

# 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><b>CHARM QUARK</b> CATEGORY: Quarks</p>		<p><b>THE WHOLE ZOO of 36 particles (WITH antiparticles):</b> 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 <b>\$345 + shipping</b></p>
	<p><b>BOTTOM QUARK</b> CATEGORY: Quarks</p>		<p><b>ANTIPARTICLE 14-pack:</b> Antiproton, Antineutron, Positron, Antimuon, Antitau, Antiup Quark, Antidown Quark, Antistrange Quark, Anticharm Quark, Antibottom Quark, Antitop Quark <b>\$130 + Shipping</b></p>
	<p><b>TOP QUARK</b> CATEGORY: Quarks</p>		<p><b>ANTIQUARK 6-pack:</b> Antiup Quark, Antidown Quark, Antistrange Quark, Anticharm Quark, Antibottom Quark, Antitop Quark <b>\$55.50 + Shipping</b></p>
	<p><b>CUSTOM PARTICLES</b></p>		

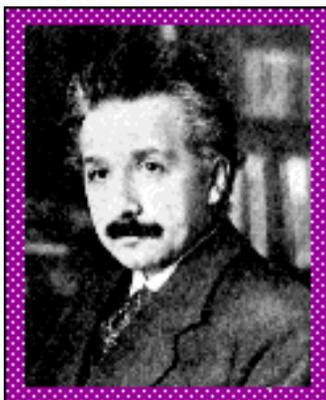
Quark, Antibottom Quark  
**\$345 + shipping**

## § 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 :  $\beta = v/c$ 
  - ▶  $\beta$  est compris entre 0 et 1
  - ▶ dans notre monde habituel,  $\beta$  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

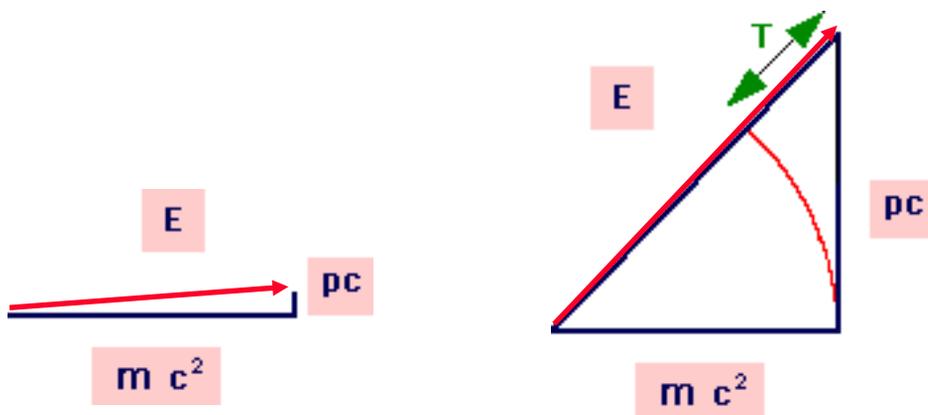
- L'énergie totale  $E$  d'une particule est la somme de :
  - ▶ son énergie interne (ou de masse)  $M = mc^2$
  - ▶ son énergie cinétique  $T$ 
    - à petite vitesse :  $T = \frac{1}{2} m v^2$
    - à grande vitesse :  $T = (\Gamma - 1) m c^2$

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

- $E$  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

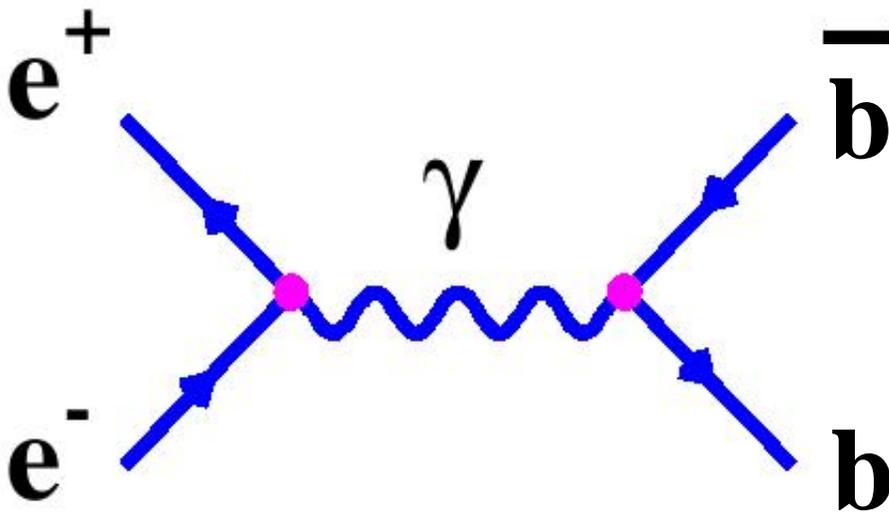
#### ■ Mesures

- 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:

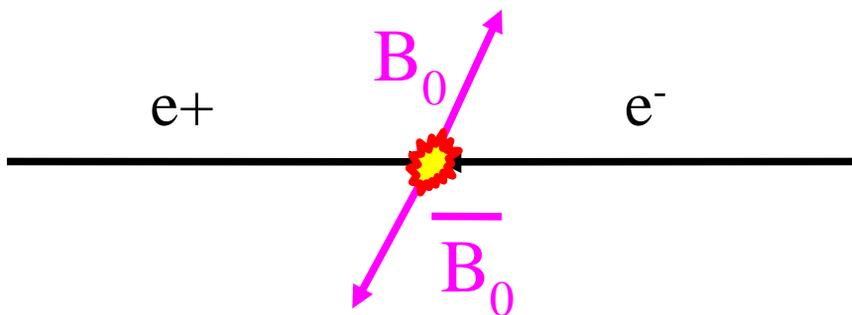
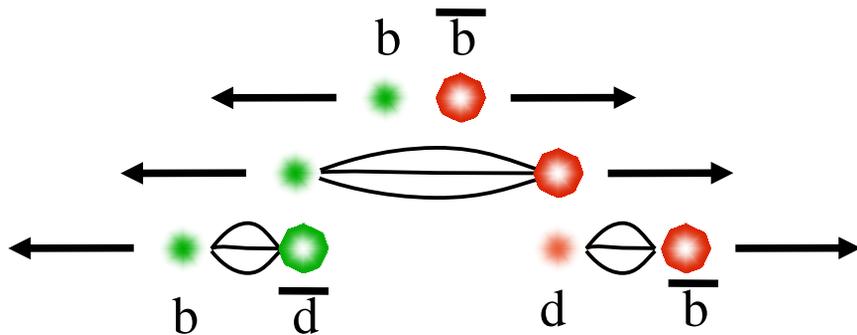
▶ ils s'habillent (s'hadronisent)

▶ le type de hadron créé

- est variable
- la loi de probabilité dépend de l'énergie

▶ ici: mésons beaux

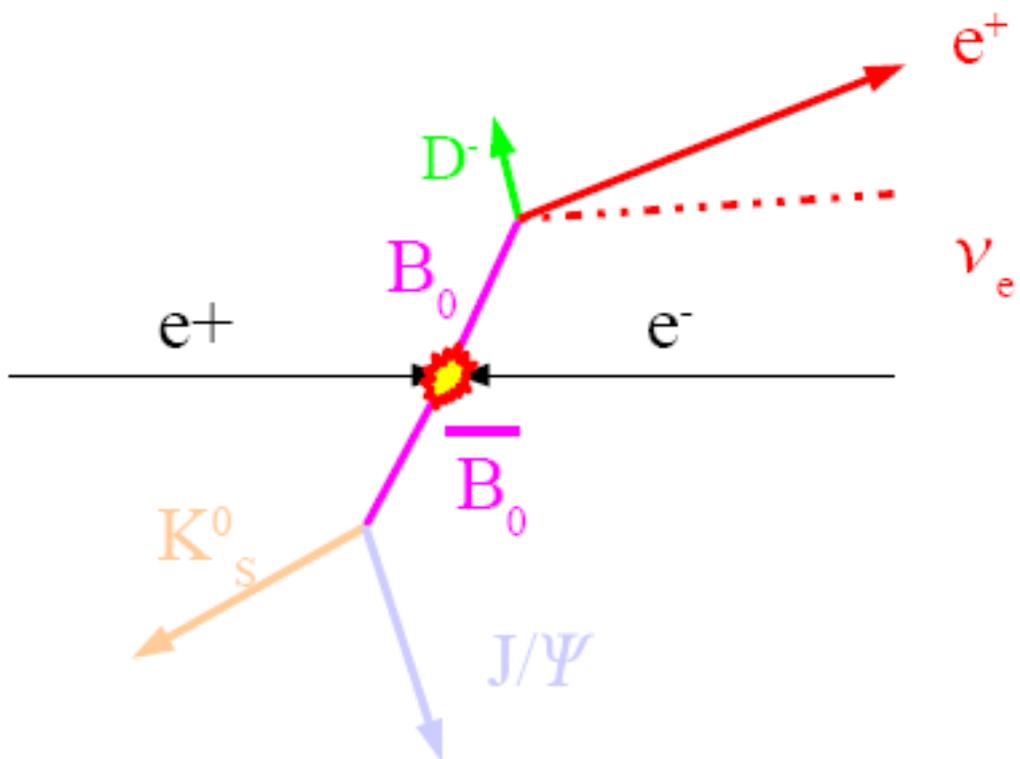
- $B_0 = d\bar{b}$
- $\bar{B}_0 = \bar{d}b$



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

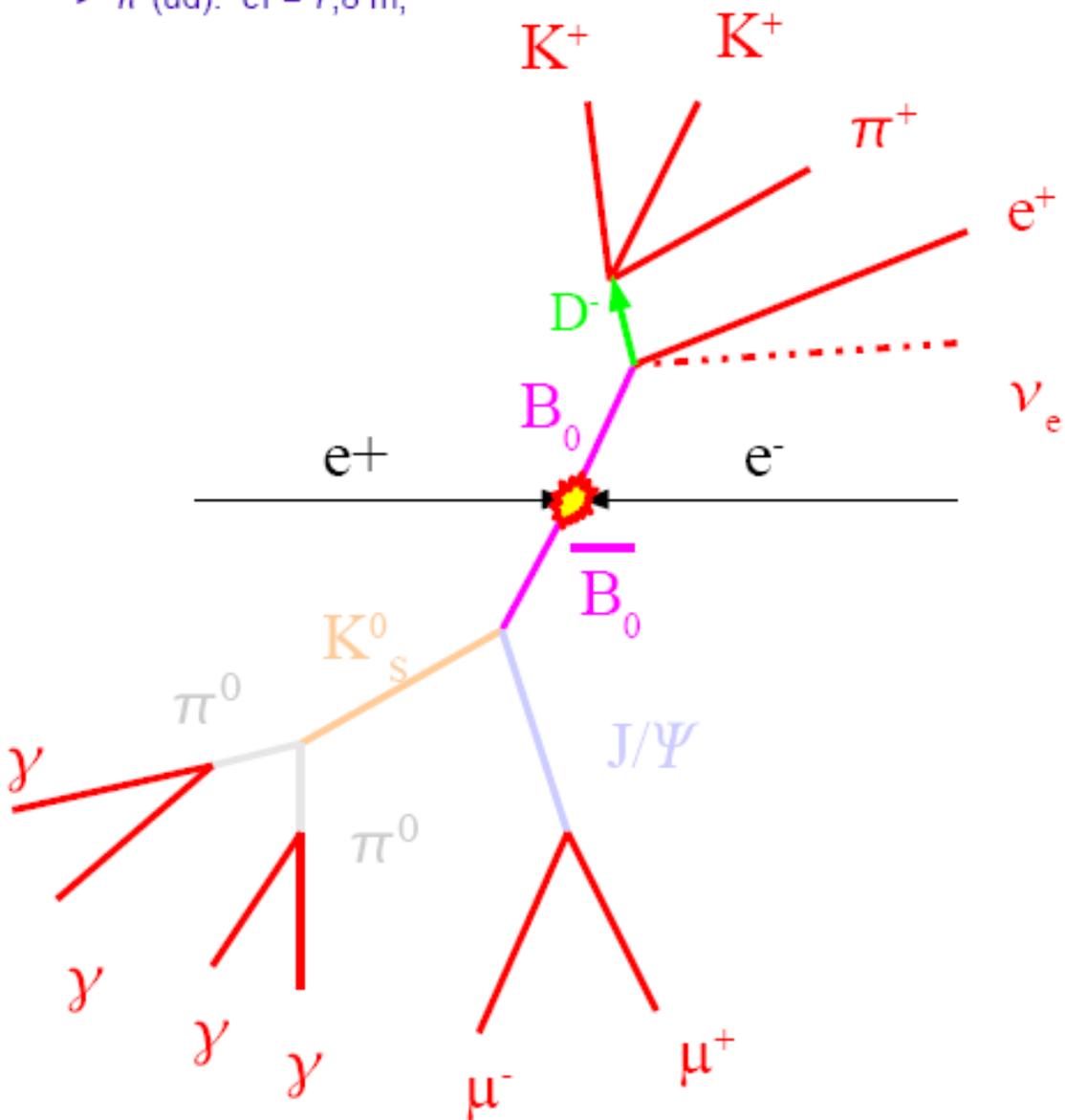


## 2.2 – Les observables des particules

### 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:

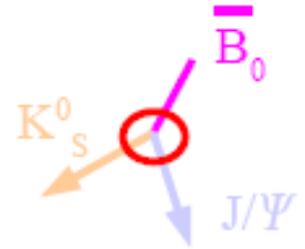
- Les quarks b ont été produits ici par interaction électromagnétique
  - ▶ conservation du type des particules : production par paires
  
- Une fois créés, les quarks se séparent et s'hadronisent
  - ▶ les hadrons formés sont des hadrons « beaux » (contenant un b)
  - ▶ ces derniers sont lourds et instables, 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

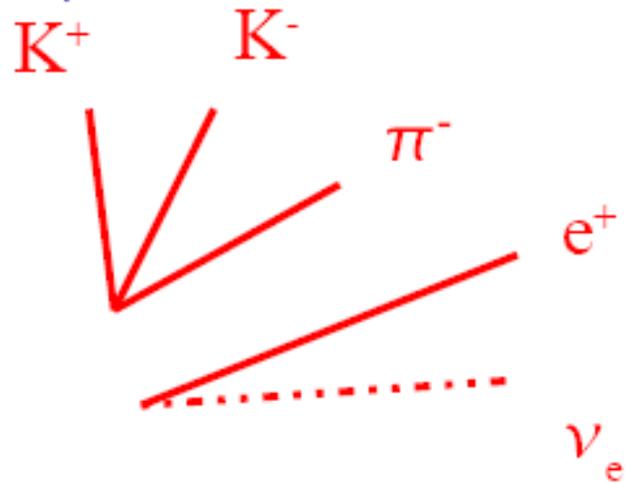


## 2.2 – Les observables des particules

### 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

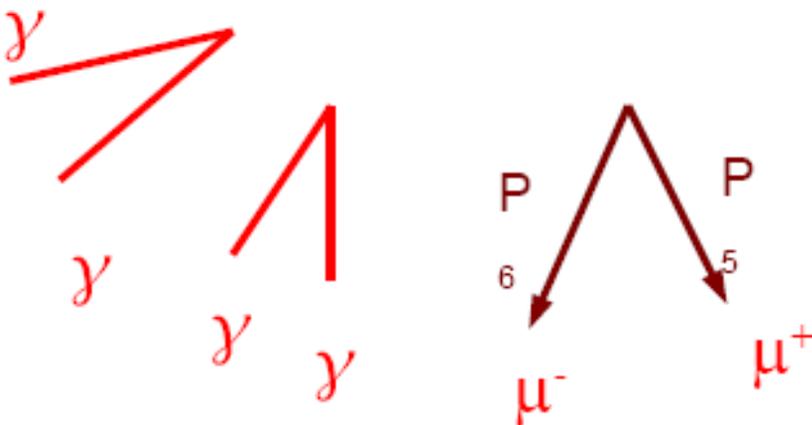
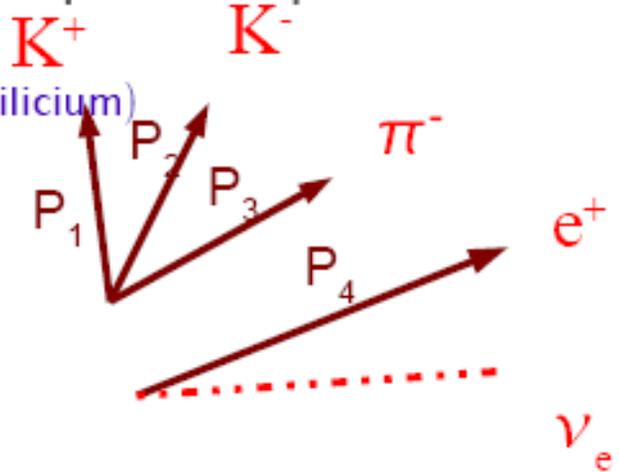


## 2.2 – Les observables des particules

### 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)

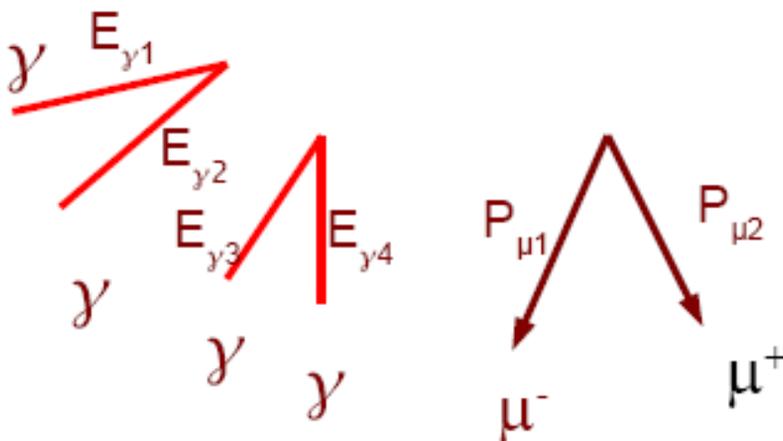
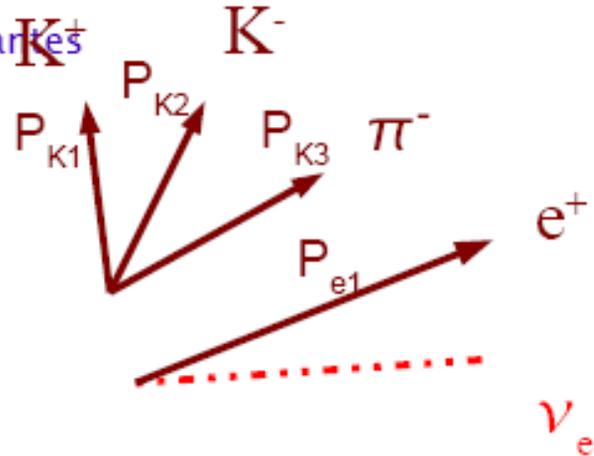


## 2.2 – Les observables des particules

### Un exemple:

Ce qu'on mesure:

- ▣ La nature des particules chargées :  $K, \pi, e, p$ 
  - 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:

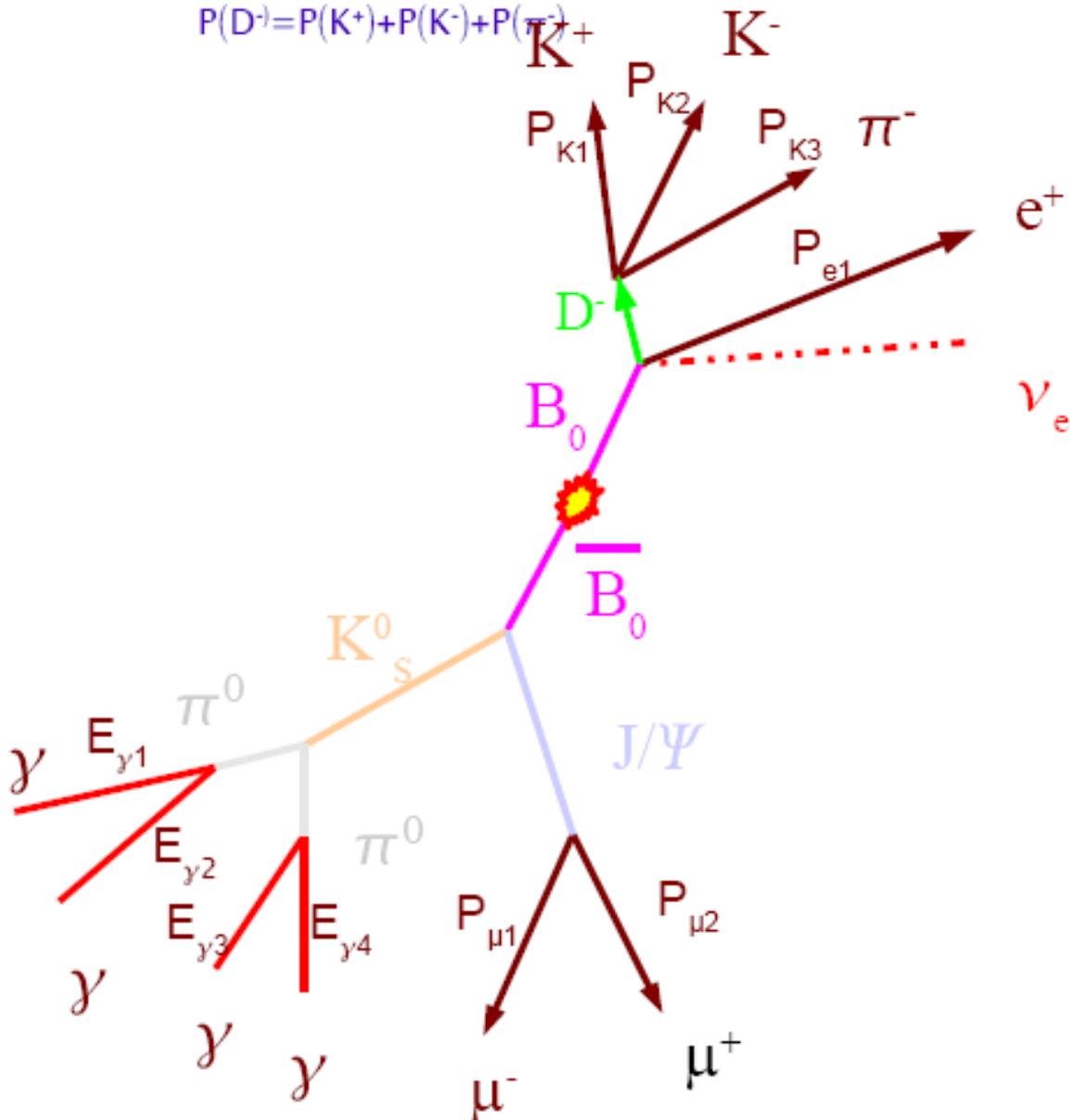
Ce qu'on mesure:

- 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  $\pi^-$  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 <sup>2</sup> )	temps de vie (ct)
▶ e <sup>±</sup>	0.000511	stable
▶ μ <sup>±</sup>	0.106	658 m
▶ π <sup>±</sup>	0.140	7,8 m
▶ K <sup>±</sup>	0.494	3,7 m
▶ Protons	0.938	stable
▪ Liste des particules neutres à séparer		
▶ γ	0	stable
▶ π <sup>0</sup>	0.135	25 nm
▶ K <sup>0</sup>	0.498	2,5 cm / 15,3 m
▶ Hypérons Λ <sup>0</sup>	1.116	7,9 cm
▶ neutrons	0.940	2,7.10 <sup>11</sup> 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,  $\mu$ ,  $\pi$ , 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

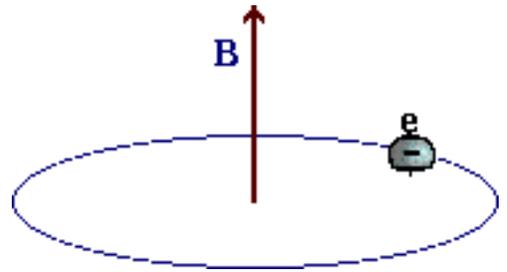
- Toutes les particules « visibles » le sont par leur interaction avec la matière
  - ▶ Beaucoup de principes physiques différents dont la majorité sont de nature **électromagnétique**
    - rayonnement de freinage
    - création de paires
    - effet cerenkov
    - rayonnement de transition...
  - ▶ 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)

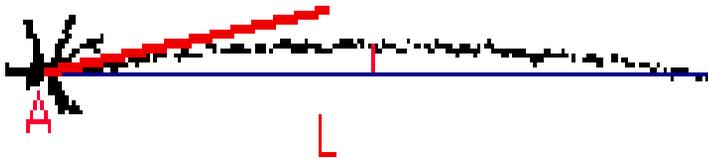
## 2.2 – Les observables des particules

### Masse, quantité de mouvement et énergie

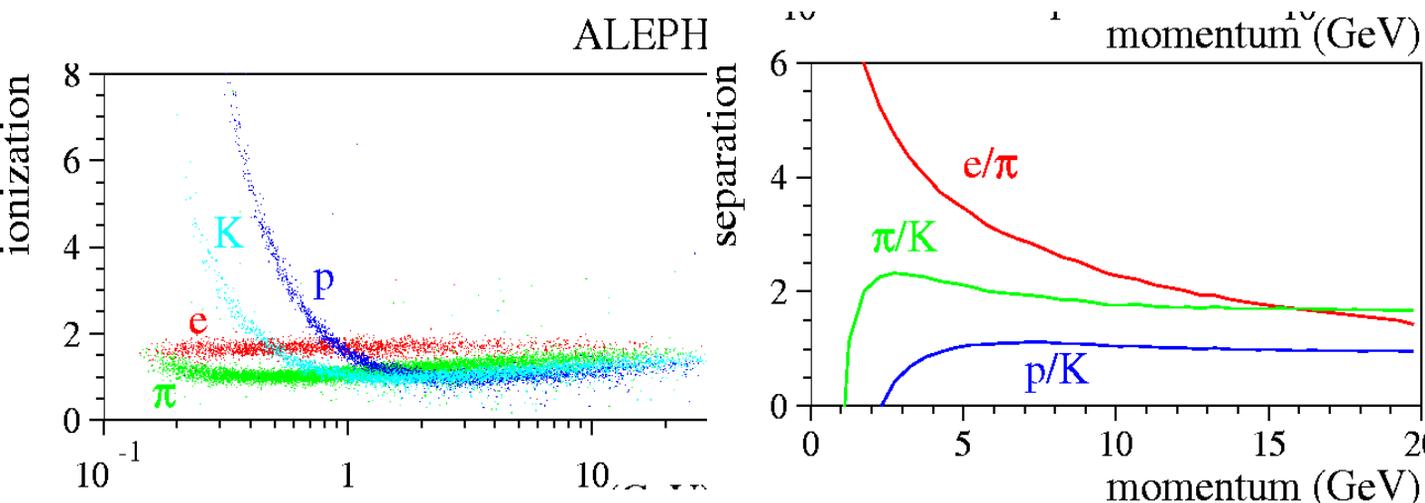
- La quantité de mouvement  $P$  d'une particule chargée se mesure à partir du rayon de courbure  $R$  de sa trajectoire (hélice) dans un champ magnétique

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

- 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

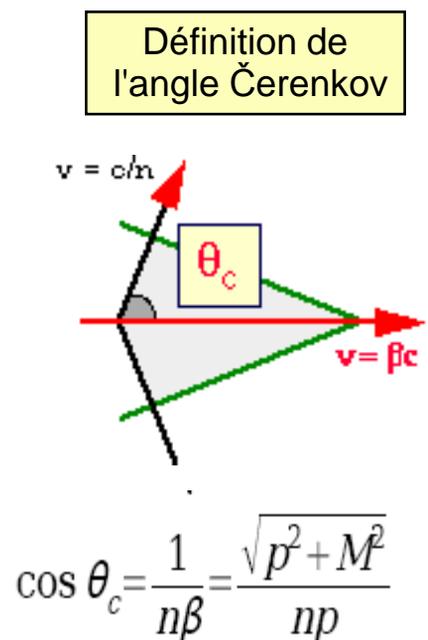
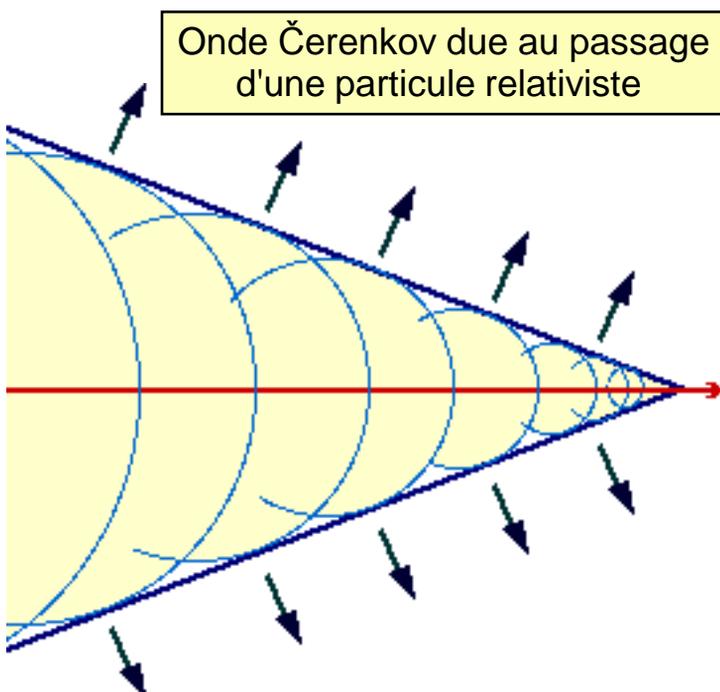




## 3.4 - Les fonctions des détecteurs

### 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

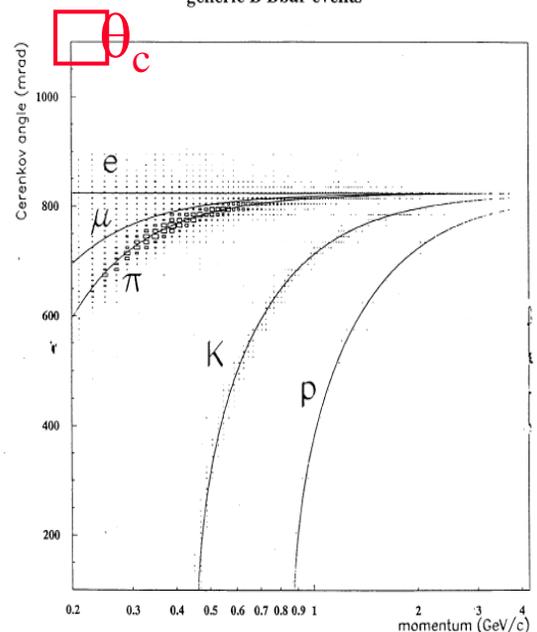
### Identification : effet Čerenkov (2)

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  $\theta_c$  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

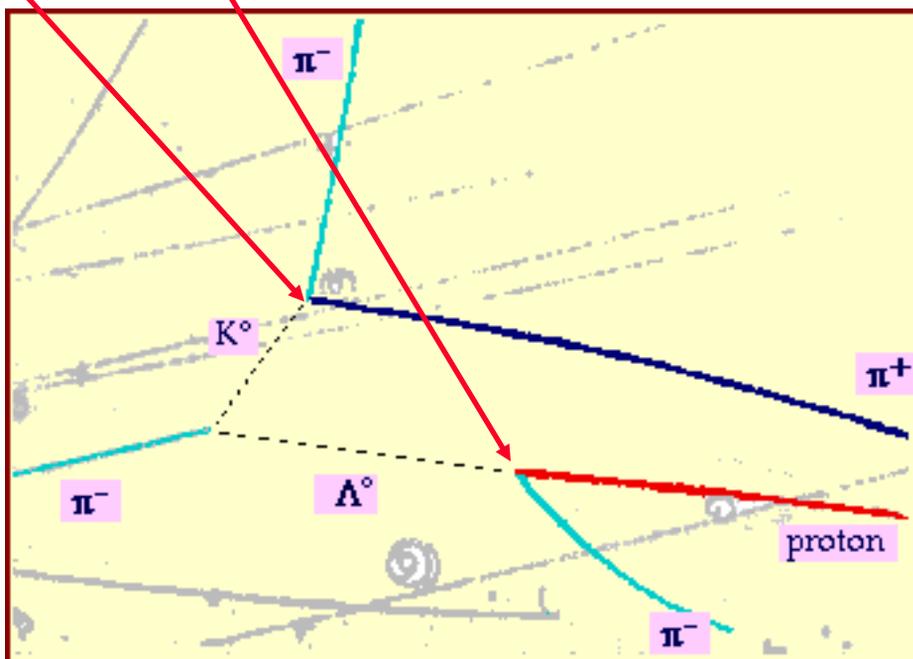
- Effet de seuil : pas de lumière Čerenkov au dessous d'une certaine impulsion (Ex. d'un proton de 10 GeV)
  - Au dessus, angle d'ouverture  $\theta_c$  petit
- On **combine** des Čerenkov liquides et gazeux pour identifier dans un domaine étendu d'impulsion

## 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  $\Lambda^0$ 
  - ▶ Le  $K^0$  "court" se désintègre
    - en  $\pi^+\pi^-$  (66% des cas)
    - en  $\pi^0\pi^0$  (33% des cas)
  - ▶ Le  $\Lambda^0$  se désintègre dans
    - en **proton**+ $\pi^-$  (66% des cas)
    - en **neutron**+ $\pi^0$  (33% des cas)

Cliché de chambre à bulles montrant la désintégration d'un  $K^0$  et d'un  $\Lambda^0$  produits lors de l'interaction d'un méson  $\pi^-$  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><b>FERMIONS</b></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><b>électron</b></p> <p>Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.</p>	<p><b>neutrino électron</b></p> <p>Sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant.</p>	<p><b>bas (down)</b></p> <p>Sa charge électrique est -1/3. Le proton en contient un, le neutron deux.</p>	<p><b>haut (up)</b></p> <p>Sa charge électrique est +2/3. Le proton en contient deux, le neutron un.</p>
	<p><b>muon</b></p> <p>Un compagnon plus massif de l'électron.</p>	<p><b>neutrino muon</b></p> <p>Propriétés similaires à celles du neutrino électron.</p>	<p><b>étrange (strange)</b></p> <p>Un compagnon plus lourd du "bas".</p>	<p><b>charm (charm)</b></p> <p>Un compagnon plus lourd du "haut".</p>
	<p><b>tau</b></p> <p>Encore plus lourd.</p>	<p><b>neutrino tau</b></p> <p>Propriétés similaires à celles du neutrino électron.</p>	<p><b>beauté (beauty)</b></p> <p>Encore plus lourd.</p>	<p><b>sommet (top)</b></p> <p>Le dernier quark observé (en 1994)</p>

**BOSONS**

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

<p><b>photon</b></p> <p>Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.</p>	<p><b>gluon</b></p> <p>Porteur de la force forte entre quarks.</p>	<p><b>bosons vecteurs</b></p> <p>Porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive.</p>	<p><b>Graviton</b></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  $\mu^-$ ,  $\mu^+$
  - 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).

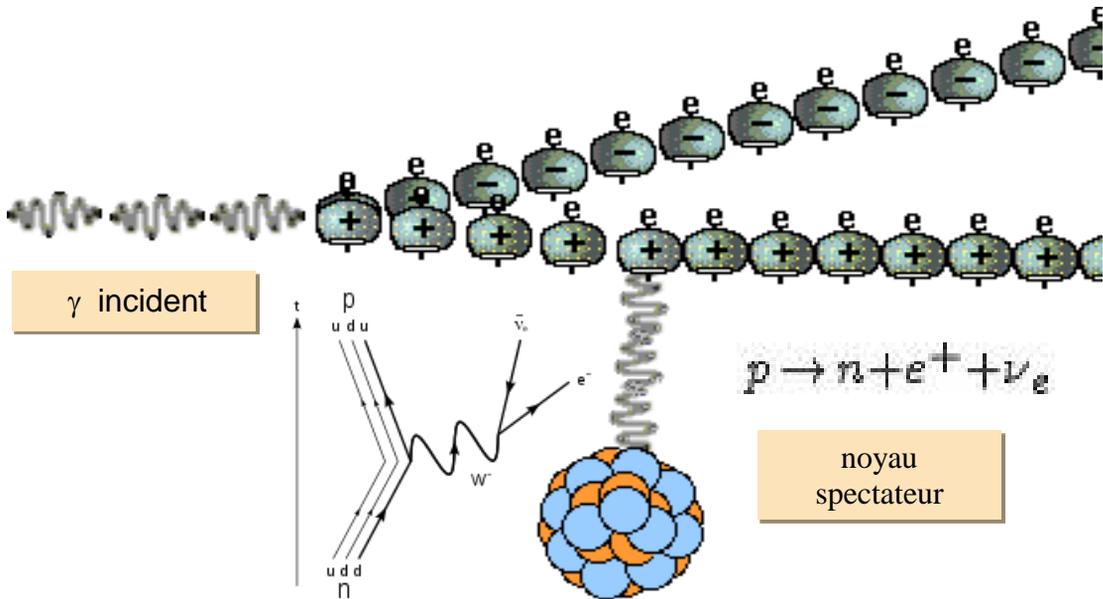
## 2.3 – Observer les leptons

### Le positron

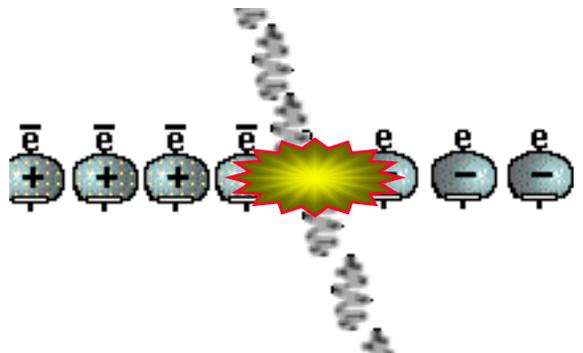
- Électron "positif", le positron est l'antiparticule de l'électron



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



- 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: $\mu^-$ et $\mu^+$

- Un électron ou un positron massif

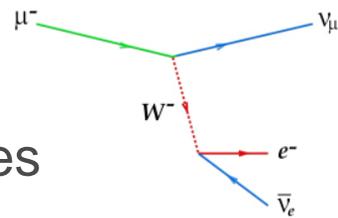


$$M_{\mu} = mc^2 = 0.106 \text{ GeV} = 200 \text{ M(électron)}$$

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

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

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

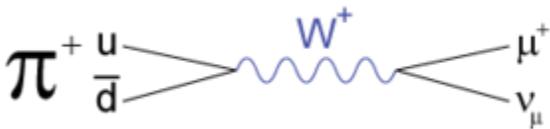


- Le muon parcourt facilement des kilomètres

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

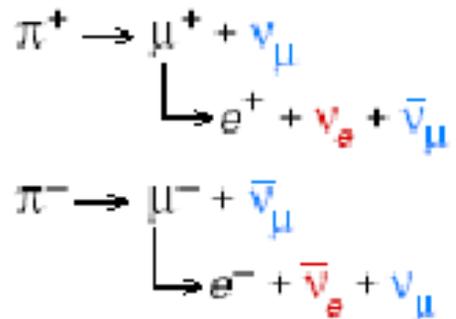
- source principale: désintégration pions  $\pi^- / \pi^+$

- 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



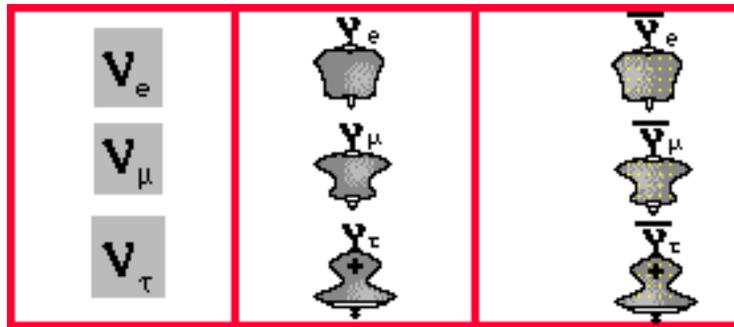
- Très pénétrant :

- 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**



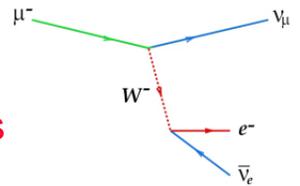
- Ces neutrinos qui nous traversent en permanence sont « mous » et interagissent très peu
  - 65 milliards par  $\text{cm}^2$  nous traversent chaque seconde !
- D'autres neutrinos plus énergiques proviennent de gerbes cosmiques, ou sont produits par des accélérateurs

## 2.3 – Observer les leptons

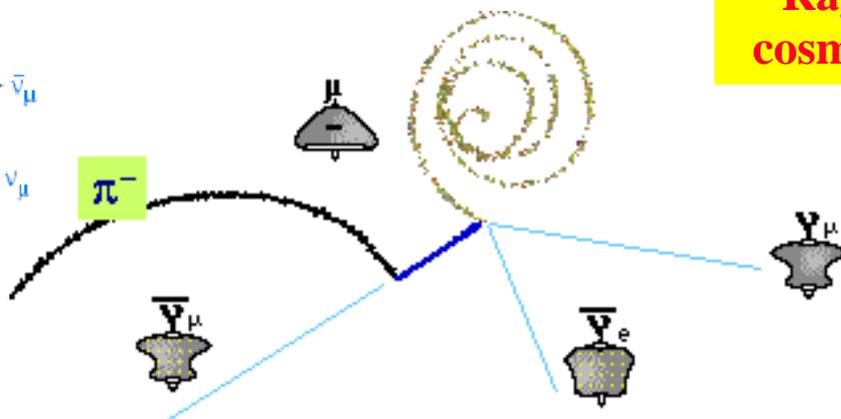
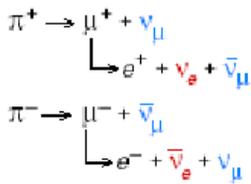
### Le neutrino - mu



- 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  $\pi^-$  fournit un antineutrino-mu, puis un neutrino-mu et un antineutrino-e



Atmospheric neutrino source



**Désintégration en cascade d'un méson  $\pi^-$  en  $\mu^-$  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

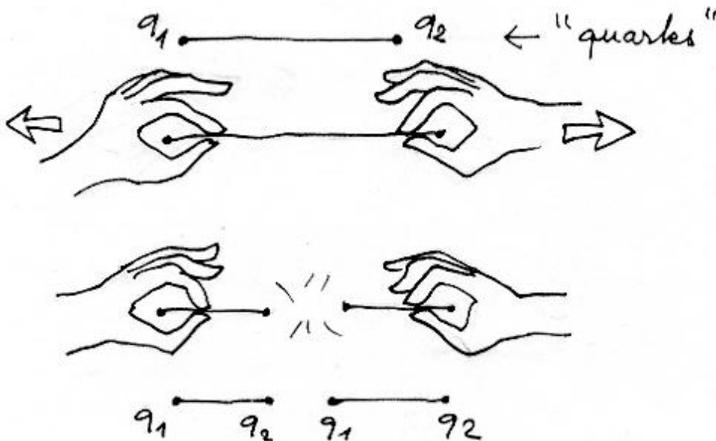
### La chromodynamique quantique

- 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



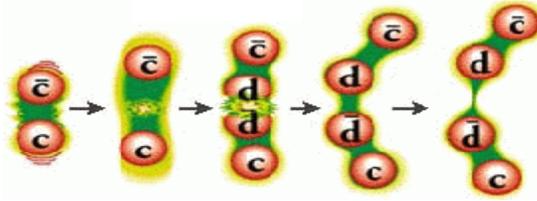
D. Gross, H. Politzer  
et F. Wilczek  
Prix Nobel 2004

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

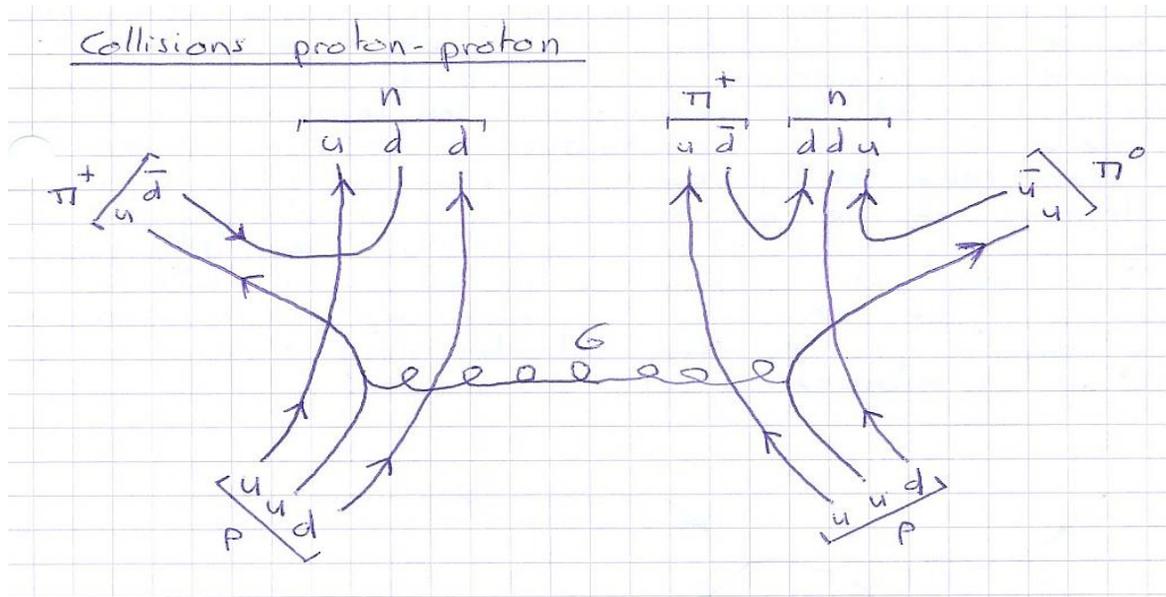


## 2.4 – Observer les hadrons

### Assemblages quarks/antiquarks/gluons



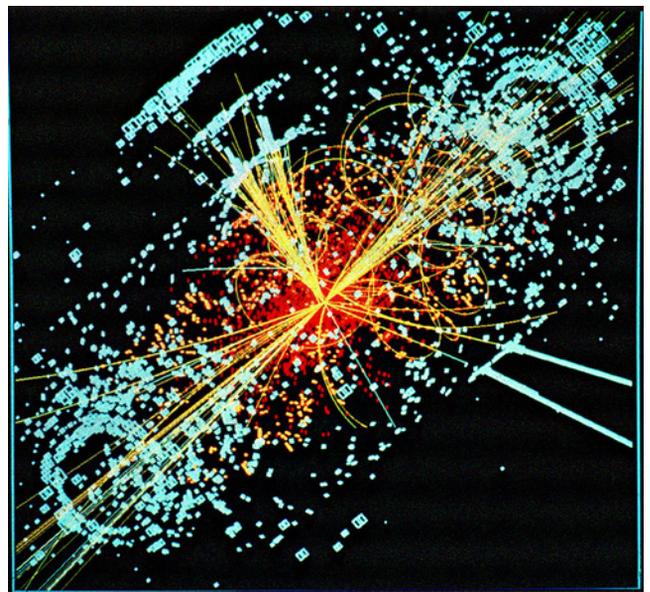
- Lors d'une violente collision, il arrive qu'un quark soit éjecté
- Il subit alors un rappel extrêmement fort
  - Il ne va pas sortir seul du volume où il était confiné
- Un gluon qui s'échange se matérialise en chemin en un quark et son anti-quark
  - ▶ Le nouveau quark se recombine avec les anciens 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

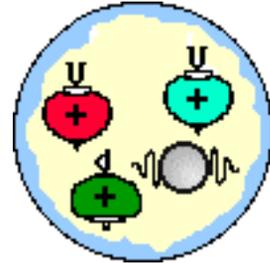
### Le proton (uud)

- 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  $\pi$  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

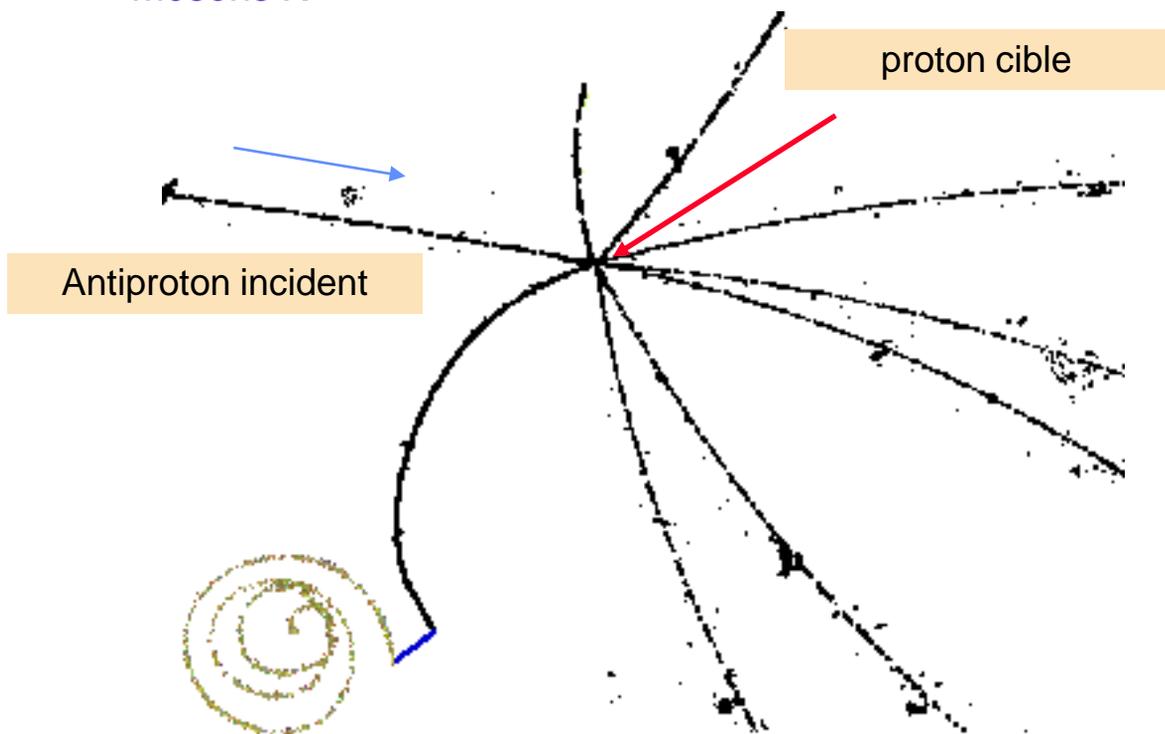
## 2.4 – Observer les hadrons

### 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  $\pi$  et aussi des mésons K



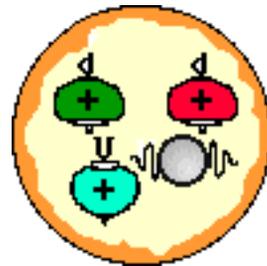
**Exemple d'une annihilation produisant 8 mésons chargés**

## 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

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

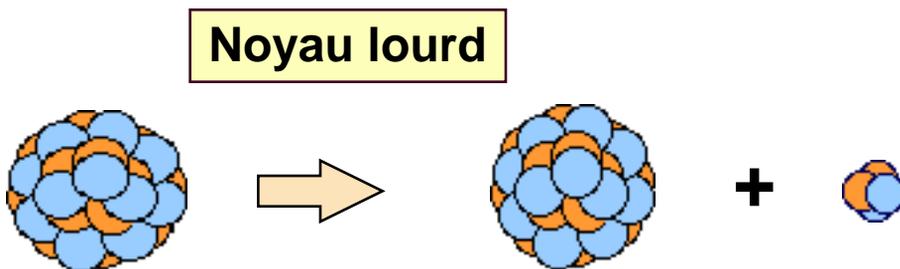


- Il est légèrement instable à l'état libre
  - ▶ Il vit environ 15 minutes. Un Matusalem comparé aux autres particules !
- On le détecte quand il communique une partie de son énergie à des particules chargées
  - ▶ Il ralentit en rebondissant sur des noyaux
  - ▶ En physique nucléaire, on mesure l'énergie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

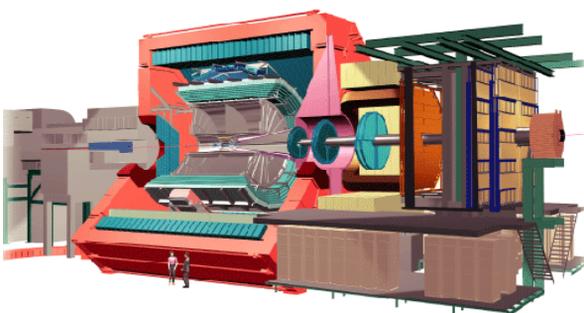
## 2.4 – Observer les hadrons

### Particules alpha et noyaux

- Les particules  $\alpha$  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  $\alpha$



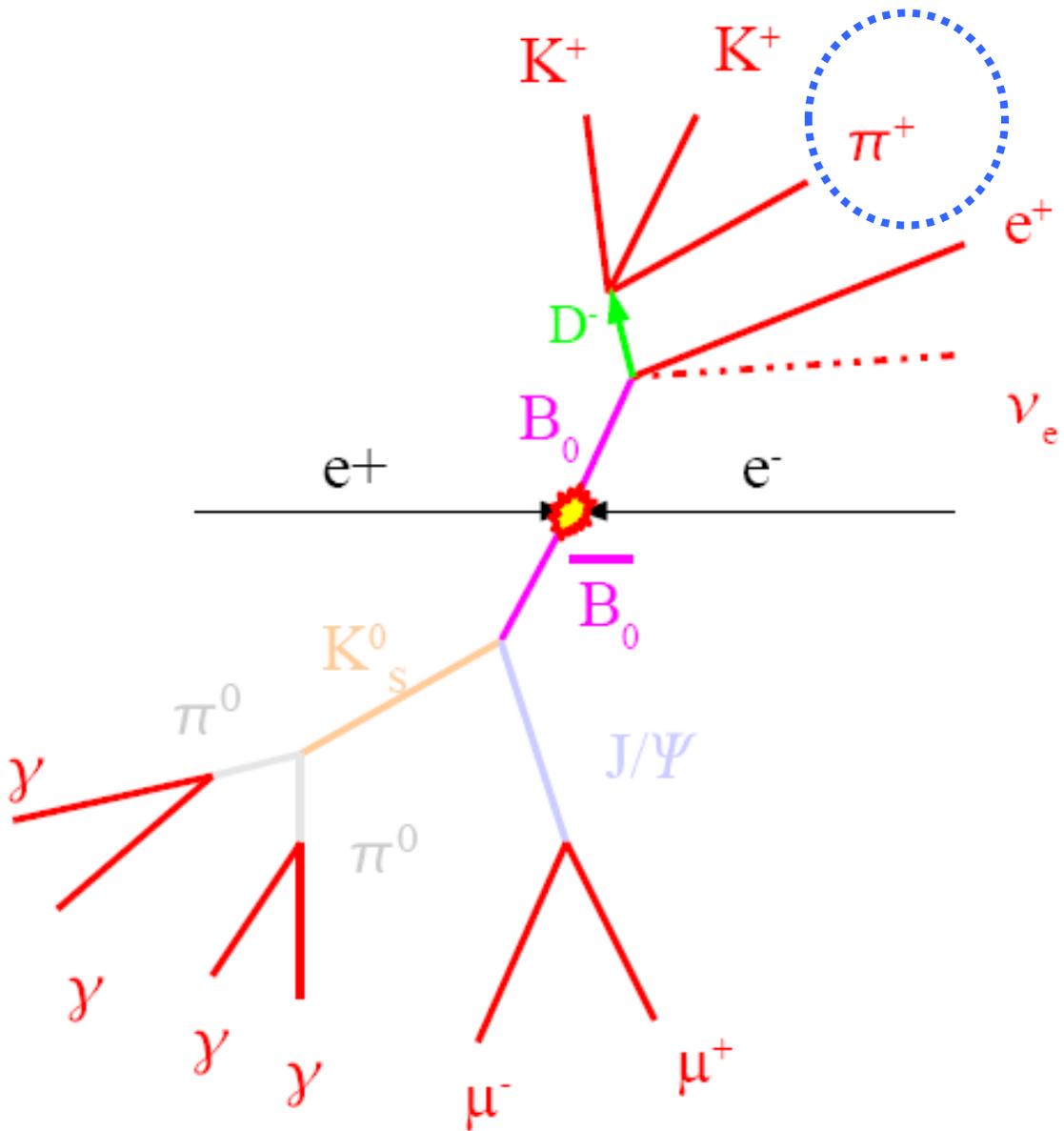
- Les noyaux commencent à être utilisés dans des collisionneurs
  - ▶ Un des buts des collisions noyau-noyau est d'étudier la matière nucléaire à haute température et forte pression
  - ▶ Le problème est d'éplucher les atomes de leurs électrons avant de les accélérer



*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

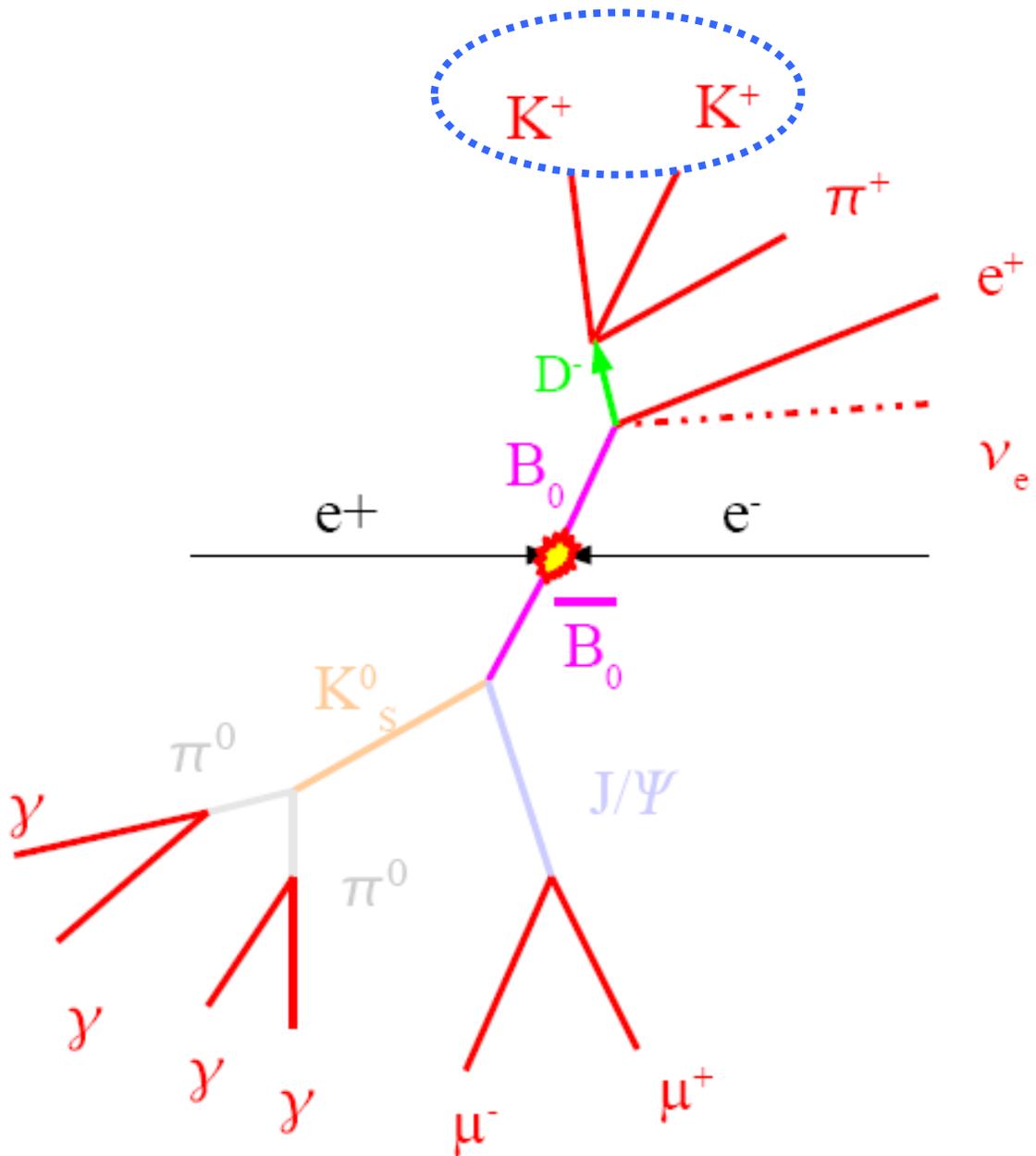
$$\tau = 2.60 \cdot 10^{-8} \text{ s} \quad \text{et} \quad c\tau = 7.8 \text{ m}$$

- Parcours moyen

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

## 2.4 – Observer les hadrons

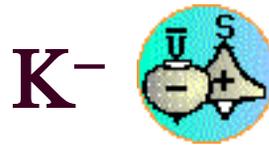
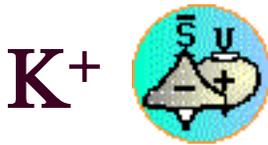
### Le kaon chargé ou méson $K^{+/-}$ (us)



## 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

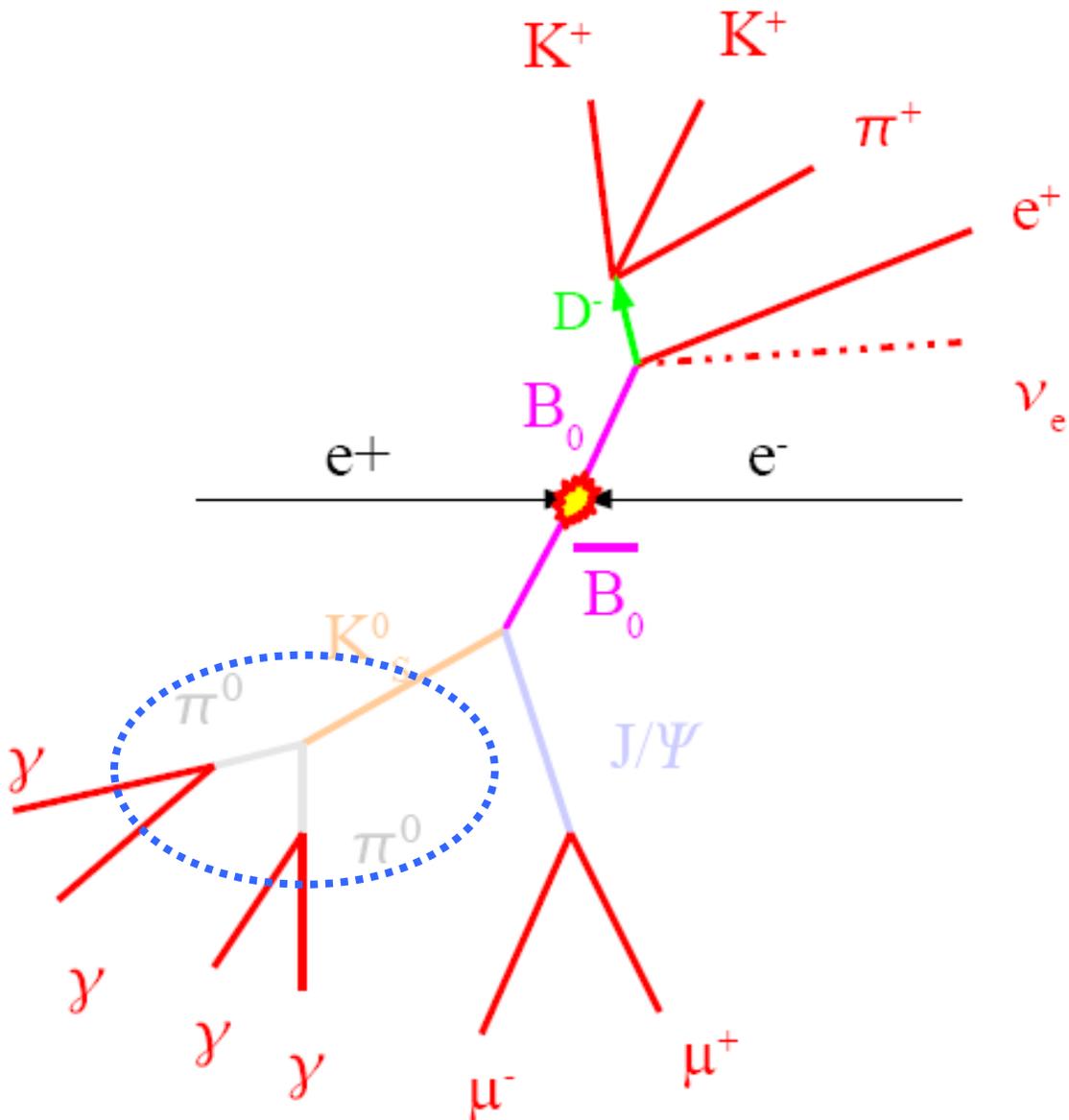
$$\tau = 1.23 \cdot 10^{-8} \text{ s} \quad \text{et} \quad c\tau = 3.7 \text{ m}$$

- Parcours moyen

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

## 2.4 – Observer les hadrons

### Le pion neutre ou méson $\pi^0$



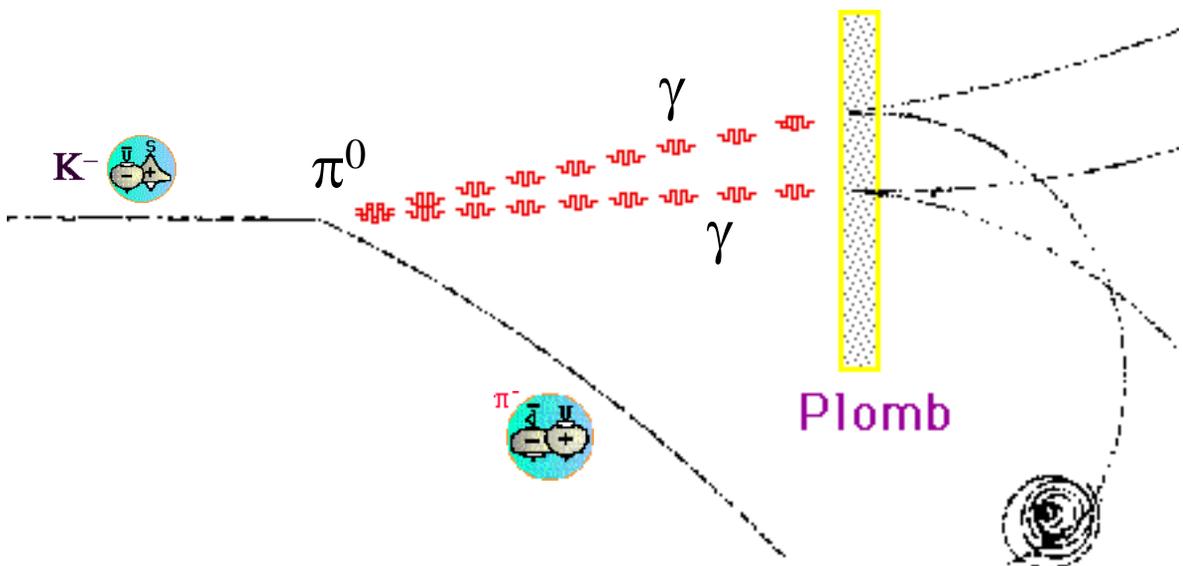
## 2.4 – Observer les hadrons

### Le pion neutre ou méson $\pi^0$

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

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

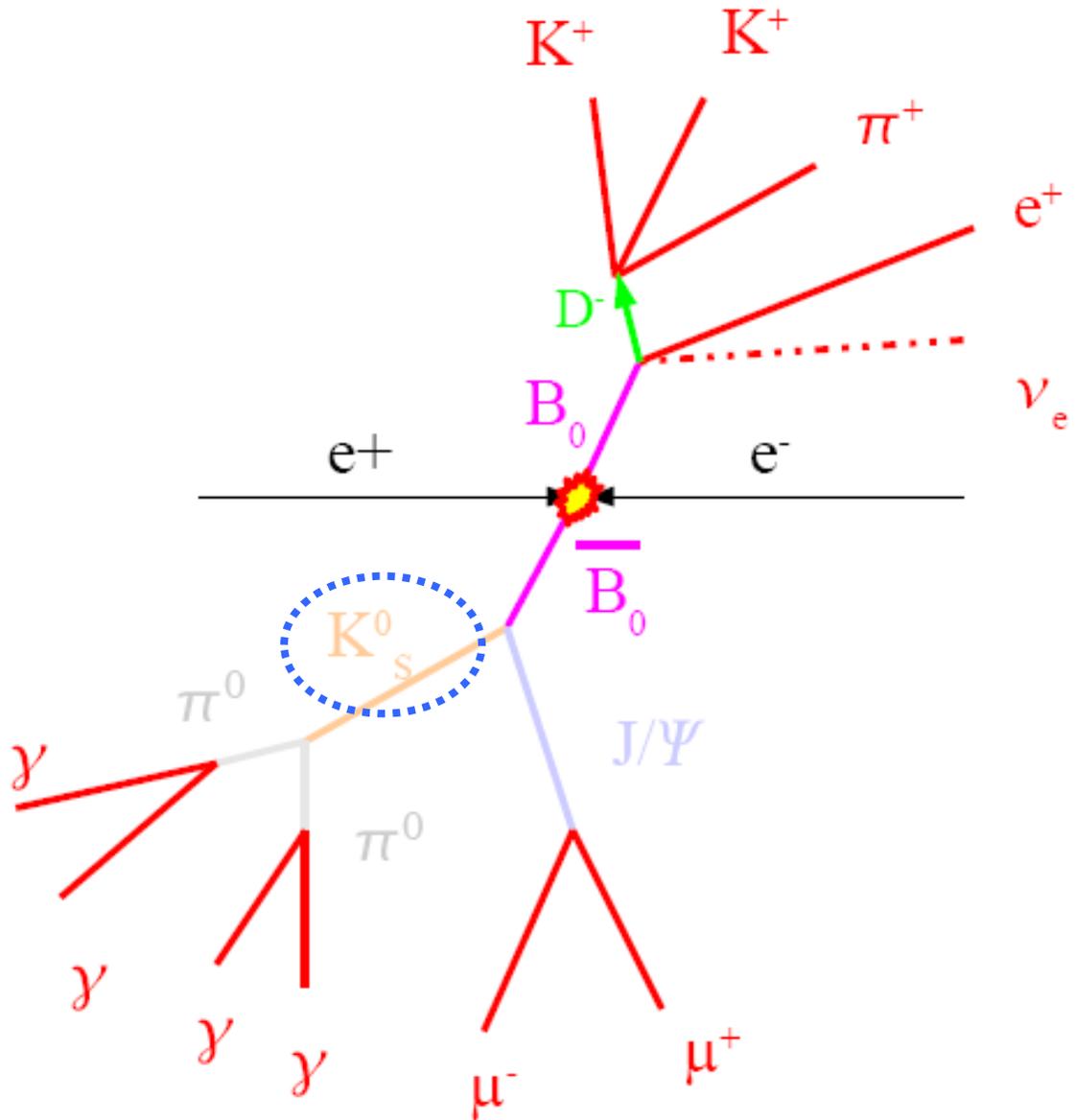
- Source principale de gamma
  - ▶ Pratiquement 100 % des désintégrations en



Exemple de la désintégration d'un  $\pi^0$  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 $K^0$

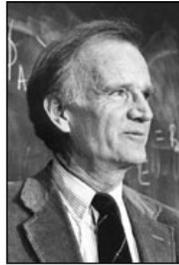
- Assemblage  $d\bar{s}$  pour le  $K^0$  et  $\bar{d}s$  pour l'anti- $K^0$



- 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  $\pi$ .
- ▶ 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  $\pi$  est rapide;

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

- La désintégration en 3 mésons  $\pi$  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»

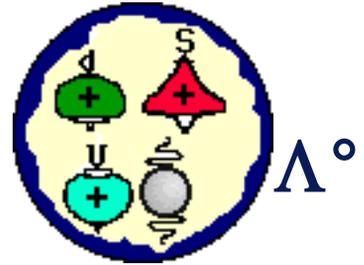
$$\text{Parcours moyen en cm} = 2.67 P (\text{GeV}/c) / 0.498$$

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

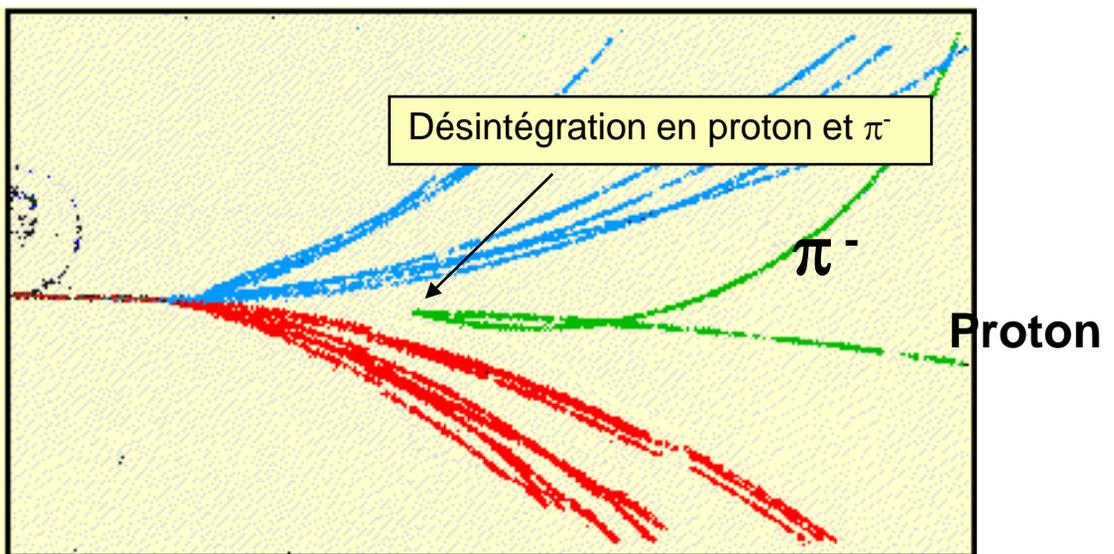
## 2.4 – Observer les hadrons

### Les hyperons

- Assemblages de trois quarks (baryons) contenant un ou plusieurs quarks étranges (s)
- Exemple du  $\Lambda^{\circ}$  ou Lambda
  - ▶ Un quark up
  - ▶ Un quark down
  - ▶ Un quark étrange
- Le  $\Lambda^{\circ}$  est neutre et plus lourd qu'un proton



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

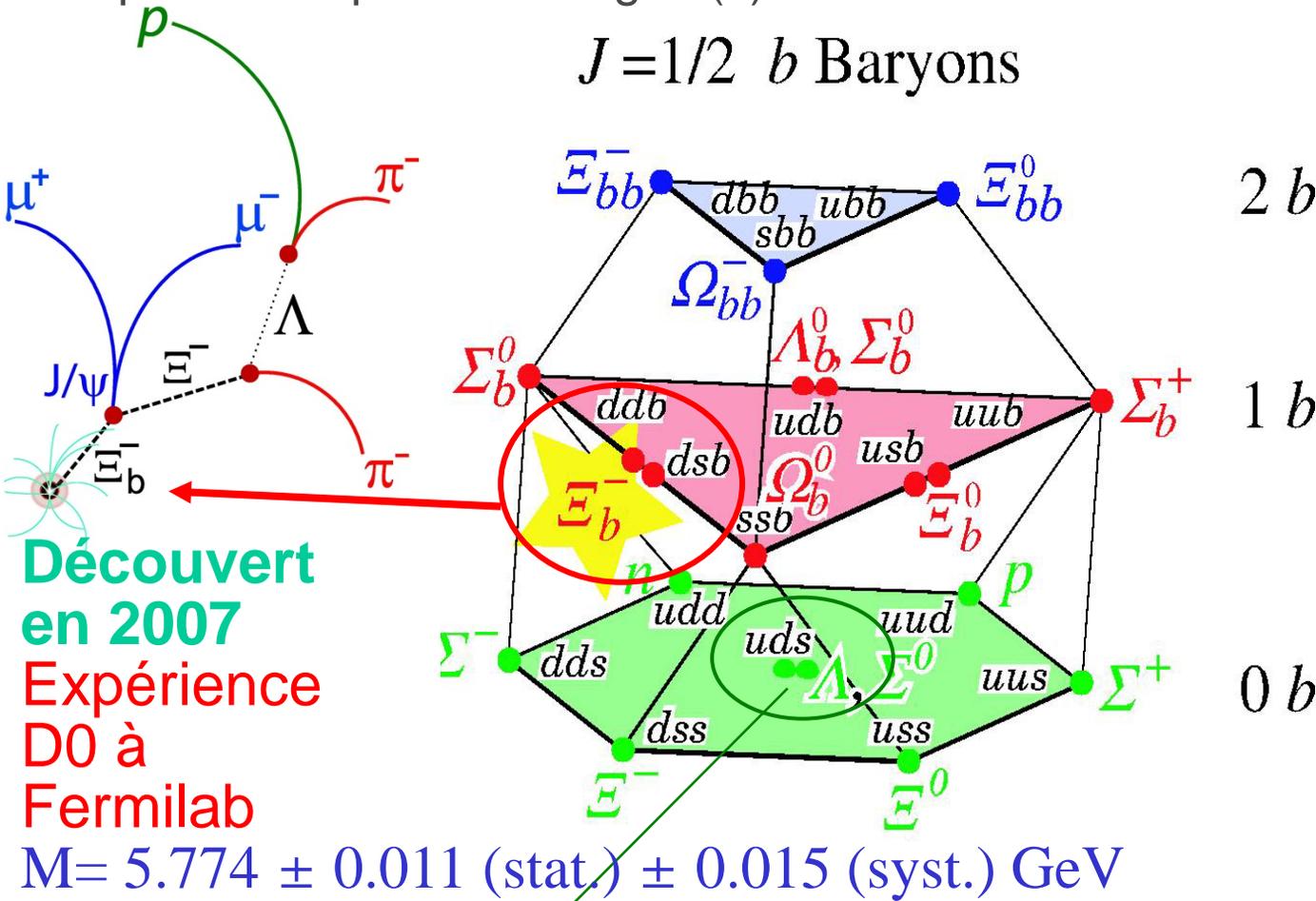


$$\tau = 2.63 \cdot 10^{-10} \text{ s et } c\tau = 7.89 \text{ cm}$$

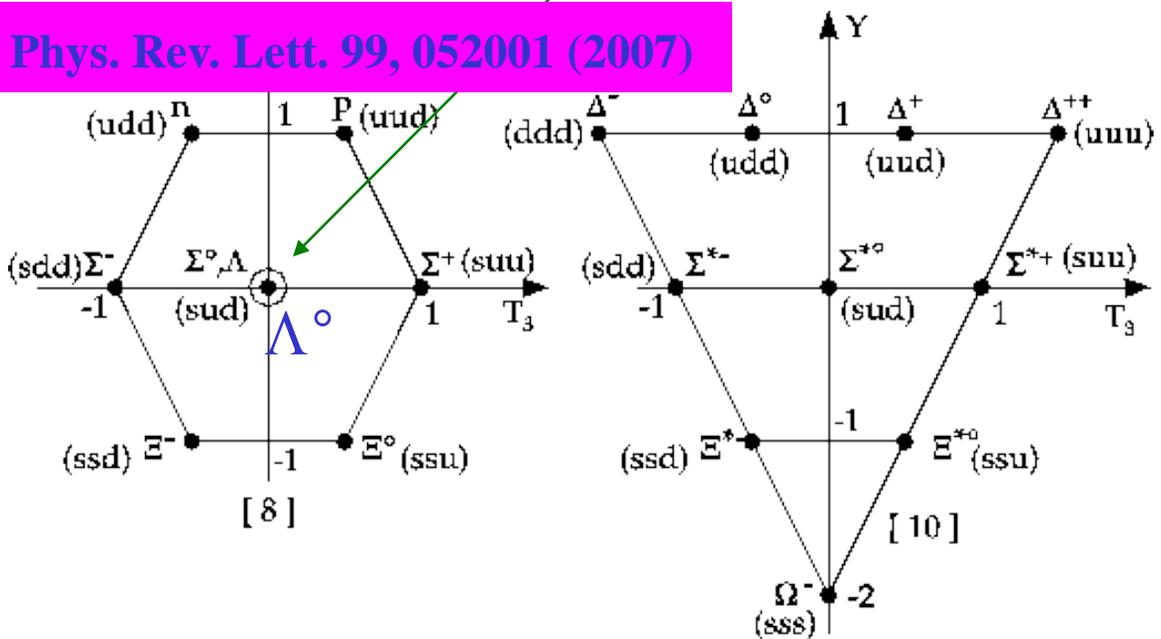
## 2.4 – Observer les hadrons

### Les hyperons

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

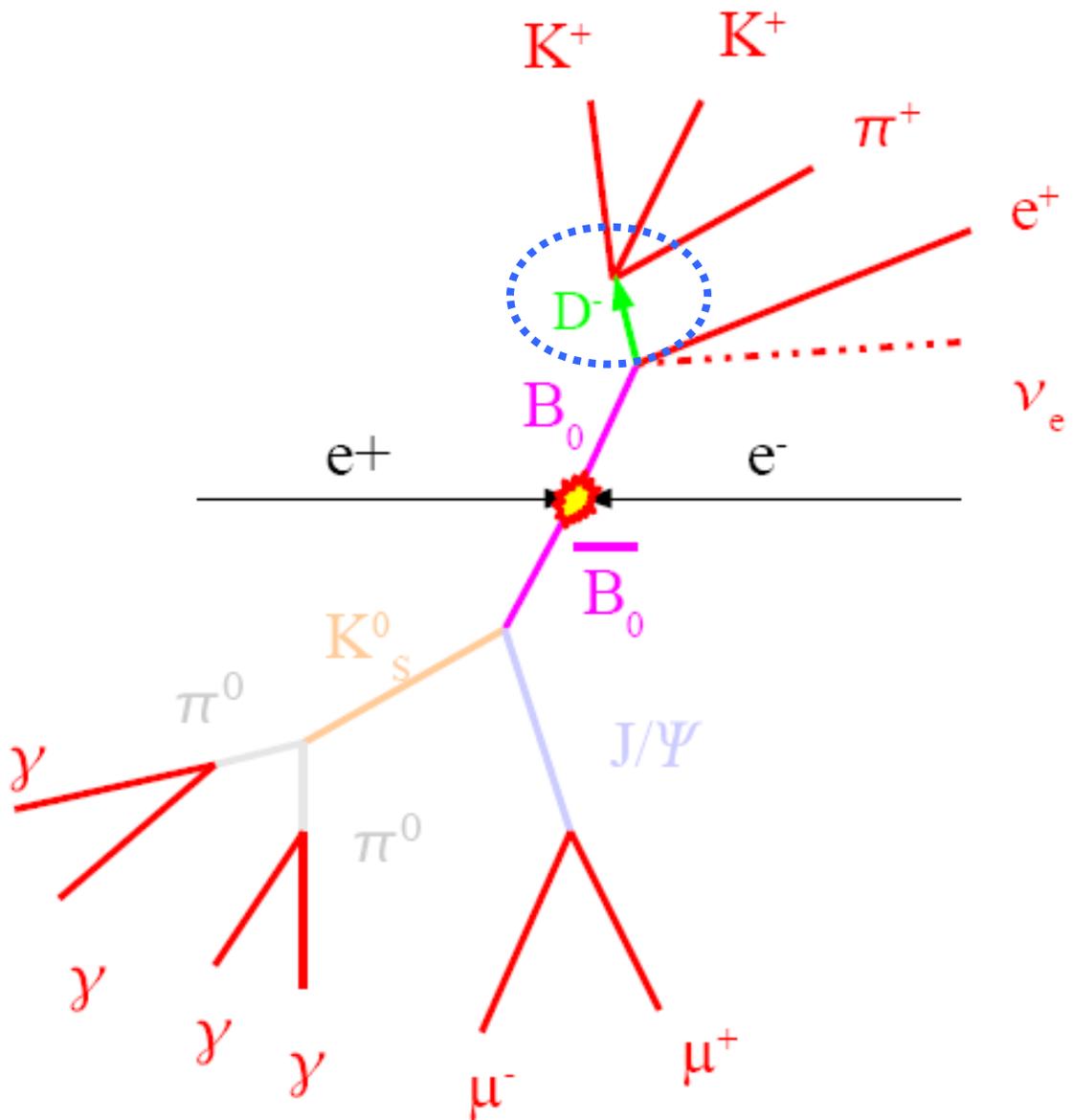


Phys. Rev. Lett. 99, 052001 (2007)



## 2.4 – Observer les hadrons

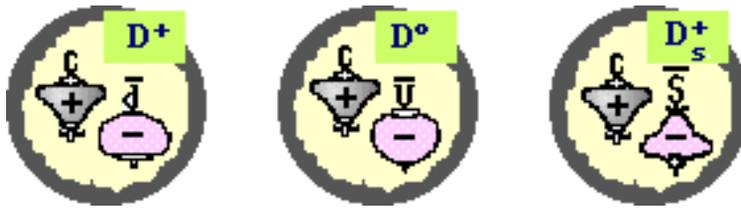
### Les hadrons « charmés »



## 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

Parcours et désintégration d'un hadron charmé

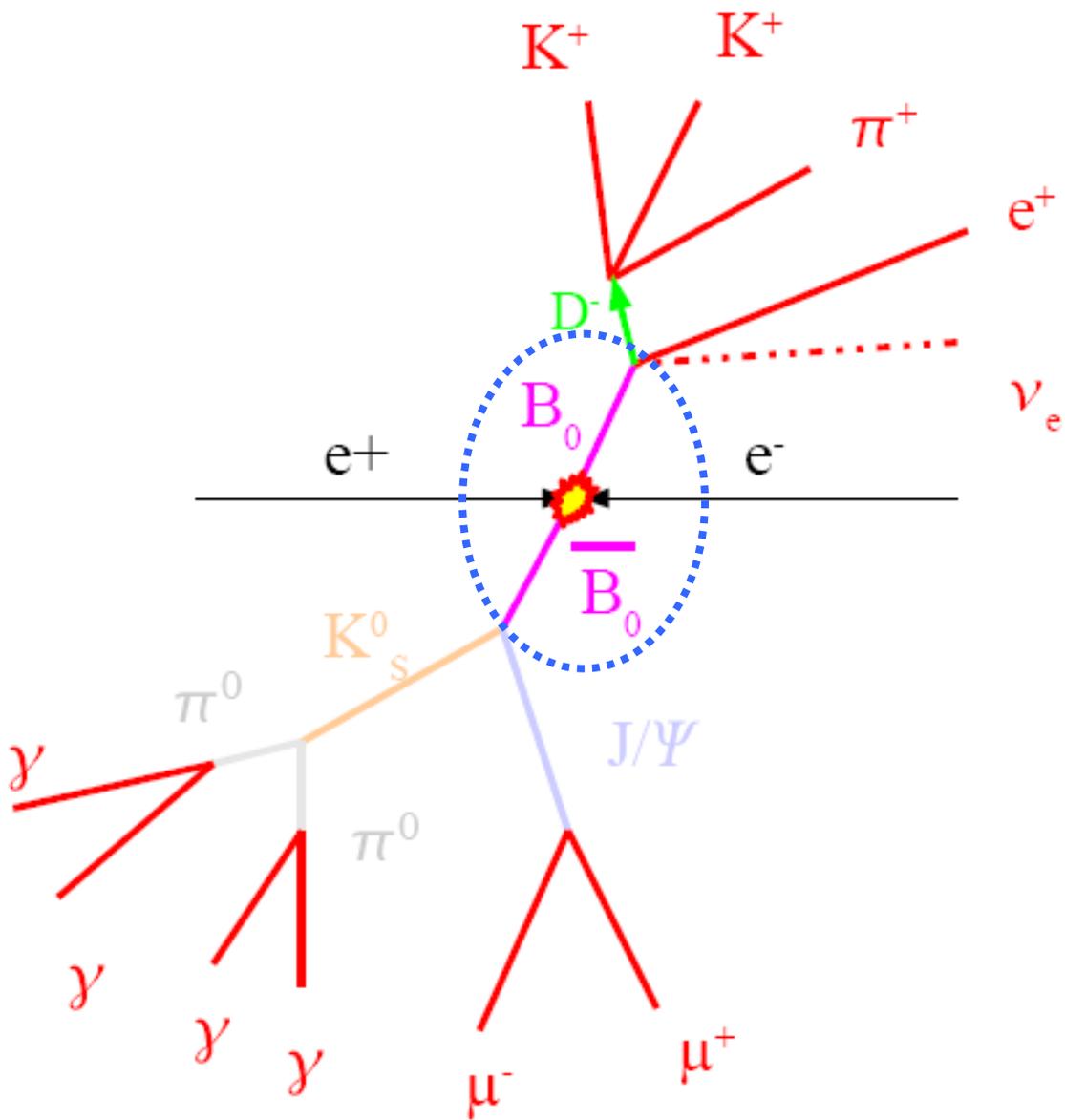
- Vertex secondaires

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



## 2.4 – Observer les hadrons

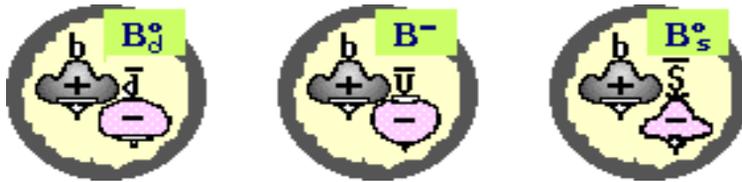
### Les hadrons « beaux »



## 2.4 – Observer les hadrons

### Les hadrons « beaux »

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

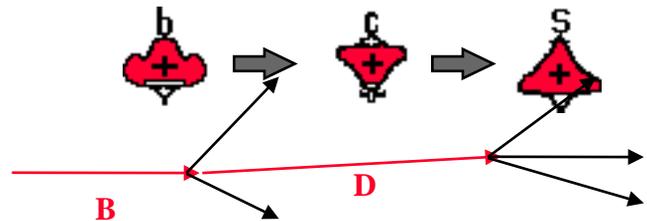


- ▶ Exemple des 3 mésons où le quark **b** est associé avec un anti-quark up, down ou étrange
- Temps de vie courts : de l'ordre de la picoseconde
  - ▶ Détecteurs très précis pour mesurer de courts parcours

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

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

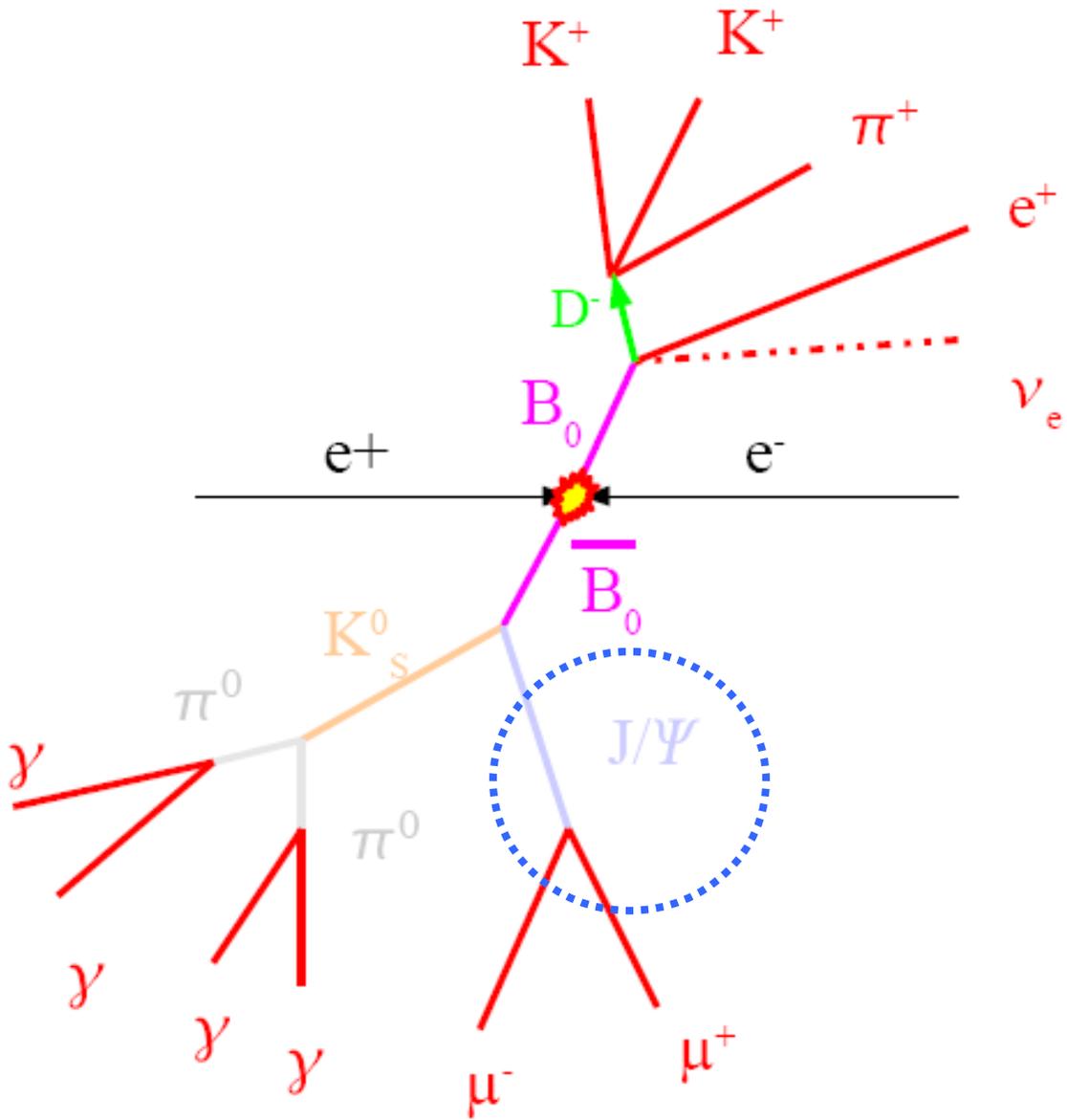
Parcours et désintégration d'un hadron **b** qui donne un hadron charmé



- 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

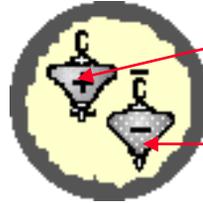


## 2.4 – Observer les hadrons

### 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

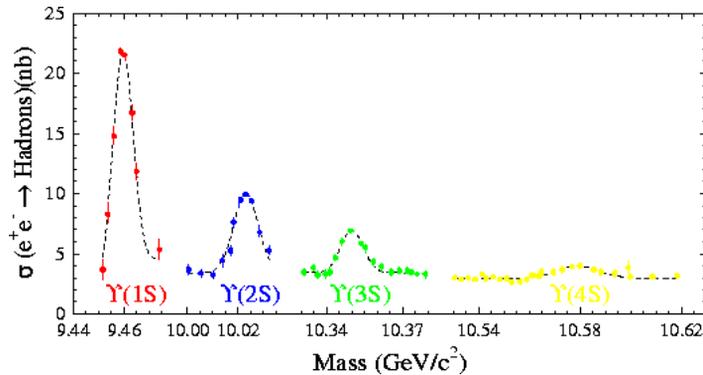


**The Nobel Prize in  
Physics 1976**

- 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

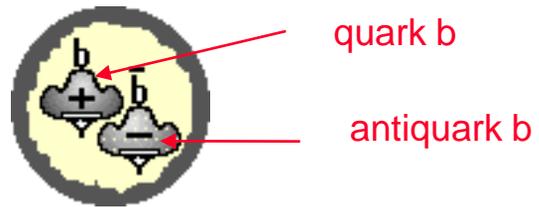
### L'exemple du Upsilon(4S)



■ ... 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  $B^0\bar{B}^0$

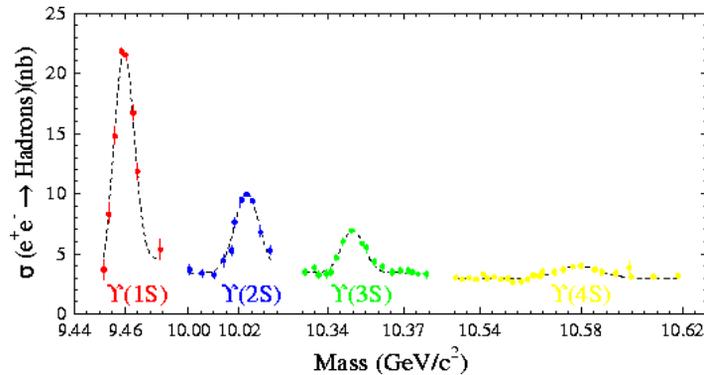


■ Le Upsilon(4S) est utilisé en usine à mésons B

- ▶ 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

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

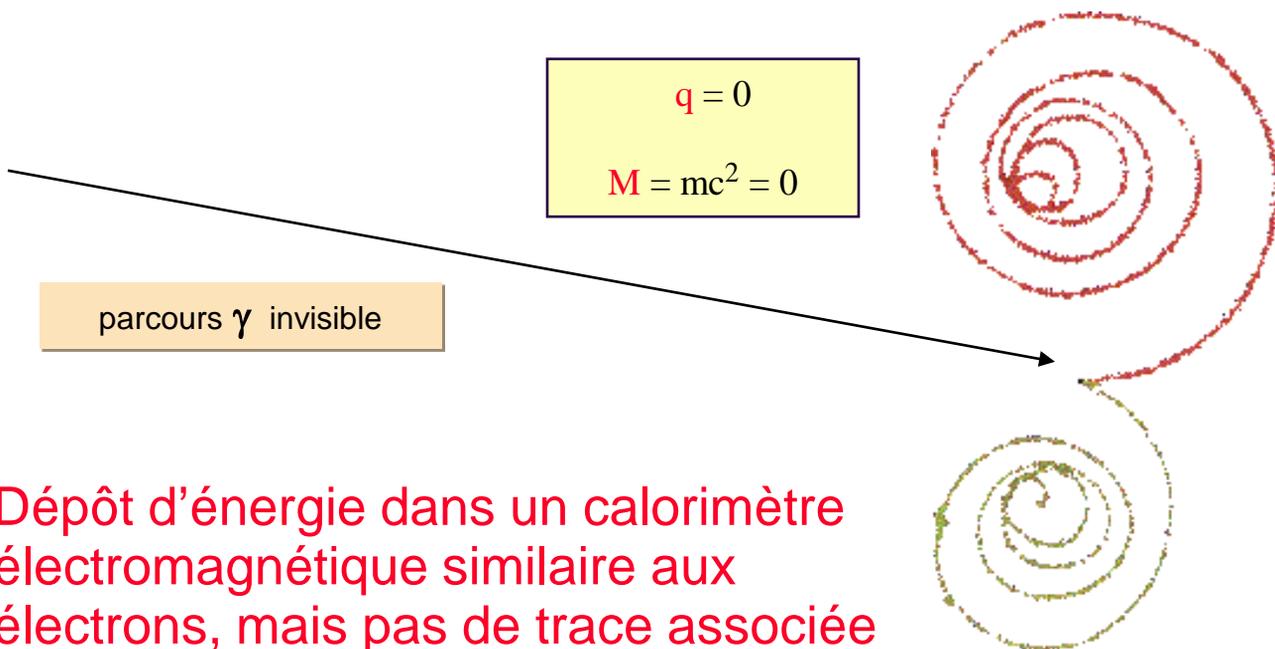
- ▶ Elles correspondent à des états excités des mésons et des baryons
- ▶ Les parcours sont de l'ordre des dimensions d'un noyau
- Elles sont appelées **résonances**
  - ▶ Les temps de vie sont si courts que les résonances ont à peine le temps de former un assemblage
- Très étudiées dans les années 1960, 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

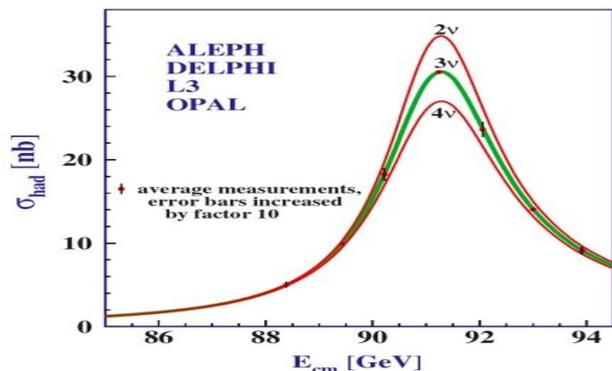
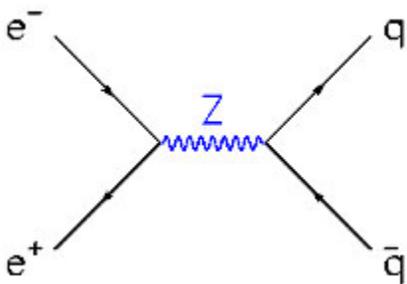
### Le boson $Z^0$



- 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

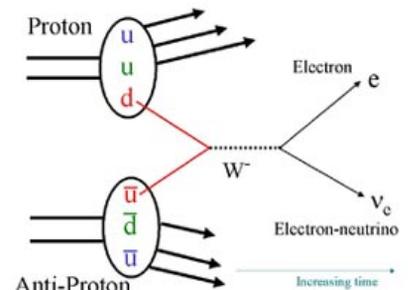
## 2.5 – Observer les bosons

### 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



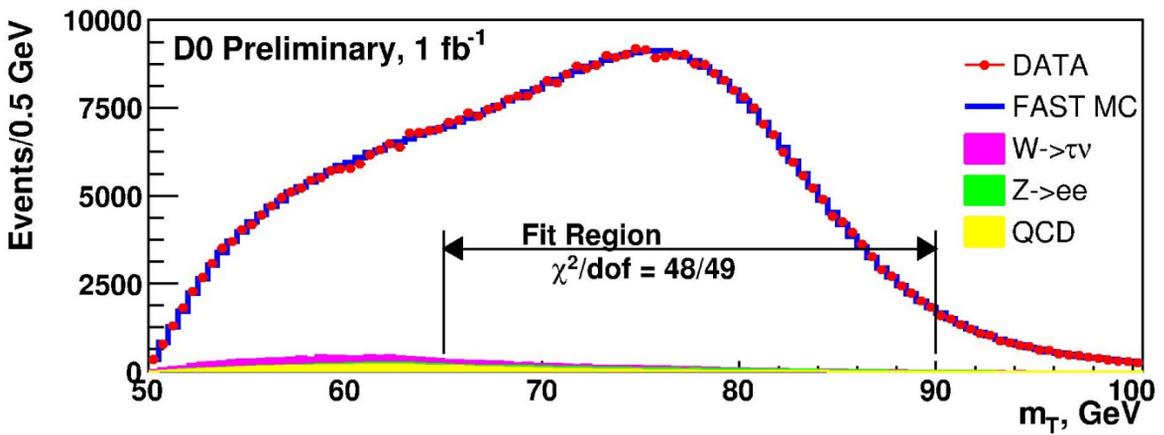
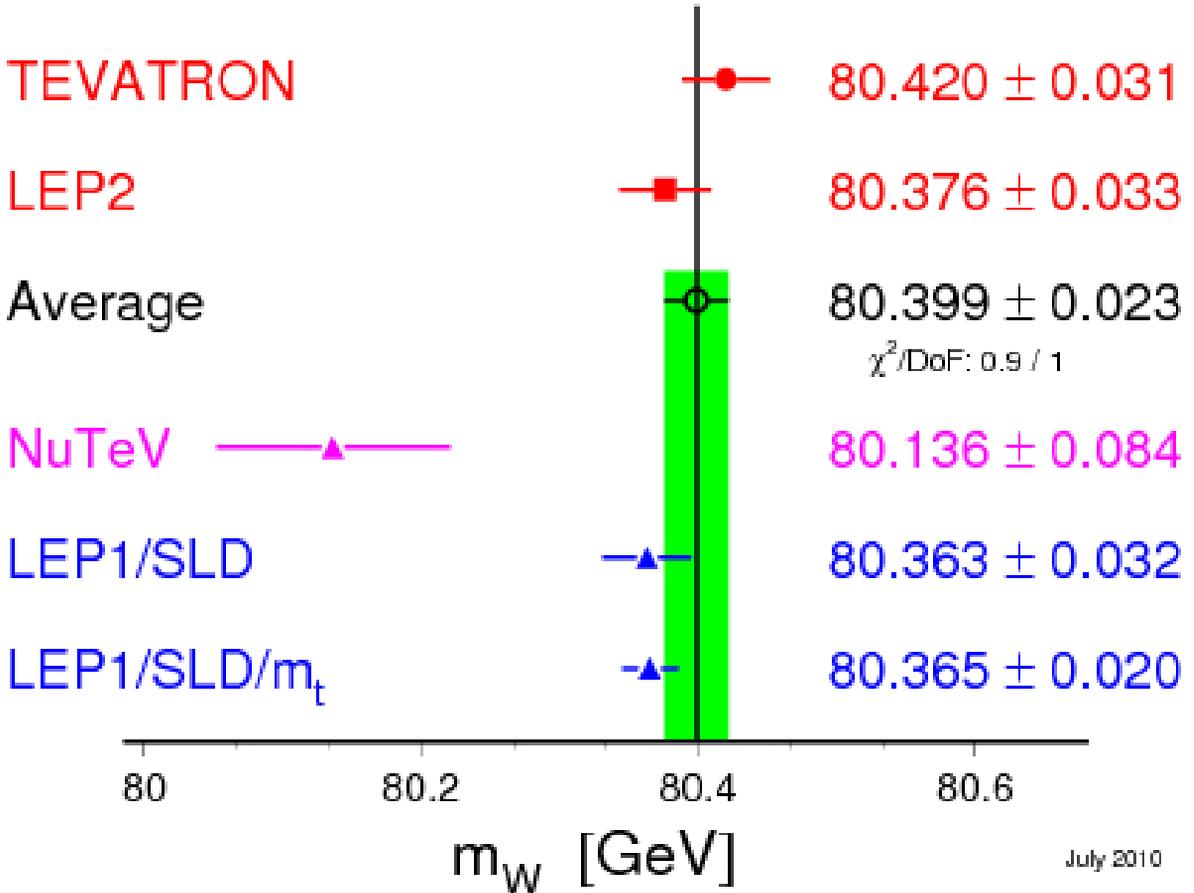
- Aux énergies des accélérateurs actuel (Tevatron) et futur (LHC), les  $W$  comme le  $Z^0$  sont (seront) produits couramment

- ▶ 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  $10 \text{ fb}^{-1}$



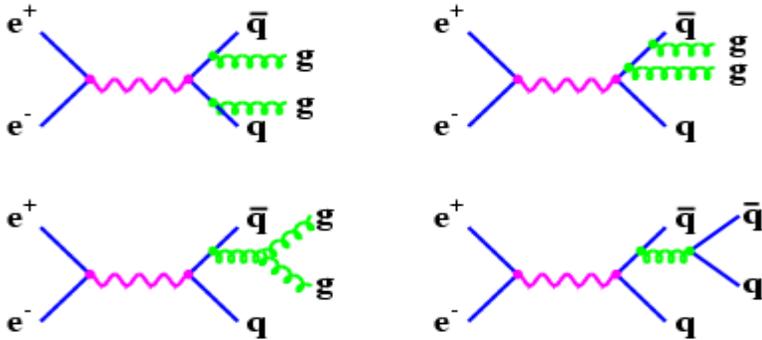
# Tevatron: mesure de la masse du W (Juillet 2010)

## W-Boson Mass [GeV]

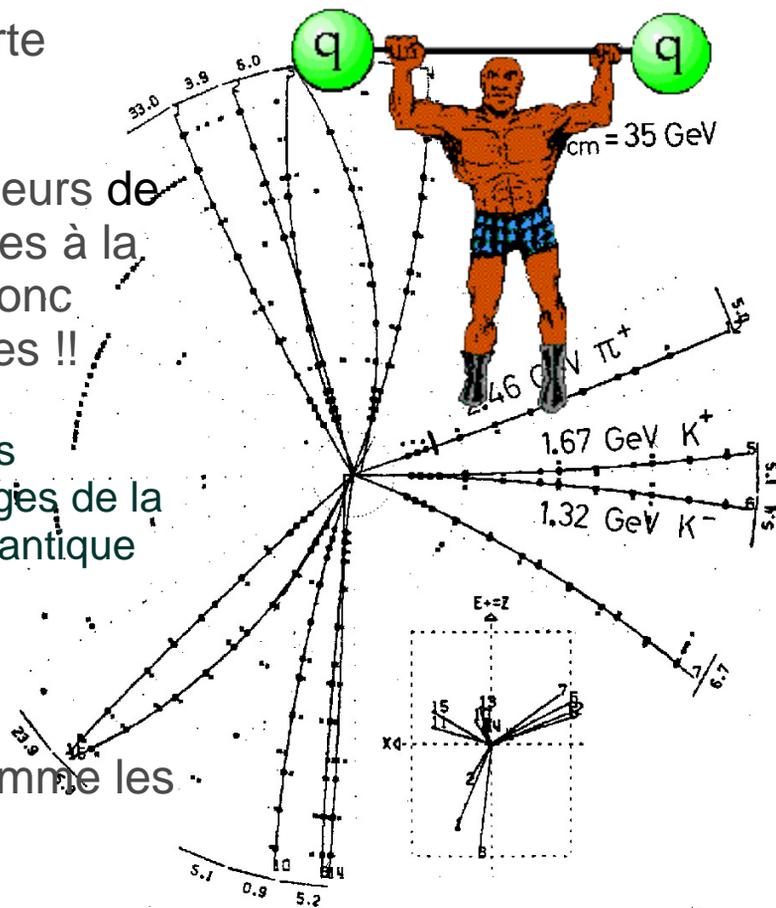


# 2.5 – Observer les bosons

## 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

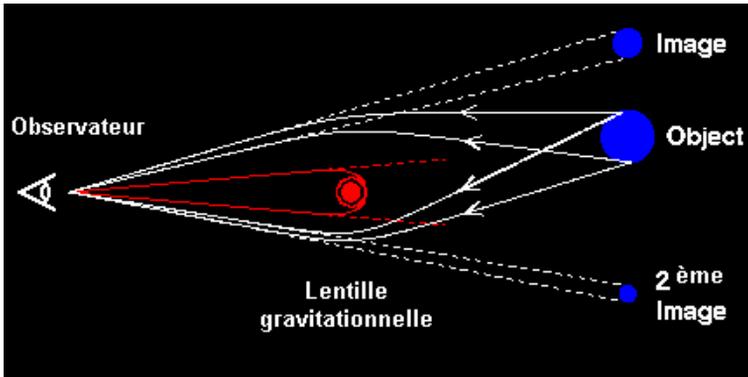
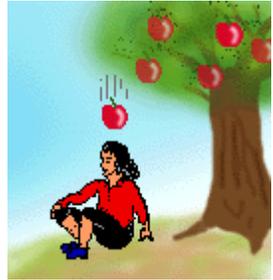


Découverte du gluon à PETRA (Hamburg, Allemagne) en 1979

## 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



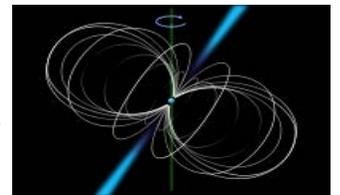
Joseph H. Taylor Jr.

- 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 !



Système binaire

## 2.5 – Observer les bosons

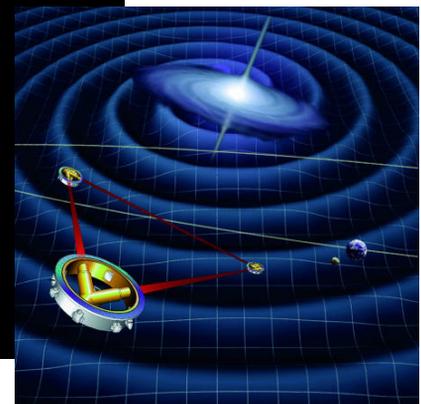
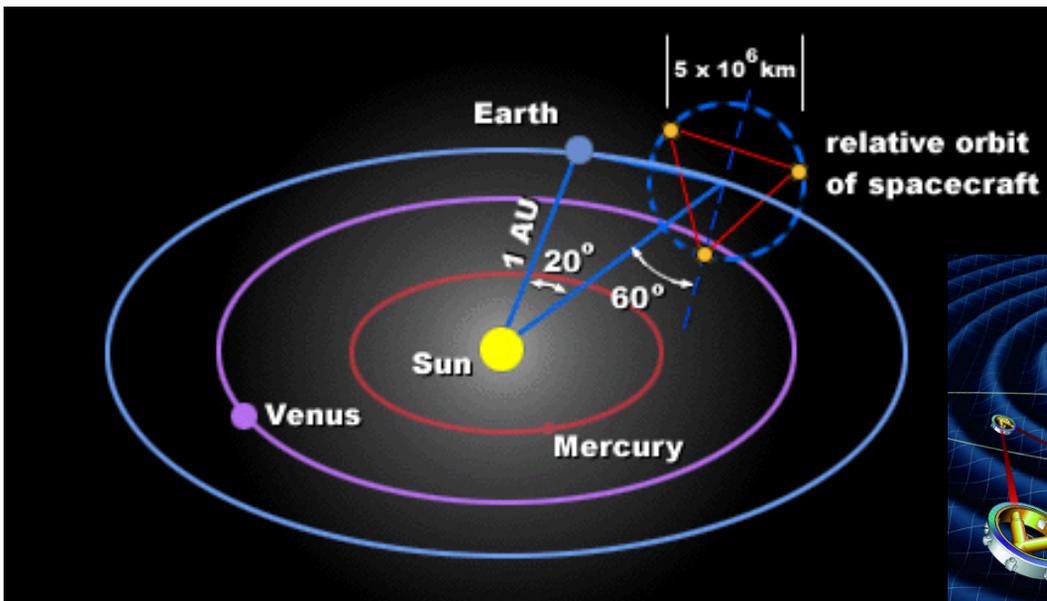
### Les gravitons?

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



Vue de Virgo, près de Pise

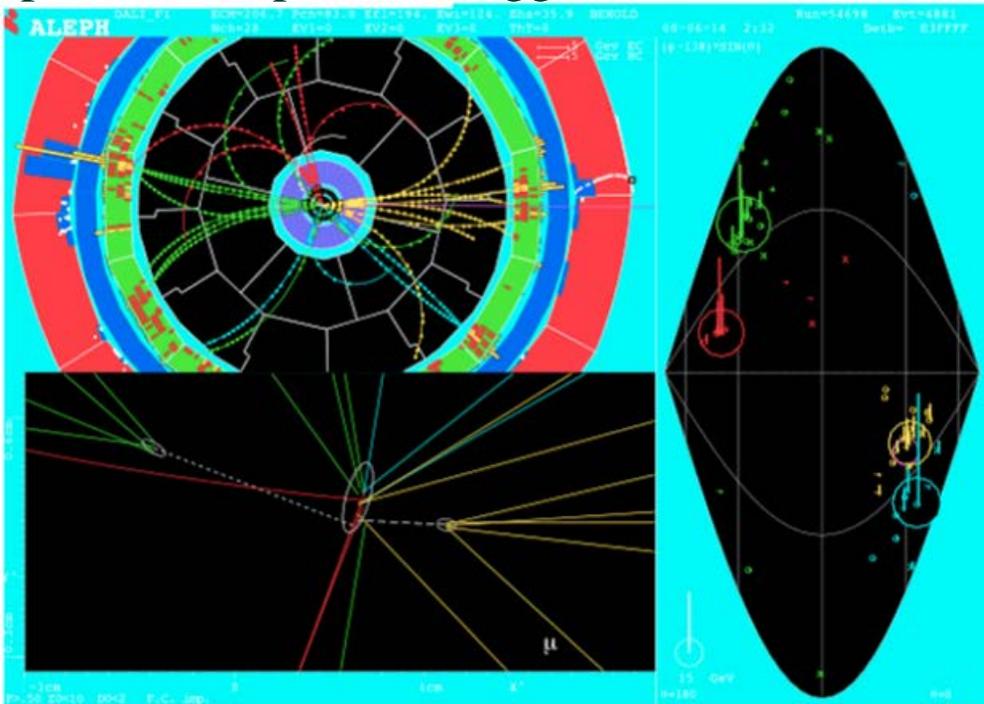
- Projet LISA (2015?) : un interféromètre de Michelson géant
  - ▶ Détecter des changements de distance inférieurs à la taille d'un atome entre des satellites distants de 5 millions de km



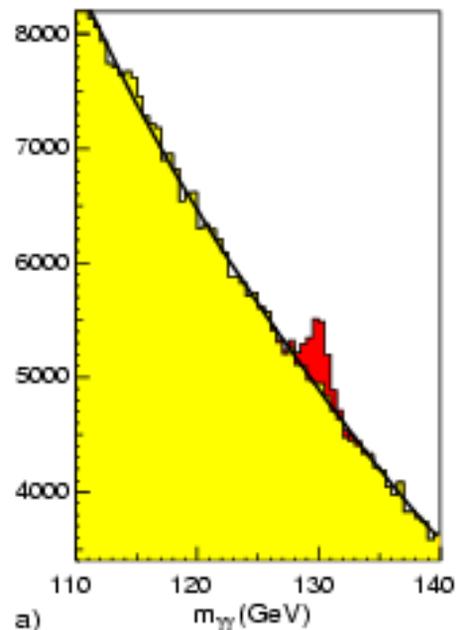
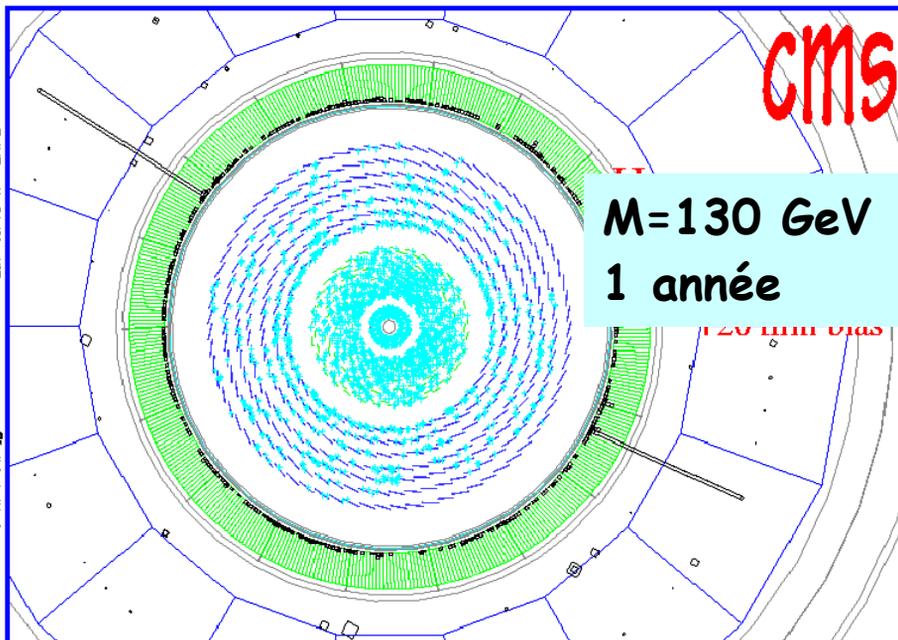
## 2.5 – Observer les bosons

### Le boson de Higgs ?

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

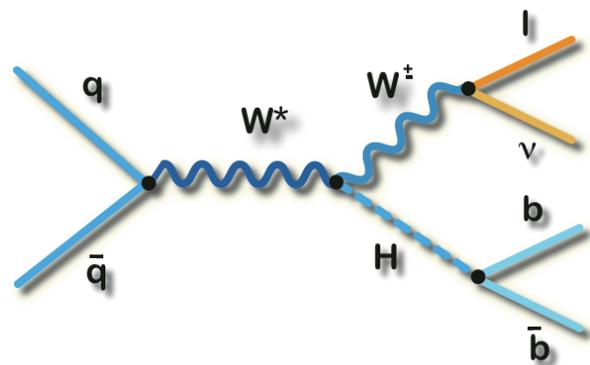
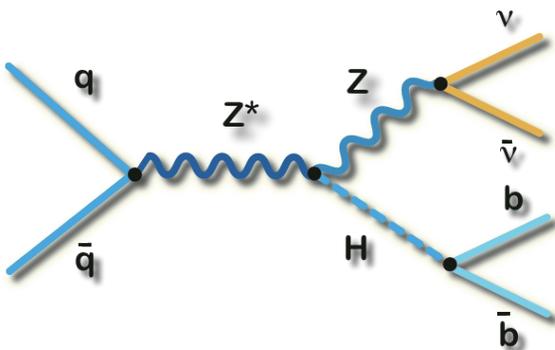


- Le LHC verra le Higgs ... s'il existe !



## 2.5 – Observer les bosons

### Le boson de Higgs ?

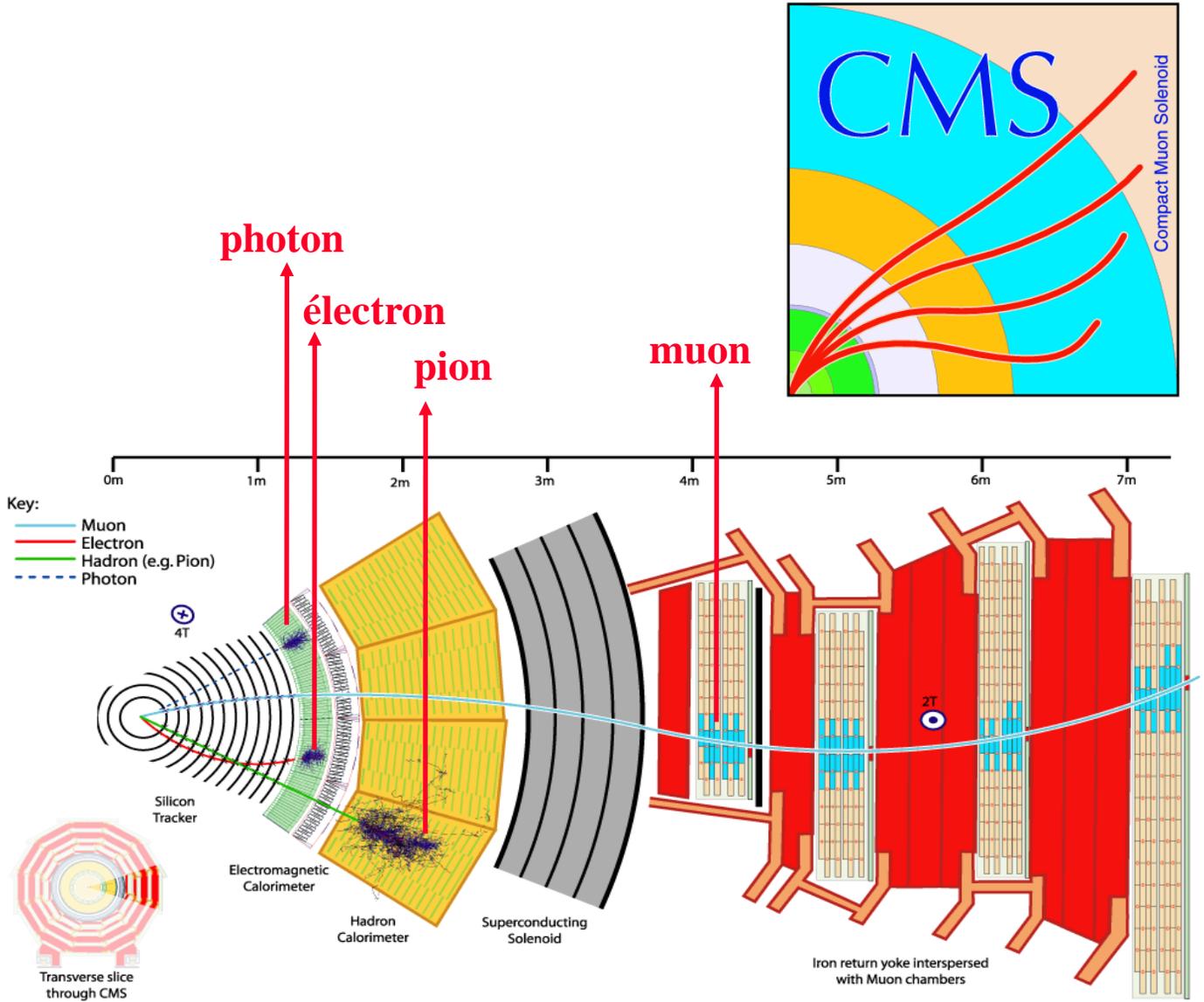


(voir chapitre 1)

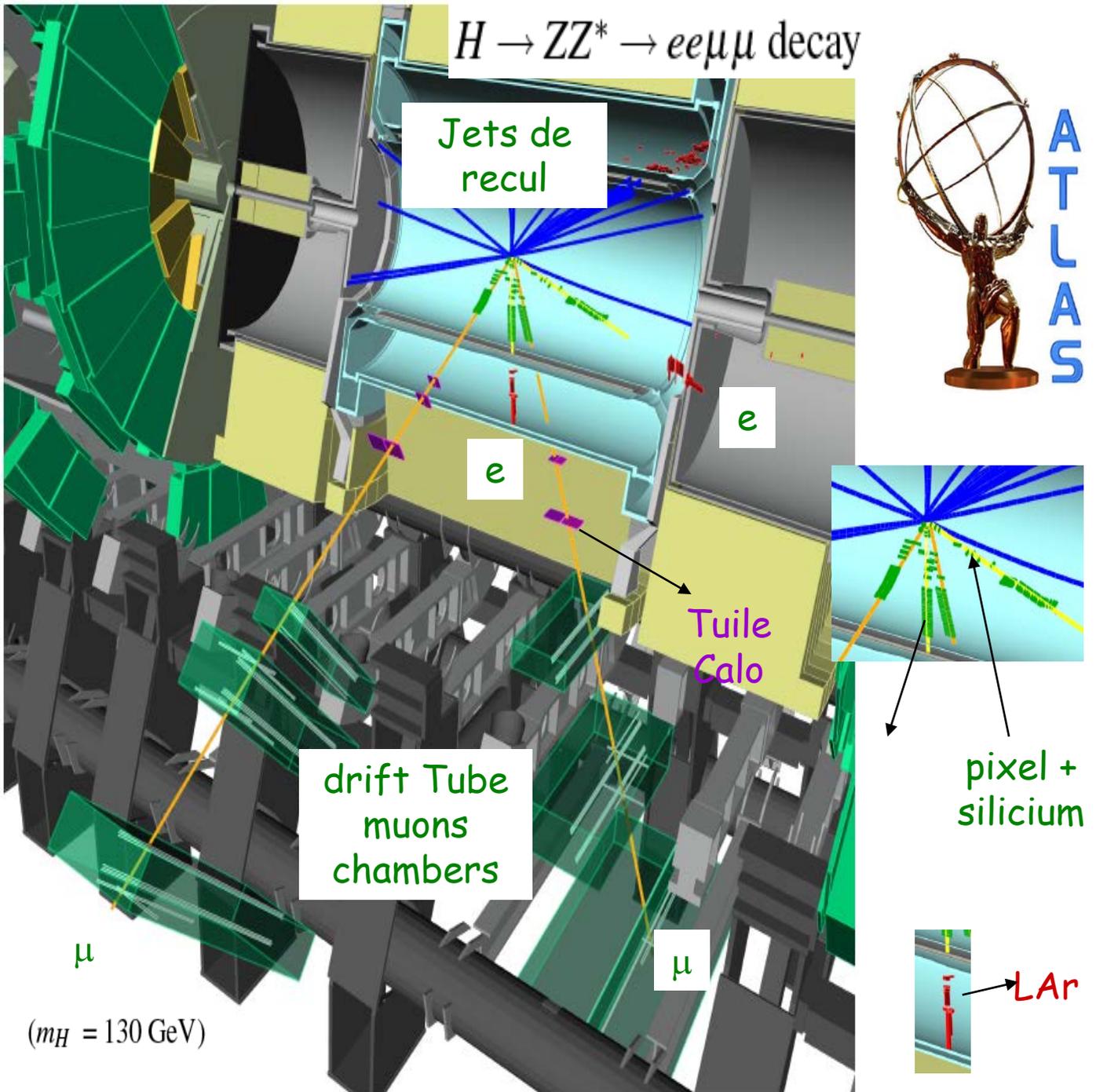
# Le premier Higgs vu au LHC !



# 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