

Les particules et leurs signatures

Elisabeth Petit
CPPM



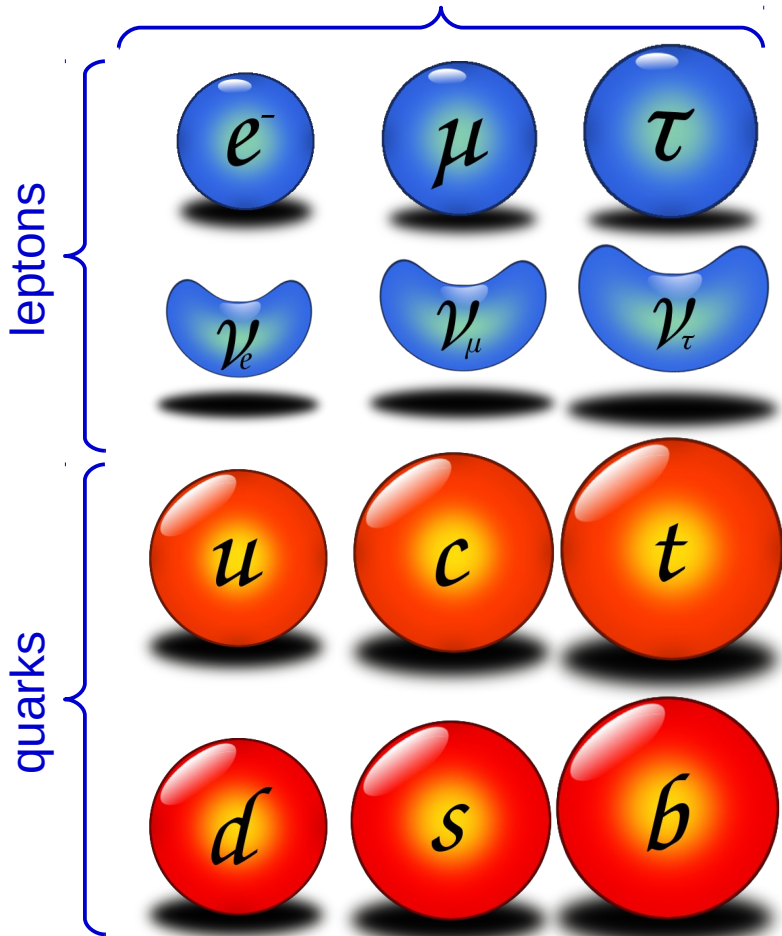
Ecole IN2P3 d'instrumentation
"Techniques de base des détecteurs"
Cargèse, 1-6 avril 2019



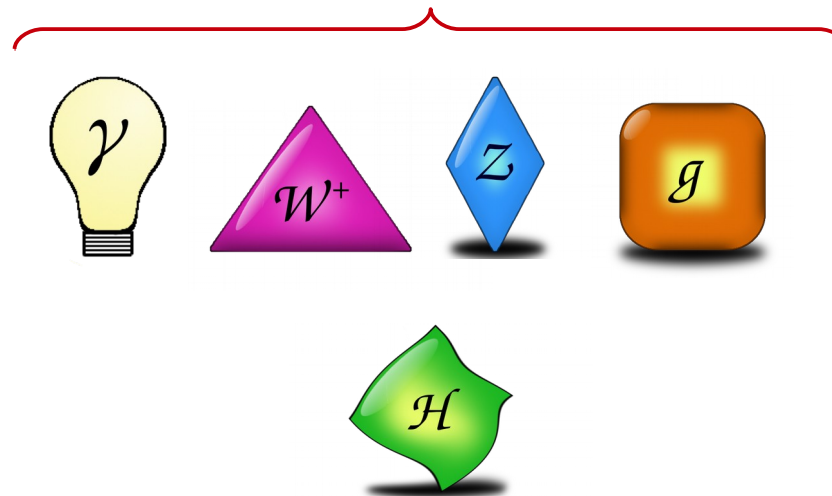


Les particules du Modèle Standard

fermions

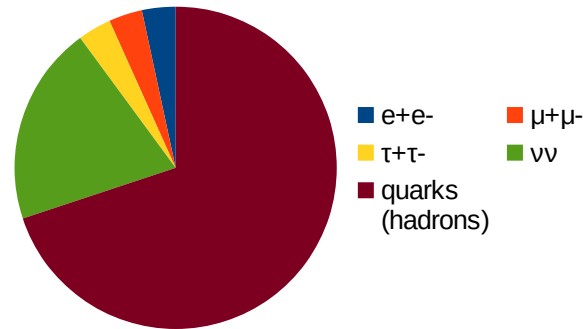


bosons

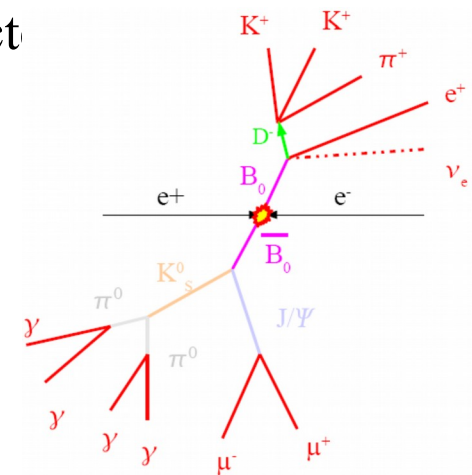


Temps de vie des particules (1)

- ◆ La plupart des particules sont **instables**
- ◆ Exemple : le boson Z
 - peut décroître en une paire d'électrons, de muons, de quarks, etc
 - on parle de “**canal**” : ex. le “canal di-électron”
 - théorie **quantique** : probabilité de chaque décroissance (rapport de branchement) calculée par la théorie



- ◆ Les décroissances continuent en chaîne jusqu’aux particules stables :
 - NB : parfois “stable” = “stable jusqu’à la sortie du détect
- ◆ Les particules stables sont **mesurées**
Les particules instables sont **reconstruites**



Temps de vie des particules (2)

◆ Temps de vie de quelques particules :

- NB : avec la dilatation des temps en relativité générale le temps de vie est multiplié, ex. par 10 pour une particule d'impulsion de 10 GeV

	masse (GeV/c)	temps de vie $c\tau$ (m)
e	0.000511	stable
μ	0.106	658
p	0.938	stable
n	0.94	$2.7 \cdot 10^{11}$
γ	0	stable
ν	$< 2 \cdot 10^{-6}$	stable
Higgs	125	$5 \cdot 10^{-14}$
Z	90.2	$9 \cdot 10^{-17}$
W	80.4	$9 \cdot 10^{-17}$
t	173	$3 \cdot 10^{-17}$
π^+ (ud)	0.14	7.8
K^+ (us)	0.494	3.7
π^0 (uu, dd)	0.135	$25 \cdot 10^{-9}$
K^0 (ds)	0.498	0.03 ou 15.3
B^+ (ub)	5.3	491.1 μm
B^0 (db)	5.3	455.7 μm

les particules que l'on va le plus souvent observer dans nos détecteurs

mésons
(assemblages
de quarks)

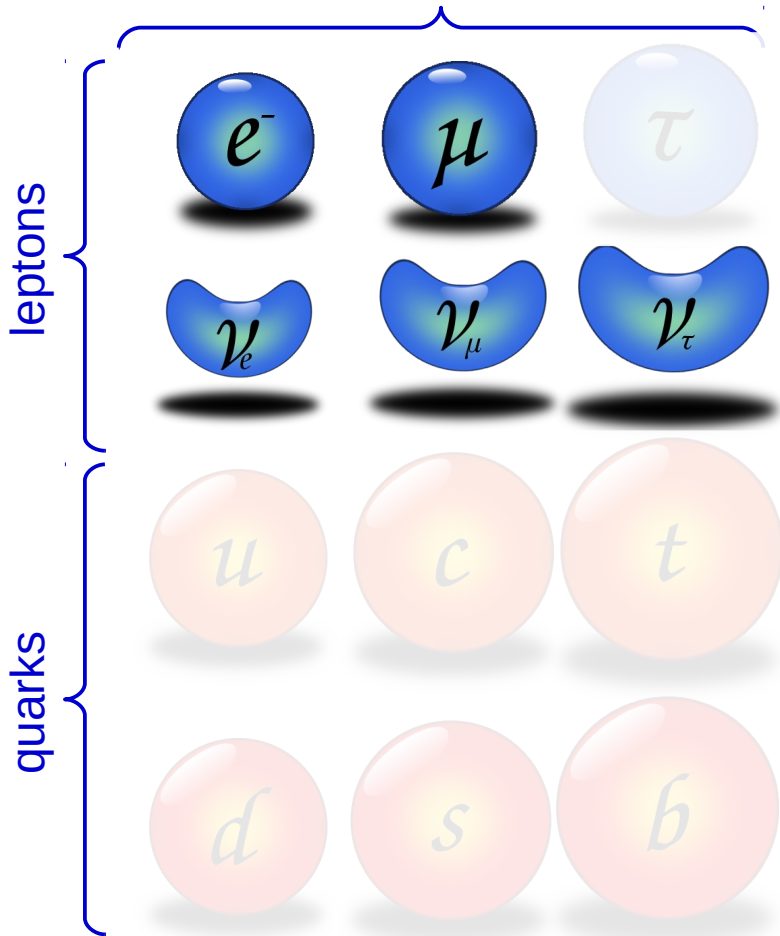
stable
stable suffisamment
longtemps
se désintègre
instantanément





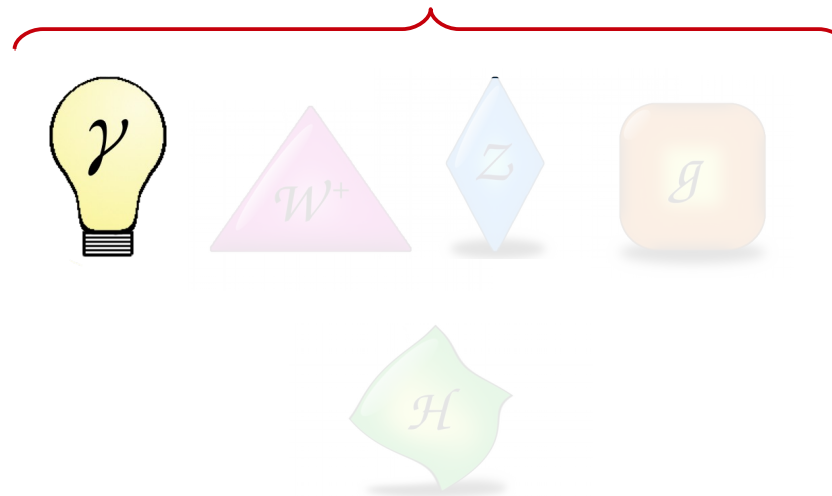
Les particules du Modèle Standard observables

fermions



↳ visibles uniquement via protons et neutrons

bosons



- ◆ La plupart des particules que l'on veut étudier se désintègrent instantanément, on étudie leur produit final de désintégration



Propriétés d'une particule

- ◆ Ce qu'on veut connaître : masse, charge, temps de vie, modes de décroissance, etc
- ◆ Exemple : le boson W

W

$J = 1$

Charge = $\pm 1 e$
 Mass $m = 80.379 \pm 0.012 \text{ GeV}$
 W/Z mass ratio = 0.88153 ± 0.00017
 $m_Z - m_W = 10.803 \pm 0.015 \text{ GeV}$
 $m_{W^+} - m_{W^-} = -0.029 \pm 0.028 \text{ GeV}$
 Full width $\Gamma = 2.085 \pm 0.042 \text{ GeV}$
 $\langle N_{\pi^\pm} \rangle = 15.70 \pm 0.35$
 $\langle N_{K^\pm} \rangle = 2.20 \pm 0.19$
 $\langle N_p \rangle = 0.92 \pm 0.14$
 $\langle N_{\text{charged}} \rangle = 19.39 \pm 0.08$

W^- modes are charge conjugates of the modes below.

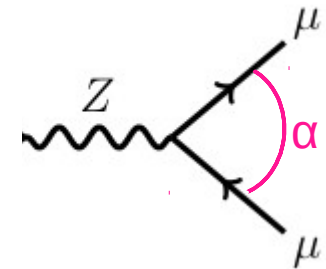
W⁺ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)
$\ell^+ \nu$	[b] $(10.86 \pm 0.09) \%$		–
$e^+ \nu$	$(10.71 \pm 0.16) \%$		40189
$\mu^+ \nu$	$(10.63 \pm 0.15) \%$		40189
$\tau^+ \nu$	$(11.38 \pm 0.21) \%$		40170
hadrons	$(67.41 \pm 0.27) \%$		–
$\pi^+ \gamma$	$< 7 \times 10^{-6}$	95%	40189
$D_s^+ \gamma$	$< 1.3 \times 10^{-3}$	95%	40165
cX	$(33.3 \pm 2.6) \%$		–
$c\bar{s}$	$(31^{+13}_{-11}) \%$		–
invisible	[c] $(1.4 \pm 2.9) \%$		–

source :
<http://pdg.lbl.gov/2018/download/db2018.pdf>

Masse invariante et résonance (1)

- ◆ Quadrivecteur particule de masse m : $\mathbf{P} = (E, \vec{p})$, $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$
 - “métrique” spéciale : $\mathbf{P}^2 = |\mathbf{P}|^2 = E^2 - p^2 = m^2$
- ◆ Ce qui se conserve dans une interaction : $|\mathbf{P}|$

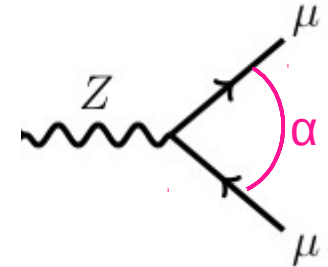
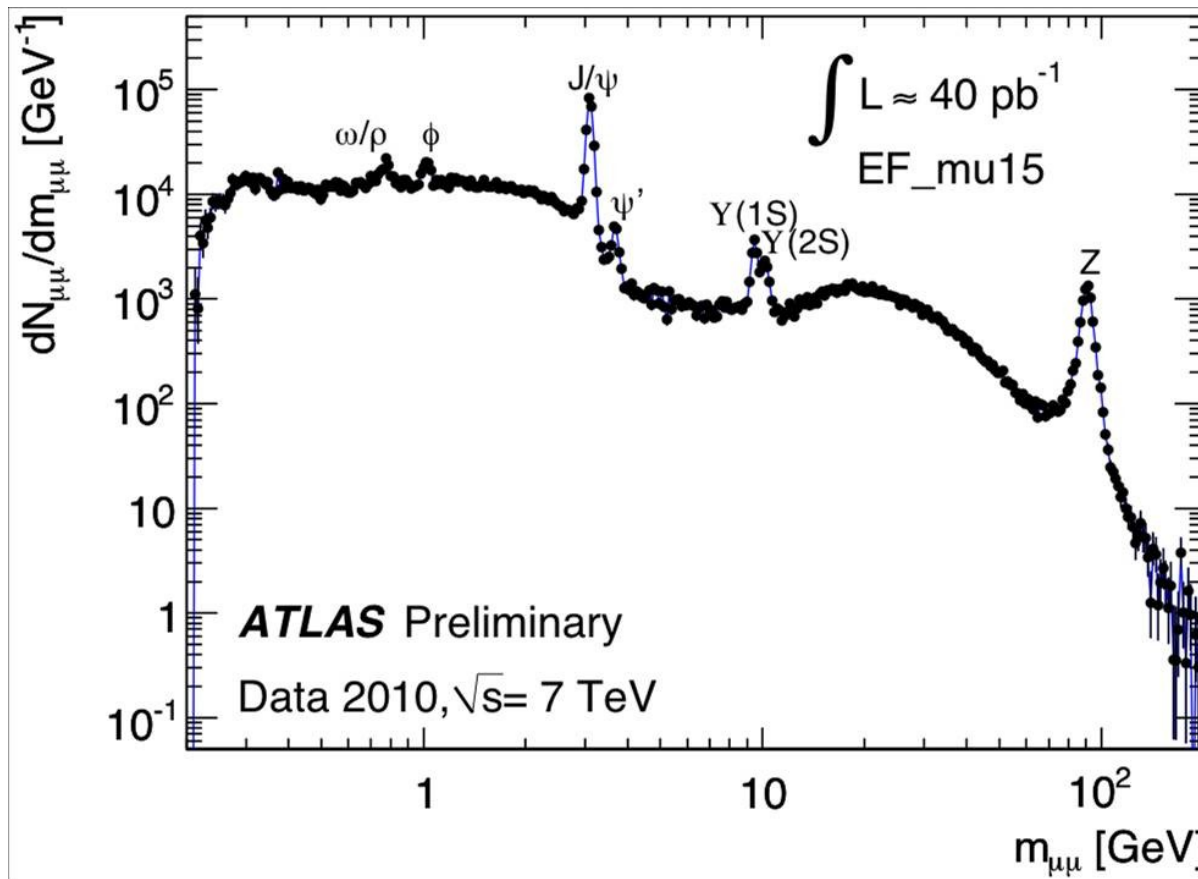
- ◆ Désintégration : Particule C en particule A + particule B
 - $\mathbf{P}_C^2 = (\mathbf{P}_A + \mathbf{P}_B)^2 = (E_A + E_B)^2 - (\vec{p}_A + \vec{p}_B)^2$
 - $\mathbf{P}_C^2 = E_C^2 - p_C^2 = m_C^2$



- ◆ La **masse** de la particule C peut être **reconstruite** à partir **des produits de désintégration**
 - $m_C^2 = (E_A + E_B)^2 - (\vec{p}_A + \vec{p}_B)^2$
 - on parle de “**masse invariante**” des deux particules A et B
 - $m_C^2 = m_A^2 + m_B^2 + 2(E_A \cdot E_B - |\vec{p}_A| \cdot |\vec{p}_B| \cos \alpha)^2$
- ◆ Conséquence : On peut connaître la masse d’une particule si on connaît celle de ses produits de désintégration et leur impulsion

Masse invariante et résonance (2)

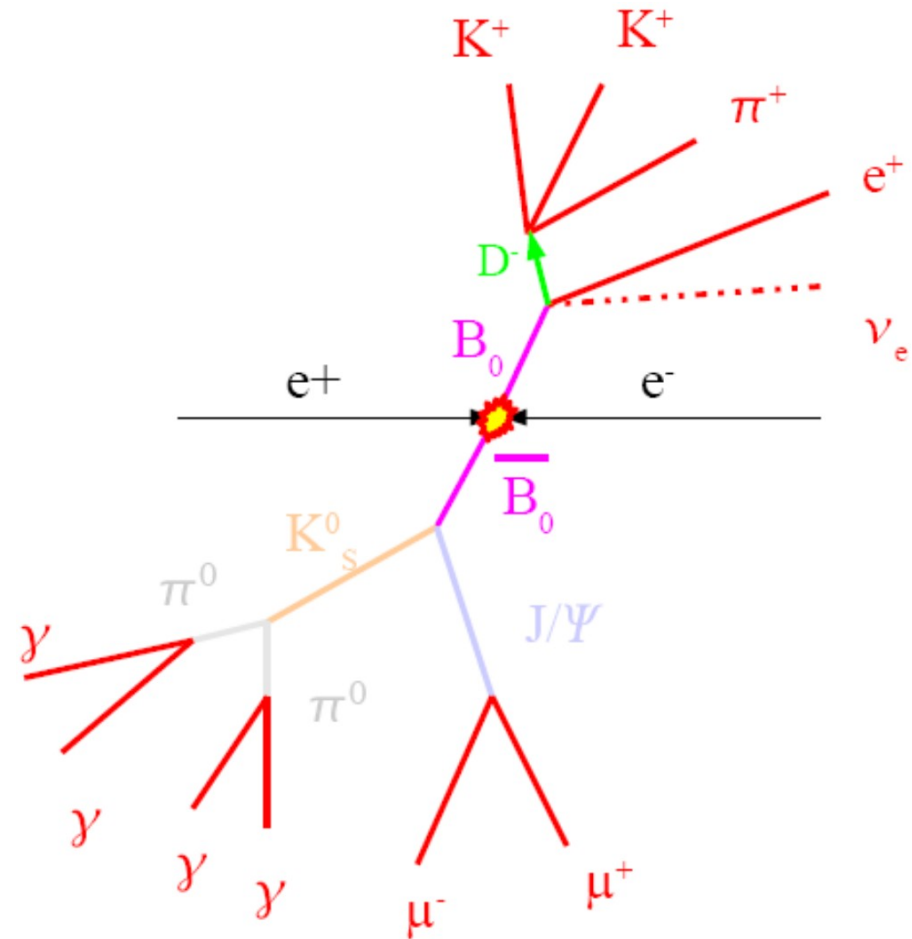
- ◆ Exemple de masses invariantes : particules qui se désintègrent en deux muons





Les observables (1)

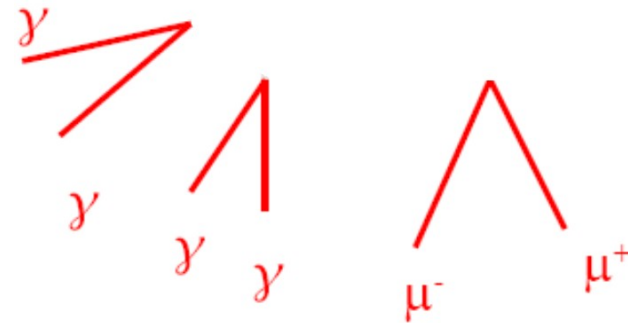
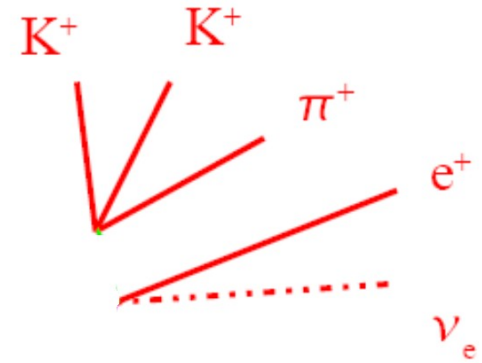
- ◆ Exemple : paire de particules contenant des quarks b
- ◆ On **veut** connaître :
 - son taux de production
 - ses rapports de branchement
 - corrélation angulaire des produits de désintégration





Les observables (2)

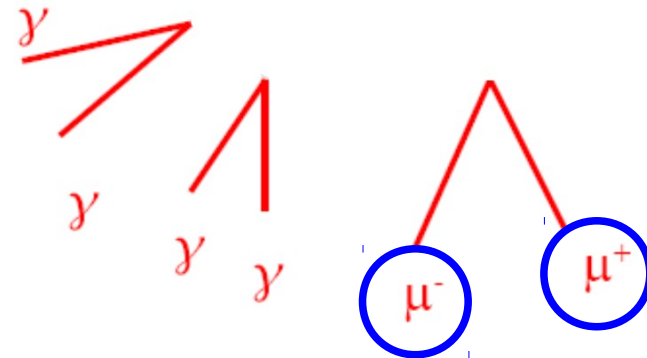
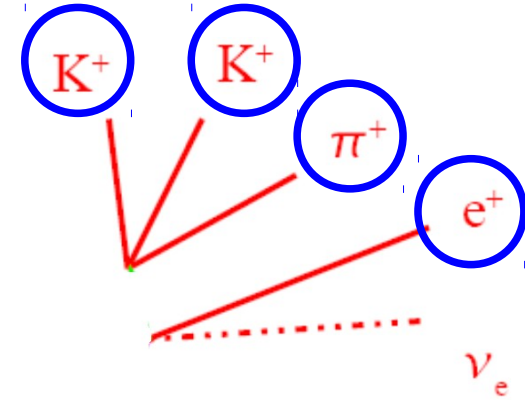
- ◆ Ce qu'on **peut voir**:
de multiples particules dans l'**état final**
- ◆ Ici, un cas très propre (pas de parasites)
- ◆ Il faut les détecteurs adaptés à toutes les particules finales





Les observables (2)

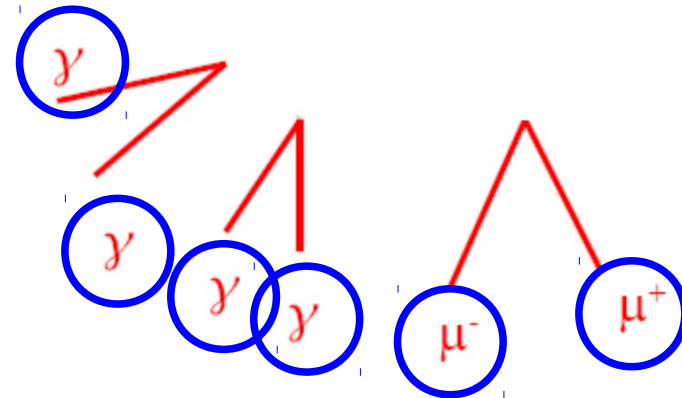
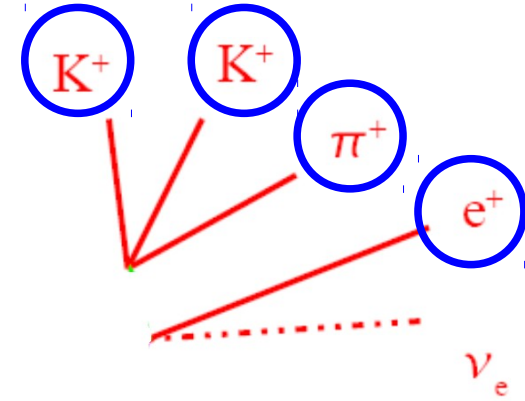
- ◆ Ce qu'on peut **mesurer** :
- ◆ L'**impulsion** des particules chargées
 - en appliquant un champ magnétique
 - en mesurant leur trajectoire
 - ex. : spectromètre (chambre à dérives + aimant)
- ◆ Leur trajectoire très très près du **point d'interaction**
 - ex. : détecteur de **vertex** au silicium





Les observables (3)

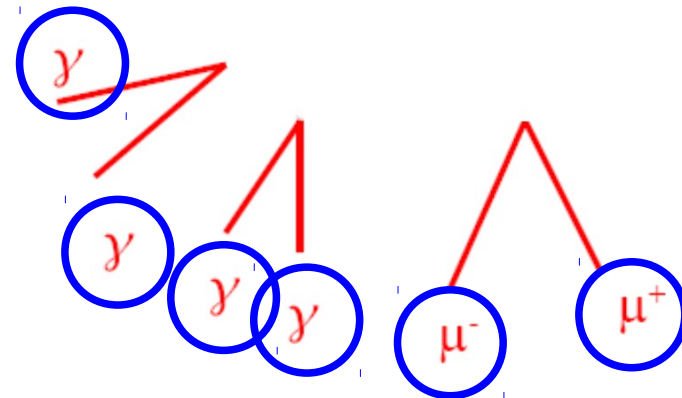
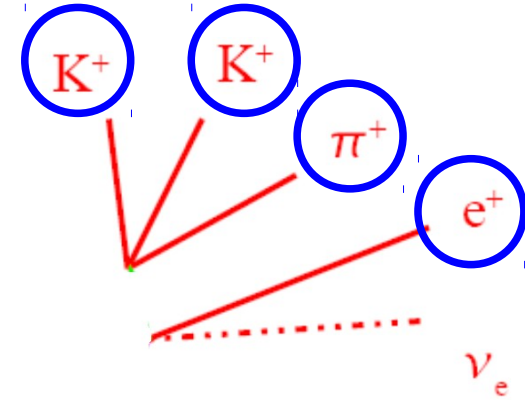
- ◆ Ce qu'on peut **mesurer** :
- ◆ L'**énergie** déposée par les particules
 - par exemple dans des calorimètres





Les observables (4)

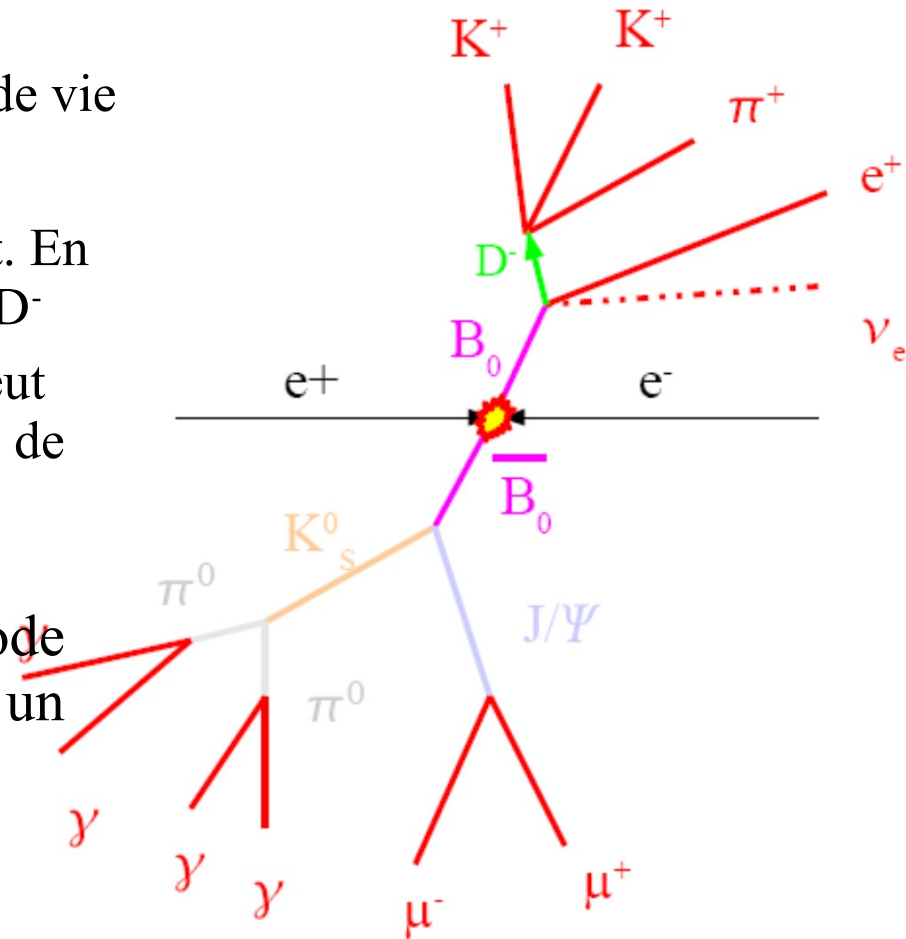
- ◆ Ce qu'on peut mesurer :
- ◆ La nature des particules:
 - masse
 - charge
- ◆ Particules chargées K , π , e , p
 - perte d'énergie par ionisation (dE/dx)
 - lumière Cherenkov (RICH)
 - dépôt d'énergie (calorimètres)
- ◆ Identification des muons
 - particules très pénétrantes
 - détecteur derrière un blindage





Les observables (5)

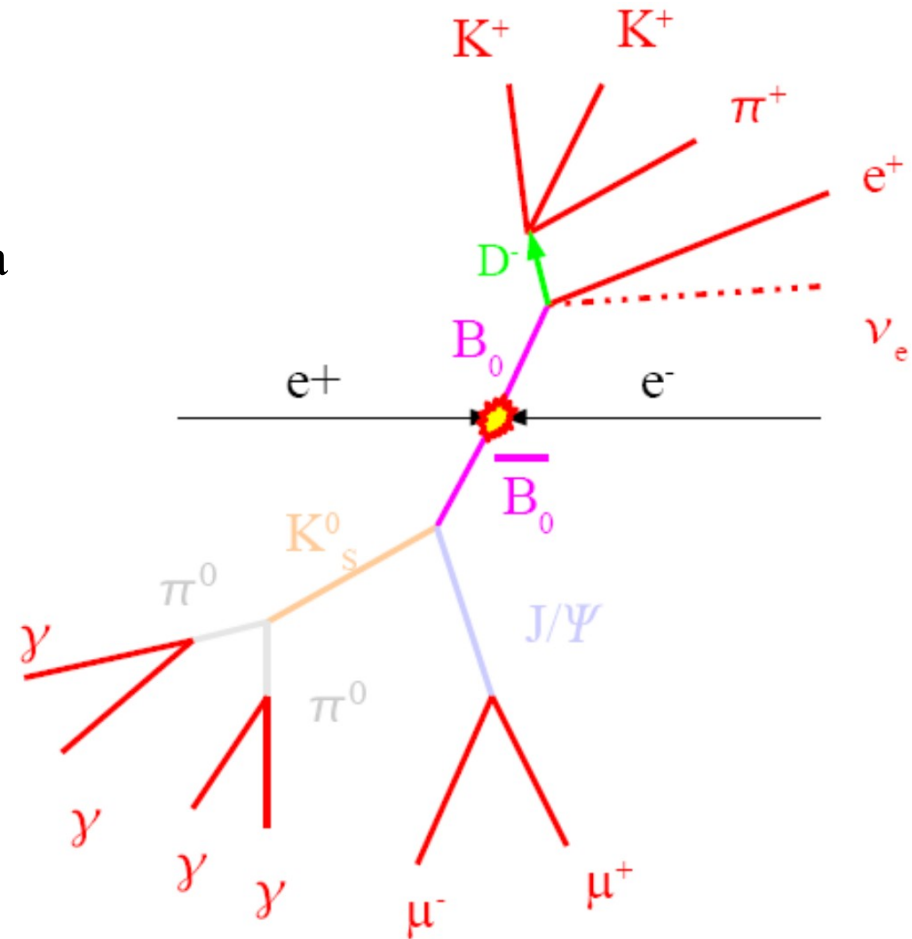
- ◆ À partir des caractéristiques **cinématiques** des particules détectées
 - énergie, impulsion, masse, charge, temps de vie
- ...On reconstruit des particules primaires
 - ex. : K^+ , K^- , π^- proviennent du même point. En sommant leur impulsion on reconstruit le D^-
 - en recoupant toutes les informations on peut essayer de reconstruire la chaîne complète de désintégrations
- ◆ Ce qu'on **déduit** : l'étude statistique du mode de désintégration va permettre de mesurer un paramètre théorique
- ◆ L'expérience permet :
 - de confirmer ou infirmer un modèle théorique
 - d'apporter des précisions sur des paramètres que les théoriciens ne savent pas calculer





Les observables (6)

- ◆ **Que mesurer** dans l'état final ?
- ◆ **Idéalement tout !**
 - énergie et impulsion
 - position
 - pour toutes les particules produites dans la collision
- ◆ **En pratique** on ne peut accéder qu'à :
 - particules chargées (e , μ , π , K , p) :
 - trajectoire
 - signe
 - impulsion
 - identification
 - photons :
 - position et énergie
 - neutrinos :
 - une partie de l'impulsion (par déduction)
 - neutrons :
 - énergie, position





Interactions particules/matière (1)

- ◆ Toutes les particules « visibles » le sont par leur **interaction avec la matière** (= noyaux + électrons)
 - beaucoup de principes physiques différents dont la majorité sont de nature **électromagnétique**
 - rayonnement de freinage
 - création de paires
 - effet cerenkov
 - rayonnement de transition...
 - quelques uns de nature nucléaire (neutron + gerbe hadronique)
 - ces processus vont être utilisés pour mesurer directement les informations des quadri-vecteurs ou alors permettre une identification des particules

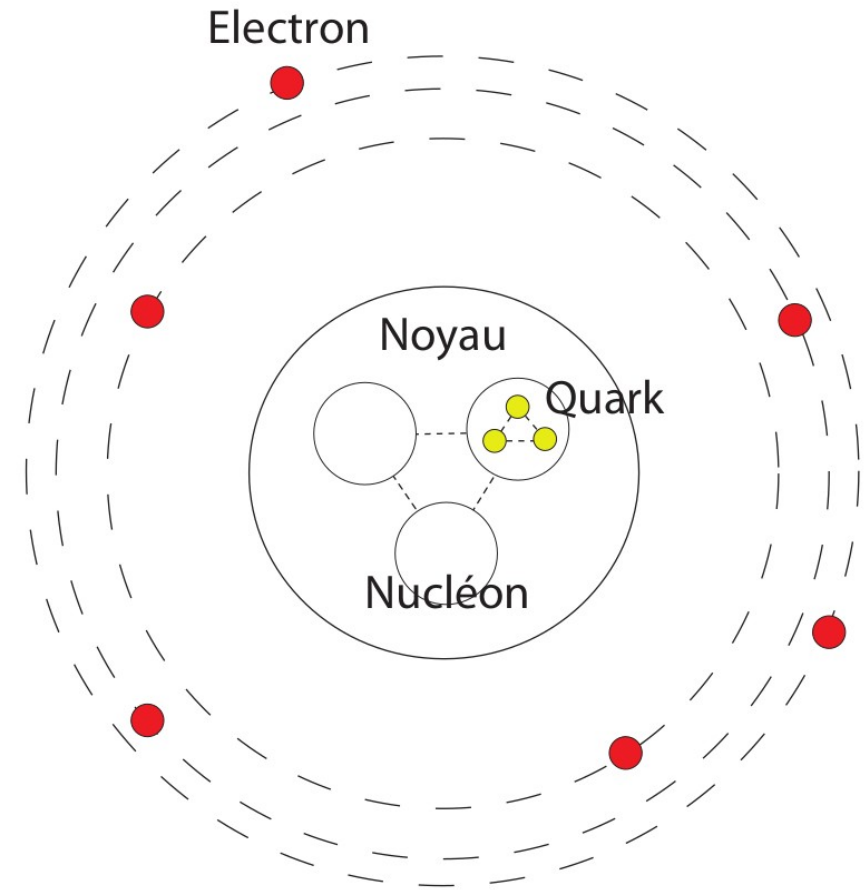
- ◆ MAIS au final ce qui sera observé reste un signal d'**ionisation** ou d'**excitation** de la matière auquel le détecteur devra être sensible

- ◆ En physique des particules on ne s'intéresse qu'aux particules ayant **$E \gg 100 \text{ keV}$**
 - En dessous, on est dans le cadre de la physique ionique, moléculaire, etc..



Interactions particules/matière (2)

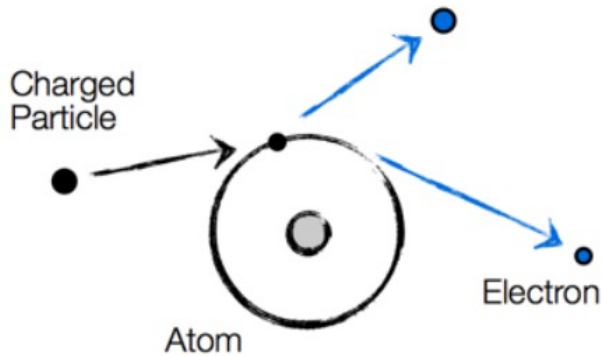
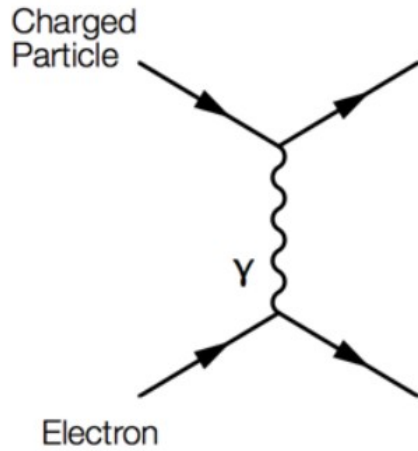
- ◆ L'interaction entre une particule chargée incidente et la matière peut intervenir à **divers niveaux** :
 - les charges dans leur ensemble
 - les électrons atomiques
 - le noyau
 - les constituants des noyaux
- ◆ Elle concerne **les trois forces** (électromagnétique, forte et faible), mais jamais la gravitation
- ◆ Particules chargées
 - Diffusion multiple
 - Particules lourdes
 - Electrons/positrons
 - Cas des muons de très haute énergie
 - Effet Čerenkov
 - Rayonnement de transition



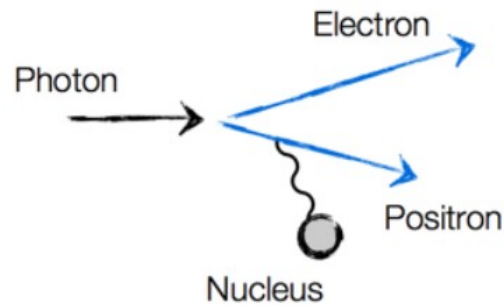
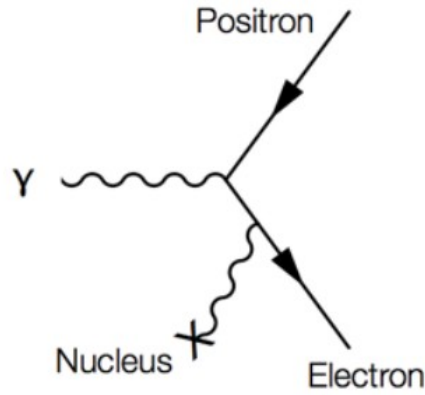
Interactions particules/matière (3)

◆ Exemples d'interactions :

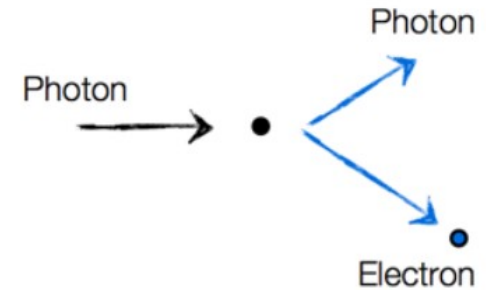
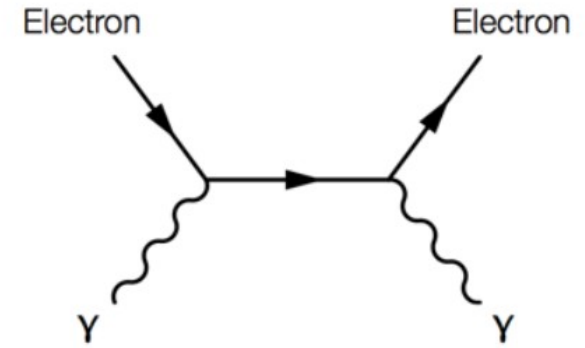
Ionisation



Production de paires e^+e^-



Diffusion Compton

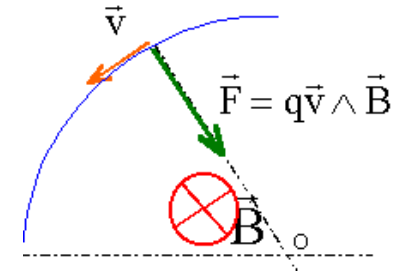




Charge électrique

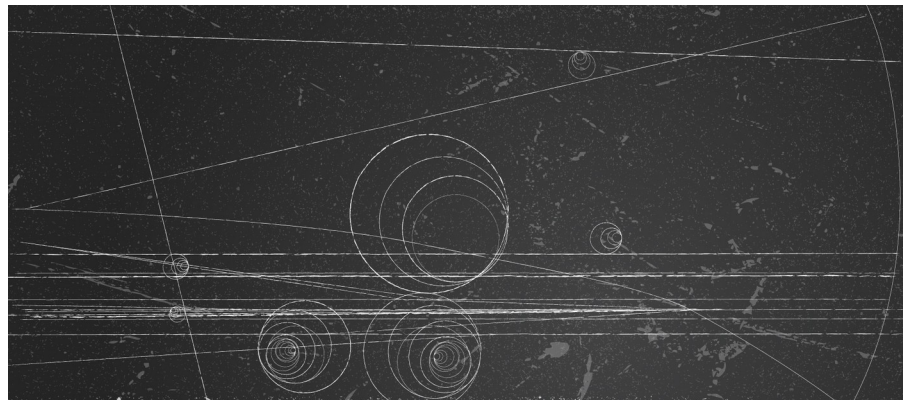
◆ Déviation dans un **champ magnétique**

- une particule chargée, soumise à un champ magnétique, décrit un cercle si sa vitesse est perpendiculaire à \vec{B}
- le **sens de l'enroulement** mesure le signe de la charge
- le rayon de courbure mesure l'impulsion



◆ L'hélice devient spirale si la particule ralentit en traversant la matière

- caractéristique de ralentissement, puis d'arrêt, d'un électron et positron



◆ Particules neutres

- elles ne laissent pas de traces et sont **invisibles** (tant qu'il ne leur arrive rien : collision avec un noyau, désintégration, etc)

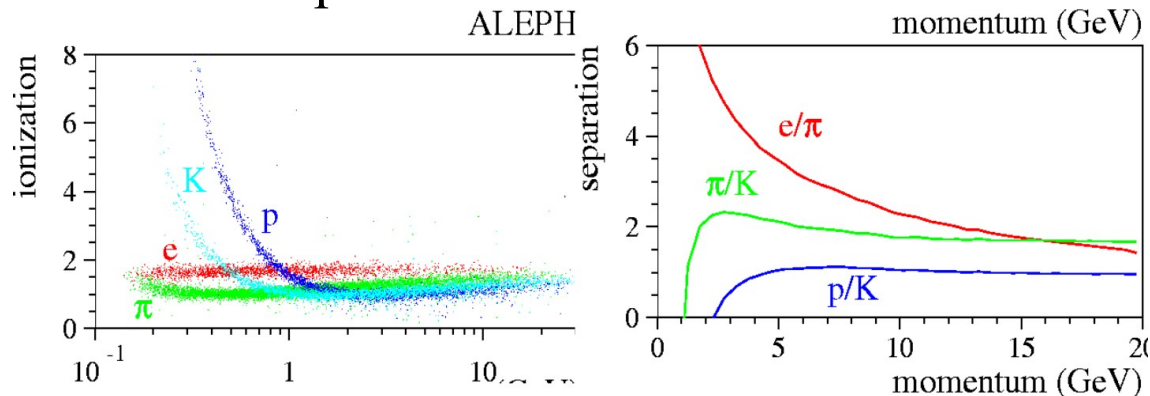


Masse, impulsion, énergie

- ◆ La quantité de mouvement P d'une particule chargée se mesure à partir du rayon de courbure R de sa trajectoire (hélice) dans un champ magnétique
 - $P \text{ (GeV/c)} = 0.3 * B \text{ (Tesla)} * R \text{ (m)}$
 - la direction est celle de la tangente à la trajectoire au point de départ



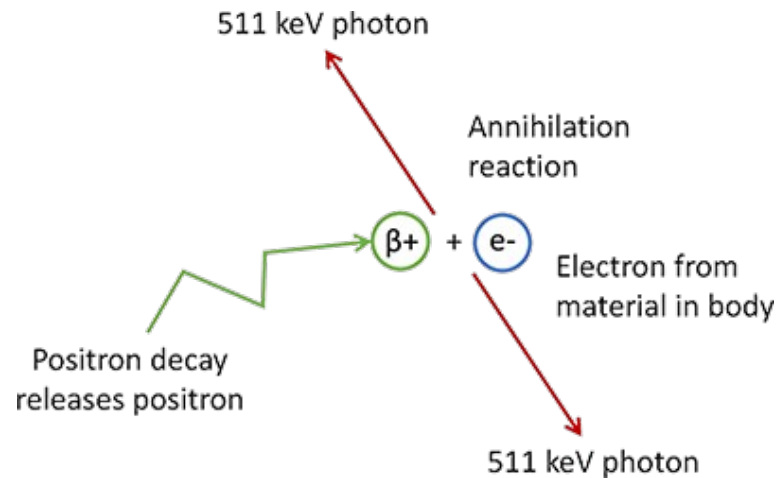
- ◆ Avec une mesure simultanée de la perte d'énergie par ionisation (dE/dx) on peut estimer la masse de la particule





Observer les électrons

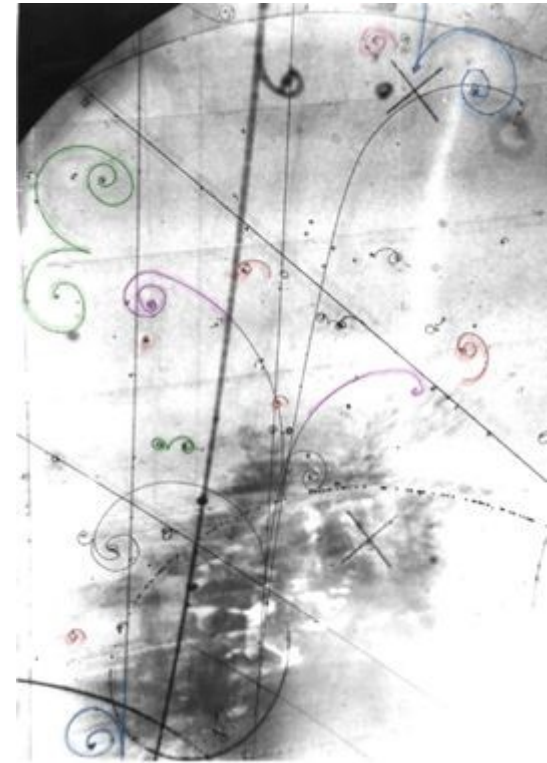
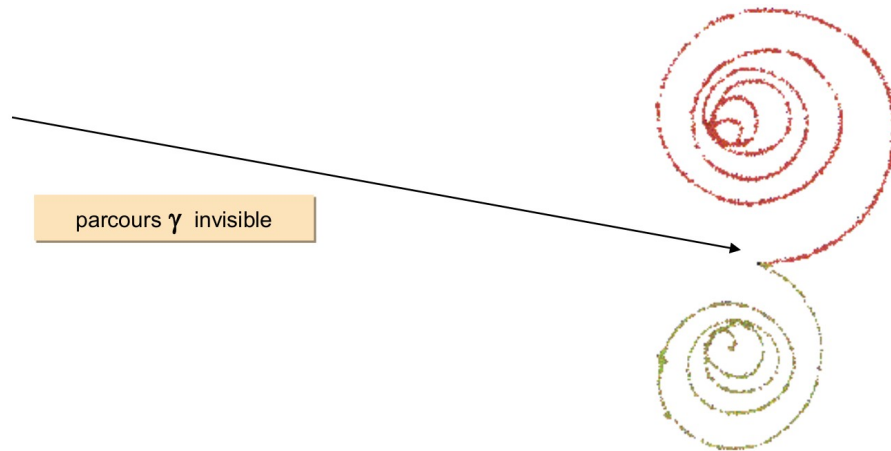
- ◆ Il dépose toute son énergie **dans la matière rapidement**
- ◆ Il constitue le projectile idéal pour sonder la matière
 - extrêmement léger par rapport au proton et sans structure
 - sa stabilité lui permet d'être utilisé dans des accélérateurs de particules
- ◆ Le positron est en tout point comparable à l'électron, mais il circule en territoire hostile
 - le positron finit par rencontrer un électron. Ils se détruisent mutuellement en deux photons





Observer les photons

- ◆ Électriquement neutre \Rightarrow non dévié par les champs magnétiques, ne laisse pas de trace
- ◆ À haute énergie se désintègre en **paires électron-positron**

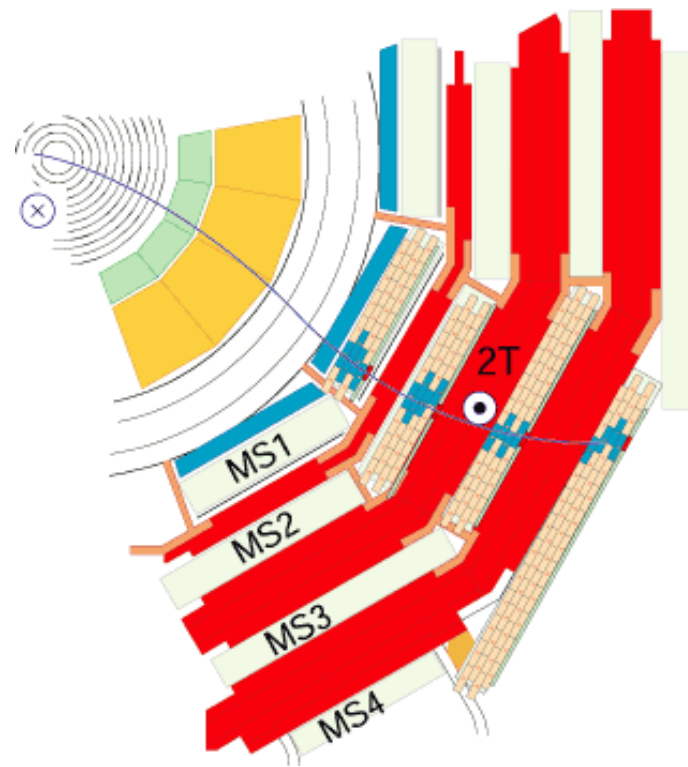
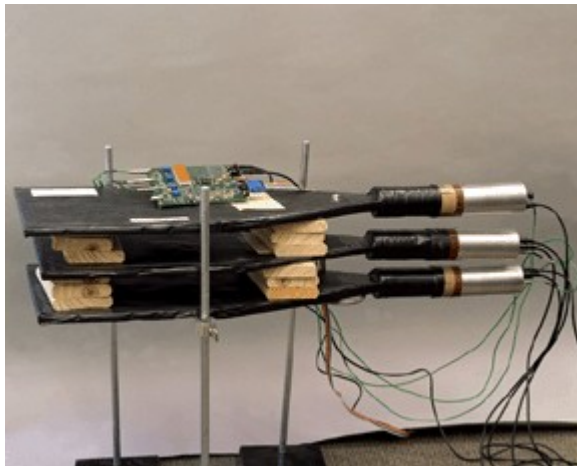


- ◆ Dépôt d'énergie dans un calorimètre électromagnétique similaire aux électrons



Observer les muons

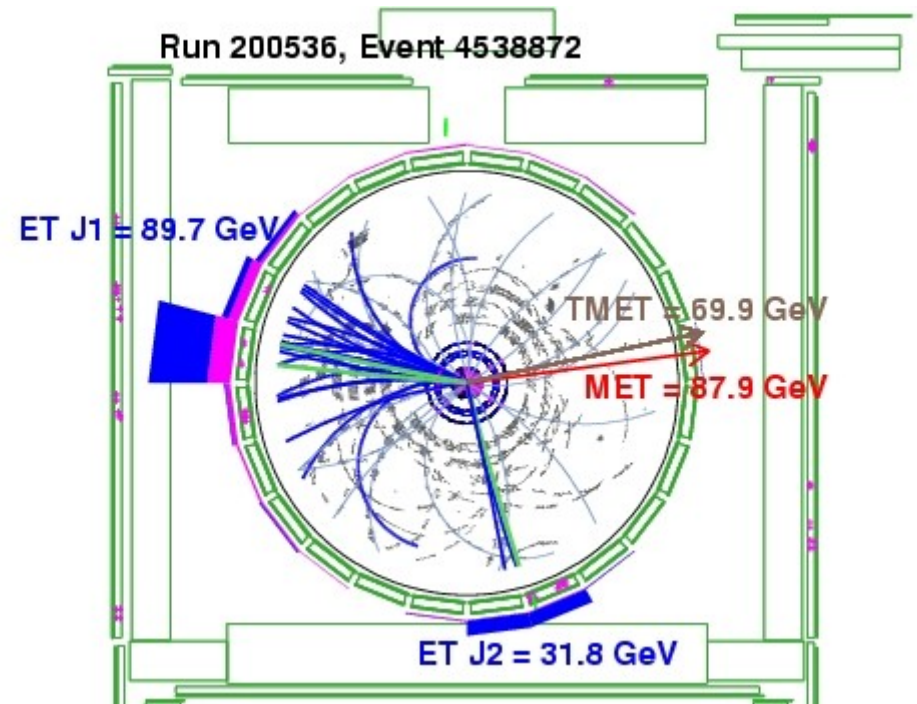
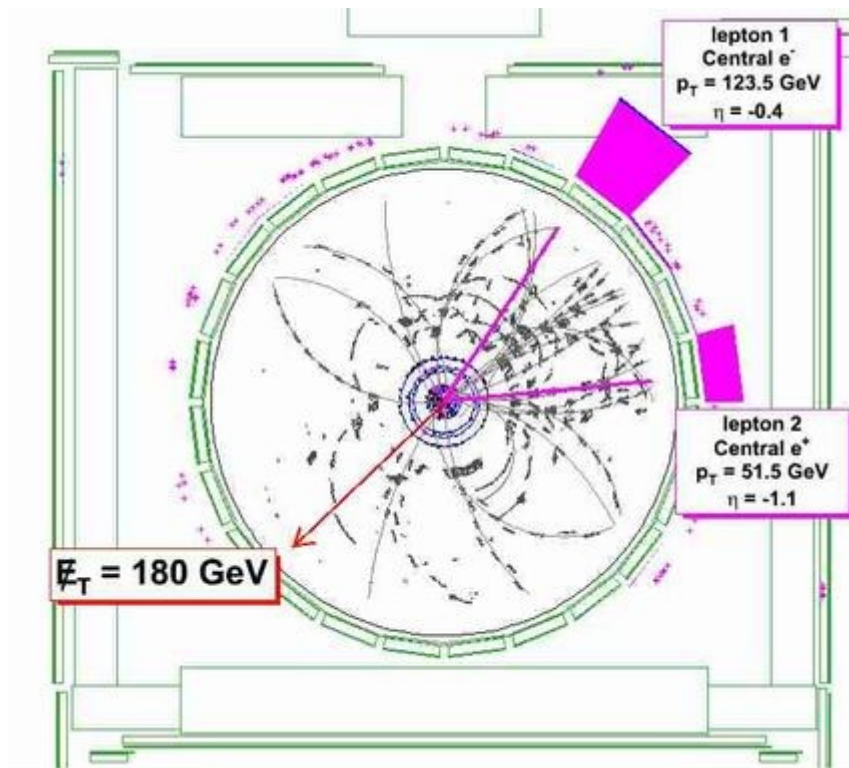
- ◆ Très pénétrant :
 - Bulldozer comparé à l'électron, il **perd lentement son énergie**
 - Interagit peu avec la matière : il dépose peu d'énergie, et est identifié par une mesure de trajectoire non arrêtée





Observer les neutrinos

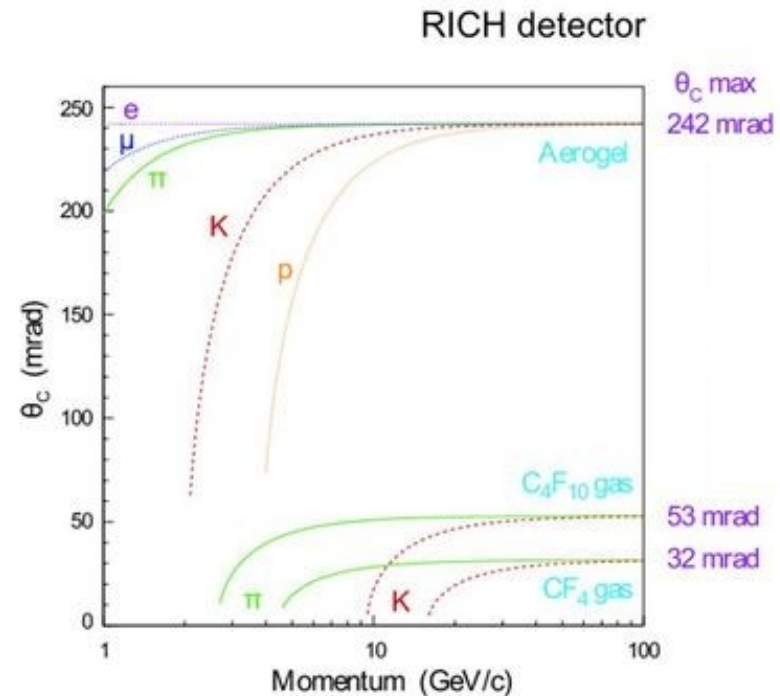
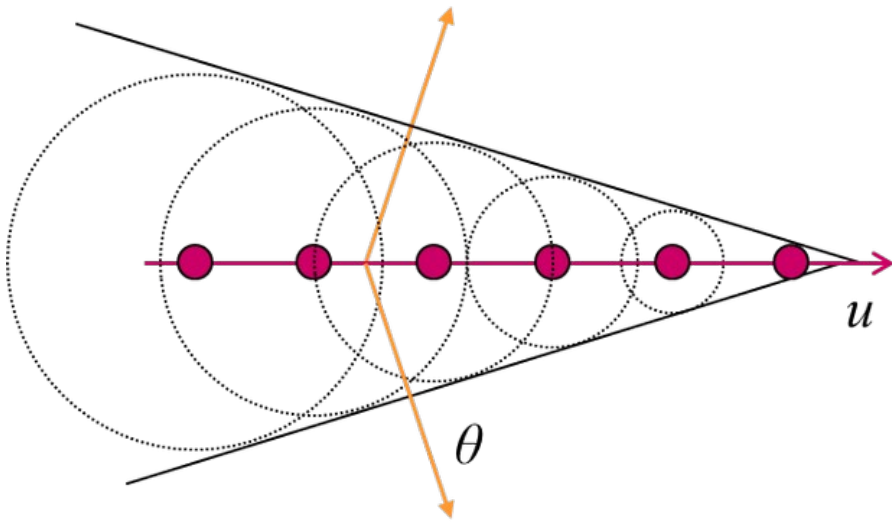
- ◆ Ils interagissent très peu (uniquement par interaction faible)
 - il faudrait 40 années-lumière de plomb pour les arrêter
 - la plupart du temps invisibles dans les détecteurs : apparaissent comme des particules manquantes





Observer les protons

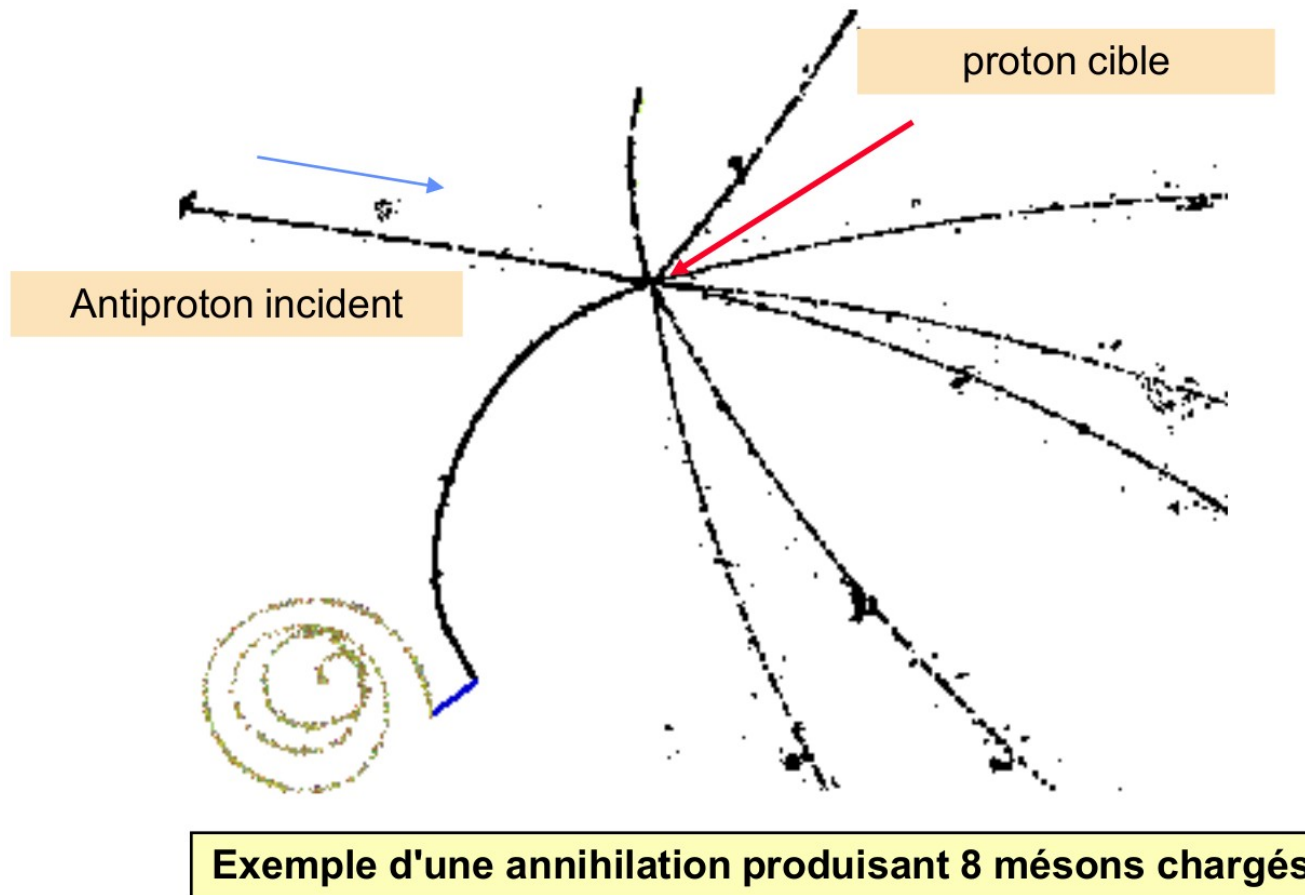
- ◆ Il est assez **lourd et ionisant**
 - Au-dessous de 1.4 GeV/c d'impulsion, les protons déposent plus d'énergie par cm de parcours que les mésons π et K, et sont reconnaissables
- ◆ Il est identifiable par effet Čerenkov
 - à impulsion égale, les protons sont plus lents que les particules plus légères
 - s'ils vont plus vite que la lumière dans le milieu traversé, ils émettent des photons Čerenkov, et peuvent facilement être séparés des pions, plus difficilement des kaons





Observer les anti-protons

- ◆ Il possède la possibilité de s'**annihiler** avec un proton ou neutron
 - la réaction d'annihilation libère beaucoup d'énergie (environ 2 GeV)
 - elle produit principalement des mésons π et aussi des mésons K





Observer les neutrons

- ◆ Le neutron, électriquement neutre, est **difficile** à détecter
- ◆ On le détecte quand il **communique une partie de son énergie** à des particules chargées
 - il ralentit en rebondissant sur des noyaux
 - en physique nucléaire, on mesure l'énergie de “protons de recul” : mesure précise
 - en physique des particules, on essaye de recueillir l'énergie d'une cascade de collisions issues d'un neutron primaire : mesure imprécise
- ◆ Calorimètres “hadroniques”
 - on ne peut le distinguer d'autres hadrons neutres comme l'antineutron ou le K^0 long

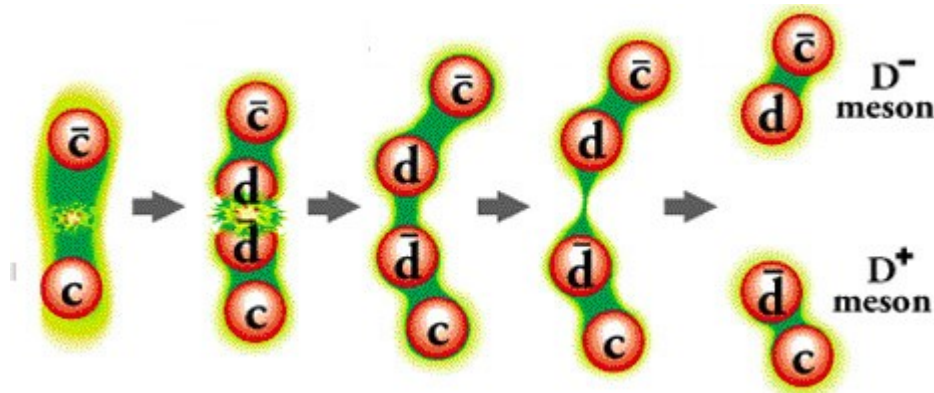


Observer les quarks et les gluons

◆ Cas particulier des **quarks**:

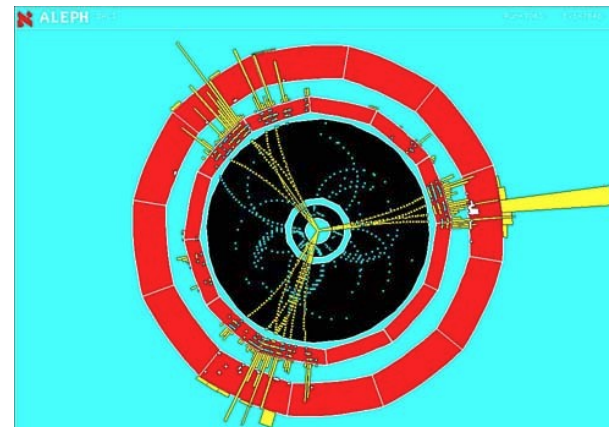
- les quarks ne peuvent exister qu'à l'intérieur des hadrons (charge de couleur)
- l'intensité de l'interaction forte augmente avec la distance

⇒ Au fur et à mesure que deux quarks s'éloignent l'un de l'autre, la création d'une paire quark-antiquark devient énergétiquement plus favorable. Les quarks résultants se combinent pour former des hadrons



◆ Les quarks se manifestent donc par des **jets** de hadrons

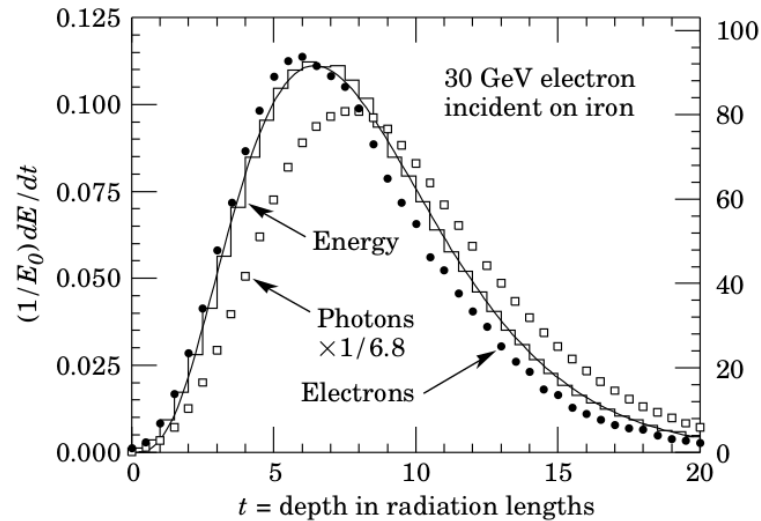
- vrai aussi pour les **gluons**
- observé pour la première fois en 1979 à DESY (Hambourg)





Longueur de radiation

- ◆ Notée X_0 , caractéristique des interactions électromagnétiques
- ◆ Distance moyenne nécessaire pour
 - qu'un électron perde $1-1/e$ de son énergie
 - qu'un photon parcourt $7/9$ de son libre parcours moyen avant qu'il ne se désintègre

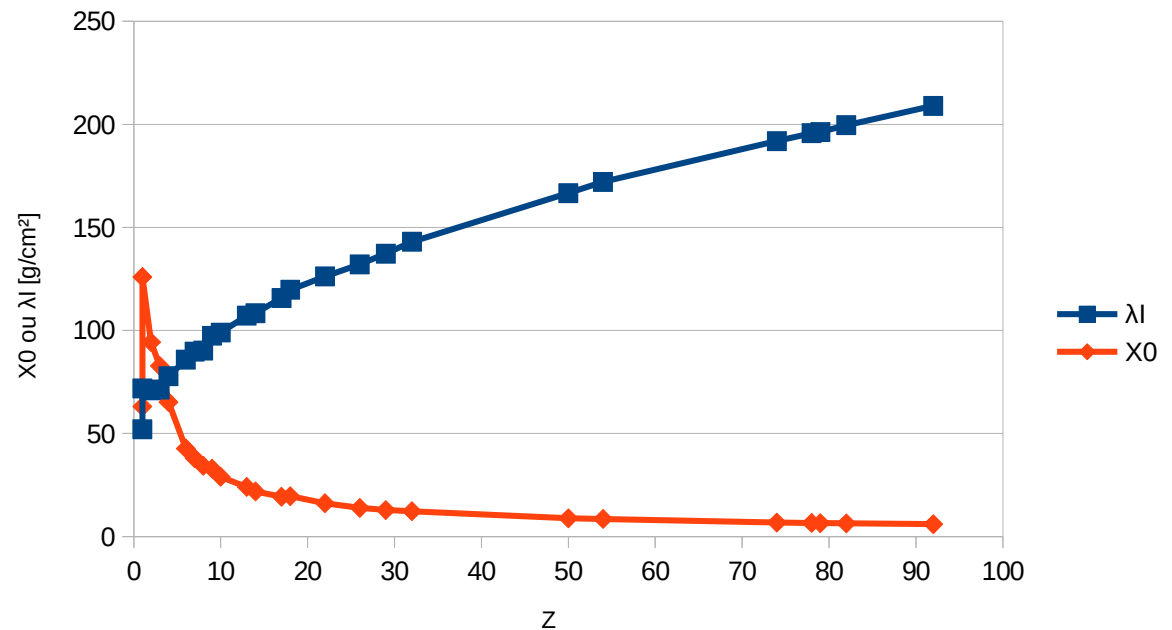


- ◆ Dépend de l'élément (Z), en g/cm^2
 - parfois on divise par la densité et on donne X_0 en cm
- ◆ Exemple :
 - 6.37 g/cm^2 dans le plomb ($X_0/\rho = 0.6 \text{ cm}$)
 - calorimètre Pb/Ar d'ATLAS : longueur totale $22 X_0$: peut arrêter tous les électrons/photons jusqu'à une énergie de qqs TeV



Longueur d'interaction

- ◆ Notée λ_I
- ◆ Équivalent pour les interactions hadroniques
 - distance moyenne pour qu'une particule perde 1-1/e de son énergie
- ◆ $\lambda_I > X_0$ pour $Z > 6$
- ◆ Aussi en g/cm^2
- ◆ Exemples :
 - 199.6 g/cm^2 pour du plomb
 - 132.2 g/cm^2 pour du fer



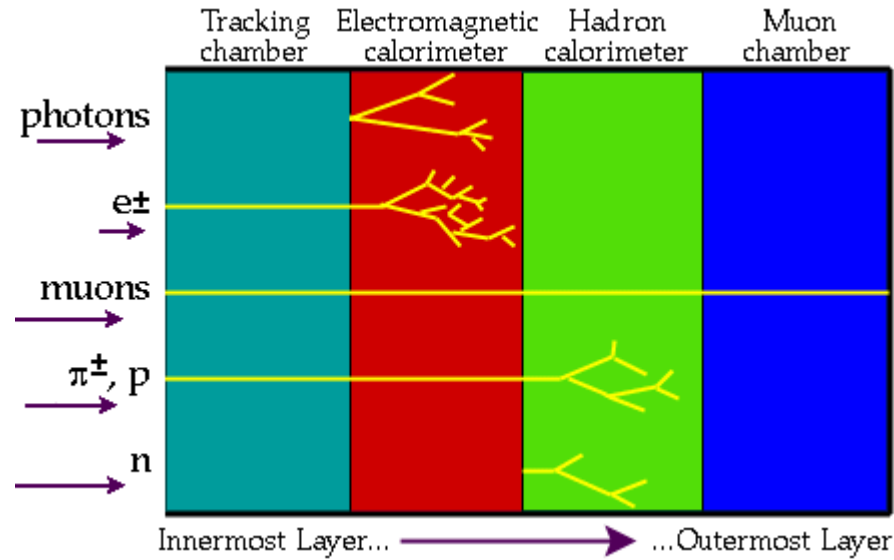
- ◆ Selon les détecteurs on voudra minimiser (trajectographe) ou maximiser (calorimètre) la quantité de matière



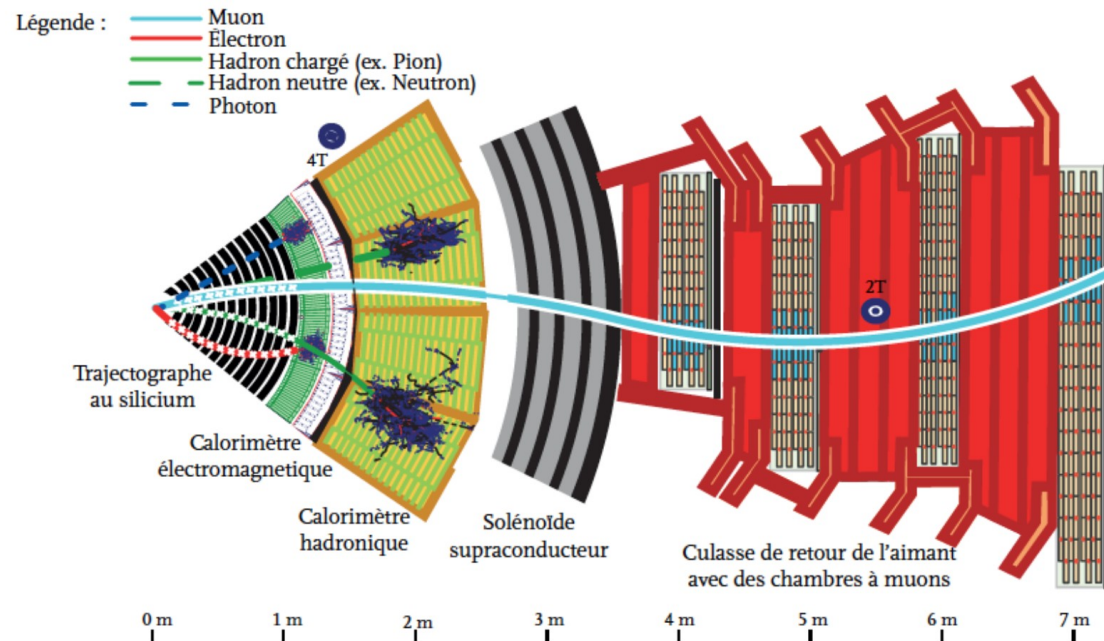
Conclusion : les particules dans les détecteurs



◆ Schématique :



◆ Exemple du détecteur CMS :



Back-up



Emprunts à d'autres cours ☺

- ◆ Cours de Steve Muanza à l'École "Techniques de base des détecteurs" 2017
- ◆ "Physique des particules aux collisionneurs", F. Ledroit, Bénodet 2017
- ◆ "Conception de détecteurs pour la physique des hautes énergies", P. Puzo, Bénodet 2017
- ◆ "Cours de master classes au CPPM", Y. Caodou et al
- ◆ Cours de I. Wingerter aux CERN Summer Students 2018
- ◆ "Un siècle d'étude des rayons cosmiques", D. Décamp, 2012

- ◆ Autre source importante : "The Review of Particle Physics (2018)", Particle Data Group