

CHAPITRE II

Les particules et leurs signatures

Arnaud Duperrin (CPPM)

Les acteurs :








Comment reconnaître et identifier les particules
que les physiciens recherchent

Plan

- 1 - Effets relativistes
- 2 - Les observables des particules
- 3 - Observer les leptons
- 4 - Observer les hadrons
- 5 - Observer les bosons

The PARTICLE ZOO

Subatomic Particle Plush Toys FROM THE STANDARD MODEL OF PHYSICS & beyond!

	<p>CHARM QUARK CATEGORY: Quarks</p>		<p>THE WHOLE ZOO of 36 particles (WITH antiparticles): Down Quark, Up Quark, Strange Quark, Charm Quark, Bottom Quark, Top Quark, Positron, Muon, Tau, Z Boson, Electron-Neutrino, Muon-Neutrino, Tau-Neutrino, Neutron, Proton, Gluon, Graviton, W Boson, Dark Matter, Electron, Photon, Higgs Boson, Tachyon, Antiproton, Antineutron, Antimuon, Antitau, Antiup Quark, Antidown Quark, Antistrange Quark, Anticharm Quark, Antibottom Quark, Antitop Quark \$345 + shipping</p>
	<p>BOTTOM QUARK CATEGORY: Quarks</p>		<p>ANTIPARTICLE 14-pack: Antiproton, Antineutron, Positron, Antimuon, Antitau, Antiup Quark, Antidown Quark, Antistrange Quark, Anticharm Quark, Antibottom Quark, Antitop Quark \$130 + Shipping</p>
	<p>TOP QUARK CATEGORY: Quarks</p>		<p>ANTIQUARK 6-pack: Antiup Quark, Antidown Quark, Antistrange Quark, Anticharm Quark, Antibottom Quark, Antitop Quark \$55.50 + Shipping</p>
	<p>CUSTOM PARTICLES</p>		

Quark, Antibottom Quark
\$345 + shipping

§ 2.1 - Effets relativistes

Aux alentours de la vitesse de la lumière

- En physique des particules, les vitesses de celles-ci approchent celle de la lumière c
- Les relations masse-vitesse-énergie changent
- On introduit le rapport des vitesses : $\beta = v/c$
 - ▶ β est compris entre 0 et 1
 - ▶ dans notre monde habituel, β est presque 0
- Une particule est dite relativiste quand

$$v > c/10 \quad \text{ou} \quad \beta = v/c > 1/10$$



Albert Einstein

2.1 – Effets relativistes

Masse = énergie interne

- L'énergie interne **M** d'une particule de masse **m** est liée à la vitesse de la lumière **c** par la relation d'Einstein:

$$M = m c^2$$

- C'est aussi l'énergie au repos
- C'est une énergie très grande : la masse est multipliée par un grand nombre au carré

$$M = m \times 300000000 \text{ m/s} \times 300000000 \text{ m/s}$$

- ▶ Réaction chimique : énergie dégagée **E** prélevée sur une variation infime de la masse des atomes et molécules : on ne s'en aperçoit pas
 - ▶ Fission atome d'uranium : perte relative de masse d'environ un millième. Multipliée par le carré de **c**, cela suffit pour dégager des énergies sans commune mesure avec les énergies chimiques
- Unité de masse : $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 \rightarrow \text{GeV}/c^2$

2.1 – Effets relativistes

Energie totale

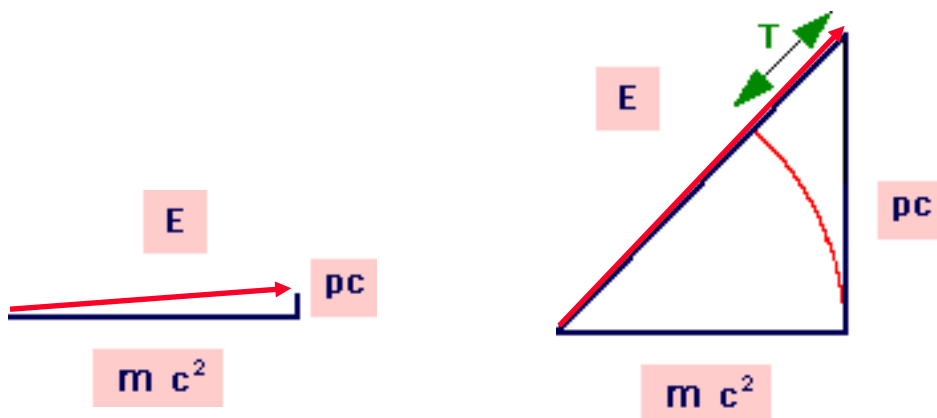
- L'énergie totale E d'une particule est la somme de :
 - ▶ son énergie interne (ou de masse) $M = mc^2$
 - ▶ son énergie cinétique T
 - à petite vitesse : $T = \frac{1}{2} m v^2$
 - à grande vitesse : $T = (\Gamma - 1) m c^2$

$$E = M + T = \Gamma M$$

- E est reliée à la vitesse v ou à la quantité de mouvement $P = pc$ par

$$E = \frac{M}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \sqrt{P^2 + M^2}$$

- Triangle rectangle : énergie E , quantité de mouvement P , et énergie de masse M
 - ▶ Faible v/c : triangle aplati verticalement $E \approx M$
 - ▶ domaine relativiste : $E \approx P$



- Note: $M^2 = E^2 - P^2$ est invariant
 - ▶ ne dépend pas du référentiel choisi

§ 2.2 - Les observables des particules

Comment observer, identifier et mesurer une particule?

■ Signatures d'identification

- Charge
- Masse (E/P)
- Temps de vie
- Modes de désintégration

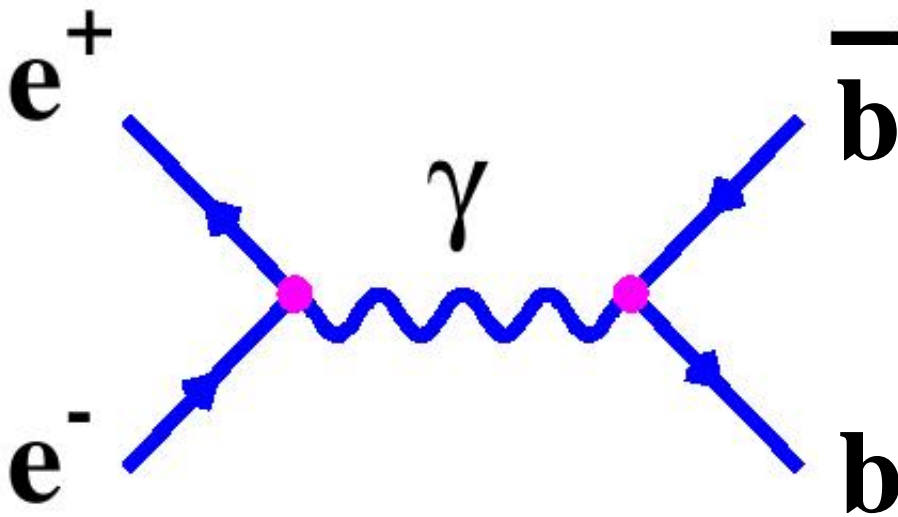
■ Mesures

- Energie - vitesse
- Direction
- Temps de passage

2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

- Collision e^+e^-
- Création d'une paire de quark / anti-quark

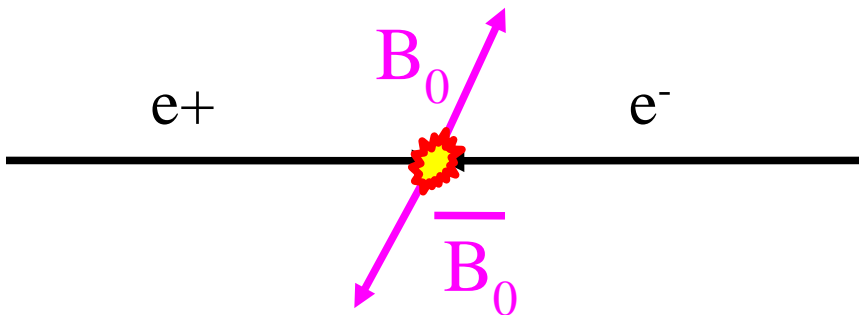
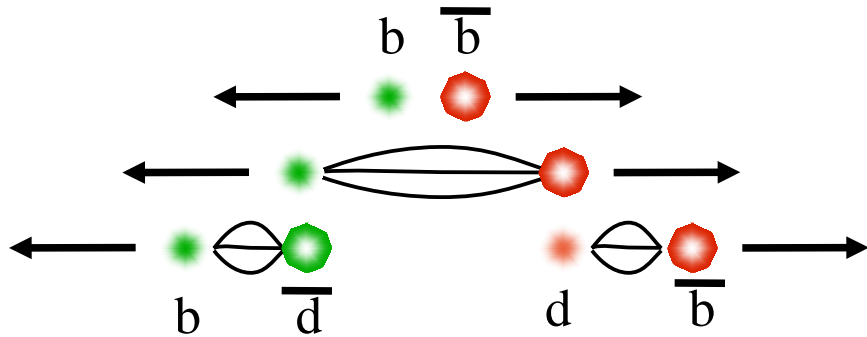


2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

■ On ne voit pas les quarks et les anti-quarks:

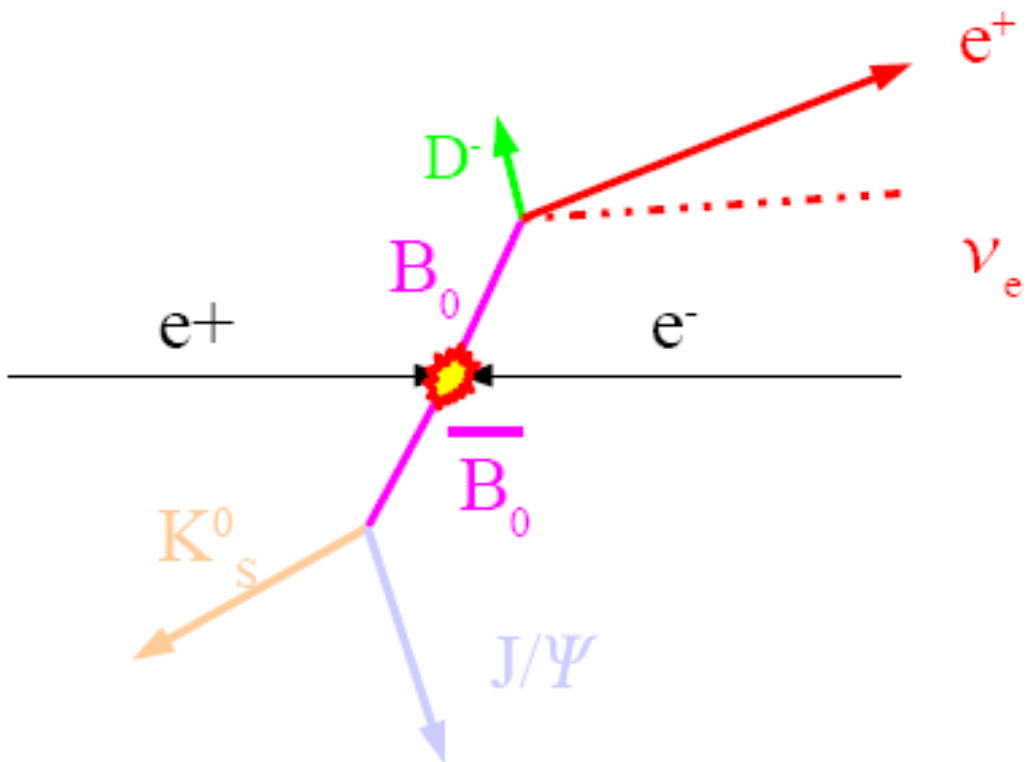
- ▶ ils s'habillent (s'hadronisent)
- ▶ le type de hadron créé
 - est variable
 - la loi de probabilité dépend de l'énergie
- ▶ ici: mésons beaux
 - $B_0 = d\bar{b}$
 - $\bar{B}_0 = \bar{d}b$



2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

- ▣ Les mésons beaux sont instables, ils vont se désintégrer spontanément
 - temps de vie moyen: $c\tau = 458 \mu\text{m}$
 - " longueur moyenne effectivement parcourue dépend de leur impulsion (boost de Lorentz)
 - de multiples modes de désintégration possibles
 - ici:
 - " $P(B_0 \rightarrow D^- e^+ \nu_e) = (2,12 \pm 0.20)\%$
 - " $P(\bar{B}_0 \rightarrow K_S^0 J/\Psi) = (8,72 \pm 0.33)10^{-4}$

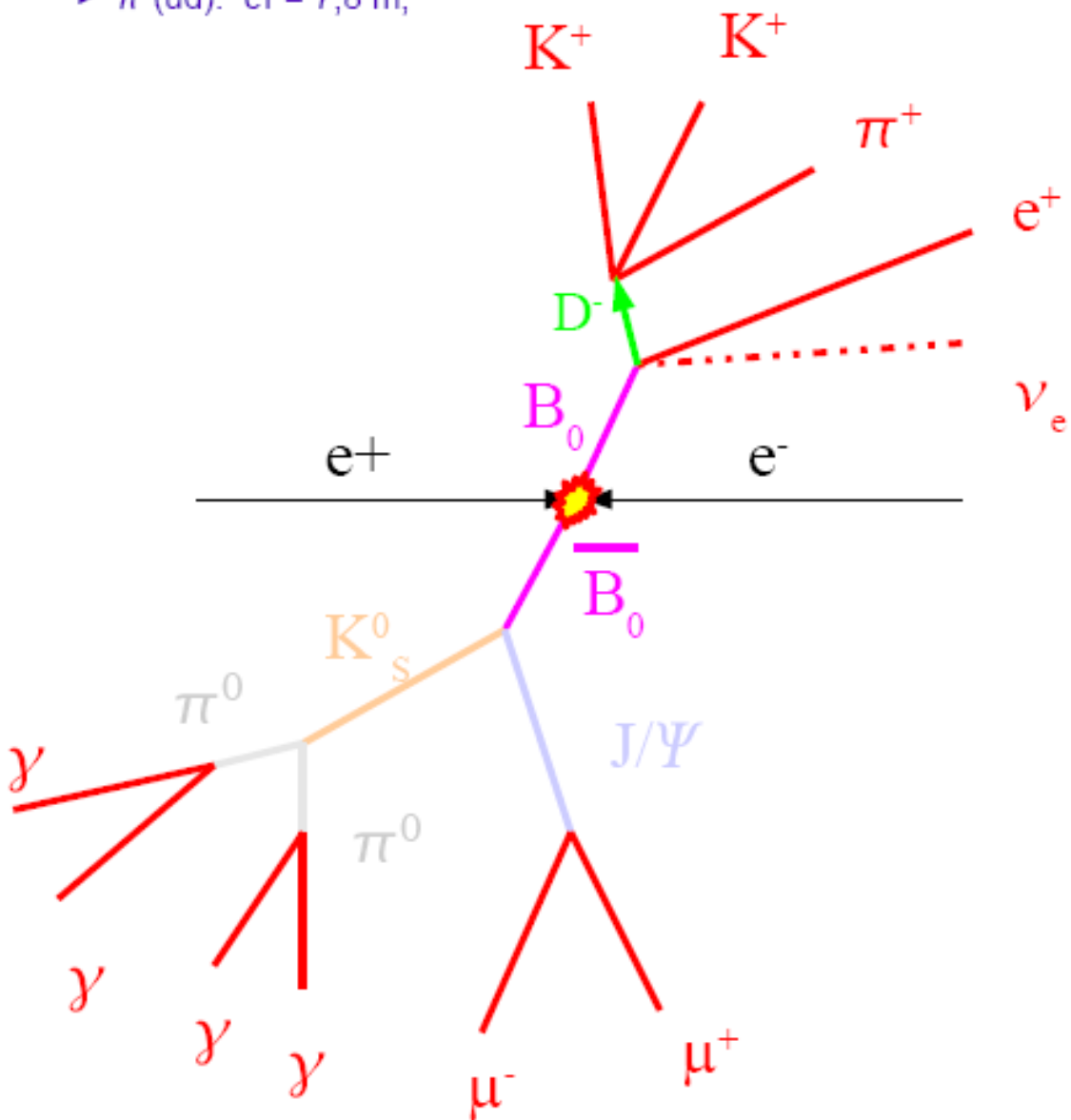


2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

- Certains des produits de désintégrations des B ne sont pas stables non plus

- ▶ $D^-(\bar{c}d)$: $c\tau = 311,8 \mu\text{m}$; $P(D^- \rightarrow K^+K^-\pi^-) = (1,00 \pm 0,04) \%$
- ▶ $K_S^0(d\bar{s})$: $c\tau = 2,7 \text{ cm}$; $P(K_S^0 \rightarrow \pi^0\pi^0) = (30,69 \pm 0,05) \%$
- ▶ $J/\Psi(c\bar{c})$: $c\tau = \sim 0$; $P(J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-) = (5,93 \pm 0,06) \%$
- ▶ $K^+(u\bar{s})$: $c\tau = 3,7 \text{ m}$;
- ▶ $\pi^+(u\bar{d})$: $c\tau = 7,8 \text{ m}$;



2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

Remarques sur les modes de production et de désintégrations des mésons Beaux:

- Les quarks b ont été produits ici par interaction électromagnétique
 - ▶ conservation du type des particules : production par paires

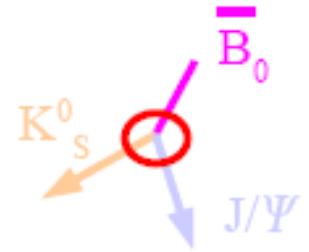
- Une fois créés, les quarks se séparent et s'hadronisent
 - ▶ les hadrons formés sont des hadrons « beaux » (contenant un b)
 - ▶ ces derniers sont lourds et instables, ils vont se désintégrer spontanément:
 - production de hadrons plus léger (contrainte cinématique)
 - unique possibilité: désintégration par interaction faible
 - la seule qui ne conserve pas la saveur initiale
 - le b n'est plus en présence d'un anti-b
 - temps de vie relativement long : $1,5 \cdot 10^{-12}$ s

2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

Ce qu'on veut mesurer:

- Un mode particulier de désintégration
 - ▶ par exemple, ici: $\bar{B}_0 \rightarrow K^0_S J/\Psi$
 - ▶ l'amplitude de désintégration est reliée à des paramètres théoriques fondamentaux
 - " mesure de son taux d'embranchement (ici la probabilité de désintégration du B_0 en $K^0_S J/\Psi$)
 - " corrélation angulaire des produits de désintégrations
- Comparer plusieurs canaux
 - ▶ par exemple, le mode conjugué: $B_0 \rightarrow K^0_S J/\Psi$
- Le plus souvent, des modes de désintégrations peu fréquent, ou rares
 - ▶ besoin de produire énormément d'événements pour en collecter seulement une fraction d'utile
 - ▶ plus on aura d'événements plus les mesures seront précises
- L'expérimentation en physique des particules:
 - ▶ la course à l'armement:
 - " de plus en plus d'énergie
 - " de plus en plus de luminosité
 - ▶ le choix des conditions de fonctionnement
 - " les paramètres de la collision
 - ici: pour optimiser la production de paires b-b

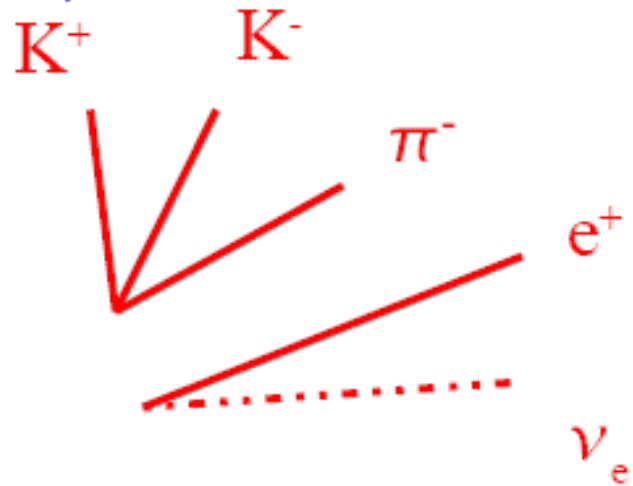


2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

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

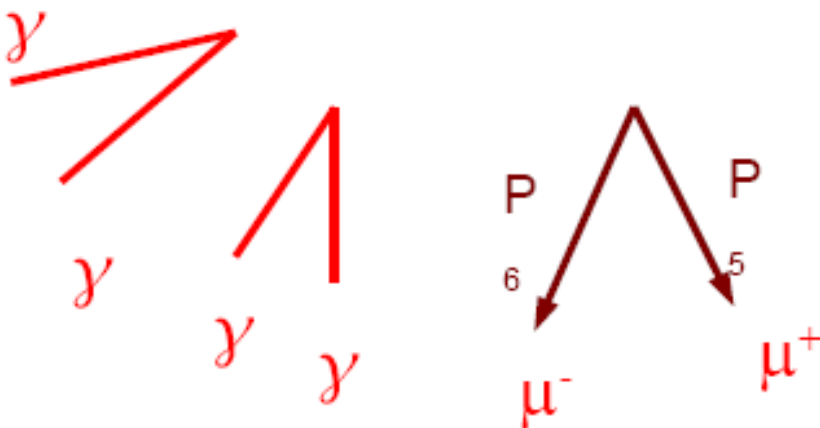
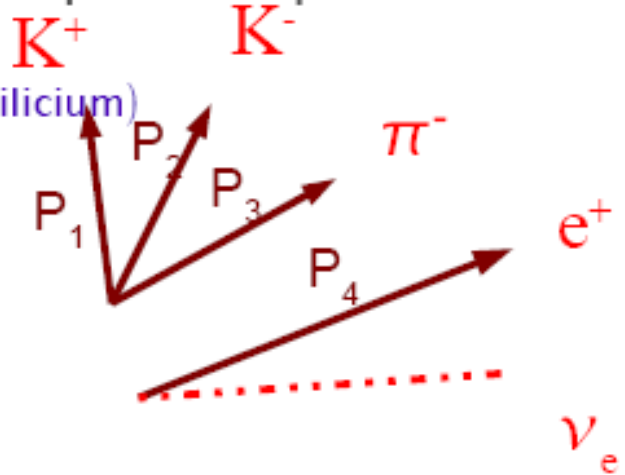


2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

Ce qu'on mesure:

- L'impulsion des particules chargées
 - ▶ en appliquant un champs magnétiques
 - ▶ et en mesurant leur trajectoire
 - ▶ ex: **spectromètre** (chambres à dérives + aimant)
- Leur trajectoire très près du point d'interaction
 - ▶ détecteur de vertex (silicium)

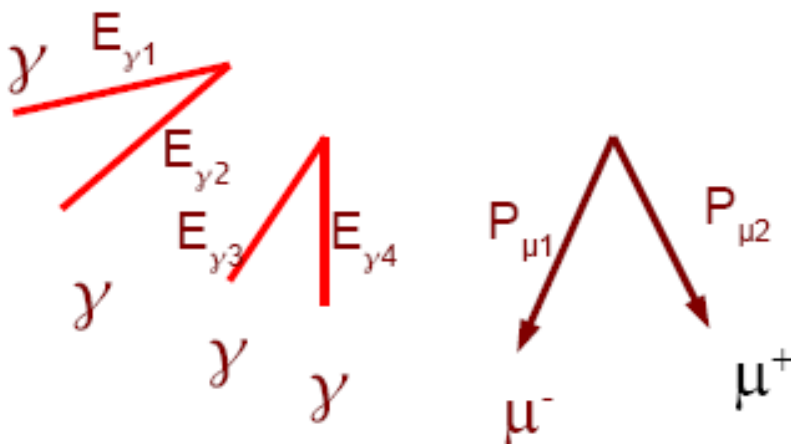
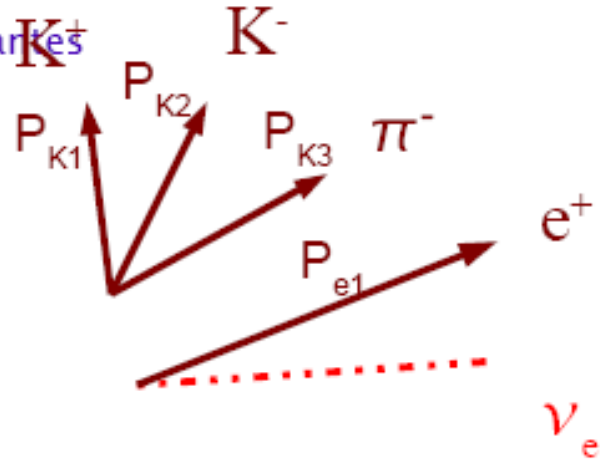


2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

Ce qu'on mesure:

- ▣ La nature des particules chargées : K, π, e, p
 - perte d'énergie par ionisation (dE/dx)
 - lumière Cerenkov (RICH)
 - dépôt d'énergie (calorimètre hadronique)
- ▣ Identification des muons
 - particules très pénétrantes
 - détecteur derrière un blindage



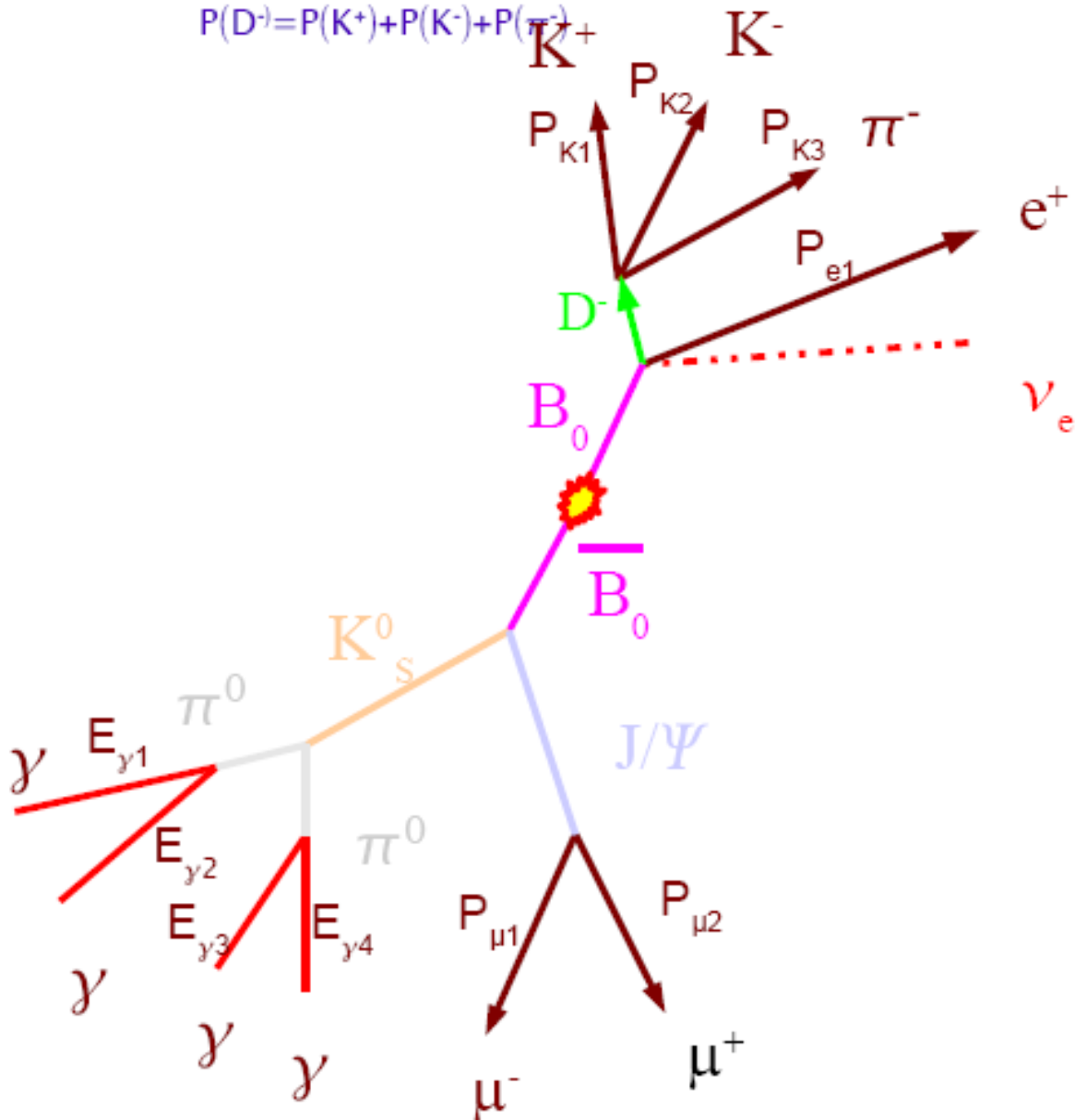
2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

Ce qu'on mesure:

- A partir des caractéristiques cinématiques des particules détectées
 - ▶ Énergie, impulsion, masse (identification), temps de vol
 - ▶ on reconstruit les particules primaires
 - ▶ ex: le K^+ , le K^- et le π^- viennent du même point
 - " en sommant leur impulsion on reconstruit celle du D^-

$$P(D^-) = P(K^+) + P(K^-) + P(\pi^-)$$



2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

Ce qu'on mesure:

- ▣ Les différents détecteurs fournissent des renseignements complémentaires
 - en recoupant ces informations, on peut (essayer de) reconstruire la chaîne complète de désintégrations.

Ce qu'on en déduit:

- ▣ L'étude statistique du mode de désintégration observé va permettre de mesurer un paramètre théorique
- ▣ L'expérience permet
 - de confirmer un modèle théorique (ou l'infirmier !)
 - d'apporter des précisions sur des paramètres que les théoriciens ne savent pas calculer

2.2 – Les observables des particules

Identification : les candidats

- Les particules laissent des traces dans un détecteur
 - ▶ ... si elles vivent assez longtemps pour le traverser
- Le physicien a besoin de les identifier
 - ▶ par leurs “empreintes” laissées dans un milieu liquide ou gazeux (trajectographes)
 - ▶ et/ou par l'énergie déposée dans la matière dense (calorimètres)
- Liste des particules chargées à séparer

	Masses (GeV/c ²)	temps de vie (ct)
▶ e [±]	0.000511	stable
▶ μ [±]	0.106	658 m
▶ π [±]	0.140	7,8 m
▶ K [±]	0.494	3,7 m
▶ Protons	0.938	stable
▪ Liste des particules neutres à séparer		
▶ γ	0	stable
▶ π ⁰	0.135	25 nm
▶ K ⁰	0.498	2,5 cm / 15,3 m
▶ Hypérons Λ ⁰	1.116	7,9 cm
▶ neutrons	0.940	2,7.10 ¹¹ m
▶ neutrinos	~0	stable

2.2 – Les observables des particules

Que mesurer dans l'état final?

- Idéalement: TOUT ! c.à.d :
 - ▶ énergie et impulsion E/P
 - ▶ position (r,t)
 - ▶ pour toutes les particules produites dans la collision
- Mais, en pratique, on ne peut accéder qu'à:
 - ▶ particules chargées:
 - trajectoire
 - signe
 - impulsion
 - identification (e, μ , π , K, p)
 - ▶ photon:
 - position et énergie
 - par interaction électromagnétique dans la matière
 - calorimétrie
 - ▶ neutrinos:
 - impulsion
 - indirectement: par déduction = ce qui manque
 - ▶ neutrons:
 - énergie, position
 - interaction hadronique

2.2 – Les observables des particules

Interactions particules chargées, rayonnement / matière

- Toutes les particules « visibles » le sont par leur interaction avec la matière
 - ▶ 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

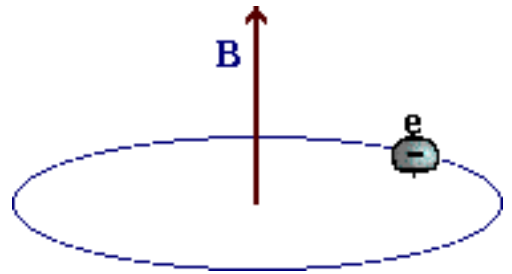
- **MAIS** in fine ce qui sera observé reste un signal **d'ionisation** ou **d'excitation** de la matière auquel le détecteur devra être sensible

2.2 – Les observables des particules

Charge électrique

■ Déviation dans un champ magnétique

- ▶ Une particule chargée, soumise à un champ magnétique, décrit un cercle si sa vitesse est perpendiculaire à B
- ▶ Le sens d'enroulement mesure le **signe de la charge**
- ▶ Le rayon de courbure mesure le **quantité de mouvement**



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

- ▶ Spirales caractéristiques de ralentissement, puis d'arrêt d'un électron et d'un positron



■ Particules neutres

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

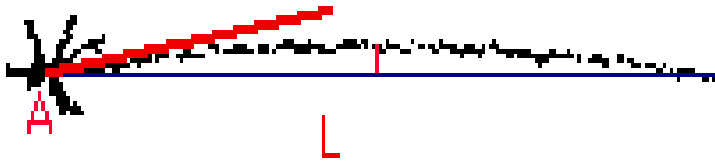
2.2 – Les observables des particules

Masse, quantité de mouvement et énergie

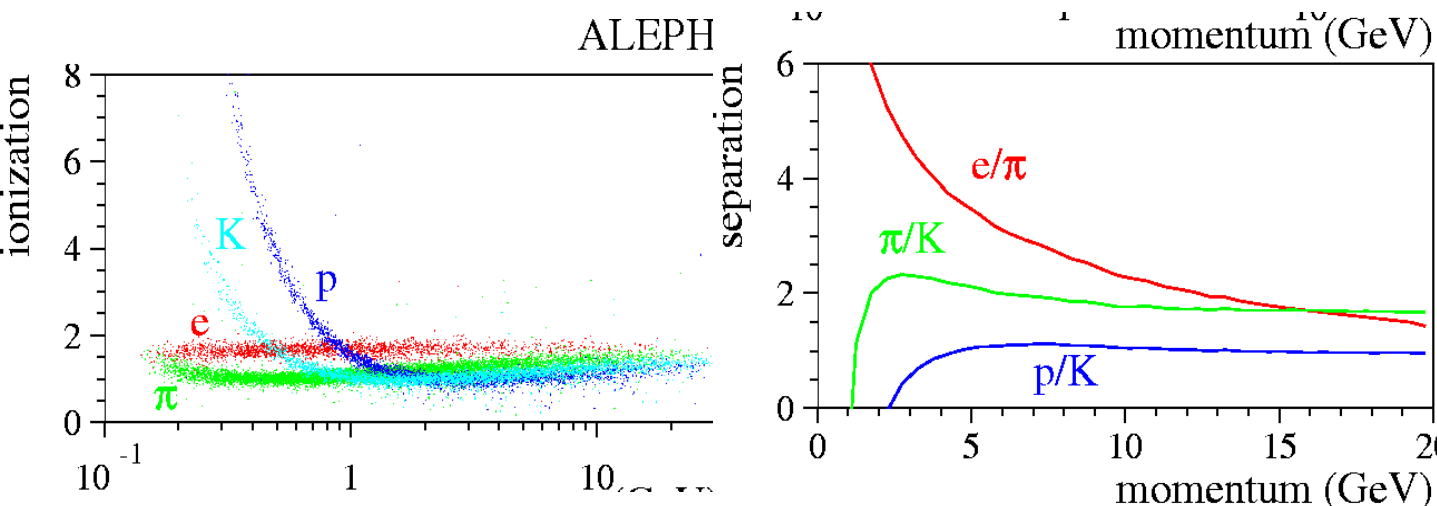
- La quantité de mouvement P d'une particule chargée se mesure à partir du rayon de courbure R de sa trajectoire (hélice) dans un champ magnétique

$$P \text{ (GeV/c)} = 0.3 \text{ B(Tesla)} R\text{(m)}$$

- La direction est celle de la tangente à la trajectoire au point de départ



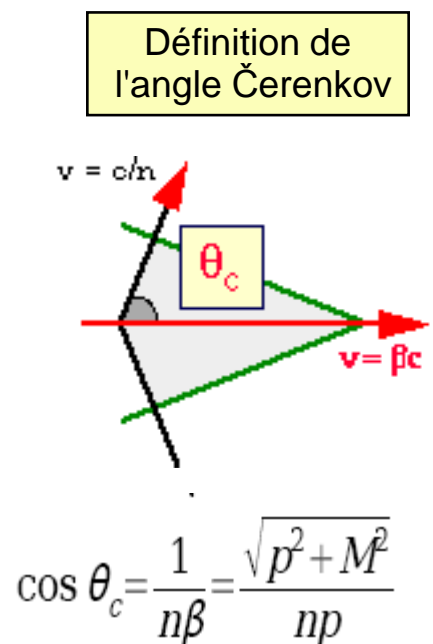
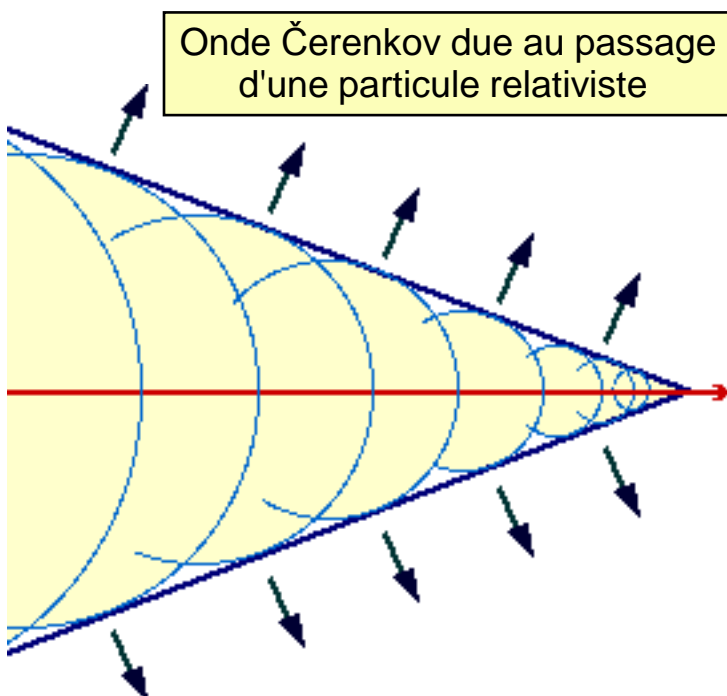
- Avec une mesure simultanée de la perte d'énergie par ionisation (appelée dE/dx)
- On peut estimer la masse de la particule
 - permet son identification



3.4 - Les fonctions des détecteurs

Identification : effet Čerenkov (1)

- A haute énergie, les particules vont presque à la vitesse de la lumière
 - ▶ Les mesures simultanées de v et de P sont peu précises pour mesurer M ($=P/\gamma v$)
- On peut utiliser **l'effet Čerenkov**
 - ▶ Phénomène d'onde de choc (semblable au mur du son) quand la particule de vitesse $v = \beta c$ va plus vite que la lumière dans le milieu d'indice n , $v = c/n$
 - ▶ Si elle va moins vite que la vitesse **seuil**, elle n'émet pas de lumière, ce qui permet de la distinguer aussi



3.4 - Les fonctions des détecteurs

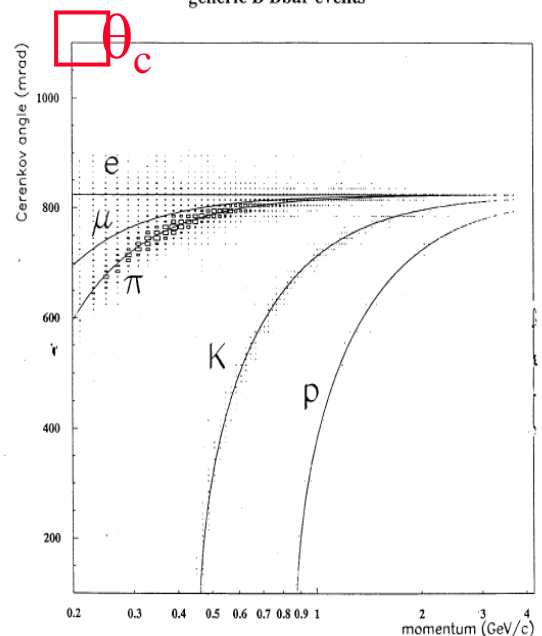
Identification : effet Čerenkov (2)

Combiné avec la mesure de l'impulsion, cela permet l'identification

- Exemple d'un milieu transparent **liquide ou solide** : $n = 1.4$

P(GeV)	$\theta_c (\pi)$	$\theta_c (K)$	$\theta_c (p)$
1.0	43°8	37°2	11°5
2.0	44°3	42°6	37°9
4.0	44°4	44°0	42°8

- Dans un liquide, angle d'ouverture θ_c important
- Séparation efficace à « basse énergie »
- Angle limite vers 4 GeV : séparation impossible



- Exemple d'un milieu transparent **gazeux** : $n = 1.001$

P(GeV)	$\theta_c (\pi)$	$\theta_c (K)$	$\theta_c (p)$
10.0	3°2	1°8	rien
20.0	3°3	3°1	2°0

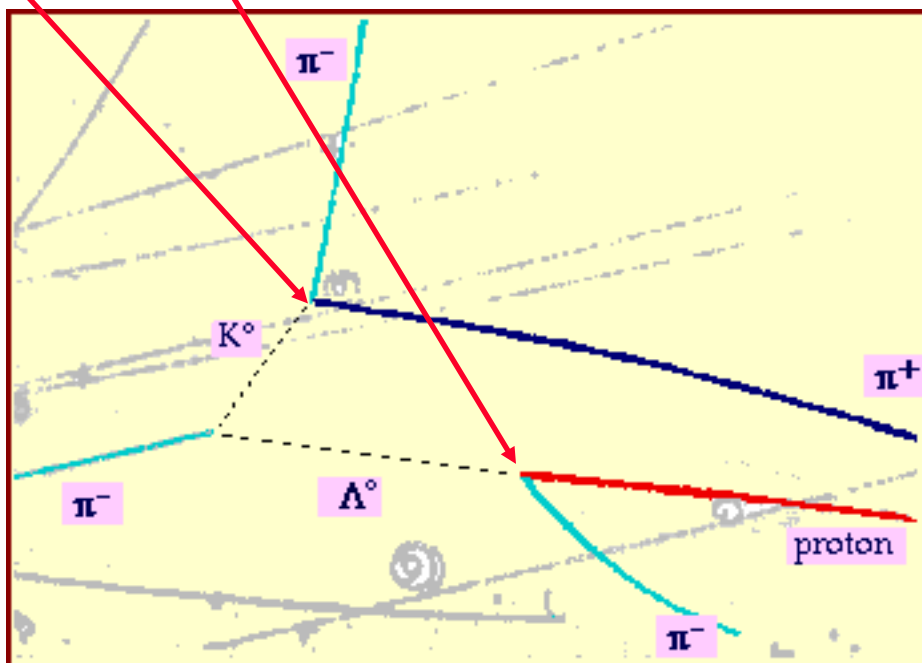
- Effet de seuil : pas de lumière Čerenkov au dessous d'une certaine impulsion (Ex. d'un proton de 10 GeV)
 - Au dessus, angle d'ouverture θ_c petit
- On **combine** des Čerenkov liquides et gazeux pour identifier dans un domaine étendu d'impulsion

2.2 – Les observables des particules

Produits de désintégrations

- Le mode de désintégration, quand on le voit, permet d'identifier une particule
- Exemples du K^0 et du Λ^0
 - ▶ Le K^0 "court" se désintègre
 - en $\pi^+\pi^-$ (66% des cas)
 - en $\pi^0\pi^0$ (33% des cas)
 - ▶ Le Λ^0 se désintègre dans
 - en $\text{proton}+\pi^-$ (66% des cas)
 - en $\text{neutron}+\pi^0$ (33% des cas)

Cliché de chambre à bulles montrant la désintégration d'un K^0 et d'un Λ^0 produits lors de l'interaction d'un méson π^- avec un proton cible de la chambre.



2.2 – Les observables des particules

Panorama des particules

MATIÈRE

ATOME

NOYAU

PROTON

LEPTONS

Peuvent se déplacer librement.

QUARKS

Prisonniers de particules plus grandes
ils ne sont pas observés individuellement.

<p>FERMIONS</p> <p>La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.</p> <hr/> <p>Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang.</p>	<p><i>Première Famille</i></p>	<p>électron</p> <p>Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.</p>	<p>neutrino électron</p> <p>Sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant.</p>	<p>bas (down)</p> <p>Sa charge électrique est -1/3. Le proton en contient un, le neutron deux.</p>	<p>haut (up)</p> <p>Sa charge électrique est +2/3. Le proton en contient deux, le neutron un.</p>
	<p><i>Deuxième Famille</i></p>	<p>muon</p> <p>Un compagnon plus massif de l'électron.</p>	<p>neutrino muon</p> <p>Propriétés similaires à celles du neutrino électron.</p>	<p>étrange (strange)</p> <p>Un compagnon plus lourd du "bas".</p>	<p>charme (charm)</p> <p>Un compagnon plus lourd du "haut".</p>
	<p><i>Troisième Famille</i></p>	<p>tau</p> <p>Encore plus lourd.</p>	<p>neutrino tau</p> <p>Propriétés similaires à celles du neutrino électron.</p>	<p>beauté (beauty)</p> <p>Encore plus lourd.</p>	<p>sommet (top)</p> <p>Le dernier quark observé (en 1994)</p>

BOSONS

Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.

<p>photon</p> <p>Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.</p>	<p>gluon</p> <p>Porteur de la force forte entre quarks.</p>	<p>bosons vecteurs</p> <p>Porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive.</p>	<p>Graviton</p> <p>Pas encore observé. Supposé véhiculer la force de gravité.</p>
--	--	---	--

ANTIMATIÈRE

A chaque particule-fermion correspond une antiparticule, espèce d'image miroir.

§ 2.3 - Observer les leptons

...les premières particules élémentaires observées

- Electrons
- Positrons
- Muons μ^- , μ^+
- Neutrinos

2.3 – Observer les leptons

L'électron

- L'électron, constituant de l'atome, intervient dans tous les phénomènes de la physique, de la chimie et de la vie courante
- C'est un corpuscule élémentaire porteur d'une charge électrique unité
 - ▶ Contrairement aux quarks, il se promène en liberté
 - ▶ Contrairement à son partenaire le neutrino, il interagit et se détecte aisément
 - Il dépose toute son énergie dans la matière rapidement

Masse et charge

$$q = -e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$M = mc^2 = 0.000511 \text{ GeV}$$

- 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 (ex le LEP du CERN, des paquets contenant des milliards d'électrons et de positrons se croisent en permanence).

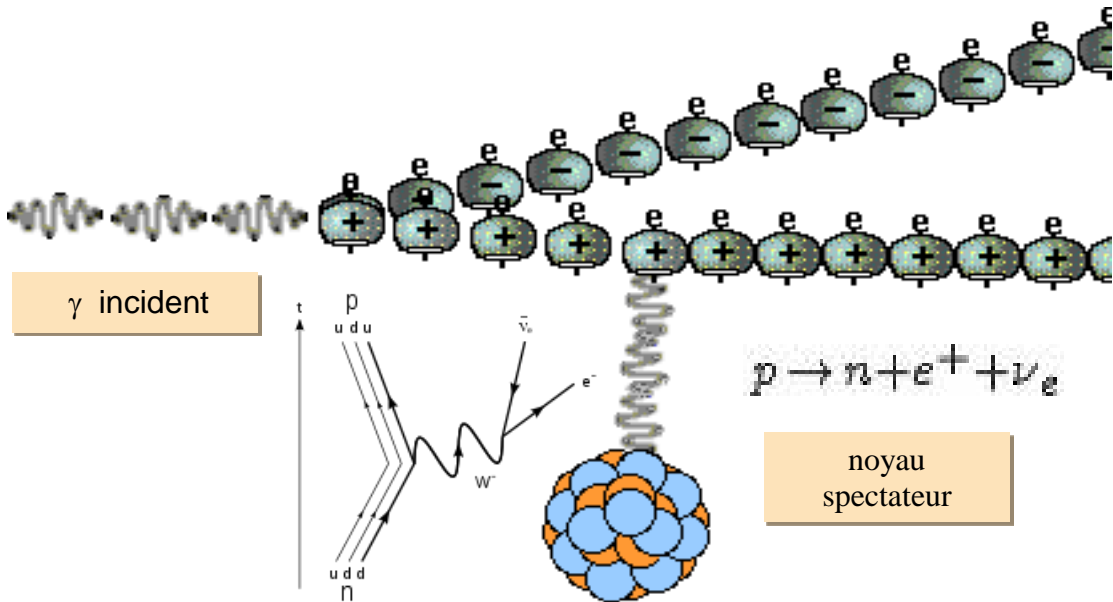
2.3 – Observer les leptons

Le positron

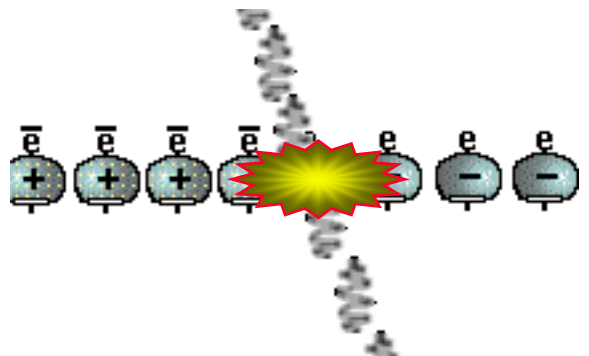
- Électron "positif", le positron est l'antiparticule de l'électron



- Il est créé lors de la matérialisation d'un gamma énergétique ou par radioactivité β^+



- 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.



2.3 – Observer les leptons

Les muons: μ^- et μ^+

- Un électron ou un positron massif

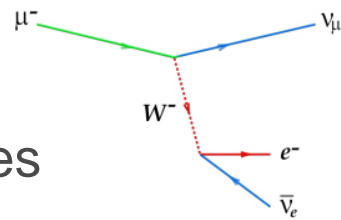


$$M_\mu = mc^2 = 0.106 \text{ GeV} = 200 \text{ M(électron)}$$

- Instable, mais ...presque stable...

- Le muon vit une éternité par rapport aux autres particules instables

$$\tau = 2.20 \cdot 10^{-6} \text{ s} , \quad c\tau = 659 \text{ m}$$

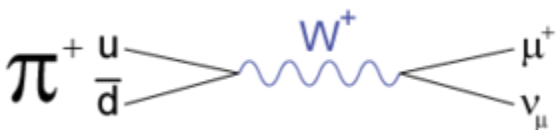


- Le muon parcourt facilement des kilomètres

$$\text{Parcours moyen en km} = \Gamma v \tau = 0.658 P (\text{GeV}/c) / 0.106$$

- source principale: désintégration pions π^- / π^+

- Les pions produits dans les gerbes cosmiques se transforment en muons et atteignent la surface terrestre



Désintégration d'un pion en muon et neutrino

Atmospheric neutrino source



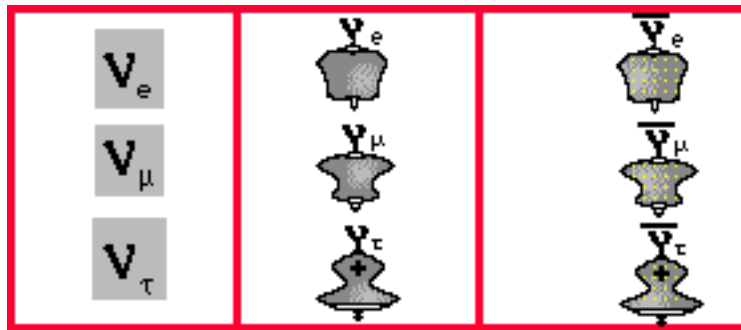
- Très pénétrant :

- 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

2.3 – Observer les leptons

Invisibles neutrinos

- Les neutrinos sont très différents des autres particules car ils interagissent très peu
 - ▶ Pas de charge électrique
 - ▶ Pas de charge de couleur
- Particules les plus énigmatiques (fantômes)
- Très difficiles à détecter



- Leurs masses sont extrêmement petites

$$M(\text{neutrino}-e) c^2 < 0.0000000002 \text{ GeV} = 2\text{eV}$$

- Ils vont à la vitesse de la lumière comme les photons
- Les neutrinos produits dans une collision apparaissent comme des **particules manquantes**
- Les accélérateurs, les réacteurs, le soleil sont des sources de neutrinos

2.3 – Observer les leptons

Le neutrino-électron



- La source naturelle principale est la radioactivité bêta-moins

► Dans un noyau trop riche en neutrons :

Réacteurs



- Ces neutrinos sont en réalité des antineutrinos-e
- Dans le soleil certaines réactions nucléaires produisent des neutrinos-e



Soleil



- Ces neutrinos qui nous traversent en permanence sont « mous » et interagissent très peu
 - 65 milliards par cm^2 nous traversent chaque seconde !
- D'autres neutrinos plus énergiques proviennent de gerbes cosmiques, ou sont produits par des accélérateurs

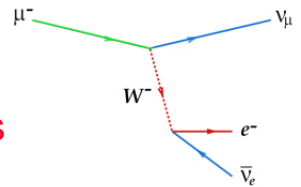
2.3 – Observer les leptons

Le neutrino - mu



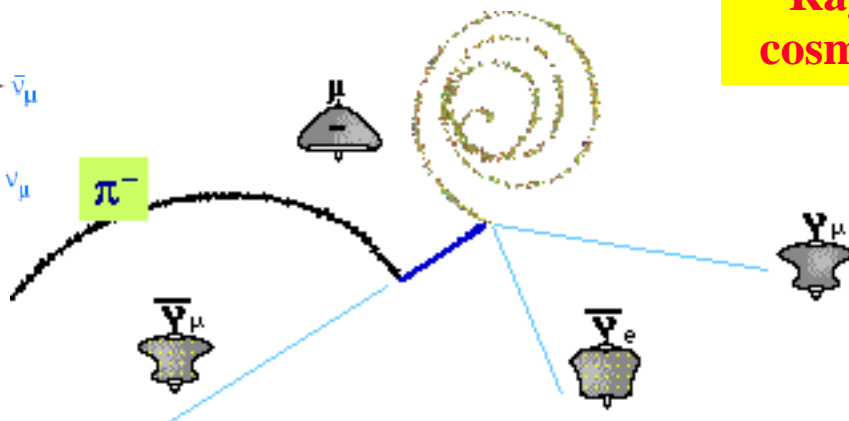
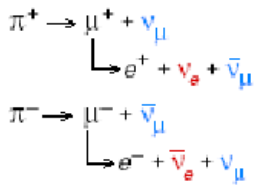
- Le Neutrino-mu diffère du neutrino-e par la naissance et les réactions qu'il induit

- le **neutrino-mu** ne peut produire que des mu **négatifs**
- l'**antineutrino-mu** ne peut produire que des mu **positifs**



- La cascade de désintégrations d'un π^- fournit un antineutrino-mu, puis un neutrino-mu et un antineutrino-e

Atmospheric neutrino source



Désintégration en cascade d'un méson π^- en μ^- qui se désintègre à son tour en électron

- Chaque fois que des pions sont produits (accélérateurs, rayons cosmiques) des neutrinos-mu sont produits
 - Ils sont en général énergiques

§ 2.4 - Observer les hadrons

...ces assemblages de quarks et de gluons et leur grande diversité

- Chromodynamique quantique
- Protons (uud), antiprotons, neutrons (udd)
- Pions et kaons chargés (mésons ud et us)
- Pions et kaons neutres (mésons uu, dd, ds)
- Hypérons (baryons étranges)
- Hadrons charmés
- Hadrons beaux

2.4 – Observer les hadrons

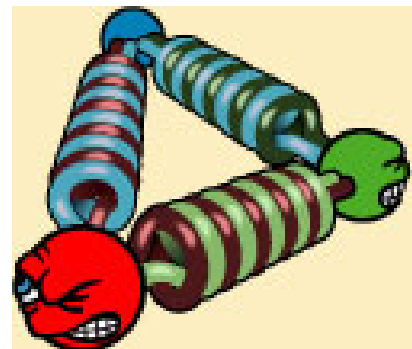
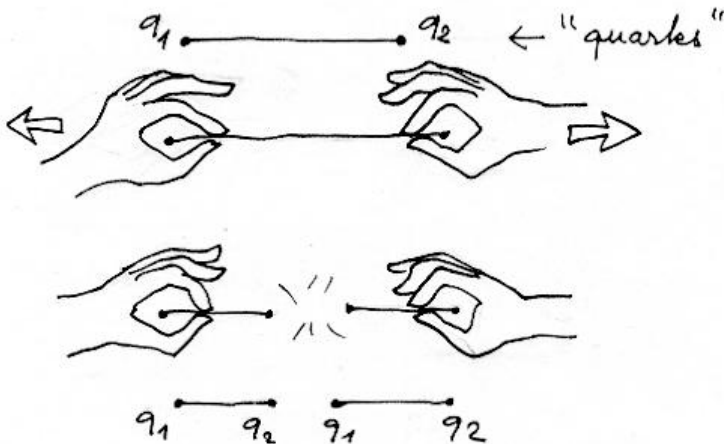
La chromodynamique quantique

- Les quarks sont sensibles à l'interaction forte, véhiculée par les gluons (charge de couleur)
- **Chromodynamique quantique** (QCD)
- Interaction bizarre : plus les quarks sont éloignés, plus leur interaction est forte!
- **Liberté asymptotique** : à la limite de l'infiniment proche, ils n'interagissent plus du tout



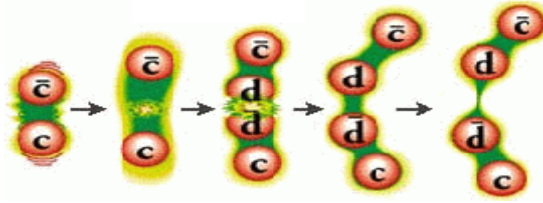
D. Gross, H. Politzer
et F. Wilczek
Prix Nobel 2004

- **Confinement** des quarks à l'intérieur des hadrons : les quarks ne peuvent pas être libres

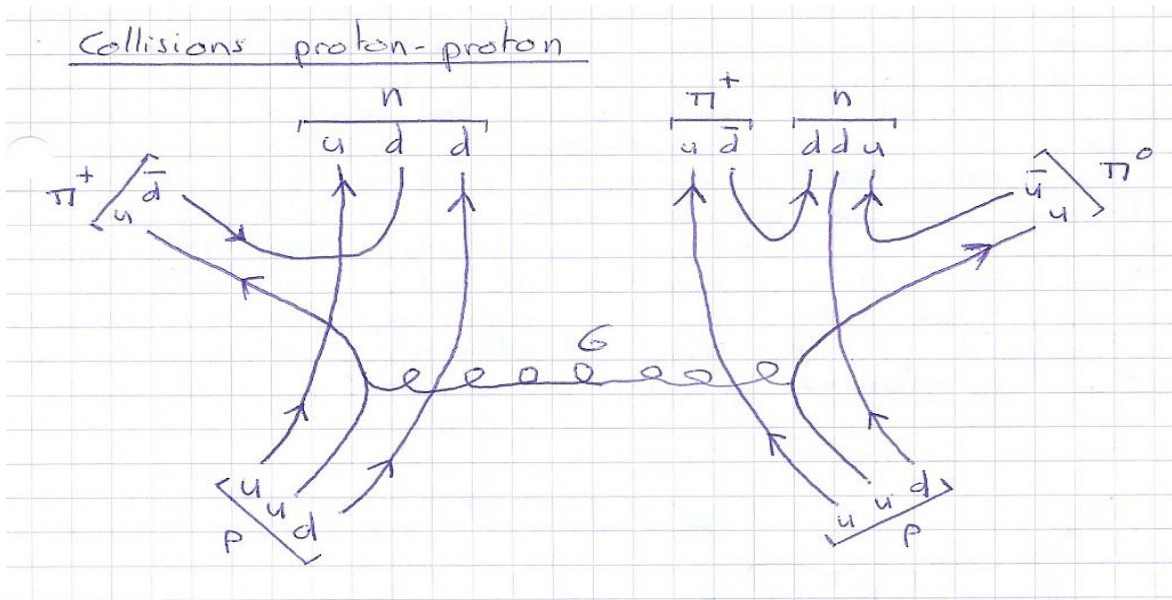


2.4 – Observer les hadrons

Assemblages quarks/antiquarks/gluons



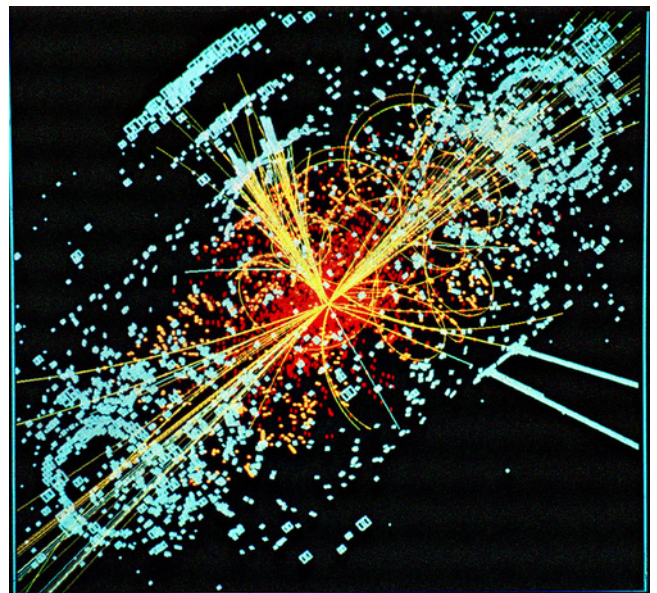
- Lors d'une violente collision, il arrive qu'un quark soit éjecté
- Il subit alors un rappel extrêmement fort
 - Il ne va pas sortir seul du volume où il était confiné
- Un gluon qui s'échange se matérialise en chemin en un quark et son anti-quark
 - ▶ Le nouveau quark se recombine avec les anciens quarks, pour former ici un nouveau **baryon**
 - ▶ Le nouvel anti-quark se marie avec le quark éjecté, pour former un **méson**
- Hyperactifs, les quarks trouvent toujours un partenaire et ne restent pas célibataires : ils forment des **hadrons**



2.4 – Observer les hadrons

Les « jets » ou le sillage des quarks

- Quand l'énergie disponible est très grande, le phénomène se répète
- On observe des **jets de particules**, sillages d'un quark ou d'un gluon émis au départ avec une grande énergie
 - ▶ En général, la particule emportant le plus d'énergie contient le quark ou l'anti-quark initial
 - ▶ On parle de phénomène d' « **hadronisation** »



2.4 – Observer les hadrons

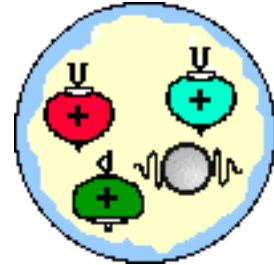
Le proton (uud)

- Stable et lourd par rapport aux mésons

$$q = e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 1.672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$M = mc^2 = \mathbf{0.9383 \text{ GeV}}$$



- 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 Cerenkov

- ▶ A impulsion égale, les protons sont plus lents que les particules plus légères.
- ▶ S'ils vont moins vite que la lumière dans le milieu traversé, ils n'émettent pas de lumière Cerenkov
- ▶ S'ils vont plus vite, ils émettent des photons Cerenkov, mais peuvent facilement être séparés des pions, plus difficilement des kaons

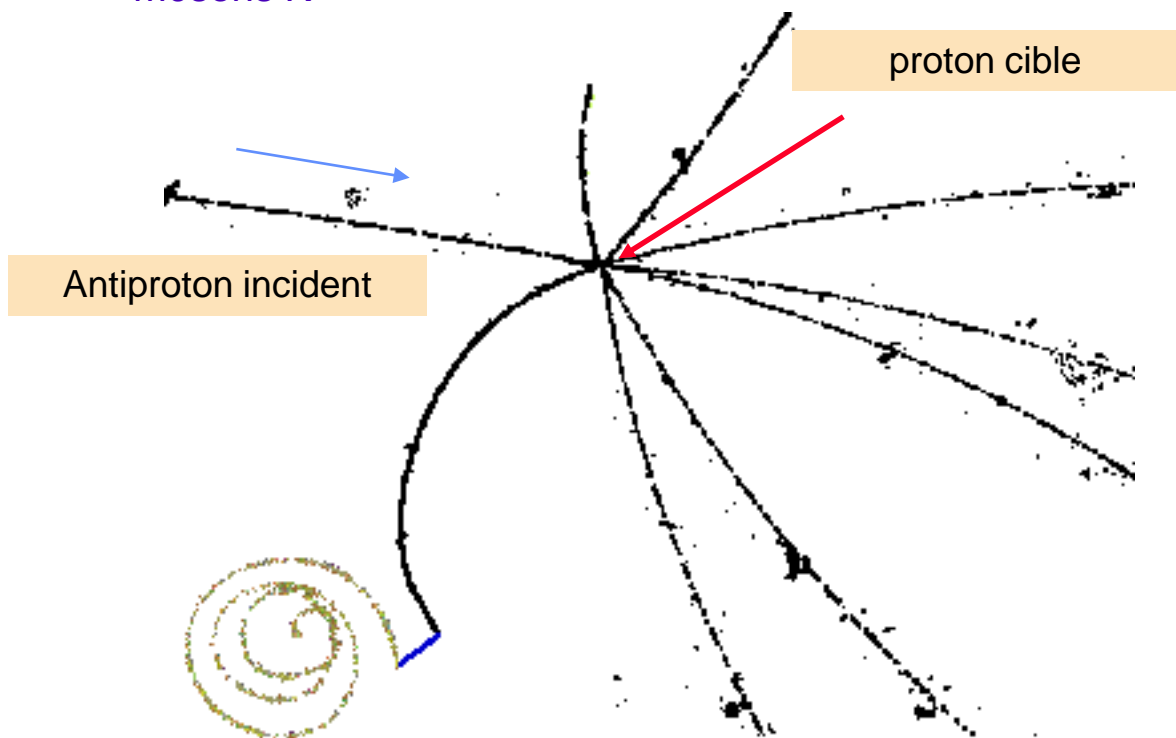
2.4 – Observer les hadrons

L'antiproton

- L'antiproton est en tous points semblable au proton...

$$M = mc^2 = 0.938 \text{ GeV}$$

- ... mais sa charge est négative
- 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



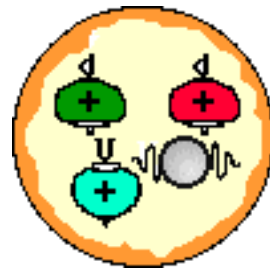
Exemple d'une annihilation produisant 8 mésons chargés

2.4 – Observer les hadrons

Le neutron (udd)

- Le neutron, électriquement neutre, est difficile à détecter
- Sa masse est légèrement supérieure à celle du proton

$$q = 0$$
$$M = mc^2 = \mathbf{0.940 \text{ GeV}}$$

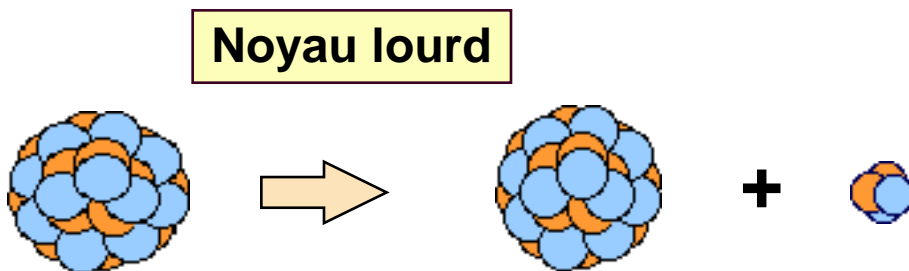


- Il est légèrement instable à l'état libre
 - ▶ Il vit environ 15 minutes. Un Matusalem comparé aux autres particules !
- On le détecte quand il communique une partie de son énergie à des particules chargées
 - ▶ Il ralentit en rebondissant sur des noyaux
 - ▶ En physique nucléaire, on mesure l'énergie 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

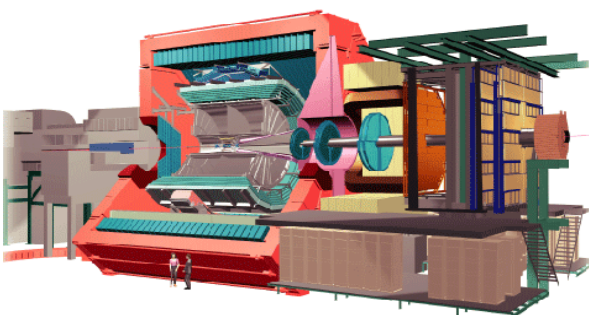
2.4 – Observer les hadrons

Particules alpha et noyaux

- Les particules α des sources radioactives ont été identifiées à des noyaux d'hélium
 - ▶ Ils comprennent deux protons et deux neutrons
 - ▶ Cet assemblage est particulièrement stable
- Quand un noyau lourd possède trop de nucléons, il se débarrasse de l'excédent en expulsant un groupe de 4 nucléons, une particule α



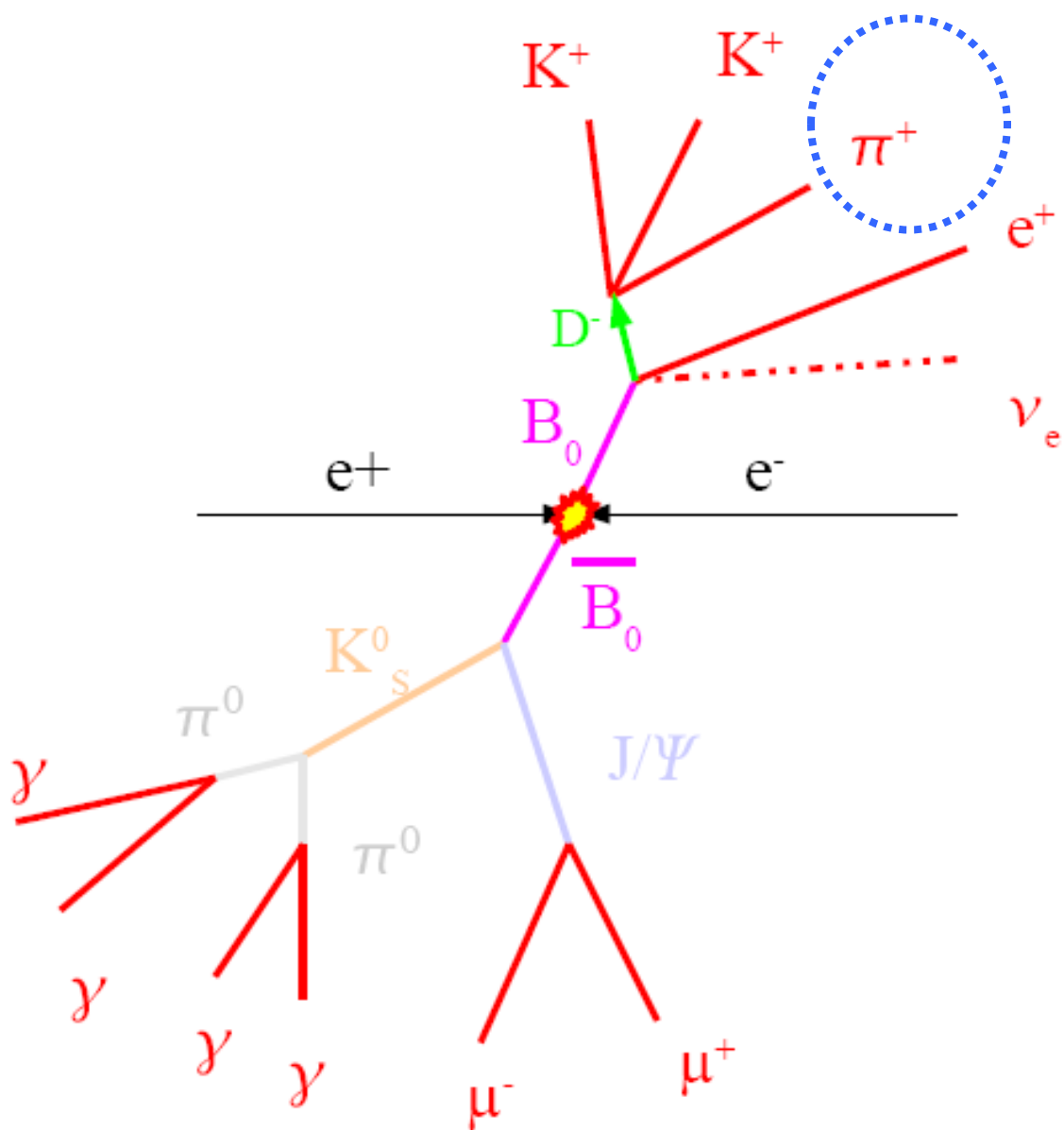
- Les noyaux commencent à être utilisés dans des collisionneurs
 - ▶ Un des buts des collisions noyau-noyau est d'étudier la matière nucléaire à haute température et forte pression
 - ▶ Le problème est d'éplucher les atomes de leurs électrons avant de les accélérer



Pour l'expérience ALICE, le LHC fera entrer en collision des ions plomb afin de recréer en laboratoire les conditions qui régnaient juste après le Big Bang.

2.4 – Observer les hadrons

Le pion chargé ou méson $\pi^{+/-}$ (ud)



2.4 – Observer les hadrons

Le pion chargé ou méson $\pi^{+/-}$ (ud)

- Assemblage d'un quark u et d'un anti-quark d



- Énergie de masse

- Le septième de celle d'un proton : le pion est économique à produire

$$M = mc^2 = 0.140 \text{ GeV}$$

- Vie moyenne

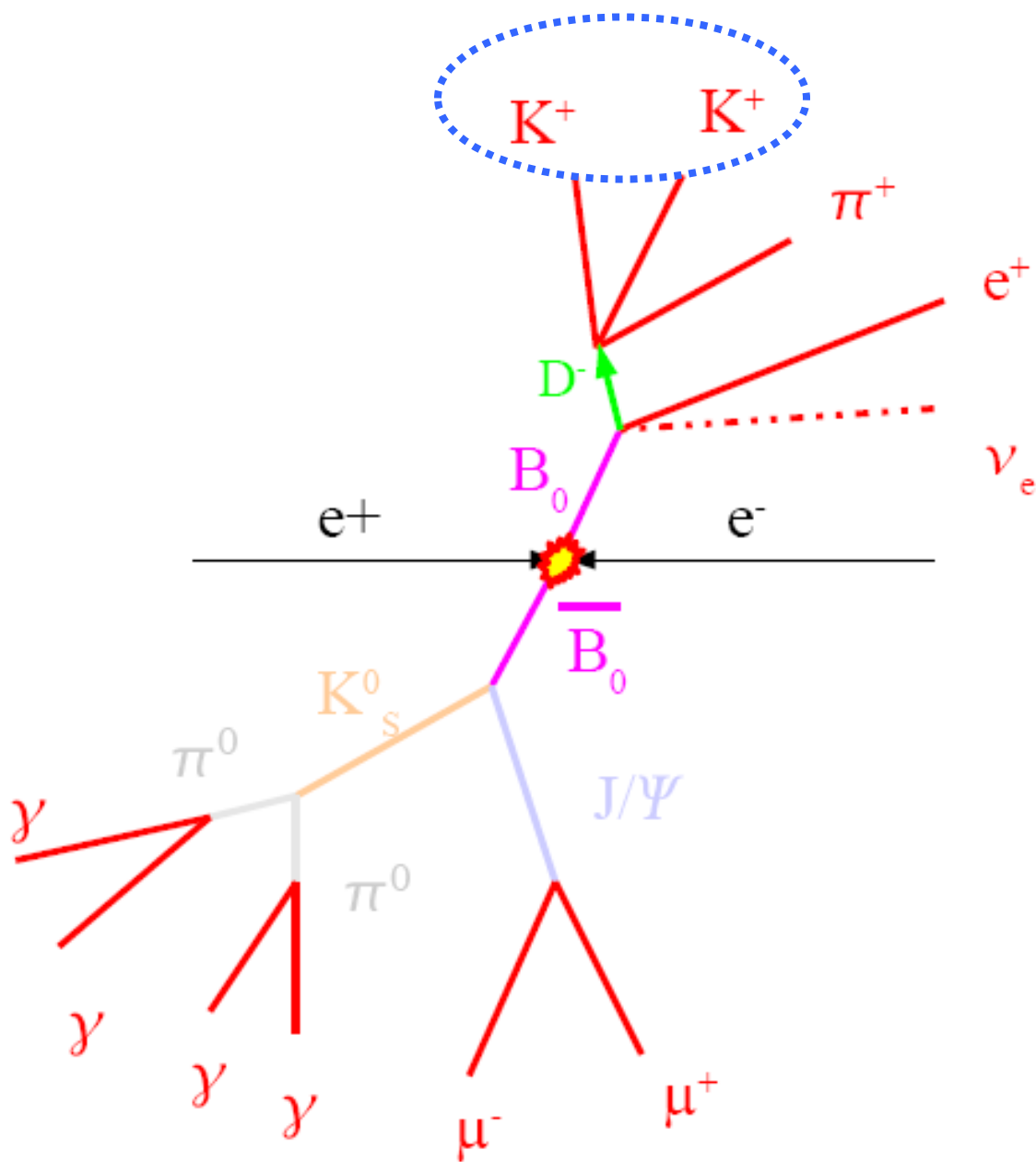
$$\tau = 2.60 \cdot 10^{-8} \text{ s} \quad \text{et} \quad c\tau = 7.8 \text{ m}$$

- Parcours moyen

$$\text{Parcours moyen en cm} = 708 P (\text{GeV}/c) / 0.140$$

2.4 – Observer les hadrons

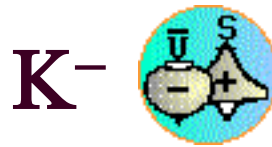
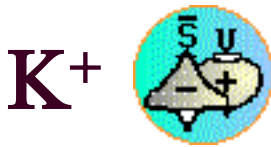
Le kaon chargé ou méson $K^{+/-}$ (us)



2.4 – Observer les hadrons

Le kaon chargé ou méson $K^{+/-}$ (us)

- Un quark d remplacé par un quark étrange s



- Énergie de masse

► La moitié de celle d'un proton : le kaon est plus rare que le pion

$$M = mc^2 = 0.494 \text{ GeV}$$

- Vie moyenne

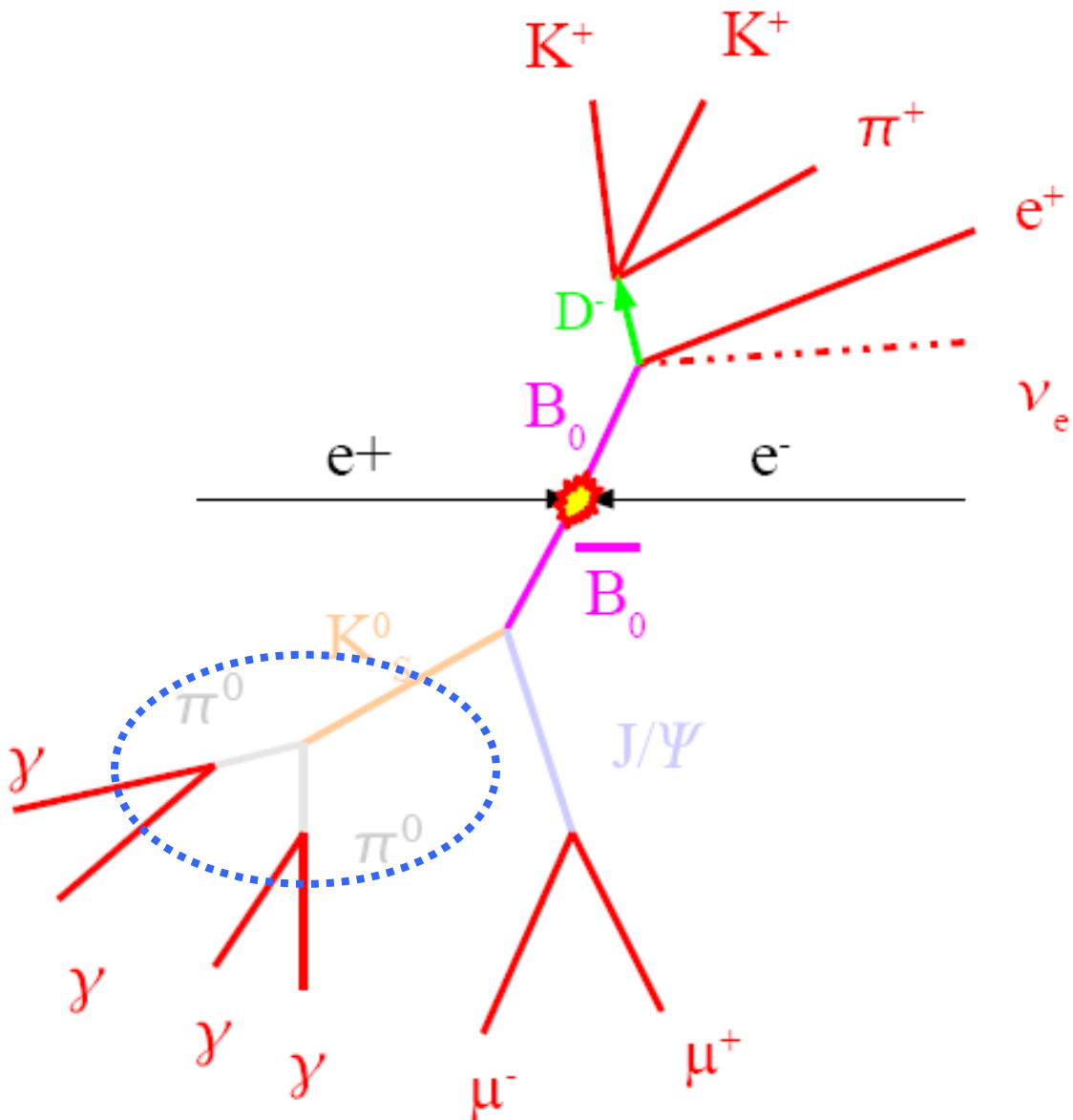
$$\tau = 1.23 \cdot 10^{-8} \text{ s} \quad \text{et} \quad c\tau = 3.7 \text{ m}$$

- Parcours moyen

$$\text{Parcours moyen en cm} = 371 P (\text{GeV}/c) / 0.494$$

2.4 – Observer les hadrons

Le pion neutre ou méson π^0



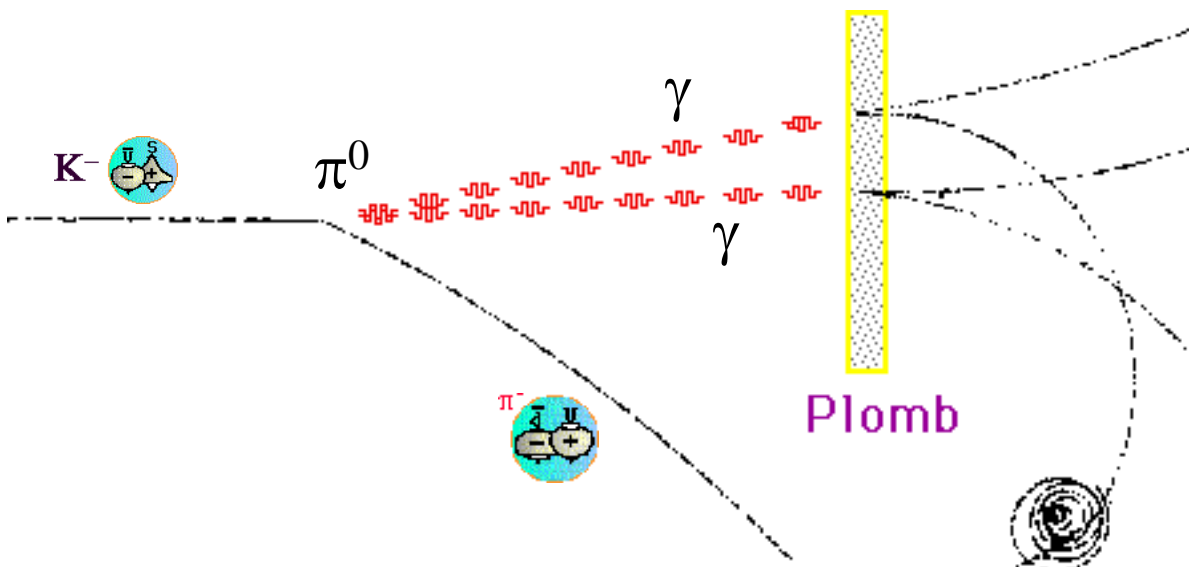
2.4 – Observer les hadrons

Le pion neutre ou méson π^0

- Assemblage uu et dd
- Durée de vie très courte : il se désintègre sur place
 - ▶ Durée de vie $8 \cdot 10^{-17}$ s

$$c\tau = 0.025 \mu\text{m} = 25 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$
$$M = mc^2 = 0.135 \text{ GeV}$$

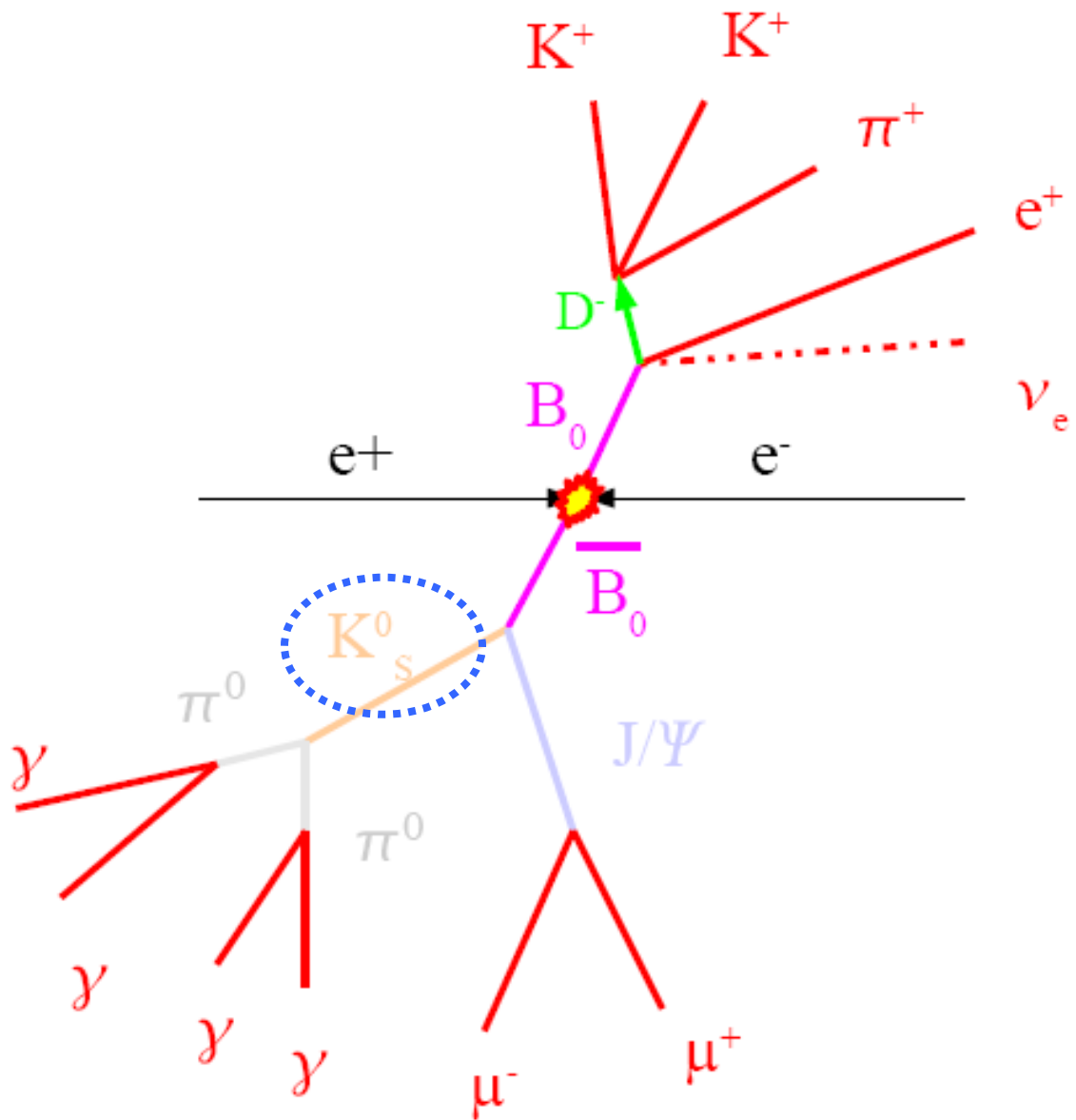
- Source principale de gamma
 - ▶ Pratiquement 100 % des désintégrations en



Exemple de la désintégration d'un π^0 produit lors de la désintégration d'un K^- en $\pi^- \pi^0$. Les deux photons se matérialisent à la traversée d'une plaque de plomb.

2.4 – Observer les hadrons

Le kaon neutre ou méson K^0



2.4 – Observer les hadrons

Le kaon neutre ou méson K^0

- Assemblage $d\bar{s}$ pour le K^0 et $\bar{d}s$ pour l'anti- K^0

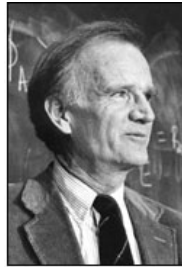


- Masse voisine de celle du K chargé $M = 0.498 \text{ GeV}$
- Ces deux particules sont intéressantes pour les physiciens. Elles se transforment l'une dans l'autre avant de se désintégrer en deux ou trois mésons π .

► Découvertes de la violation de CP en 1964



James Cronin



Val Fitch

Prix Nobel 1980
James Cronin and
Val Fitch

- La désintégration en 2 mésons π est rapide;

$$\tau = 0.89 \cdot 10^{-10} \text{ s et } c\tau = 2.7 \text{ cm}$$

- La désintégration en 3 mésons π est lente :

$$\tau = 5.17 \cdot 10^{-8} \text{ s et } c\tau = 1550 \text{ cm}$$

- Les parcours des K^0 sont très différents: ils sont dits «courts» ou «longs»

$$\text{Parcours moyen en cm} = 2.67 P (\text{GeV}/c) / 0.498$$

$$\text{Parcours moyen en cm} = 1550 P (\text{GeV}/c) / 0.498$$

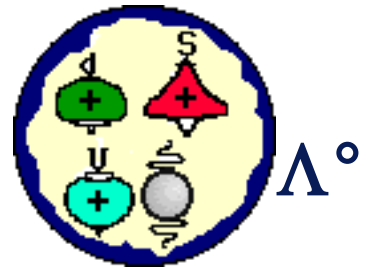
2.4 – Observer les hadrons

Les hyperons

- Assemblages de trois quarks (baryons) contenant un ou plusieurs quarks étranges (s)

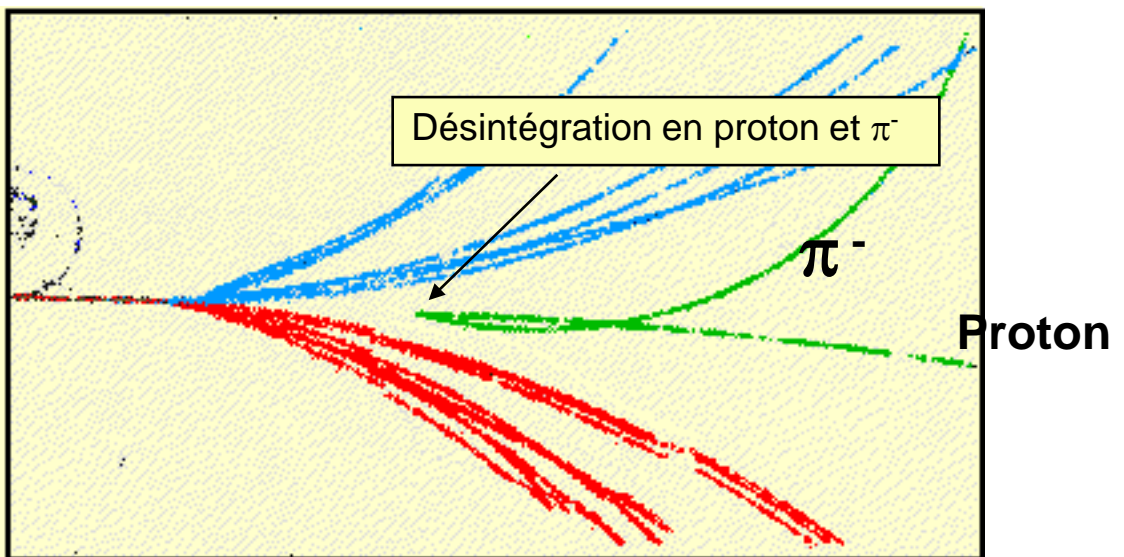
- Exemple du Λ° ou Lambda

- ▶ Un quark up
- ▶ Un quark down
- ▶ Un quark étrange



- Le Λ° est neutre et plus lourd qu'un proton

$$M = mc^2 = 1.12 \text{ GeV}$$



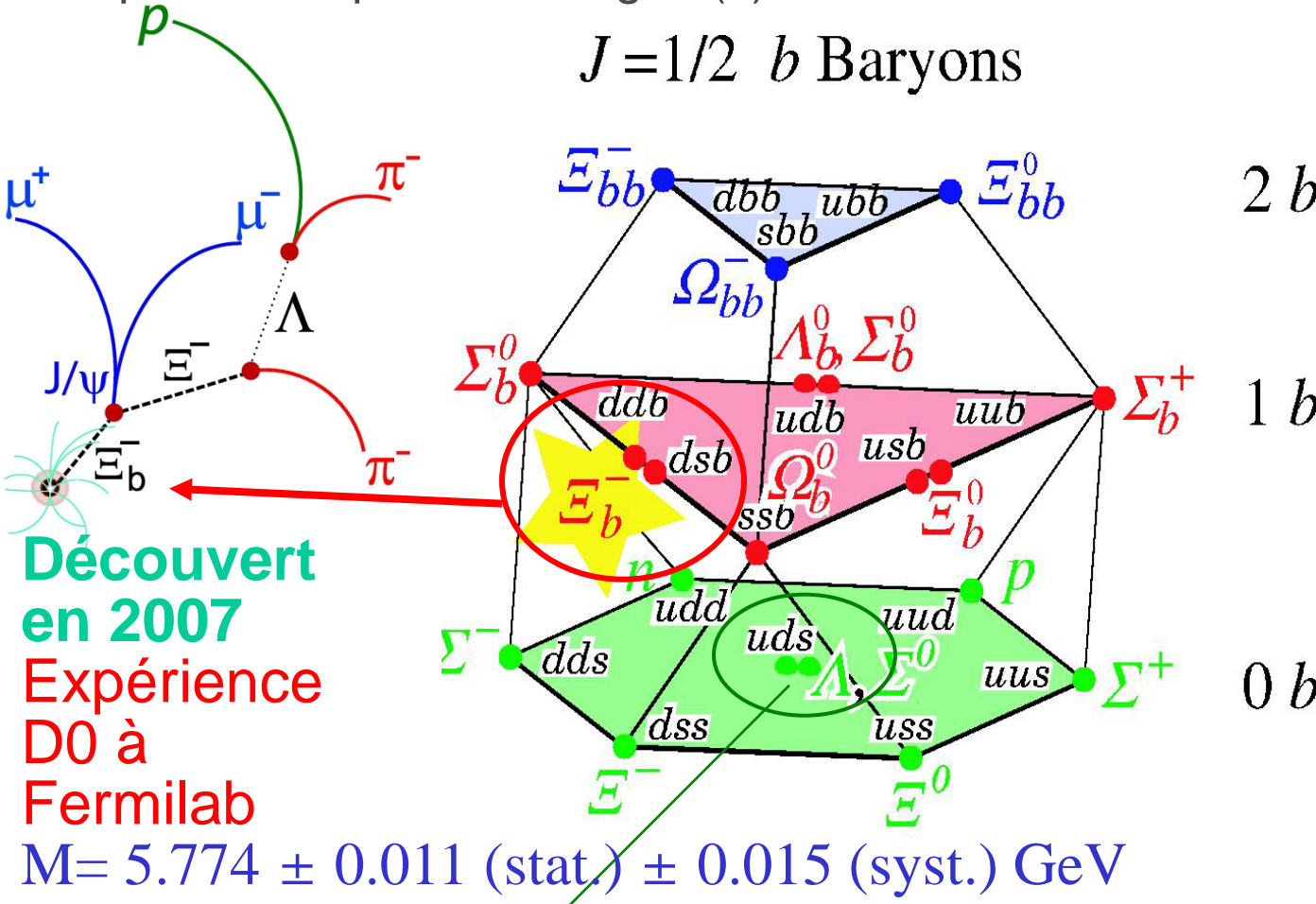
$$\tau = 2.63 \cdot 10^{-10} \text{ s et } c\tau = 7.89 \text{ cm}$$

2.4 – Observer les hadrons

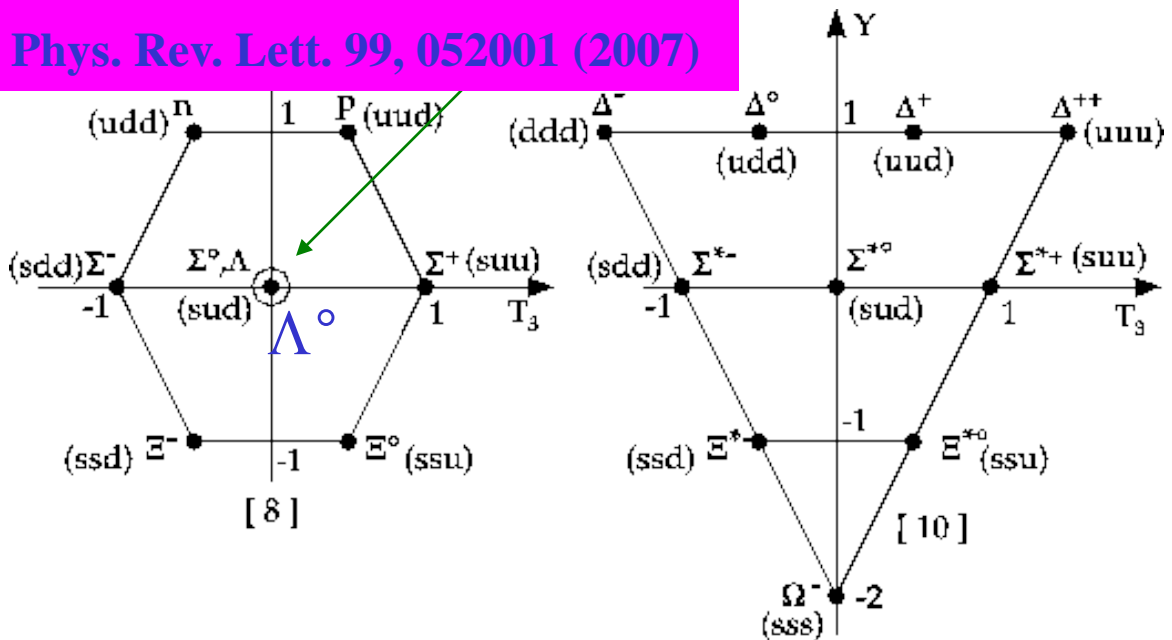
Les hyperons

- Assemblages de trois quarks (baryons) contenant un ou plusieurs quarks étranges (s)

$J=1/2$ b Baryons

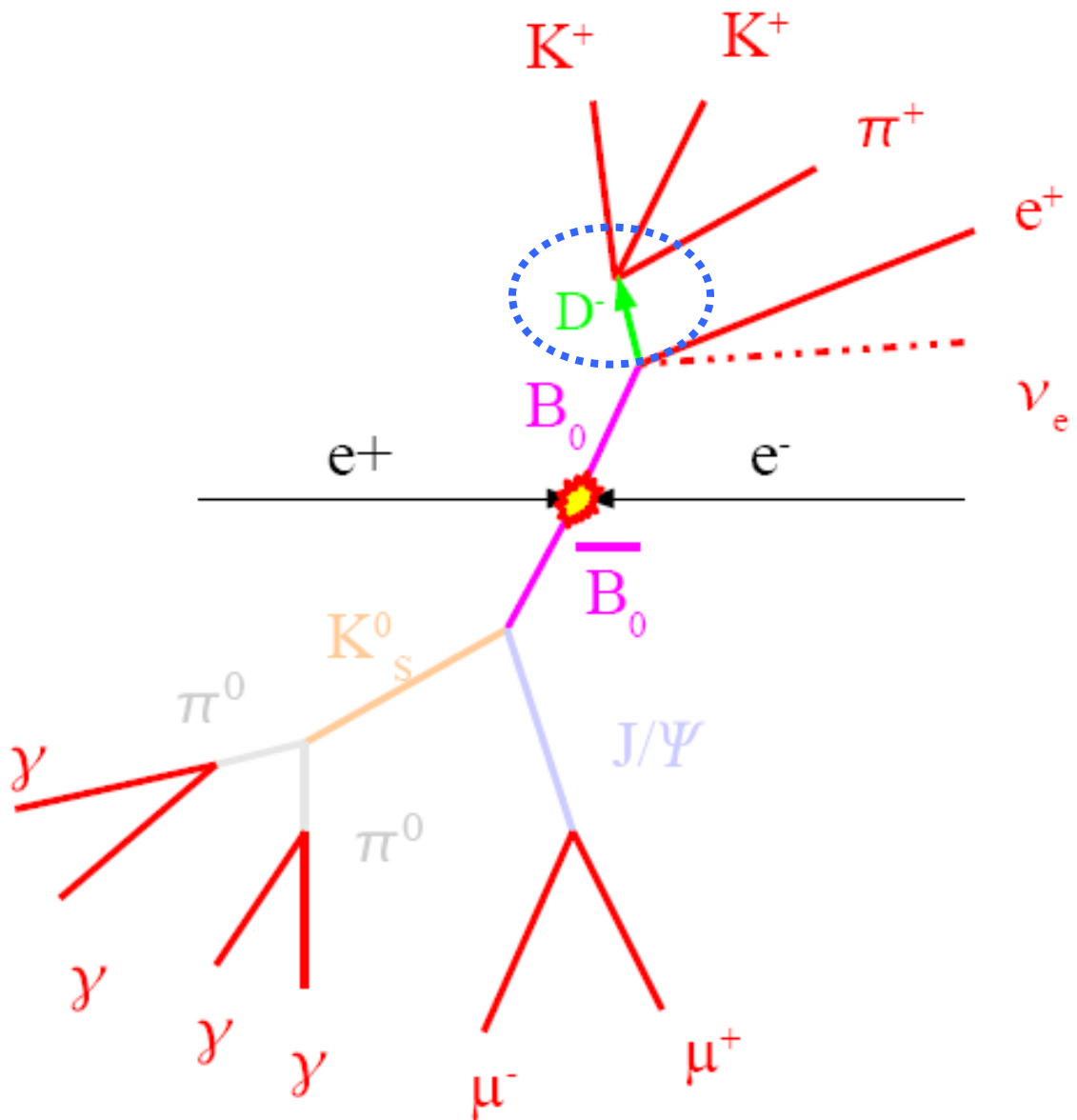


Phys. Rev. Lett. 99, 052001 (2007)



2.4 – Observer les hadrons

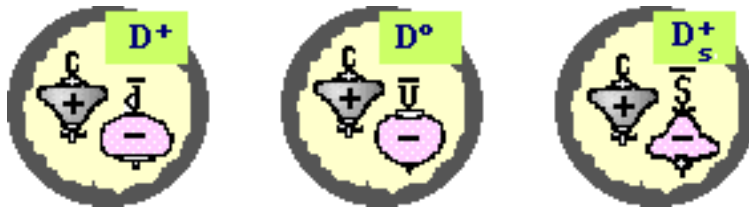
Les hadrons « charmés »



2.4 – Observer les hadrons

Les hadrons « charmés »

- Mésons et baryons contenant un quark ou antiquark **c** dit «charmé» :



- ▶ Exemple des 3 mésons où le quark **c** est associé avec un anti-quark up, down ou étrange
- Temps de vie courts : de l'ordre de la picoseconde ou fraction de picoseconde
 - ▶ Détecteurs très précis pour mesurer de courts parcours

Parcours moyen en mm = $0.12 \text{ à } 0.30 \frac{P(\text{GeV}/c)}{M}$

- ▶ Désintégration en cascade: $c \Rightarrow s$: recherche de kaons

- Masse: environ 1.5 GeV

- ▶ Coûteux à produire

- Vertex secondaires

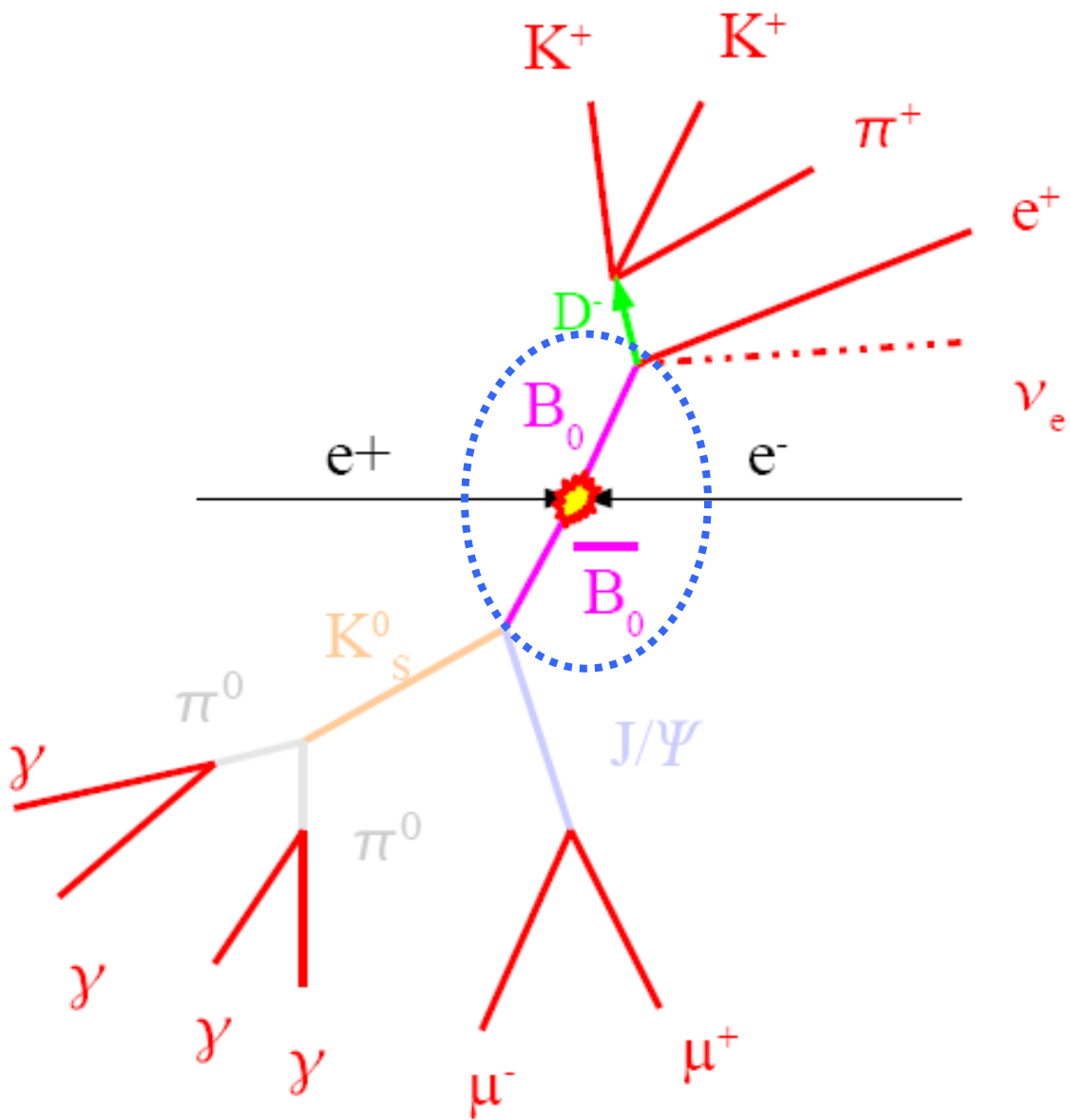
- ▶ Nombreux modes de désintégrations après un parcours de l'ordre du mm
- ▶ On détecte de 0 à 4 particules chargées

Parcours et désintégration d'un hadron charmé



2.4 – Observer les hadrons

Les hadrons « beaux »



2.4 – Observer les hadrons

Les hadrons « beaux »

- Mésons et baryons contenant un quark ou antiquark **b** dit de « beauté » :

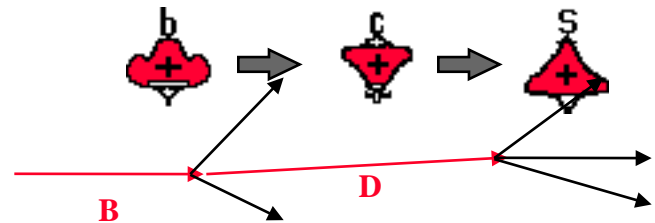


- ▶ Exemple des 3 mésons où le quark **b** est associé avec un anti-quark up, down ou étrange
- Temps de vie courts : de l'ordre de la picoseconde
 - ▶ Détecteurs très précis pour mesurer de courts parcours

Parcours moyen en mm = $0.45 P(\text{GeV}/c)/M$

- ▶ Désintégration en cascade: $b \Rightarrow c \Rightarrow s$

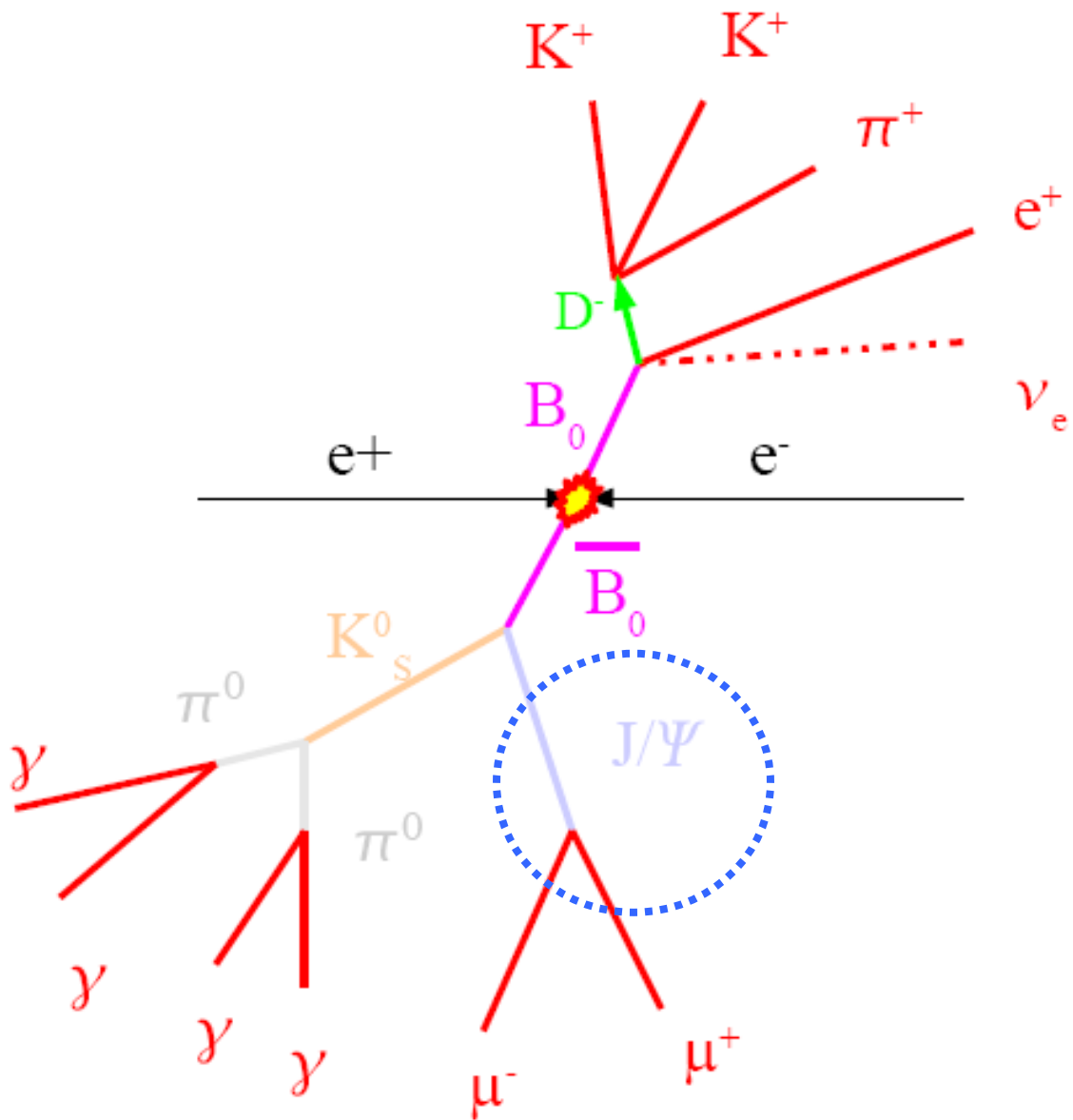
Parcours et désintégration d'un hadron **b** qui donne un hadron charmé



- Masse: environ 5 GeV
 - ▶ Coûteux à produire
- Vertex secondaires et tertiaires
- 20 % des désintégrations produisent directement un muon ou un électron
 - ▶ La « signature » de muons est très utilisée

2.4 – Observer les hadrons

L'exemple du J/psi

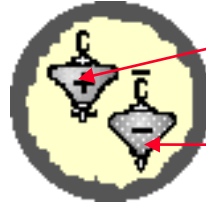


2.4 – Observer les hadrons

L'exemple du J/psi

- ... du charme dans l'air
 - ▶ Un quark et un antiquark charmé y sont cachés

$$Q = 2e/3 - 2e/3 = 0$$



quark charmé

antiquark charmé

- Le J/psi est produit en abondance dans des machines e^+e^- d'énergie 3.1 GeV.
 - ▶ Sa découverte en 1974 fut un « tremblement de terre » et assura le triomphe de la théorie des quarks
 - ▶ Sam Ting l'observa à Fermilab et Burt Richter à Stanford

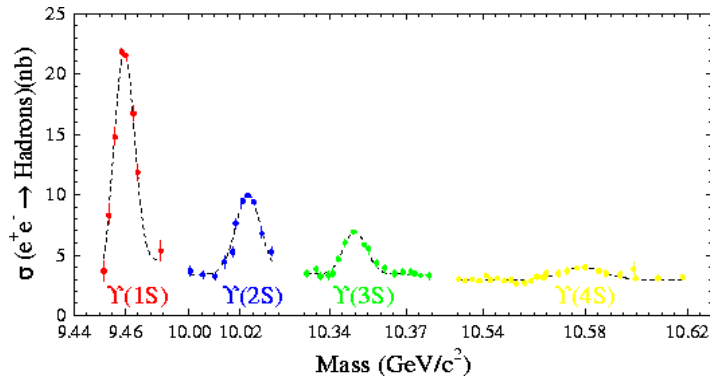


**The Nobel Prize in
Physics 1976**

- Pourquoi le J/psi : en 1974,...
 - ▶ Ting l'appela **J** et Richter **Psi** . L'appellation J/psi ne faisait pas de jaloux....
- Un méson anormalement lourd : 3.1 GeV
 - ▶ NB : Les masses des mésons formés de quarks légers ne dépassent pas 2 GeV
- Dans 6% des cas, il se désintègre en paire de muons
 - ▶ Une particule bien reconnaissable, témoin de la présence de quarks c et qui intéresse souvent les physiciens

2.4 – Observer les hadrons

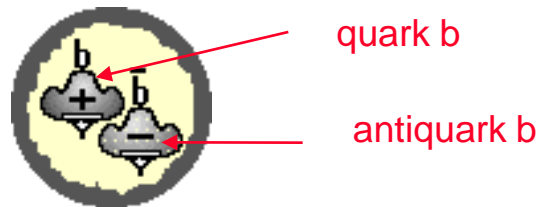
L'exemple du Upsilon(4S)



■ ... de la beauté dans l'air

- ▶ Un quark et un antiquark b y sont cachés

$$Q = -e/3 + e/3 = 0$$



■ Produit en abondance dans une machine e^+e^-

- ▶ Énergie de collision 10.6 GeV = masse du $\Upsilon(4S)$

■ Désintégration en paires de mésons B

- ▶ 50 % B^+B^- et $B^0B^0_{\text{bar}}$

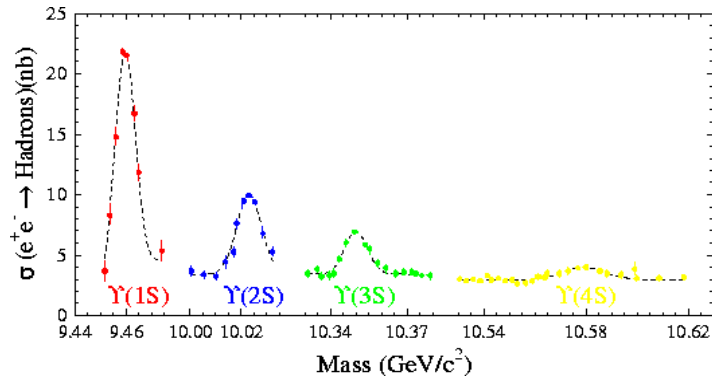


■ Le Upsilon(4S) est utilisé en usine à mésons B

- ▶ Spécialité autrefois de CLEO à Cornell (USA) et ensuite de BABAR à Stanford et BELLE à KEK (Japon)

2.4 – Observer les hadrons

Résonances



- Un grand nombre de pseudo-particules se désintègrent extrêmement rapidement par interaction forte : quelques 10^{-23} s

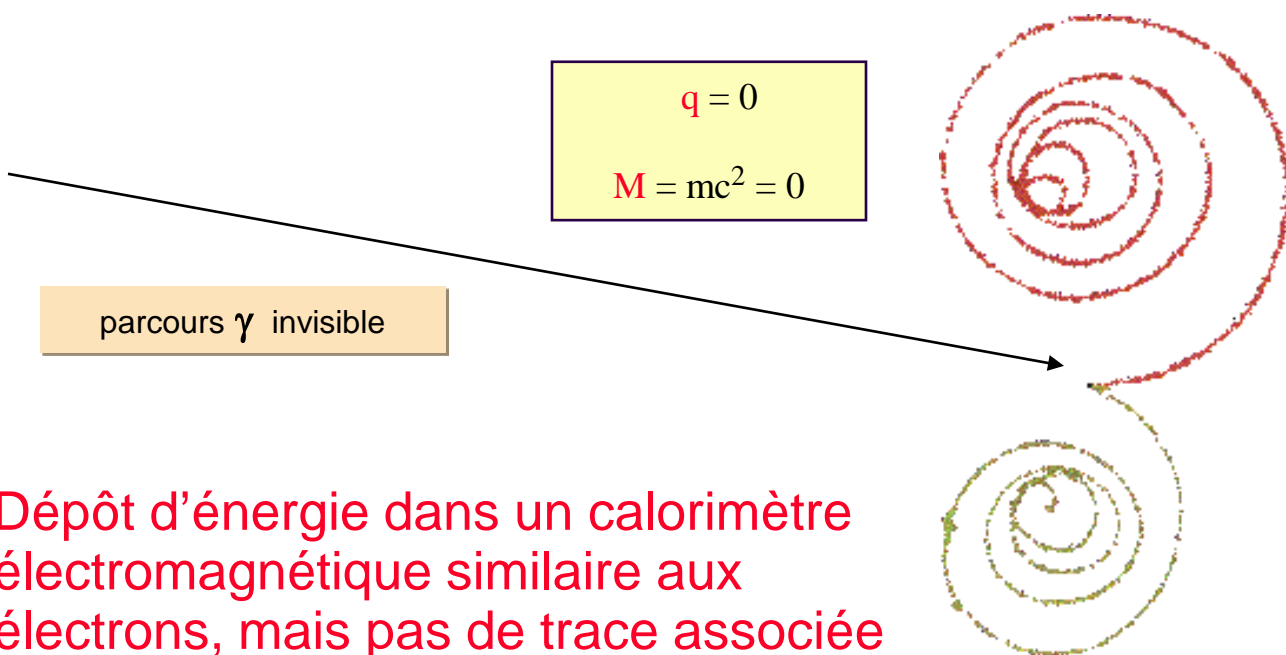
$$c\tau = \text{quelques fm} \quad (10^{-15} \text{ m})$$

- ▶ Elles correspondent à des états excités des mésons et des baryons
- ▶ Les parcours sont de l'ordre des dimensions d'un noyau
- Elles sont appelées **résonances**
 - ▶ Les temps de vie sont si courts que les résonances ont à peine le temps de former un assemblage
- Très étudiées dans les années 1960, elles le sont moins maintenant
 - ▶ Elles aboutirent à soupçonner l'existence des quarks
 - ▶ On répertorie surtout actuellement les états excités des mésons charmés et beaux
- Ces résonances sont reconstituées à partir de leurs produits de désintégration

2.5 – Observer les bosons

Les photons

- Le photon est électriquement neutre
- Sa masse est nulle
- Sa vitesse est celle de la lumière
- L'énergie des photons en physique des particules est élevée : $E > 100 \text{ MeV} = 0.1 \text{ GeV}$: photons gamma
- Le photon:
 - ▶ Quand il se matérialise, il disparaît
 - ▶ Exemple de la matérialisation en paire électron-positron, dominante à haute énergie



2.5 – Observer les bosons

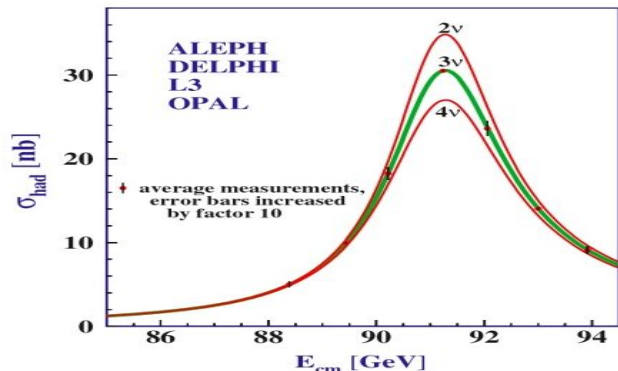
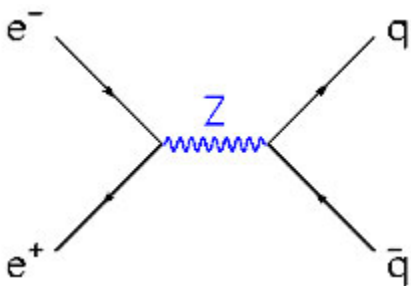
Le boson Z^0



- Une particule beaucoup plus fondamentale que d'autres. Elle véhicule la force faible.
 - ▶ On a construit le LEP pour elle. Elle est produite en abondance dans des collisions e^+e^-
- Elle est très massive
 - ▶ Elle pèse autant à elle seule qu'un noyau d'une centaine de nucléons

$$M = mc^2 = 91.2 \text{ Gev}$$

- Le Z^0 ressemble à un photon très lourd qui se désintègre en 10^{-25} s en paires:
 - ▶ quark-antiquark
 - ▶ lepton antilepton chargés (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$)
 - mais aussi en paires neutrino et antineutrino neutres



- Le LEP a fonctionné comme une usine à Z^0 de 1989 à 1995
 - ▶ 10 millions de Z^0 observés par 4 expériences

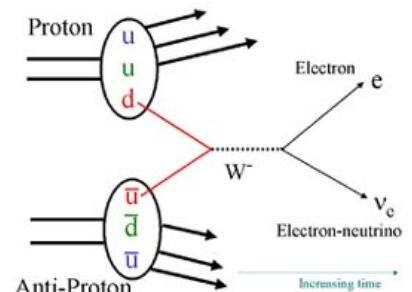
2.5 – Observer les bosons

Les bosons W^+ et W^-



- Partenaires chargés du Z^0 et comme lui particules très fondamentales. Ils véhiculent la force faible
 - On a construit les anneaux proton-antiproton du CERN pour les découvrir en 1982.
 - Ils ont été alors observés à quelques exemplaires se désintégrant (dans le cas du W^-) en :

- **électron + Antineutrino-e**
- **Muon + Antineutrino-mu**



- Les W sont aussi très massifs et instables
 - Ils pèsent plus qu'un noyau d'une centaine de nucléons

$$M = m c^2 = 80.4 \text{ Gev}$$

- Ils se désintègrent aussi très rapidement

- Quand un W intervient, il **change la nature** d'une particule:

- Par exemple, il change un neutrino en électron



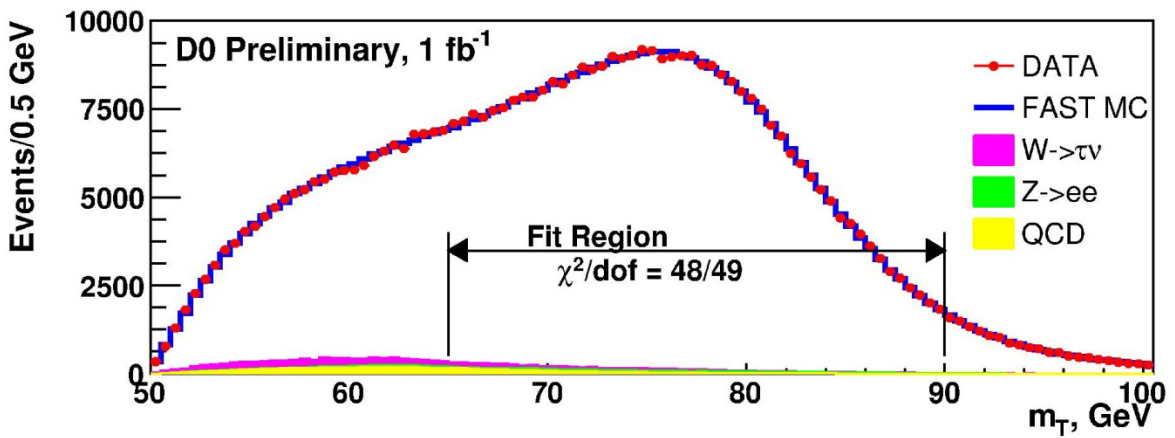
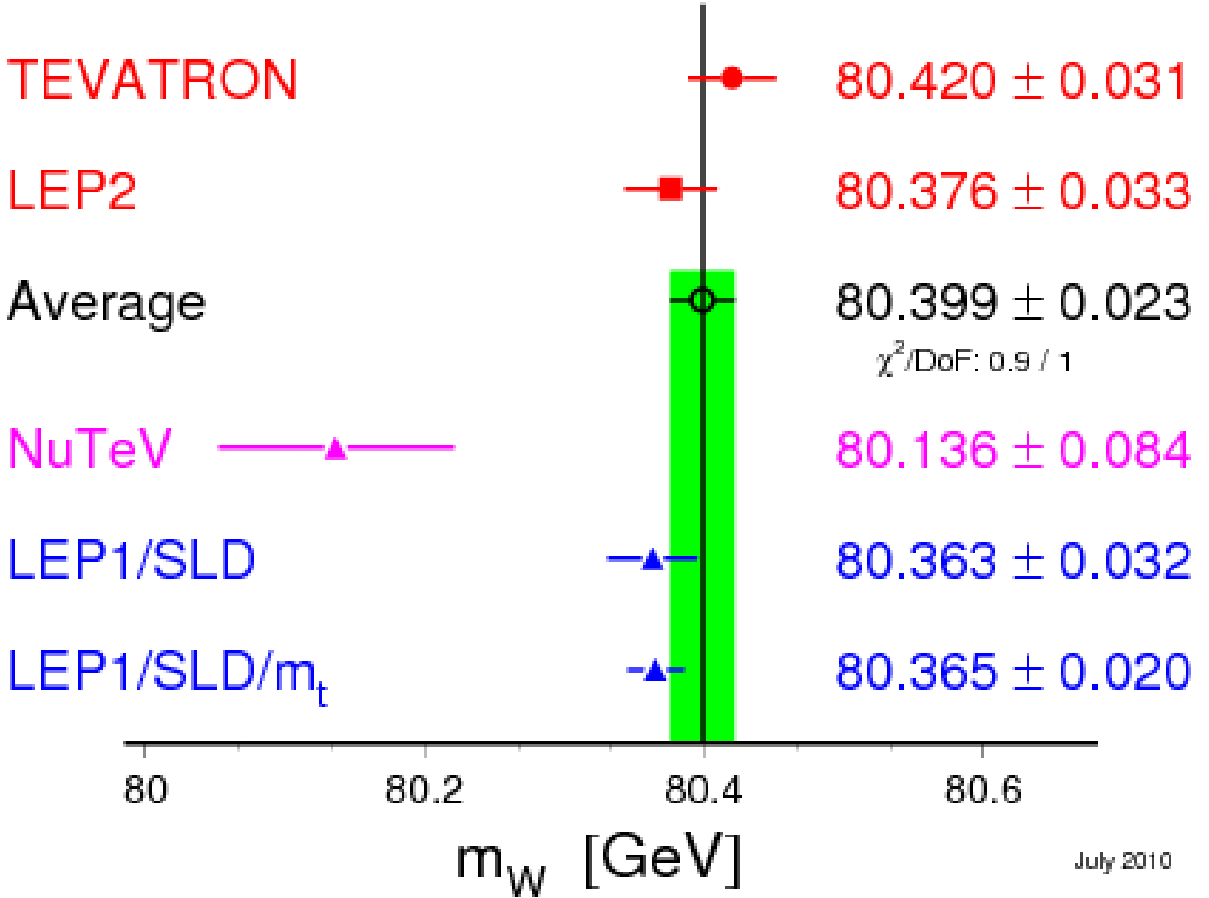
- Aux énergies des accélérateurs actuel (Tevatron) et futur (LHC), les W comme le Z^0 sont (seront) produits couramment

- Au LEP 2 (1996-2000, i.e. au dessus de 160 GeV d'énergie) , on a produit plus de 80000 paires de boson W .
- Au Tevatron (2001-?): 16 Millions de boson $W(l\nu)$ pour l'instant.
- Au LHC (2009?-?): 200 Millions pour 10 fb^{-1}



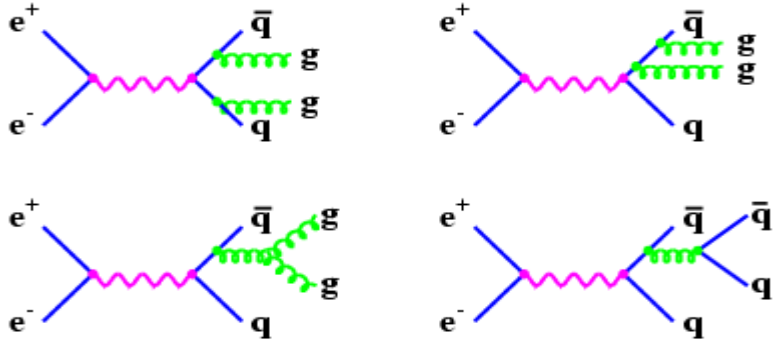
Tevatron: mesure de la masse du W (Juillet 2010)

W-Boson Mass [GeV]

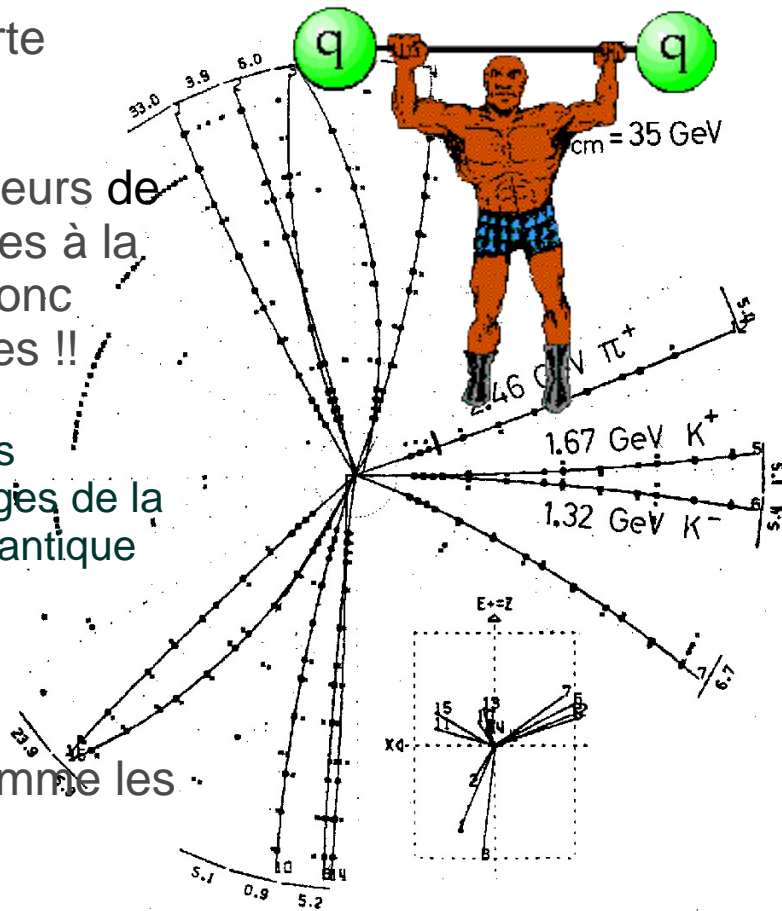


2.5 – Observer les bosons

Les gluons



- Ils véhiculent la force forte
- Ils sont eux-mêmes porteurs de **couleur** : ils sont sensibles à la force forte, et peuvent donc interagir avec eux-mêmes !!
 - Ceci est à l'origine des comportements étranges de la chromodynamique quantique (confinement, liberté asymptotique)
- Ils se comporte donc comme les quarks
 - Ils ne sont pas libres mais s'hadronisent
 - Ils donnent naissance à des **jets**
 - Très difficile de distinguer les jets de gluons des jets de quarks

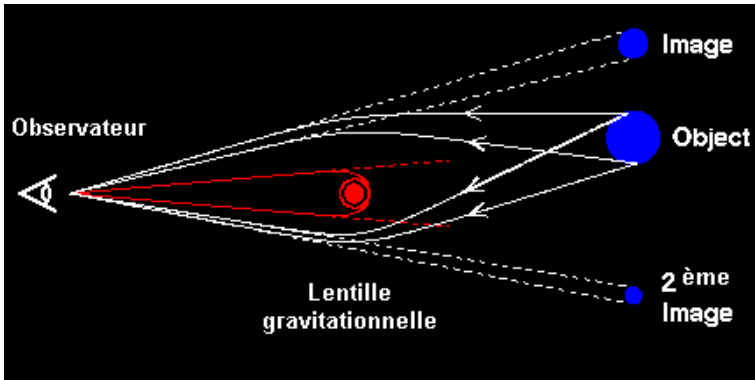


Découverte du gluon à PETRA (Hamburg, Allemagne) en 1979

2.5 – Observer les bosons

Les gravitons?

- La lumière est déviée par les étoiles
 - ▶ Einstein l'avait prévu
 - ▶ Effet de lentille gravitationnelle observé en 1993



Russell A. Hulse



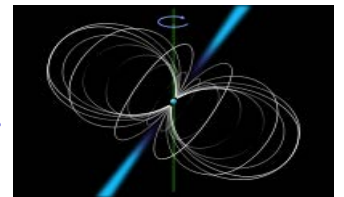
Joseph H. Taylor Jr.

- Le messager de l'interaction de gravitationnelle serait une particule appelée “ **graviton** ”
 - ▶ Il n'a pas encore été mis en évidence.
 - ▶ Il se manifesterait sous formes d'ondes gravitationnelles produites par des événements cosmiques violents.

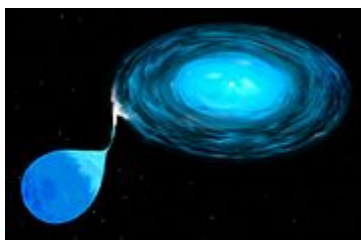


The Nobel Prize in Physics 1993

Pulsar



- De telles ondes sont recherchées, mais leurs effets sont extrêmement faibles.
 - ▶ Exemple : expérience **VIRGO** veut détecter au passage d'une onde gravitationnelle une variation relative de longueur de 10^{-21} = dimension d'un atome pour une distance terre-soleil !



Systeme binaire

2.5 – Observer les bosons

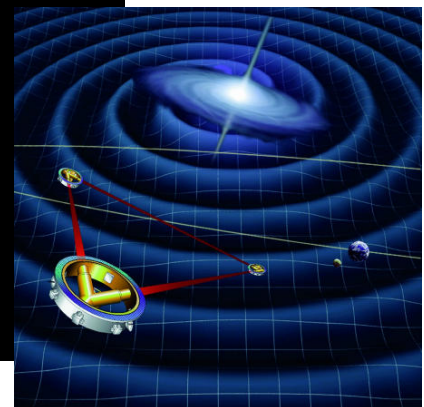
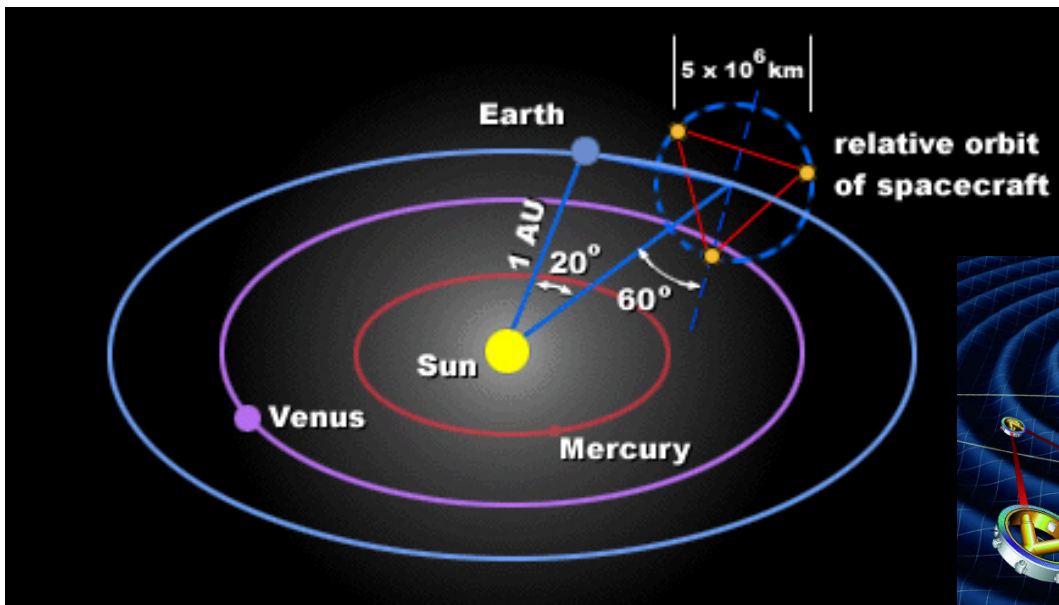
Les gravitons?

- Projet Virgo (run physique en mai 2007) : un interféromètre de 3km !



Vue de Virgo, près de Pise

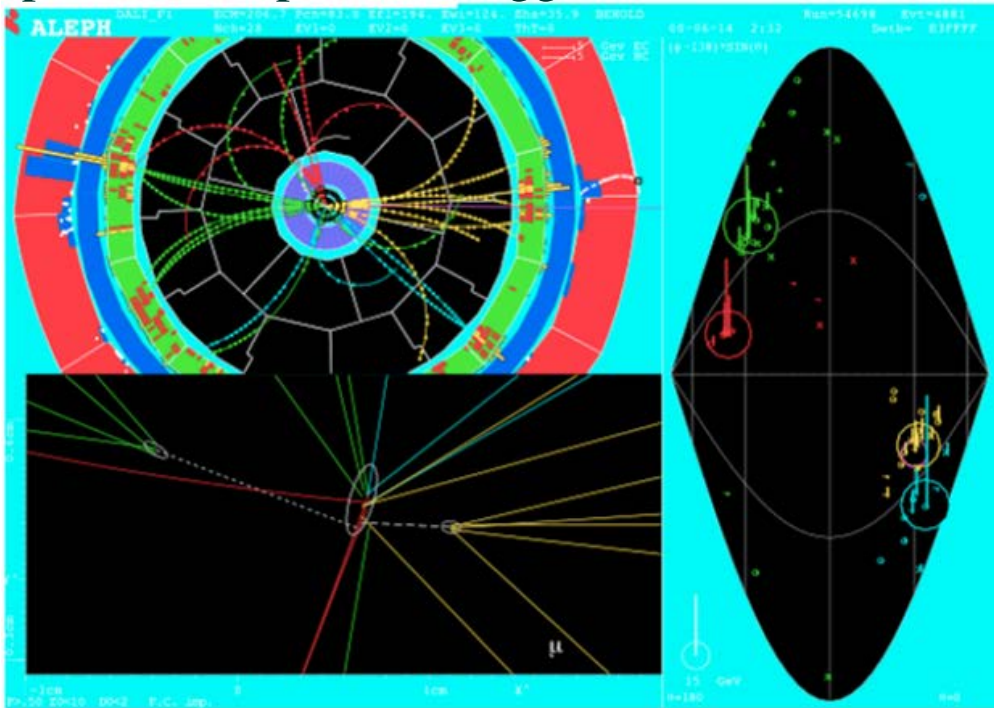
- Projet LISA (2015?) : un interféromètre de Michelson géant
 - ▶ Détecter des changements de distance inférieurs à la taille d'un atome entre des satellites distants de 5 millions de km



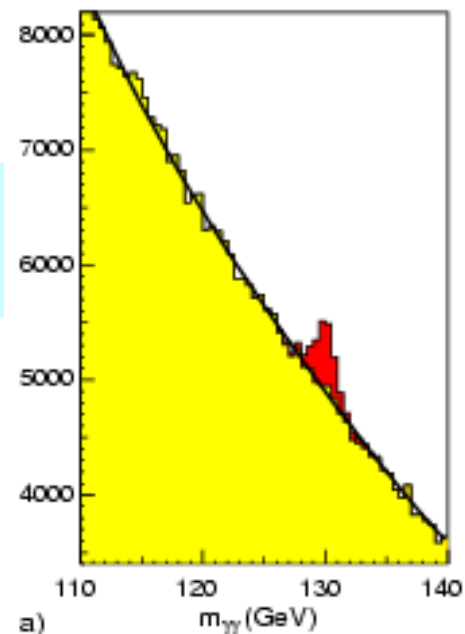
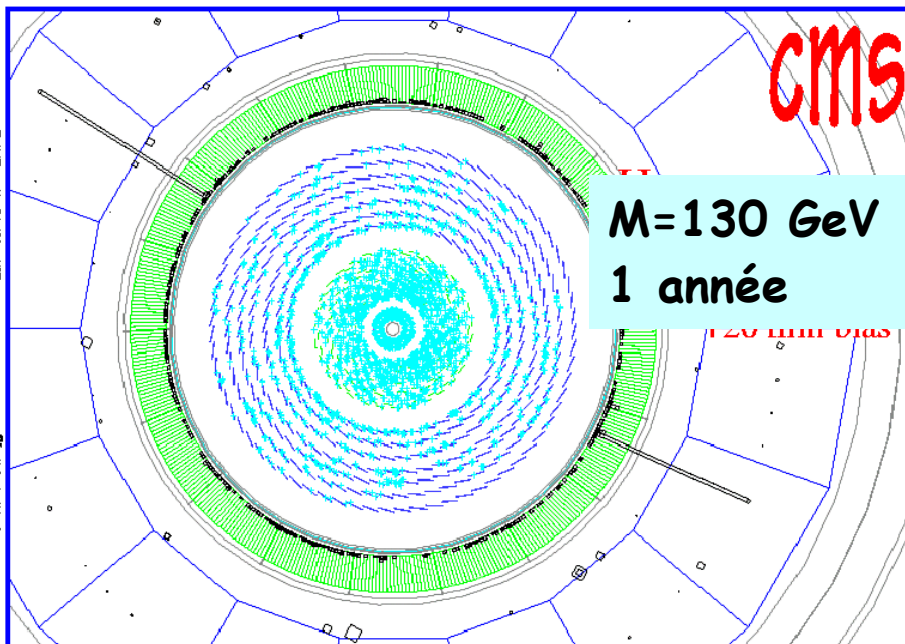
2.5 – Observer les bosons

Le boson de Higgs ?

- LEP : peut-être le premier Higgs ... ou bruit de fond

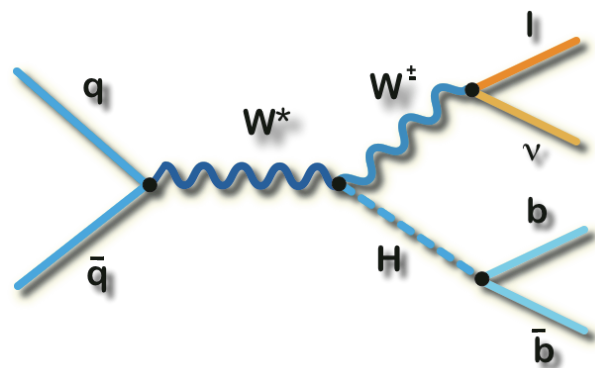
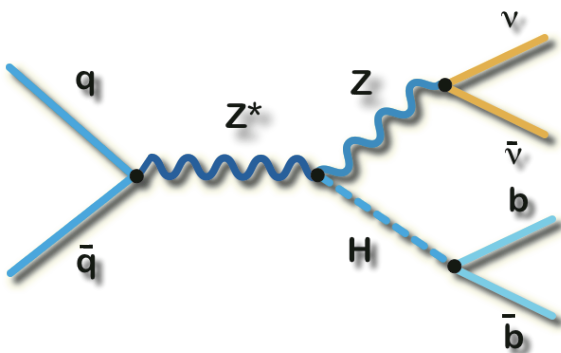


- Le LHC verra le Higgs ... s'il existe !



2.5 – Observer les bosons

Le boson de Higgs ?

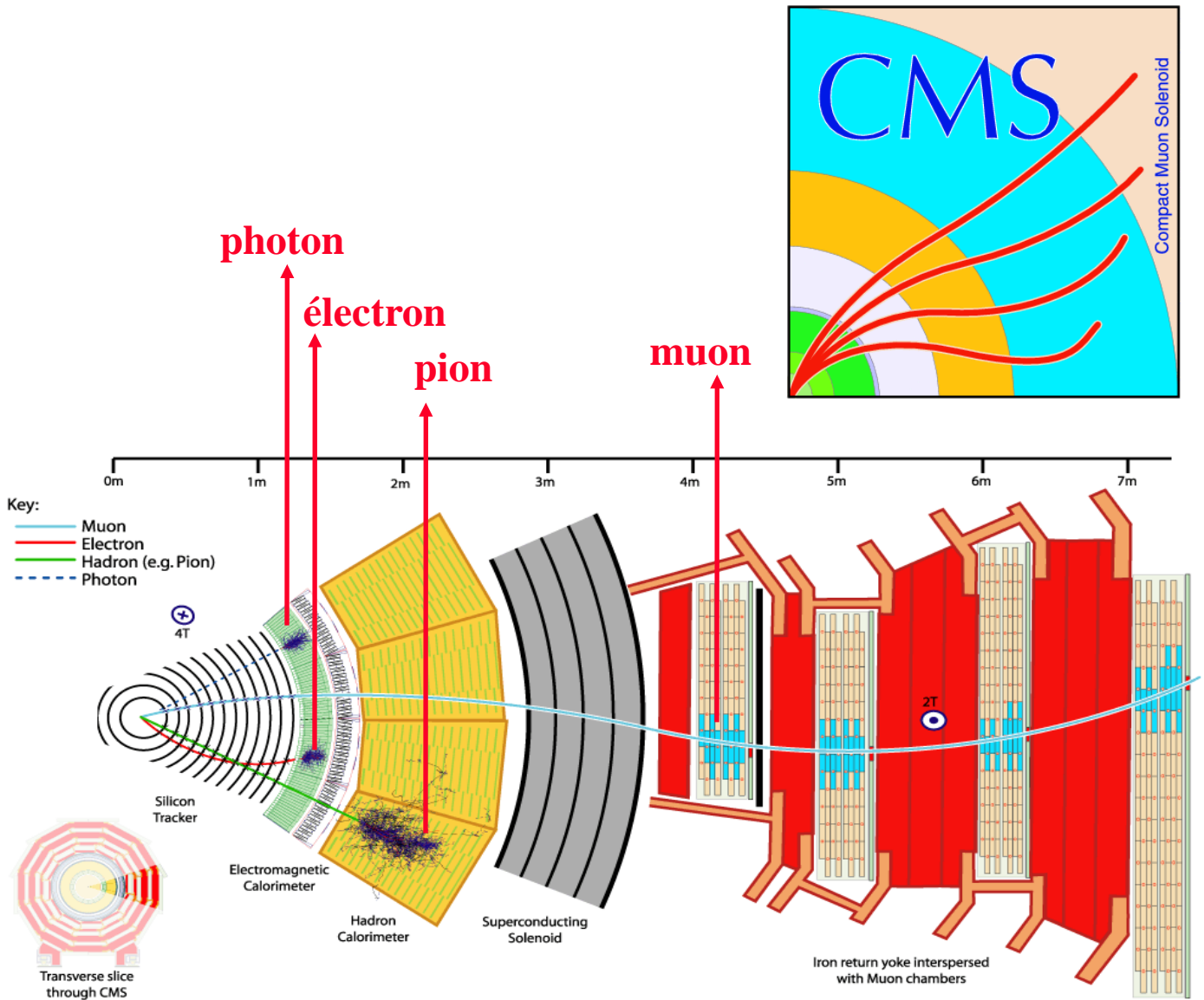


(voir chapitre 1)

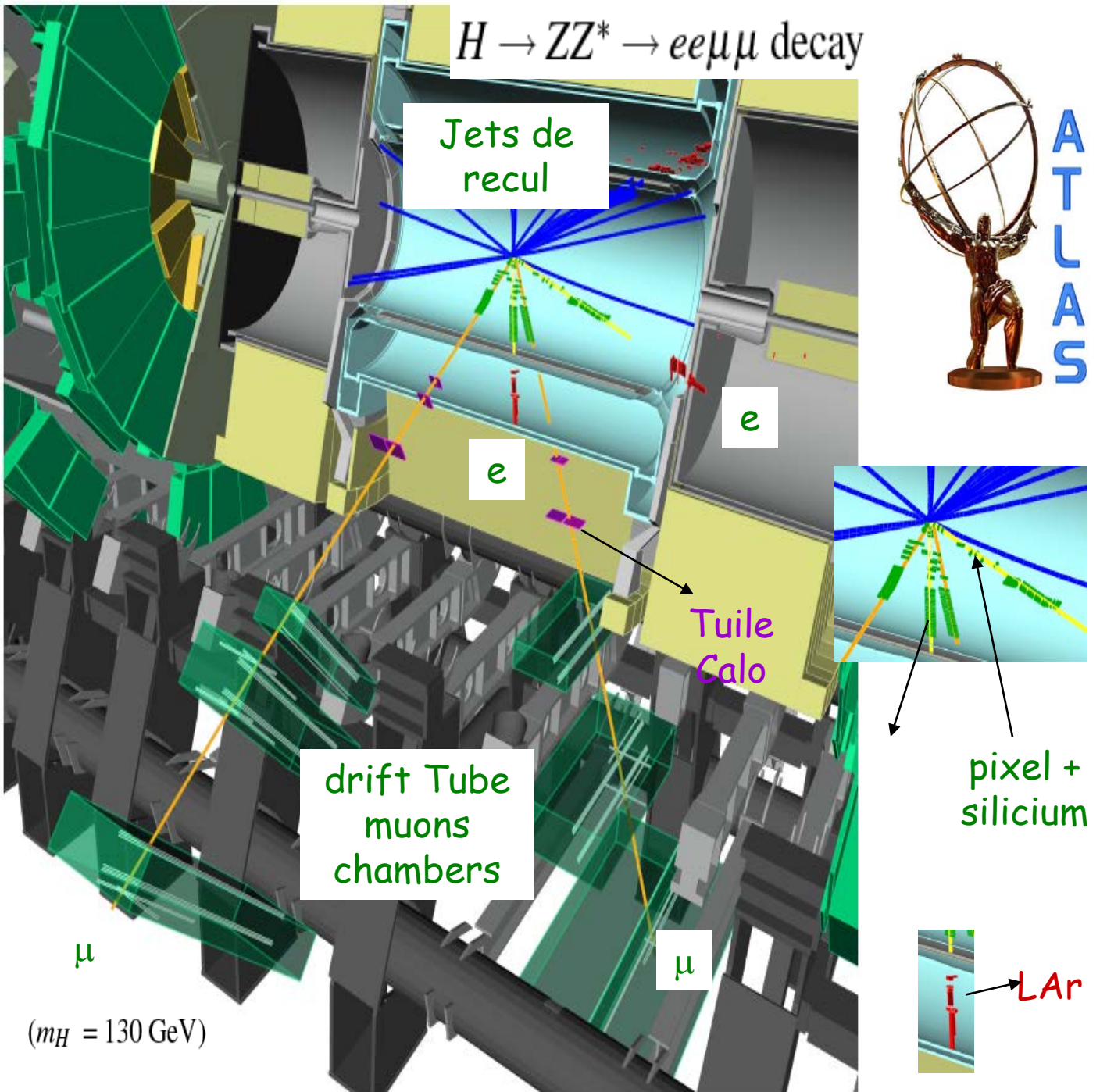
Le premier Higgs vu au LHC !



Bilan : les particules dans un détecteur



Bilan : les particules dans un détecteur



LHC Collisions in 2011 Have Begun !



Higgs Boson, if it exists between masses of (114 - 600 GeV) will either be discovered or ruled out in \approx next two years

As in every important journey, there will be challenges to overcome