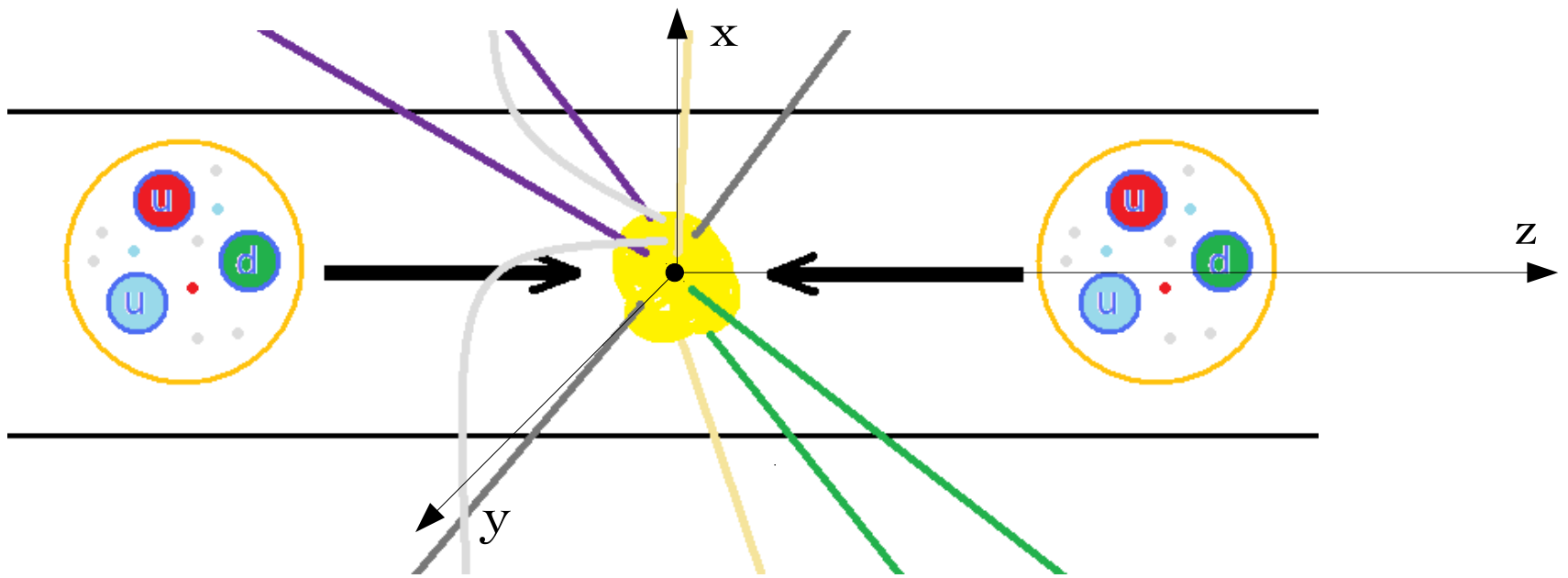


Les collisions proton-proton

- 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



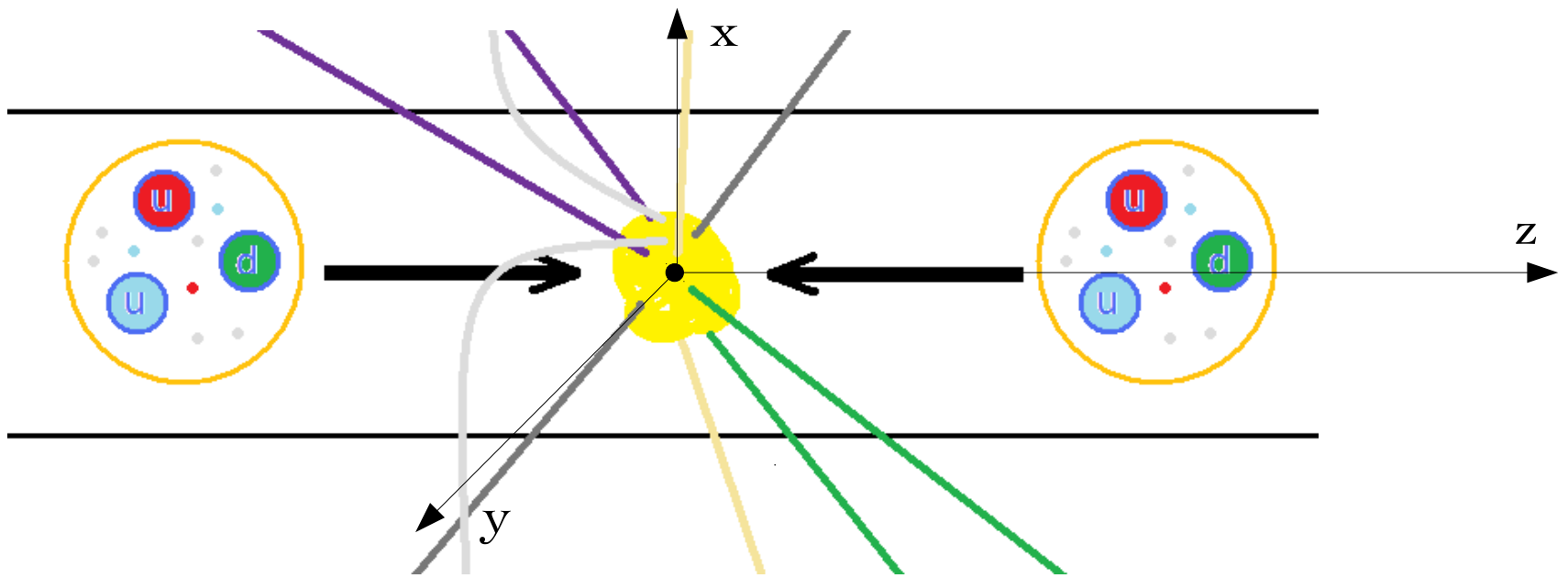
Les collisions proton-proton

- 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 :

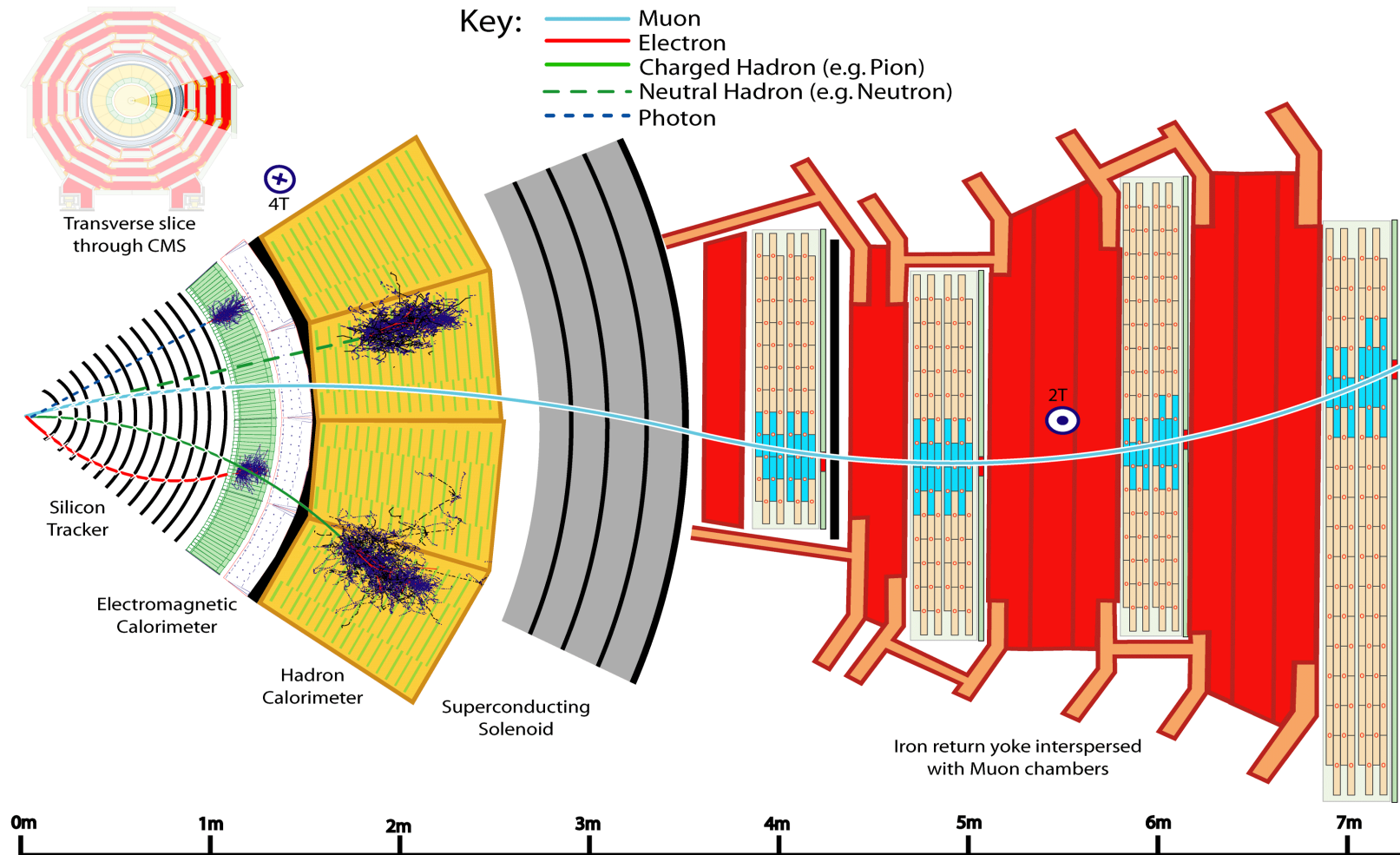
Etat initial, constituants des protons :
énergie seulement le long de z



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

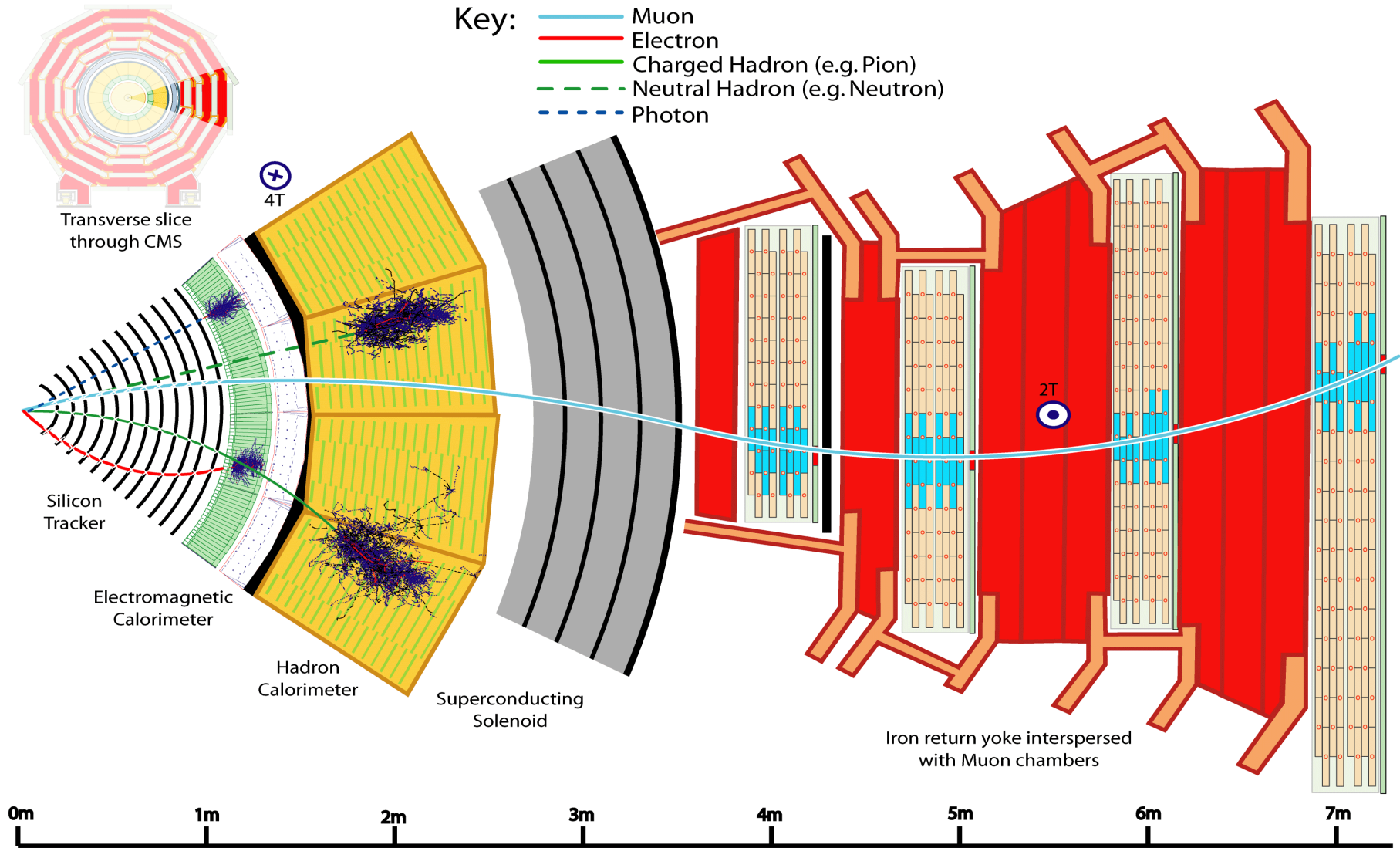


Le détecteur CMS



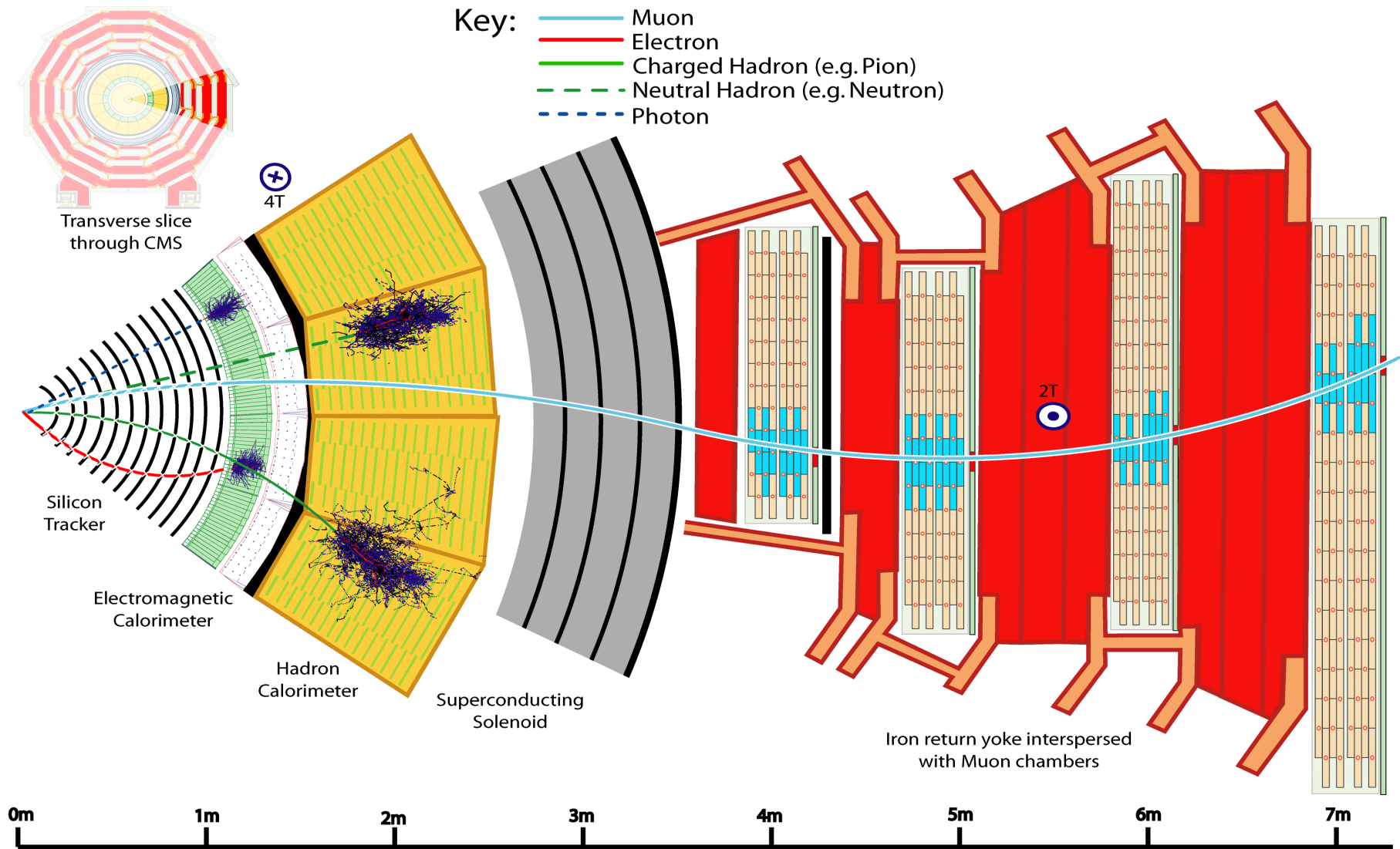
Les collisions produisent des particules au centre du détecteur
Différents détecteurs sont sensibles à différents types de particules
La trajectoire d'une particule chargée est courbée dans un champ magnétique

Signature expérimentale : le muon



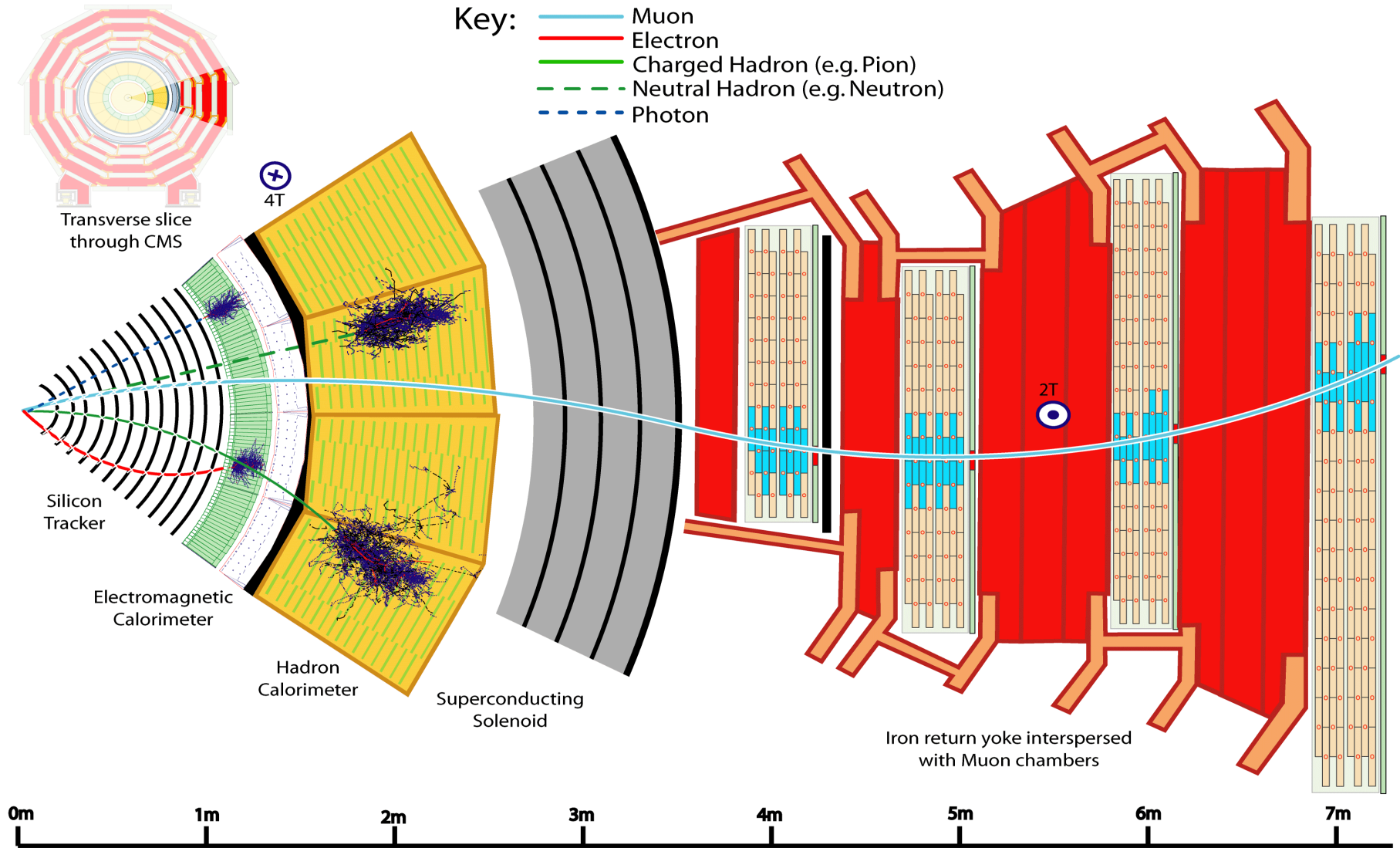
Muon ?

Signature expérimentale : le muon



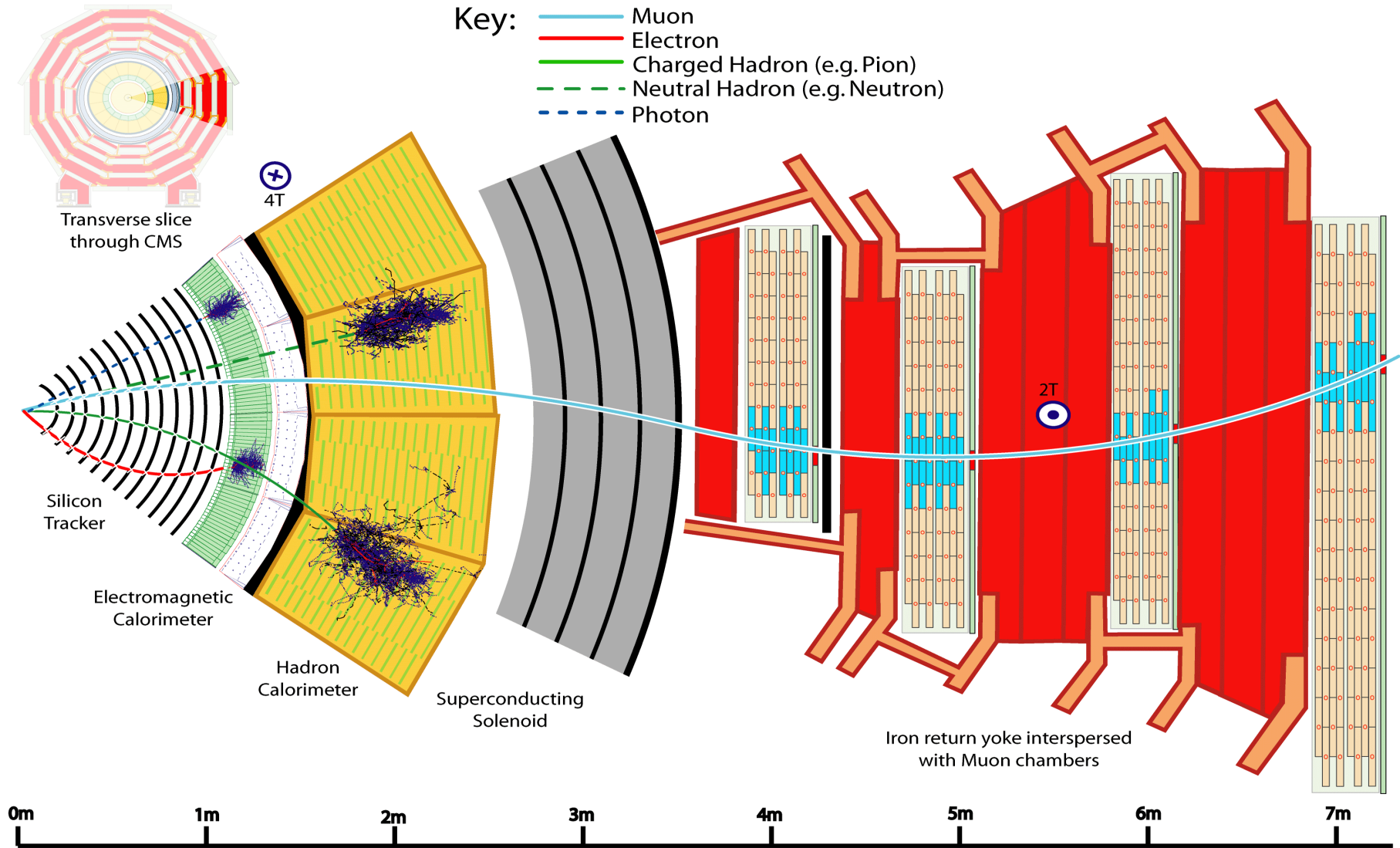
Muon : trace dans le trajectographe, peu de dépôt dans les calorimètres, trace dans les chambres à muons

Signature expérimentale : l'électron



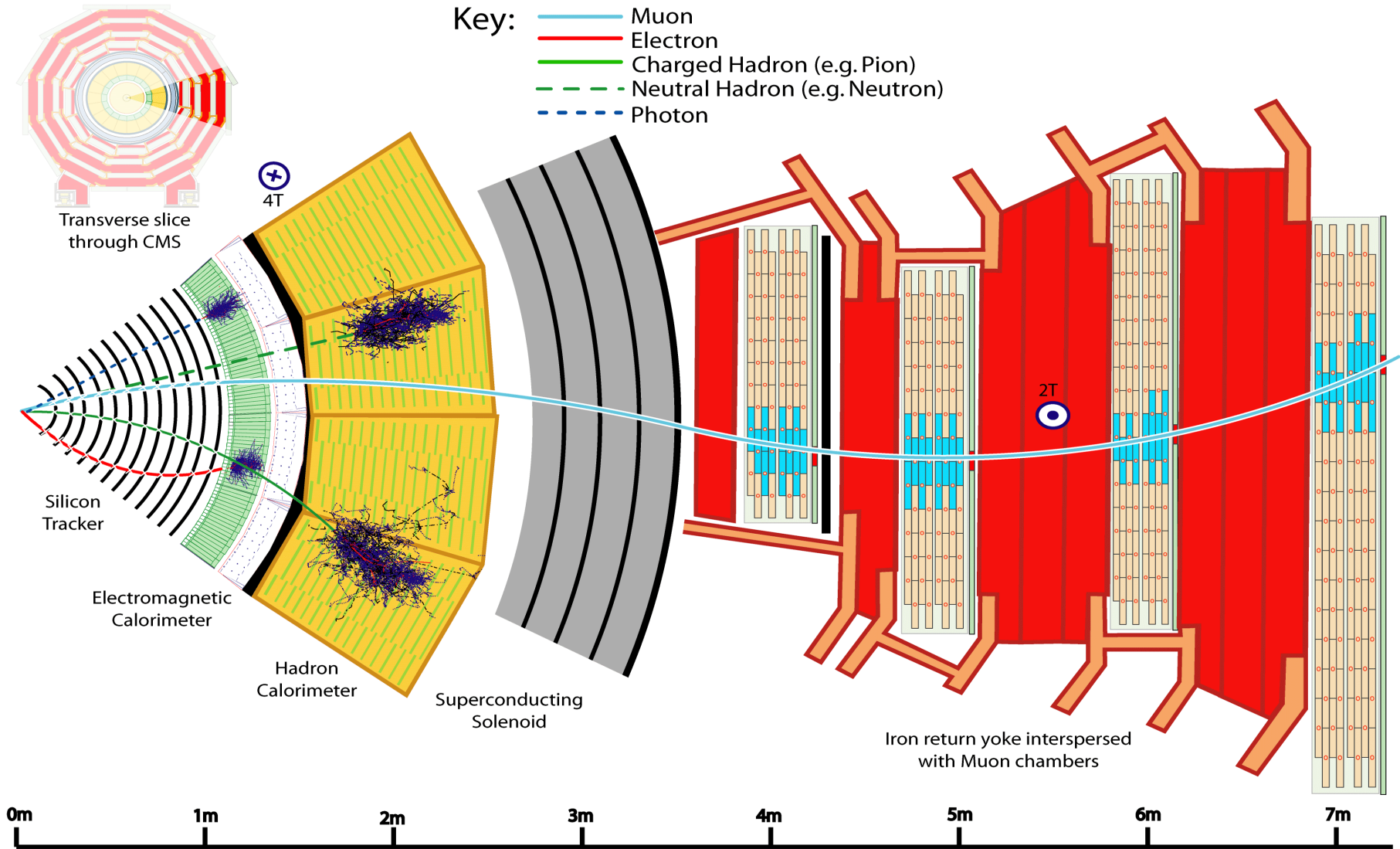
Electron ?

Signature expérimentale : l'électron



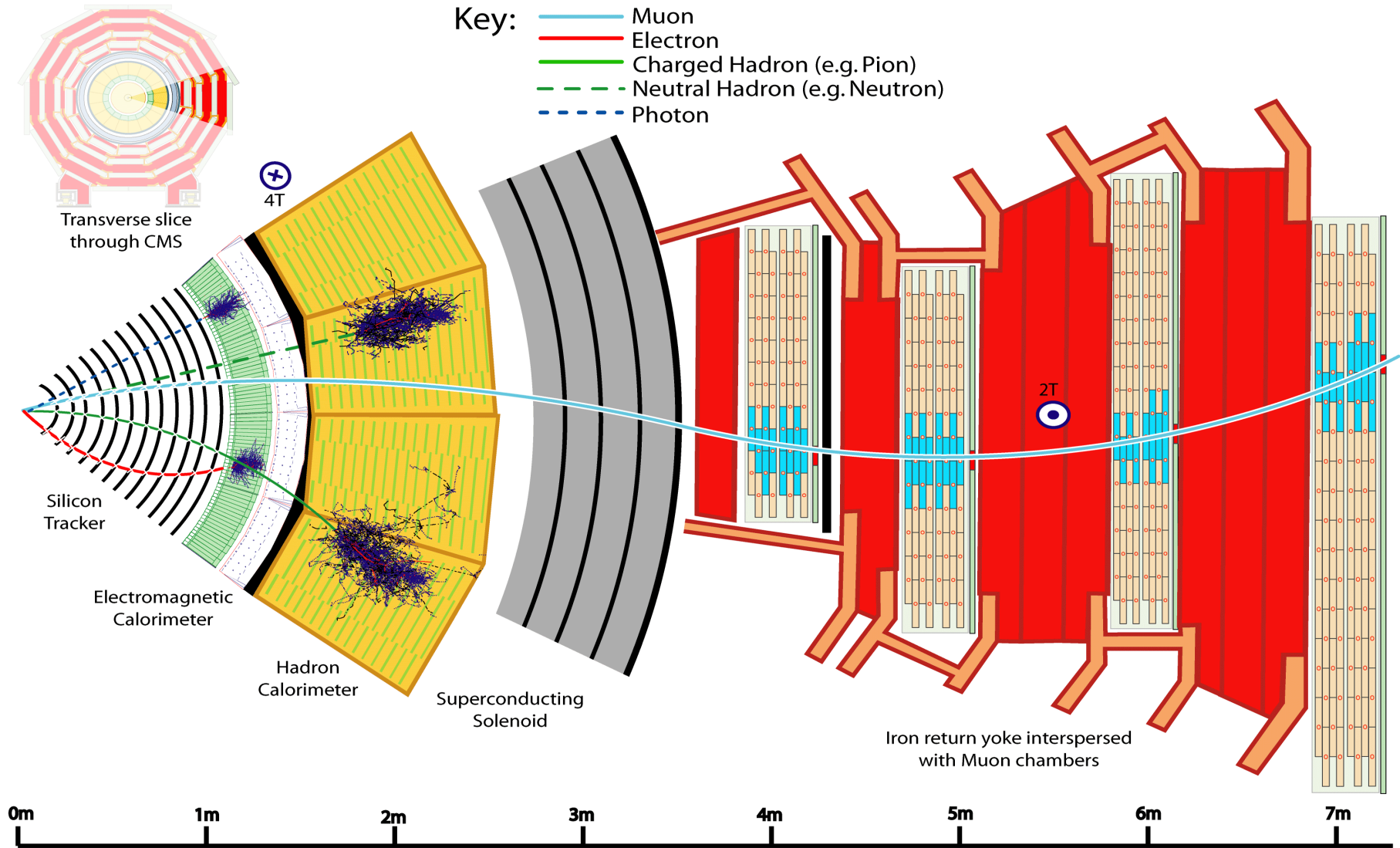
Electron : trace chargée dans le trajectographe et dépôt d'énergie dans le calo électromagnétique

Signature expérimentale : le neutrino



Neutrino ?

Signature expérimentale : le neutrino



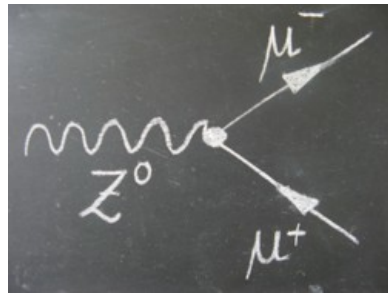
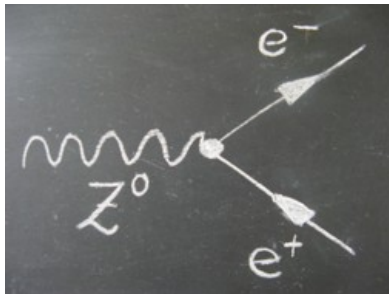
Neutrino : pas de trace ni dépôt d'énergie : le neutrino n'est pas détecté expérimentalement

Qu'allons nous chercher ?

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

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

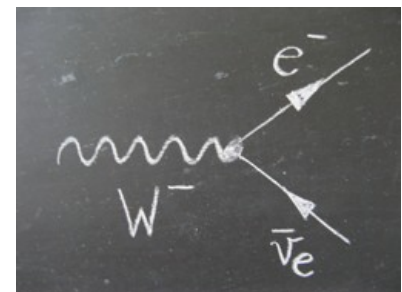
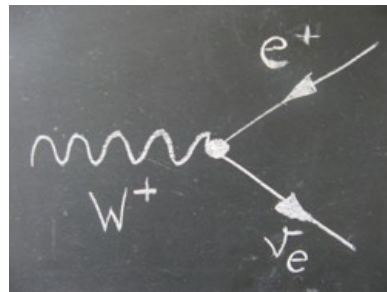
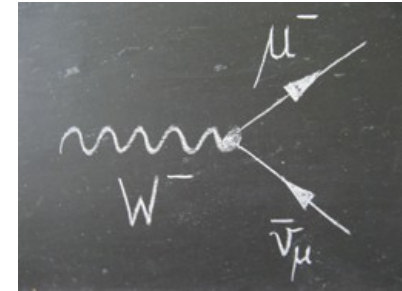
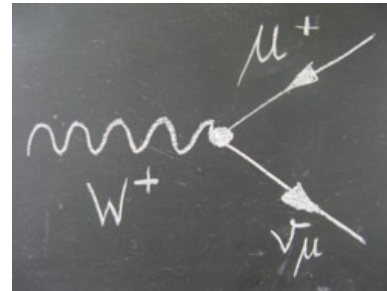
les Z se désintègrent en 2 leptons



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

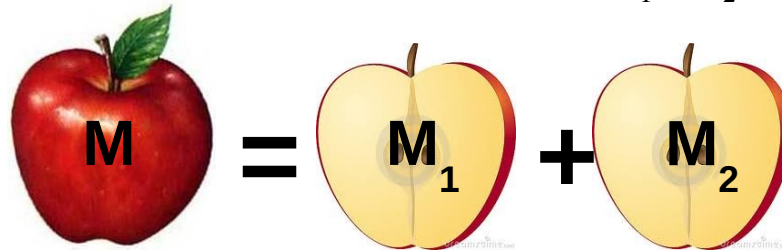
$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$

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**:

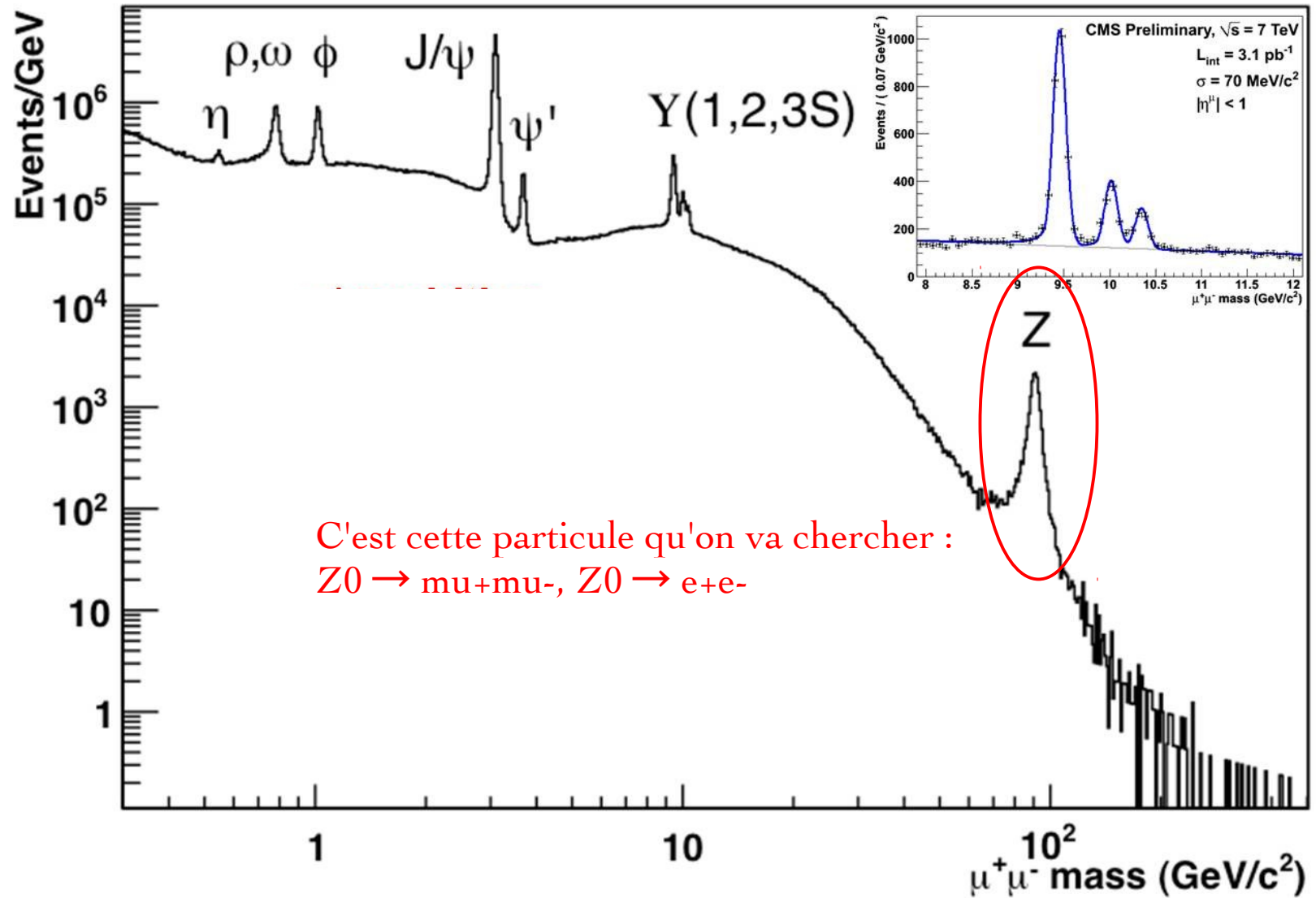
$$M^{inv} c^2 = \sqrt{E^2 - p_x^2 c^2 - p_y^2 c^2 - p_z^2 c^2}$$

[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

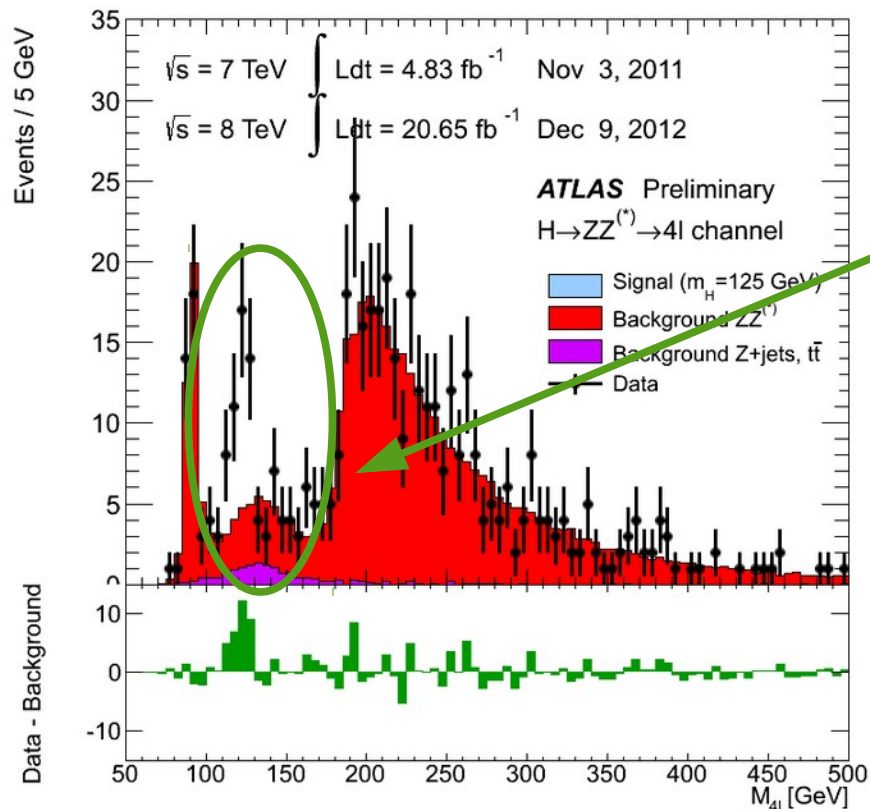


Statistique !

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.

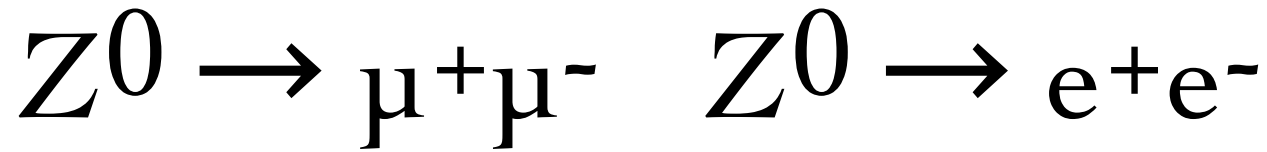
Chaque découverte dans notre domaine se fait par accumulation de données et passe par des évaluations de type statistique.



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 :

http://www.atlas.ch/photos/atlas_photos/selection

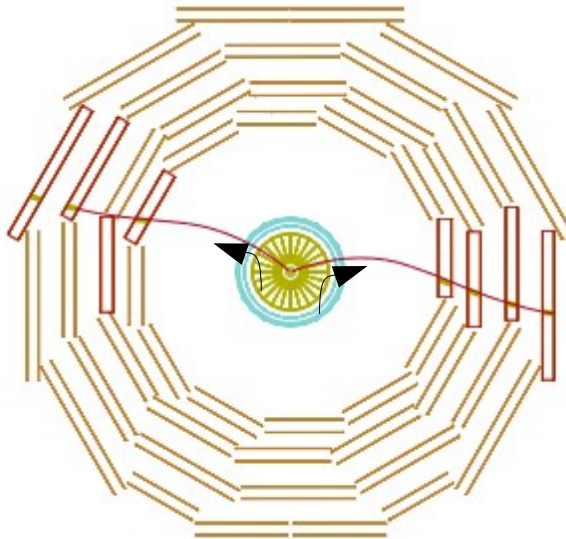


Particule neutre créée dans les collisions qui se désintègre en deux leptons, ($\mu^+ \mu^-$ ou $e^+ e^-$)

- 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 (μ^-)

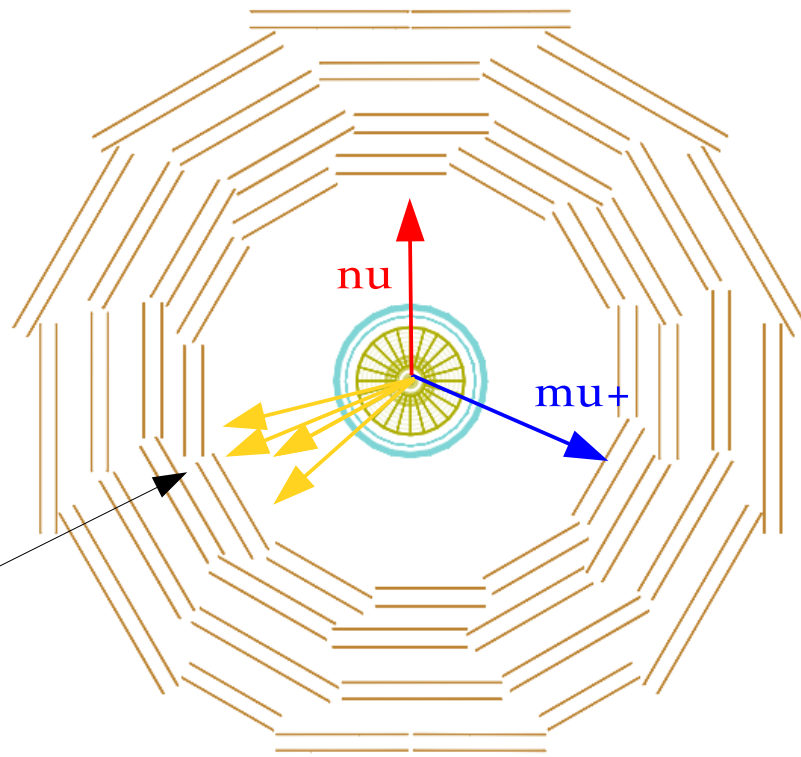


Trace courbée dans le sens des aiguilles d'une montre : charge positive (μ^+)



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

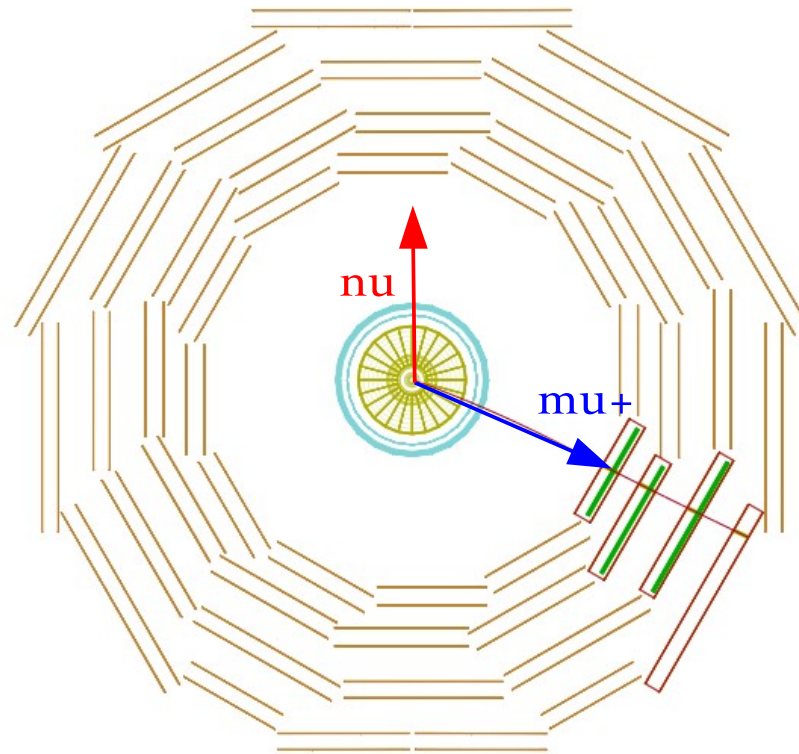


Possible activité
additionnelle, ça nous
intéresse pas
aujourd'hui, on ne va
pas la regarder





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^+ .



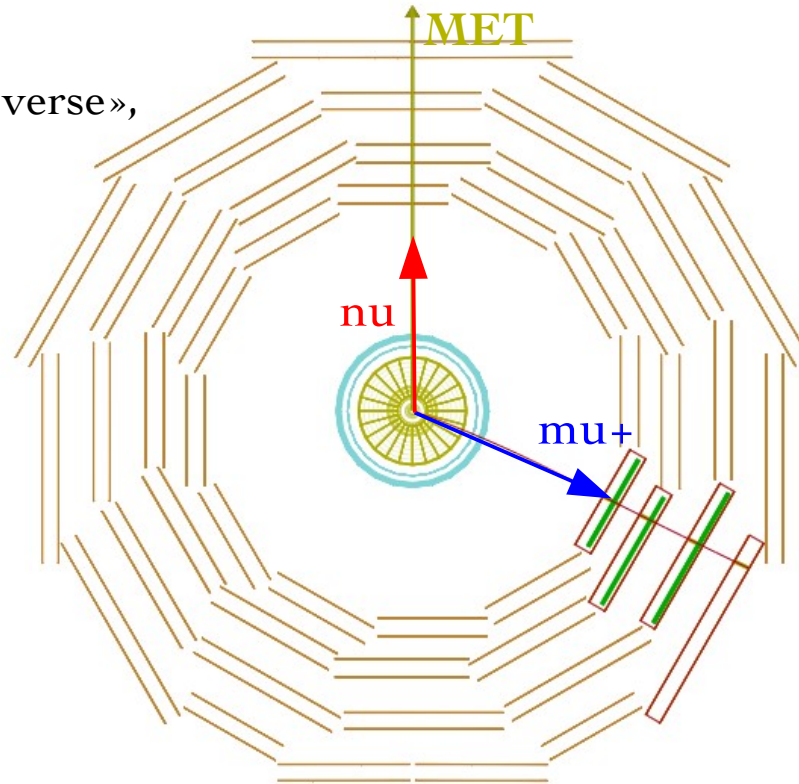
Le neutrino n'est pas observé.

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 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 ($MET < 20 \text{ GeV}$)

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

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

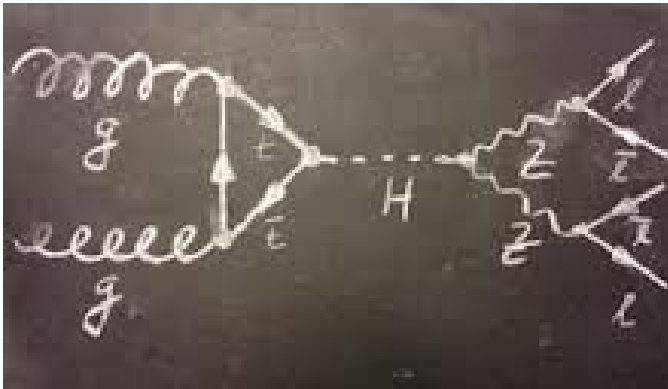
$$W^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu \quad W^- \rightarrow e^- \nu_e$$

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)

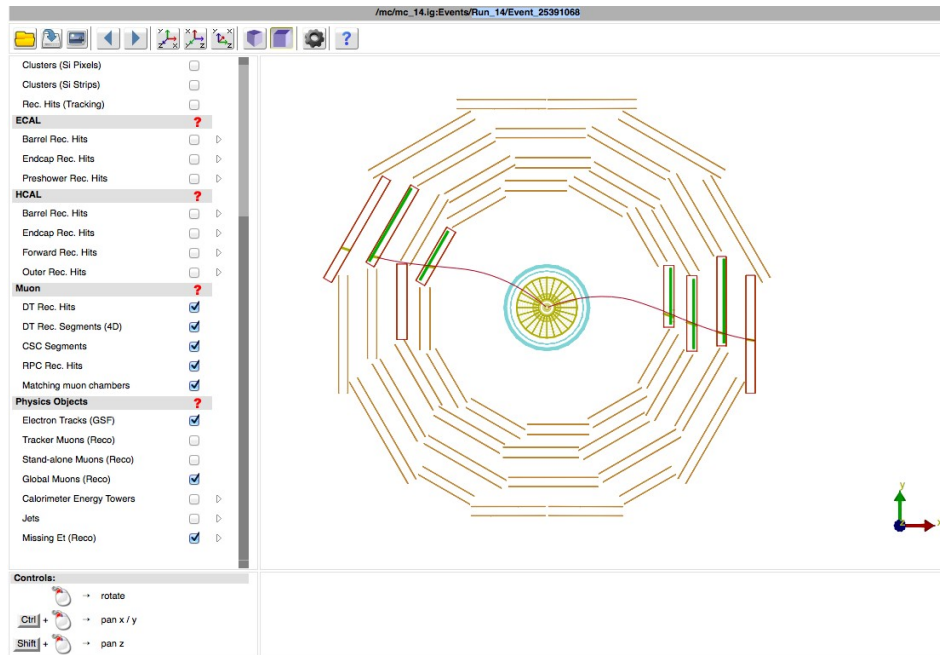
La masse invariante des 4 leptons dans l'état finale va ensuite nous dire quelle est la masse de la mystérieuse particule X

Quelqu'un se rappelle d'une particule qui se désintègre en ZZ ?

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_{e0}	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	118510854										
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 ou ZZ, 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 à l'entier impair le plus proche)

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

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

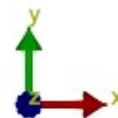
Cliquez ici pour changer la perspective
(x,y utile pour voir la courbure)

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 !)

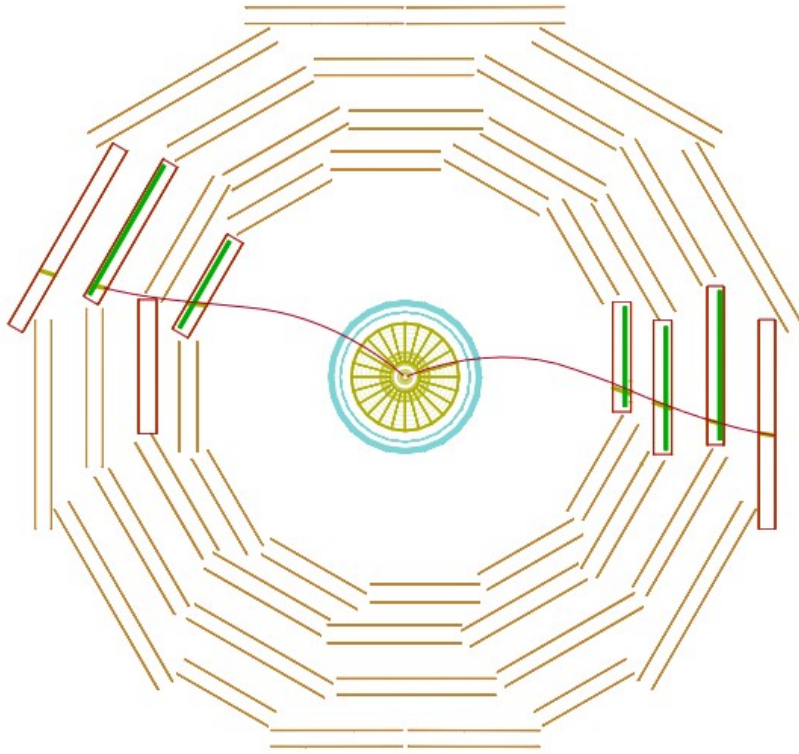
Rotation, zoom



The image shows a screenshot of the ATLAS event viewer software. The interface includes a top toolbar with navigation and view controls, a left sidebar with a detector configuration tree, and a central 3D visualization of particle tracks. Annotations in French provide instructions on how to use the software. The event ID '25391068' is highlighted in a purple box. The detector configuration tree on the left is partially expanded, showing sections for ECAL, HCAL, Muon, and Physics Objects. The 3D view shows a central detector structure with tracks originating from a central vertex. A red circle highlights the inner tracks, and a black arrow points to them with a text box explaining how to determine their charge based on their curvature. A blue circle highlights the navigation arrows in the toolbar, with a text box explaining how to switch between events. A red circle highlights the perspective view icons, with a text box explaining how to change the view. A black arrow points to the detector configuration tree, with a text box explaining how to visualize different detector components. A black arrow points to the 'Controls' section at the bottom left, which lists keyboard shortcuts for rotating and zooming the view.

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

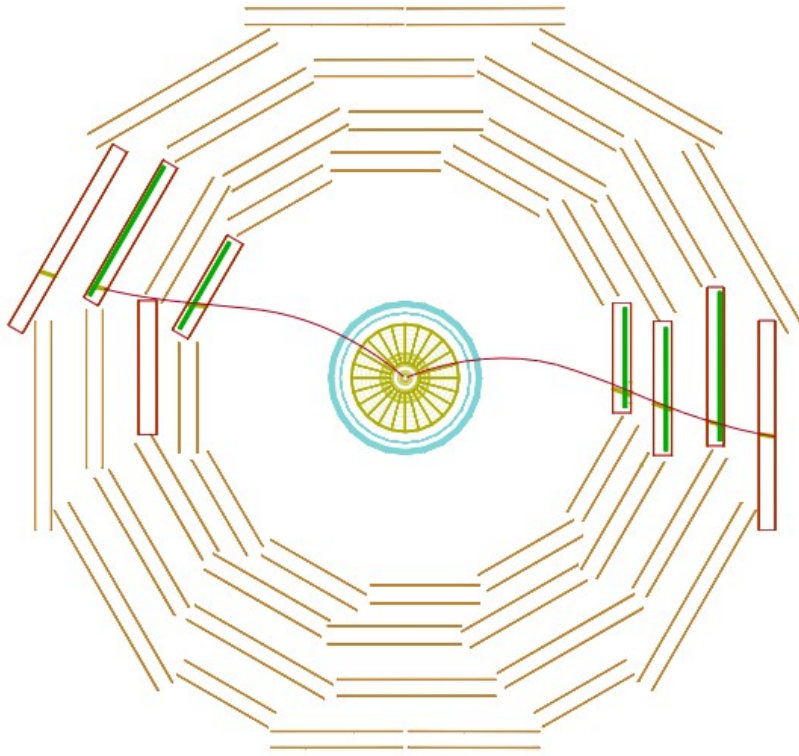
2) Il faut que la valeur de MET soit assez basse (si $MET < 20$ GeV c'est un bon événement Z). MET est 0 dans ce cas là.

→ 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 $MET < 25$ GeV c'est un bon événement Z). MET est 0 en ce cas là.

→ c'est un **bon événement Z**

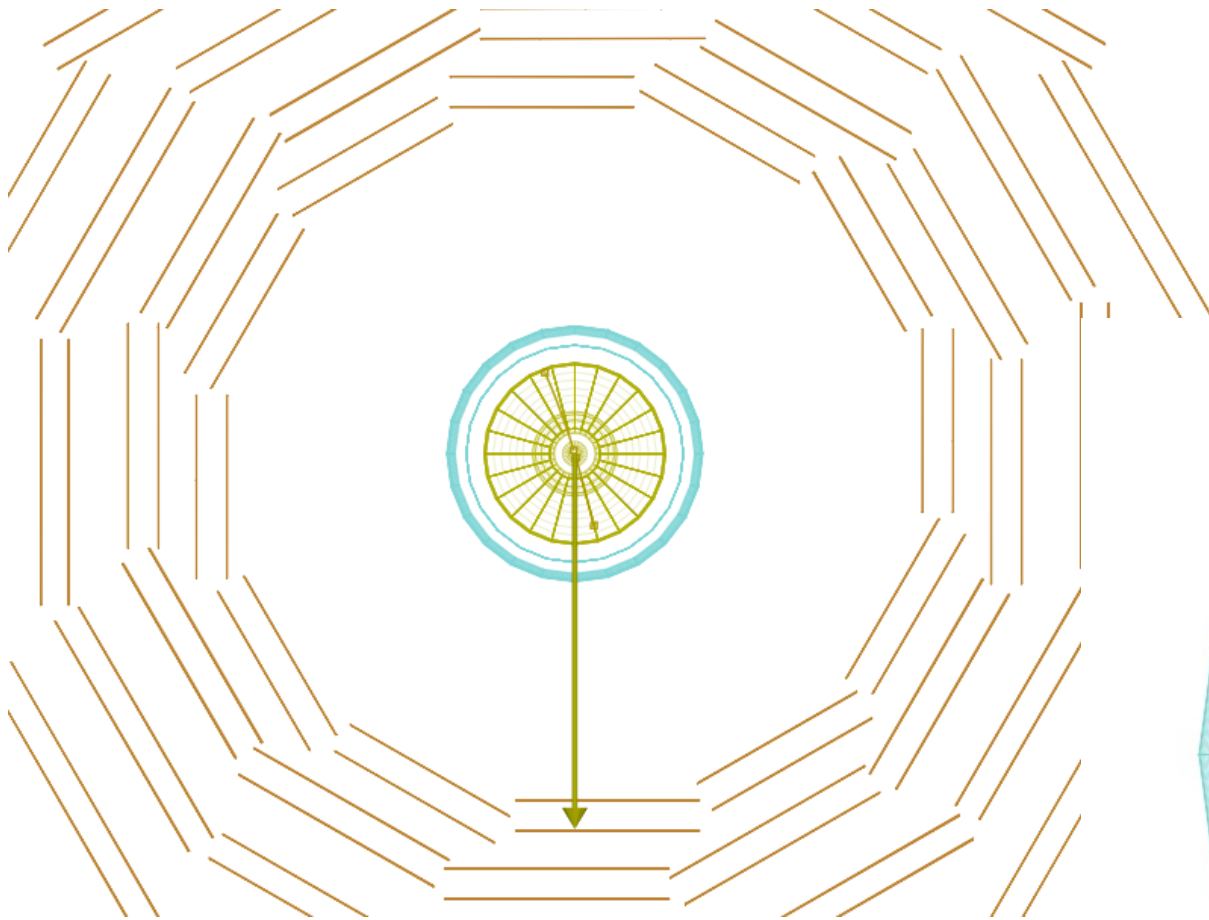


electron	muon	W+ cand	W- cand	W cand	Z cand	"zoo"	ZZ cand	Mass	Mass-->odc
					1				

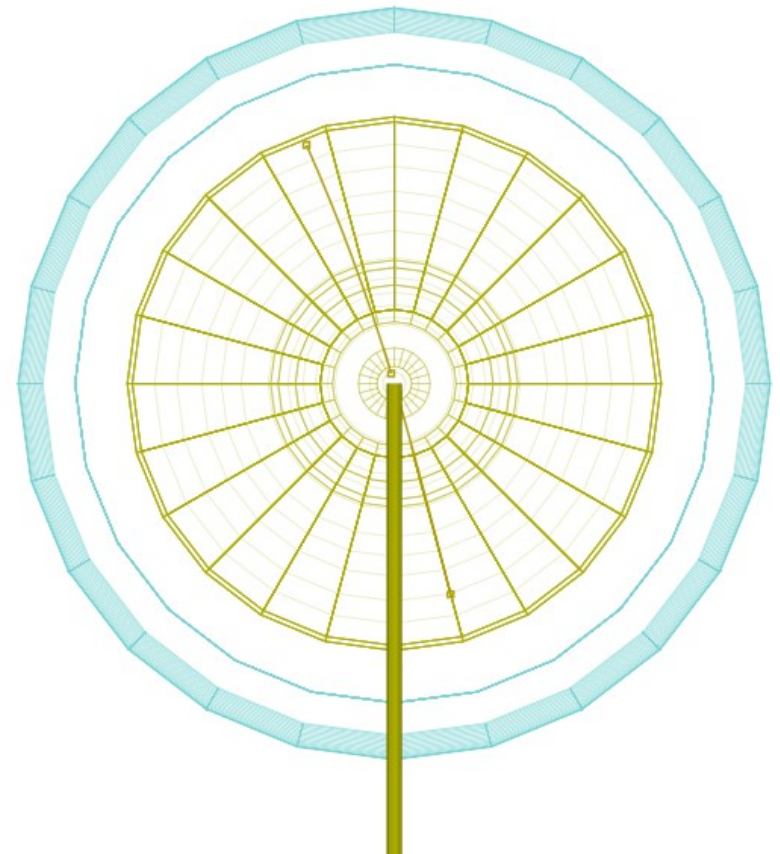
La valeur de la masse invariante va apparaître ici

Recherche du Z^0

Événements avec deux électrons et MET

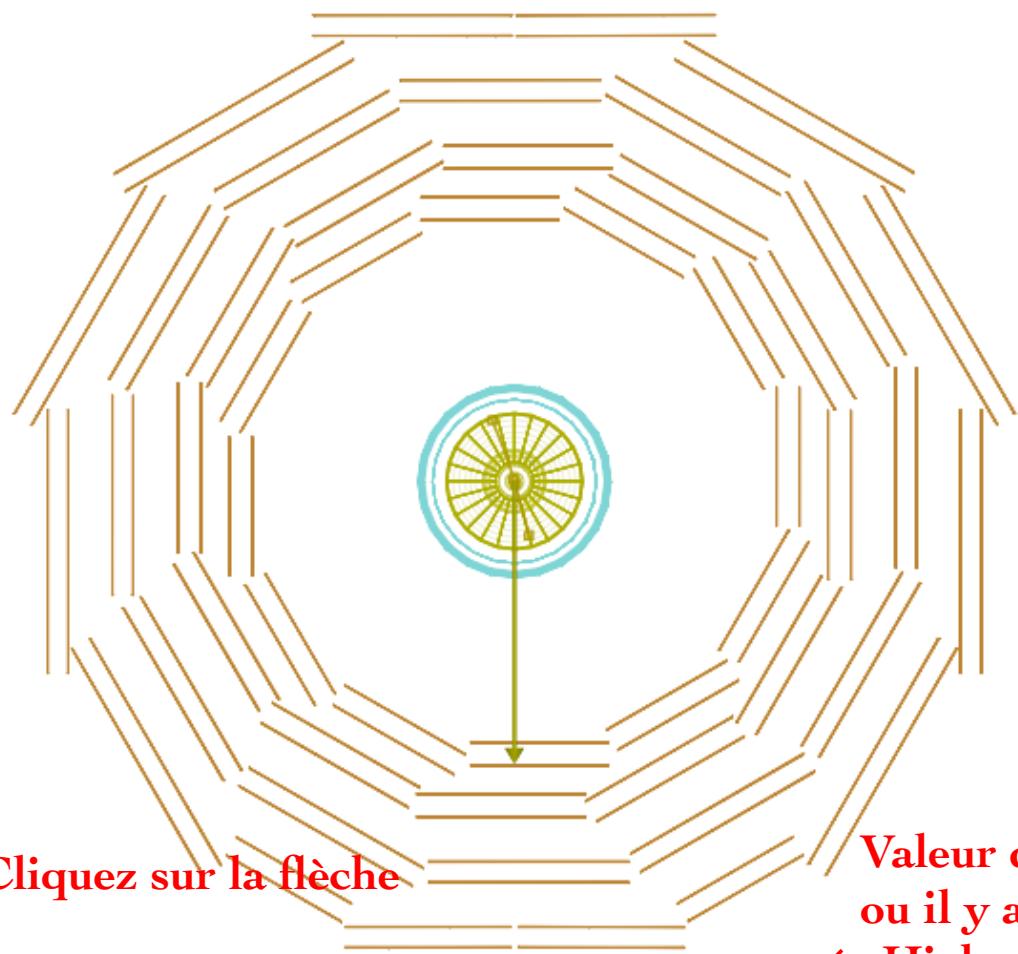


1) On contrôle que la charge des leptons est opposée : Zoom pour voir la courbure des électrons (utilisez une feuille en papier si c'est très difficile à voir !)



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»)

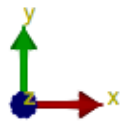
Energy Range Selector ✕

Energy range for Missing Et (Reco)

Low cut: 3.74 GeV (75%)

High cut: 4.98 GeV (100%)

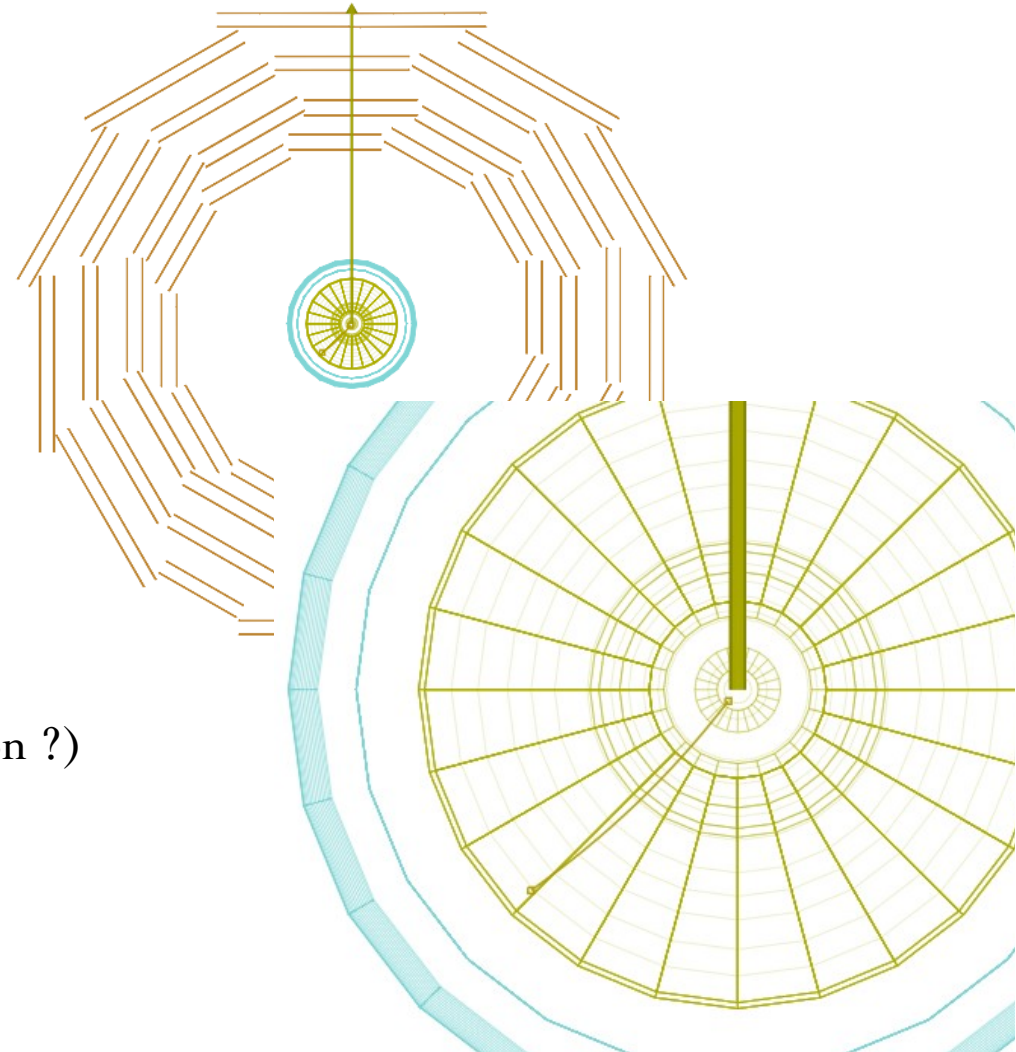
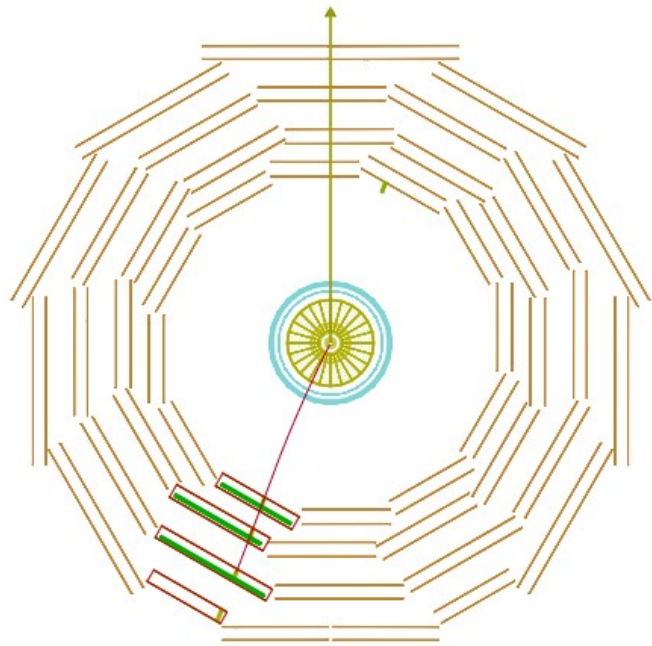
MET~5 GeV, c'est à dire MET < 20 GeV. c'est un bon événement Z



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

Recherche du W^+ ou W^-

Événements avec un lepton et MET

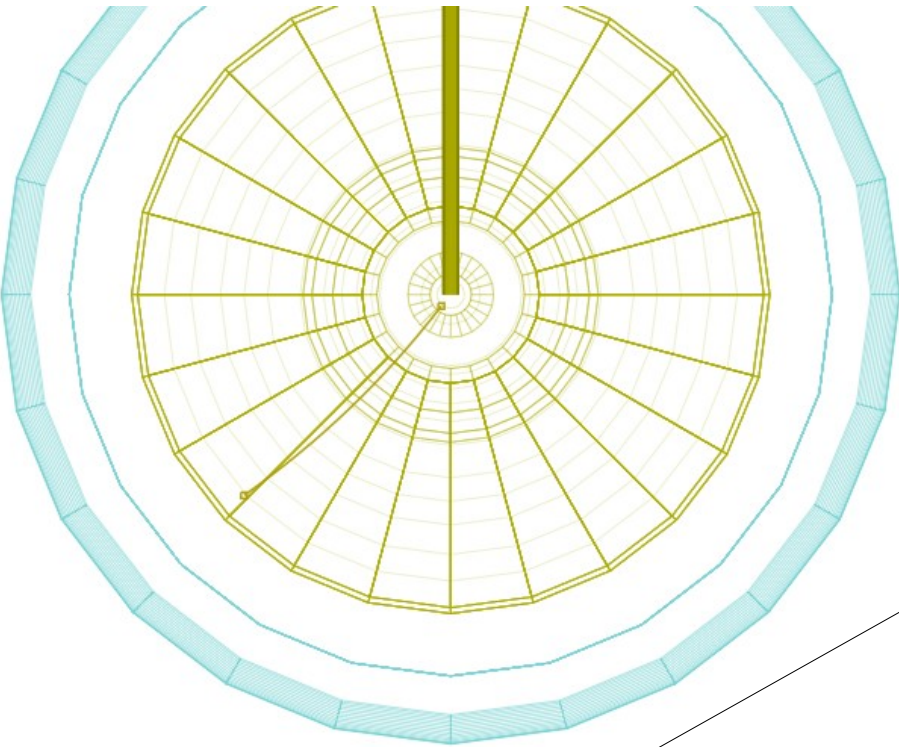


- 1) Saveur du lepton (c'est un électron ou un muon ?)
- 2) charge du lepton
- 3) présence de $MET > 20$
- 4) il n'y a pas d'autres leptons

→ 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) MET > 20
- 3) il n'y a pas d'autres leptons

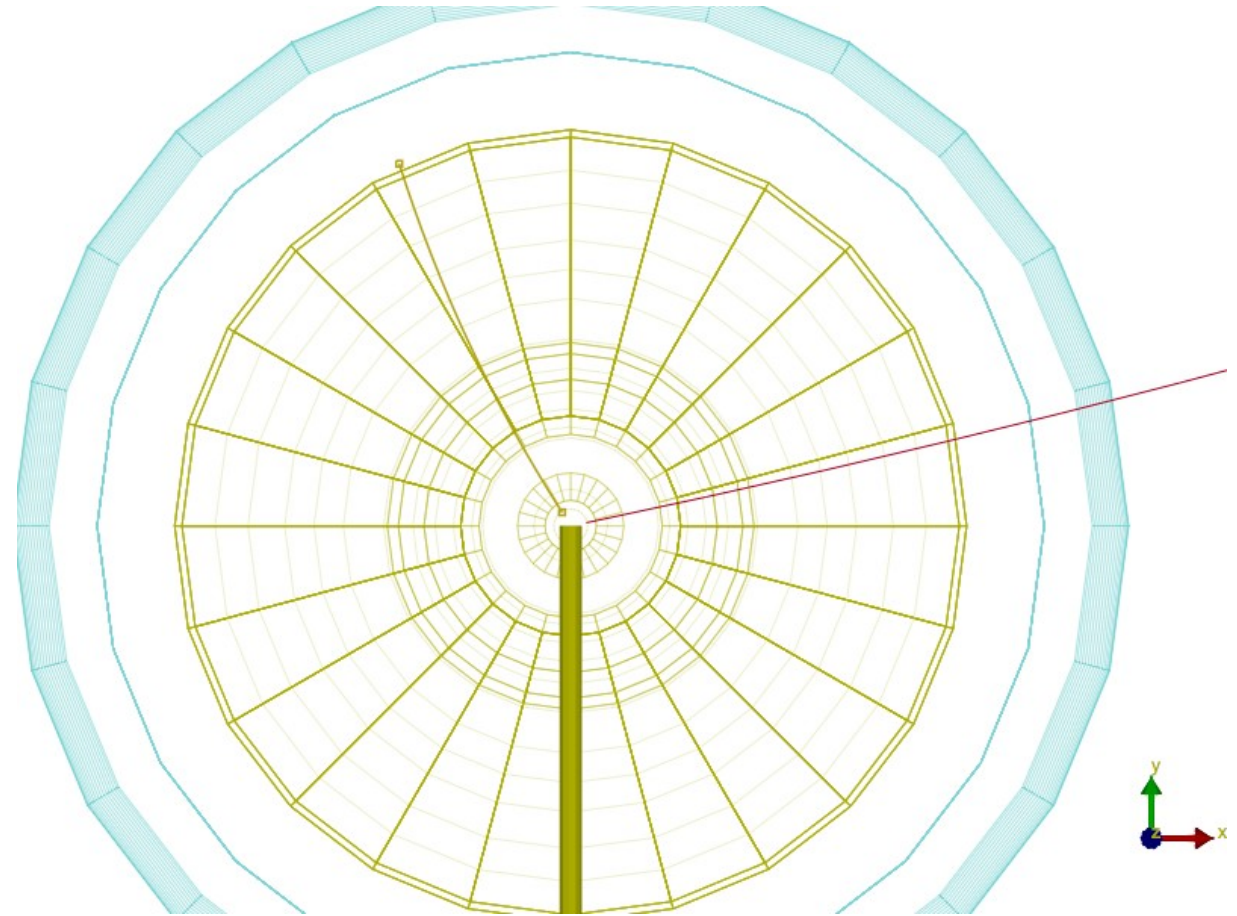
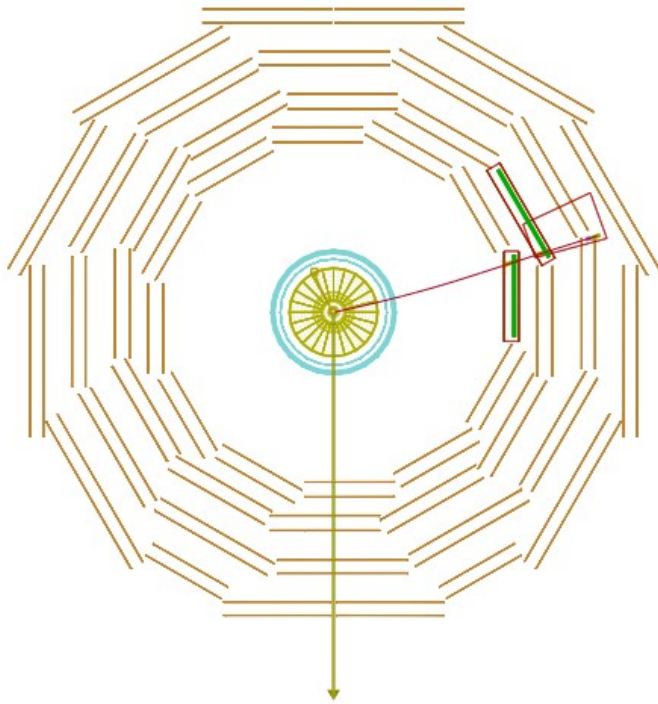
→ c'est un **bon événement W**



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

Exemples d'événements «zoo»

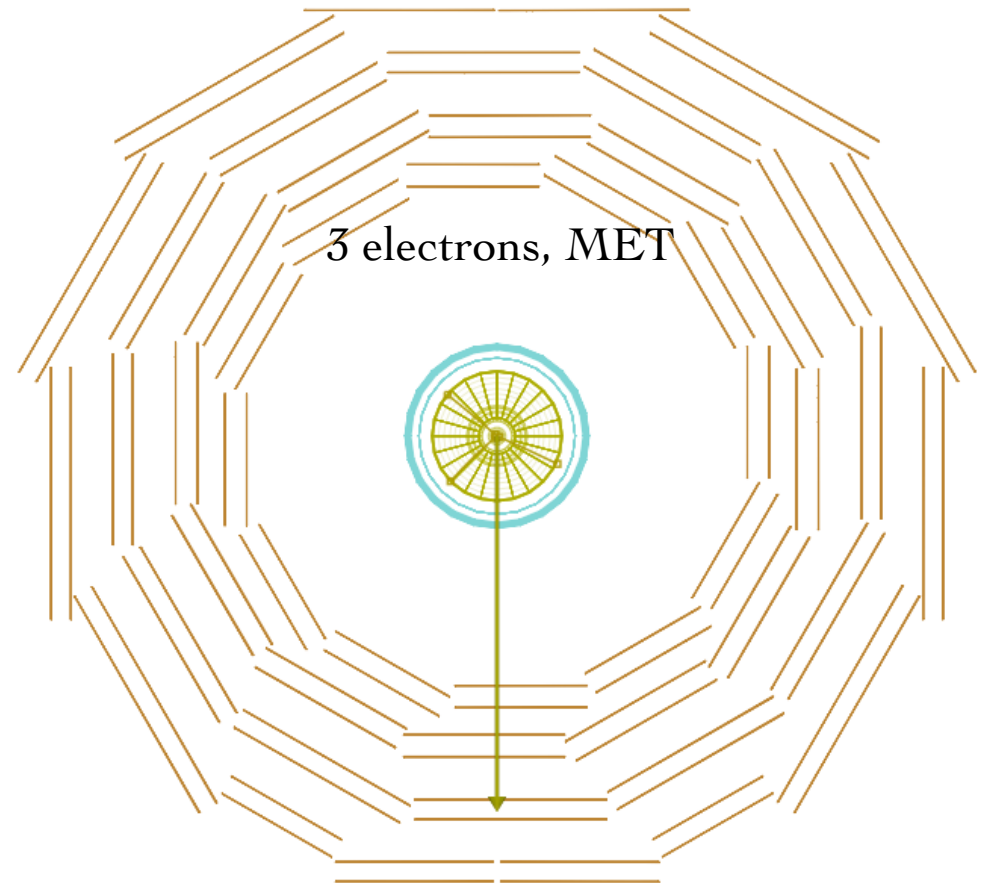
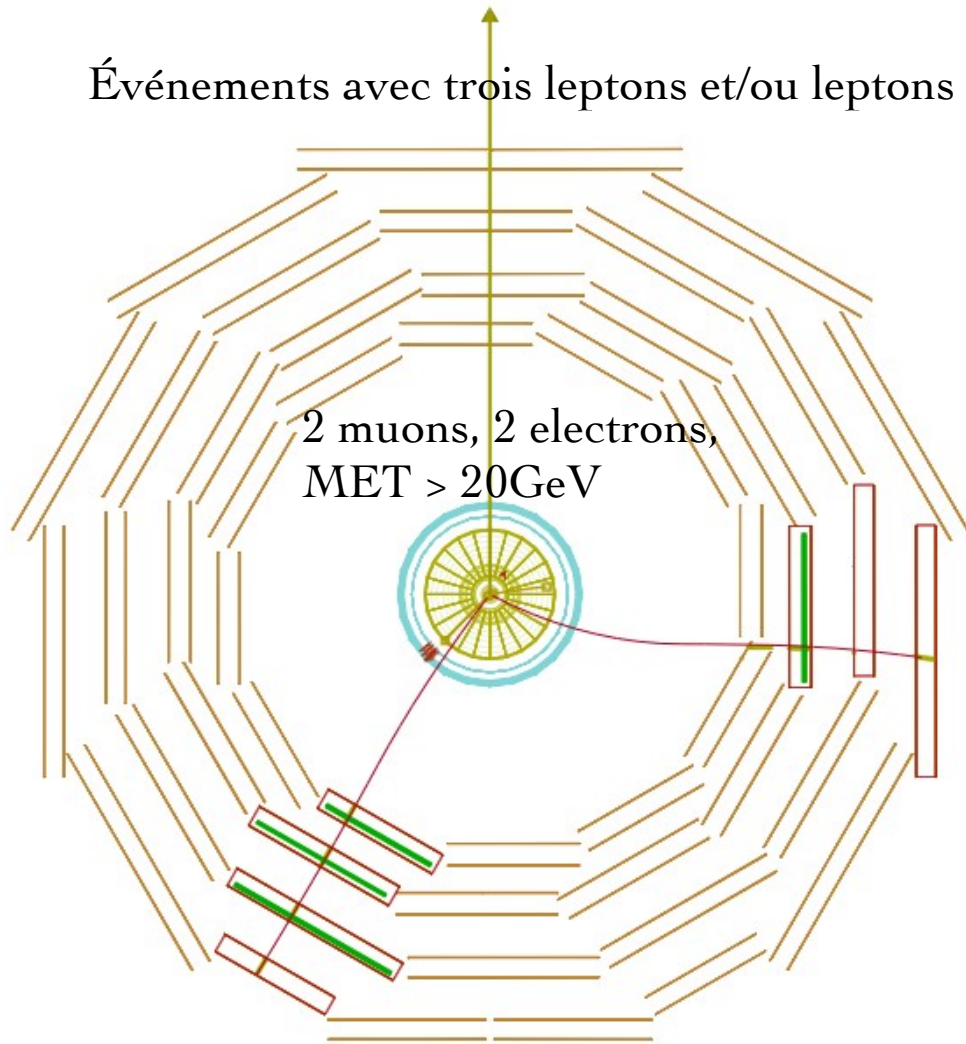
Événements avec deux leptons de saveur différente (μ et e) et MET



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

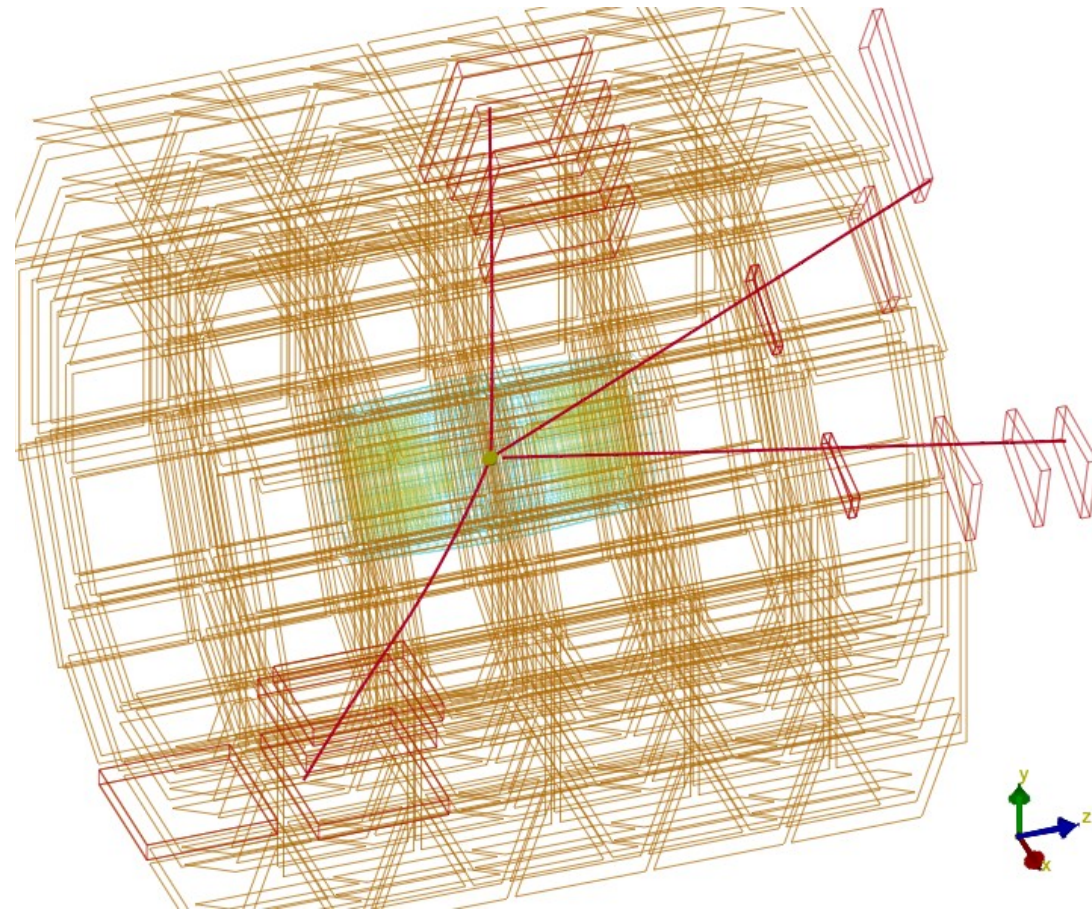
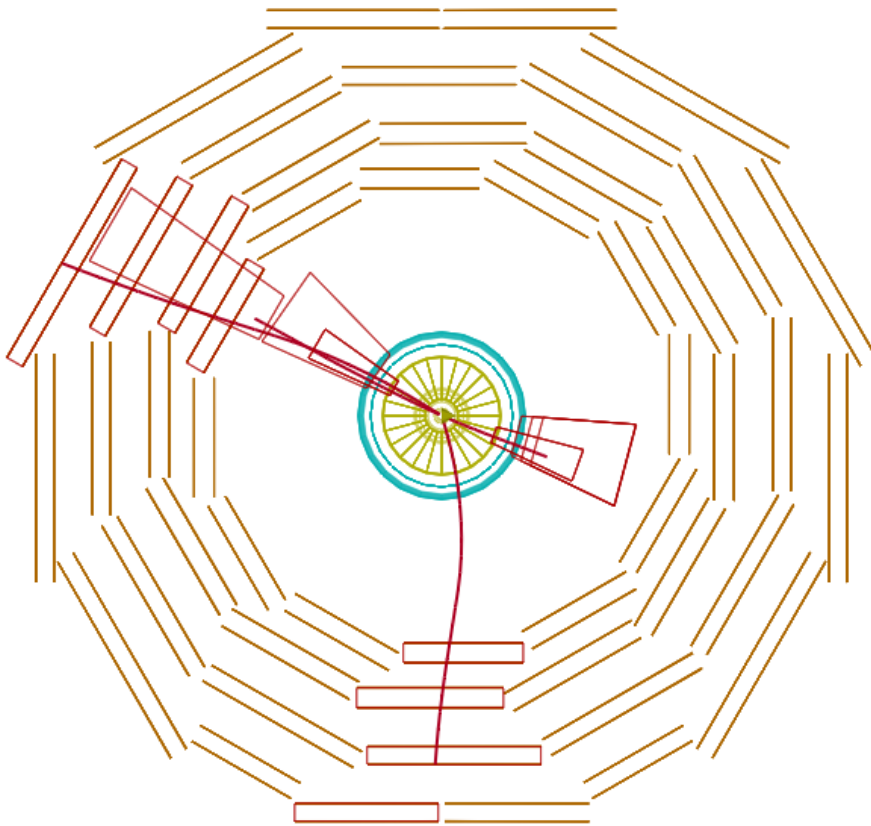


electron	muon	W+ cand	W- cand	W cand	Z cand	"zoo"	ZZ cand	Mass	Mass-->odr
						1			

À force de chercher des Z...

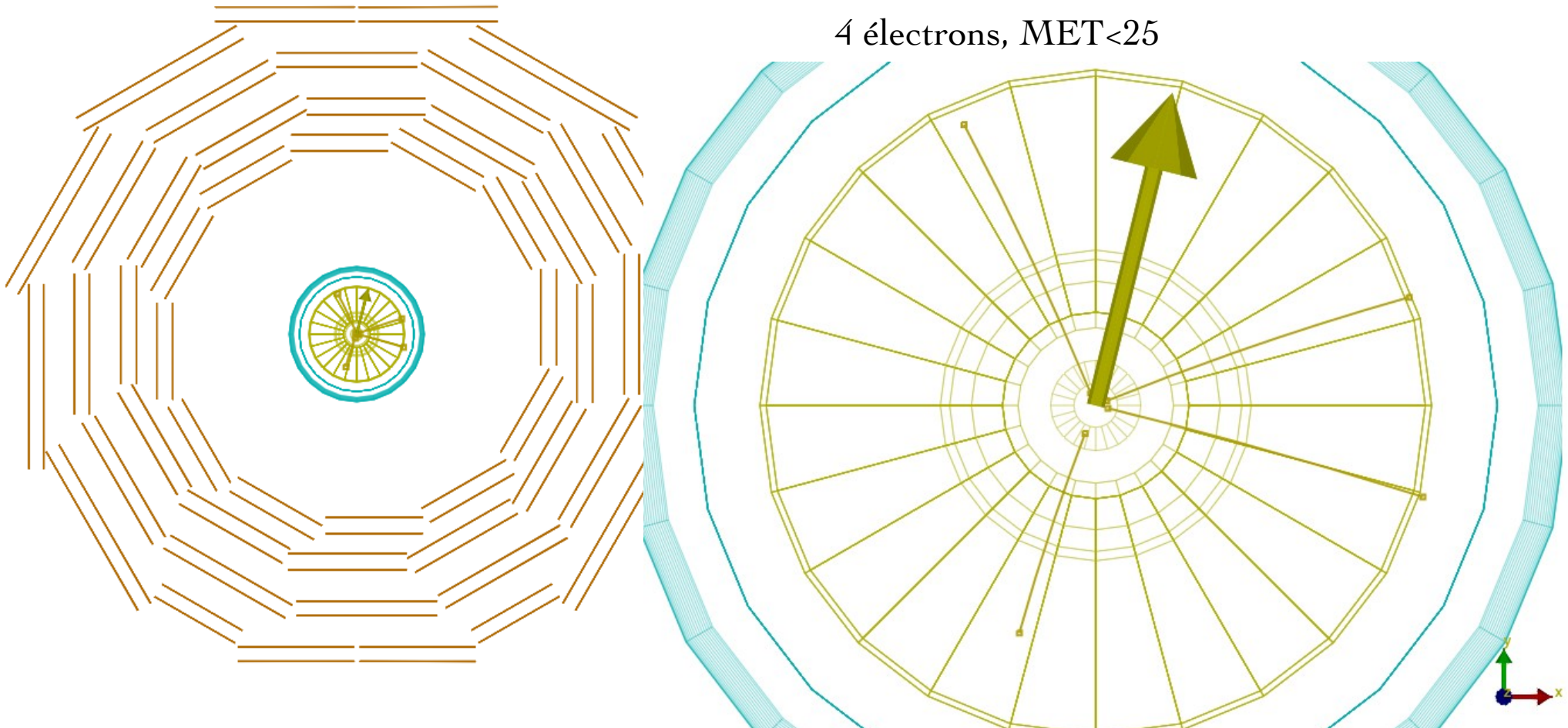
Événements avec deux paires de deux leptons de même saveur et charge opposée (donc deux candidats Z), $MET < 25$ GeV

4 muons, $MET \sim 0$



À force de chercher des Z...

Événements avec deux paires de deux leptons de même saveur et charge opposée, $MET < 25$ GeV



4 électrons, $MET < 25$

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 :

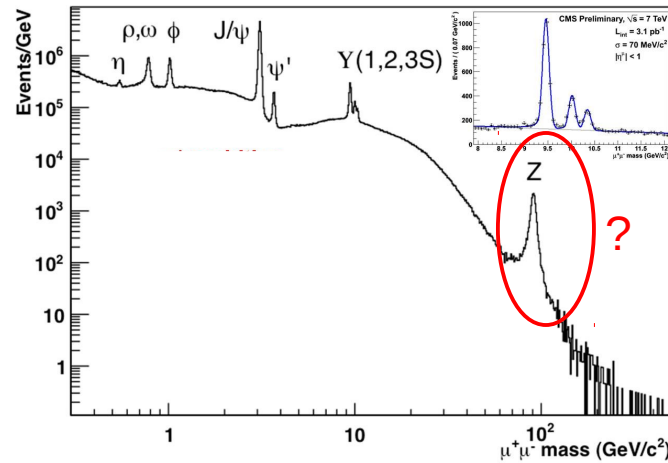
- un événement avec un W (électron ou muon ? W_+ ou W_- ?)
- un événement avec un Z
- un événement avec deux Z
- un événement «zoo»

Remplissez la feuille excel en conséquence

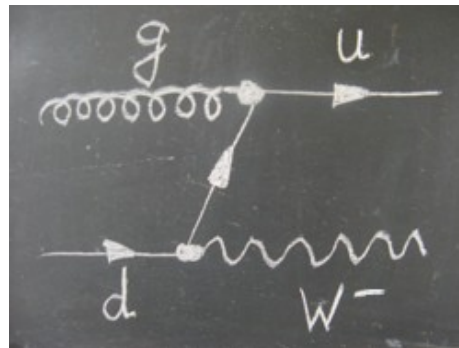
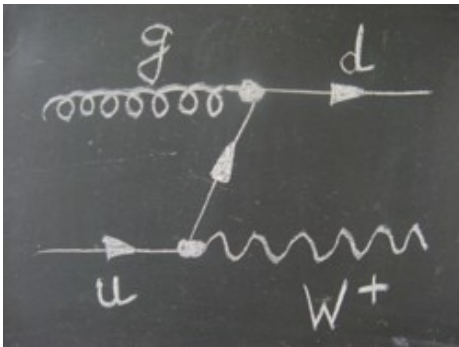
On va ensuite **mettre en commun les résultats de tous les binômes**, pour analyser la totalité des événements (importance d'accumuler de la statistique !)

Objectif de l'exercice

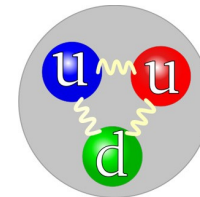
- Construire un spectre de masse invariante des paires de lepton, pour la recherche du Z



- 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

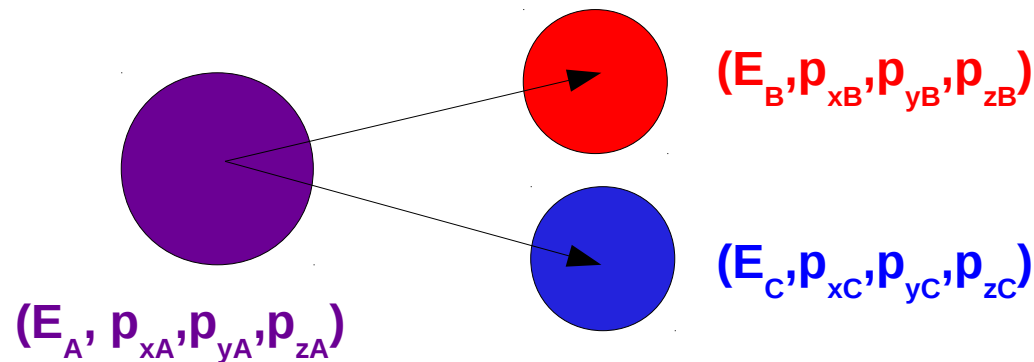
$$m_A = \sqrt{(E_B + E_C)^2 - |\vec{p}_B + \vec{p}_C|^2}$$



: 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:

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

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 composantes de l'impulsion.