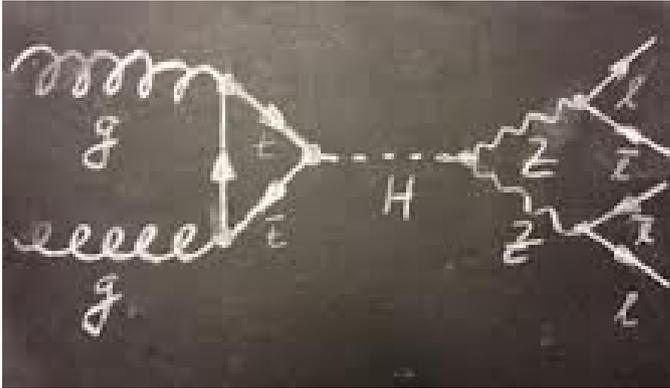
$$W^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu \quad W^- \rightarrow e^- \nu_e$$

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

Qu'allons nous chercher

...en cherchant des Z...



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

Il pourrait y avoir une particule qui se désintègre en ZZ
chaque Z se désintègre en 2 leptons

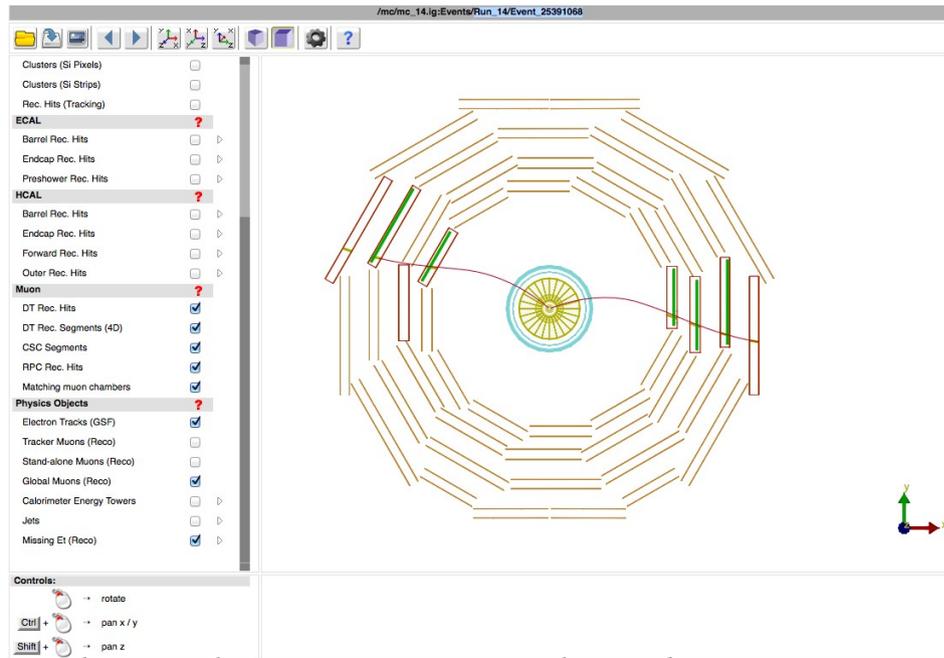
- de charge opposée
- de même saveur (2 muons ou 2 électrons)
- pas beaucoup d'activité additionnelle dans l'événement (MET < 20 GeV)

La masse invariante des 4 leptons dans l'état finale va ensuite nous dire quelle est la masse de la mystérieuse particule X

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 feuille excel avec liste d'événements à analyser



| A1 | f ₀ | | Dataset | | | | | | | | | | |
|-----|----------------|--------|-----------|----------|------|---------|---------|--------|--------|-------|---------|------|------------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
| 1 | Dataset | Ord No | Ev No | electron | muon | W+ cand | W- cand | W cand | Z cand | "zoo" | ZZ cand | Mass | Mass-->odd |
| 215 | masterclass_3 | 204 | 115180352 | | | | | | | | | | |
| 216 | masterclass_3 | 205 | 118510854 | | | | | | | | | | |
| 217 | masterclass_3 | 206 | 120218778 | | | | | | | | | | |
| 218 | masterclass_3 | 207 | 120706369 | | | | | | | | | | |
| 219 | masterclass_3 | 208 | 127095686 | | | | | | | | | | |
| 220 | masterclass_3 | 209 | 130593477 | | | | | | | | | | |
| 221 | masterclass_3 | 210 | 130601256 | | | | | | | | | | |
| 222 | masterclass_3 | 211 | 139591470 | | | | | | | | | | |
| 223 | masterclass_3 | 212 | 139984297 | | | | | | | | | | |
| 224 | masterclass_3 | 213 | 140664090 | | | | | | | | | | |
| 225 | masterclass_3 | 214 | 141933955 | | | | | | | | | | |
| 226 | masterclass_3 | 215 | 142471053 | | | | | | | | | | |
| 227 | masterclass_3 | 216 | 142715334 | | | | | | | | | | |
| 228 | masterclass_3 | 217 | 147313218 | | | | | | | | | | |
| 229 | masterclass_3 | 218 | 15395536 | | | | | | | | | | |
| 230 | masterclass_3 | 219 | 156900355 | | | | | | | | | | |
| 231 | masterclass_3 | 220 | 164518991 | | | | | | | | | | |
| 232 | masterclass_3 | 221 | 173183638 | | | | | | | | | | |
| 233 | masterclass_3 | 222 | 188499351 | | | | | | | | | | |
| 234 | masterclass_3 | 223 | 207058976 | | | | | | | | | | |
| 235 | masterclass_3 | 224 | 215167651 | | | | | | | | | | |
| 236 | masterclass_3 | 225 | 223957361 | | | | | | | | | | |
| 237 | masterclass_3 | 226 | 226401140 | | | | | | | | | | |
| 238 | masterclass_3 | 227 | 228618167 | | | | | | | | | | |
| 239 | masterclass_3 | 228 | 228733310 | | | | | | | | | | |

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

- un événement avec un W
- un événement avec un Z
- un événement avec deux Z
- rien de tout cela, ce qu'on appellera événement «zoo»

Comment allons nous chercher, outils

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|---------------|--------|-----------|----------|------|---------|---------|--------|--------|-------|---------|------|------------|
| Dataset | Ord No | Ev No | electron | muon | W+ cand | W- cand | W cand | Z cand | "zoo" | ZZ cand | Mass | Mass-->odd |
| masterclass_3 | 204 | 115180352 | | | | | | | | | | |
| masterclass_3 | 205 | 118110854 | | | | | | | | | | |
| masterclass_3 | 206 | 120218778 | | | | | | | | | | |
| masterclass_3 | 207 | 120706369 | | | | | | | | | | |
| masterclass_3 | 208 | 127095686 | | | | | | | | | | |
| masterclass_3 | 209 | 130593477 | | | | | | | | | | |

Identifiant de l'événement

Mettez 1 ici si l'événement contient un ou 2 électrons

1 ici si l'événement contient un ou 2 muons

1 ici si l'événement contient un W+

1 ici si l'événement contient un W-

1 ici si l'événement contient un W mais vous n'arrivez pas à voir la charge

1 ici si l'événement contient un Z

1 ici si l'événement n'est pas un bon W ni un bon Z (zoo)

1 ici si l'événement contient deux Z

Si vous avez mis 1 à la colonne Z, une masse va apparaître en vert ici : c'est la masse invariante des deux leptons de l'événement (mass→odd est la même valeur arrondie)

/mc/mc_14.ig:Events/Run_14/Event_25391068

Identifiant de l'événement
(le même que sur la feuille excel)

Cliquez ici pour changer la perspective
(x,y utile pour voir la courbure)

Cliquez ici pour passer d'un événement à l'autre

Observez la courbure des traces dans la partie interne pour déterminer leur charge (dans le sens des aiguilles d'une montre : charge positive)

Cliquez ici pour visualiser les différents sous-détecteurs, objets
(vous trouverez une configuration initiale appropriée !)

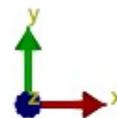
Rotation, zoom



- Clusters (Si Pixels)
- Clusters (Si Strips)
- Rec. Hits (Tracking)
- ECAL** ?
- Barrel Rec. Hits ▷
- Endcap Rec. Hits ▷
- Preshower Rec. Hits ▷
- HCAL** ?
- Barrel Rec. Hits ▷
- Endcap Rec. Hits ▷
- Forward Rec. Hits ▷
- Outer Rec. Hits ▷
- Muon** ?
- DT Rec. Hits
- DT Rec. Segments (4D)
- CSC Segments
- RPC Rec. Hits
- Matching muon chambers
- Physics Objects** ?
- Electron Tracks (GSF)
- Tracker Muons (Reco)
- Stand-alone Muons (Reco)
- Global Muons (Reco)
- Calorimeter Energy Towers ▷
- Jets ▷
- Missing Et (Reco) ▷

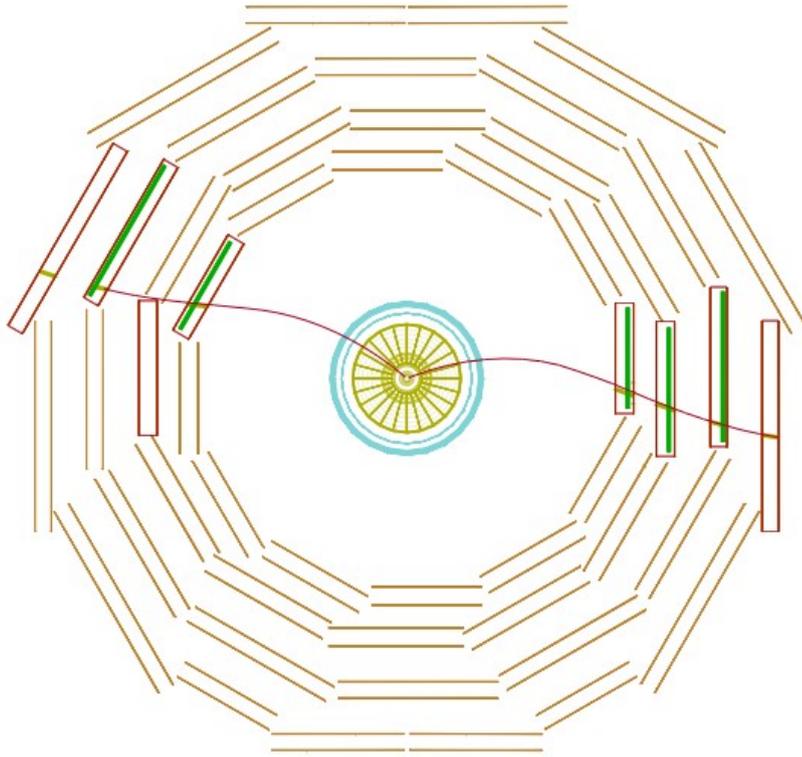
Controls:

- rotate
- Ctrl** + → pan x / y
- Shift** + → pan z



Recherche du Z^0

Événements avec deux leptons de la même saveur. En ce cas là, **deux muons**



1) Il faut que la charge des leptons soit opposée

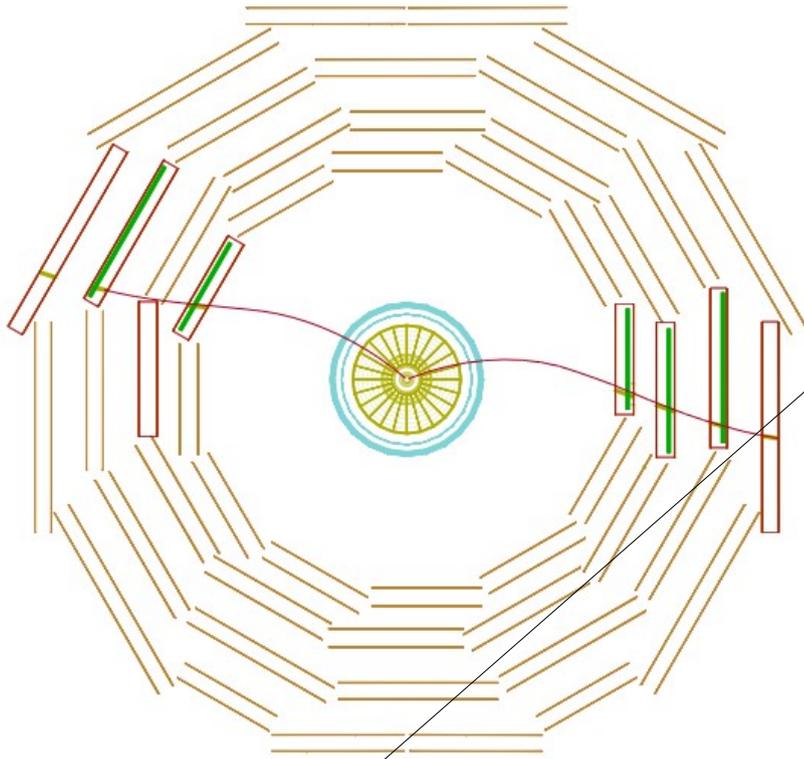
2) Il faut que la valeur de MET soit assez basse (si $MET < 20$ GeV c'est un bon événement Z). MET est 0 dans ce cas là.

→ c'est un **bon événement Z**



Recherche du Z^0

Événements avec deux leptons de la même saveur. En ce cas là, **deux muons**



1) On contrôle que la charge des leptons soit opposée

2) On contrôle que la valeur de MET soit assez basse (si $MET < 20$ GeV c'est un bon événement Z). MET est 0 en ce cas là.

→ c'est un **bon événement Z**

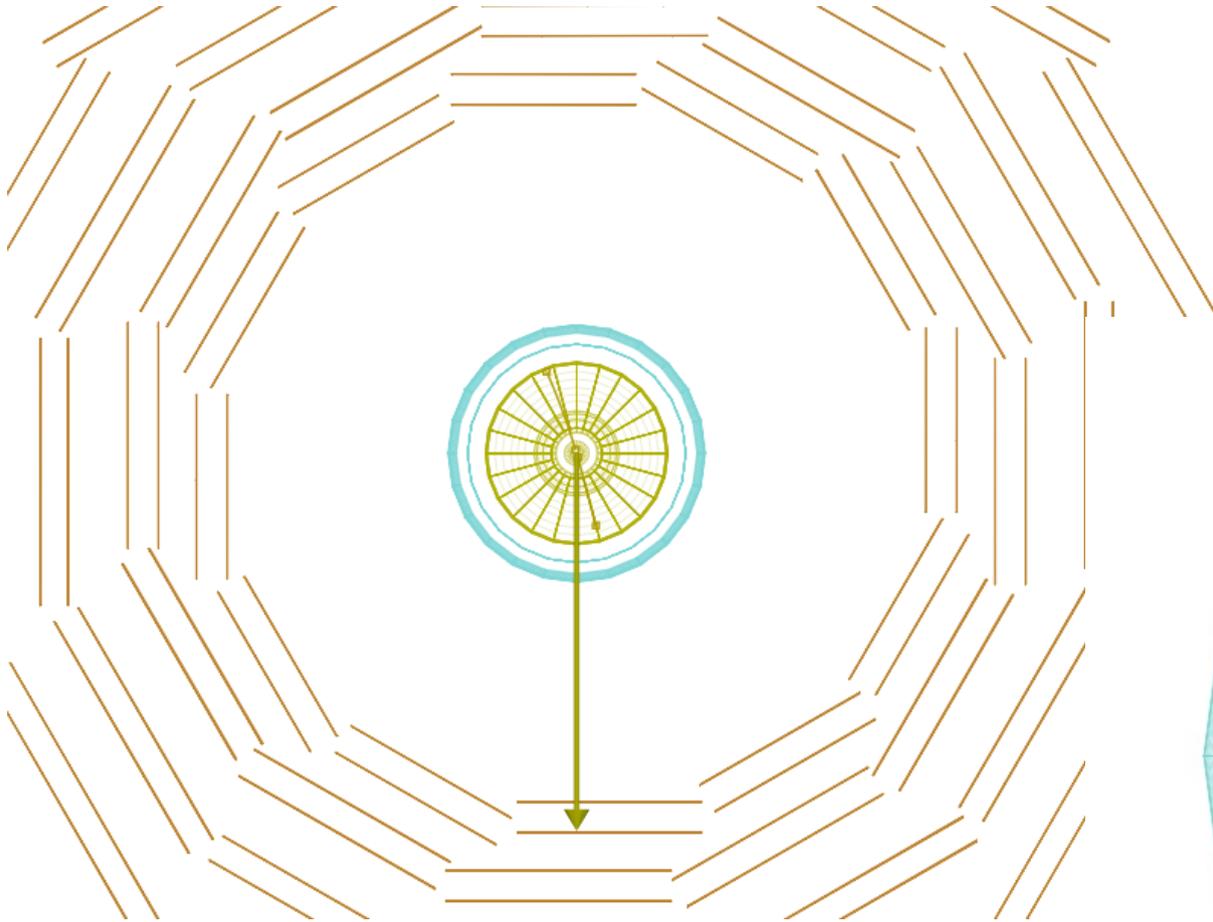


| | | | | | | | | | |
|----------|------|---------|---------|--------|--------|-------|---------|------|------------|
| electron | muon | W+ cand | W- cand | W cand | Z cand | "zoo" | ZZ cand | Mass | Mass-->odc |
| | 1 | | | | 1 | | | | |

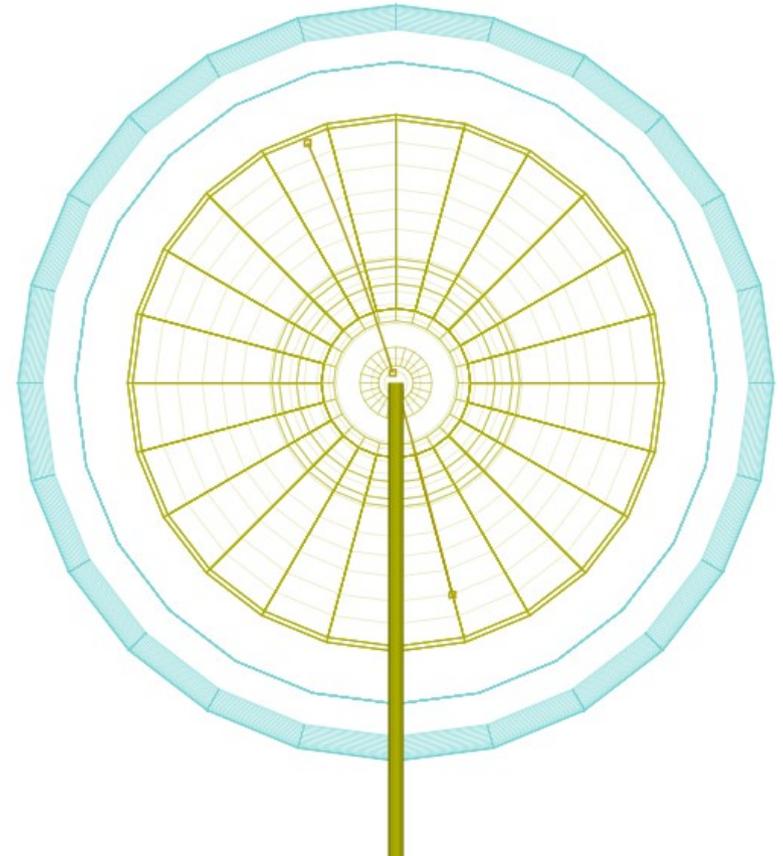
La valeur de la masse invariante va apparaître ici

Recherche du Z^0

Événements avec deux électrons et MET

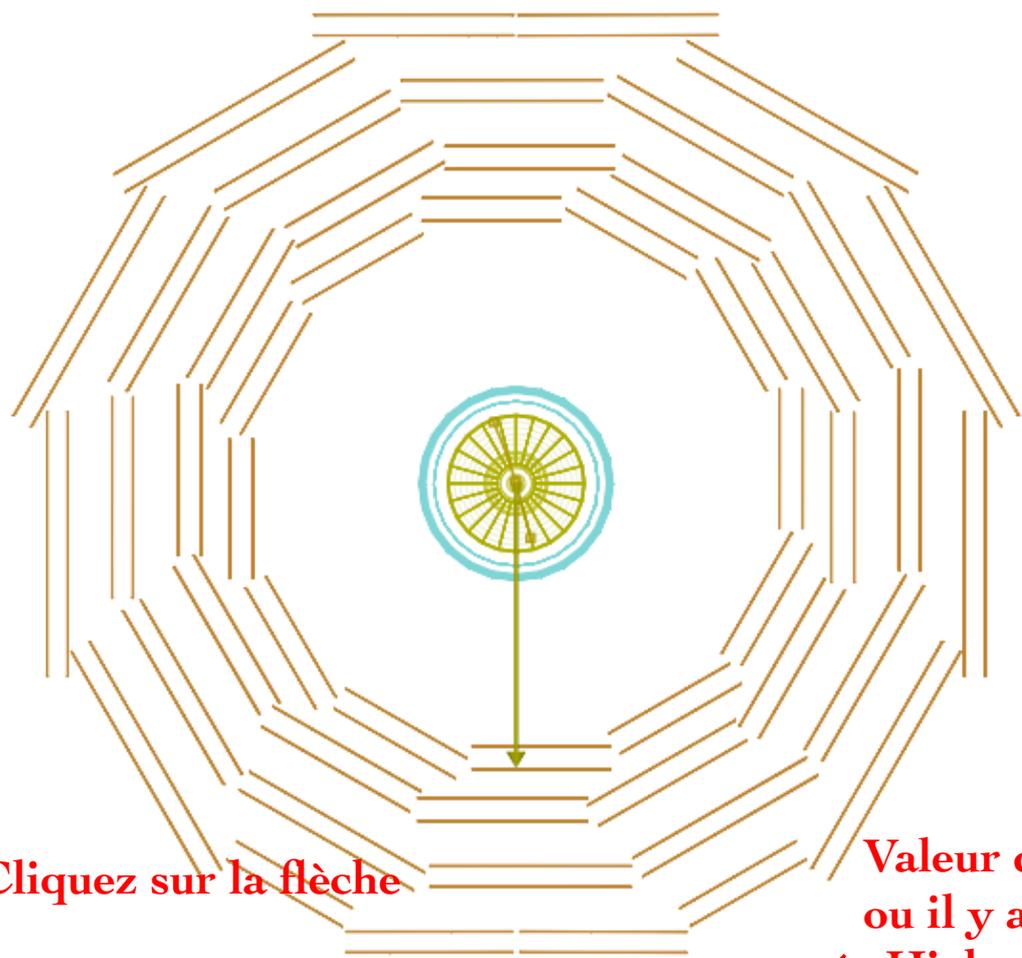


1) On contrôle que la charge des leptons est opposée : Zoom pour voir la courbure des électrons (utilisez une feuille en papier si c'est très difficile à voir !)



2) On contrôle que la valeur de MET est assez basse (si $MET < 20$ GeV c'est un bon événement Z)

- Clusters (Si Pixels)
 - Clusters (Si Strips)
 - Rec. Hits (Tracking)
 - ECAL** ?
 - Barrel Rec. Hits ▷
 - Endcap Rec. Hits ▷
 - Preshower Rec. Hits ▷
 - HCAL** ?
 - Barrel Rec. Hits ▷
 - Endcap Rec. Hits ▷
 - Forward Rec. Hits ▷
 - Outer Rec. Hits ▷
 - Muon** ?
 - DT Rec. Hits
 - DT Rec. Segments (4D)
 - CSC Segments
 - RPC Rec. Hits
 - CSC Rec. Hits (2D)
 - Physics Objects** ?
 - Electron Tracks (GSF)
 - Tracker Muons (Reco)
 - Stand-alone Muons (Reco)
 - Global Muons (Reco)
 - Calorimeter Energy Towers ▷
 - Jets
 - Missing Et (Reco)** ▷
- Controls:**
- rotate
 - Ctrl** + → pan x / y
 - Shift** + → pan z



Cliquez sur la flèche

Valeur de MET (la ou il y a écrit «High cut»)

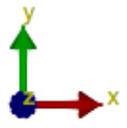
Energy Range Selector ✕

Energy range for Missing Et (Reco)

Low cut: 3.74 GeV (75%)

High cut: 4.98 GeV (100%)

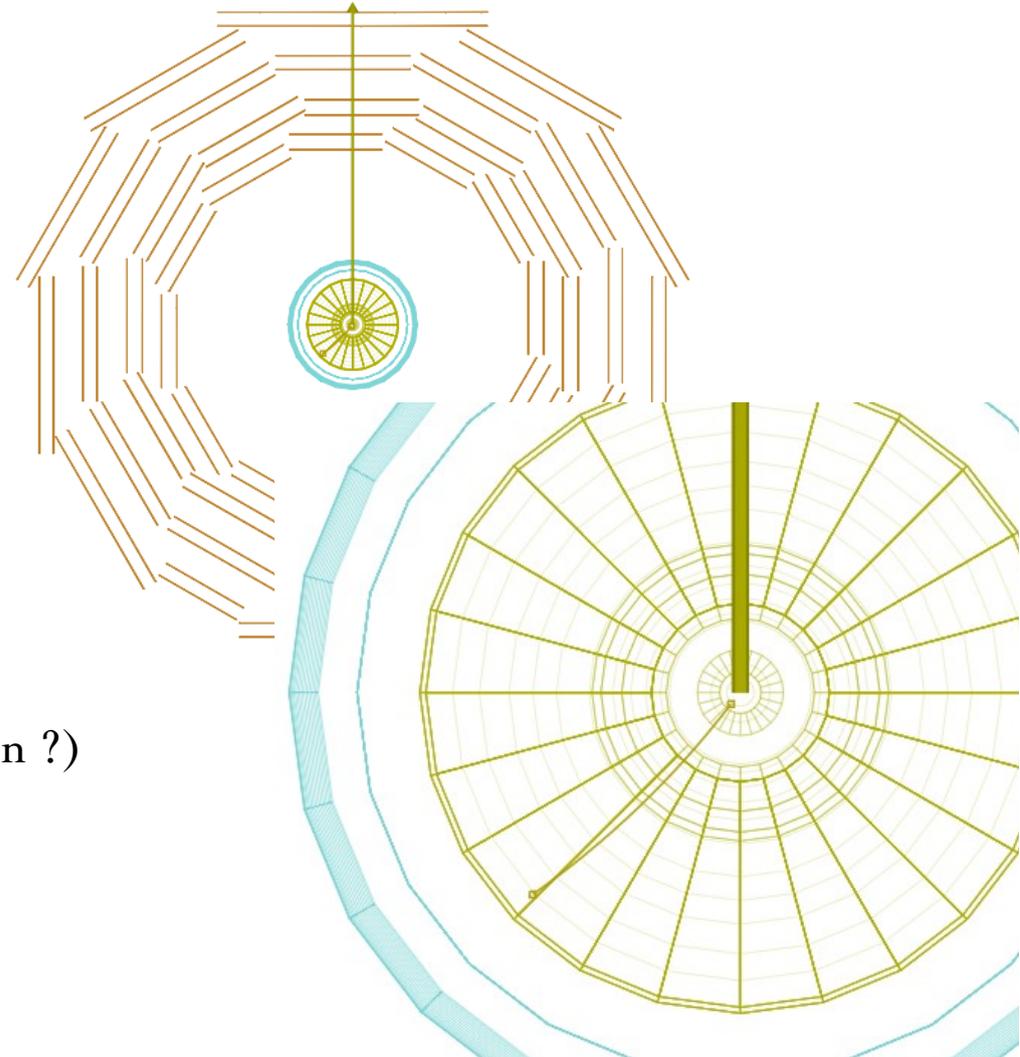
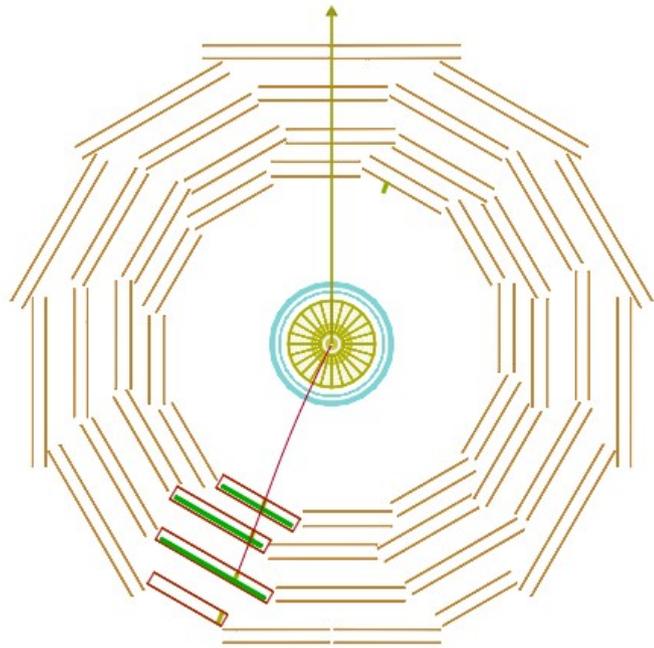
MET~5 GeV, c'est à dire MET < 20 GeV. c'est un bon événement



| electron | muon | W+ cand | W- cand | W cand | Z cand | "zoo" | ZZ cand | Mass | Mass-->odc |
|----------|------|---------|---------|--------|----------|-------|---------|------|------------|
| 1 | | | | | 1 | | | | |

Recherche du W^+ ou W^-

Événements avec un lepton et MET

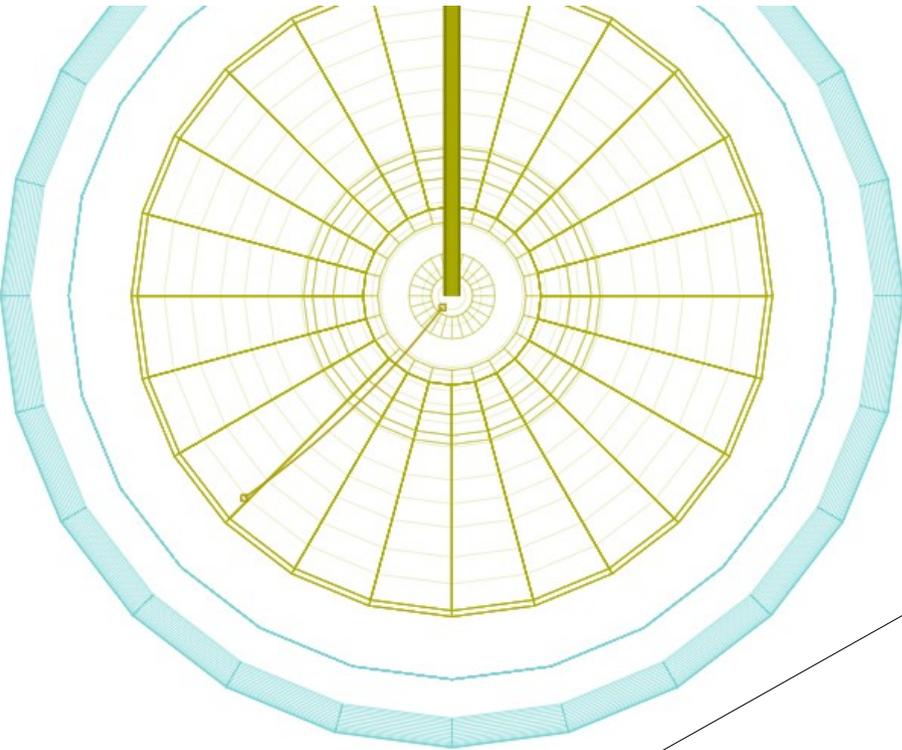


- 1) Saveur du lepton (c'est un électron ou un muon ?)
- 2) charge du lepton
- 3) il n'y a pas d'autres leptons

→ c'est un **bon événement W**

Recherche du W^+ ou W^-

Événements avec un lepton et MET



- 1) Saveur du lepton : c'est un **électron**
- 2) charge du lepton : trace interne courbée dans le sens des aiguilles d'une montre , **charge +**
- 3) il n'y a pas d'autres leptons

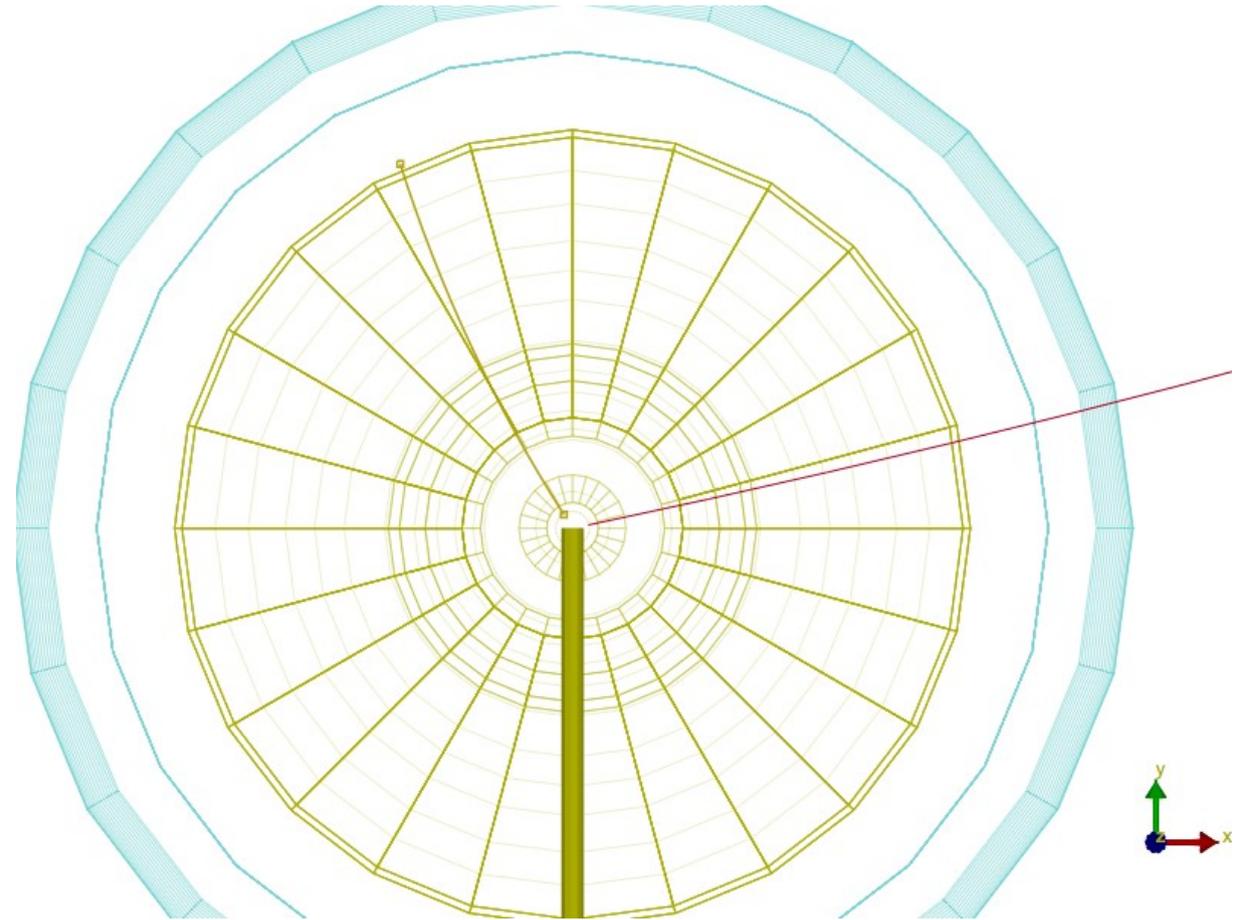
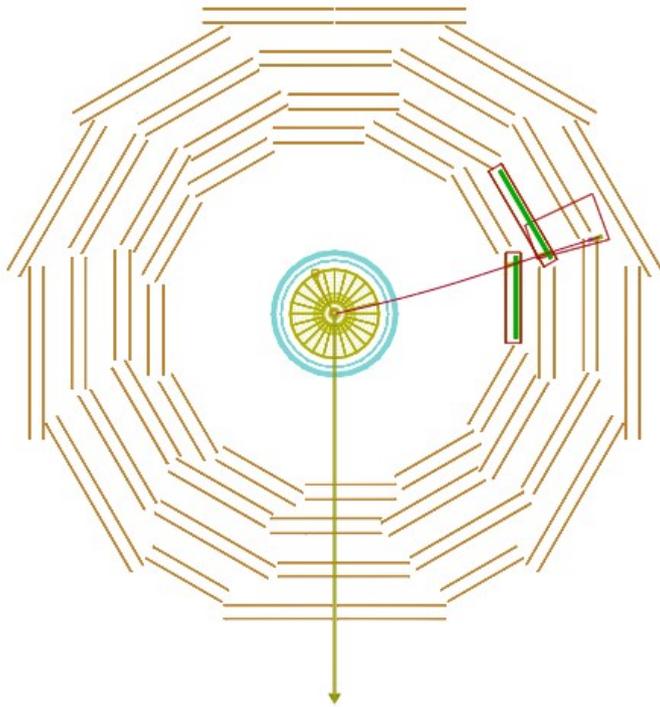
→ c'est un **bon événement W**



| electron | muon | W+ cand | W- cand | W cand | Z cand | "zoo" | ZZ cand | Mass | Mass-->odr |
|----------|------|---------|---------|--------|--------|-------|---------|------|------------|
| 1 | | 1 | | | | | | | |

Exemples d'événements «zoo»

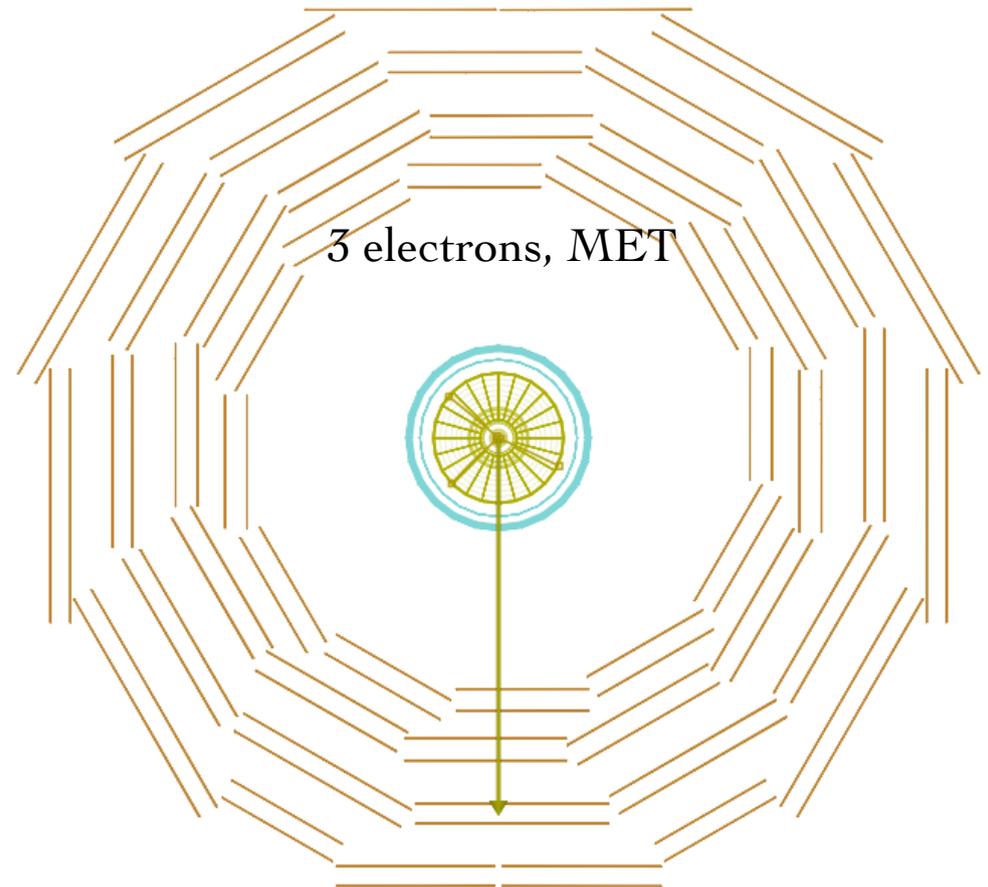
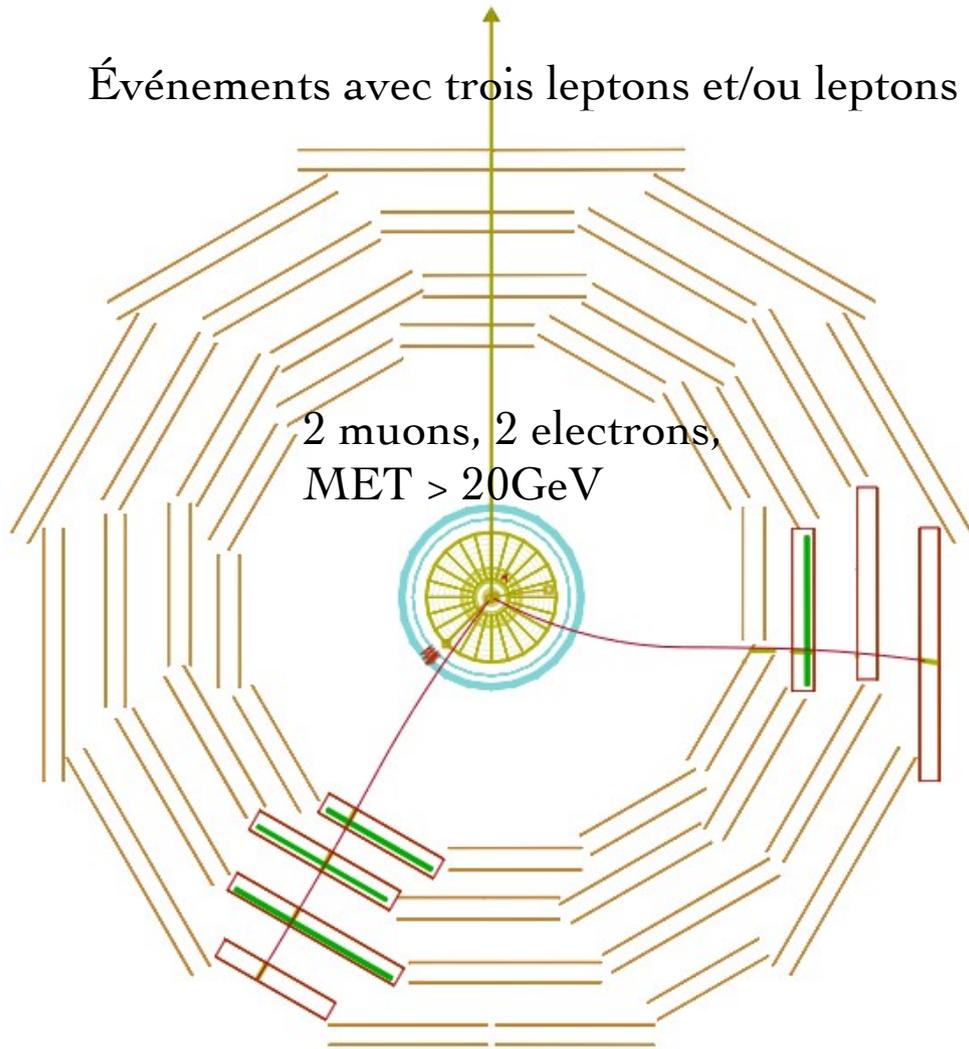
Événements avec deux leptons de saveur différente (μ et e) et MET



| electron | muon | W+ cand | W- cand | W cand | Z cand | "zoo" | ZZ cand | Mass | Mass-->odr |
|----------|------|---------|---------|--------|--------|-------|---------|------|------------|
| | | | | | | 1 | | | |

Exemples d'événements «zoo»

Événements avec trois leptons et/ou leptons de différente saveur et MET

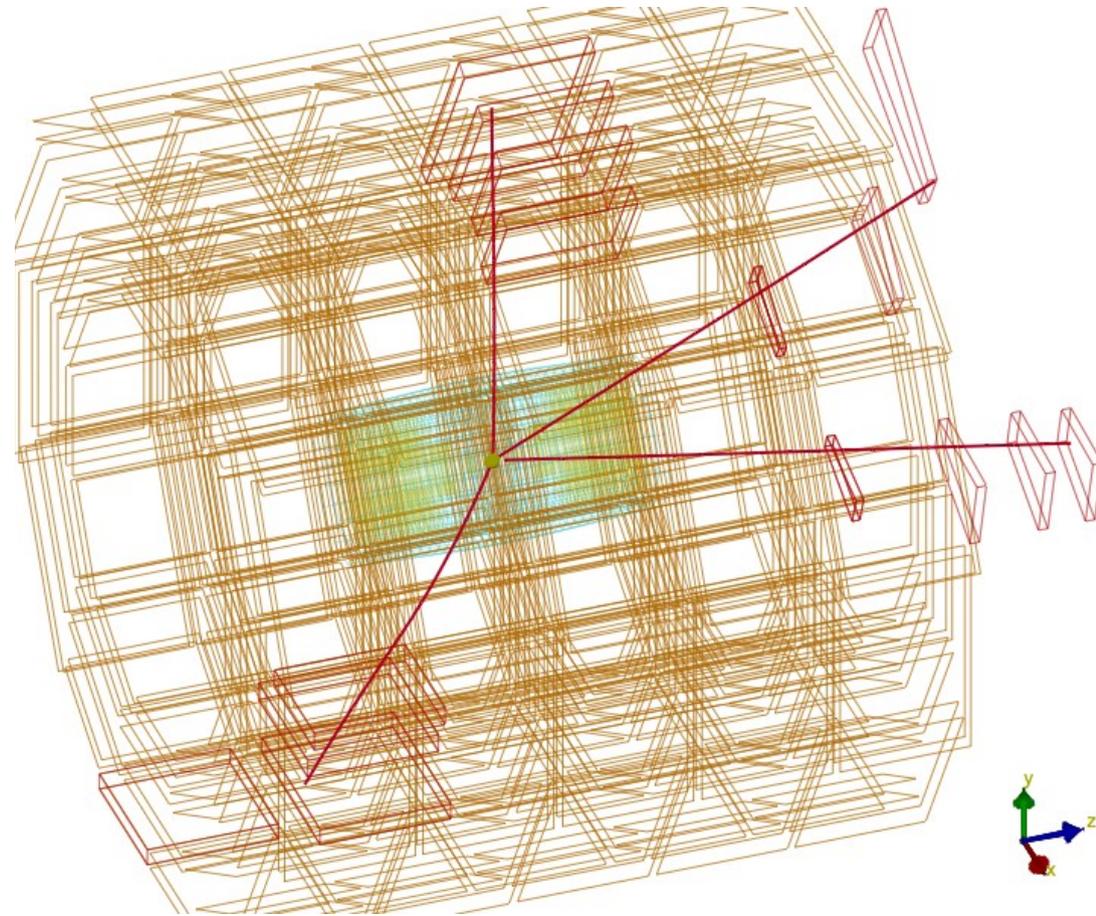
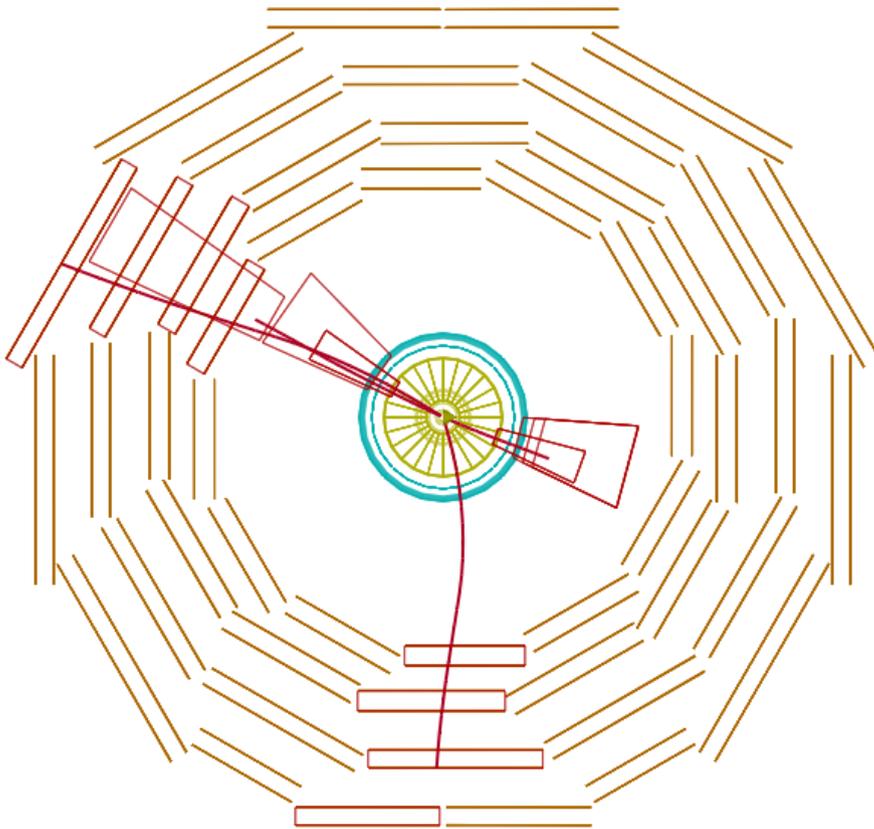


| electron | muon | W+ cand | W- cand | W cand | Z cand | "zoo" | ZZ cand | Mass | Mass-->odr |
|----------|------|---------|---------|--------|--------|-------|---------|------|------------|
| | | | | | | 1 | | | |

À force de chercher des Z...

Événements avec deux paires de deux leptons de même saveur et charge opposée (donc deux candidats Z), $MET < 20$ GeV

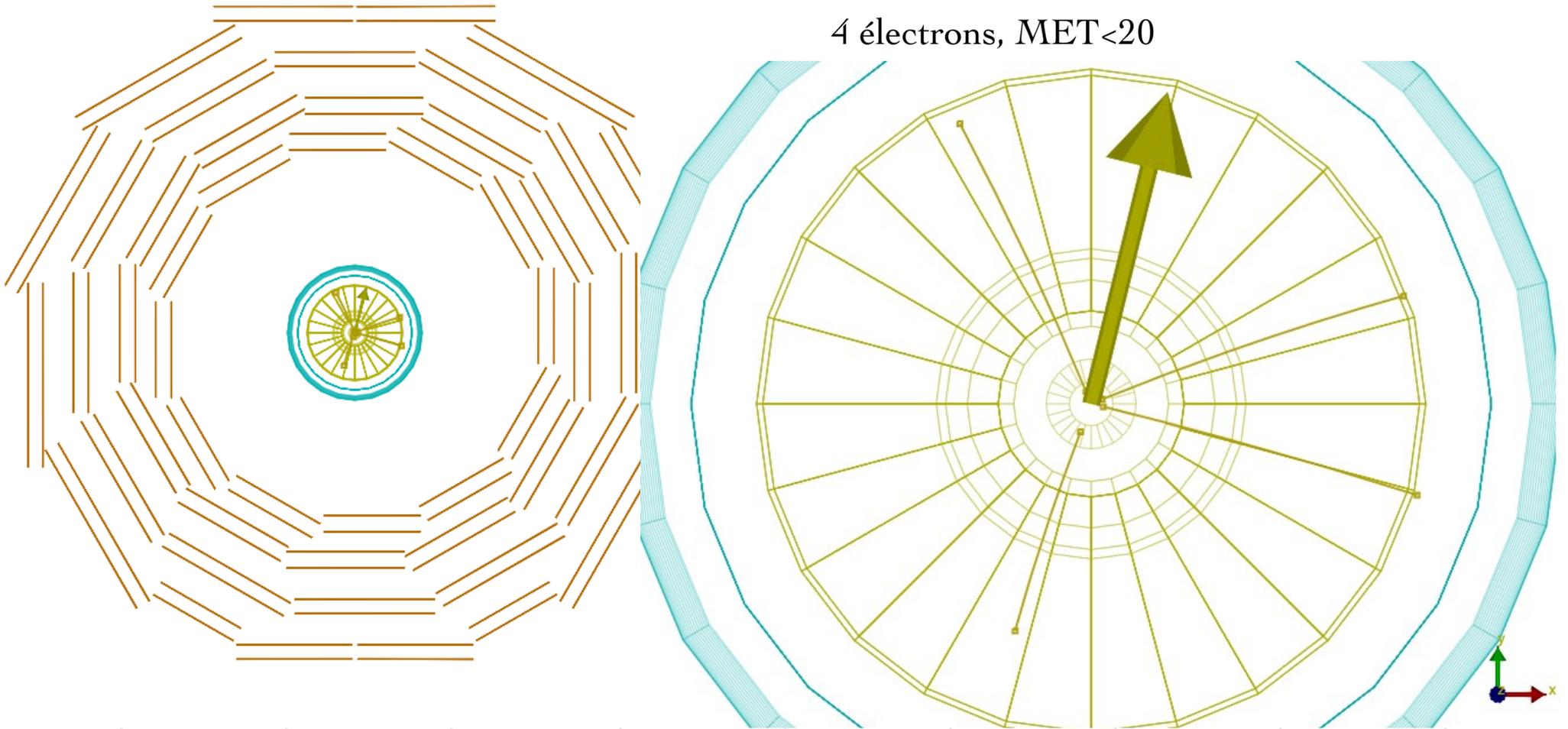
4 muons, $MET \sim 0$



À force de chercher des Z...

Événements avec deux paires de deux leptons de même saveur et charge opposée, $MET < 20$ GeV

4 électrons, $MET < 20$



| | | | | | | | | | |
|----------|------|---------|---------|--------|--------|-------|---------|------|------------|
| electron | muon | W+ cand | W- cand | W cand | Z cand | "zoo" | ZZ cand | Mass | Mass-->odc |
| | | | | | | | 1 | | |

La valeur de la masse invariante va apparaître ici

Classification des événements

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

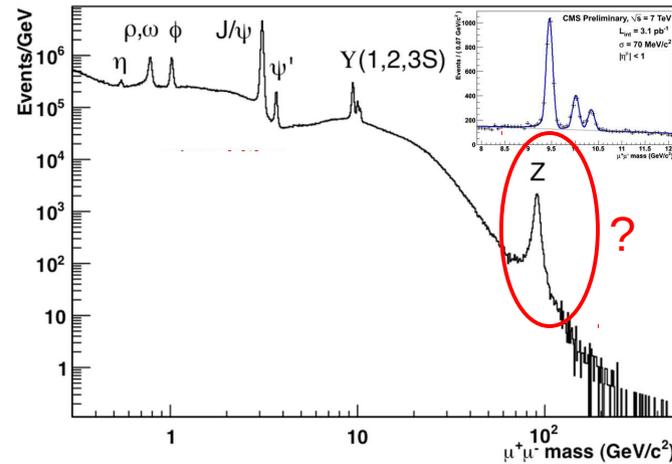
- un événement avec un W (électron ou muon ? W^+ ou W^- ?)
- un événement avec un Z
- un événement avec deux Z
- un événement «zoo»

Remplissez la feuille excel en conséquence

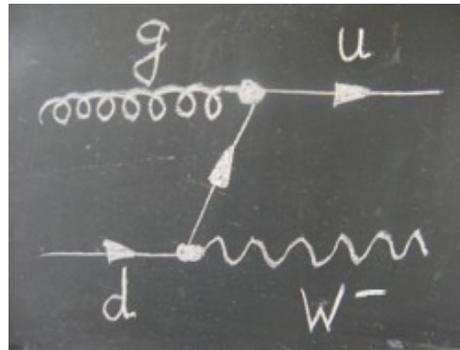
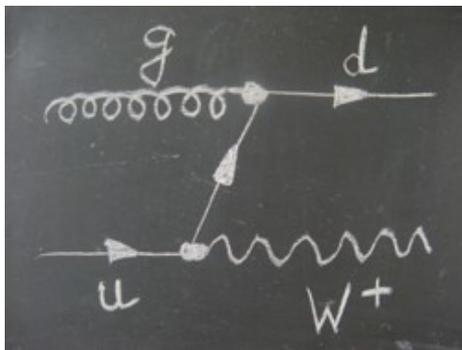
On va ensuite **mettre en commun les résultats de tous les binômes**, pour analyser la totalité des événements

Objectif de l'exercice

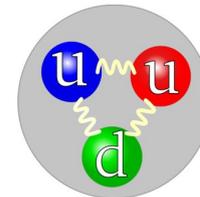
- Construire un spectre de masse invariante des paires de lepton, pour la recherche du Z



- 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_A = E_B + E_C \\ \vec{p}_A = \vec{p}_B + \vec{p}_C \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{On peut donc determiner la masse de} \\ \text{la particule A qui s'est desintegree a} \\ \text{partir des energies et impulsions de} \\ \text{ses produits de desintegration B et C} \end{array} \quad \begin{array}{l} m_A c^2 = \sqrt{(E_A^2 - |\vec{p}_A|^2 c^2)} = \\ = \sqrt{(E_B + E_C)^2 - |\vec{p}_B + \vec{p}_C|^2 c^2} \end{array}$$

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

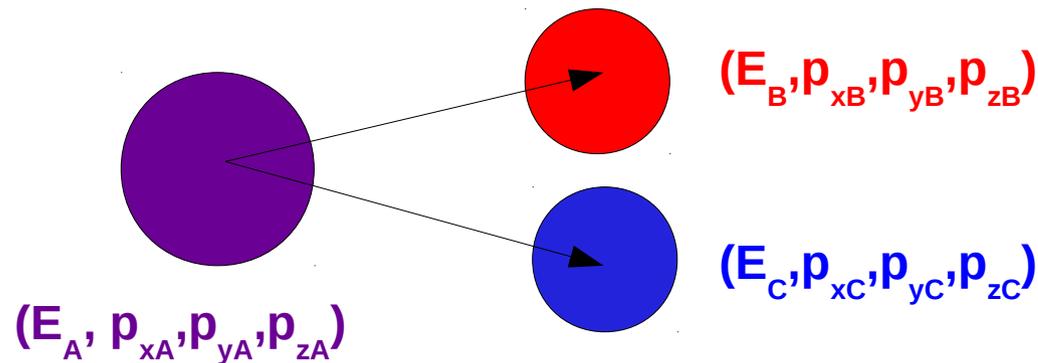
$$m_A = \sqrt{(E_B + E_C)^2 - |\vec{p}_B + \vec{p}_C|^2}$$



: particule cree dans la collision: elle se desintegre tres rapidement donc elle n'est **pas directement visible dans le detecteur**



: produits de desintegration: **c'est eux qu'on observe dans le detecteur.**
On peut mesurer leurs energies et impulsions



La masse de la particule A est accessible:

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

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 composantes de l'impulsion.