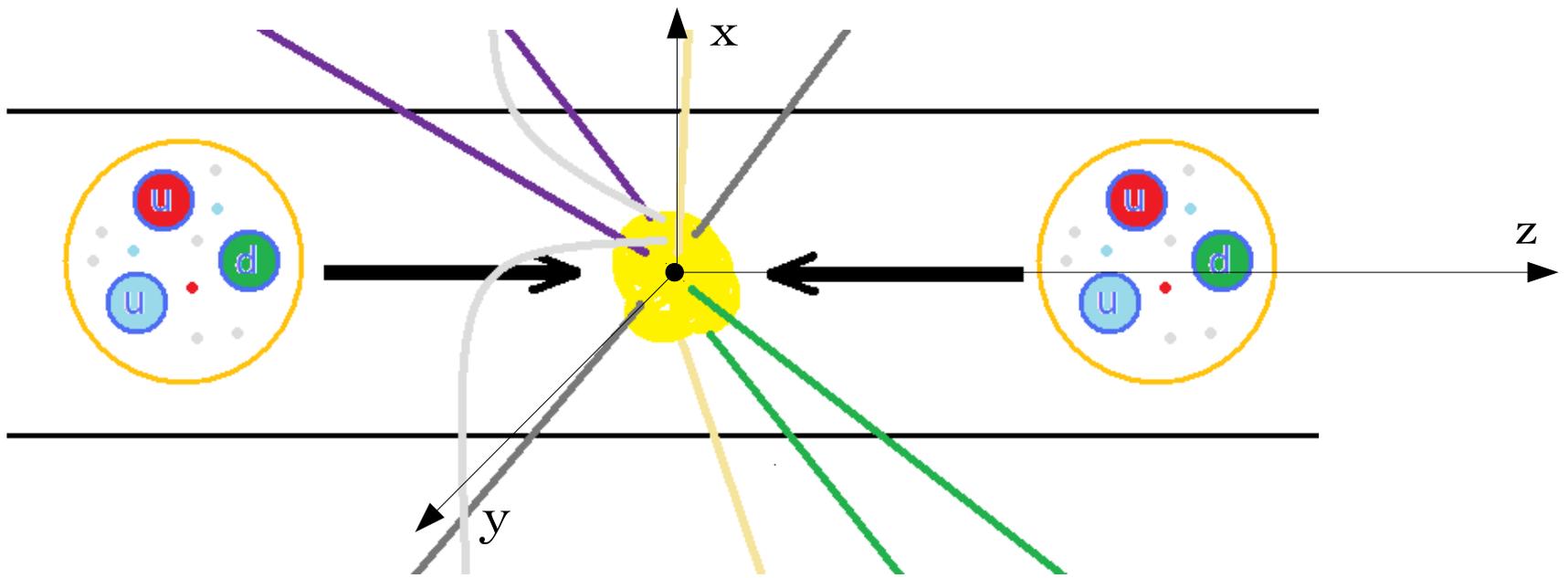


Plan

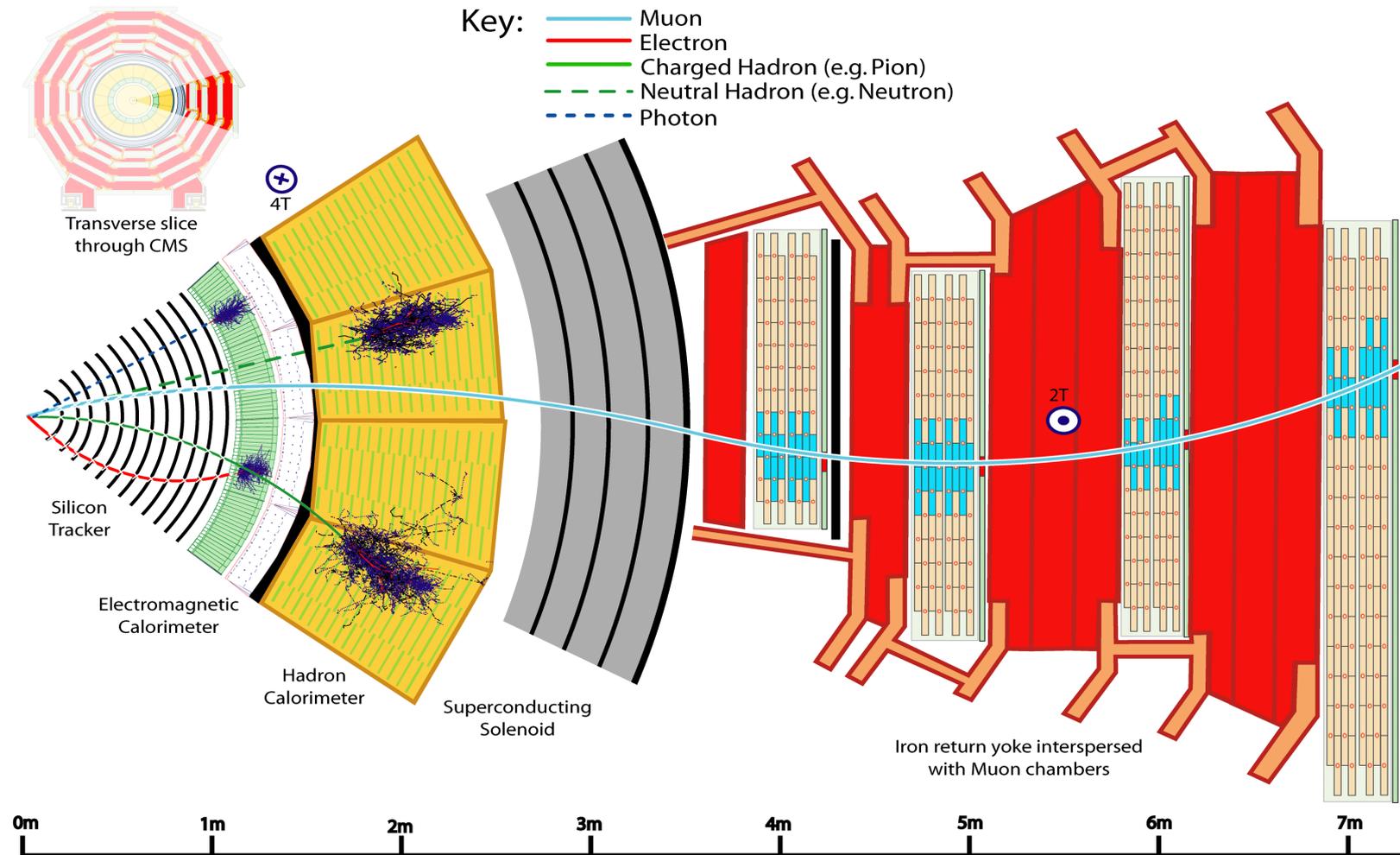
- Les collisions proton-proton
- Reconstruction des évènements avec le détecteur CMS
- Sélection des évènements
- Technique d'analyse des données
- Exemples pratiques
 - Recherche du boson Z
 - Recherche du boson de Higgs
 - Recherche du boson W

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

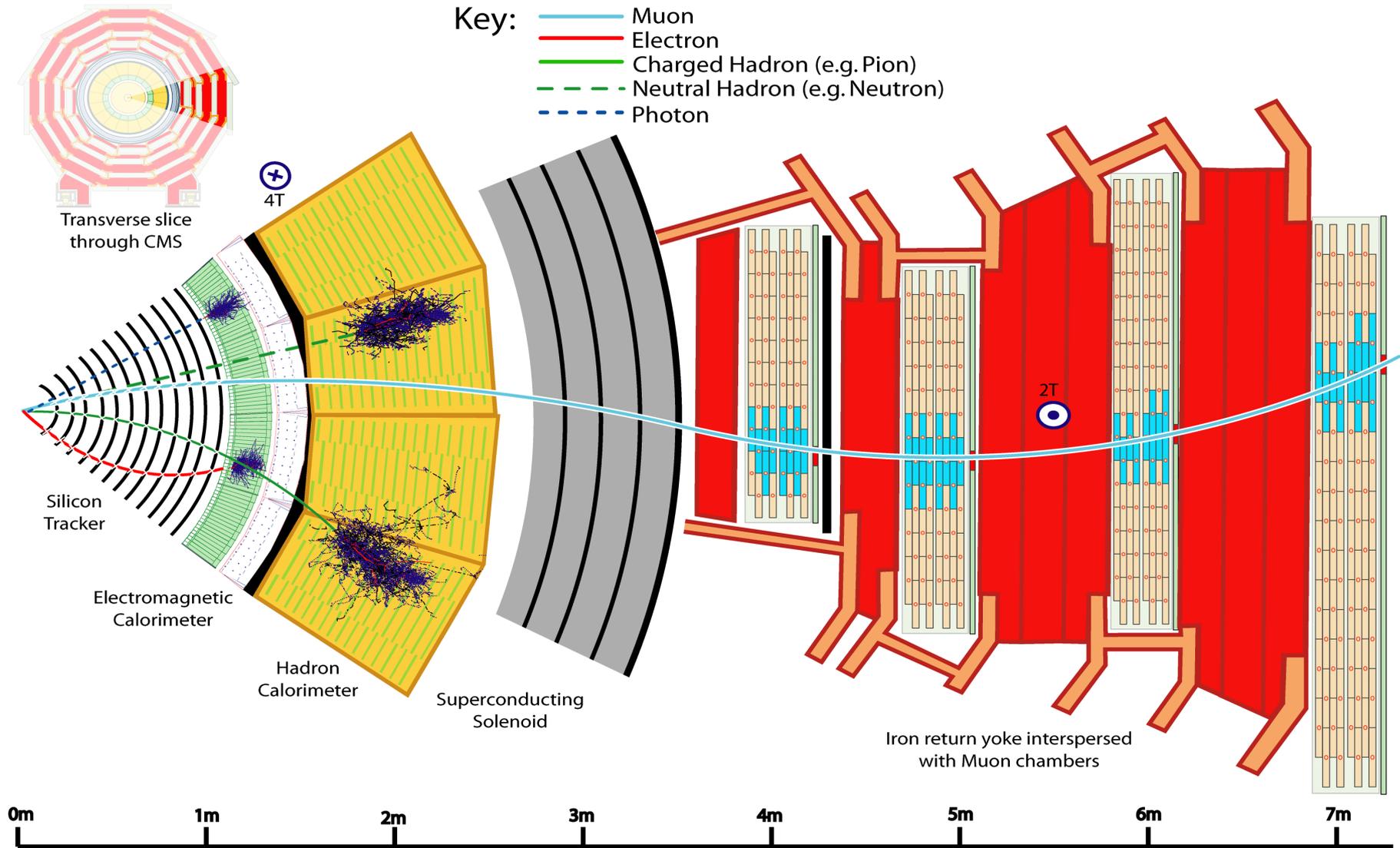


Le détecteur CMS



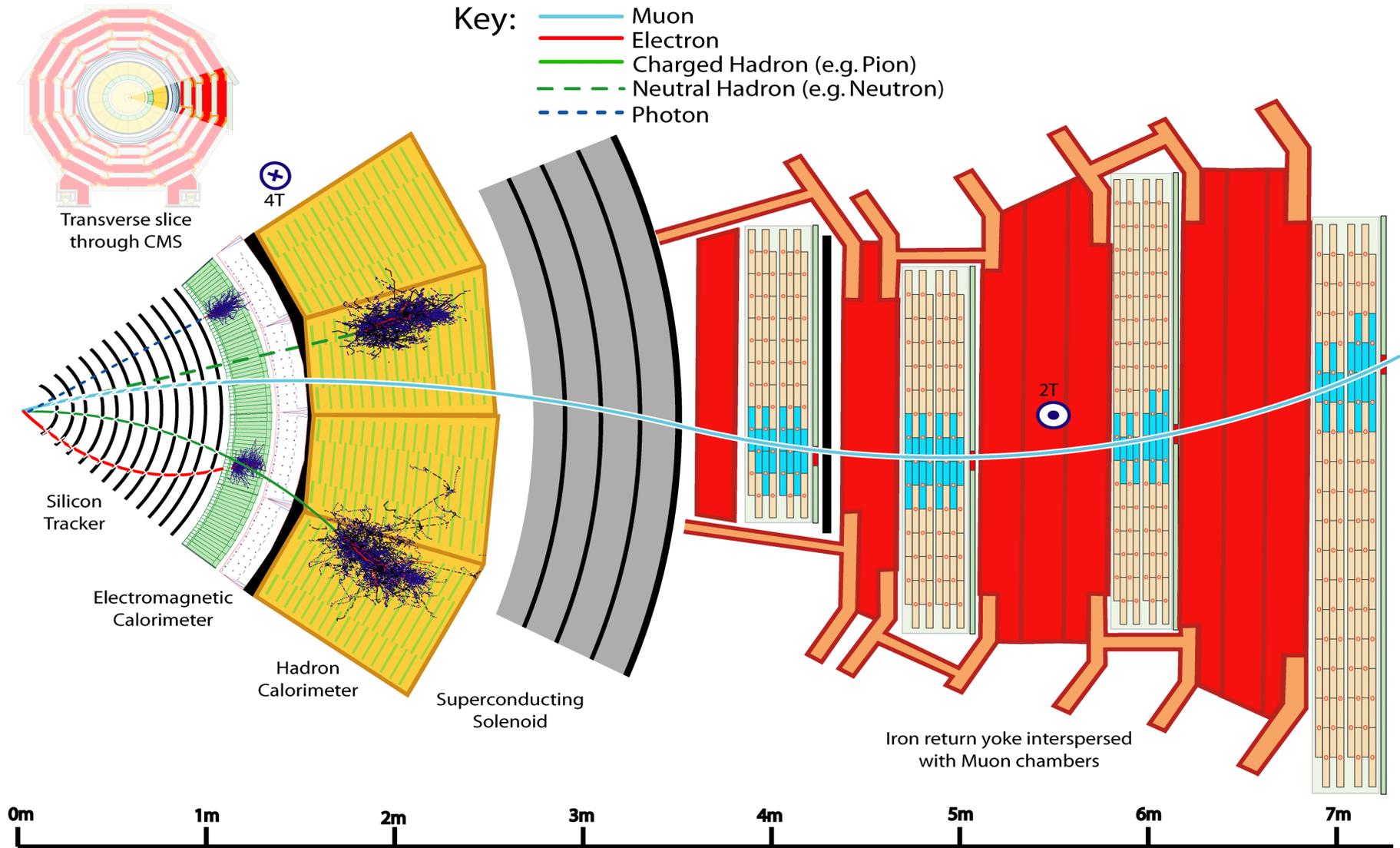
Les collisions produisent des particules au centre du détecteur
Différents détecteurs sont sensibles à différents types de particules
La trajectoire d'une particule chargée est courbée dans un champ magnétique

Signature expérimentale : le muon



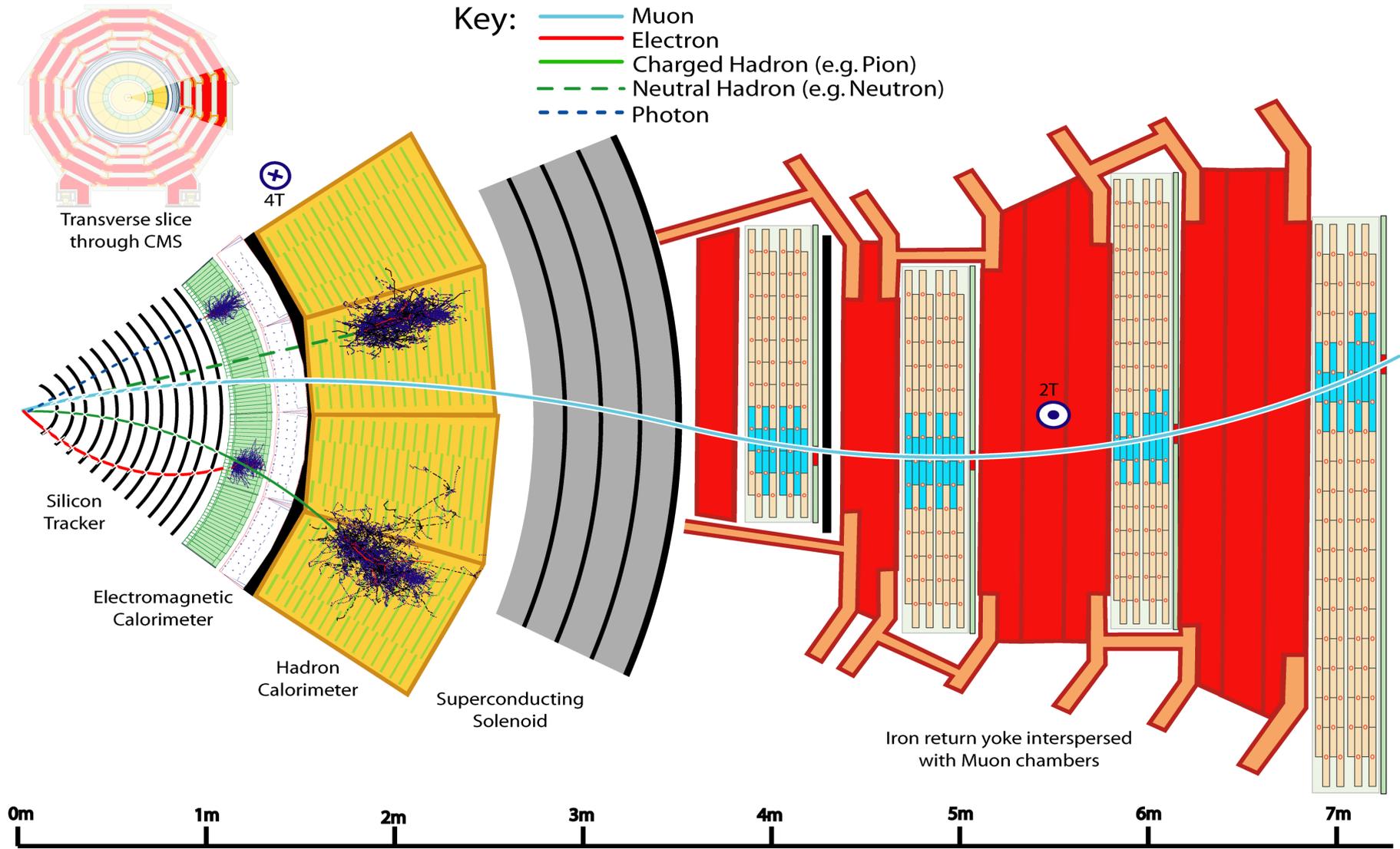
Muon ?

Signature expérimentale : le muon



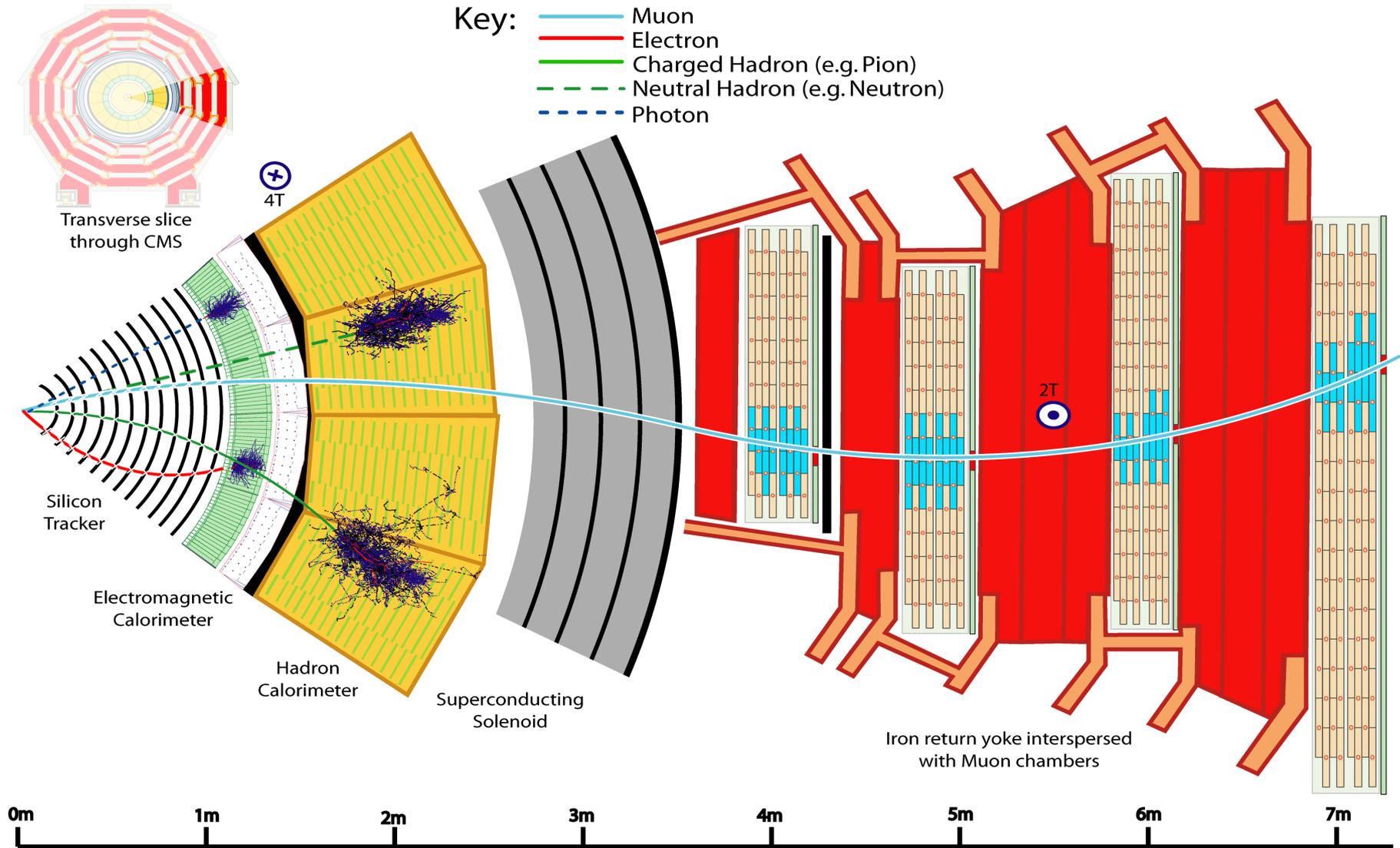
Muon : trace dans le trajectographe, peu de dépôt dans les calorimètres, trace dans les chambres à muons

Signature expérimentale : l'électron



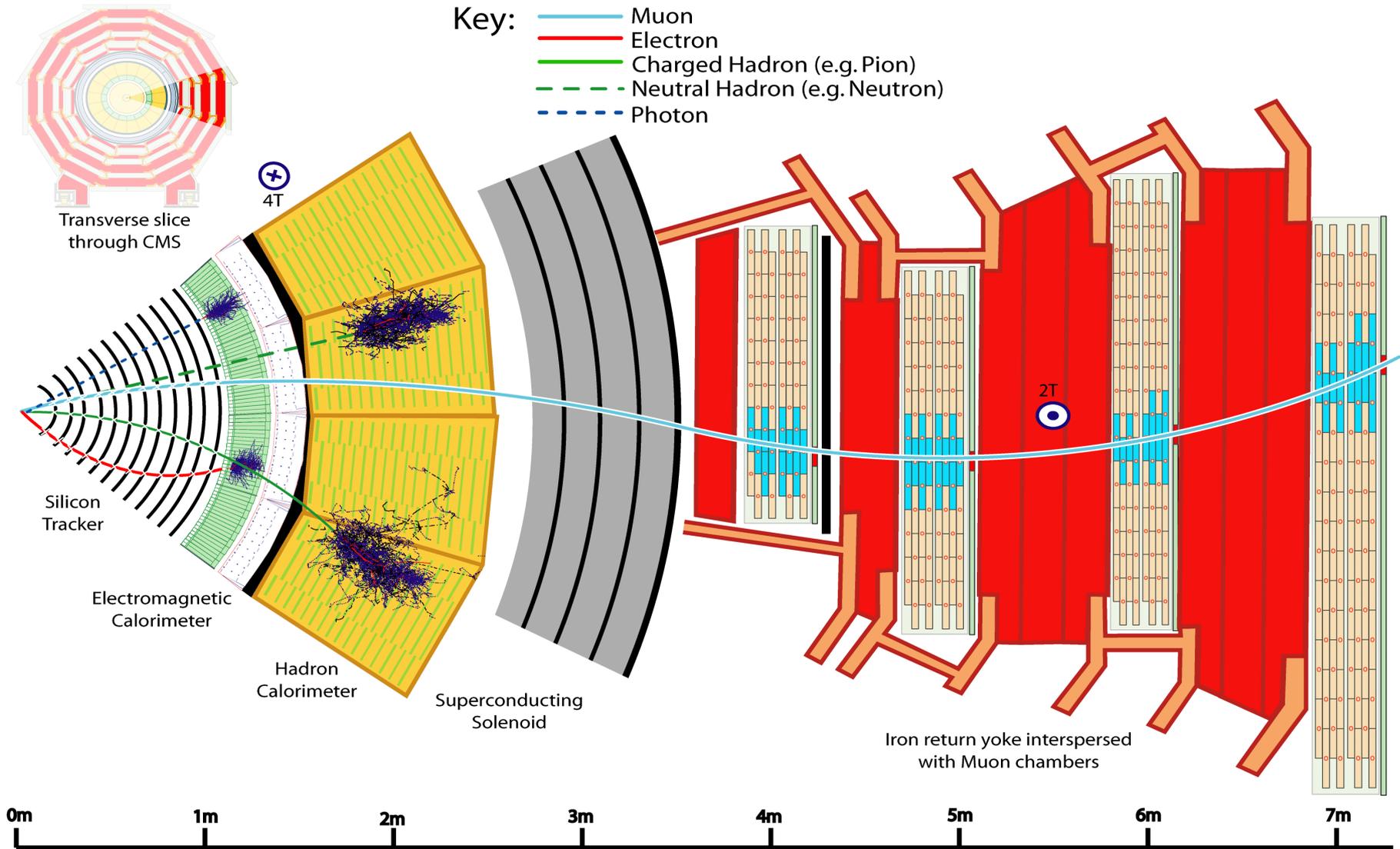
Electron ?

Signature expérimentale : l'électron



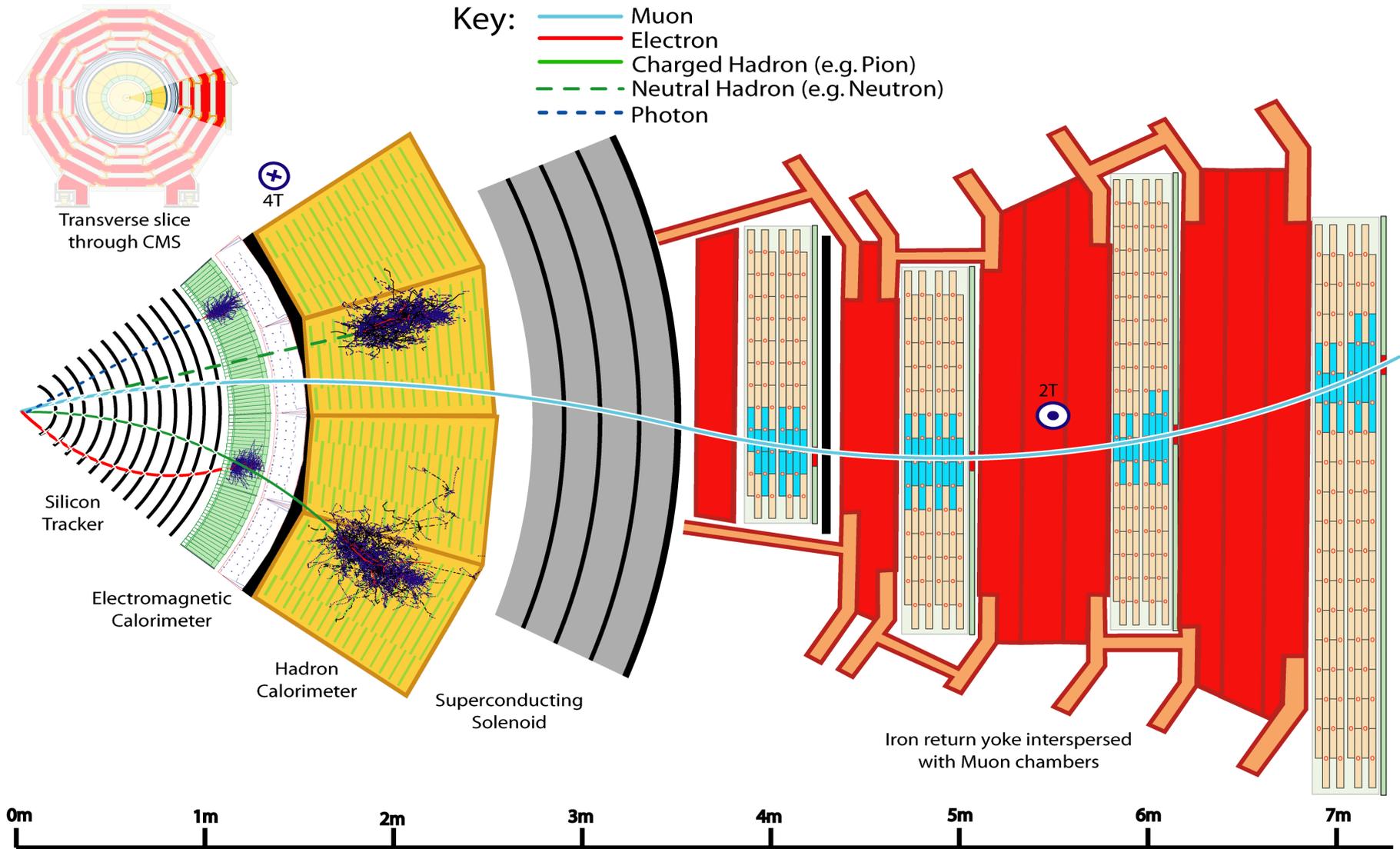
Electron : trace chargée dans le trajectographe et dépôt d'énergie dans le calo électromagnétique

Signature expérimentale : le photon



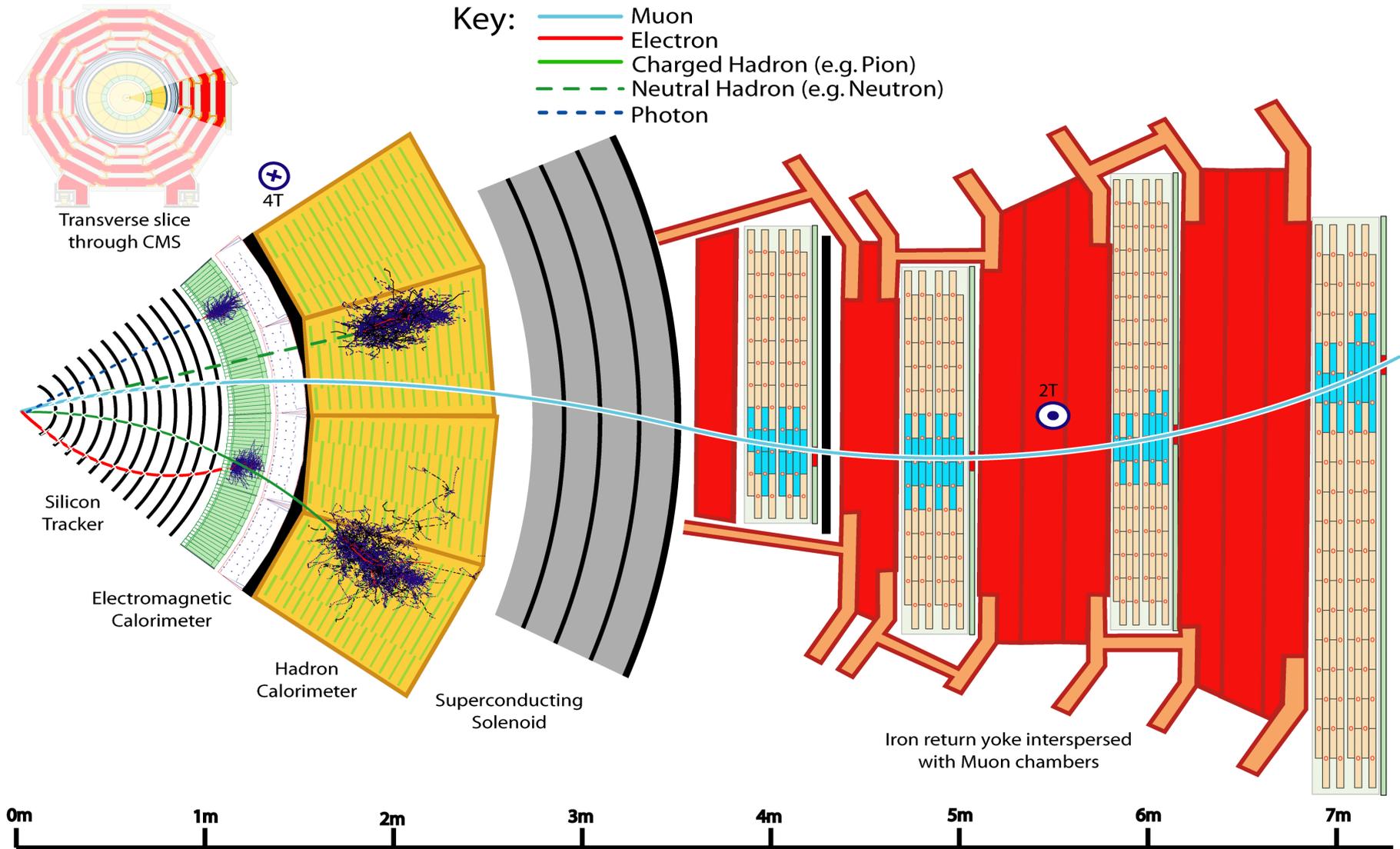
Photon ?

Signature expérimentale : le photon



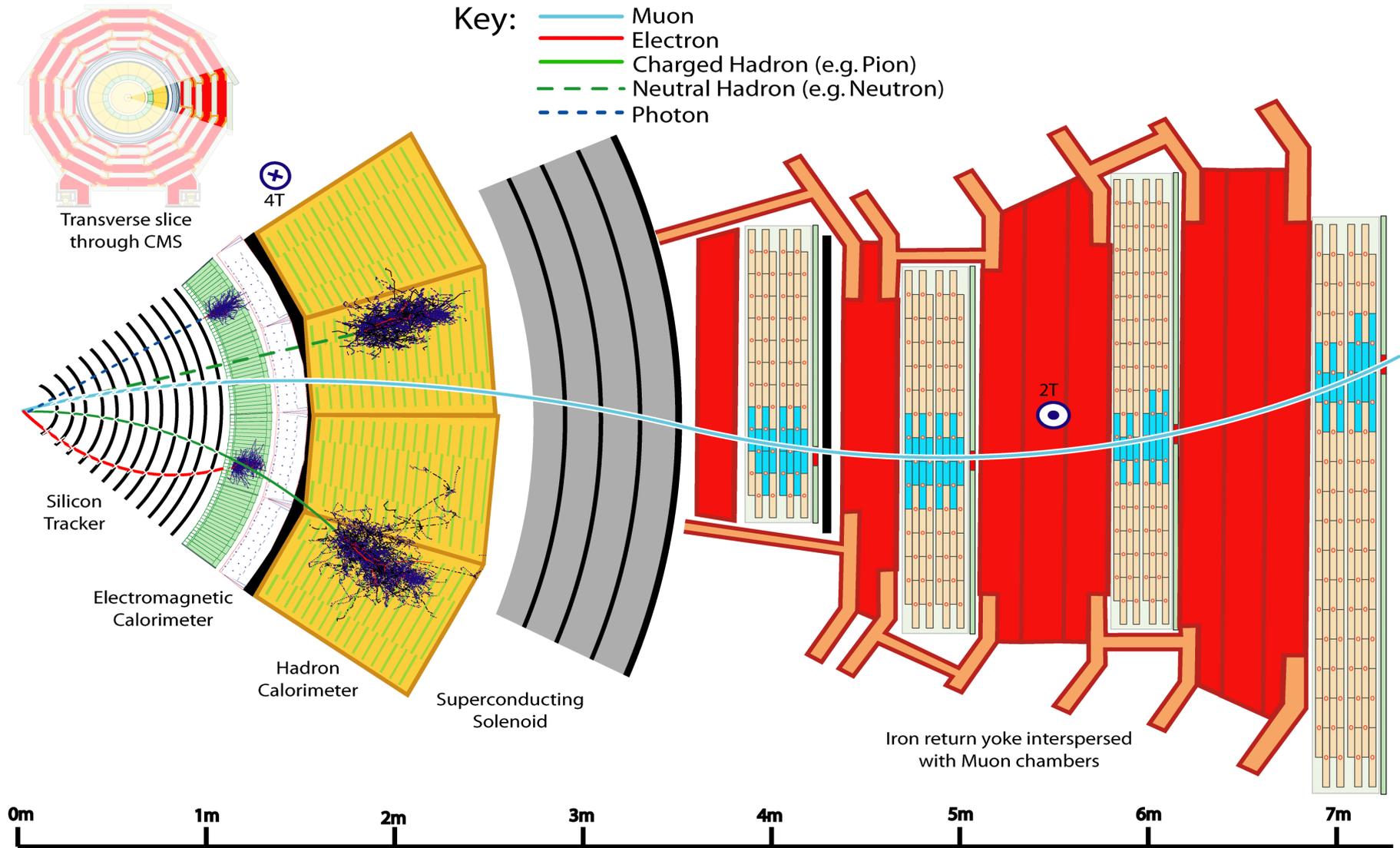
Photon : dépôt d'énergie dans le calo électromagnétique

Signature expérimentale : le neutrino



Neutrino ?

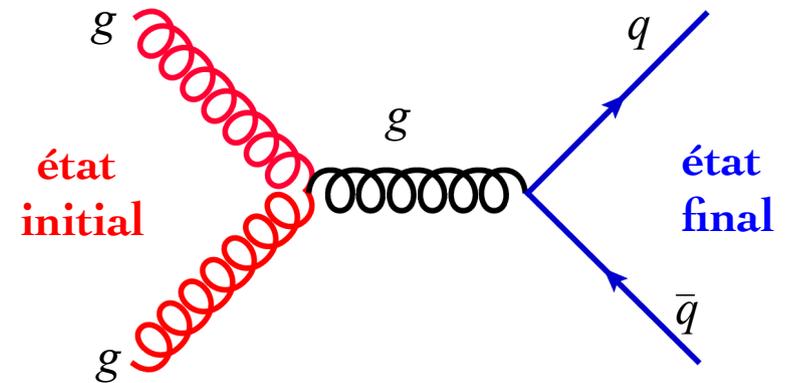
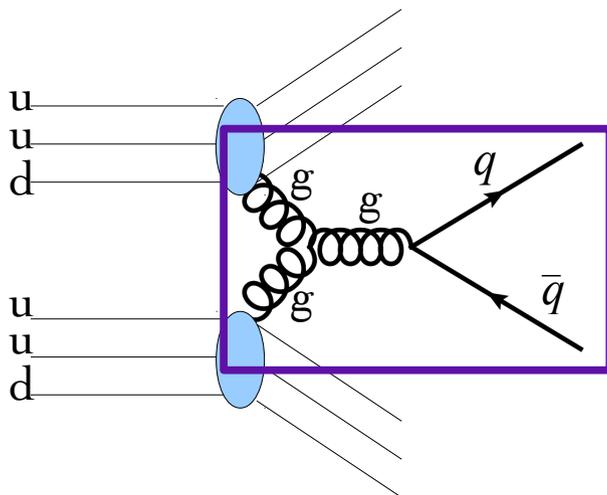
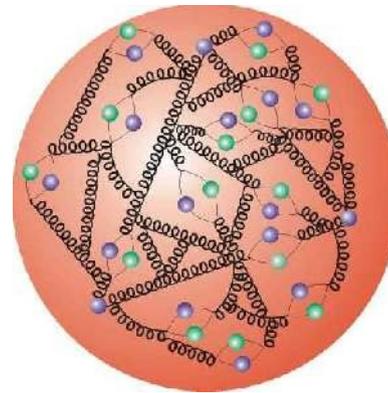
Signature expérimentale : le neutrino



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

Les collisions proton-proton

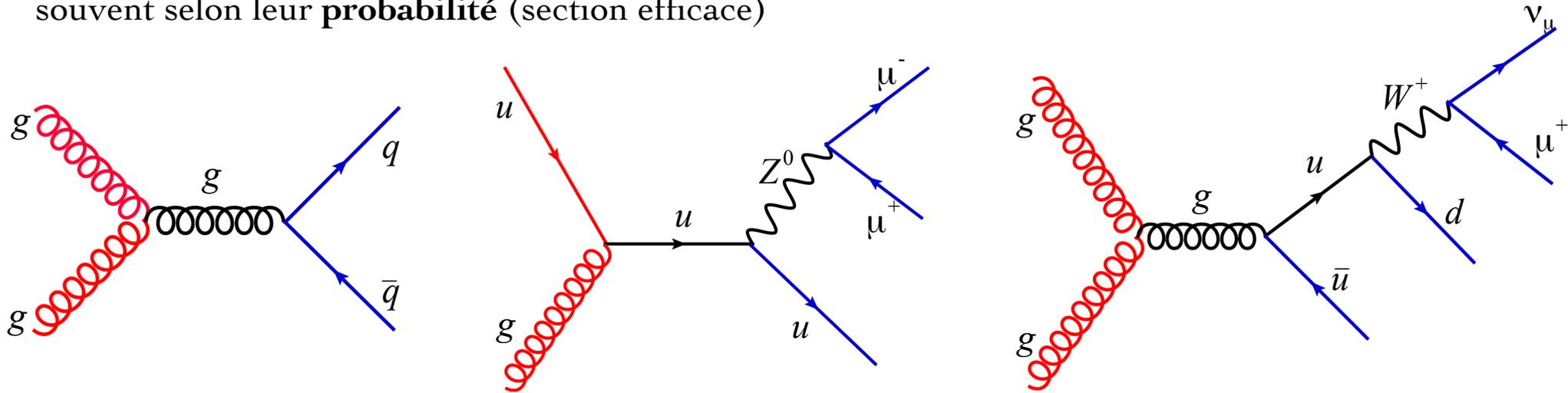
- Modèle Standard (MS) : théorie mathématique qui explique les interactions entre particules élémentaires, construite grâce aux expériences
- Le MS détermine quoi peut interagir et comment
- Proton composé de quarks, antiquarks et gluons



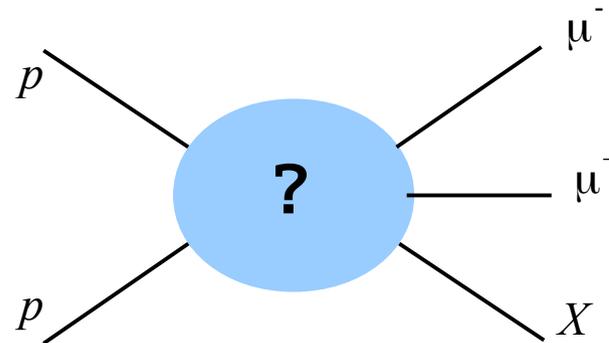
temps →

Les collisions proton-proton

- Plusieurs processus possibles quand on collisionne deux protons (uud)
- Tous les processus possibles (qui respectent les règles de la théorie) ont lieu, juste plus ou moins souvent selon leur **probabilité** (section efficace)



- Plusieurs possibles états initiaux différents (chacun avec sa probabilité)
- Plusieurs possibles états finaux différents (chacun avec sa probabilité)
- Plusieurs processus pour un même état final !



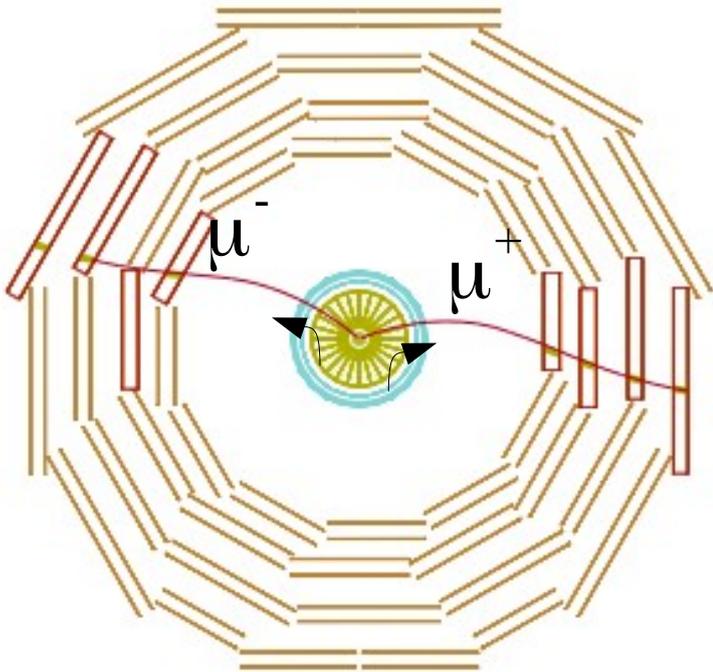
Analyse des données : sélection

- Parmi tous les processus je veux isoler les évènements qui m'intéressent (**sélection**)

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

les Z se désintègrent en 2 leptons

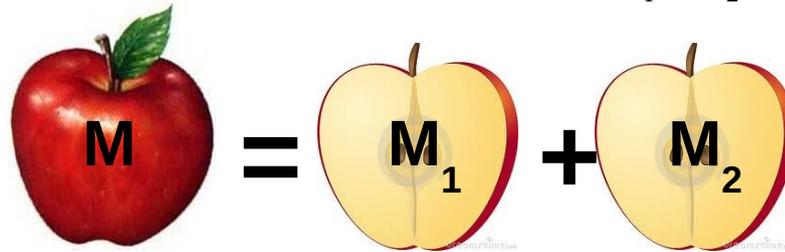
- Pour le Z^0 , je vais isoler les évènements qui contiennent deux muons ou deux électrons de charge opposée



- Attention : le Z^0 n'est pas le seul à donner un tel état final, il y a d'autres processus (**bruits de fond**)
 - Il faut un autre angle d'attaque après la sélection : différentes **techniques d'analyse des données**

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

- Le boson Z se désintègre très vite en deux muons et il n'est pas directement visible dans le détecteur. Les muons sont mesurés.

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

- La masse invariante du Z est

$$M_Z c^2 = \sqrt{E_Z^2 - |\vec{p}_Z|^2 c^2} \quad (M_Z \sim 90 \text{ GeV} / c^2)$$

- Conservation de l'énergie et de l'impulsion

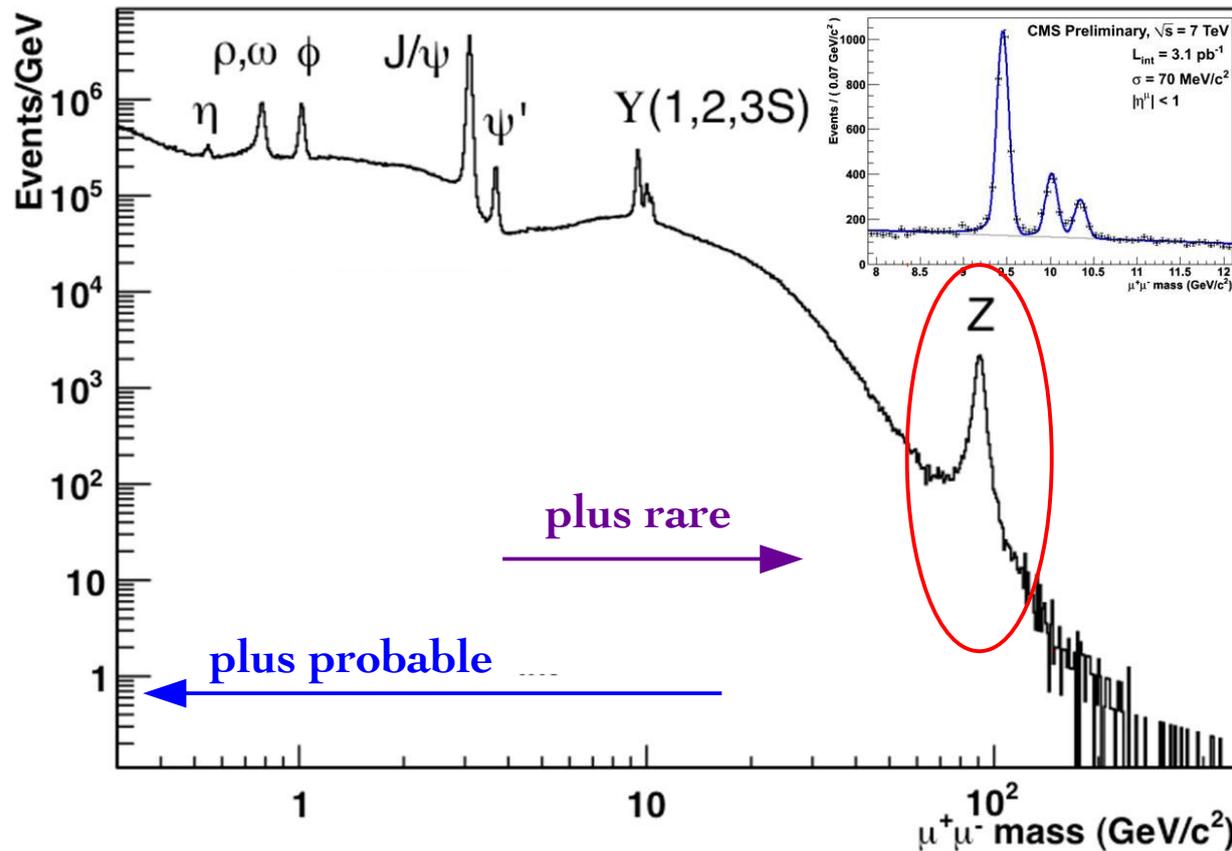
$$\begin{cases} E_Z = E_{\mu^+} + E_{\mu^-} \\ \vec{p}_Z = \vec{p}_{\mu^+} + \vec{p}_{\mu^-} \end{cases}$$

- À partir des énergies et impulsions mesurées pour les deux muons on peut remonter à la masse de la particule qui leur a donné naissance

$$M_Z c^2 = \sqrt{E_Z^2 - |\vec{p}_Z|^2 c^2} = \sqrt{(E_{\mu^+} + E_{\mu^-})^2 - |\vec{p}_{\mu^+} + \vec{p}_{\mu^-}|^2 c^2}$$

Masse invariante des deux leptons

Distribution de la masse invariante de paires de muons

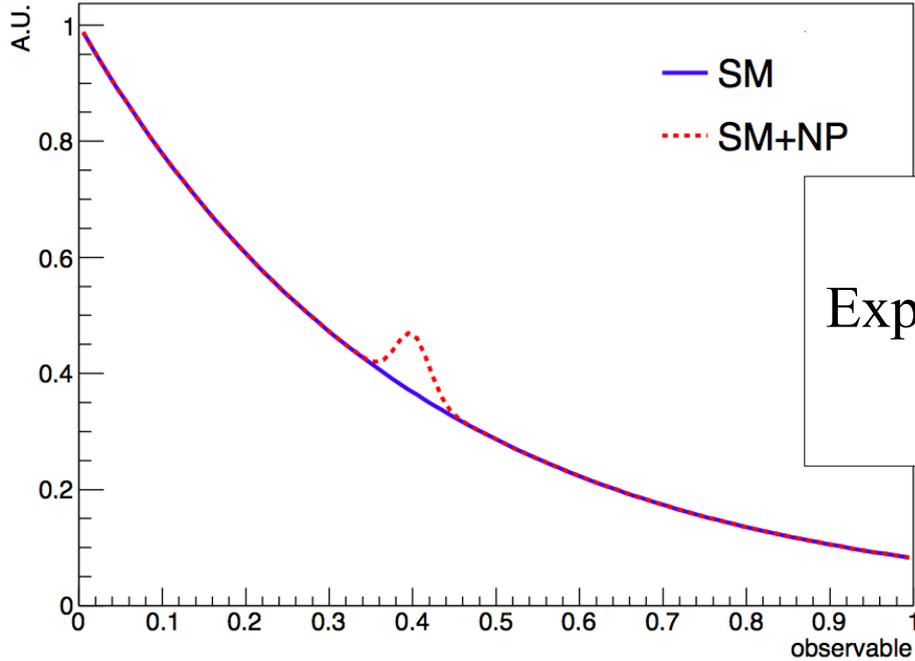


Masse invariante permet de :

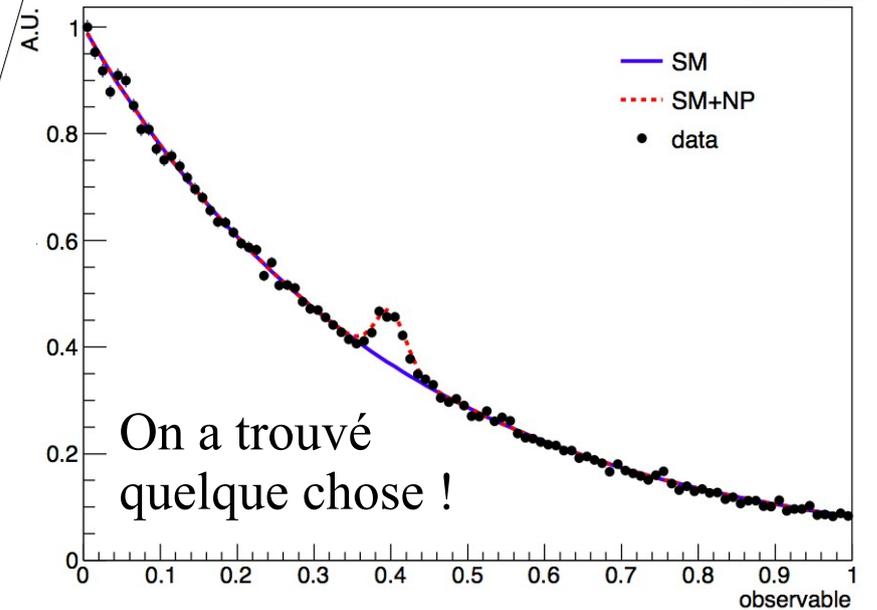
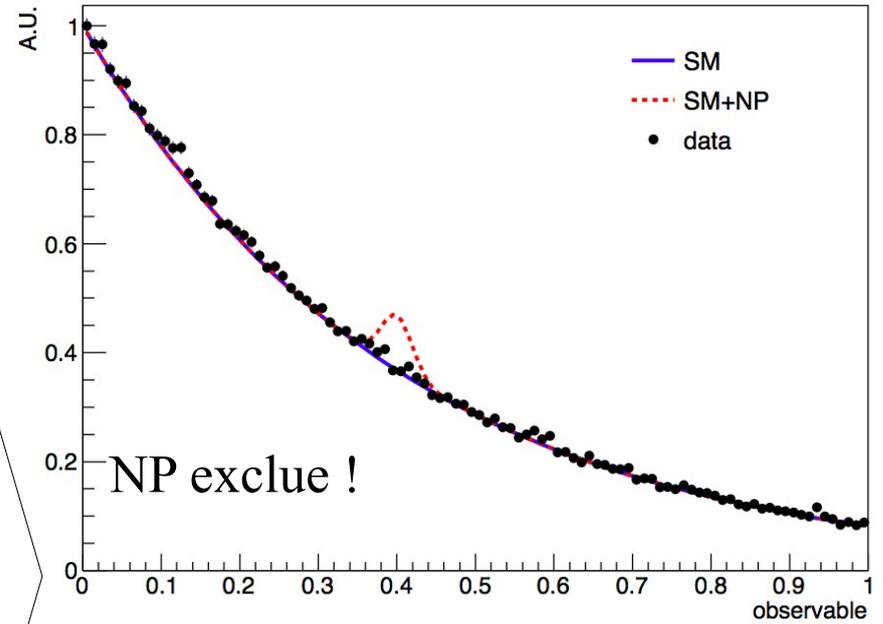
- Identifier une particule si on connaît sa masse
- Découvrir une nouvelle particule et déterminer sa masse
 - Intéressant d'avoir plusieurs canaux (e.g. $\mu^+\mu^-$ et e^+e^-)

Statistique !

Théorie

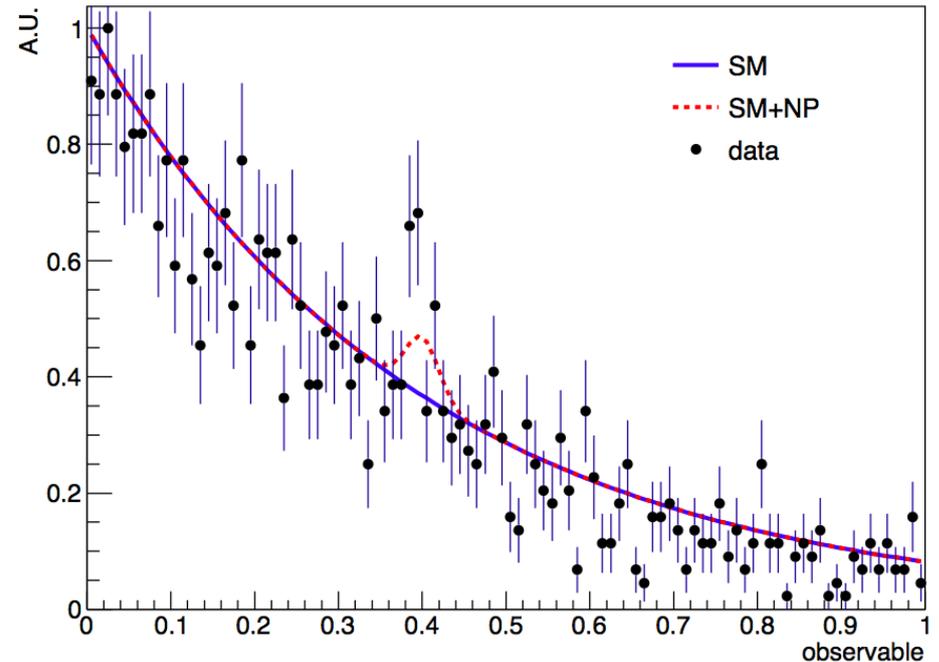
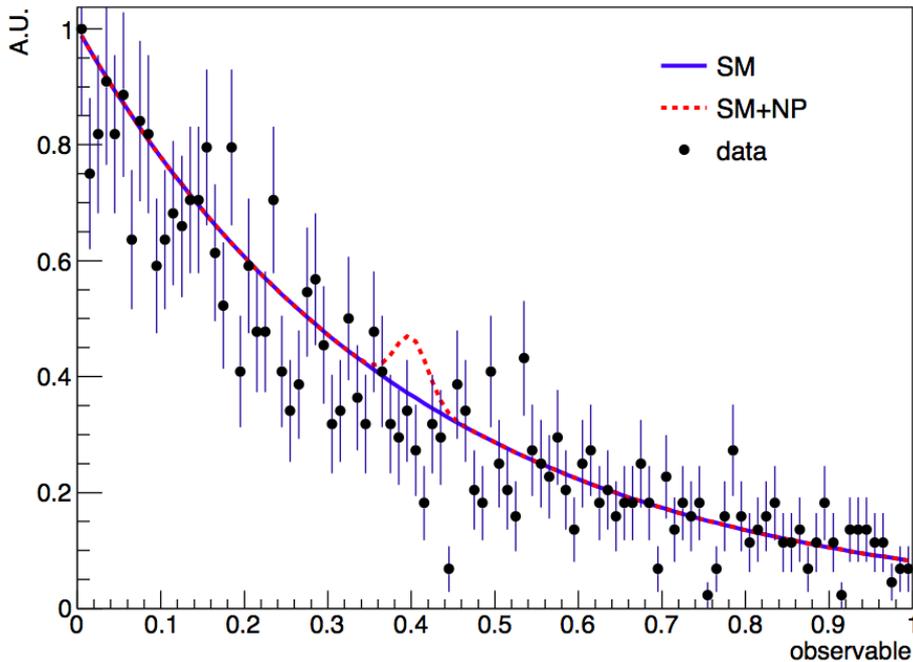


Expérience



Statistique !

Quelle est la probabilité que le signal que j'observe est en vérité une fluctuation statistique du bruit de fond ?

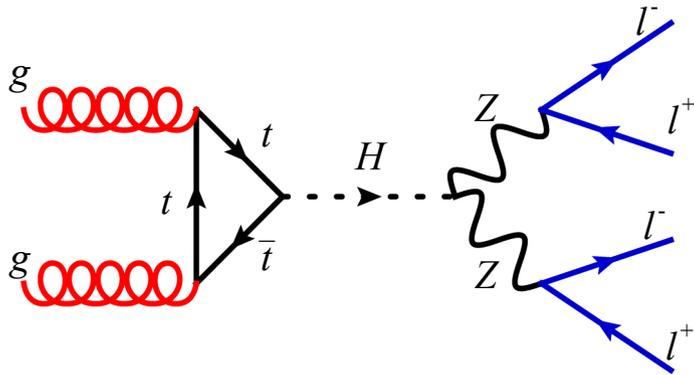


Toutes les découvertes/exclusions qu'on fait sont de **nature statistique**

- besoin d'accumuler des données (plus ou moins selon la probabilité du processus)
- on donne toujours un résultat avec sa probabilité

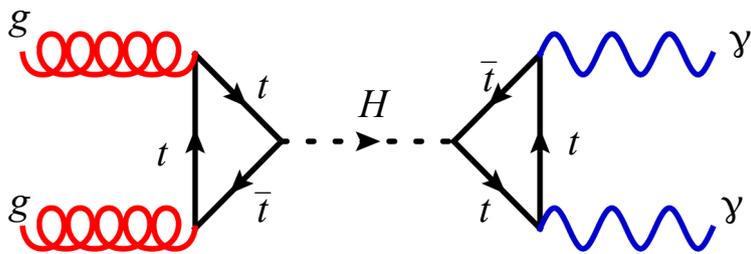
Recherche du boson de Higgs

Boson de Higgs créé dans les collisions, il peut se désintégrer de plusieurs façons



Sélection :

2 paires de leptons de même saveur et charge opposée
($\mu^+\mu^-e^+e^-$ ou $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ ou $e^+e^-e^+e^-$)



Sélection :

2 photons

Il faut

- 10 millions de collisions pour produire un Z
- 500 milliards de collisions pour produire un H

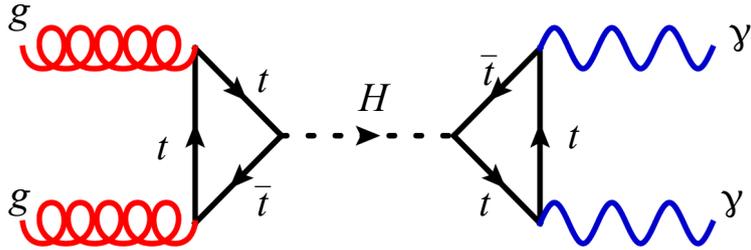
Et encore, seulement **3%** de ces H se désintègre en **ZZ** et **2‰** en **$\gamma\gamma$** !

Technique d'analyse :

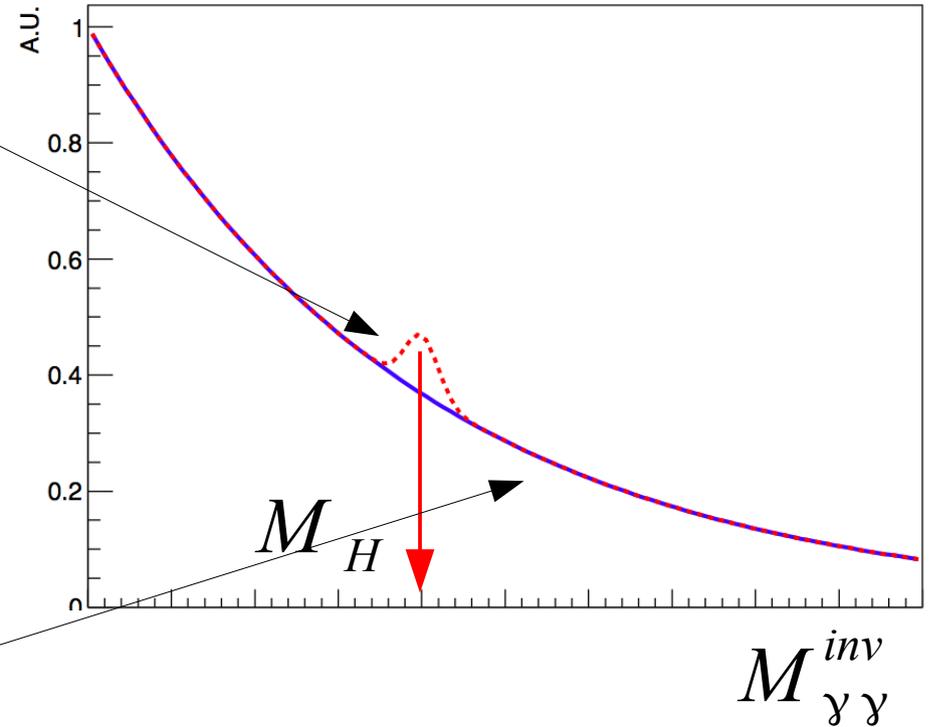
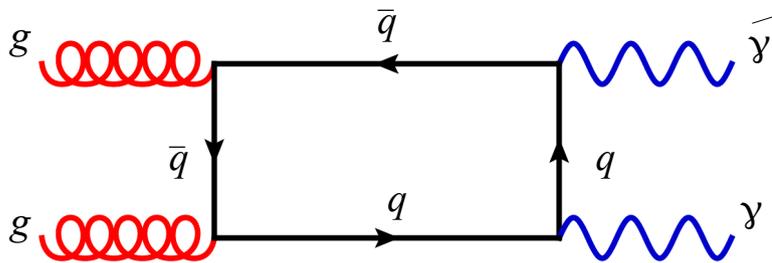
Masse invariante (et ça doit donner la même valeur dans les deux canaux !)

Recherche du boson de Higgs

Signal

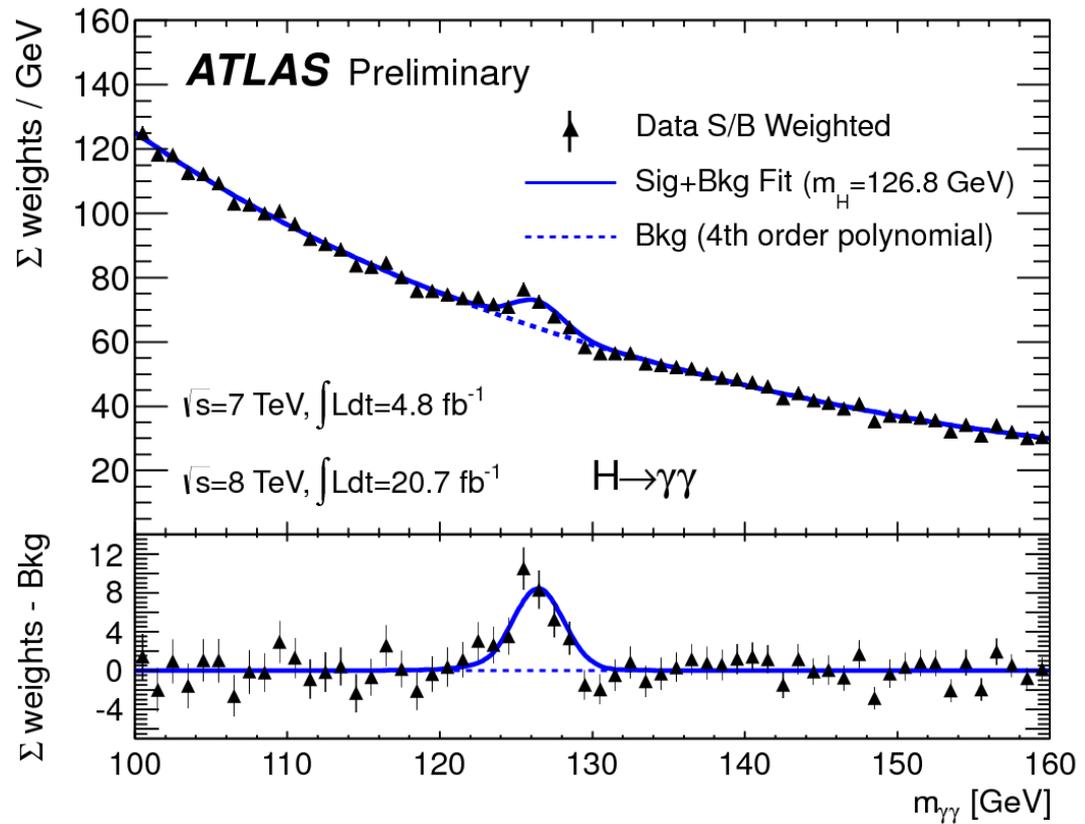
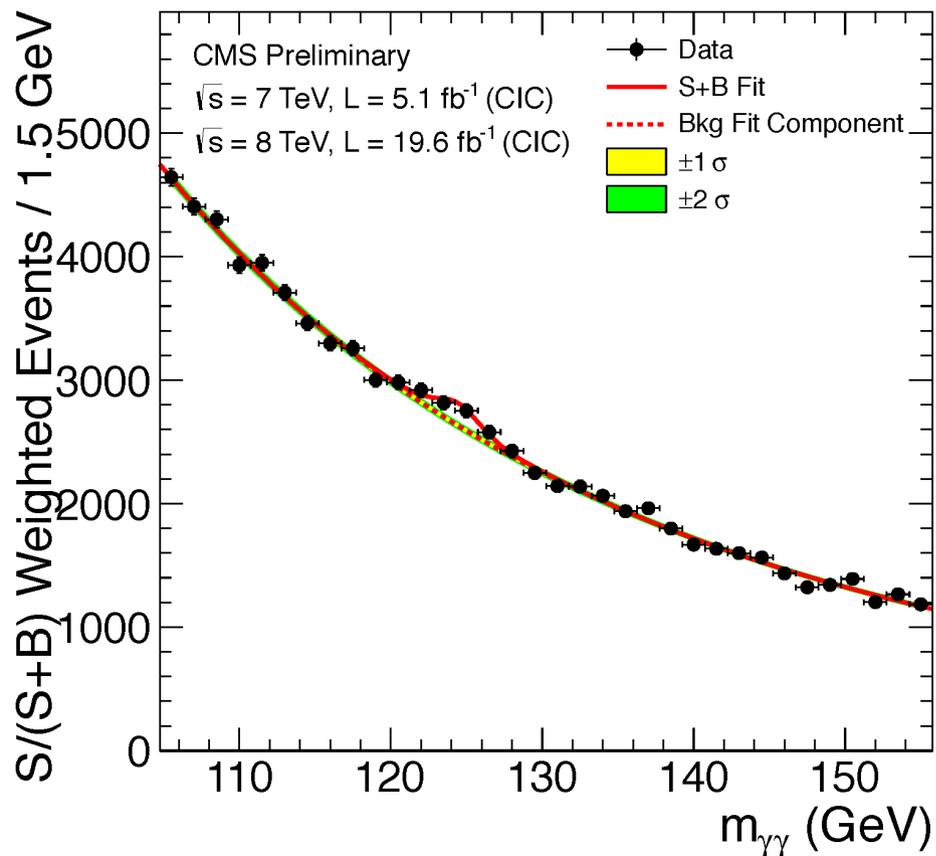


Bruit de fond



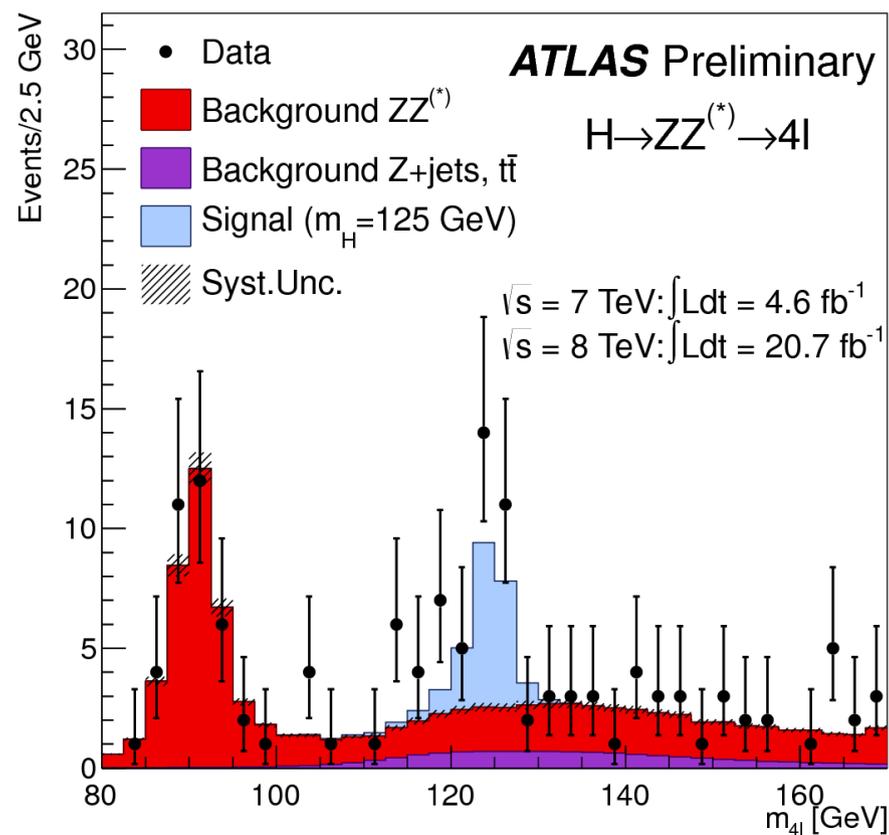
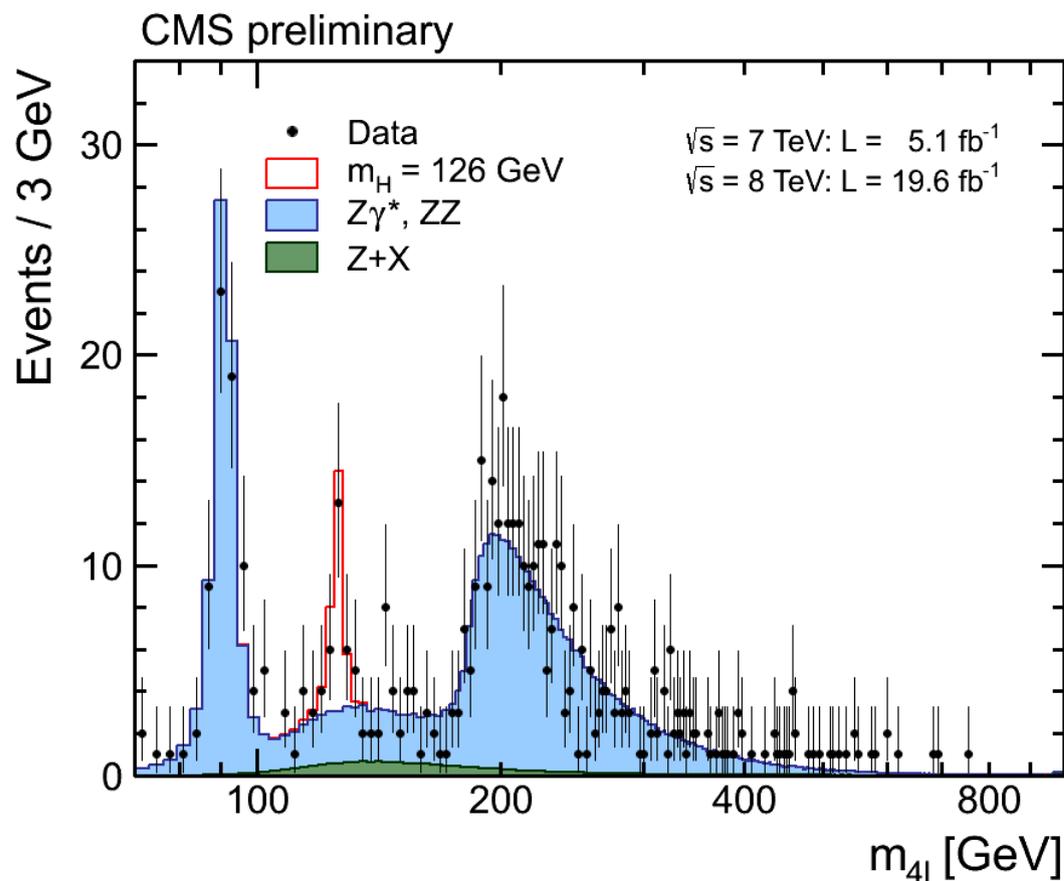
Recherche du boson de Higgs

- Évènements avec deux photons dans l'état final
- Distribution de la masse invariante



Recherche du boson de Higgs

- Évènements avec quatre leptons dans l'état final ($\mu^+\mu^-e^+e^-$ ou $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ ou $e^+e^-e^+e^-$)
- Distribution de la masse invariante



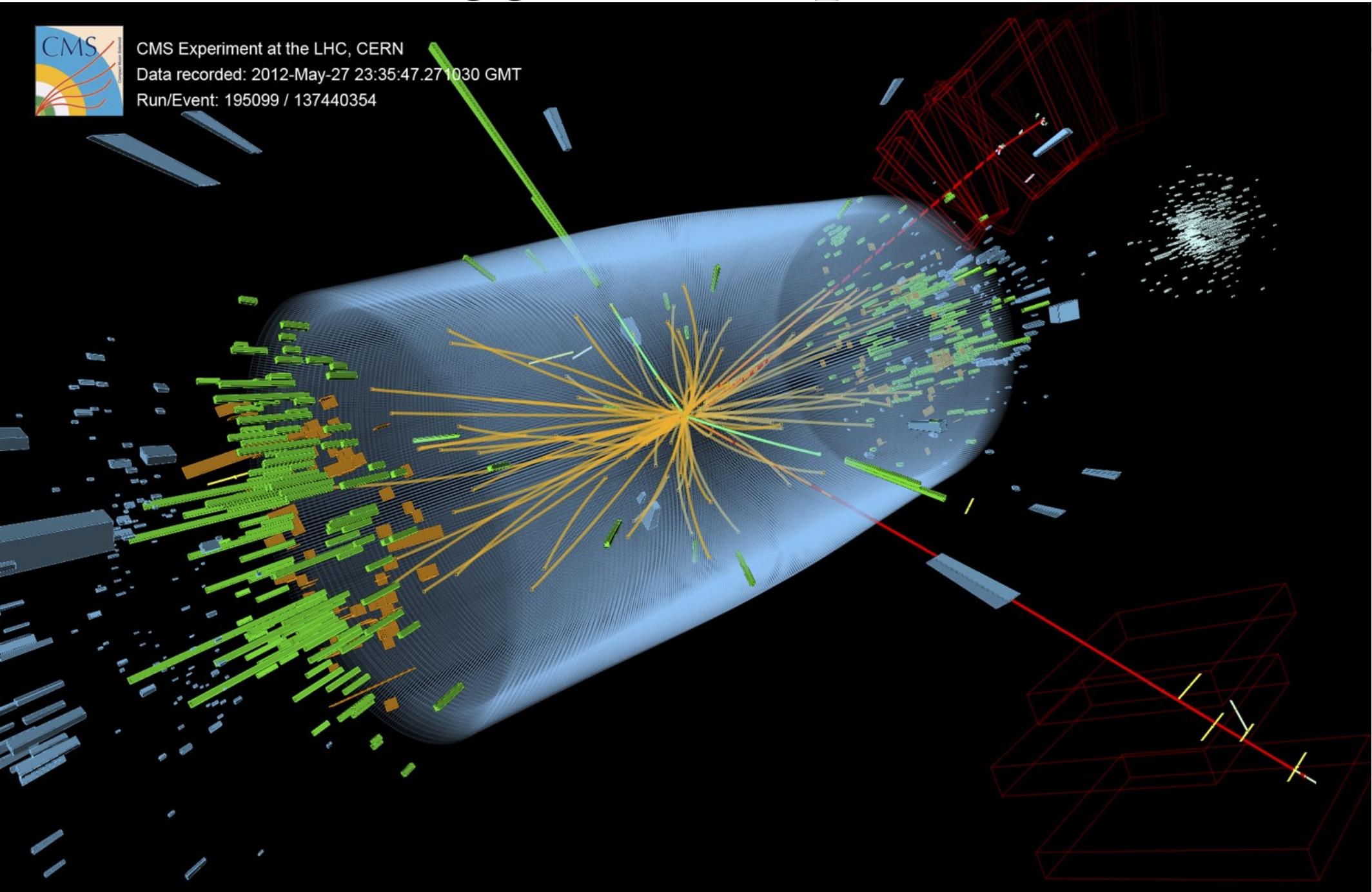
Higgs en 4 leptons



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT

Run/Event: 195099 / 137440354

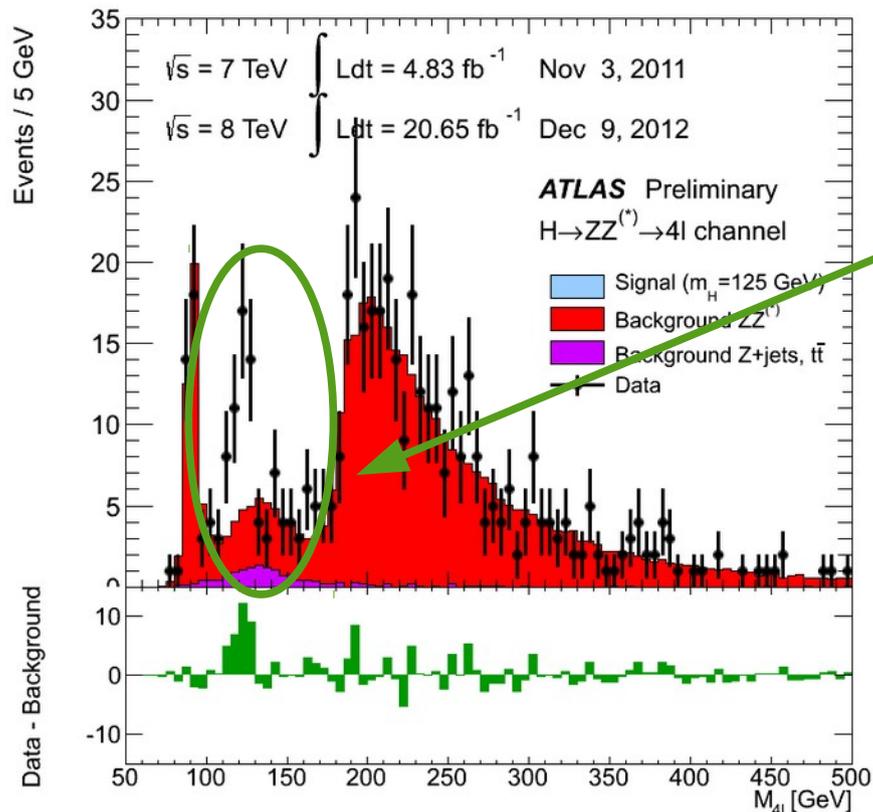


Statistique !

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.



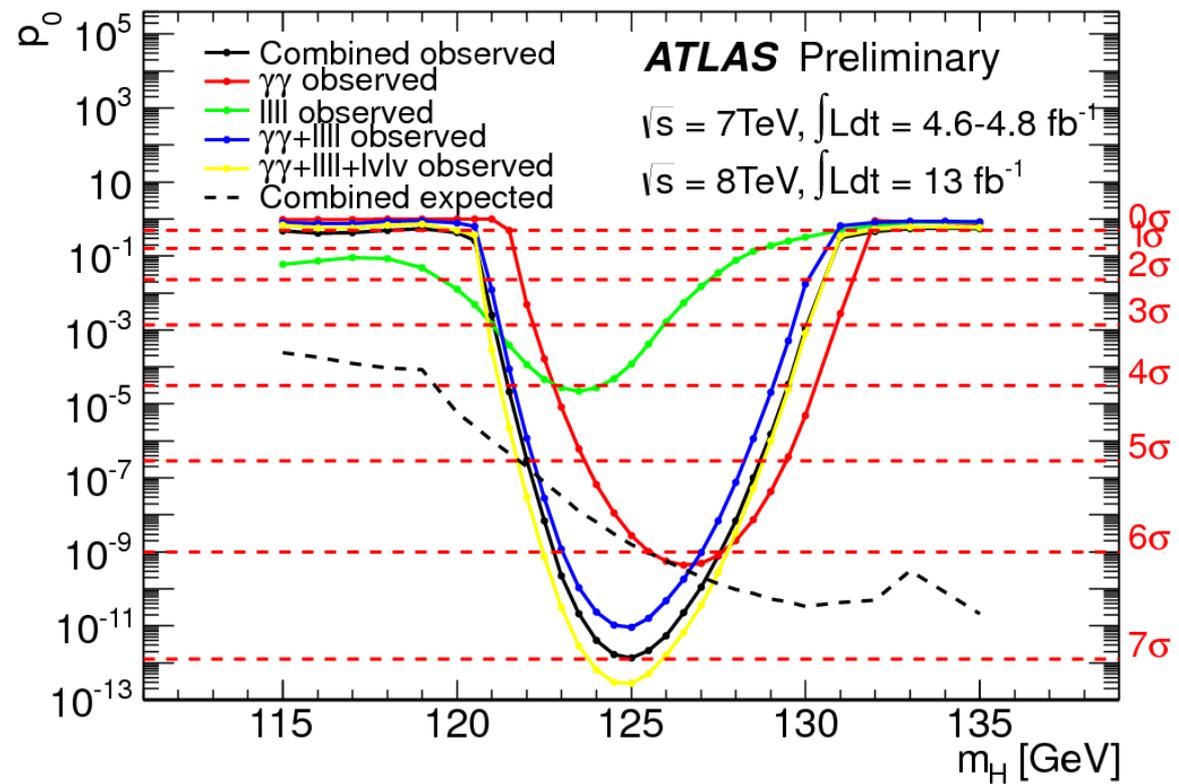
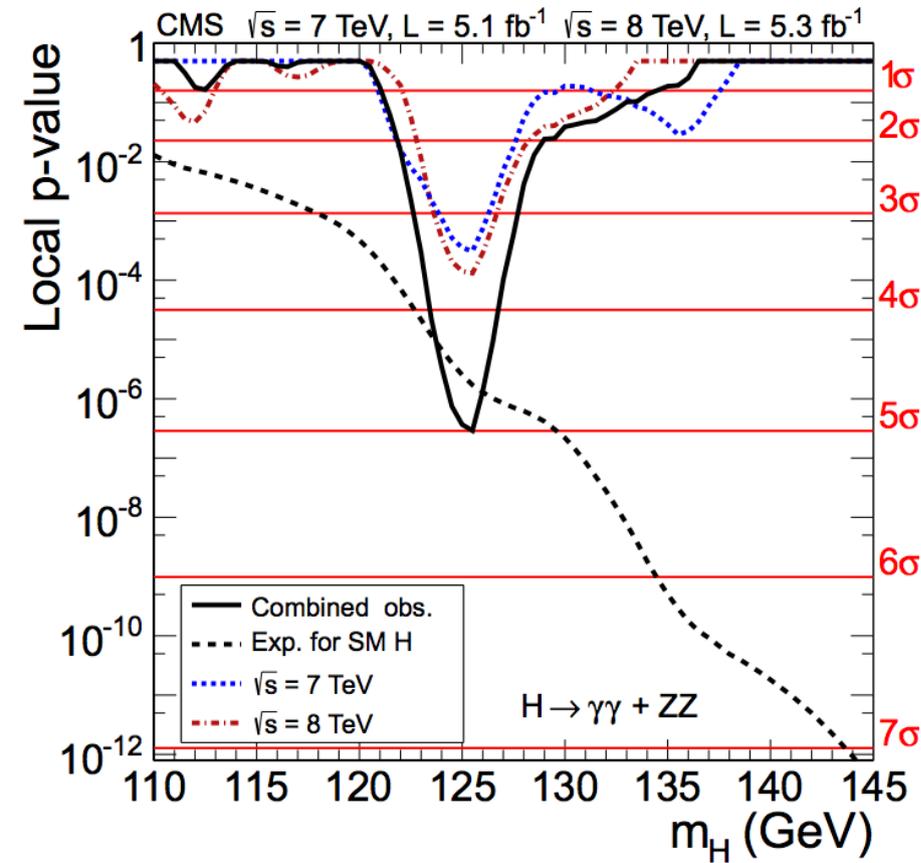
Présence d'une particule de masse $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$ mise en évidence sur les données 2011 et 2012.

Accumulation des données le long des années 2011 et 2012 :

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

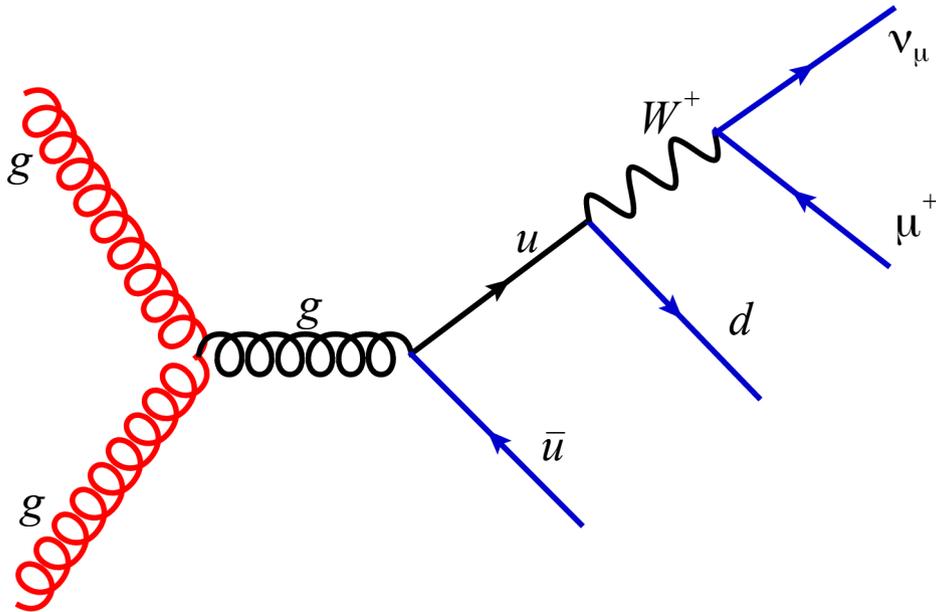
Statistique !

On mesure la probabilité que ce qu'on observe soit une fluctuation du bruit de fond



Un dernier exemple : le W

Les bosons W sont produits dans les collisions pp
(il faut 1 million de collisions pour produire 1 W)



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

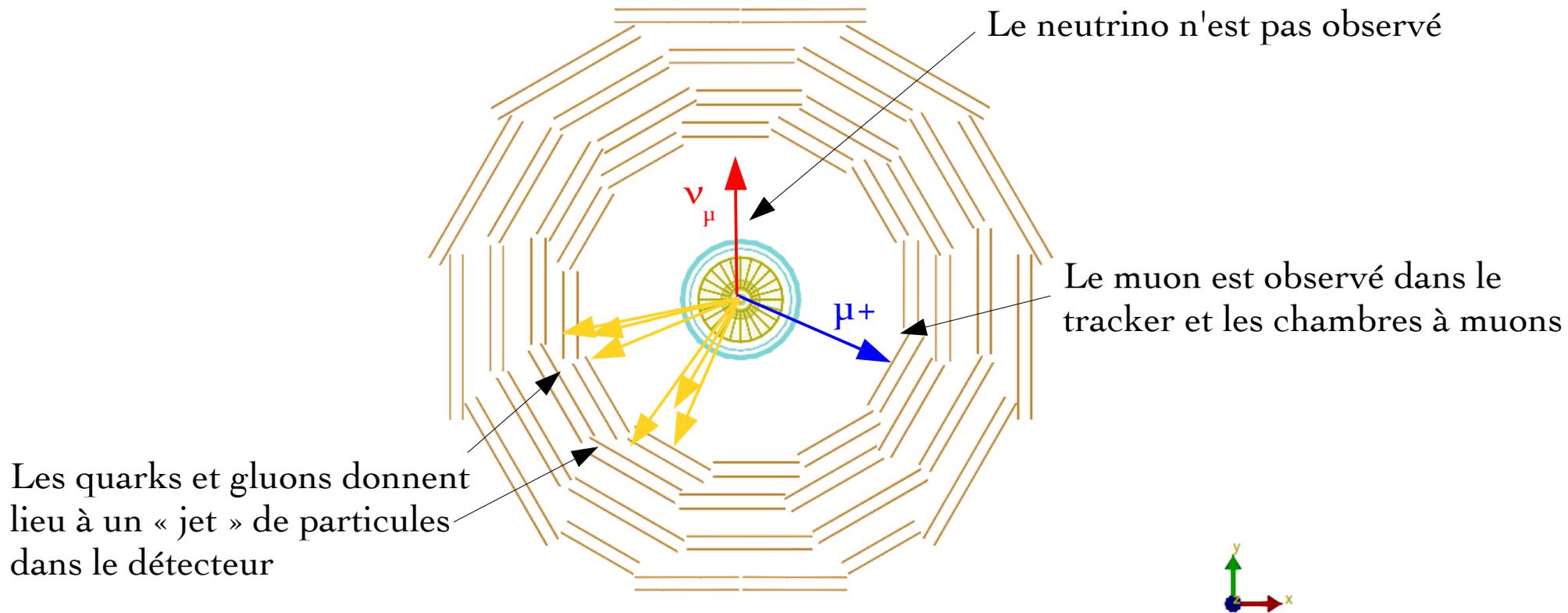
$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$

Les W se désintègrent en **lepton neutrino**



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

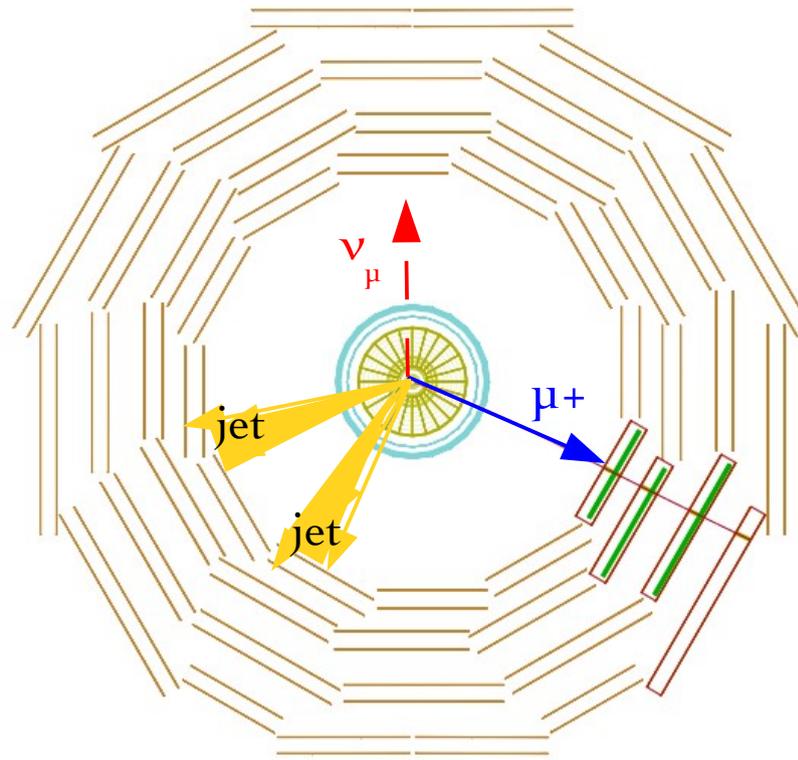
Particule chargée créée dans les collisions qui se désintègre en **lepton** et **neutrino**.
Le muon est détecté, le neutrino ne l'est pas





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



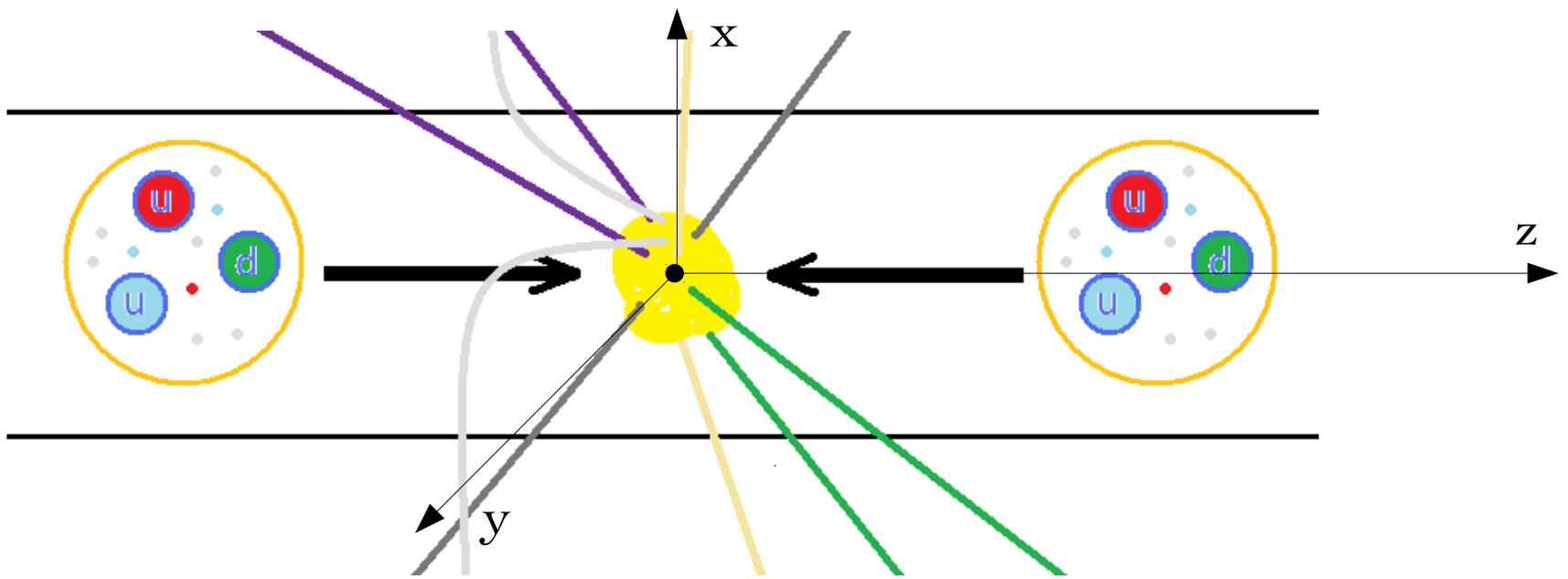
Lois de conservation

- 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

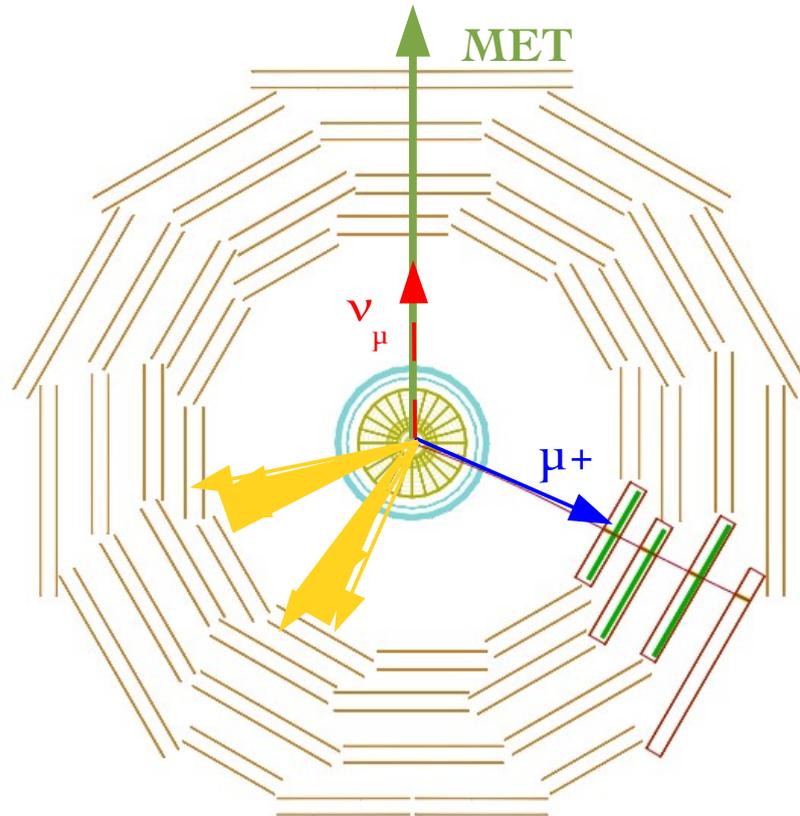




Le neutrino n'est pas observé.

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

Commentaires sur MET

- On mesure que les composantes x et y , pas équivalent à la mesure, par exemple, d'un lepton chargé (p_x, p_y, p_z), pas de reconstruction de la masse invariante
- Il peut y avoir plus d'une particule invisible ! (plusieurs neutrinos, des nouvelles particules)
 - D'ailleurs c'est une variable très utilisée pour les recherches de nouvelles particules (candidats matière noire)
- Très sensible au bruit du détecteur

Résumé

- Collisions proton-proton :
 - plein de processus physiques ont lieu. Parmi eux, celui qui nous intéresse
- Reconstruction des particules avec CMS
- Sélection : isoler l'état final lié au processus auquel on est intéressé
- Bruits de fond : connaître quels autres processus donnent le même état final et les modéliser
- Analyse des données : plusieurs techniques possibles
- Statistique : accumuler des données et bien évaluer la signification de nos observations
- Pendant votre visite au CERN, vous allez faire une expérience directe de tout cela !

Quelques liens

CERN website (« students and educators »)

<http://home.web.cern.ch/>

CMS website (liens sous « education and outreach »)

<http://cms.web.cern.ch/>

ATLAS public website

<http://atlas.ch/>

CMS public physics results

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResults>

ATLAS public physics results

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>

backup

Quelques chiffres...

Total pp xsection at 8TeV (<http://cds.cern.ch/record/1495764>) : ~100 mb

Z inclusive production xsec (<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsSMP>) :
~ $3 \cdot 10^4$ pb

H (mH 125) production cross section at 8TeV (<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections>) : ~ 20pb

Fraction of Z bosons decaying to $\mu^+\mu^-$ or e^+e^- 0.07

Fraction of H bosons decaying to

ZZ ~ 0.03

$\gamma\gamma$ ~ 0.002

20 fb-1 de collisions correspond à

20fb-1 x 100 mb ~ $2 \cdot 10^{17}$ events (100 millions de milliards !)

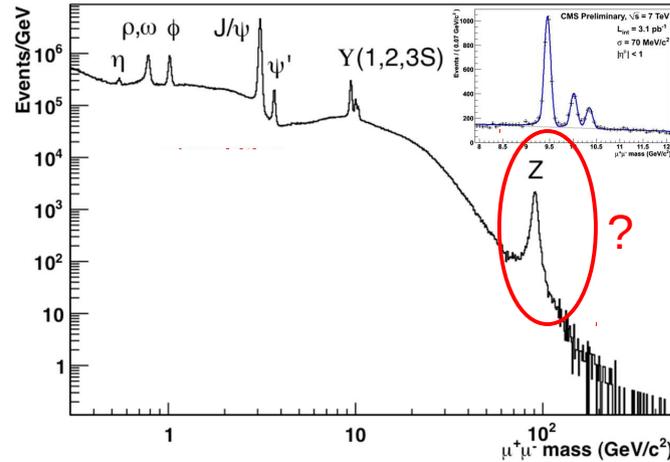
Prod Z/tot pp ~ 10^{-7} → il faut 10M de collision pour produire un Z

Prod H/tot pp ~ $2 \cdot 10^{-12}$ → y faut 500 milliards de collisions pour produire un H

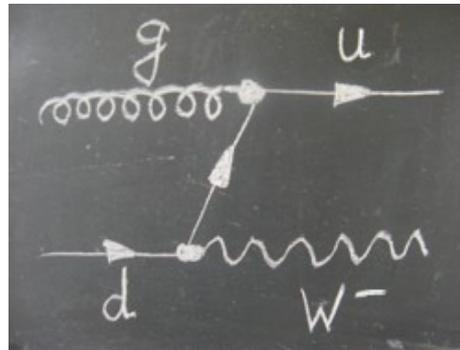
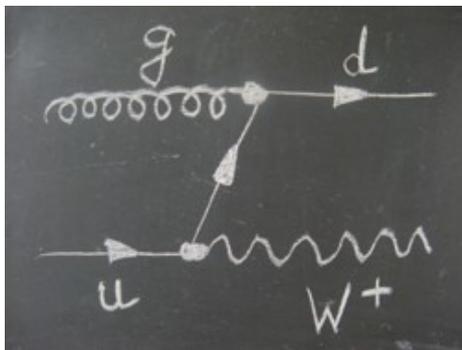
20fb-1 = 200 millions de milliards de collisions

Objectif de l'exercice

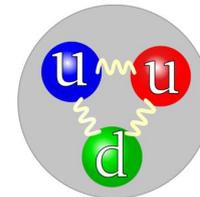
- Construire un spectre de masse invariante des paires de lepton, pour la recherche du Z



- 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...



Masse invariante

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:

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

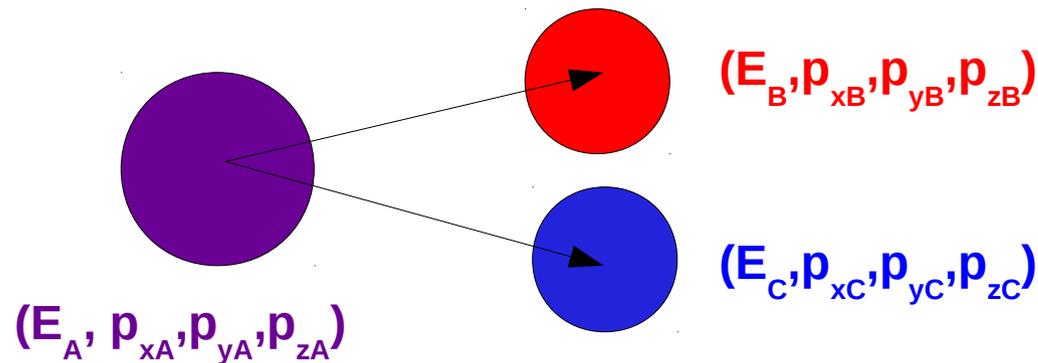
On choisit les unites de mesure telles que on peut mettre $c=1$

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

Masse invariante

● : 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:

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

Masse invariante

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:

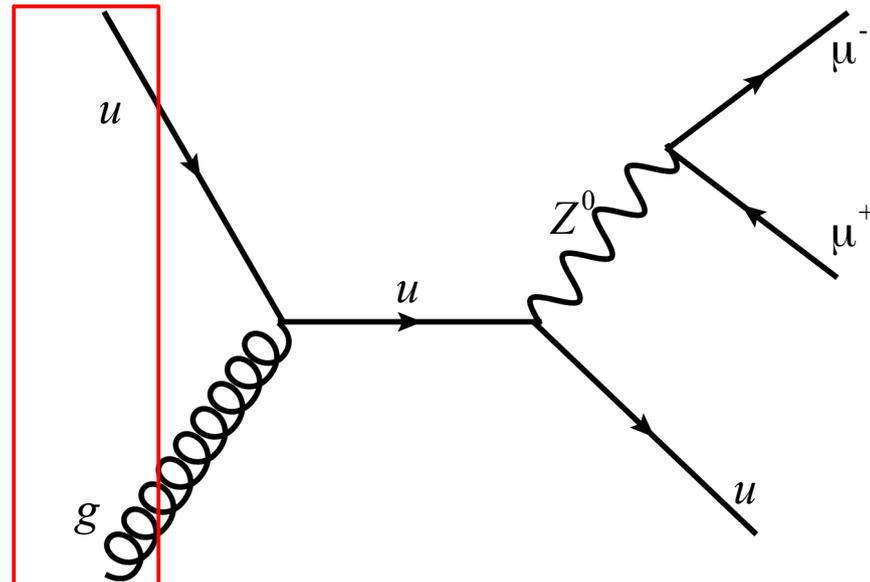
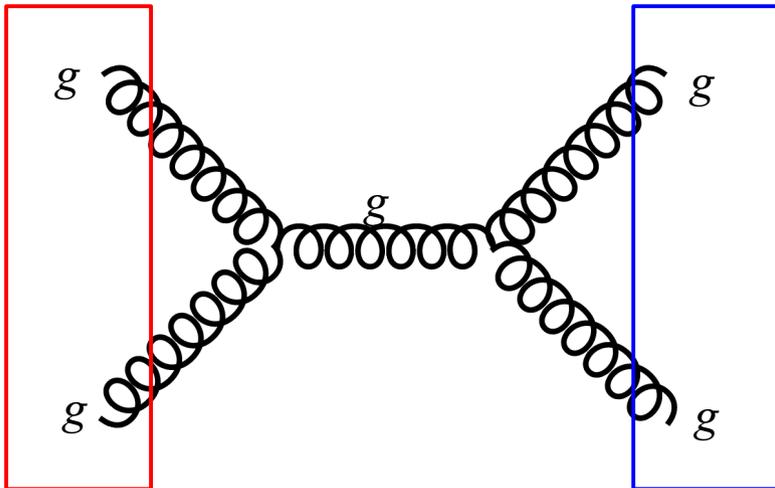
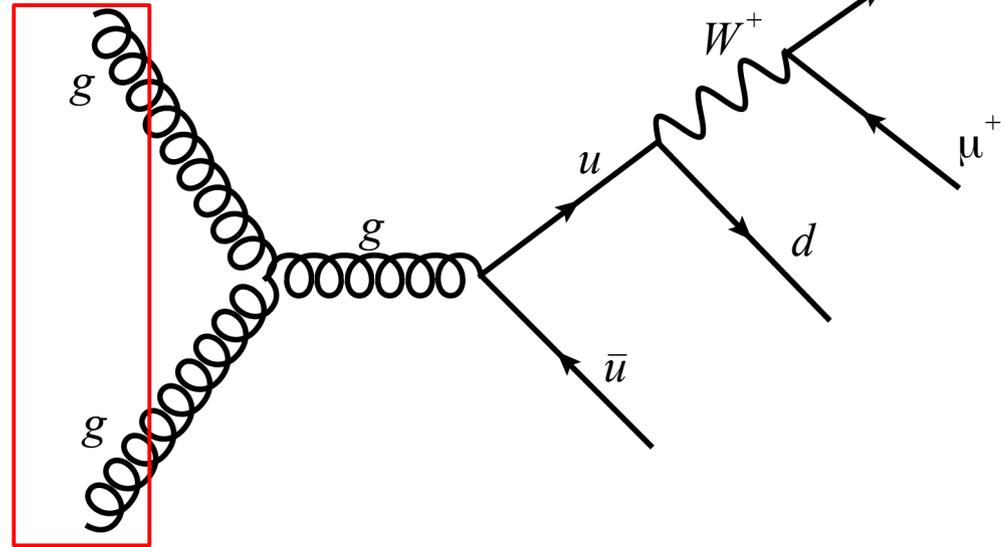
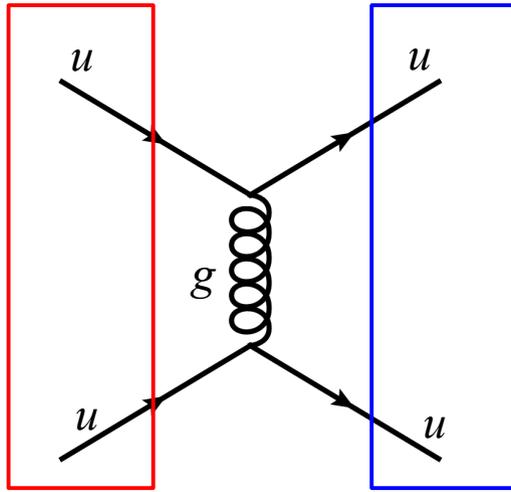


$$\vec{v}=(x_1+x_2, y_1+y_2, z_1+z_2)$$

On somme composante par composante.

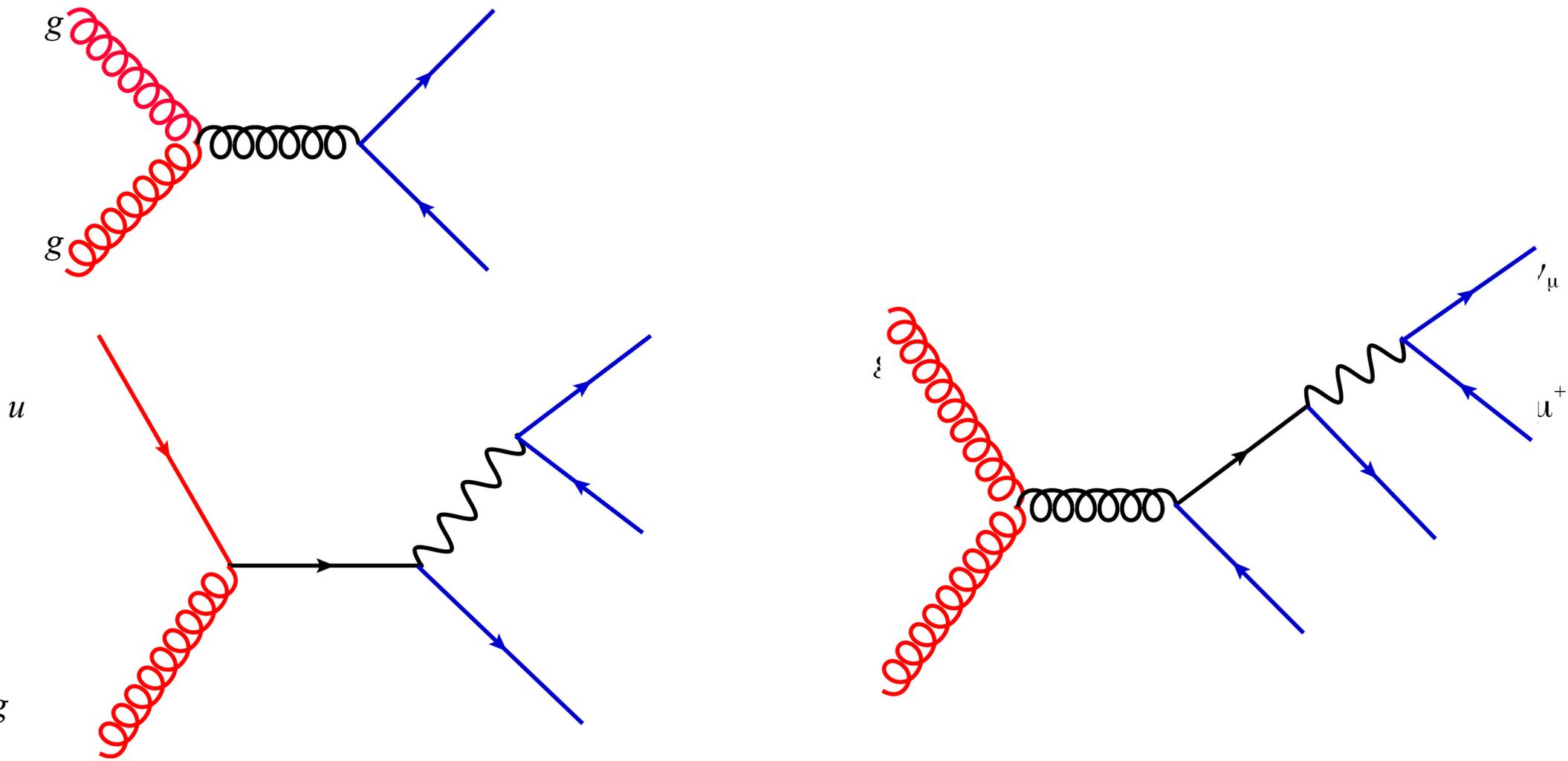
Pour le calcul de la masse invariante aussi, on somme separement les energies et les composantes de l'impulsion.

Les collisions proton-proton



Les collisions proton-proton

- Plusieurs processus possibles quand on collisionne deux protons (uud)
- Tous les processus possibles (qui respectent les règles de la théorie) ont lieu, juste plus ou moins souvent selon leur **probabilité** (section efficace)



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

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
- Quantité conservée : la «masse» de la particule qui se désintègre est égale à la « somme » des «masses » des deux leptons

