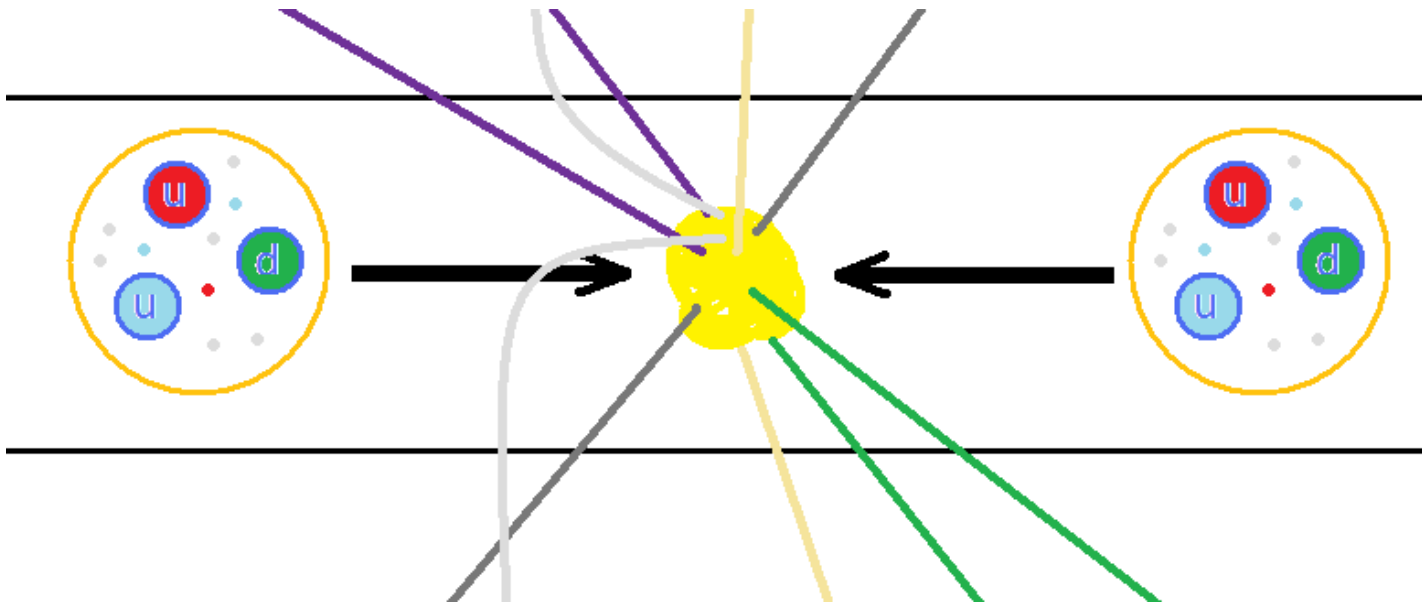


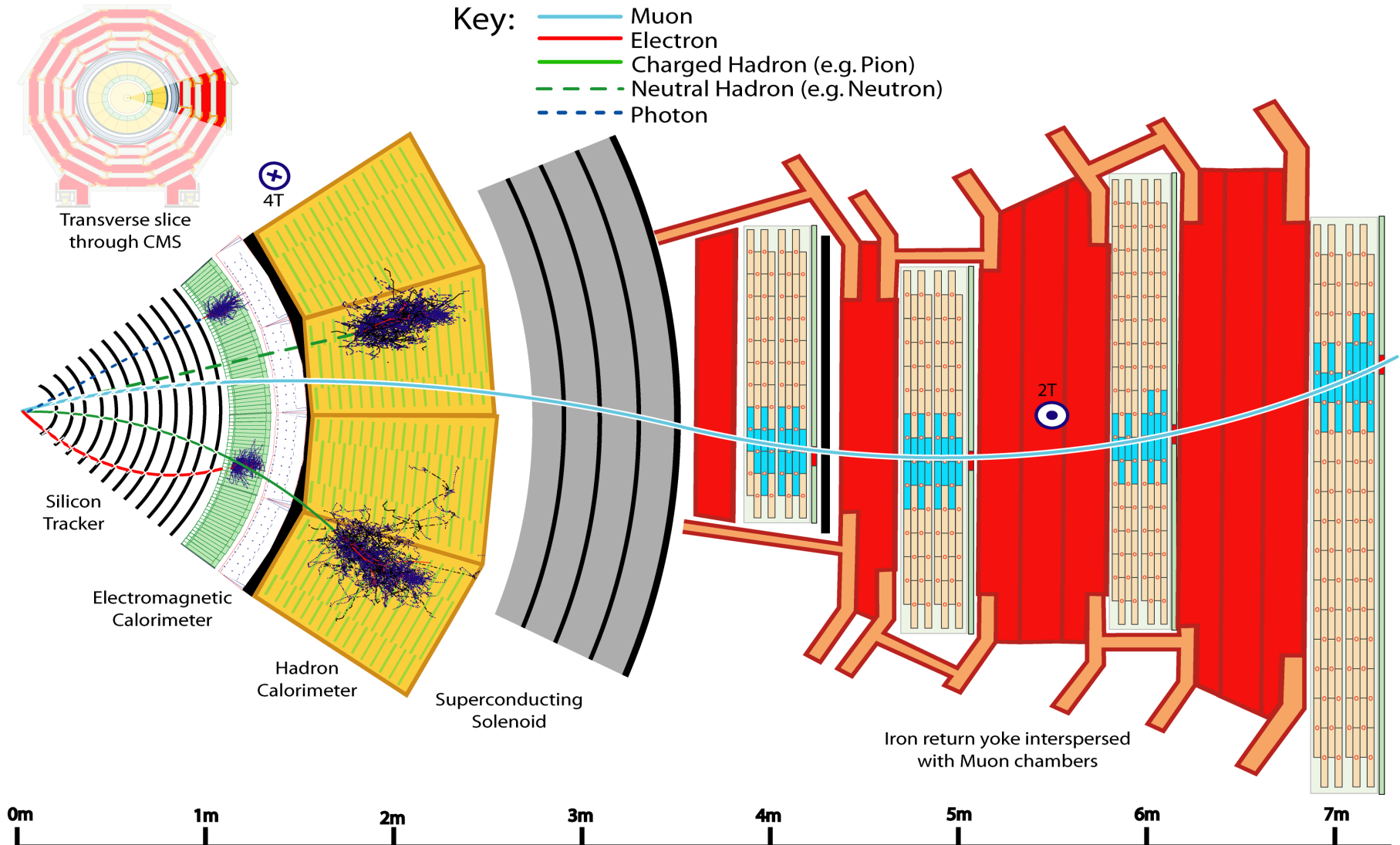
Collisions au LHC

- 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 :

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

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 $c=1$

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

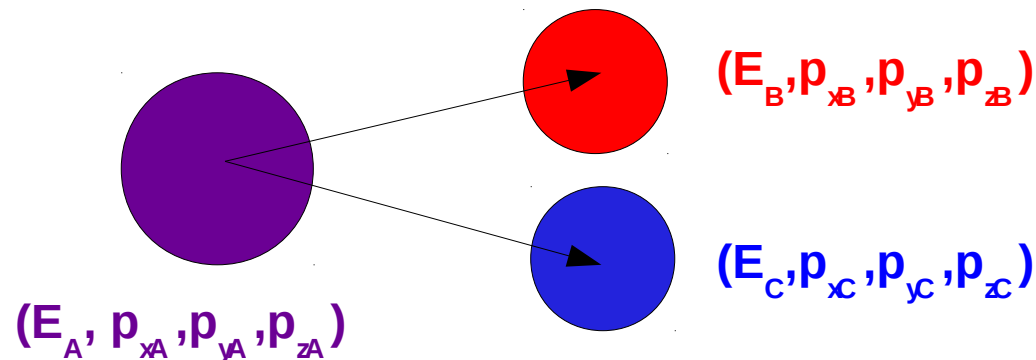
Désintégrations



: 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



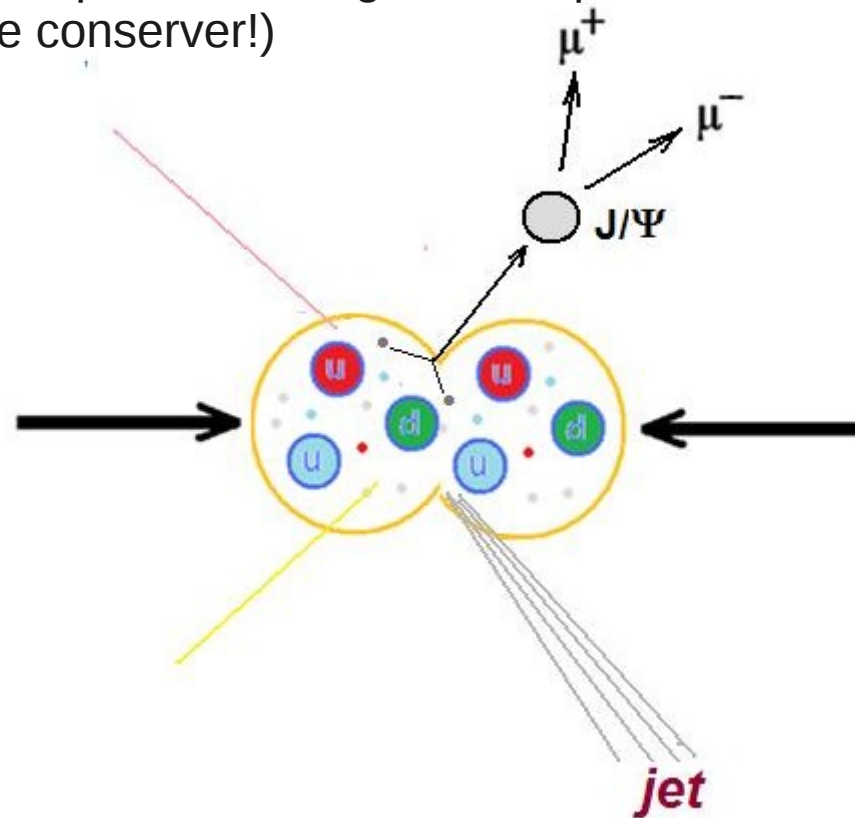
La masse de la particule A est accessible:




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

Ce qu'on cherche

On cherche à trouver des événements où la particule J/ψ a été produite.

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

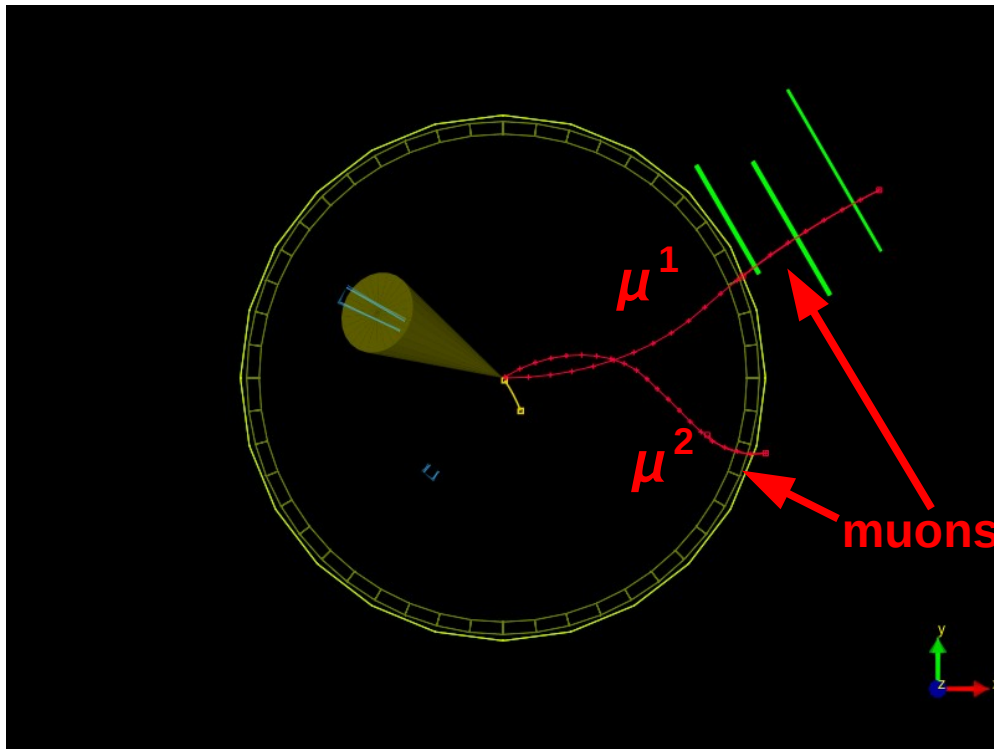


Donc dans notre exemple  c'est un J/ψ et  et  sont deux muons de charge opposée.

ATTENTION: pas tous les muons viennent d'un J/ψ !!

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:

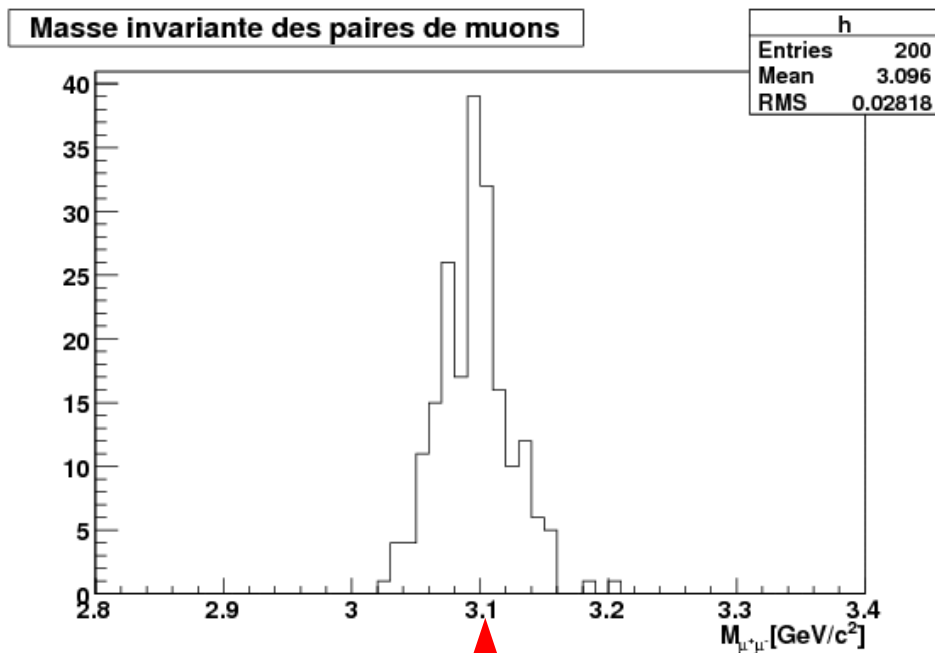
$$m^{inv} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2}$$

- Si les deux muons **proviennent de la désintégration d'un J/ψ** , la masse invariante sera « égale » à la masse de la particule J/ψ .
- Si les deux muons **ne proviennent pas de la désintégration d'un J/ψ** , 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/ψ qui se désintègre en deux muons

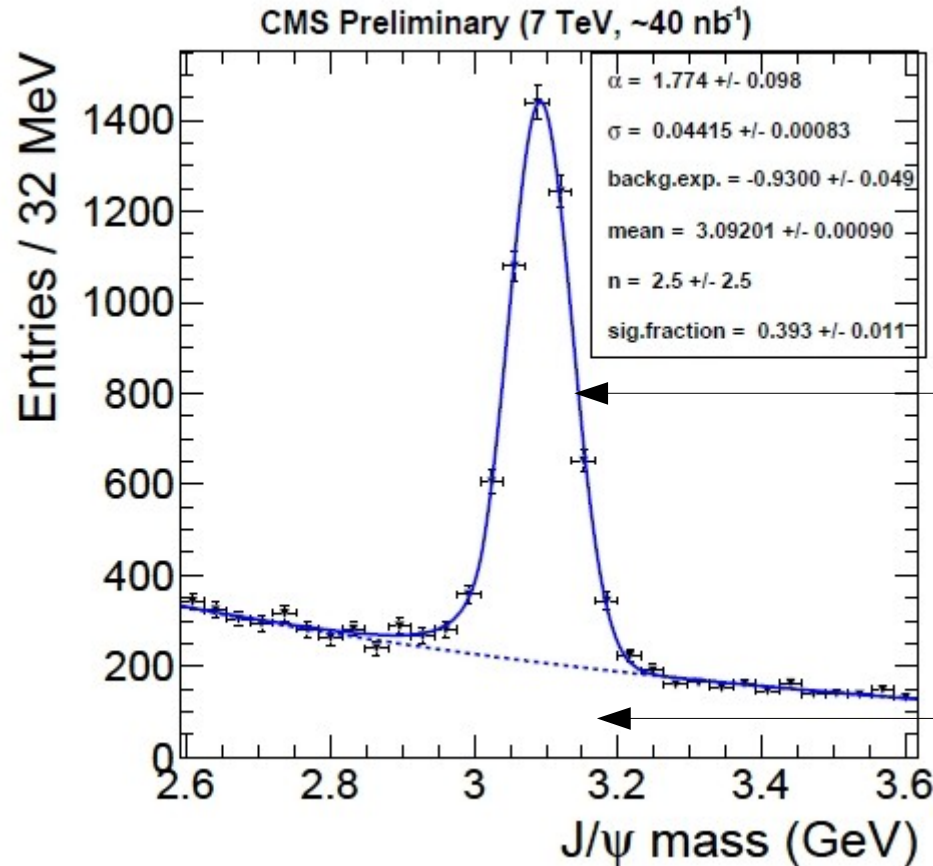
- On mesure énergie et impulsion des deux muons
 - On calcule la masse invariante du système constitué par les deux muons
 - On rentre la valeur de la masse invariante dans un histogramme
- on obtient:



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

On peut remarquer que **pas tous les événements donnent exactement la masse du J/ψ** , 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/ψ ,

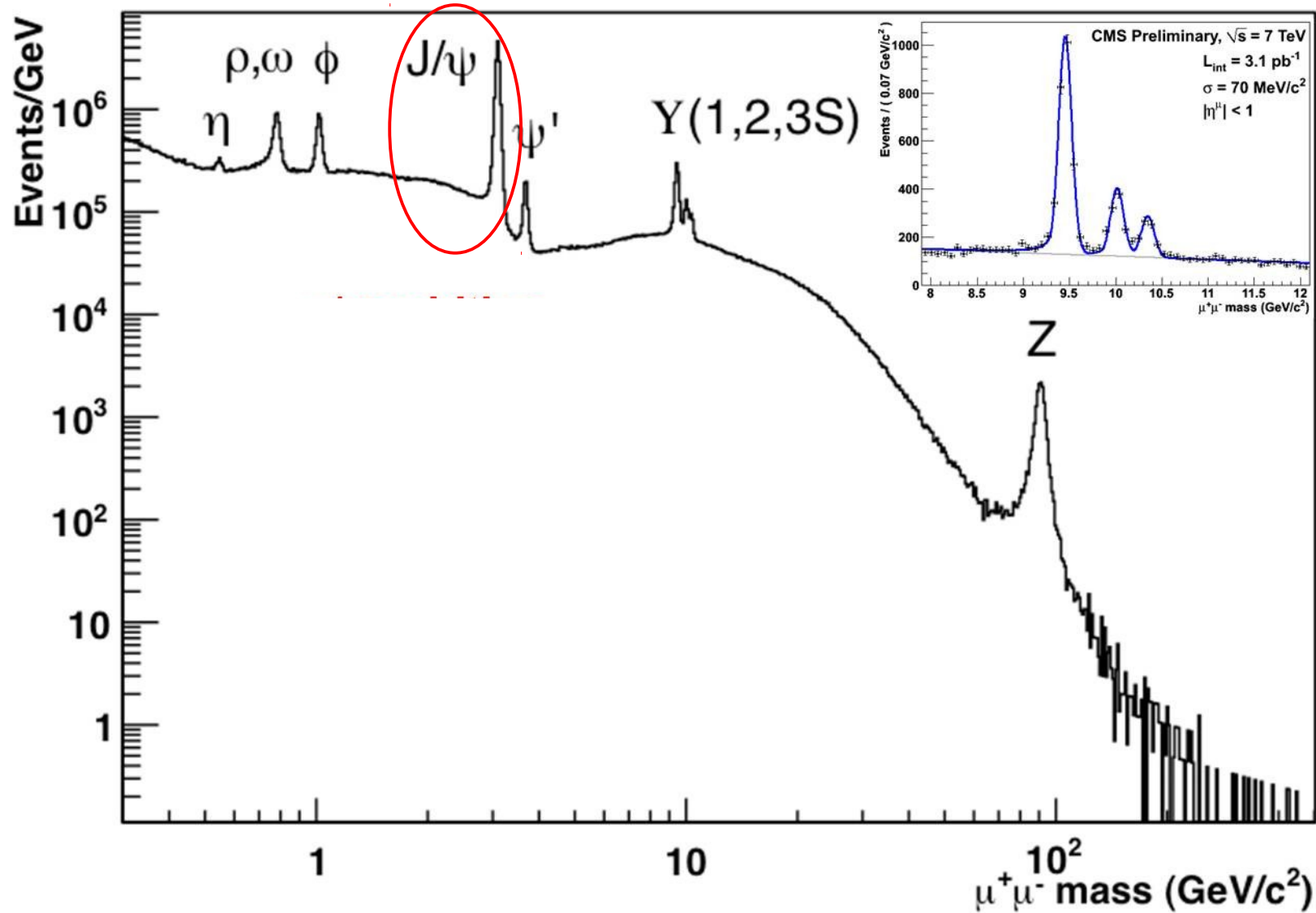
→ Paires de muons qui ne viennent **pas** de la désintégration d'un J/ψ ,

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

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

Un exemple d'utilisation de cette technique

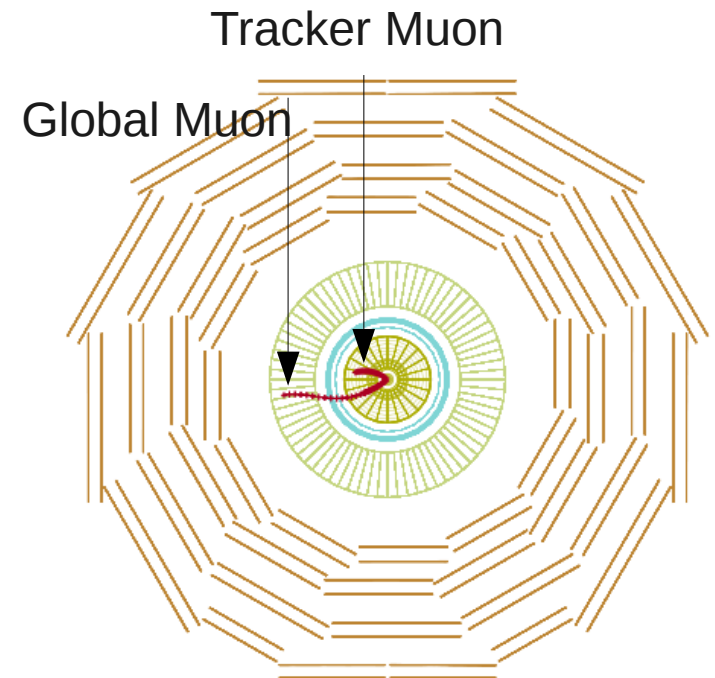
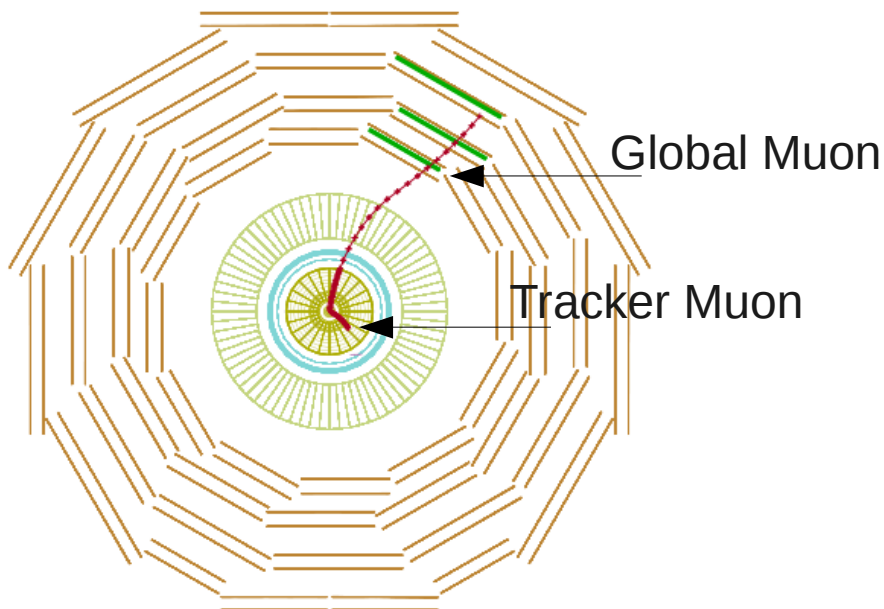
Paires de muons qui
viennent d'un J/ψ



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/ψ , par exemple si les charges électriques des deux muons ont le même signe

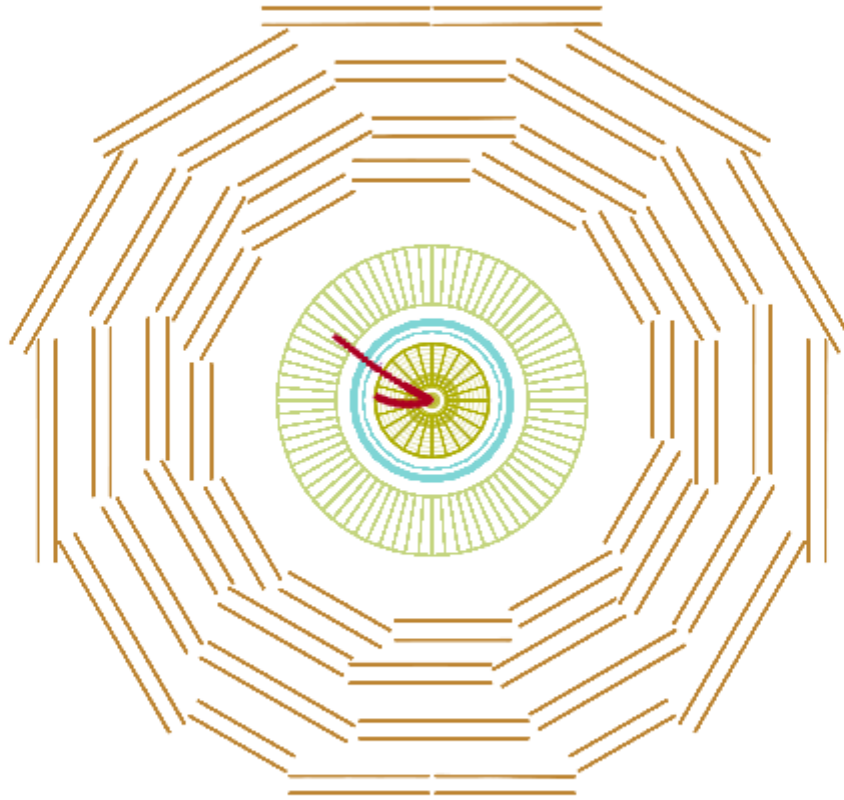
1: il est **peu probable** que l'événement contienne un J/ψ

2: il est **probable** que l'événement contienne un J/ψ

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

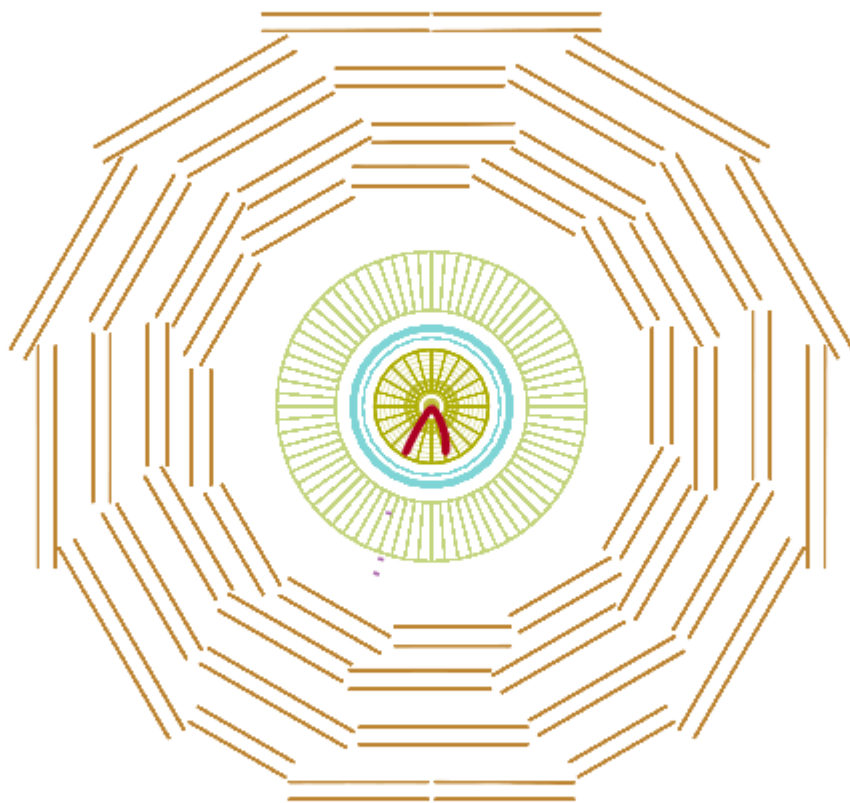
Exemple d'événement avec qualité 0

Deux muons de la même charge



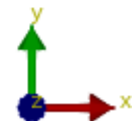
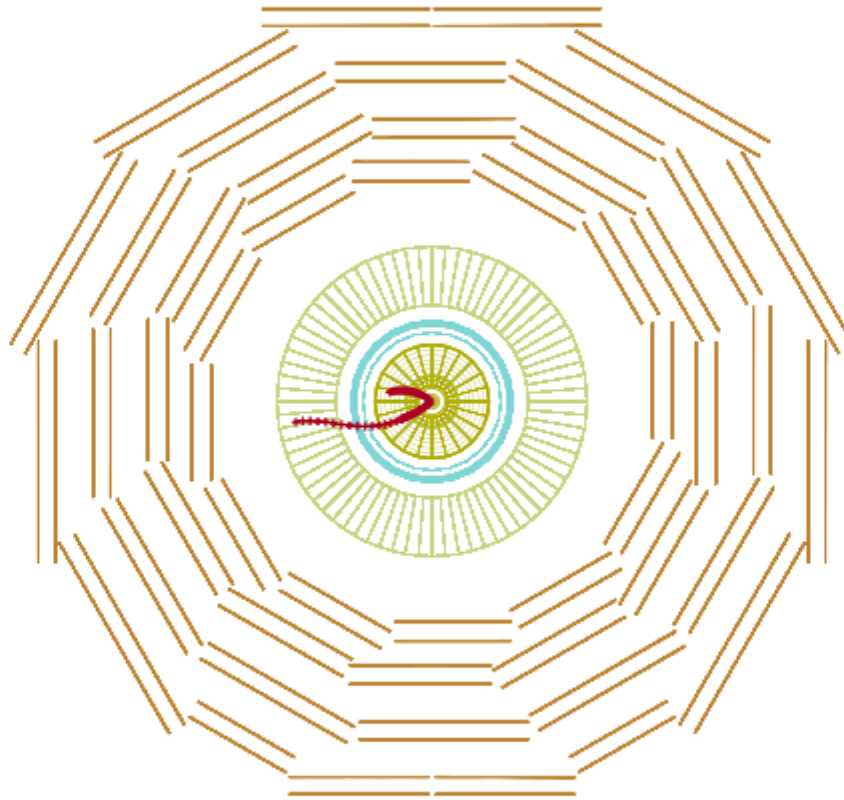
Exemple d'événement avec qualité 1

Deux Tracker Muons de charges opposées



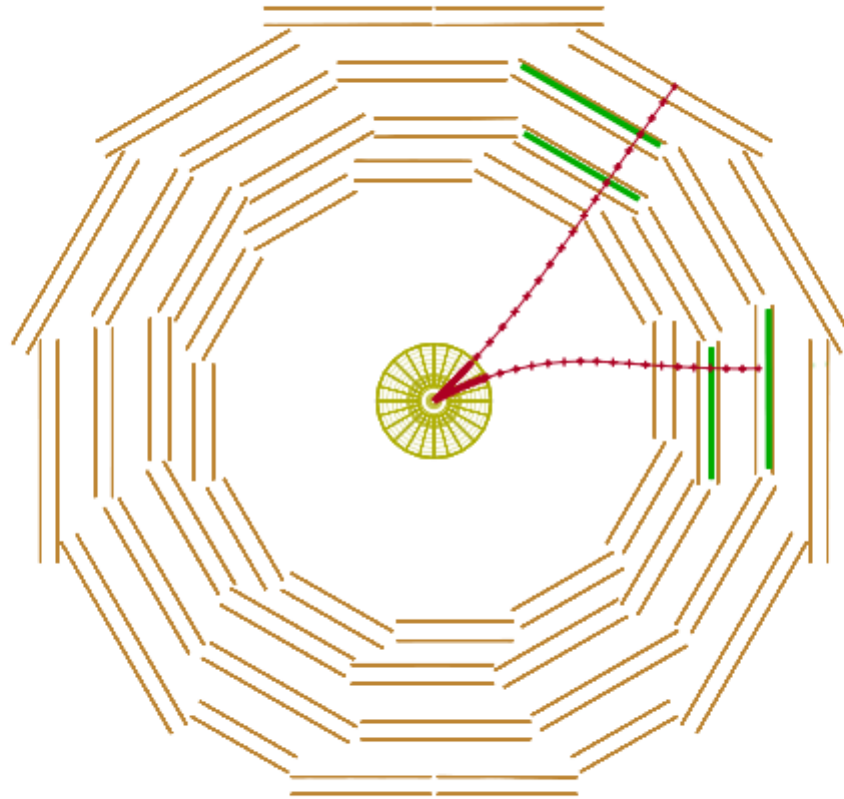
Exemple d'événement avec qualité 2

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

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

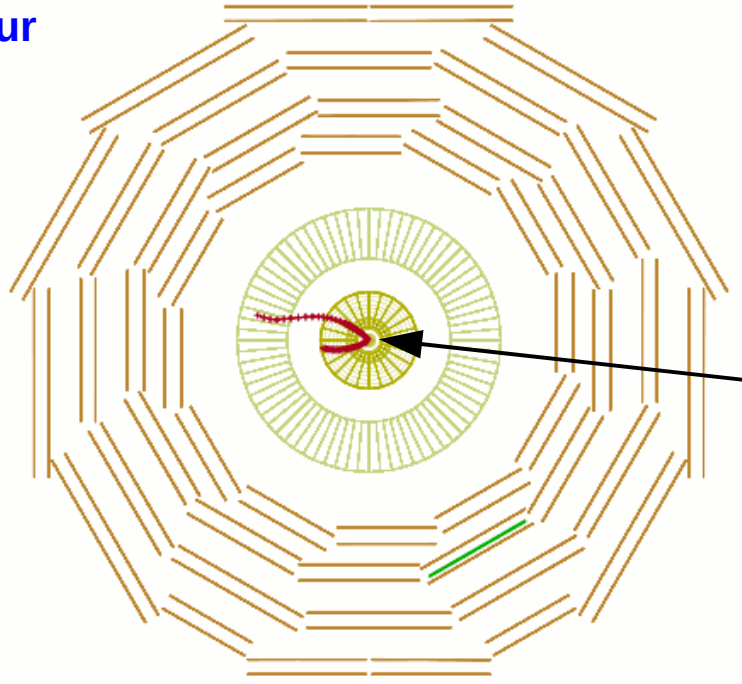
- un logiciel pour regarder les événements et déterminer leur qualité:

- 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)

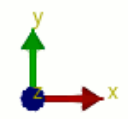
Identifiant de l'événement (le même que sur la feuille excel)

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