

CHAPITRE II

Mars 2007, Ch. de la Vaissière, F.Hubaut, O. Leroy, J. Cogan

Les particules et leurs signatures

Les acteurs :

Comment reconnaître et identifier les particules
que les physiciens recherchent

Plan

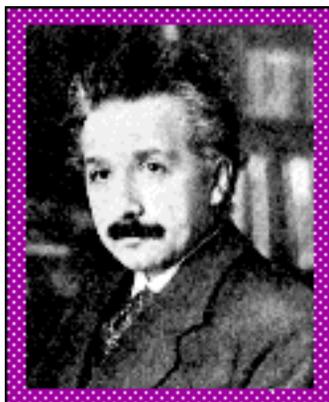
- 1 - Effets relativistes
- 2 - Les observables des particules
- 3 - Observer les leptons
- 4 - Observer les hadrons
- 5 - Observer les bosons

§ 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

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

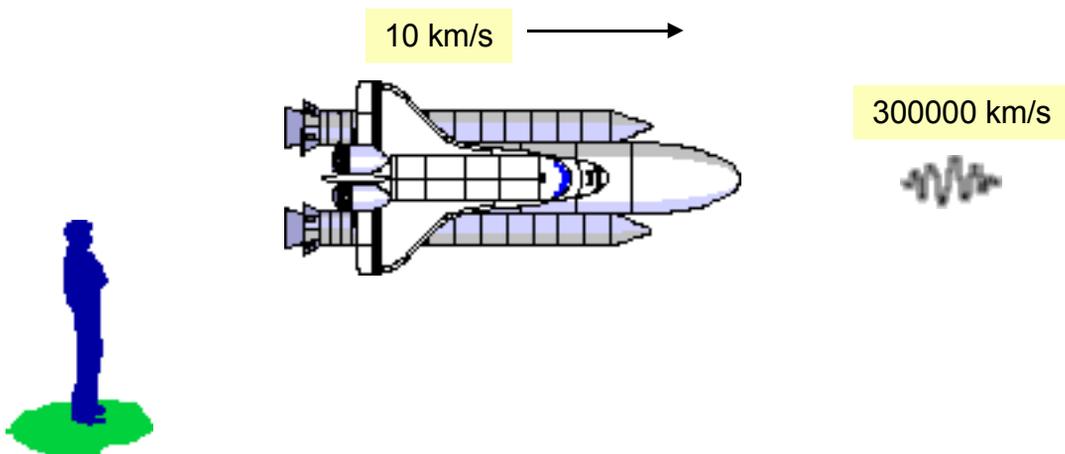


Albert Einstein

2.1 – Effets relativistes

La vitesse de la lumière

- La vitesse de la lumière dans le vide est :
300000 km/s
- Dans le vide rien ne va plus vite
 - ▶ Le pilote d'une fusée allant à 10km/s émet un signal lumineux
 - ▶ A quelle vitesse va ce signal pour un spectateur au sol ? On devrait avoir en ajoutant les vitesses
 $300000 + 10 = 300010$ km/s ?
- Non : la vitesse de la lumière est pour tout le monde 300000 km/s
- Il faut changer quelque chose.
 - ▶ Le temps est relatif.



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

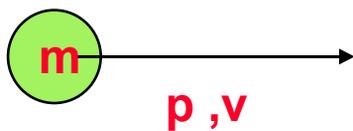
$$M = m \times 300000000 \text{ m/s} \times 300000000 \text{ m/s}$$

- ▶ 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 : $\text{kg.m}^2/\text{s}^2 \rightarrow \text{GeV}/c^2$

2.1 – Effets relativistes

Quantité de mouvement

- Pour tout objet en mouvement, le vecteur quantité de mouvement est représenté par le produit de la masse m par \vec{v} , son vecteur vitesse.



$$\vec{p} = m \vec{v}$$

- Aux vitesses proches de la vitesse c de la lumière, l'expression doit être modifiée et s'écrit :

$$\vec{p} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

- Unité d'impulsion : $\text{kg.m/s} \rightarrow \text{GeV/c}$
- Dans l'expression de P intervient un facteur caractéristique Γ , le facteur (boost) de Lorentz :

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

v	Γ
0.100 c	1.005
0.900 c	2.294
0.990 c	7.089

2.1 – Effets relativistes

Energie totale

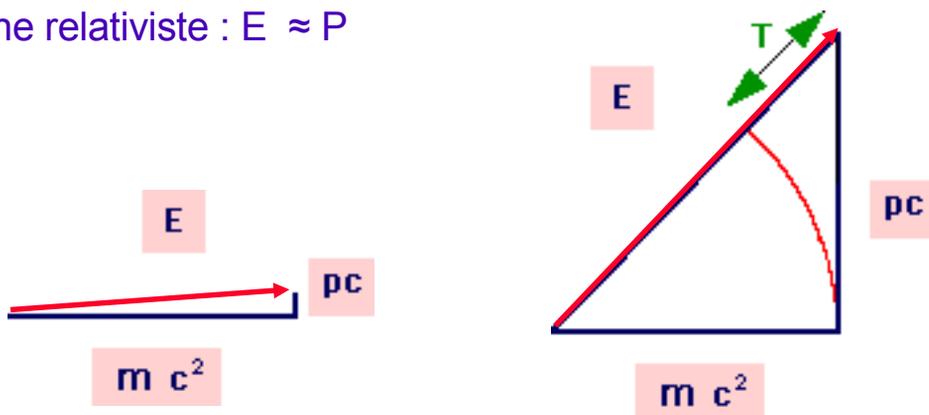
- L'énergie totale E d'une particule est la somme de :
 - ▶ son énergie interne (ou de masse) $M = mc^2$
 - ▶ son énergie cinétique T
 - à petite vitesse : $T = \frac{1}{2} m v^2$
 - à grande vitesse : $T = (\Gamma - 1) m c^2$

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

- 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 : $E \approx P$



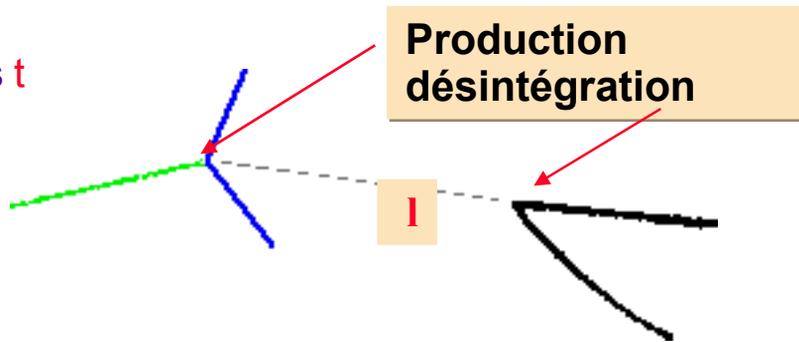
- Note: $M^2 = E^2 - P^2$ est invariant
 - ▶ ne dépend pas du référentiel choisi

2.1 – Effets relativistes

Dilatation du temps

■ Imaginons une particule qui se désintègre

- ▶ Production au temps 0
- ▶ Désintégration au temps t
- ▶ Distance de vol : l



■ Formule classique

- ▶ Le temps de vie t est le même pour la particule et l'observateur qui la regarde dans le laboratoire

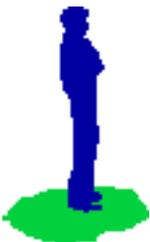
$$l = vt = \beta ct$$

■ Formule à très grande vitesse ($v \approx c$)

- ▶ Pour l'observateur, le temps vécu par la particule semble plus long

$$t \text{ devient } \Gamma t \text{ et } l = \beta \Gamma ct$$

■ Le facteur de Lorentz Γ dilate le temps



$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

v	Γ
0.100 c	1.005
0.900 c	2.294
0.990 c	7.089

§ 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

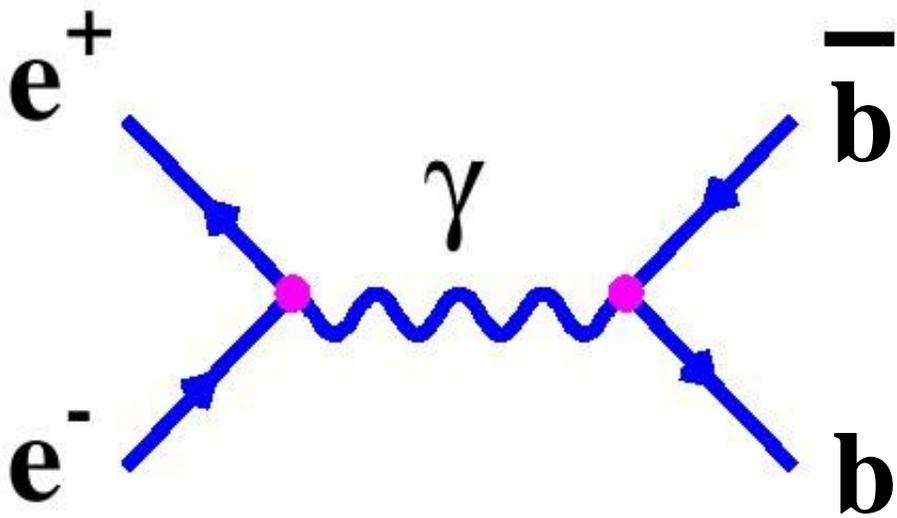
■ Mesures

- 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

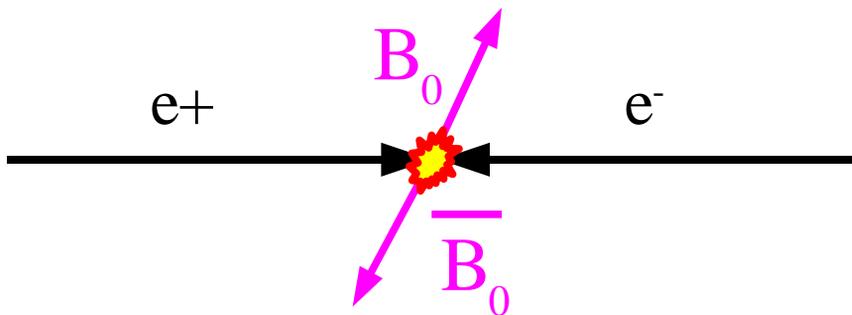
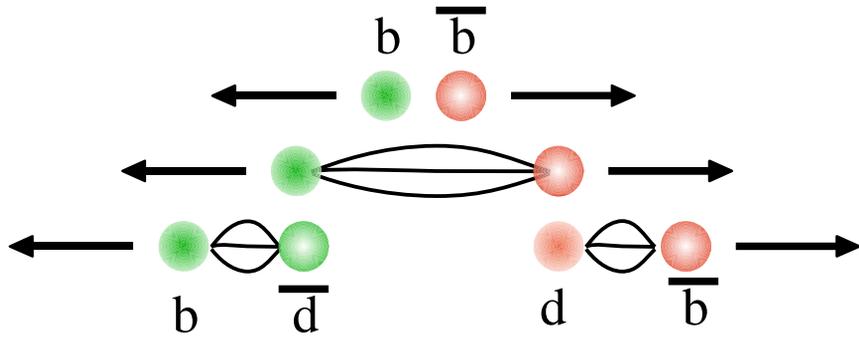


2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

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

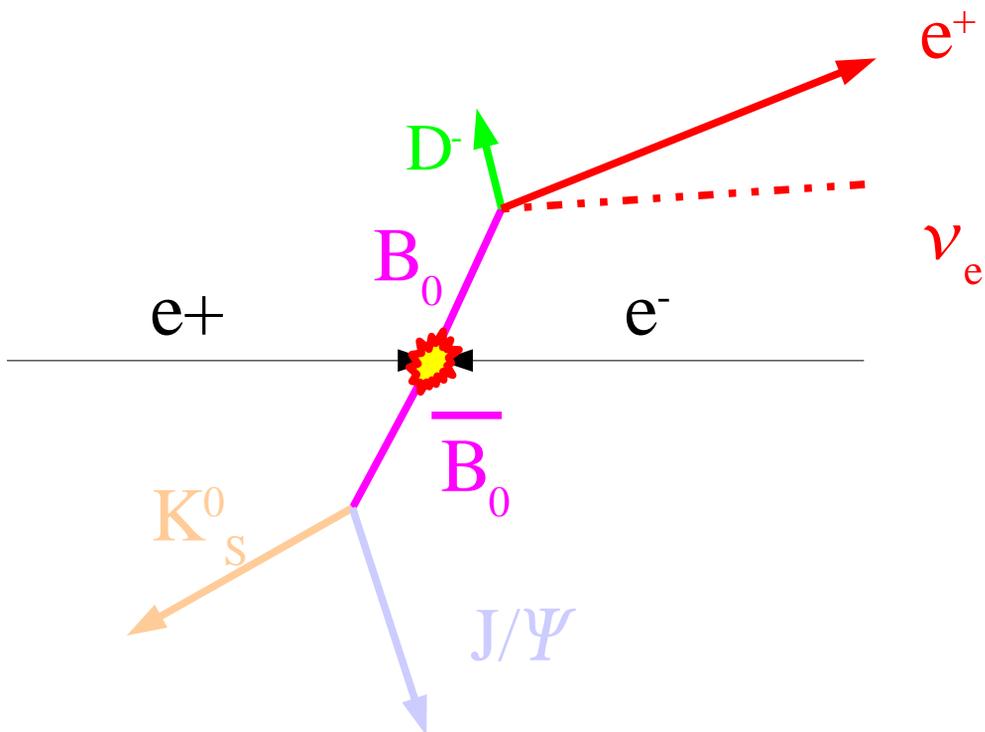
- ▶ ils s'habillent (s'hadronisent)
- ▶ le type de hadron créé
 - est variable
 - la loi de probabilité dépend de l'énergie
- ▶ ici: mésons beaux
 - $B_0 = d\bar{b}$
 - $\bar{B}_0 = \bar{d}b$



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:
 - $P(B_0 \rightarrow D^- e^+ \nu_e) = (2,12 \pm 0.20)\%$
 - $P(\bar{B}_0 \rightarrow K_S^0 J/\Psi) = (8,72 \pm 0.33)10^{-4}$

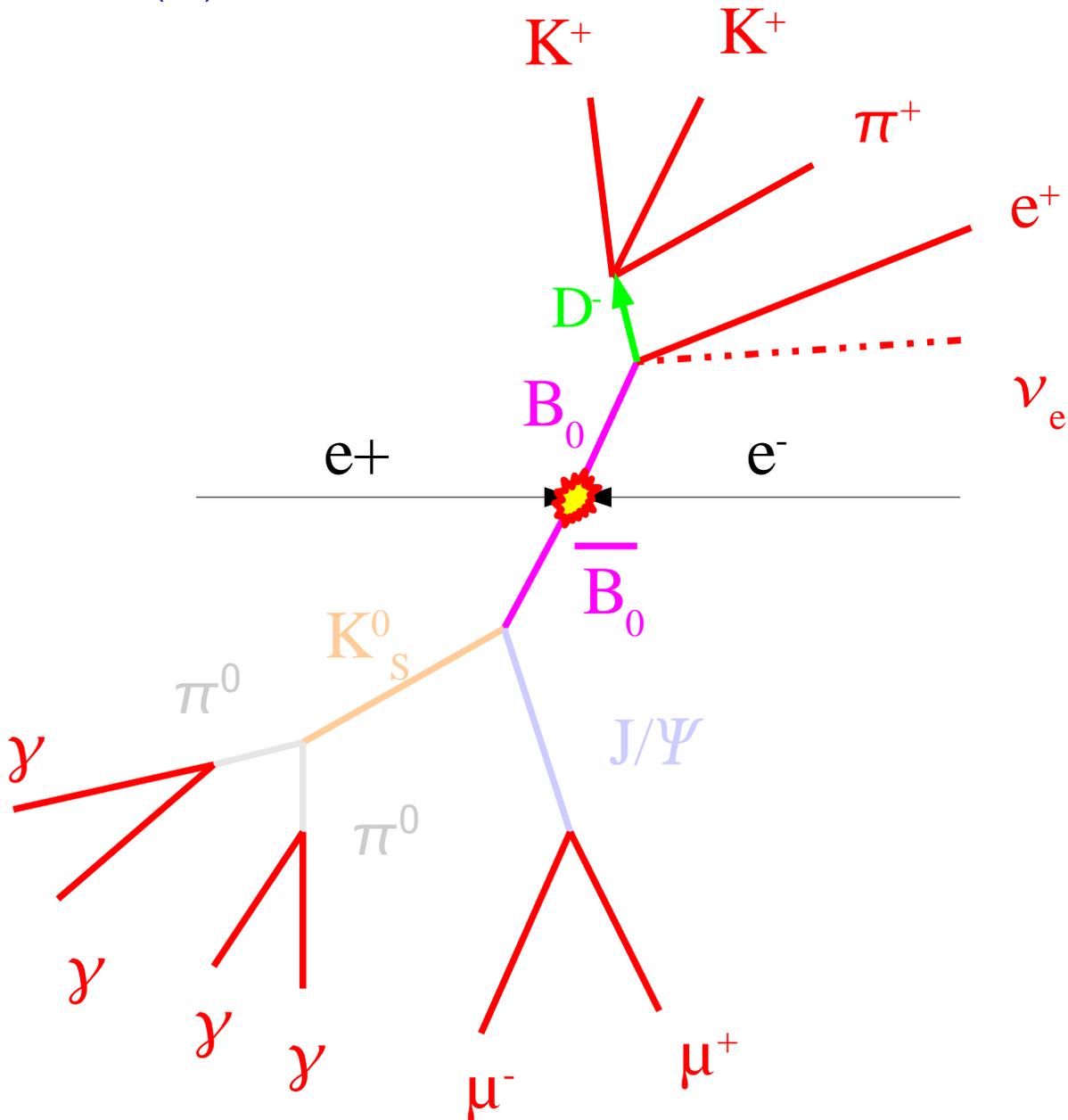


2.2 – Les observables des particules

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

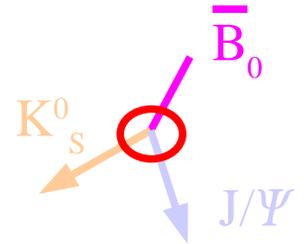
- Une fois créés, les quarks se séparent et s'hadronisent
 - ▶ les hadrons formés sont des hadrons « beaux » (contenant un b)
 - ▶ ces derniers sont lourds et instables, ils vont se désintégrer spontanément:
 - production de hadrons plus léger (contrainte cinématique)
 - unique possibilité: désintégration 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: $\bar{B}_0 \rightarrow K^0 J/\Psi$
 - ▶ 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: $\bar{B}_0 \rightarrow K^0 J/\Psi$
- 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 $b\bar{b}$
 - NB: pas moyen d'optimiser les modes de désintégrations

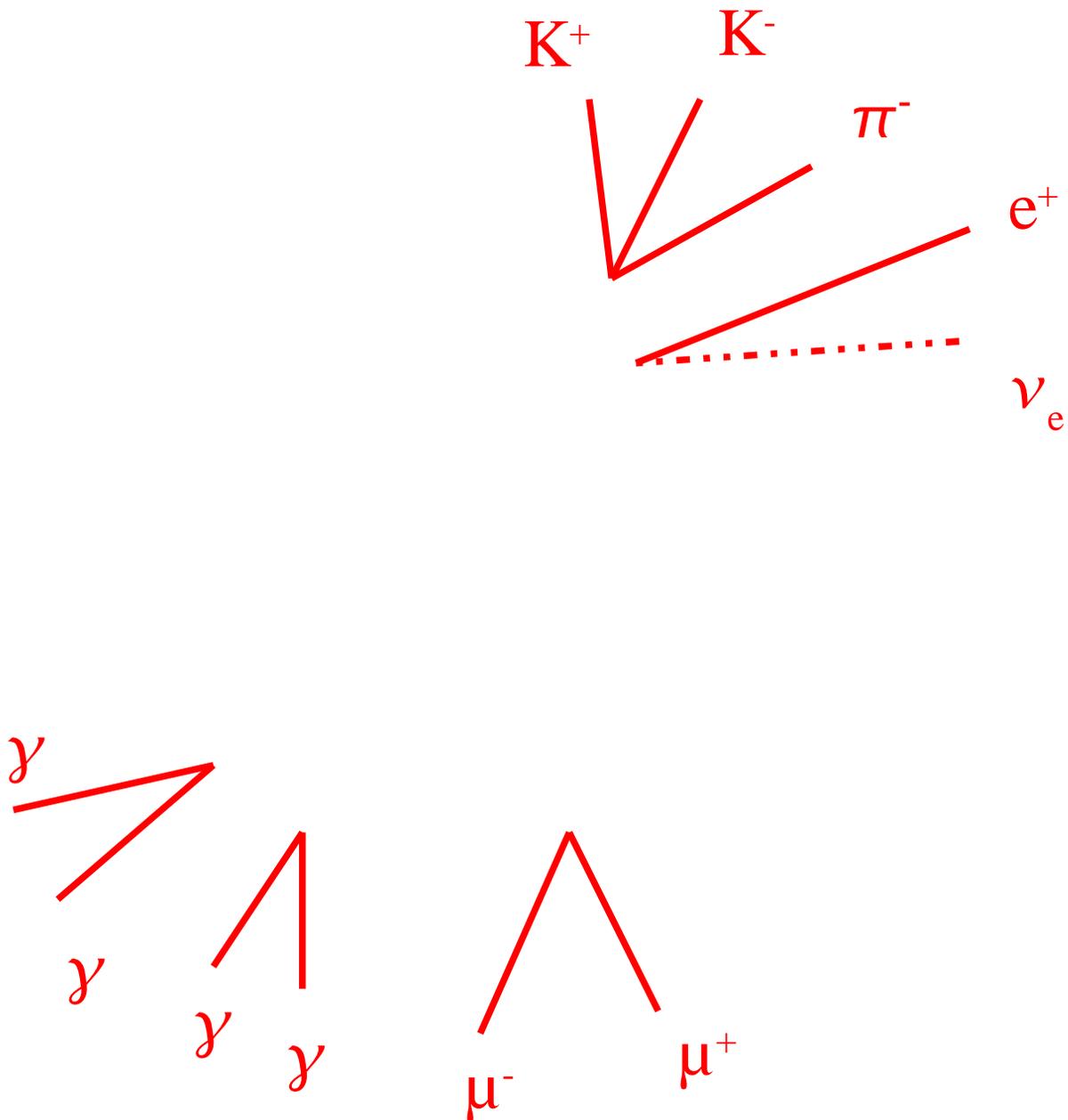


2.2 – Les observables des particules

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

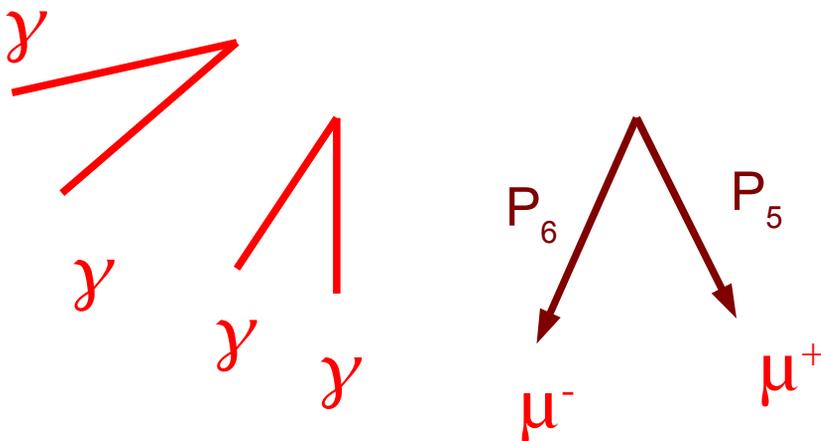
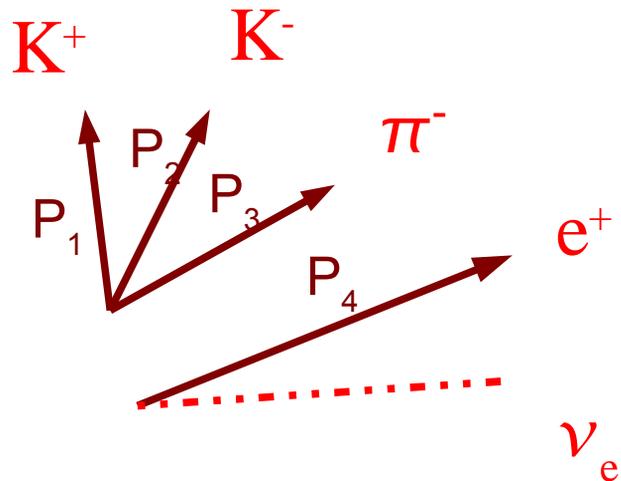


2.2 – Les observables des particules

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)



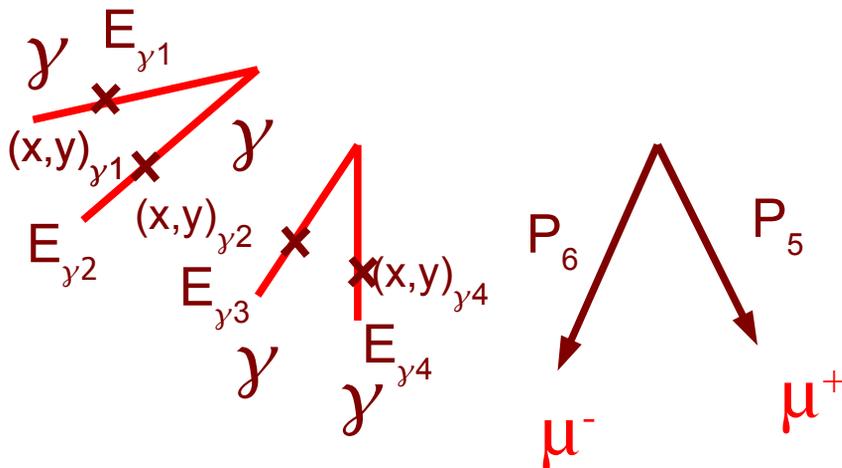
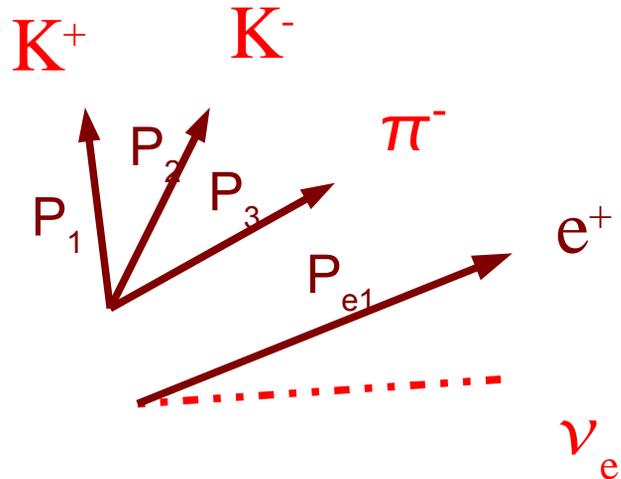
2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

Ce qu'on mesure:

■ L'énergie des photons et des électrons

- ▶ dépose toute leur énergie dans un **calorimètre électromagnétique**
- ▶ pour les électrons $E/P = 1 \rightarrow$ identification
- ▶ pour les photons
 - mesure de la position
 - absence de trace dans le spectromètre \rightarrow identification

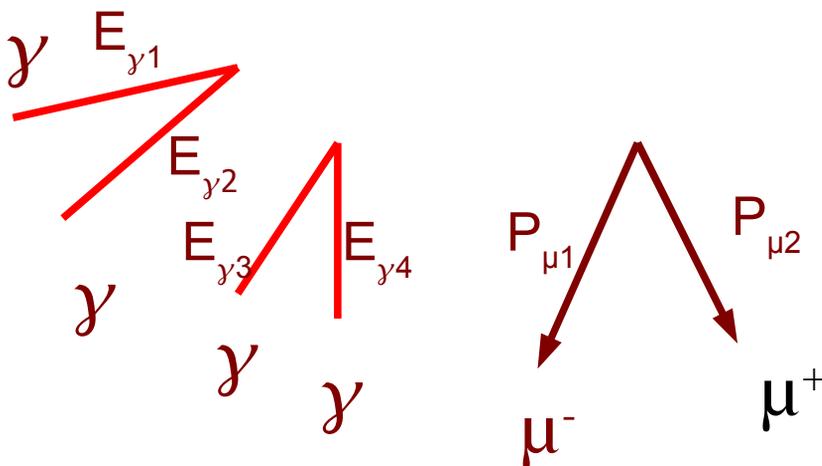
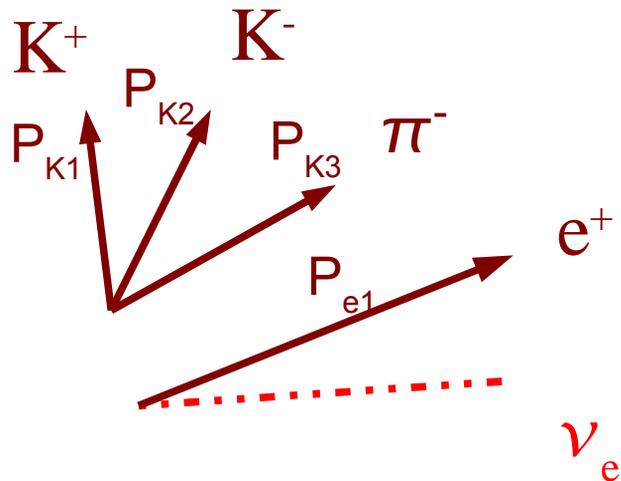


2.2 – Les observables des particules

Un exemple:

Ce qu'on mesure:

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

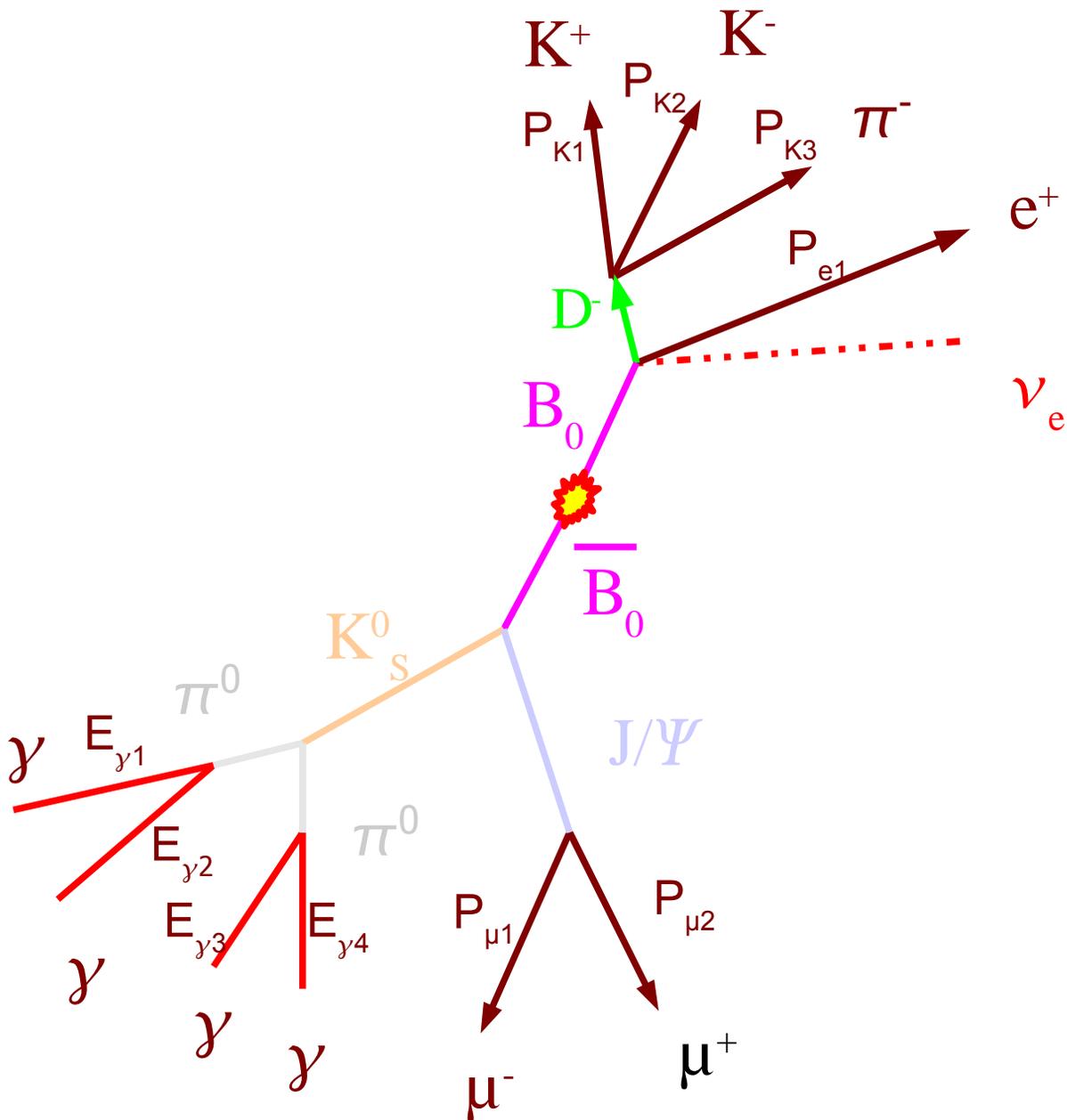


2.2 – Les observables des particules

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 en m)
▸ e [±]	0.000511	stable
▸ μ [±]	0.106	658
▸ π [±]	0.140	7,8
▸ K [±]	0.494	3,7
▸ Protons	0.938	stable
▣ Liste des particules neutres à séparer		
▸ γ	0	stable
▸ π ⁰	0.135	25.10 ⁻⁹
▸ K ⁰	0.498	2,5.10 ⁻² /15,3
▸ Hypérons Λ ⁰	1.116	7,9.10 ⁻²
▸ neutrons	0.940	2,7.10 ¹¹
▸ 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 (destructif!)
 - ▶ 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

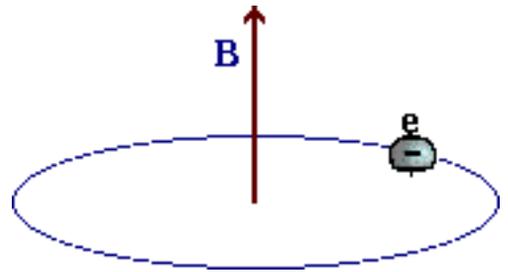
- **MAIS** in fine ce qui sera observé reste un signal **d'ionisation** ou **d'excitation** de la matière auquel le détecteur devra être sensible

2.2 – Les observables des particules

Charge électrique

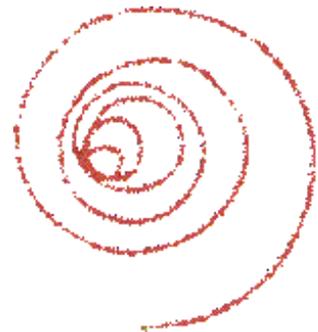
■ Déviation dans un champ magnétique

- ▶ Une particule chargée, soumise à un champ magnétique, décrit un cercle si sa vitesse est perpendiculaire à B
- ▶ Sinon elle décrit une hélice
- ▶ Le sens d'enroulement de l'hélice **signe de la charge**
- ▶ Le rayon de courbure mesure **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)

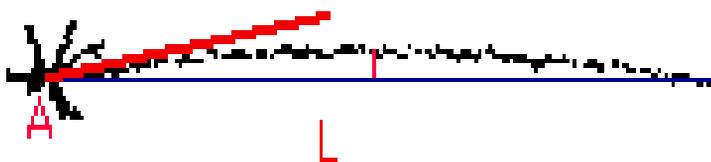
2.2 – Les observables des particules

Masse, quantité de mouvement et énergie

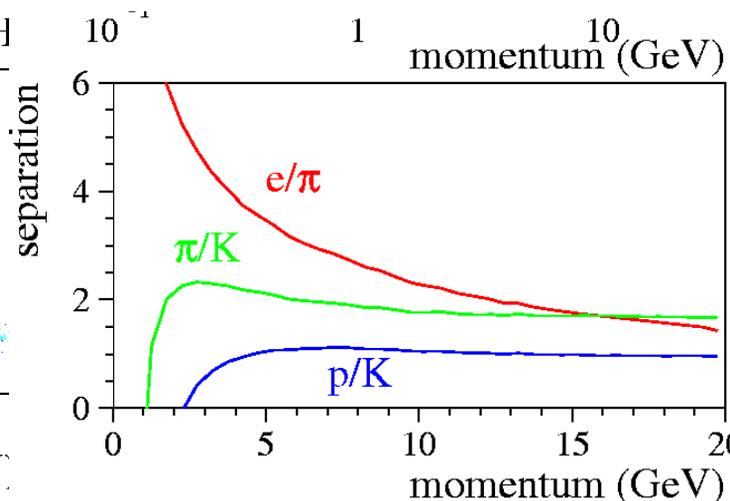
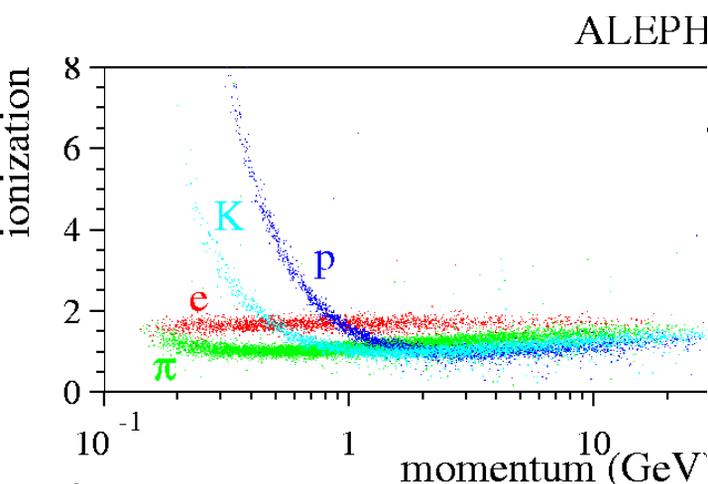
- La quantité de mouvement P d'une particule chargée se mesure à partir du rayon de courbure R de sa trajectoire (hélice) dans un champ magnétique

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

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



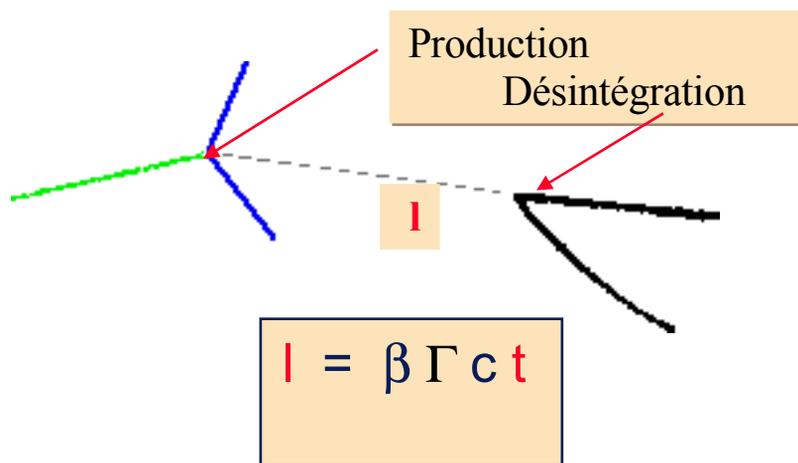
- Avec une mesure simultanée de la perte d'énergie par ionisation (appelée dE/dx)
- On peut estimer la masse de la particule
 - permet son identification



2.2 – Les observables des particules

Parcours et temps de vol

- Le parcours d'une particule entre le point de production et le point de désintégration, permet de mesurer son « temps de vol »



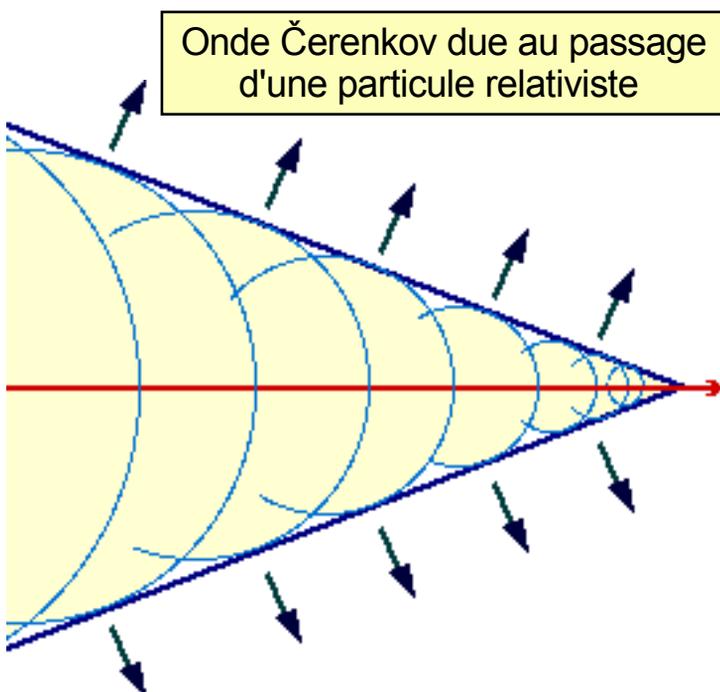
- Les parcours sont très variables
 - quelques centimètres à quelques dizaines de cm pour des K^0 et des hypérons porteurs du quark s
 - quelques centaines de microns pour des particules contenant des quarks c et b
- Très important dans l'identification des quarks b

Le besoin de mesurer de très courts parcours a conduit au développement des détecteurs de microvertex

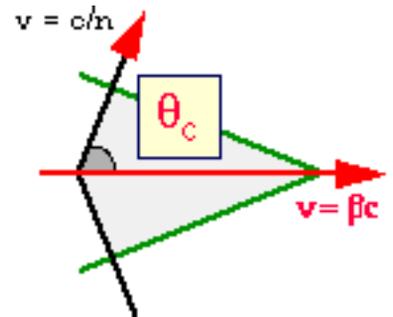
3.4 - Les fonctions des détecteurs

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 ($=P/\gamma v$)
 - ▶ Au LEP les détecteurs de temps de vol sont surtout utilisés pour éliminer les événements dus au rayonnement cosmique
- On utilise principalement **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



Définition de l'angle Čerenkov



$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} = \frac{\sqrt{p^2 + M^2}}{np}$$

3.4 - Les fonctions des détecteurs

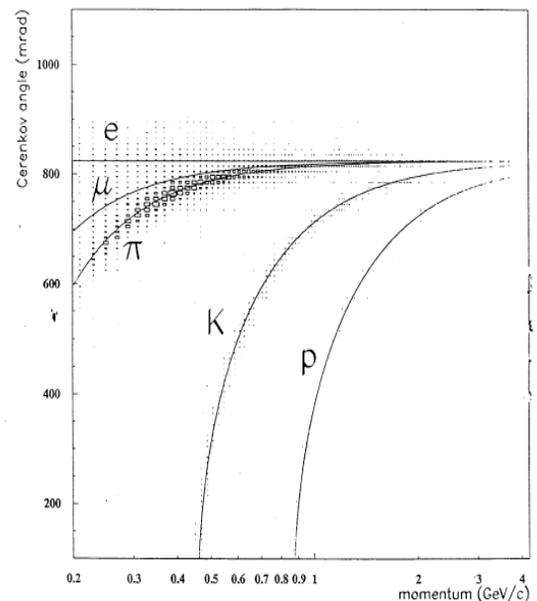
Identification : effet Čerenkov (2)

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

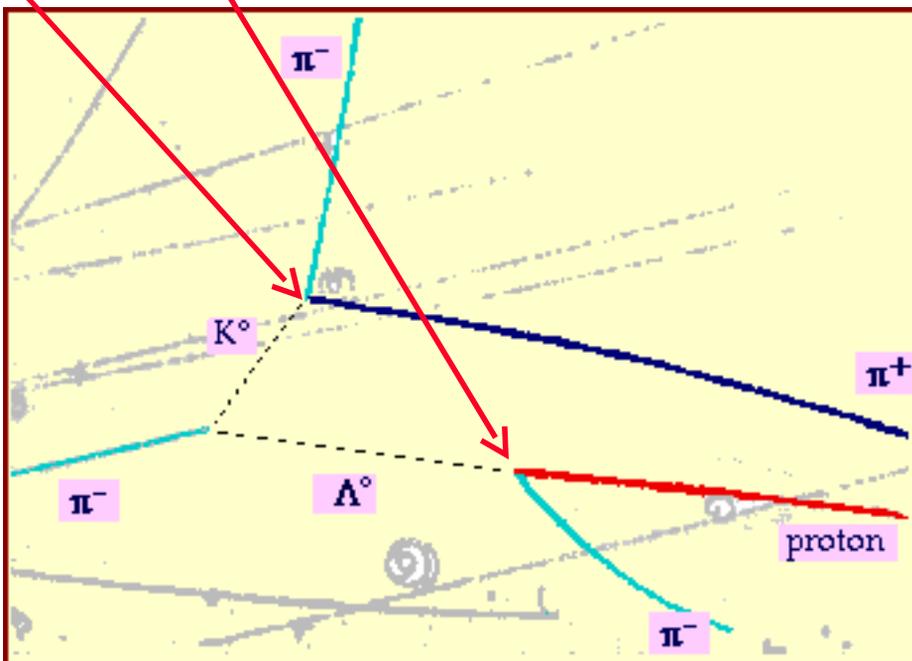
- Effet de seuil : pas de lumière Čerenkov au dessous d'une certaine impulsion (Ex. d'un proton de 10 GeV)
- Au dessus, angle d'ouverture θ_c petit
- On **combine** des Čerenkov liquides et gazeux pour identifier dans un domaine étendu d'impulsion

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 dans
 - 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>électron Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.</p>	<p>neutrino électron Sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant.</p>	<p>bas (down) Sa charge électrique est -1/3. Le proton en contient un, le neutron deux.</p>	<p>haut (up) Sa charge électrique est +2/3. Le proton en contient deux, le neutron un.</p>
	<p>muon Un compagnon plus massif de l'électron.</p>	<p>neutrino muon Propriétés similaires à celles du neutrino électron.</p>	<p>étrange (strange) Un compagnon plus lourd du "bas".</p>	<p>charme (charm) Un compagnon plus lourd du "haut".</p>
	<p>tau Encore plus lourd.</p>	<p>neutrino tau Propriétés similaires à celles du neutrino électron.</p>	<p>beauté (beauty) Encore plus lourd.</p>	<p>sommet (top) Le dernier quark observé (en 1994)</p>

BOSONS

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

<p>photon Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.</p>	<p>gluon Porteur de la force forte entre quarks.</p>	<p>bosons vecteurs Porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive.</p>	<p>Graviton 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 jamais 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 (dans le LEP du CERN ou PEPV à Stanford, des paquets contenant des milliards d'électrons et de positrons se croisent en permanence).

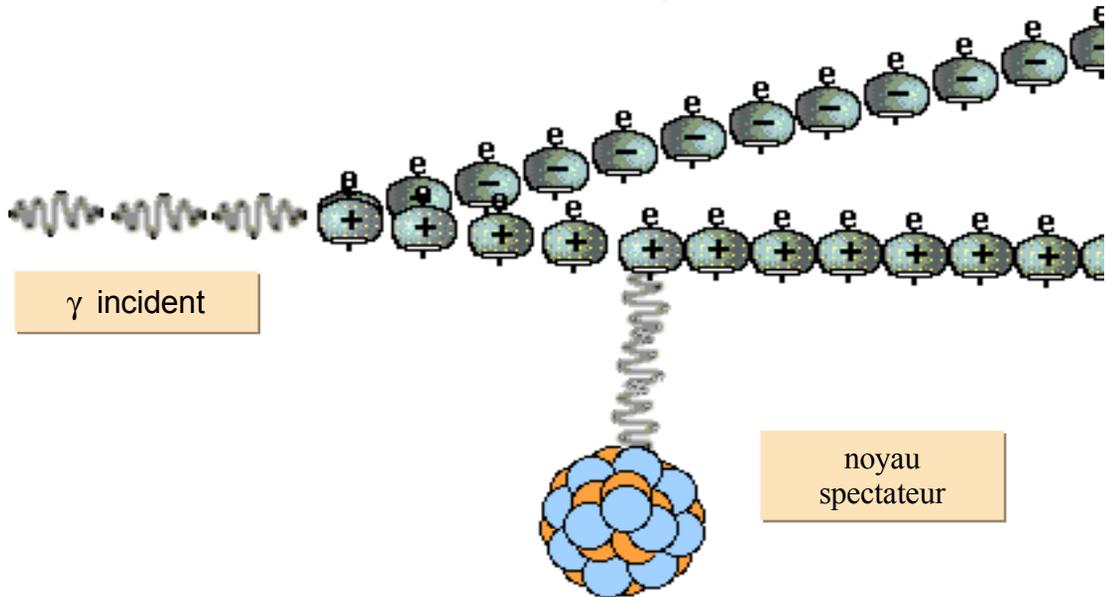
2.3 – Observer les leptons

Le positron

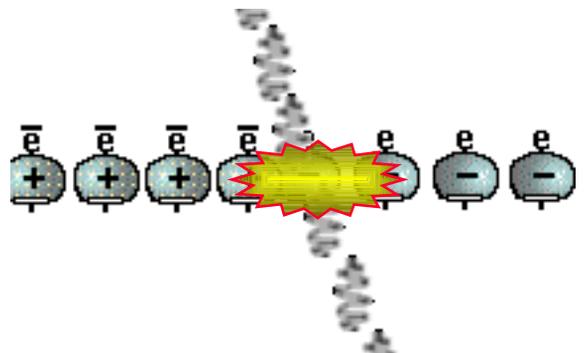
- Électron "positif", le positron est l'antiparticule de l'électron



- 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

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

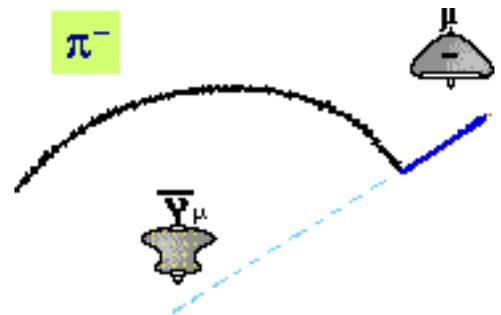
- Le muon parcourt facilement des kilomètres

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

- 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



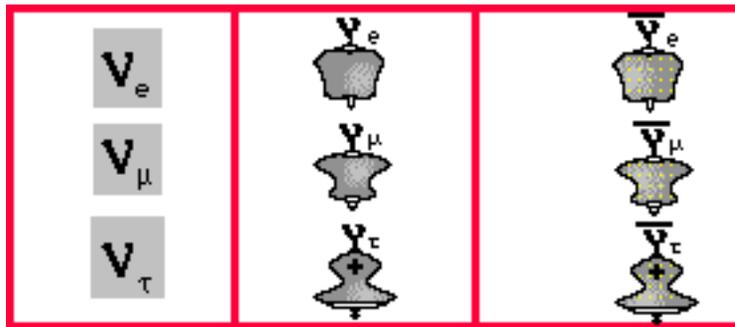
- Très pénétrant :

- 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



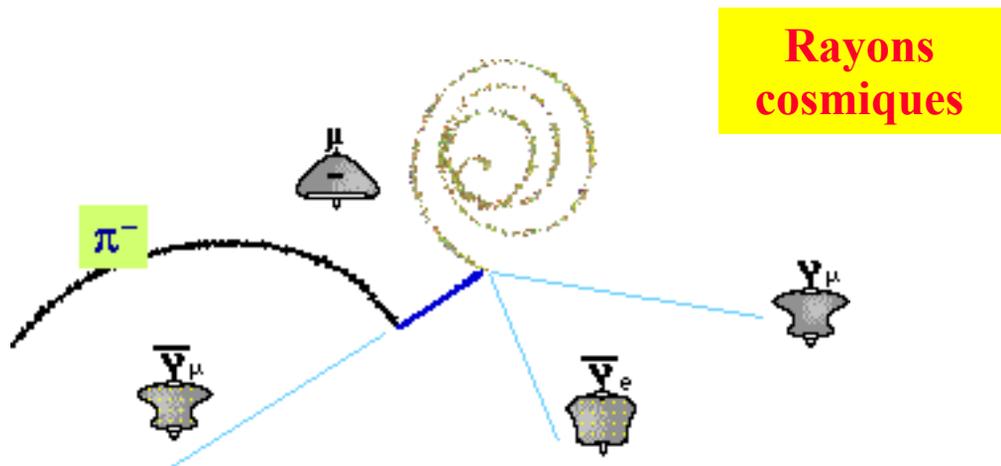
- Ces neutrinos qui nous traversent en permanence sont « mous » et interagissent très peu
 - 65 milliards par cm^2 nous traversent chaque seconde !
- D'autres neutrinos plus énergiques proviennent de gerbes cosmiques, ou sont produits par des accélérateurs

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



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

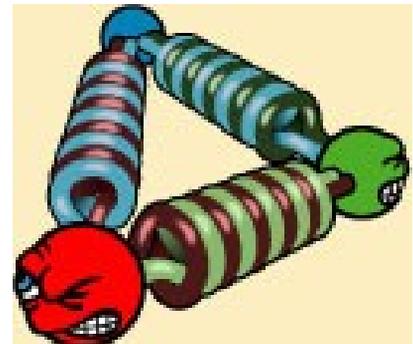
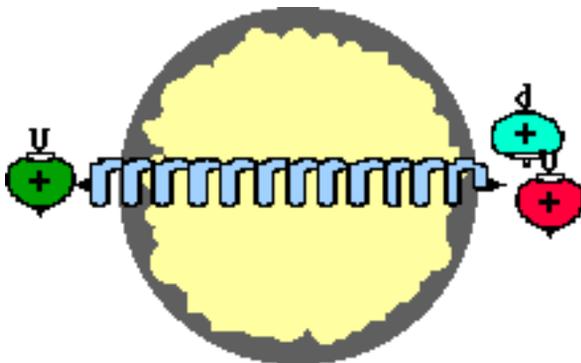
La chromodynamique quantique

- 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

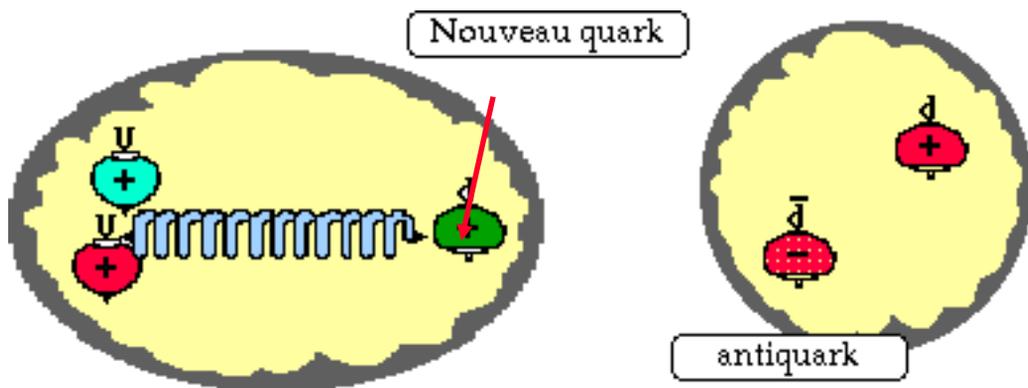
- Confinement des quarks à l'intérieur des hadrons : les quarks ne peuvent pas être libres



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**

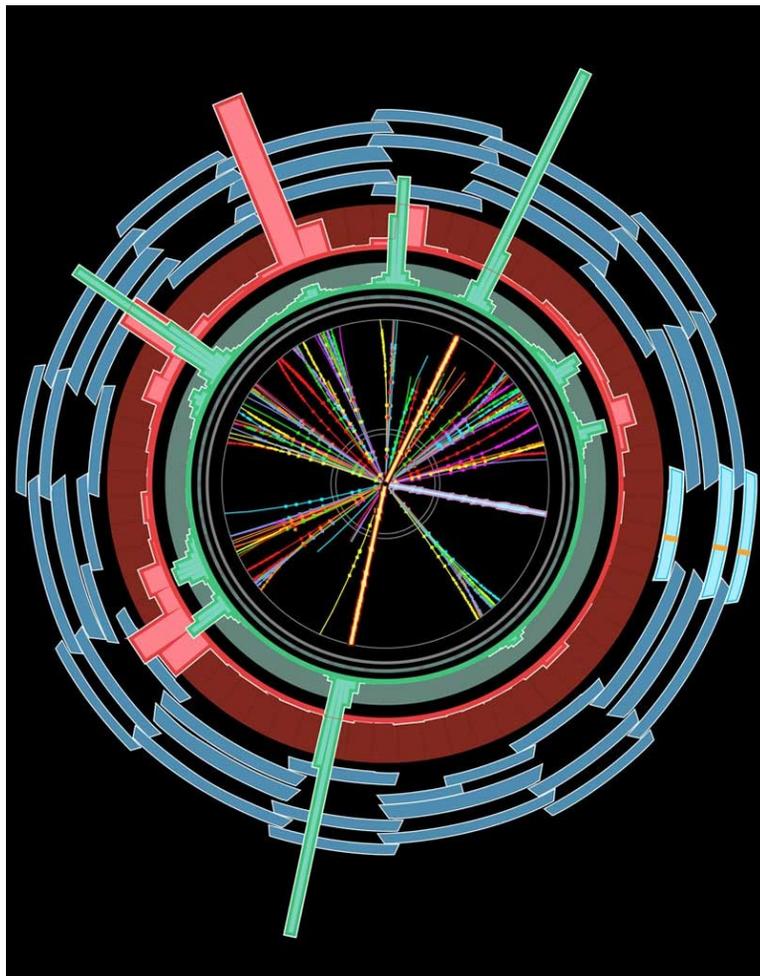


- Hyperactifs, les quarks trouvent toujours un partenaire et ne restent pas célibataires : ils forment des **hadrons**

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

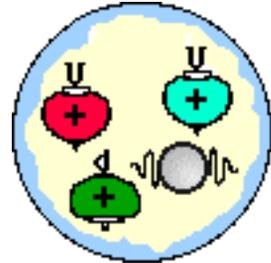
Le proton (uud)

- 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

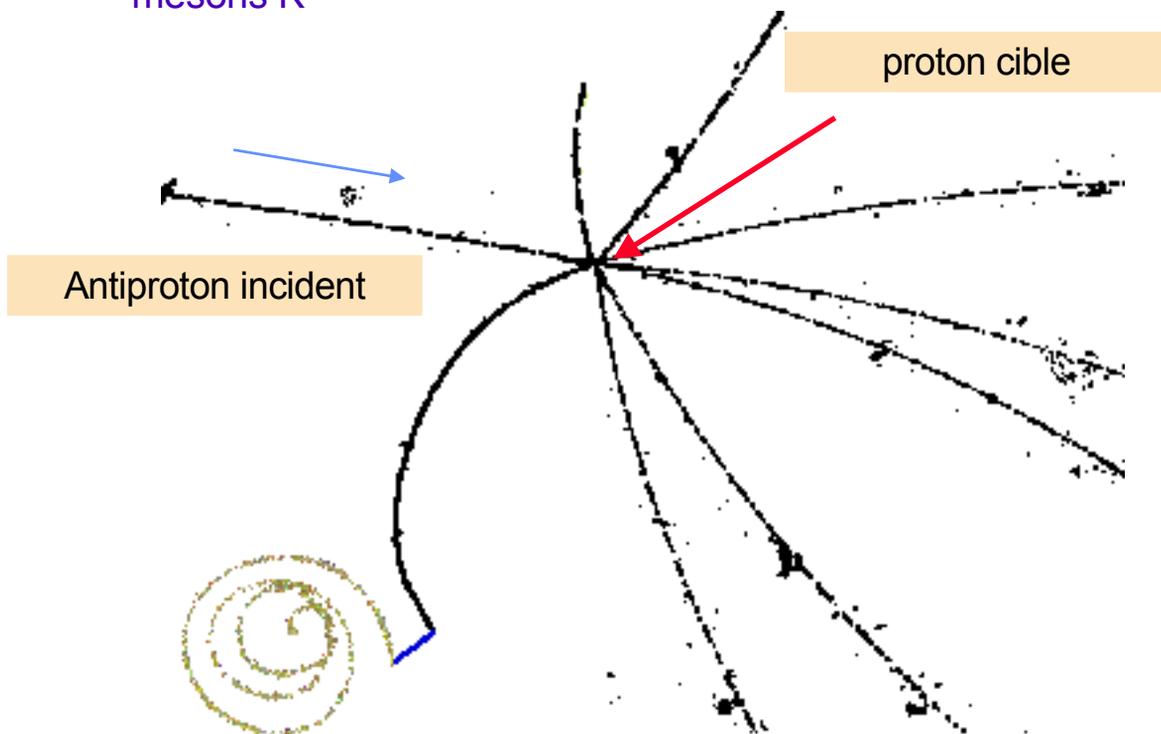
2.4 – Observer les hadrons

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



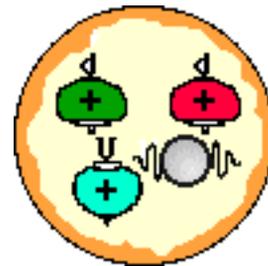
Exemple d'une annihilation produisant 8 mésons chargés

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

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

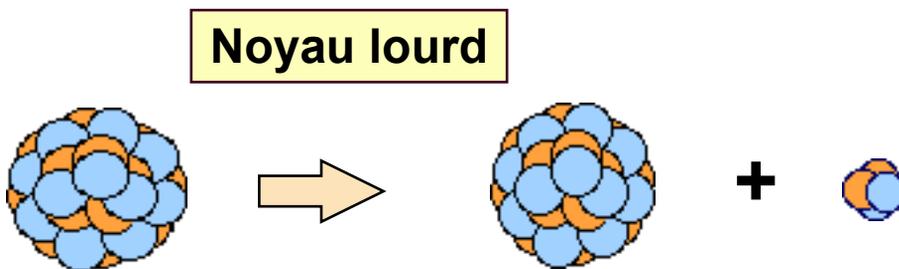


- Il est légèrement instable à l'état libre
 - ▶ Il vit environ 15 minutes. Un Mathusalem comparé aux autres particules !
- On le détecte quand il communique une partie de son énergie à des particules chargées
 - ▶ Il ralentit en rebondissant sur des noyaux
 - ▶ En physique nucléaire, on mesure l'énergie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

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

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

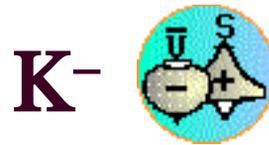
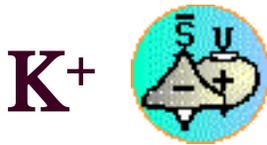
- Parcours moyen

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

2.4 – Observer les hadrons

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

- 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

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

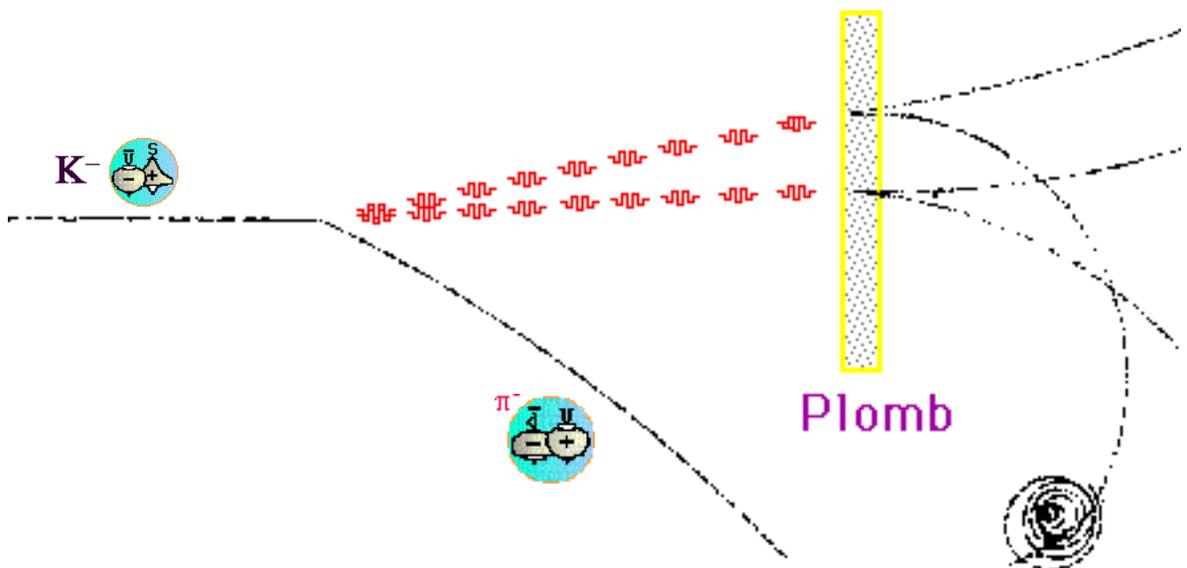
2.4 – Observer les hadrons

Le pion neutre ou méson π^0

- 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

- 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

- 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»

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

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

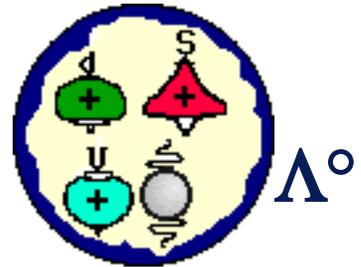
2.4 – Observer les hadrons

Les hyperons

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

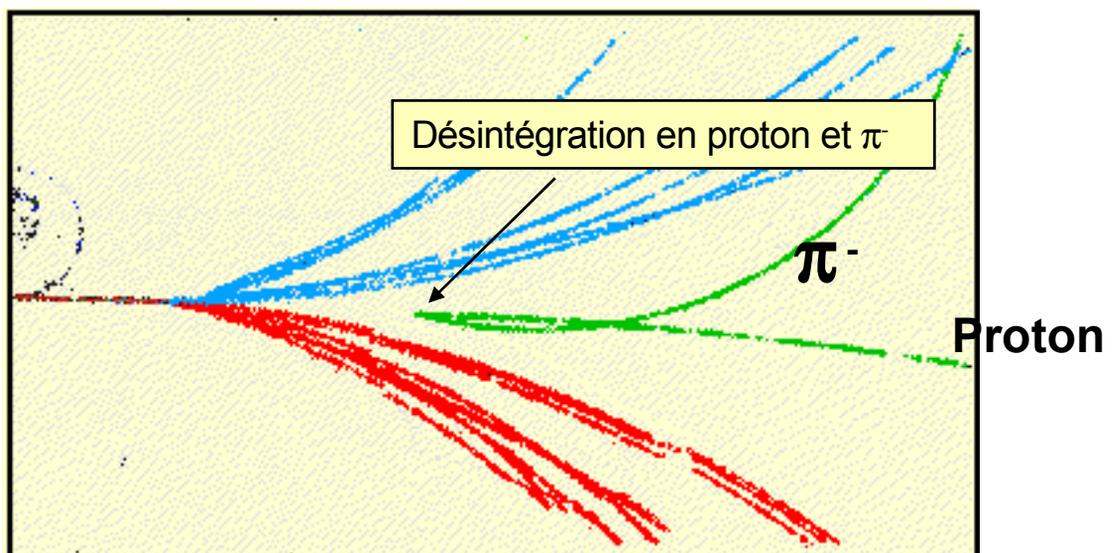
- Exemple du Λ° ou Lambda

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



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

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

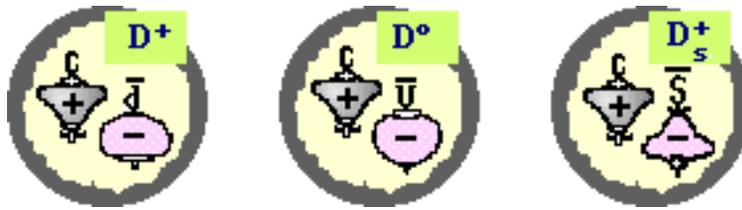


$$\tau = 2.63 \cdot 10^{-10} \text{ s} \text{ et } c\tau = 7.89 \text{ c m}$$

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

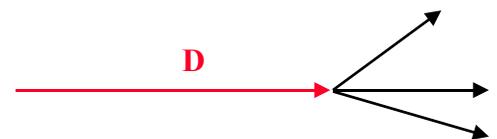
- Masse: environ 1.5 GeV

- ▶ 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 »

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

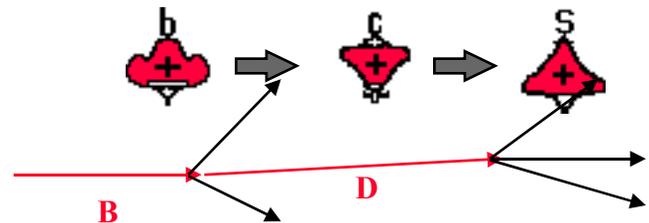


- ▶ Exemple des 3 mésons où le quark **b** est associé avec un anti-quark up, down ou étrange
- Temps de vie courts : de l'ordre de la picoseconde
 - ▶ Détecteurs très précis pour mesurer de courts parcours

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

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

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



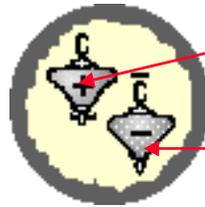
- Masse: environ 5 GeV
 - ▶ Coûteux à produire
- Vertex secondaires et tertiaires
- 20 % des désintégrations produisent directement un muon ou un électron
 - ▶ La « signature » de muons est très utilisée

2.4 – Observer les hadrons

L'exemple du J/psi

- ▣ ... 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
- ▣ Pourquoi le J/psi : en 1974, ...
 - Ting l'appela **J** et Richter **Psi**. L'appellation J/psi ne faisait pas de jaloux.... En anglais « gipsy » veut dire gitane.
- ▣ 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

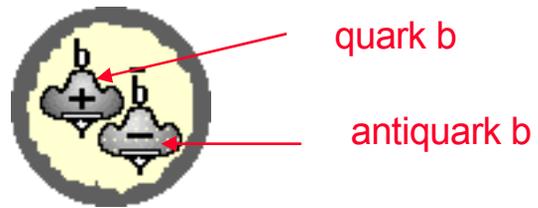
2.4 – Observer les hadrons

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 $B^0\bar{B}^0$
- ▶ La paire de mésons B est produite quasi au repos



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

- ▶ Spécialité autrefois de CLEO à Cornell (USA) et maintenant 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

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

- ▶ 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

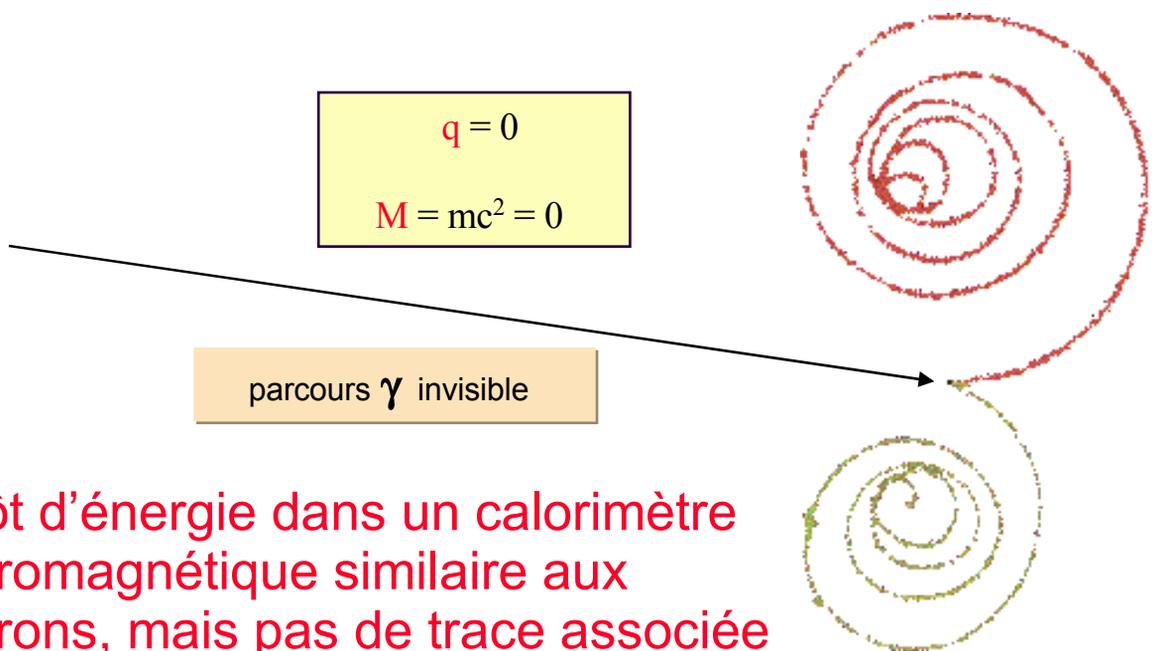
...qui ne sont pas des particules de matière mais vectrices des interactions

- Photons
- Bosons W^+ , W^- et Z^0
- Gluons : jets
- Gravitons ?
- Boson de Higgs ?

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 agit par tout ou rien
 - ▶ Quand il se matérialise, il disparaît
 - ▶ Exemple de la matérialisation en paire électron-positron, dominante à haute énergie



- Dépôt d'énergie dans un calorimètre électromagnétique similaire aux électrons, mais pas de trace associée

2.5 – Observer les bosons

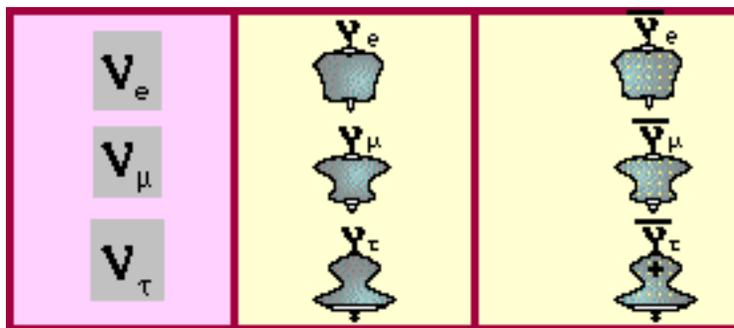
Le boson Z^0



- Une particule beaucoup plus fondamentale que d'autres. Elle véhicule la force faible.
 - ▶ On a construit le LEP pour elle. Elle est produite 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^-

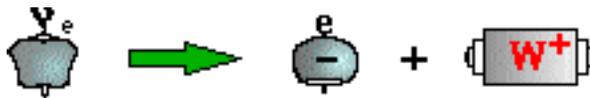


- Partenaires chargés du Z^0 et comme lui particules très fondamentales. Ils véhiculent la force faible
 - ▶ On a construit les anneaux proton-antiproton du CERN pour les découvrir en 1982.
 - ▶ Ils ont été alors observés à quelques exemplaires se désintégrant (dans le cas du W^-) en :
 - **électron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

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

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

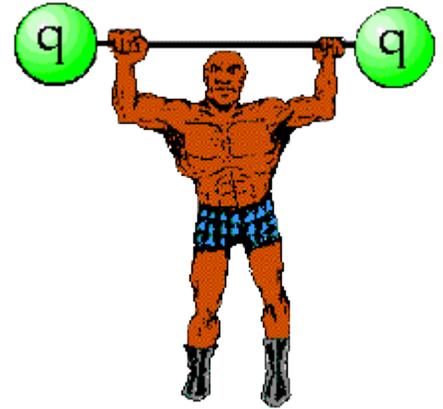
- ▶ Ils se désintègrent aussi très rapidement
- Quand un W intervient, il **change la nature** d'une particule:
 - ▶ Par exemple, il change un neutrino en électron



- Aux énergies très élevées du futur, les W comme le Z^0 seront produits couramment
 - ▶ Au LEP 200 (au dessus de 160 GeV d'énergie) , on a observé depuis 1996 des paires de W

2.5 – Observer les bosons

Les gluons



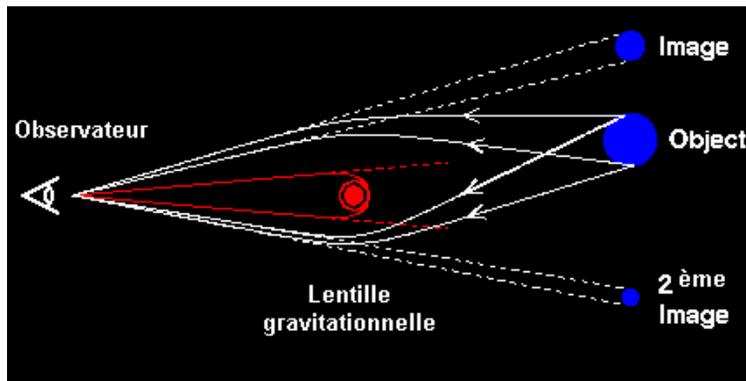
- Ils véhiculent la force forte
- Ils sont eux-mêmes porteurs de **couleur** : ils sont sensibles à la force forte, et peuvent donc interagir avec eux-mêmes !!
 - Ceci est à l'origine des comportements étranges de la chromodynamique quantique (confinement, liberté asymptotique)
- Ils se comporte donc 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

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



- Le messenger 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.

- 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
= dimension d'un atome pour une distance terre-soleil !

10^{-21}

2.5 – Observer les bosons

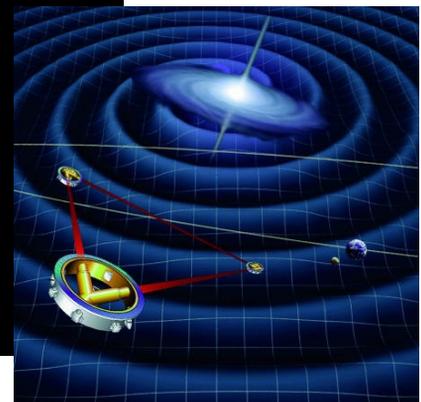
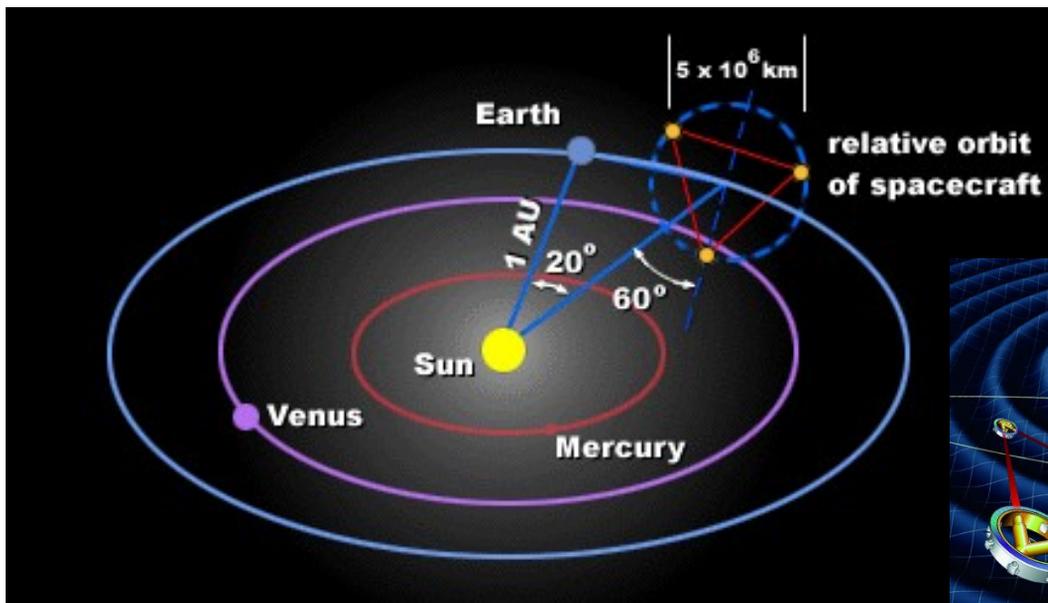
Les gravitons?

- **Projet Virgo (2005) : un interféromètre de 3km !**



Vue de Virgo, près de Pise

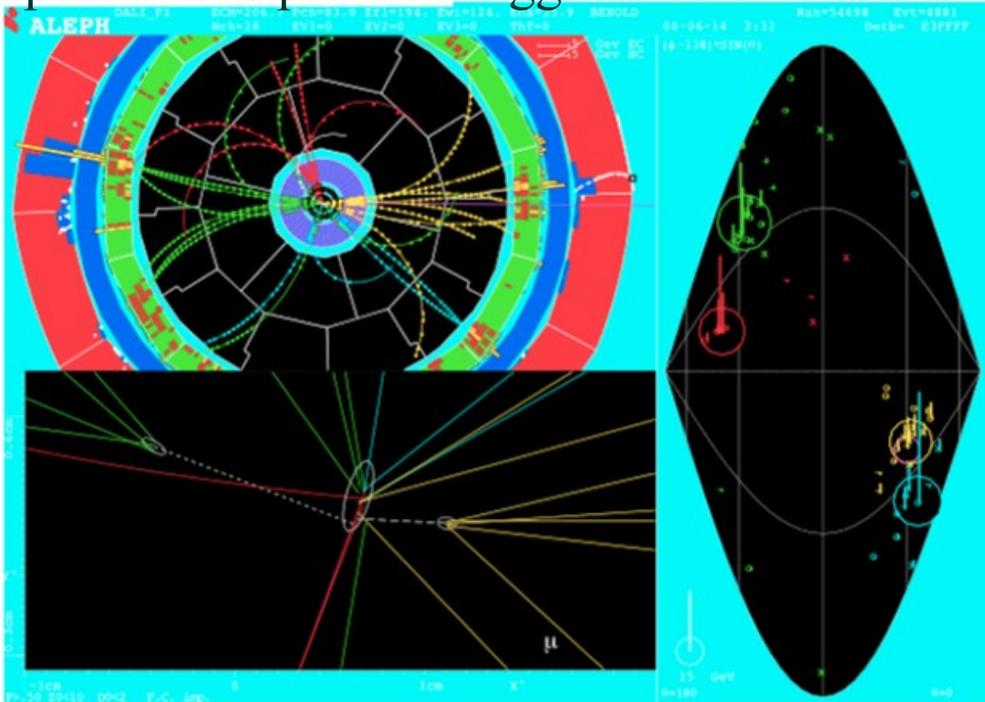
- **Projet LISA (2015?) : un interféromètre de Michelson géant**
 - ▶ Détecter des changements de distance inférieurs à la taille d'un atome entre des satellites distants de 5 millions de km



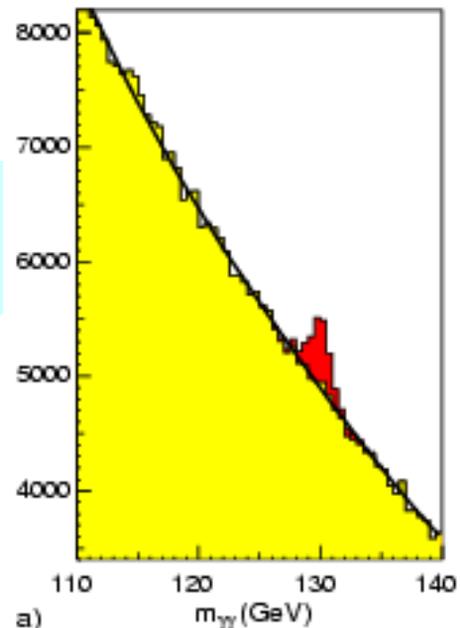
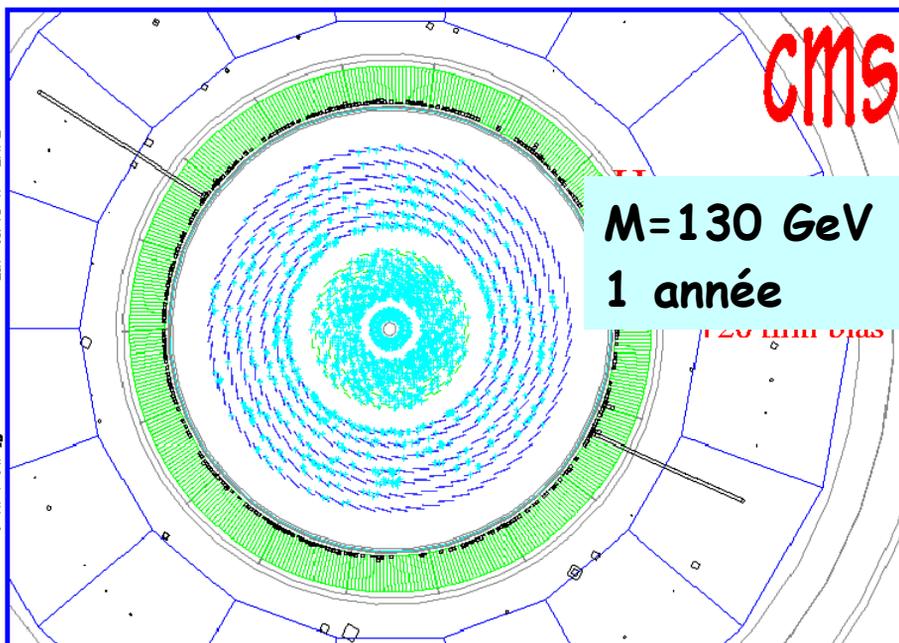
2.5 – Observer les bosons

Le boson de Higgs ?

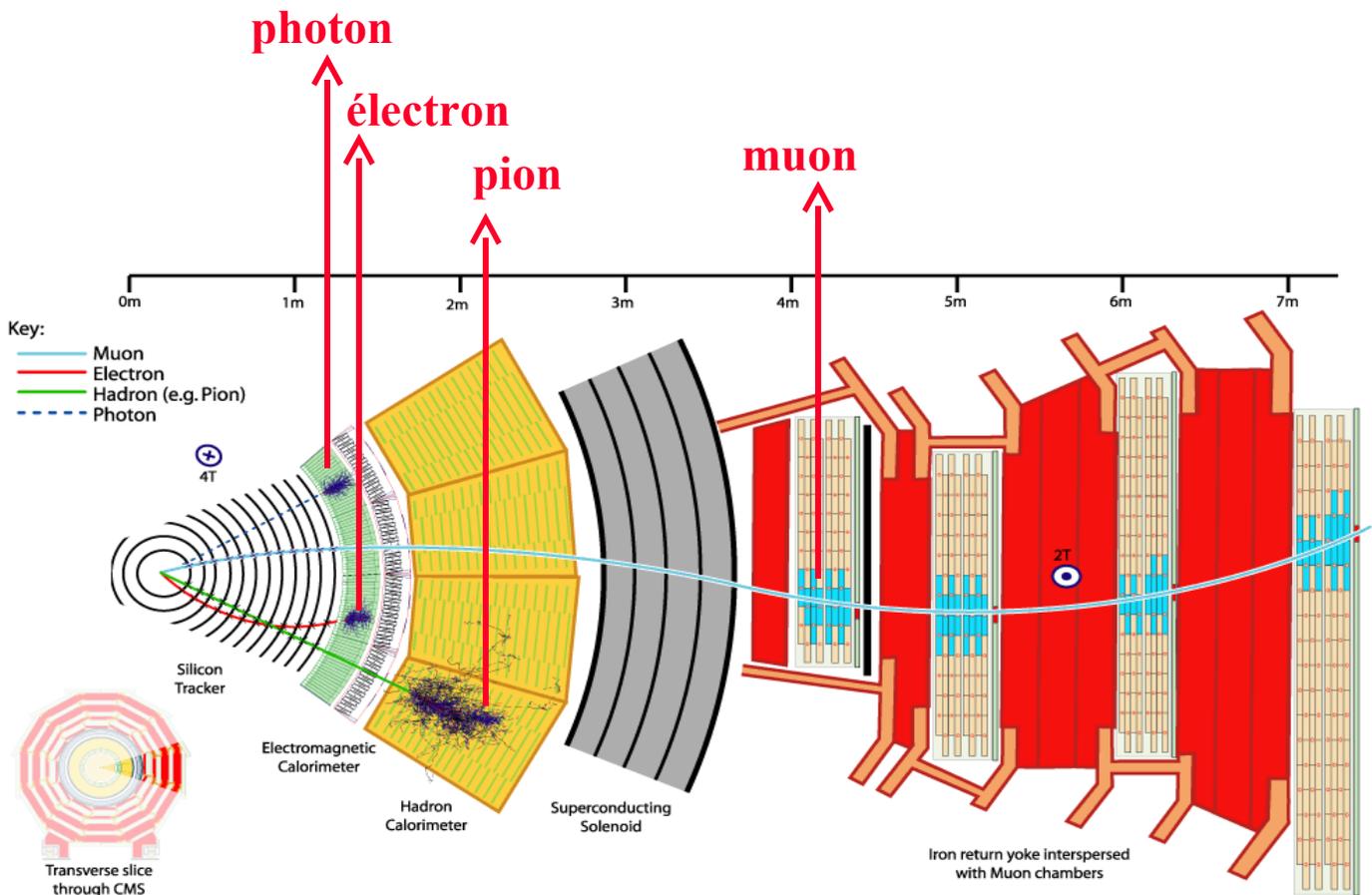
- LEP : peut-être le premier Higgs ... ou bruit de fond



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



Bilan : les particules dans un détecteur



Ce qui reste pour faire la conservation de l'impulsion transverse est donnée aux **neutrinos**, donc intérêt à un détecteur hermétique ...