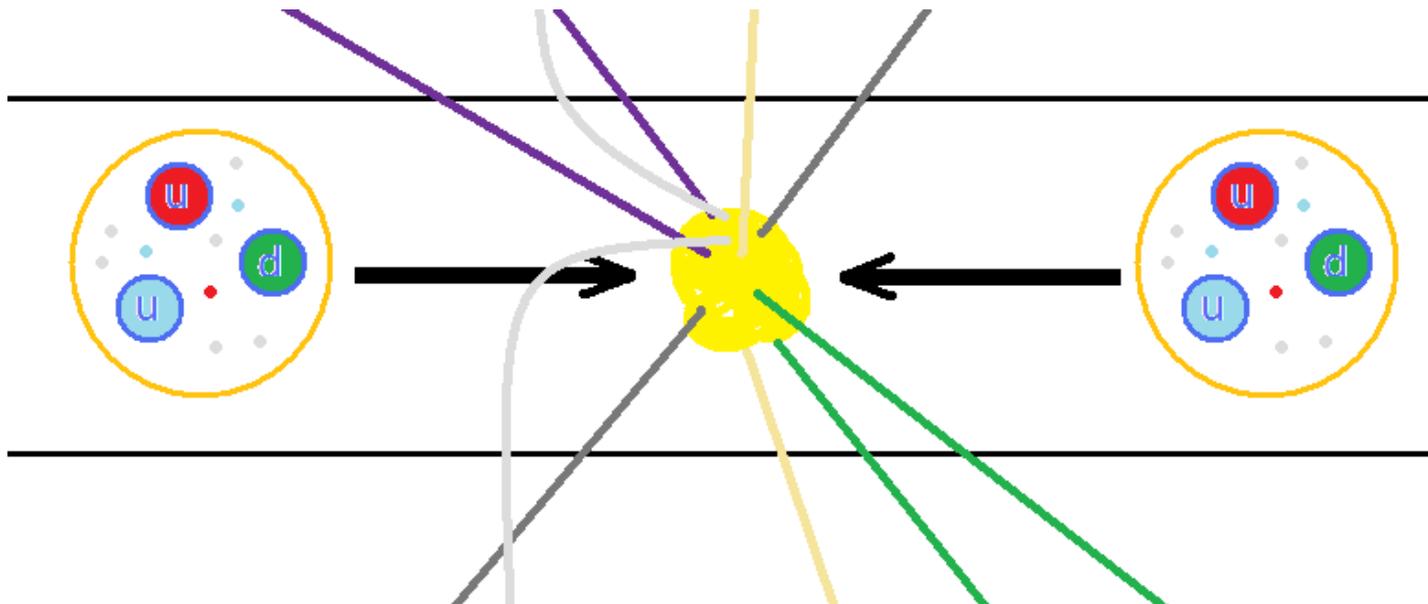


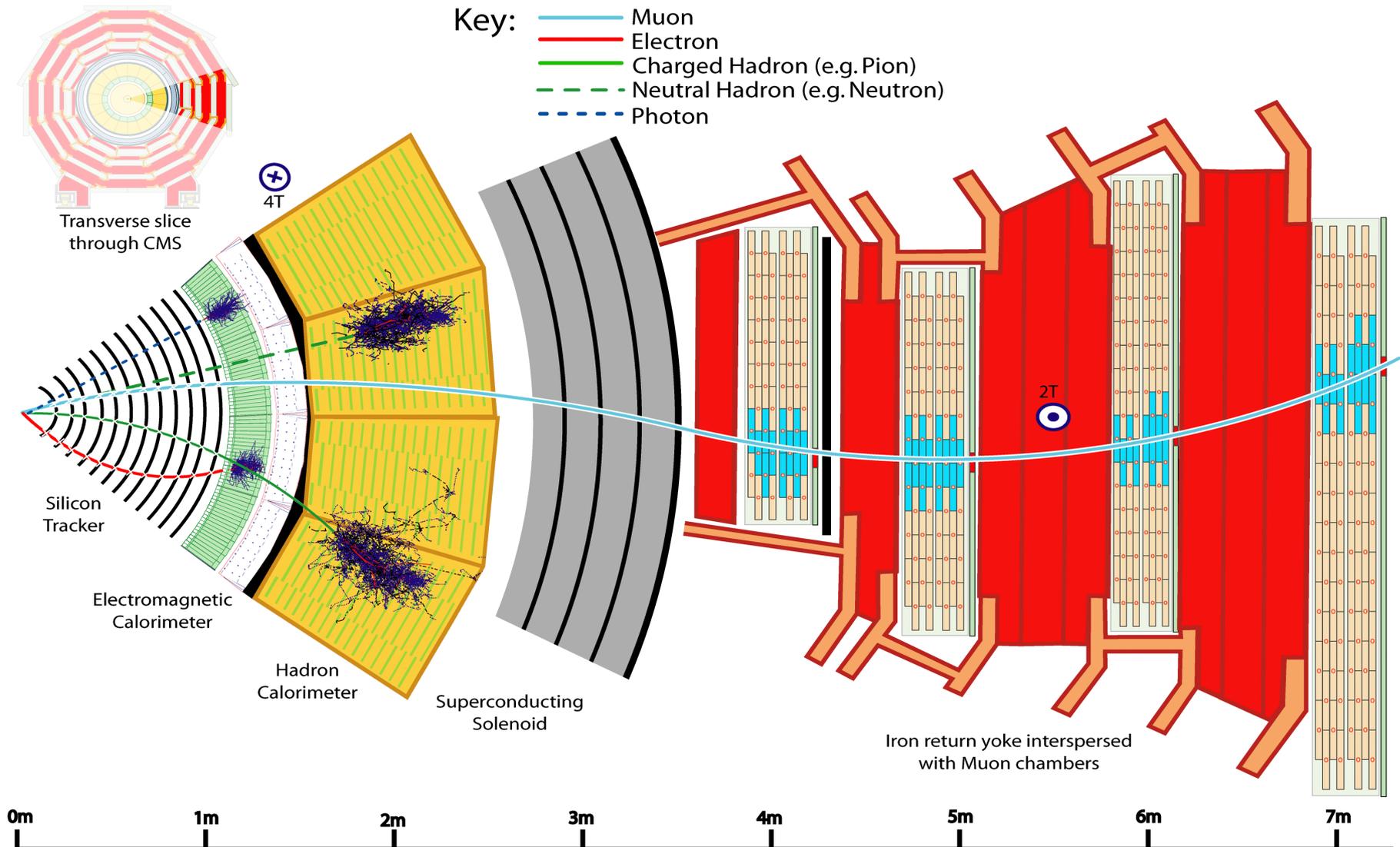
# Collisions au LHC

- Les protons de chaque faisceau ont une énergie de 3.5 TeV. L'énergie de la collision est  $2 \times 3.5 \text{ TeV} = 7 \text{ TeV}$
- Les particules qui constituent le proton ont seulement une fraction de son énergie
- Des nouvelles particules sont créés 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
- Des lois de conservation imposent des contraintes sur quelles désintégrations sont possibles (ex: conservation de la charge électrique)



# Le détecteur CMS

Différents parties du détecteur donnent des informations sur différents types de particules



# La masse d'une particule

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

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

Cette relation est valable pour une particule à repos.

Pour une particule qui a une vitesse on définit 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 liée à son énergie et impulsion :

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

Dans une désintégration ( $A \rightarrow B + C$ ) l'énergie et l'impulsion se conservent:

$$\begin{cases} E_A = E_B + E_C \\ \vec{p}_A = \vec{p}_B + \vec{p}_C \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{On peut donc déterminer la masse de} \\ \text{la particule A qui s'est désintégrée à} \\ \text{partir des énergies et impulsions de} \\ \text{ses produits de désintégration B et C} \end{array} \quad \begin{aligned} m_A c^2 &= \sqrt{(E_A^2 - |\vec{p}_A|^2 c^2)} = \\ &= \sqrt{(E_B + E_C)^2 - |\vec{p}_B + \vec{p}_C|^2 c^2} \end{aligned}$$

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

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

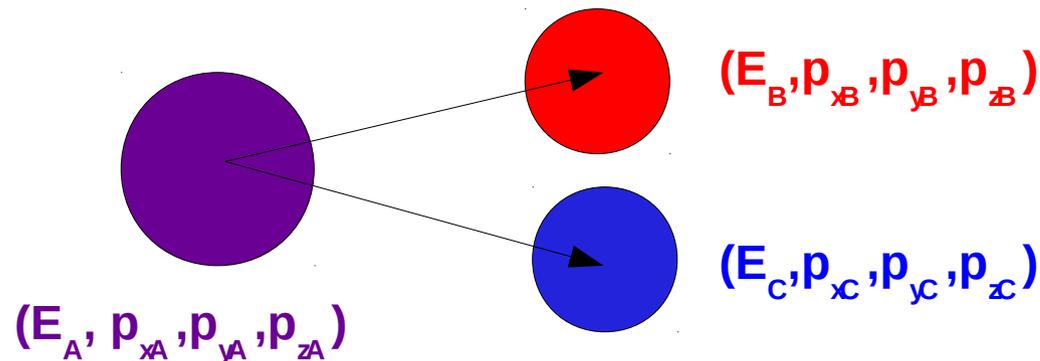
# Désintégrations



: particule créé dans la collision: elle se désintègre très rapidement donc elle n'est **pas directement visible dans le détecteur**



: produits de désintégration: **c'est eux qu'on observe dans le détecteur.**  
On peut mesurer leurs énergies et impulsions



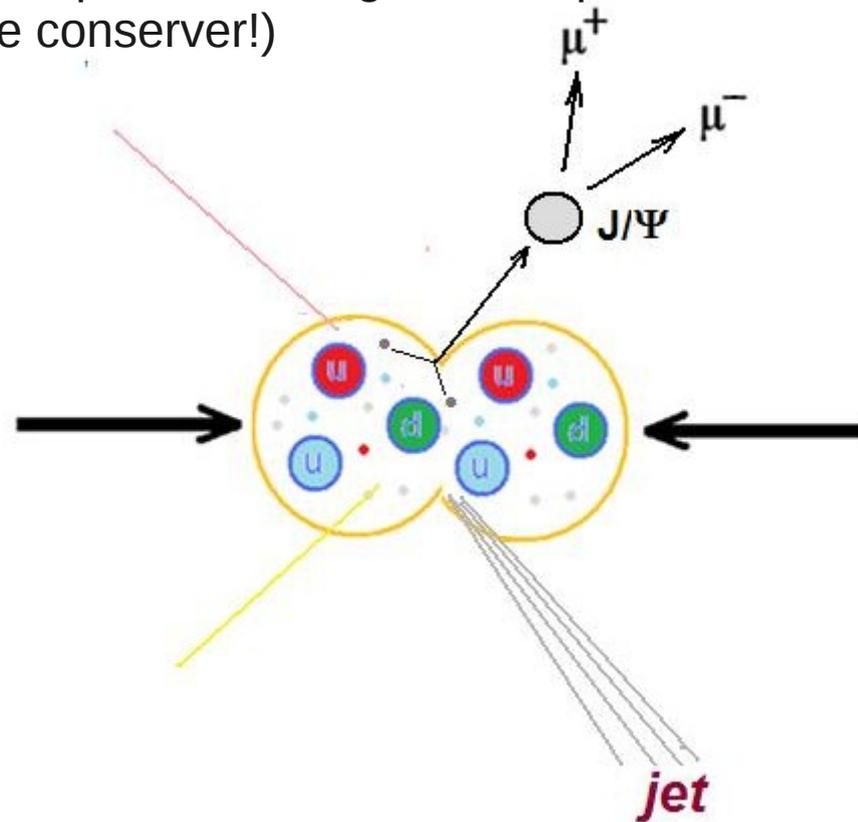
La masse de la particule A est accessible:

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

# Ce qu'on cherche

On cherche à trouver des événements où la particule  $J/\psi$  a été produite.

$J/\psi$  est une particule neutre, qui se désintègre très rapidement en **deux muons de charge opposée** (la charge doit se conserver!)

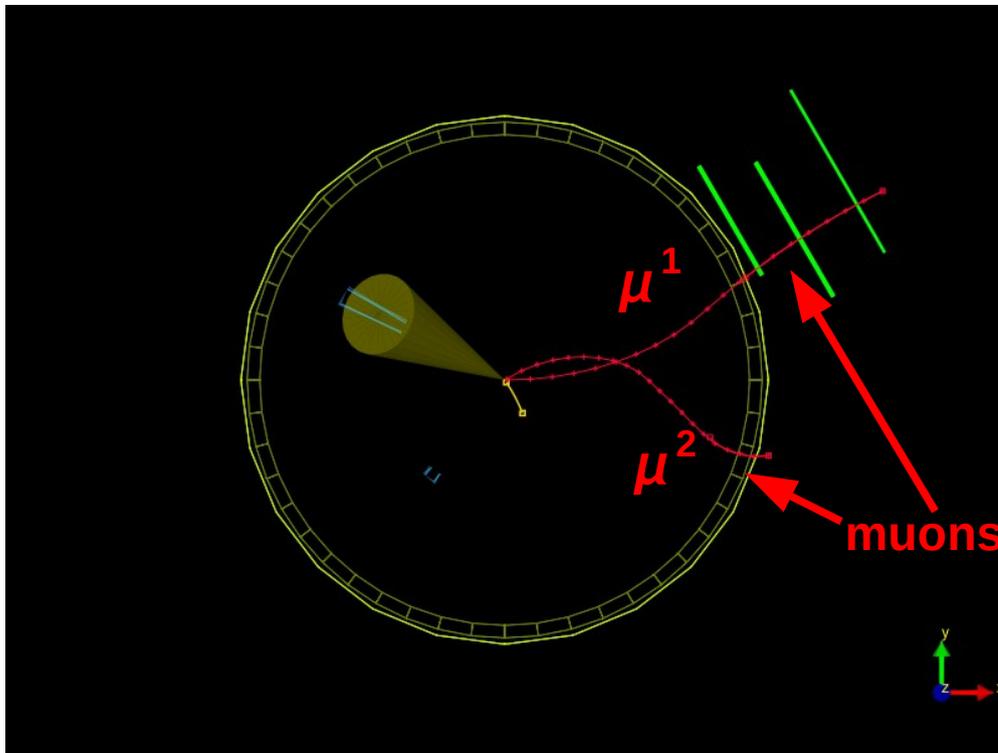


Donc dans notre exemple  c'est un  $J/\psi$  et  et  sont deux muons de charge opposée.

**ATTENTION: pas tous les muons viennent d'un  $J/\psi$ !!**

# Ce qu'on cherche

Si un événement contient des muons, on les observe dans le détecteur CMS.  
On peut mesurer leur **énergie** et **impulsion**, et on peut déduire leur **charge** de la courbure de leur trace dans le champ magnétique



Pour tous les événements dans lesquels on trouve deux muons, on mesure:

$$(E_1, \vec{p}_1)$$

et

$$(E_2, \vec{p}_2)$$

De ça on calcule la **masse invariante** du système constitué par les deux muons:

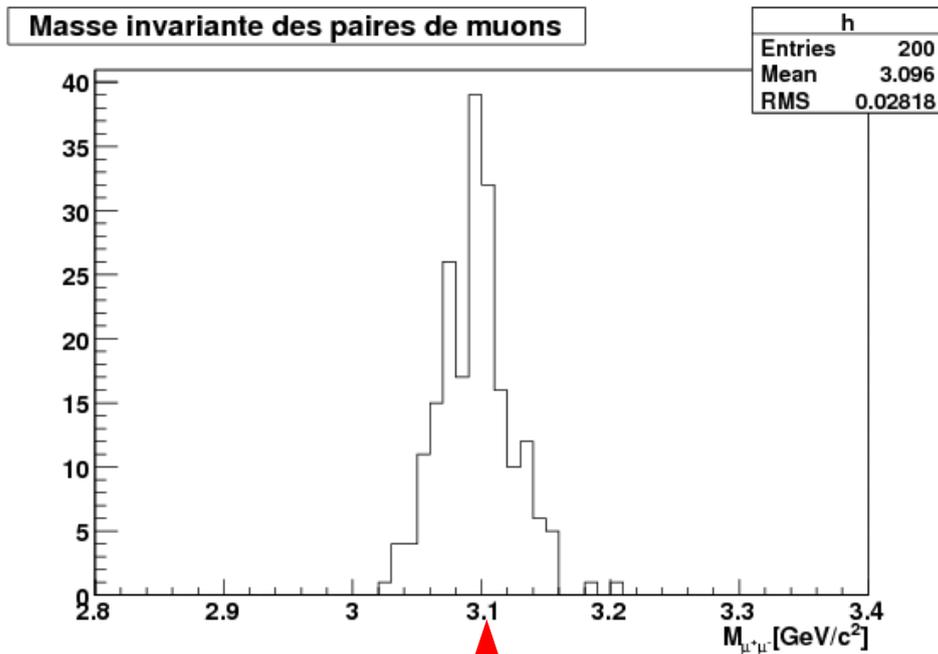
$$m^{inv} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2}$$

- Si les deux muons **proviennent de la désintégration d'un  $J/\psi$** , la masse invariante sera « égale » à la masse de la particule  $J/\psi$ .
- Si les deux muons **ne proviennent pas de la désintégration d'un  $J/\psi$** , la masse invariante va avoir n'importe quelle valeur.

# Masse invariante des paires de muons

Si pour plusieurs événements (simulés) qui contiennent vraiment un  $J/\psi$  qui se désintègre en deux muons

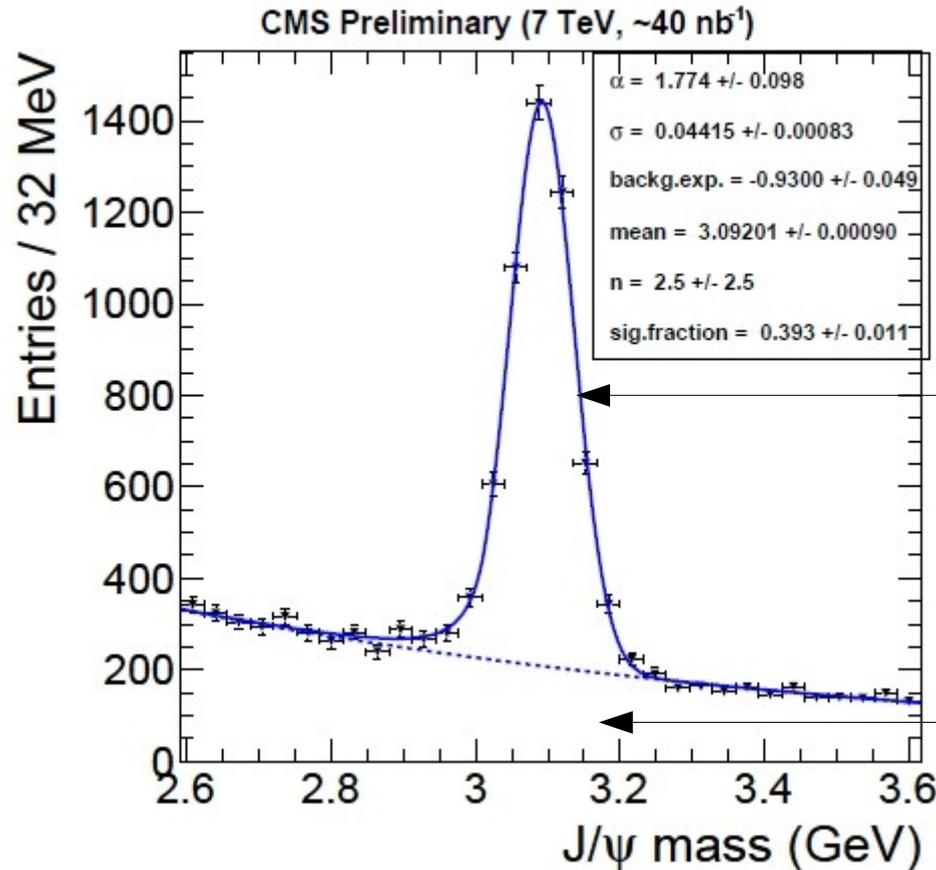
- On mesure énergie et impulsion des deux muons
  - On calcule la masse invariante du système constitué par les deux muons
  - On rentre la valeur de la masse invariante dans un histogramme
- on obtient:



« Vraie » masse  $J/\psi$   $3.1 \text{ GeV}/c^2$

On peut remarquer que **pas tous les événements donnent exactement la masse du  $J/\psi$** , mais que les valeurs sont distribuées **autour de celle-ci** avec une **certaine largeur**. Cela est dû au fait que le détecteur mesure les énergies et impulsions avec une incertitude.

# Masse invariante des paires de muons



Bosse: paires de muons qui viennent de la désintégration d'un  $J/\psi$ ,

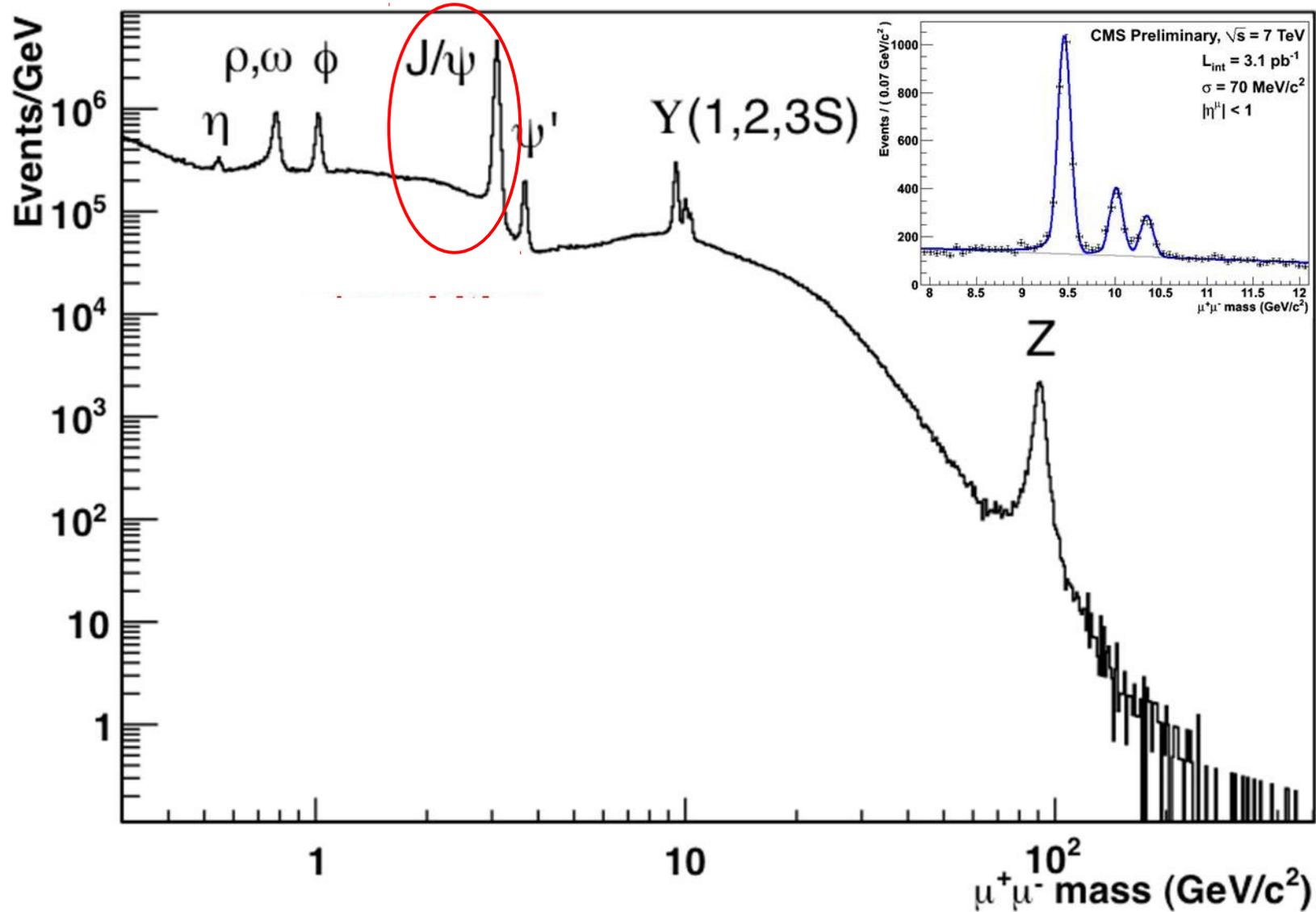
Paires de muons qui ne viennent **pas** de la désintégration d'un  $J/\psi$ ,

On est intéressés aux muons qui viennent de la désintégration d'un  $J/\psi$ , on ajoute des critères de qualité (ex: demander que les deux muons aient charge opposée)

Technique utilisée pour découvrir des particules ( $J/\psi$ ): on cherche des bosses dans la distribution de masse invariante de ses possibles produits de désintégration

# Un exemple d'utilisation de cette technique

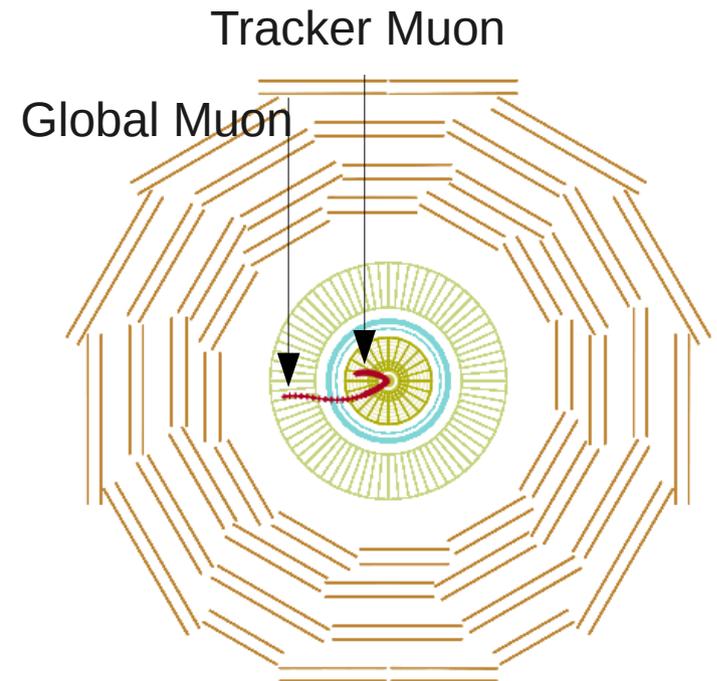
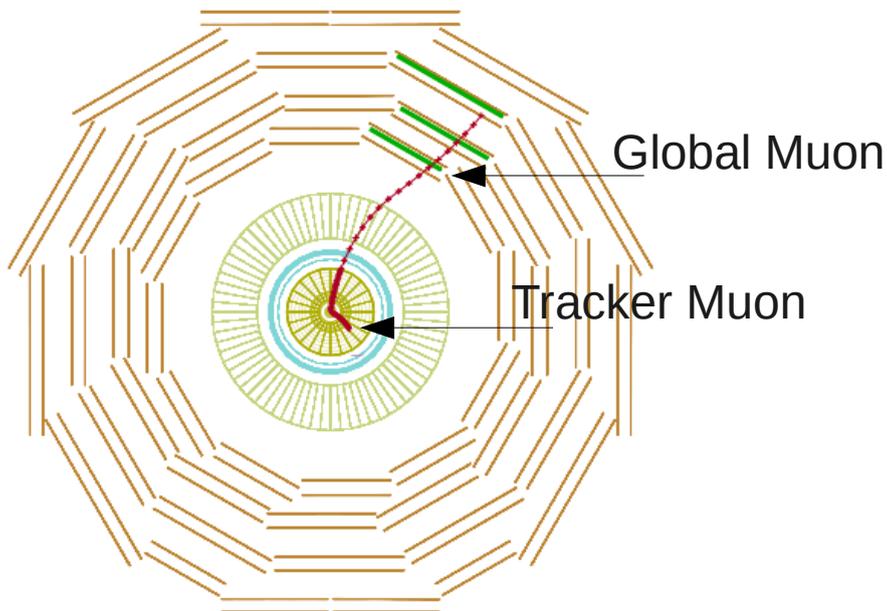
Paires de muons qui  
viennent d'un  $J/\psi$



# Types de muons en CMS

Les muons observés dans CMS peuvent être de deux types: **Tracker Muons** ou **Global Muons**.

- Les **Tracker Muons** ont déposé leur énergie seulement dans la partie la plus interne du détecteur
- Pour les **Global Muons** on a à disposition les informations provenant de plusieurs parties du détecteurs et on les mesure donc plus précisément. On va en tenir compte pour définir des critères de qualité des événements



# Critères de qualité

---

On va regarder des événements qui contiennent deux muons d'une façon graphique et leur attribuer une valeur qui va de 0 à 3, selon leur qualité:

**0** : l'événement ne contient sûrement **pas** un  $J/\psi$ , par exemple si les charges électriques des deux muons ont le même signe

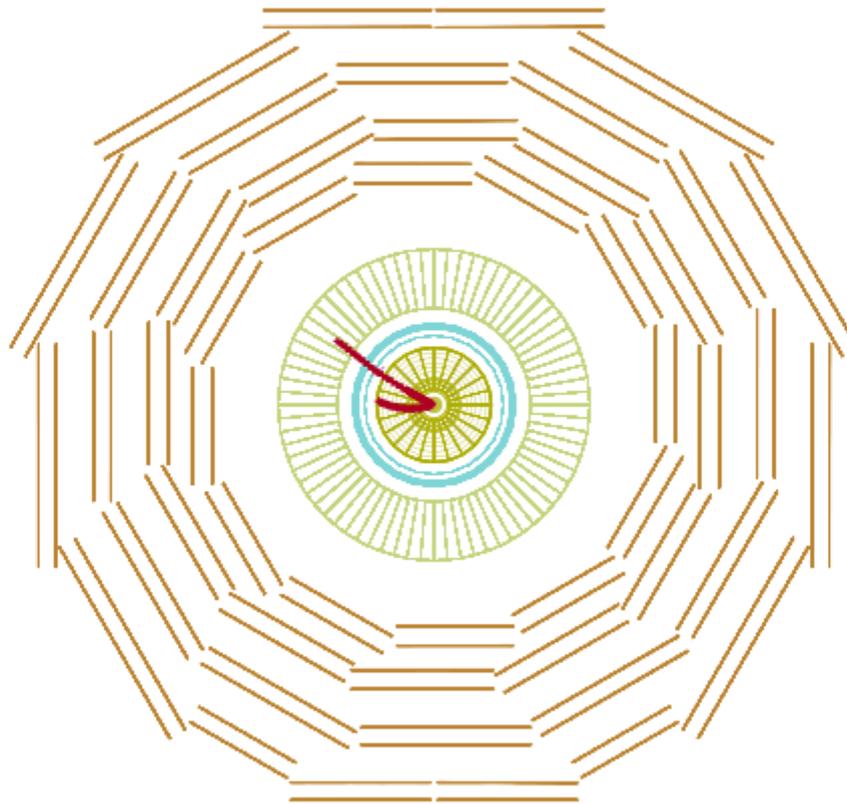
**1**: il est **peu probable** que l'événement contienne un  $J/\psi$

**2**: il est **probable** que l'événement contienne un  $J/\psi$

**3**: il est très **probable** que l'événement contienne un  $J/\psi$ , par exemple si on a deux Global Muons de charge opposée

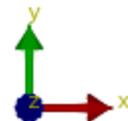
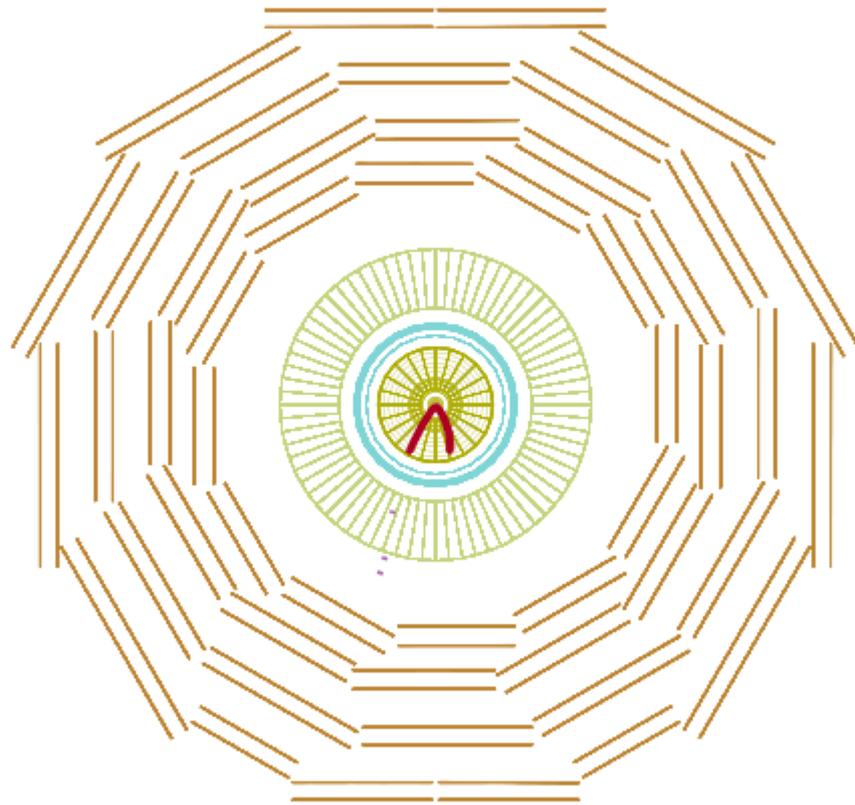
# Exemple d'événement avec qualité 0

Deux muons de la même charge



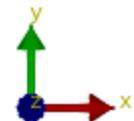
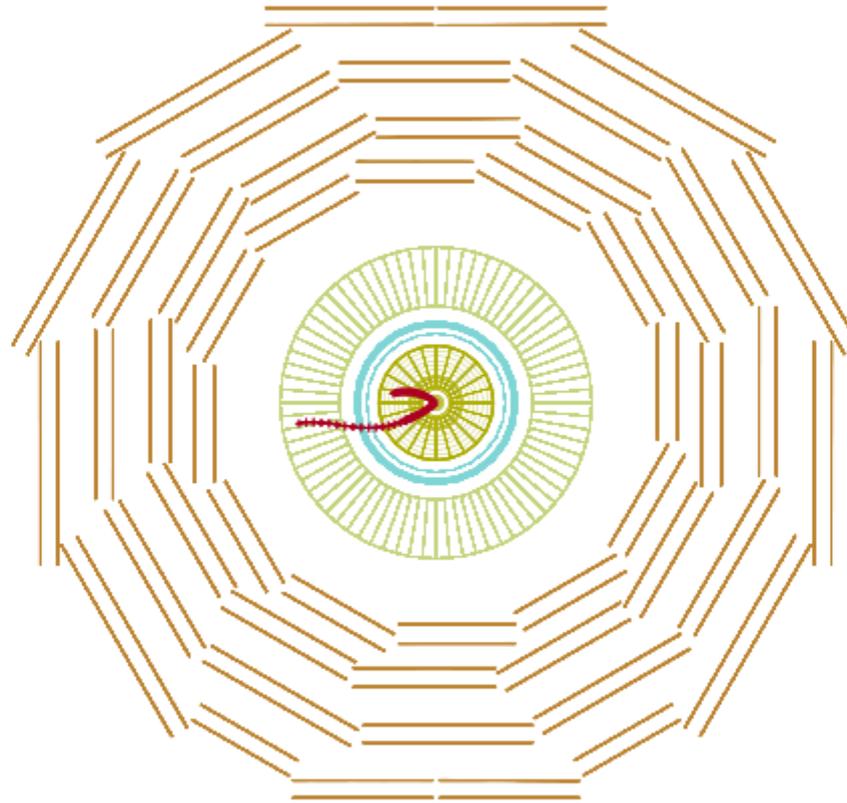
# Exemple d'événement avec qualité 1

Deux Tracker Muons de charges opposées



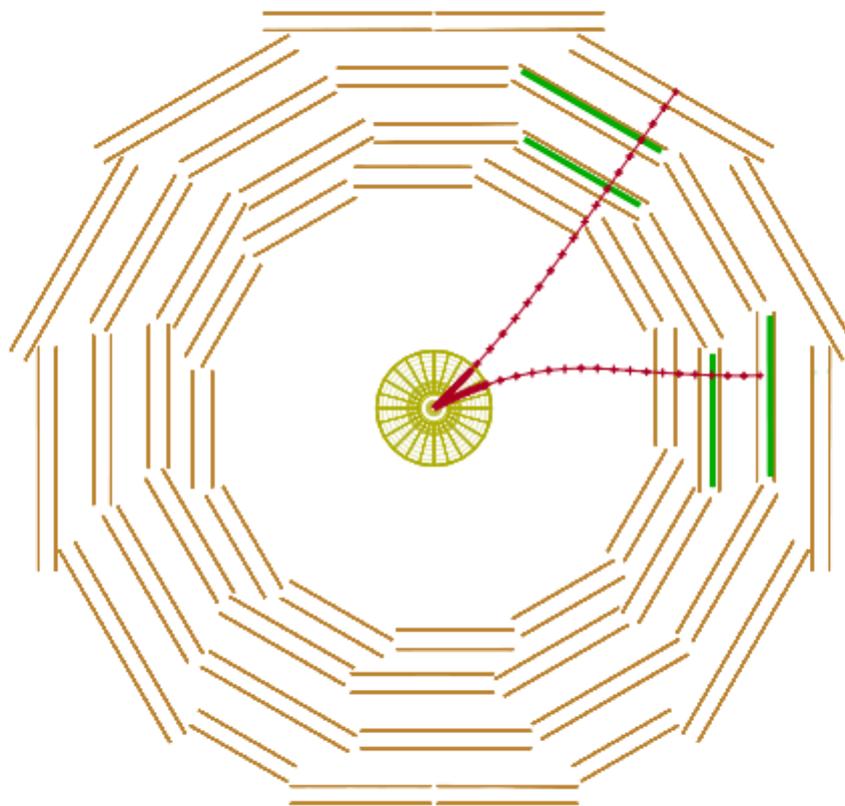
# Exemple d'événement avec qualité 2

Un Global Muon et un Tracker Muons de charges opposées



# Exemple d'événement avec qualité 3

Deux Global Muons de charges opposées



# Exercice d'aujourd'hui

Dans la pratique vous allez avoir:

- une feuille excel avec

Identifiant de l'événement

Énergie et impulsion mesurées du premier et deuxième muon

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1				Rating (0-3)	Mass		Muon Track #1				Muon Track #2					
2	MCNo	RunNo	EvNo	default=0	(GeV)	E	px	py	pz	E	px	py	pz			
3	1	140124	1007912007	0	0	13.71	4.89	-2.51	12.56	3.67	-0.68	0.53	3.57			
4	2	140124	1007957044	0	0	9.09	-2.16	-2.96	-8.32	3.81	0.79	-0.78	-3.64			
5	3	140124	1008000431	0	0	6.82	5.76	3.24	-1.67	19.15	12.89	12.39	-6.86			

qualité de l'événement, **vous devez remplir cette colonne!**

Masse invariante, des que vous rentrez une valeur pour la qualité de l'événement, elle est remplie automatiquement selon la formule:

$$M^{inv} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (p_{x1} + p_{x2})^2 - (p_{y1} + p_{y2})^2 - (p_{z1} + p_{z2})^2}$$

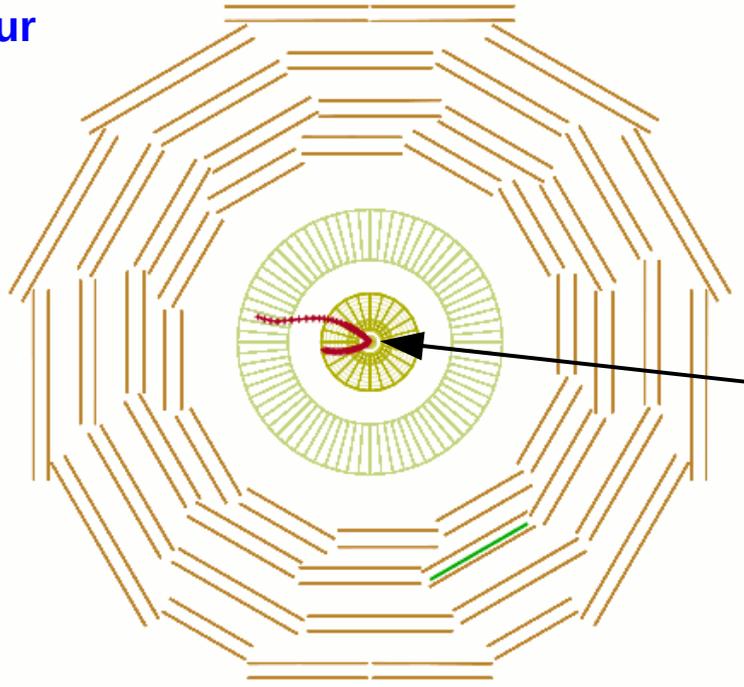
- un logiciel pour regarder les événements et déterminer leur qualité:

- Electron Tracks (GSF)(0)
- Clusters (Si Pixels)(759)
- Clusters (Si Strips)(5907)
- Rec. Hits (Tracking)(1746)
- ECAL** ?
- Barrel Rec. Hits(1013)  ▷
- Endcap Rec. Hits(860)  ▷
- Preshower Rec. Hits(689)  ▷
- HCAL** ?
- Barrel Rec. Hits(858)  ▷
- Endcap Rec. Hits(255)  ▷
- Forward Rec. Hits(225)  ▷
- Outer Rec. Hits(375)  ▷
- Muon** ?
- DT Rec. Hits(1)
- DT Rec. Segments (4D)(0)
- CSC Segments(4)
- RPC Rec. Hits(0)
- CSC Rec. Hits (2D)(23)
- Particle Flow** ?
- Physics Objects** ?
- Tracker Muons (Reco)(2)
- Stand-alone Muons (Reco)(1)
- Global Muons (Reco)(1)
- Calorimeter Energy Towers(393)  ▷
- Jets(11)  ▷

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

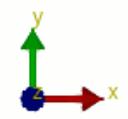
**Identifiant de l'événement (le même que sur la feuille excel)**

**Cliquez ici pour charger les événements**



**Observez la courbure des traces pour déterminer leur charge**

**Cliquez ici pour voir les muons Global et Tracker**



**Déterminer la qualité (0,1,2,3) de l'événement et rentrez sa valeur dans la feuille excel**

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