

L'asymétrie matière- antimatière

(à la recherche de l'antimatière perdue)

Justine Serrano

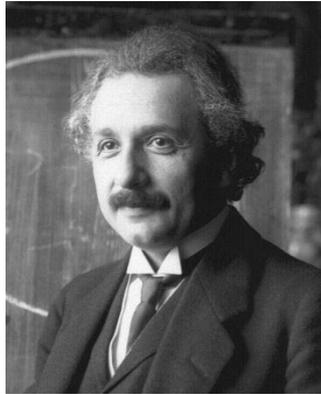
CPPM

21 septembre 2013



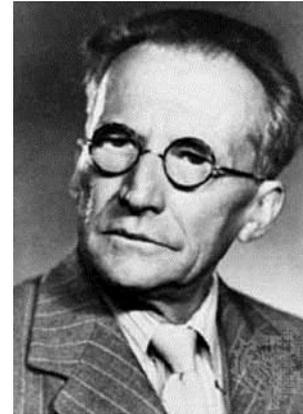
Un peu d'histoire

1905 : Einstein



Relativité restreinte

1926 : Schrödinger



Mécanique quantique

1928 : Equation de Dirac,
décrit le comportement de
l'électron



Schrödinger et Dirac
partage le prix Nobel en
1933

Problème...

L'équation de Dirac a 2 solutions !

{ l'électron
????

- La 2ème solution correspond à une particule de charge et autres nombres quantiques opposés à ceux de l'électron
- Une particule de charge +1 ???
- Le proton ? Mais sa masse est 2000 fois plus grande!



Dirac invente
l'antiélectron
en 1930

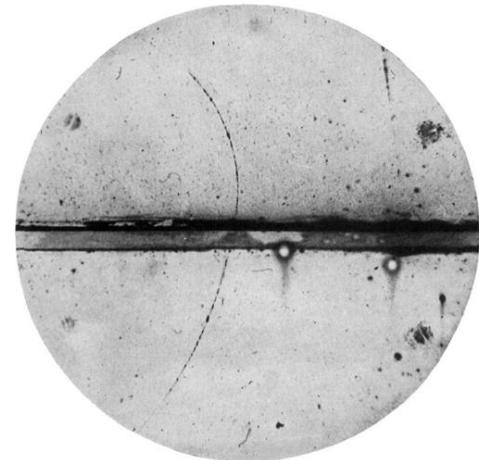


e^-
électron

e^+
positron



1932 : Anderson découvre le positron
dans les rayons cosmiques



Plomb

FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 7.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

Les antiparticules

- Sont similaires aux particules:
 - Même masse
 - Même durée de vie
- MAIS ont une charge (électrique, baryonique, leptonique,..) opposée

électron e^- 

proton p 

neutron n 

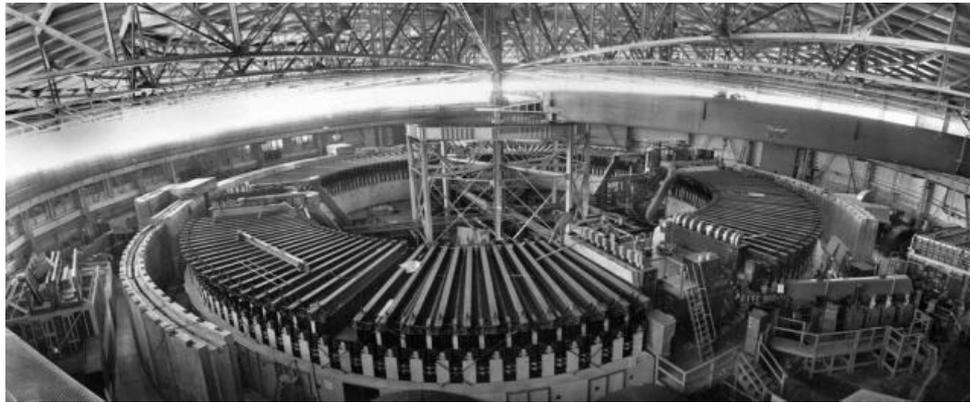
 e^+ positron

 \bar{p} antiproton

 \bar{n} antineutron

Histoire de l'antimatière

- **1932** : découverte du **positron** dans les rayons cosmiques. Prix Nobel en 1936
- **1955** : découverte de l'**antiproton** au Bevatron à Berkeley, Californie. Prix Nobel en 1959
- **1956**: découverte de l'**anti-neutron** au Bevatron



- **1965**: première observation d'anti-noyau: **anti-deuteron** au CERN et Brookhaven
- **1995**: premier atome d'**anti-hydrogène** produit au CERN

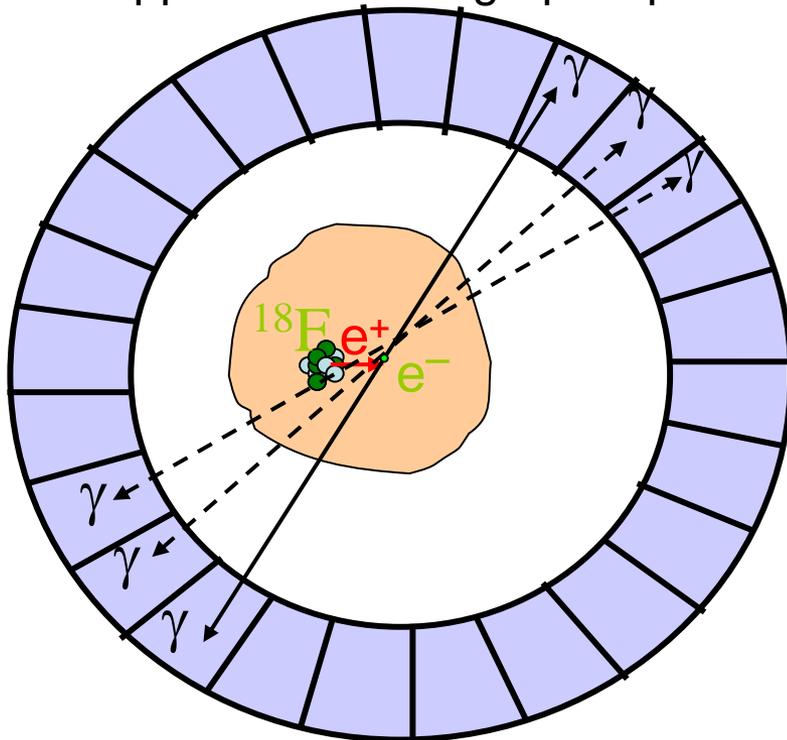
Matière + antimatière

- L'antimatière n'a rien de mystérieux mais elle a une propriété intéressante: elle s'annihile avec la matière.



Elle est donc instable, c'est pourquoi on n'en trouve pas dans la nature!

- Application: tomographie par émission de positrons



Où trouve-t-on de l'antimatière ?

- 2 source naturelles:

- Collisions entre les rayons cosmiques et l'atmosphère: l'énergie du choc est transformée en particules et anti-particules

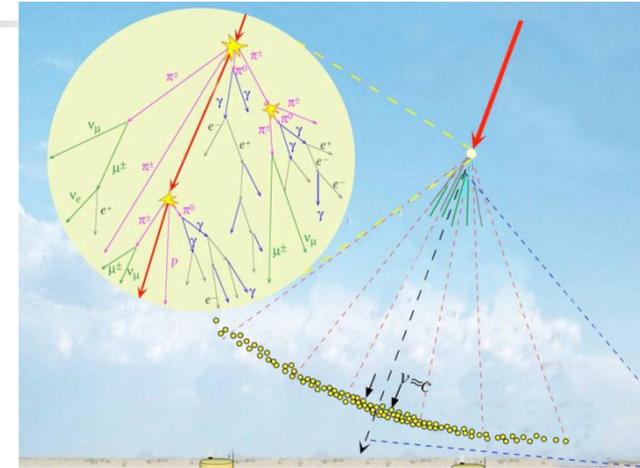
- Radioactivité β :

proton \rightarrow neutron + positron e^+ + neutrino

Mais aucune source massive détectée dans l'univers!

- Dans les accélérateurs de particules: $E=mc^2$

Elle est très difficile à produire et à stocker!



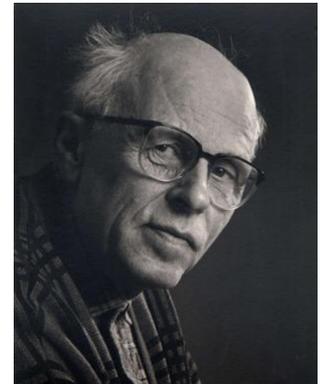
Pourquoi étudier l'antimatière ?

- Big bang : énergie \rightarrow matière + antimatière
- Puis : matière + antimatière \rightarrow énergie \rightarrow photon
- Mais aujourd'hui notre univers est fait de matière!

\rightarrow La matière l'a emporté sur l'antimatière

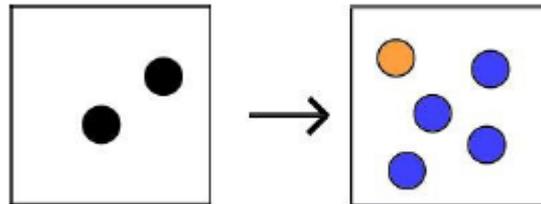
\rightarrow Une asymétrie matière – antimatière est apparue au cours de l'évolution de l'Univers... **mais comment ??**

- 1967: Sakharov montre que **3 conditions** doivent être réunies

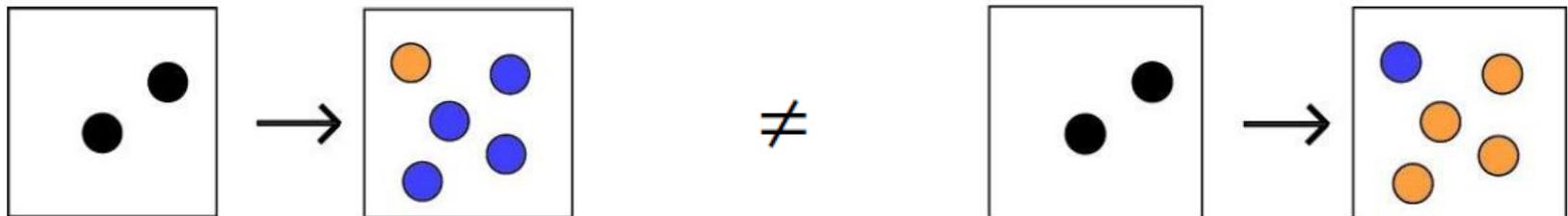


Les 3 conditions de Sakharov

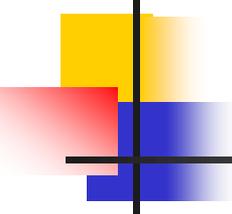
- Certaines réactions physiques créent plus de matière que d'antimatière (**violation du nombre baryonique**)



- Ces réactions ne sont pas identiques entre matière et d'antimatière (**violation de CP**)



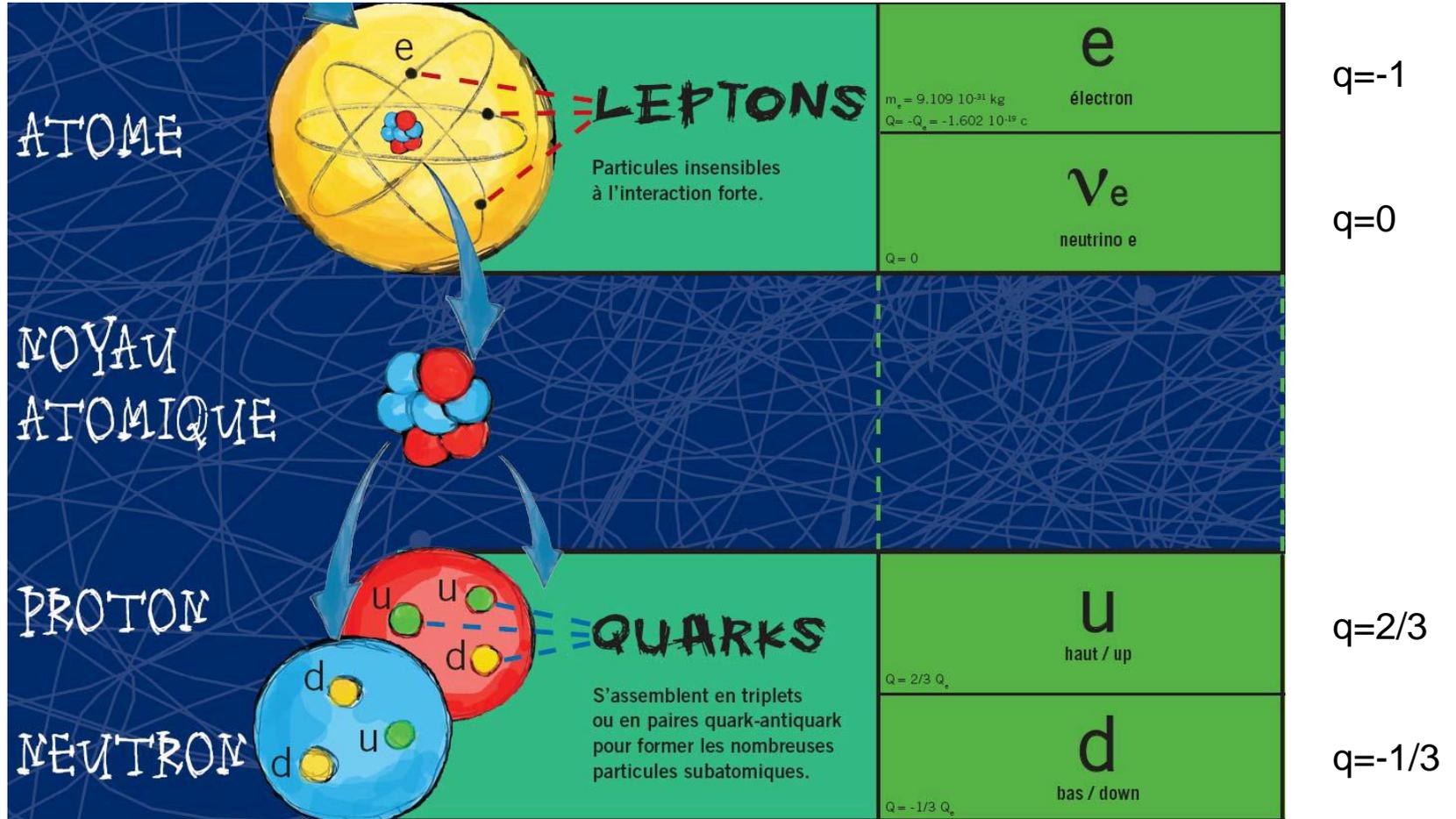
- Ces réactions doivent être lentes par rapport à l'expansion de l'Univers (sinon les réactions qui créent des baryons sont exactement compensées par les réactions qui les détruisent): c'était le cas au début de l'Univers.



Les recherches sur l'antimatière

- Violation de CP dans le secteur des quarks: étudiée dans le système des mésons K et B
- Violation du nombre baryonique : désintégration du proton
- Quelle est l'anti-particule du neutrino ?
- Recherche d'antimatière dans l'univers
- Etude des propriétés des anti-atomes

Les constituants fondamentaux: leptons et quarks



En fait, il y a 3 familles

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
<p>Les membres de la 1^{re} famille composent l'ensemble de la matière ordinaire (protons, neutrons, atomes...).</p>	<p>Réplique plus massive et instable de la 1^{re} famille. Le muon est ainsi 200 fois plus lourd que l'électron.</p>	<p>Réplique encore plus massive et instable de la 1^{re} famille. Le lepton τ est ainsi 3600 fois plus lourd que l'électron.</p>
<p>e électron</p> <p>$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $Q = -Q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$</p>	<p>μ muon</p> <p>$Q = -Q_e$</p>	<p>τ tau</p> <p>$Q = -Q_e$</p>
<p>ν_e neutrino e</p> <p>$Q = 0$</p>	<p>ν_μ neutrino muon</p> <p>$Q = 0$</p>	<p>ν_τ neutrino tau</p> <p>$Q = 0$</p>
<p>u haut / up</p> <p>$Q = 2/3 Q_e$</p>	<p>c charme / charm</p> <p>$Q = 2/3 Q_e$</p>	<p>t top</p> <p>$Q = 2/3 Q_e$</p>
<p>d bas / down</p> <p>$Q = -1/3 Q_e$</p>	<p>s étrange/strange</p> <p>$Q = -1/3 Q_e$</p>	<p>b beau/beauty/bottom</p> <p>$Q = -1/3 Q_e$</p>

Et leurs **antiparticules**:

- Même masse

- Charge électrique opposée

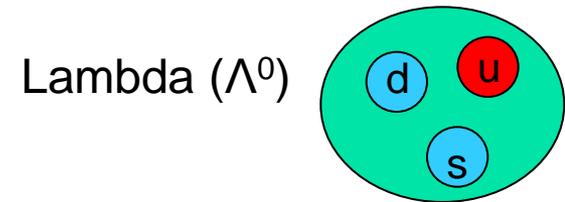
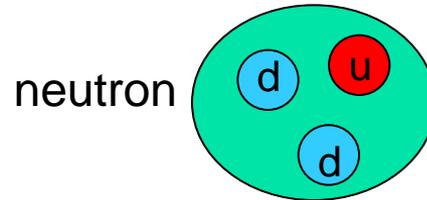
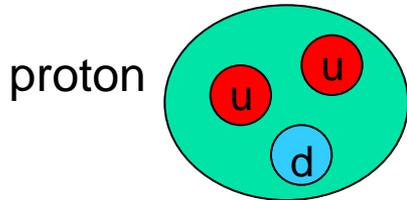
Ex: électron e^- et positron e^+

quark q et anti-quark \bar{q}

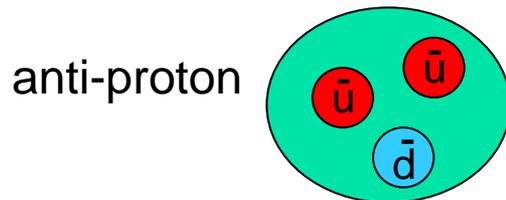
Assemblage de quarks: hadrons

On n'observe pas directement les quarks mais des assemblages de quarks

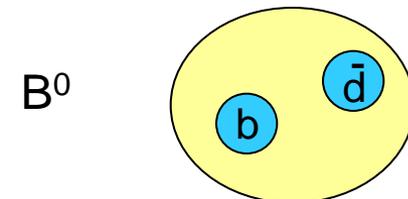
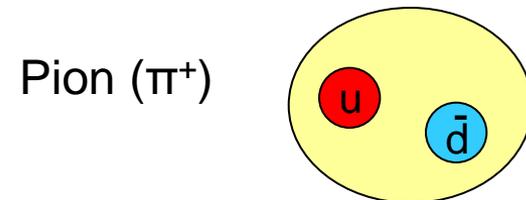
Baryon: 3 quarks



Anti-Baryon: 3 anti-quarks

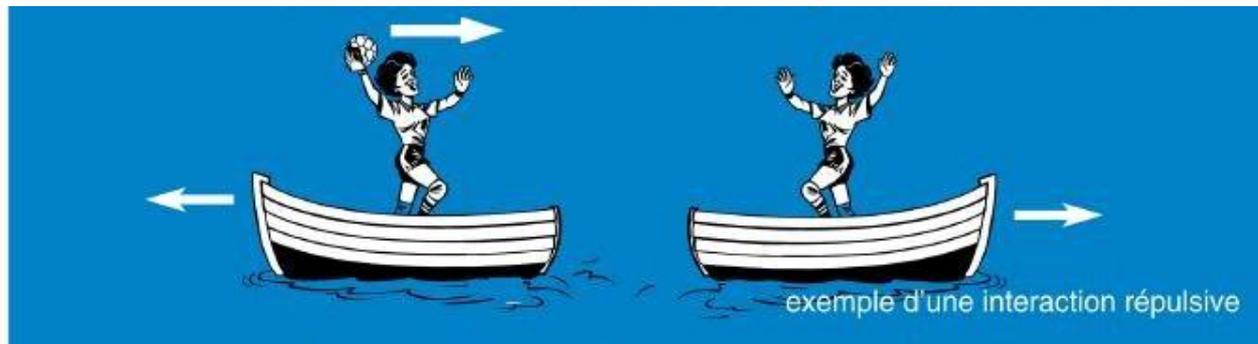


Meson: 1 quark + 1 anti-quark



Les 4 interactions fondamentales

Intéraction	effets	Portée	Action sur	boson médiateur
Forte	Cohésion des noyaux atomiques	$\sim 1\text{fm}(10^{-15}\text{m})$	quarks	8 gluons
Faible	Radioactivité beta (soleil)	$\sim 10^{-2}\text{ fm}$	quarks et leptons	W^+, W^-, Z^0
Électro-magnétisme	Electricité, aimant, lumière,...	infinie	particules chargées	photon
Gravitation	Pesanteur, marées,...	infinie	toutes les particules massive	Graviton?



Toute l'information sur l'interaction est dans le messenger

Le Modèle Standard

- Les quarks, leptons et leurs interactions sont décrits par le modèle standard
- **Expérimentalement, on a testé ce modèle et il marche très (trop) bien!**
- Mais il n'est pas suffisant....il n'explique pas:
 - Pourquoi il y a 3 familles de particules
 - L'origine de la masse des particules et leur hiérarchie
 - Notre univers est composé seulement de 4% de matière ordinaire. Qu'est-ce qui compose la matière noire et l'énergie noire ?
 - La gravitation
 - Pourquoi le monde est constitué de matière et pas d'antimatière
- On pense qu'il existe une théorie plus vaste, dont le MS serait une approximation à basse énergie. Si c'est le cas, de nouvelles particules devraient apparaître (Supersymétrie, ...)
- C'est ce qu'on cherche au LHC



Les désintégrations

- Les hadrons ne sont pas **stables**, à part le proton (sinon on ne serait pas là!)
- Ils se désintègrent de différentes façons tout en respectant des **lois**:
 - Conservation de la **charge électrique**
 - Conservation du **moment cinétique**
 - Conservation de l'**énergie-impulsion**:
désintégration de particules lourdes vers des particules plus légères, le surcroît étant transformé en énergie cinétique
 - Conservation du **nombre baryonique, leptonique**

Exemple du neutron :
(désintégration beta)



$$q=0$$

$$q=1-1+0=0$$

$$B=1$$

$$B=1+0+0=1$$

$$L=0$$

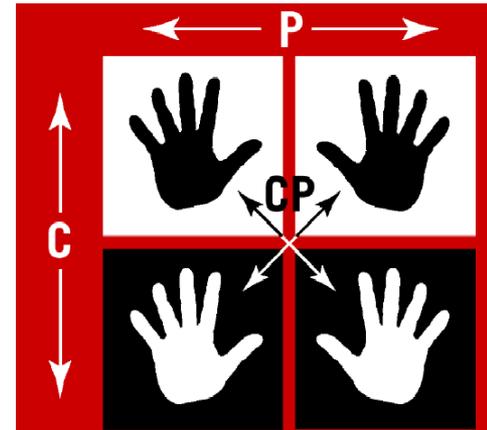
$$L=0+1-1=0$$

Probabilité que le neutron se désintègre de cette façon (rapport d'embranchement) = 100%

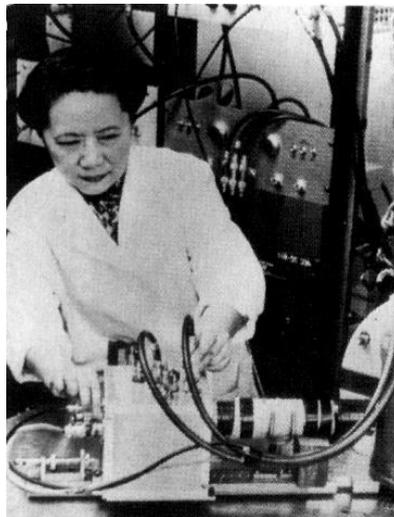
Certaines désintégrations ne sont autorisées que par l'interaction faible. Ex: c'est la seule à permettre les transitions entre les différentes familles de quarks

Symétries C et P

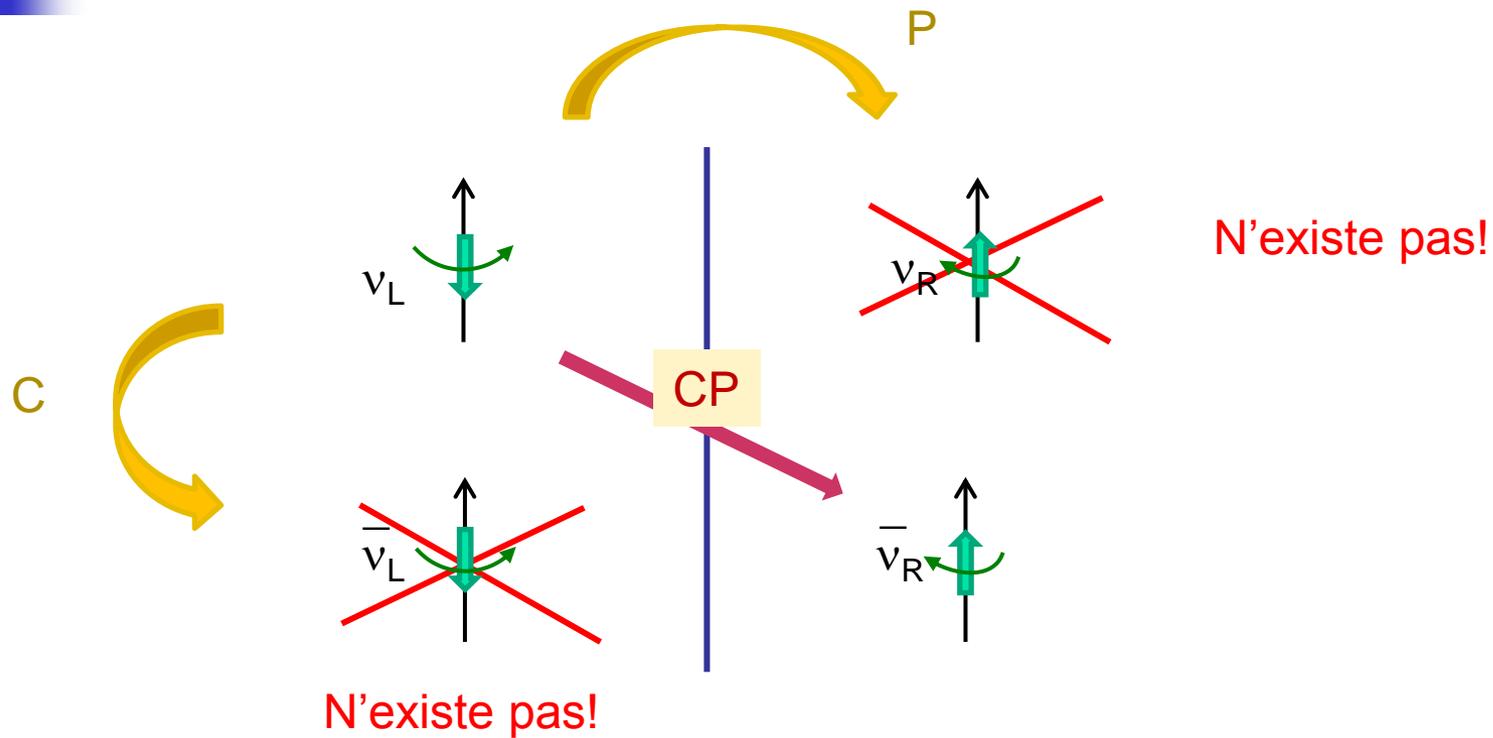
- C: charge opposée
- P: on regarde dans un miroir



C et P sont conservées par l'interaction électromagnétique et l'interaction forte **mais pas par l'interaction faible!** (idée de Lee et Yang en 1956, montré par Mme Wu en 1957, prix Nobel pour Lee et Yang)



Et pour le neutrino



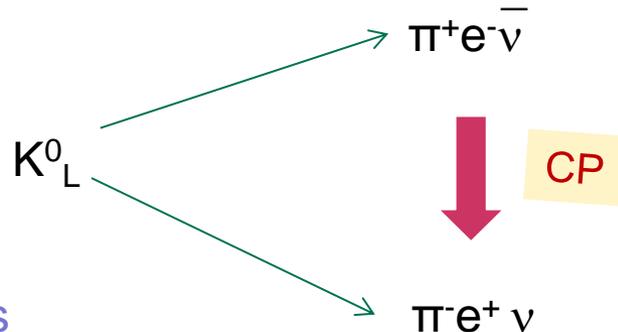
En physique des particules, droite et gauche sont très différents!
La symétrie CP semble conservée!

Violation de CP dans les K

- 1964: Cronin et Fitch réalisent une expérience qui observe la violation de CP dans le système des Kaons
Prix Nobel en 1980!



Le K_L^0 est un mélange de matière et d'antimatière, et contient un quark s



Cette désintégration se produit 1.0066 fois plus souvent que l'autre!

$$\text{Asymétrie : } \frac{\pi^- e^+ \nu - \pi^+ e^- \bar{\nu}}{\pi^- e^+ \nu + \pi^+ e^- \bar{\nu}} = 0.0033$$

Violation de CP dans les B

- 1973: Kobayashi et Maskawa généralisent l'idée de Cabibbo: l'asymétrie peut être expliquée si il y a 3 autres quarks!

Quark c découvert en 1974, quark b en 1977, quark t en 1994

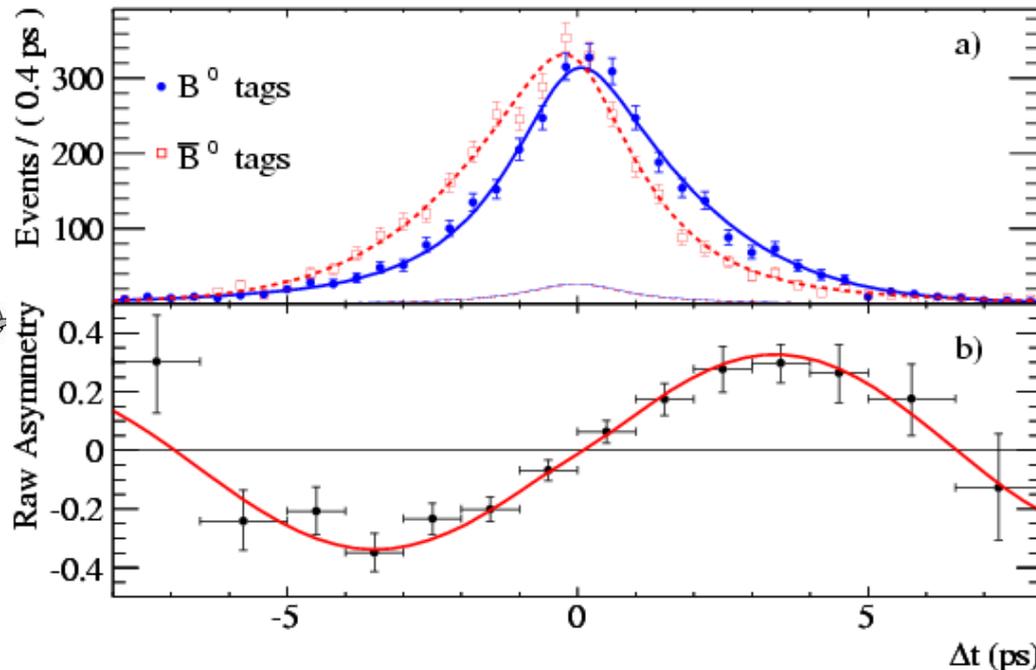
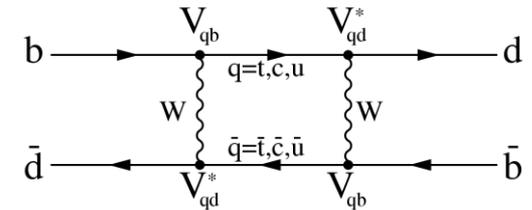
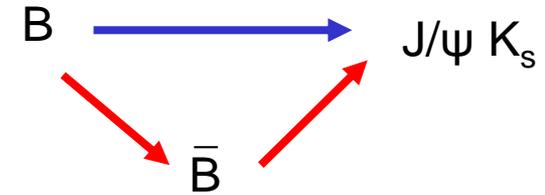
Prix Nobel en 2008 pour K&M!



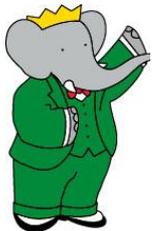
- Leur modèle prévoit une grande asymétrie pour les mésons B

Les « usines à B »

- Babar: SLAC, Californie 1999-2008
- Belle: KEK, Japon 2001-2010



Asymétrie = 0.69 ± 0.03
 En accord avec le modèle CKM !!

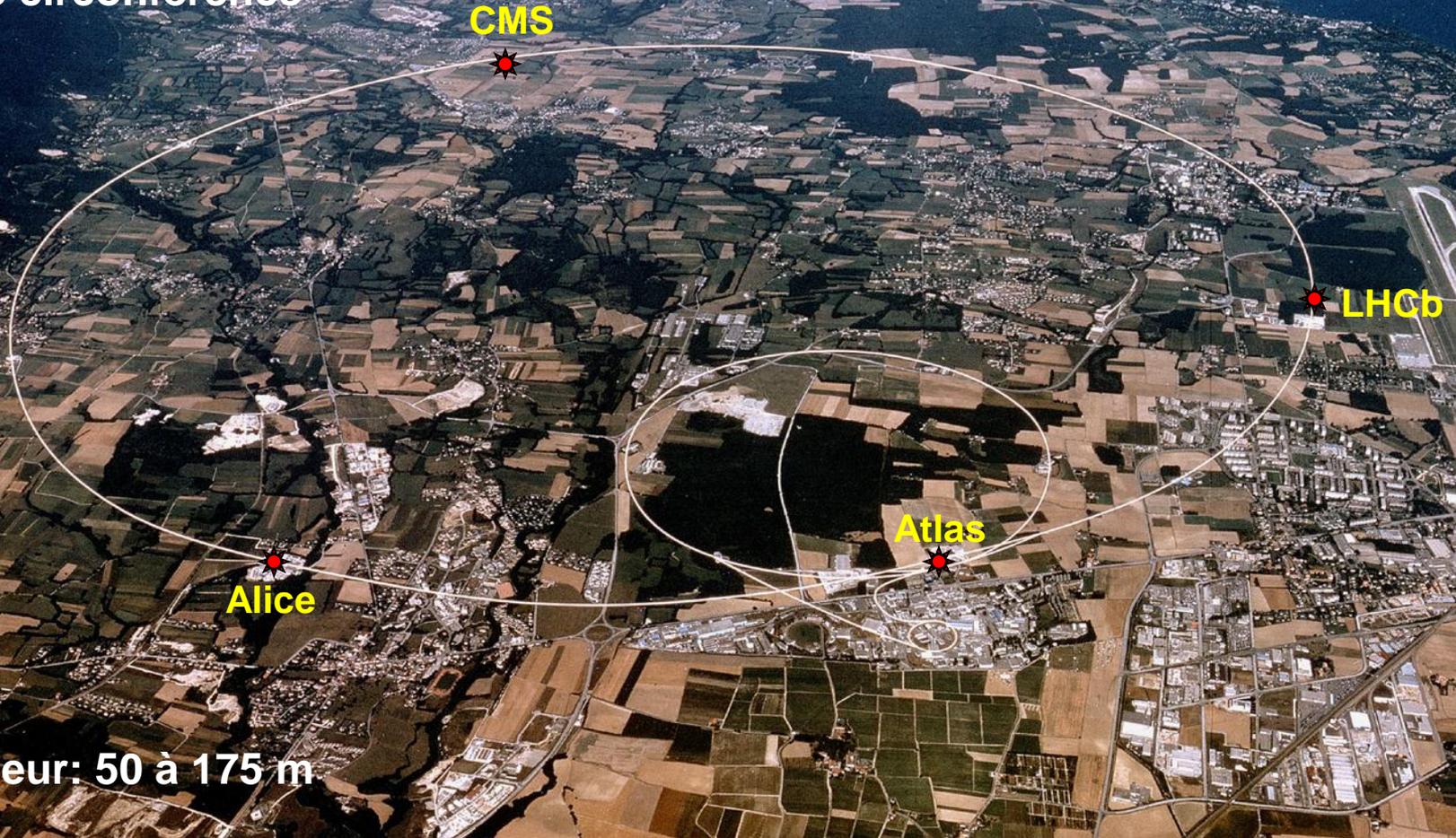


- Mais elle n'est pas suffisante pour expliquer l'asymétrie matière antimatière de l'univers ☹
- Peut être trouvera-t-on d'autres sources de violation de CP avec les mésons B que le modèle CKM...

Le Large Hadron Collider (LHC)

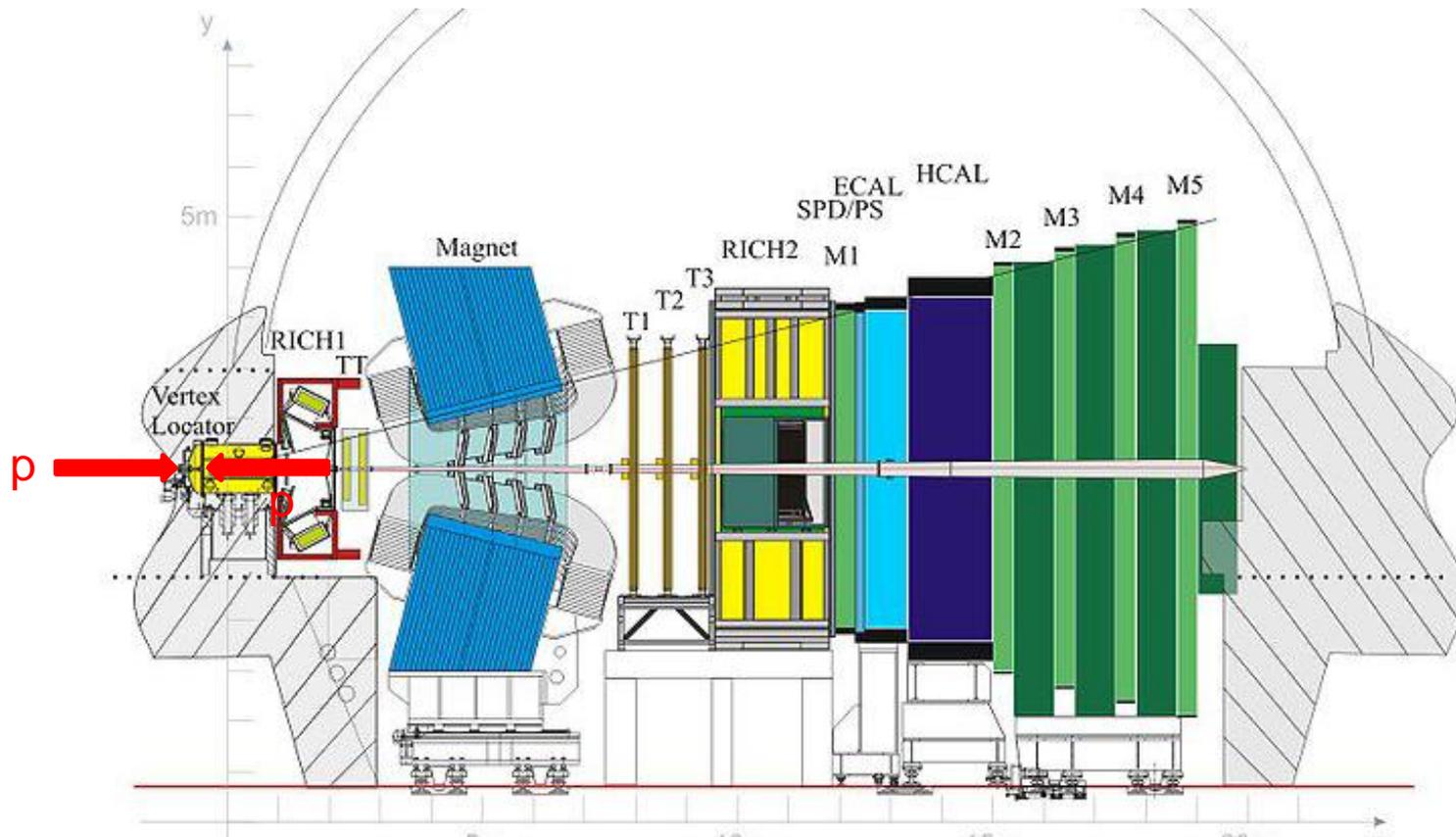
- Le plus grand et le plus complexe instrument scientifique au monde

Collisionneur proton-proton, énergie de 7 TeV + 7 TeV
27 km de circonférence



Profondeur: 50 à 175 m

Le détecteur LHCb

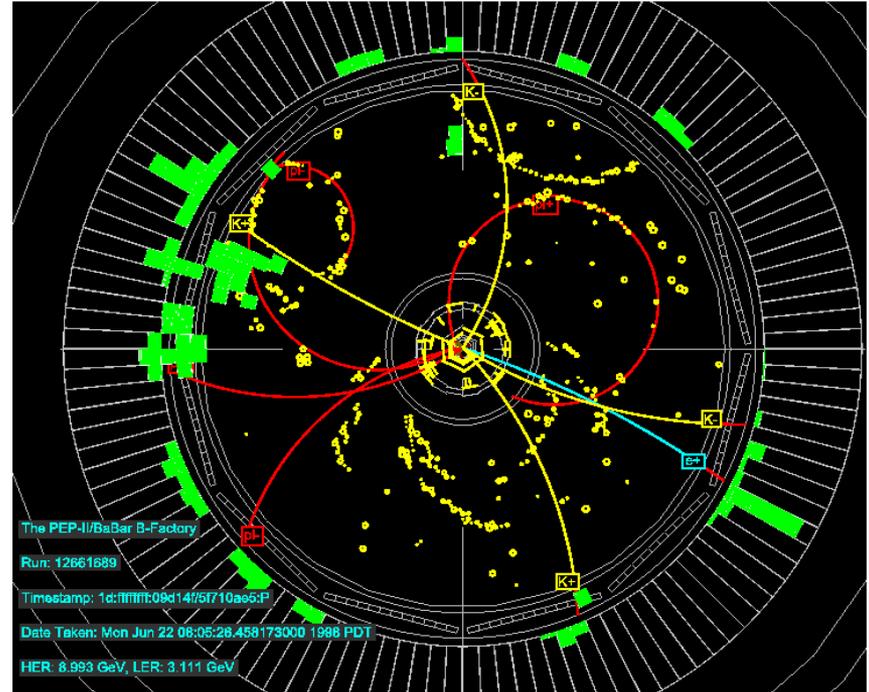
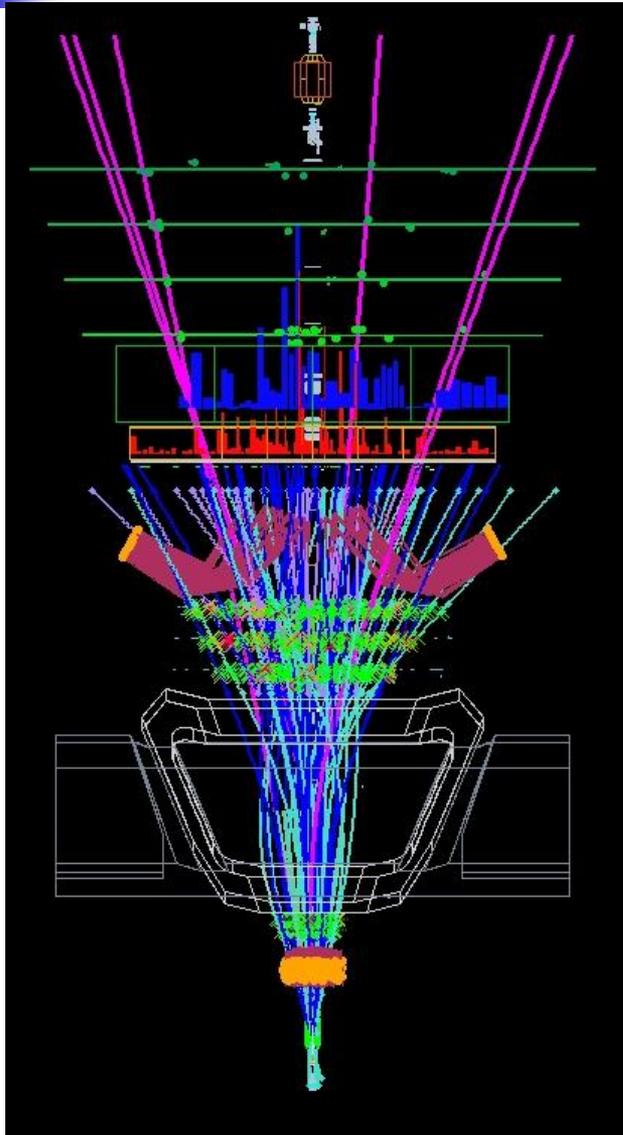


Environ 220×10^9 de paires bb enregistrées en 2 ans de prise de donnée !

912 physiciens de 17 pays



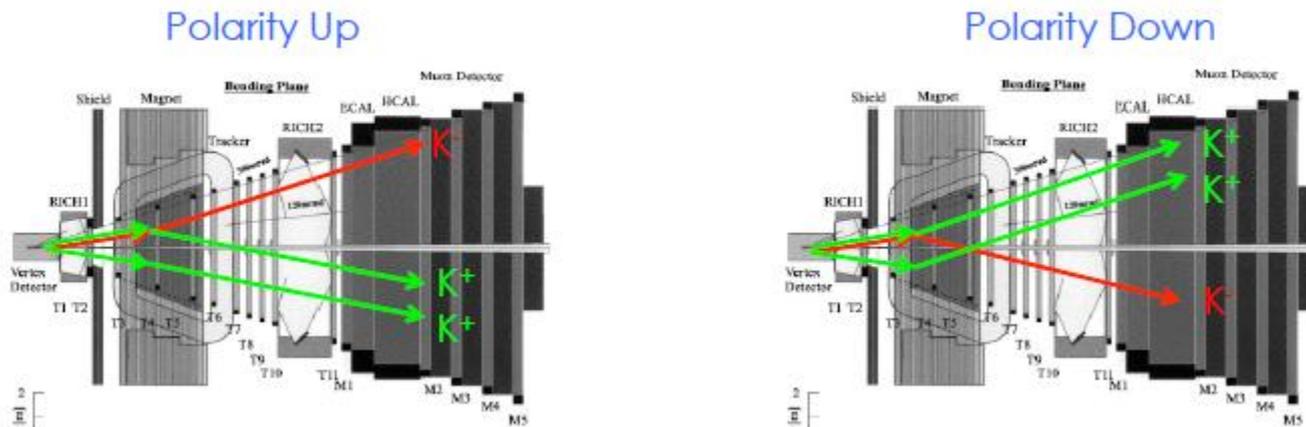
LHCb vs usines à B



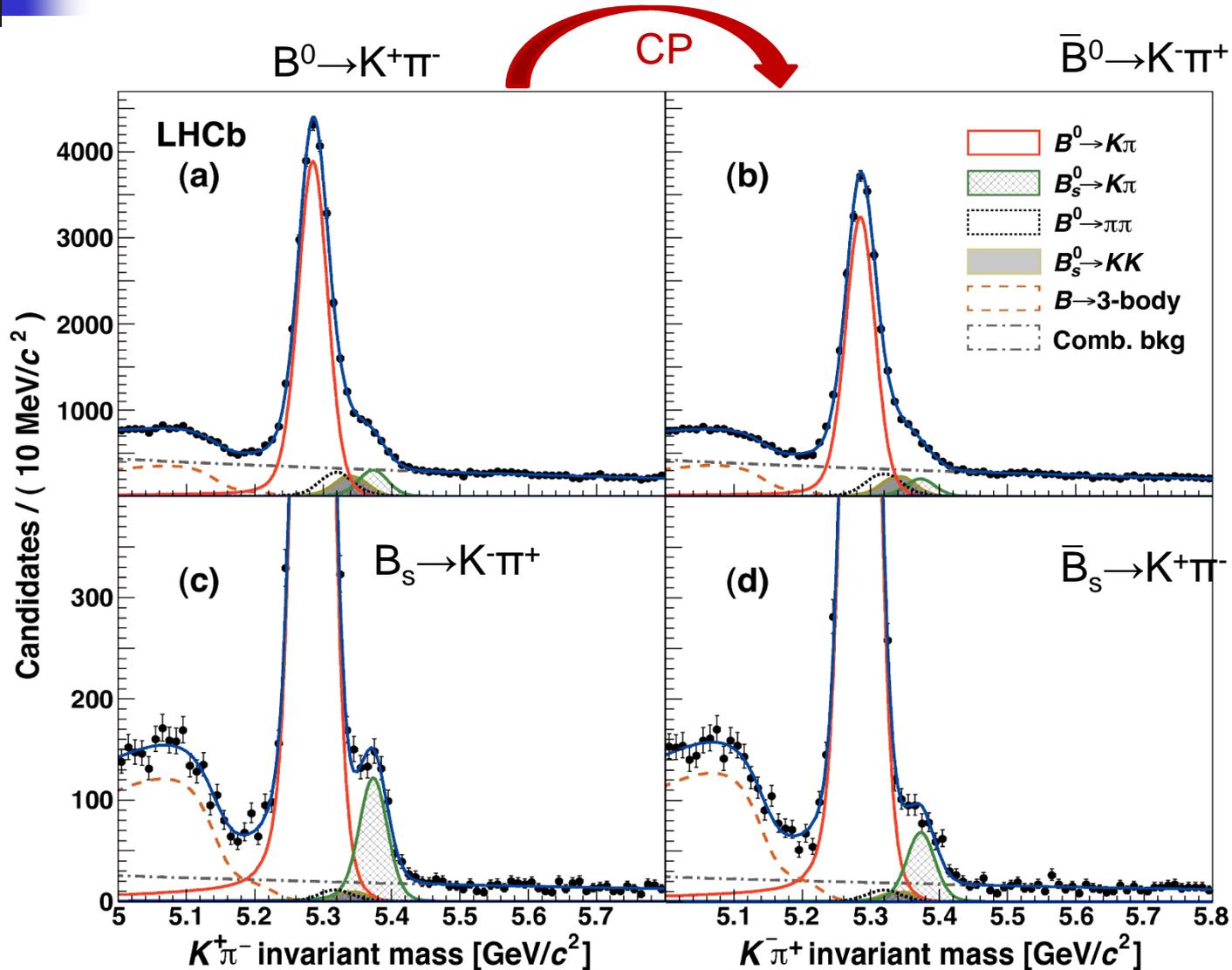
Violation de CP à LHCb

- Les usines à B ont étudié principalement les B^0 (bd) et B^+ (bu)
- LHCb a le plus grand échantillon de B au monde, et surtout de B_s (bs) !
- On étudie toutes les asymétries CP possible...
- On doit faire attention aux autres sources d'asymétrie!

- Par exemple: l'efficacité de voir un K^+ n'est pas la même qu'un K^-



Première observation de violation de CP dans le B_s



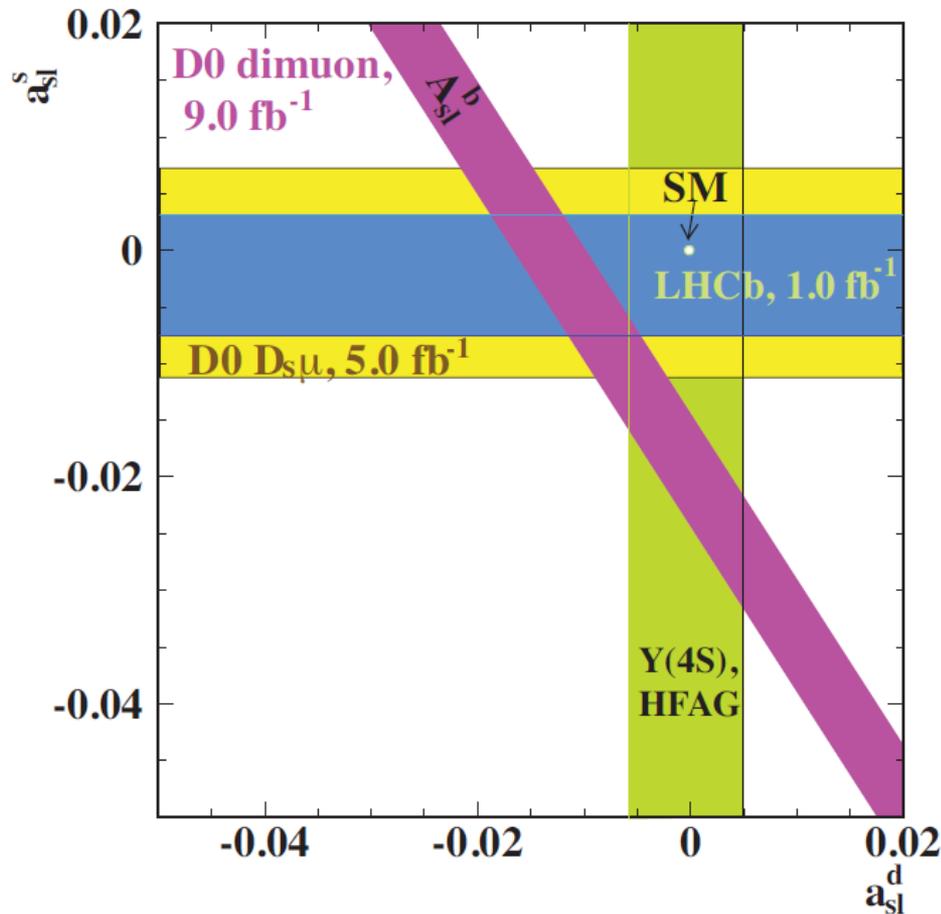
Avril 2013

$$A_{CP}(B_s^0 \rightarrow K^- \pi^+) = +0.27 \pm 0.04 \pm 0.01$$

Asymétrie semileptonique du B_s

$$\frac{D_s^- \mu^+ - D_s^+ \mu^-}{D_s^- \mu^+ + D_s^+ \mu^-}$$

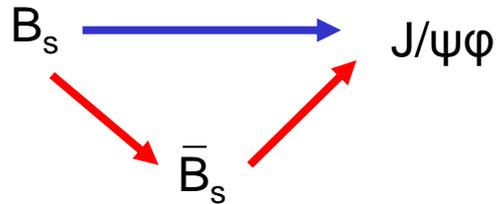
Juillet 2012



D0 mesurait une valeur différente du modèle standard, ce résultat n'est pas confirmé par LHCb

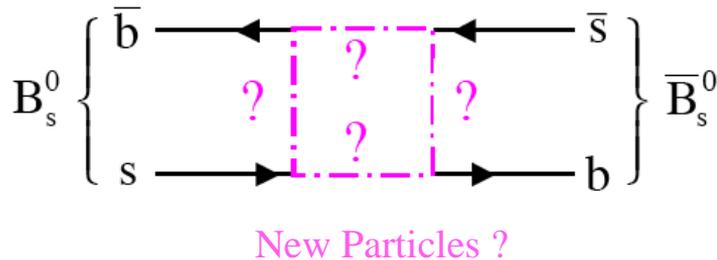
Violation de CP dans le mélange

Mars 2012



Interférence entre la désintégration **directe** et la désintégration après **oscillation**

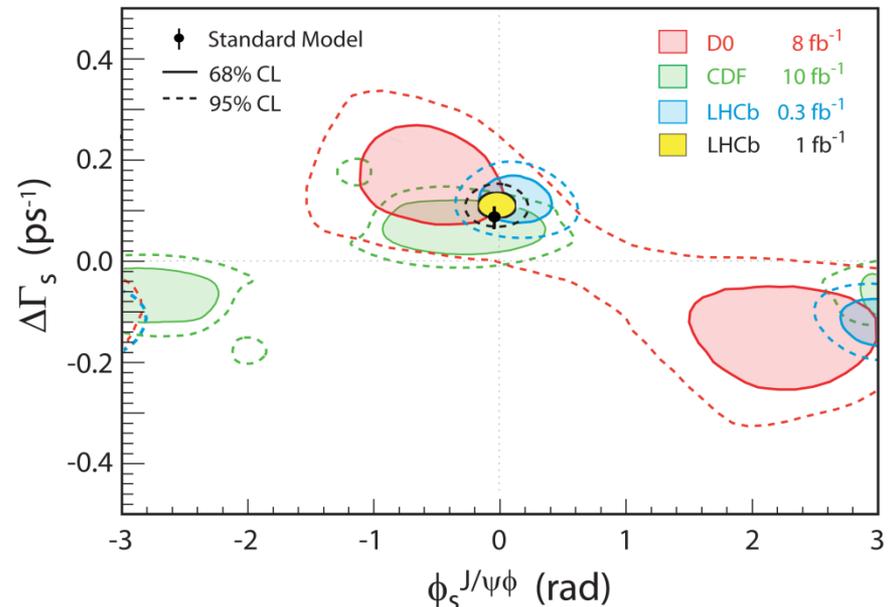
Le modèle standard prédit: $\phi_s = -0.036 \pm 0.002$ rad mais la nouvelle physique peut modifier cette valeur

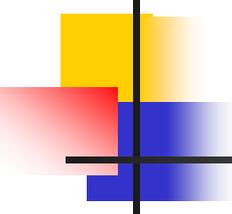


LHCb mesure:

$$\phi_s = -0.001 \pm 0.101 \pm 0.027 \text{ rad}$$

Compatible avec le modèle standard mais on peut encore gagner en précision!



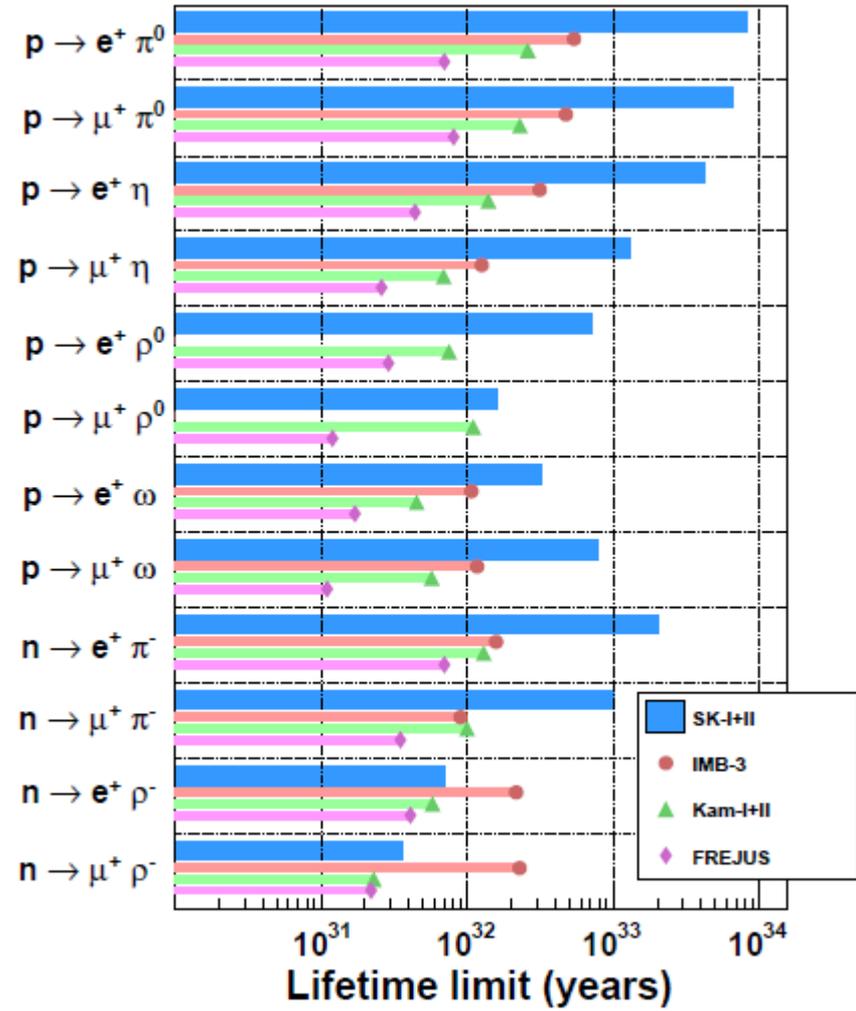
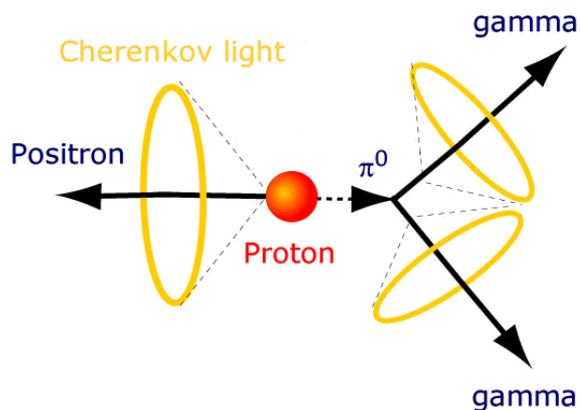
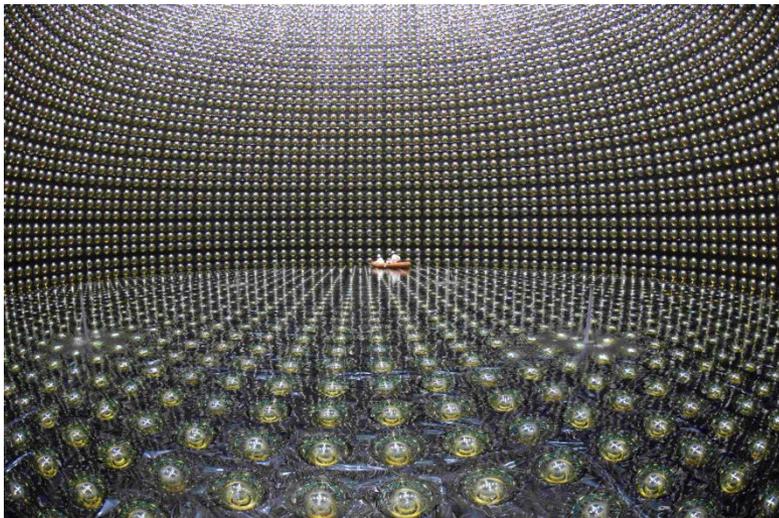


Les recherches sur l'antimatière

- Violation de CP dans le secteur des quarks: étudiée dans le système des mésons K et B
- Violation du nombre baryonique : désintégration du proton
- Recherche d'antimatière dans l'univers
- Quelle est l'anti-particule du neutrino ?
- Etude des propriétés des anti-atomes

Désintégration du proton

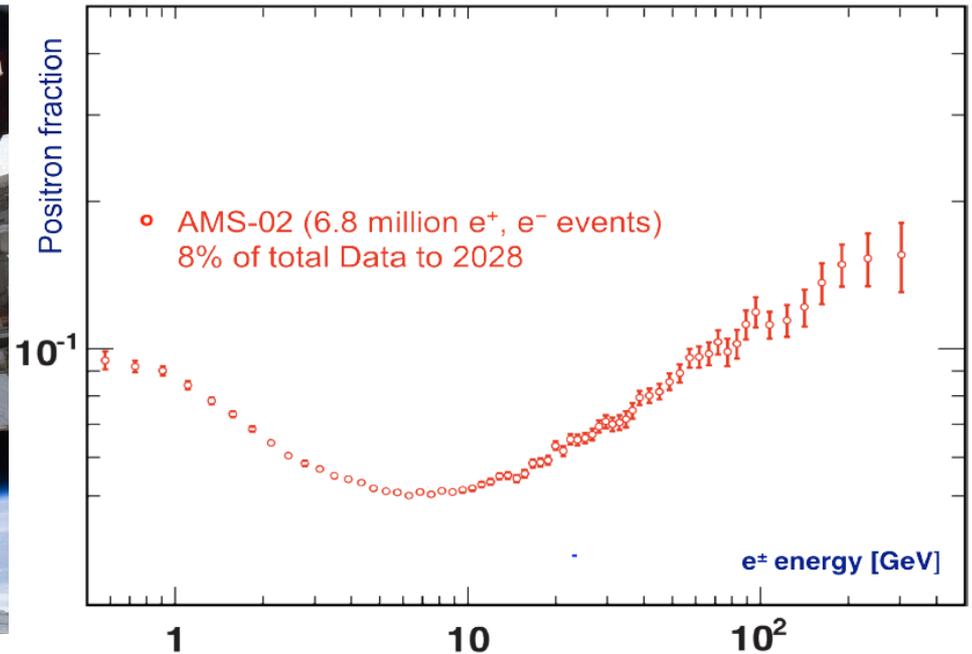
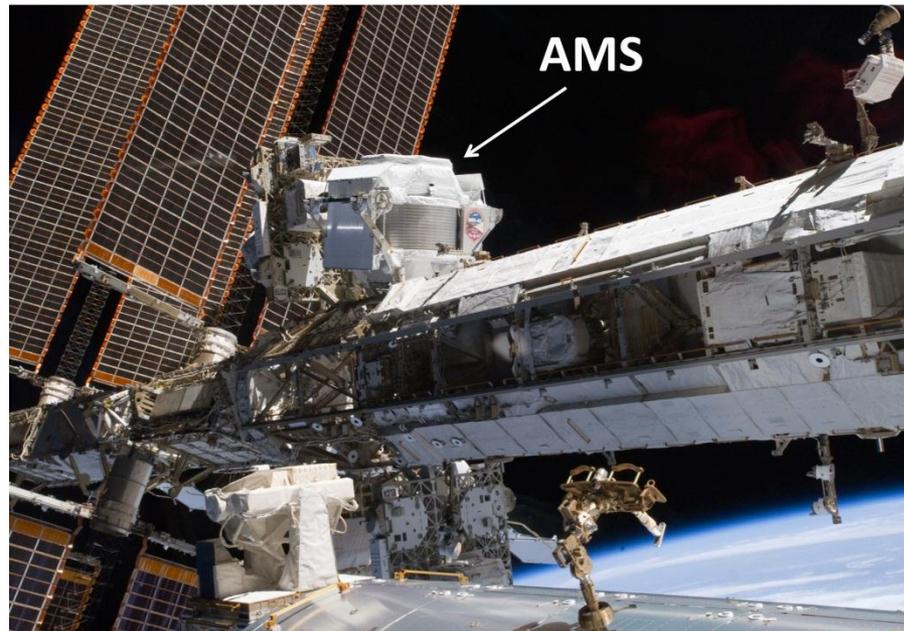
- Super KamioKande (Japon)
50kt d'eau, détection cherenkov



Toujours pas observée!

Recherche d'antimatière dans l'univers

- AMS: détecteur de particule sur l'ISS, lancé en mai 2011



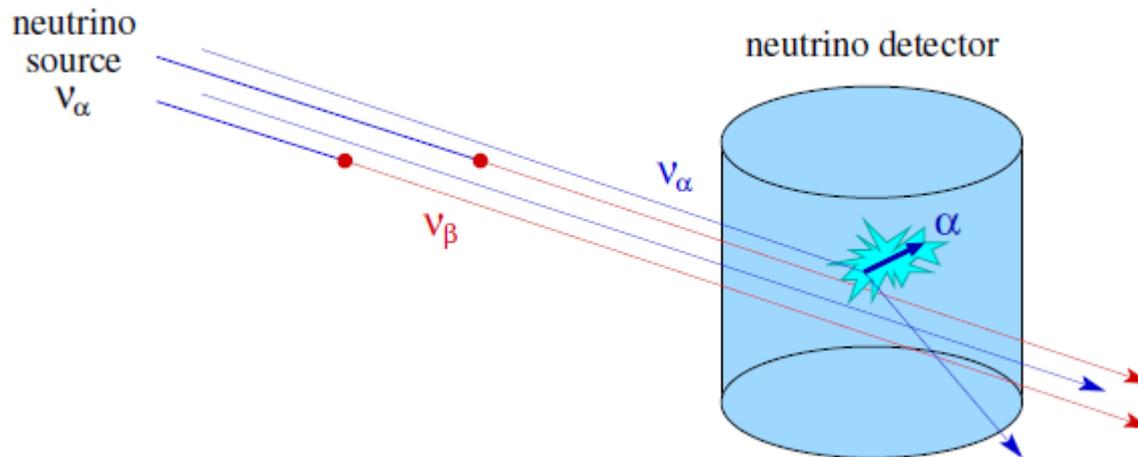
Excès de positrons! Viennent-ils de matière noire, bruit de fond, Pulsar,...?

La fraction de positron semble isotrope : pas de source privilégiée

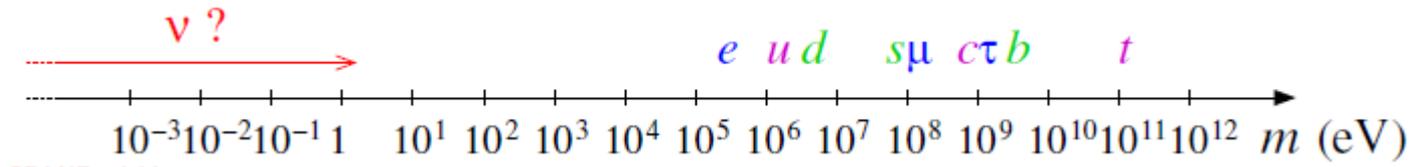
En 1998, AMS-01 avait aussi cherché des noyaux d'anti-hélium : pas de trace pour l'instant

Etude des neutrinos

- Plusieurs expériences ont établi l'oscillation des neutrinos



- Pour que ces oscillations soient possible, les neutrinos doivent avoir une masse. Cette masse est très petite



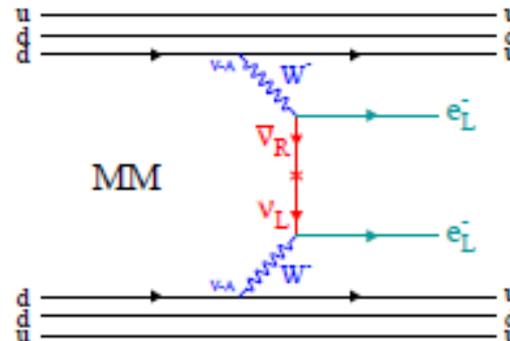
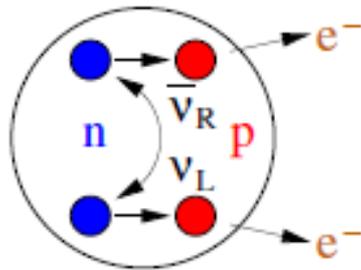
- Mais le modèle standard prédit des neutrinos sans masse...

Etude des neutrinos

- La solution: si le neutrino est sa propre antiparticule, il est possible d'expliquer sa masse
- Une autre conséquence : la présence de violation de CP dans les leptons!

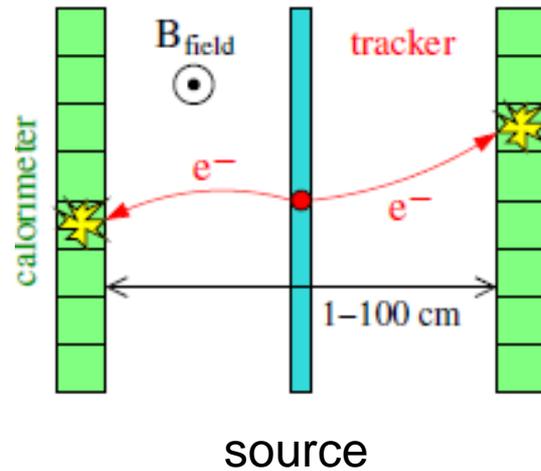
$$\longrightarrow \nu \stackrel{?}{=} \bar{\nu}$$

- Dans ce cas, la désintégration double Beta sans neutrino est possible



Recherche de la désintégration double beta

Principe des expériences:

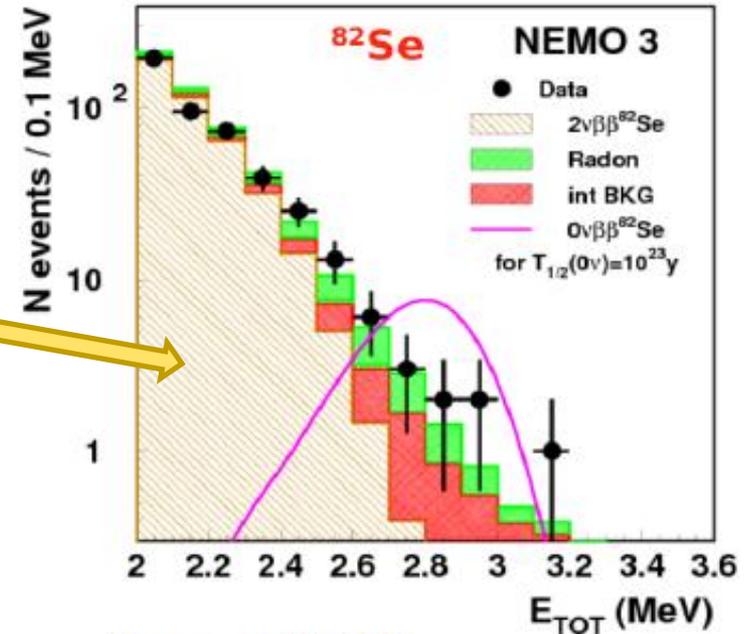
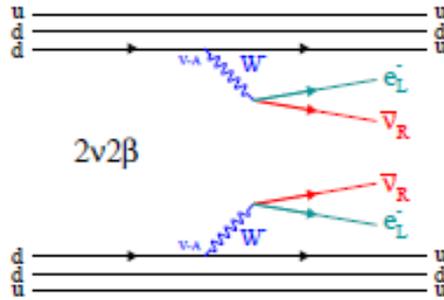
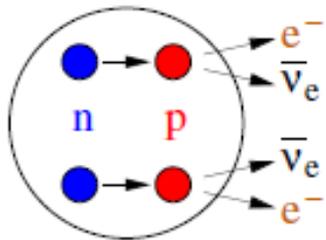


Ex: NEMO3 dans le laboratoire souterrain de Modane



Réduire le bruit de fond est très important!
rayons cosmiques: expérience en sous sol (1700m de roche au dessus de NEMO 3)
Radioactivité naturelle: blindage extérieur

Résultat



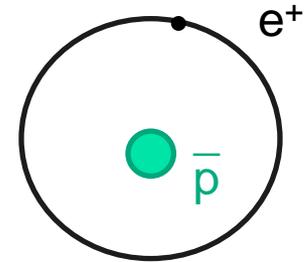
[2.6 – 3.2] MeV
 Phase 1: 4 obs., 3.6 expect.
 Phase 2: 10 obs., 7.3 expect.

$$T_{1/2}^{0\nu}(^{82}\text{Se}) > 3.2 \cdot 10^{23} \text{ yr}$$

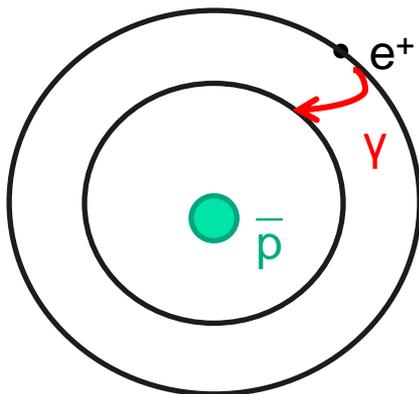
La désintégration double beta sans neutrino n'a pas encore été observée mais beaucoup d'expériences la cherchent

Etude des anti-atomes

- l'anti-hydrogène est le système atomique d'antimatière le plus simple

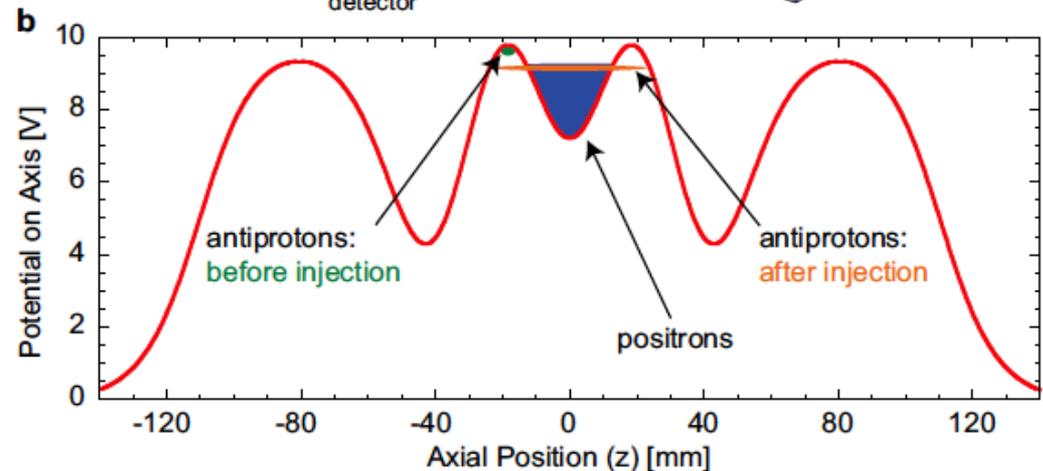
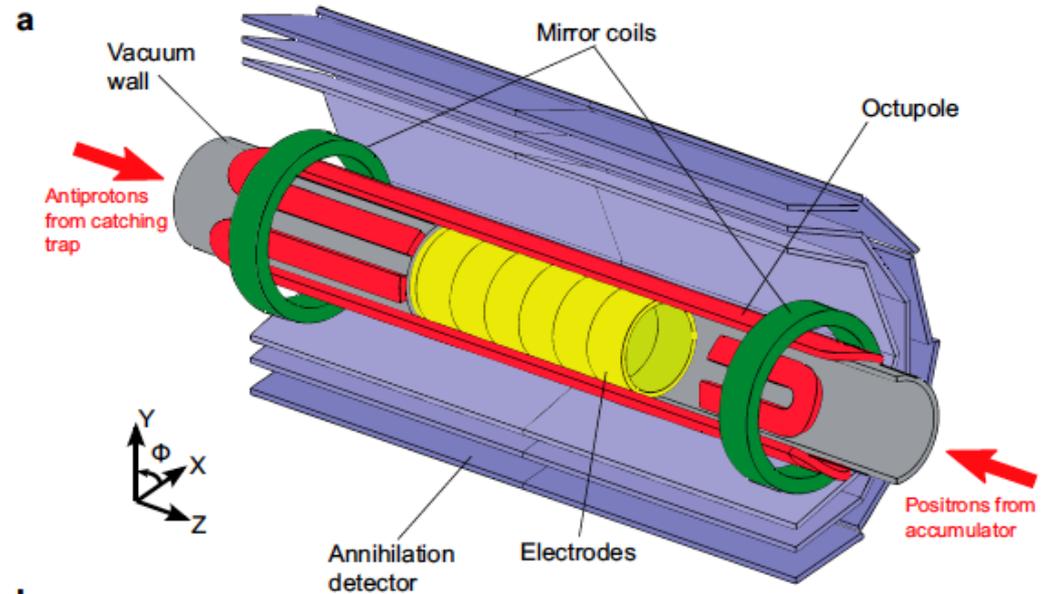
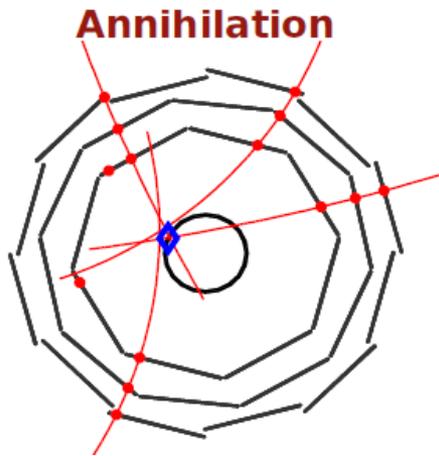


- Comparer ses propriétés avec celle de l'hydrogène peut révéler une asymétrie matière antimatière:
 - Transition du premier état excité vers le niveau fondamental
 - Gravitation: l'anti-hydrogène tombe-t-il vers le haut ?



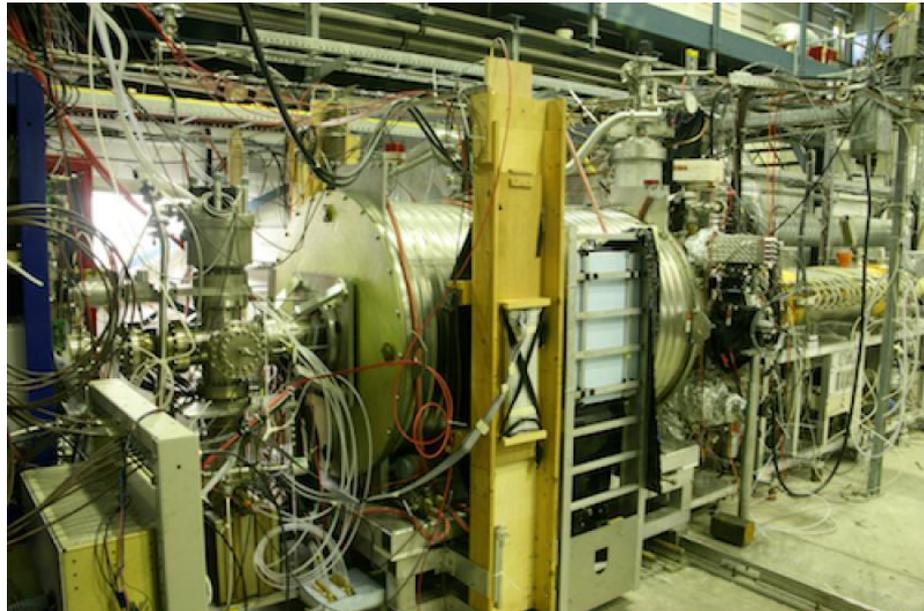
L'expérience ALPHA au CERN

- Création de l'anti-hydrogène à partir d'antiprotons et de positrons froids
- L'anti hydrogène est piégé dans un champ magnétique
- Si on le libère, il s'annihile avec la matière environnante en produisant des pions



Résultats

- En juin 2011 ALPHA est parvenu à piéger des atome d'anti hydrogène pendant 16 minutes!
- En avril 2013, première étude sur les effets de la gravitation

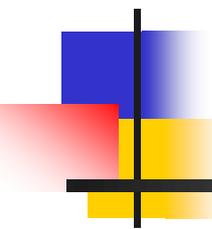


- Pas d'évidence d'asymétrie matière/antimatière mais les études se poursuivent!
- Autres expériences: AEGIS, ASACUSA, ATRAP,...

conclusion

- L'antimatière n'a rien d'esotérique mais on aimerait comprendre pourquoi elle a disparu!
- Les expériences ont montré que les lois de la physique ne sont pas exactement les mêmes pour la matière et l'antimatière
- Mais ces asymétries sont trop petites pour expliquer la disparition de l'antimatière... on continue de chercher d'autres sources d'asymétries!

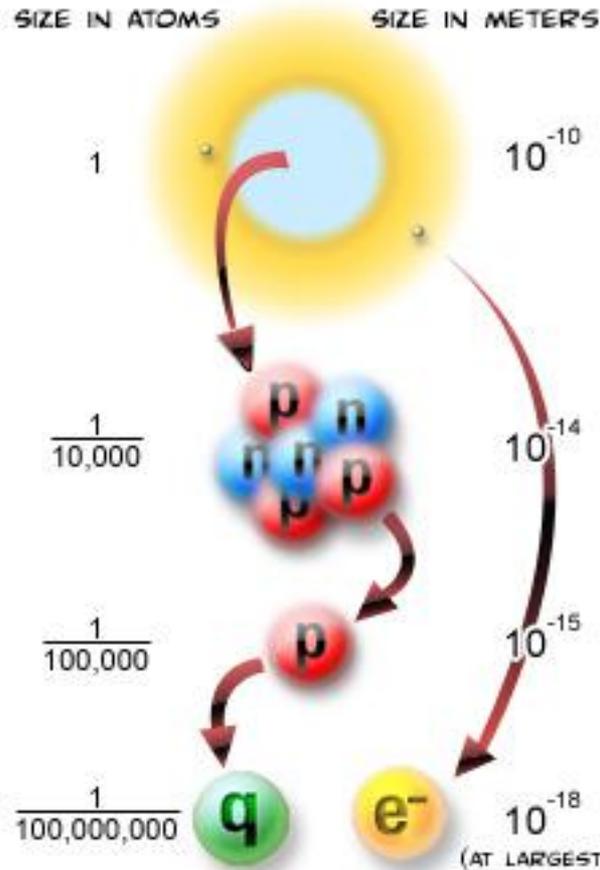




Bonus

Dans le monde de l'infiniment petit...

- Il faut changer de repères et d'habitudes
- Distances:



= 1 fermi = 0.0000000000000001 m

Objets très petits → monde quantique!

Dans le monde de l'infiniment petit...

■ Vitesse:

- Rien ne va plus vite que la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 300000 \text{ km/s}$
- les protons du LHC se déplacent à 99.999991% de c

Vitesses très grandes → monde relativiste!

→ Dilatation du temps, contraction des longueurs

■ Energie:

- Petite à notre échelle mais très grande au niveau des particules
- On parle en électron-Volt: $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$
- 1TeV (Téra= 10^{12}) = énergie cinétique d'un moustique en vol... mais ici concentré dans un volume mille milliard de fois inférieur au moustique

■ Masse: $E=mc^2$, c'est pareil que de l'énergie

- Mass du proton: 0.94 GeV (Giga = 10^9)

L'accélération des protons

- Les protons acquièrent leur énergie grâce à une succession de plusieurs accélérateurs

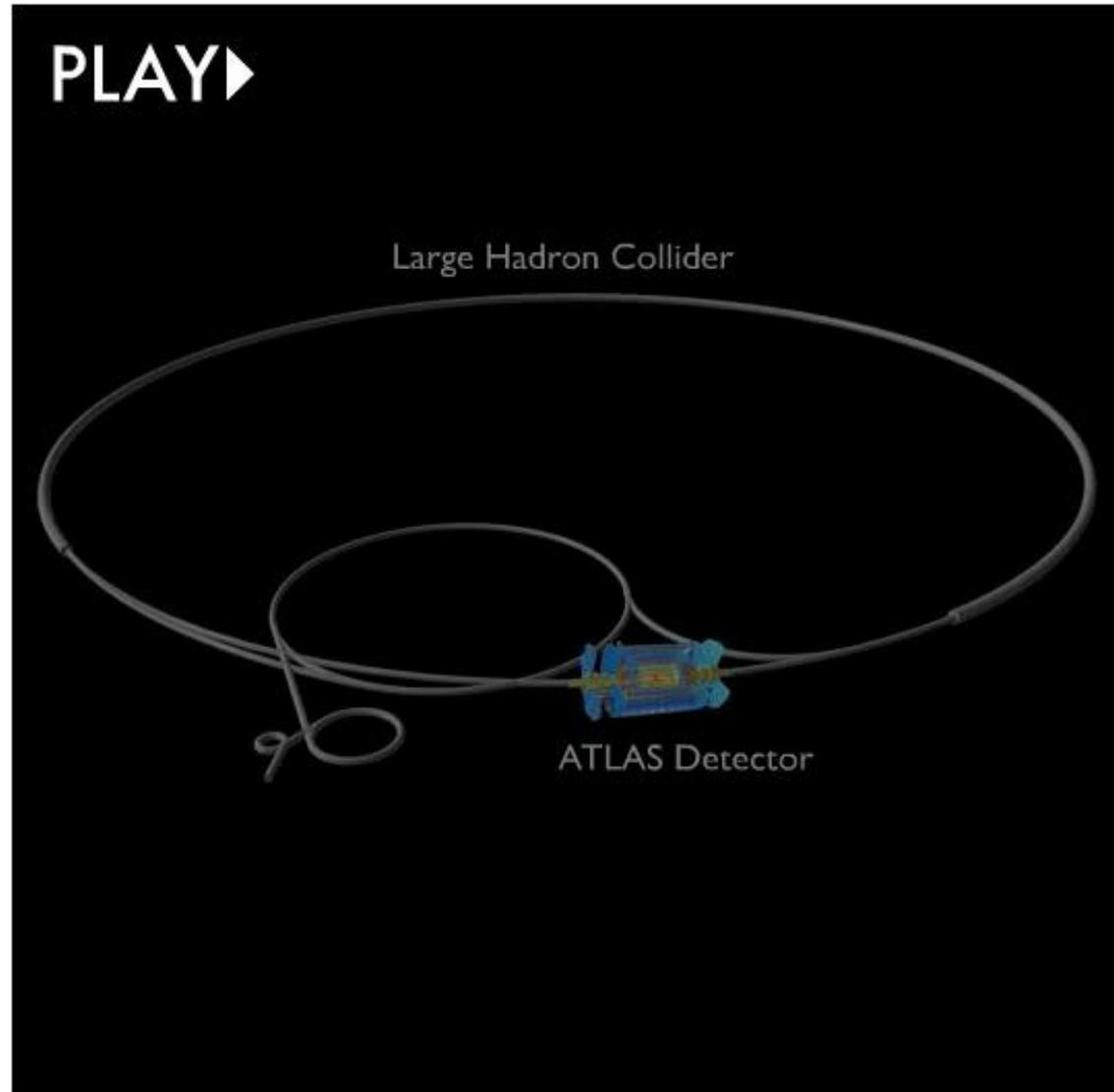
Linac 50 MeV 31% c

Booster 1.4 GeV 92% c

PS 25 GeV 99.93% c

SPS 450 GeV 99.998% c

LHC 14 TeV 99.9999991% c



Les désintégrations

- Plus une particule est lourde, plus elle se désintègre rapidement et plus elle a de possibilités pour se désintégrer

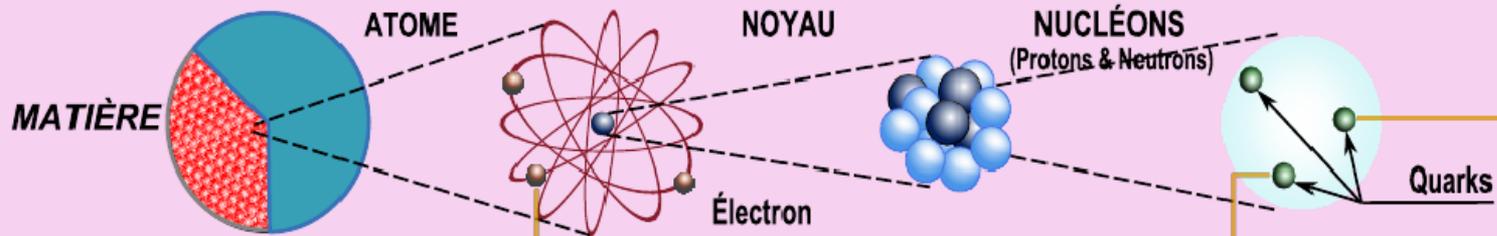
B⁰ DECAY MODES

Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level						
Γ_1 $\ell^+ \nu_\ell$ anything	[a] (10.33 ± 0.28) %		Γ_{19} K^\pm anything	(78 ± 8) %				
Γ_2 $e^+ \nu_e X_c$	(10.1 ± 0.4) %		Γ_{20} $D^0 X$	(8.1 ± 1.5) %				
Γ_3 $D \ell^+ \nu_\ell$ anything	(9.4 ± 0.9) %		Γ_{21} $\bar{D}^0 X$	(47.4 ± 2.8) %				
Γ_4 $D^- \ell^+ \nu_\ell$	[a] (2.17 ± 0.12) %		Γ_{22} $D^+ X$	< 3.9 %	CL=90%			
Γ_5 $D^- \tau^+ \nu_\tau$	(1.1 ± 0.4) %		Γ_{23} $D^- X$	(36.9 ± 3.3) %				
Γ_6 $D^*(2010)^- \ell^+ \nu_\ell$	[a] (5.05 ± 0.12) %		Γ_{24} $D_s^+ X$	(10.3 ± 2.1) %				
Γ_7 $D^*(2010)^- \tau^+ \nu_\tau$	(1.5 ± 0.5) %	S=1.4	Γ_{25} $D_s^- X$	< 2.6 %	CL=90%			
Γ_8 $\bar{D}^0 \pi^- \ell^+ \nu_\ell$	(4.3 ± 0.6) × 10 ⁻³		Γ_{26} $\Lambda_c^+ X$	< 3.1 %	CL=90%			
Γ_9 $D_1^0(2400)^- \ell^+ \nu_\ell \times$ $B(D_1^0 \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-)$	(3.0 ± 1.2) × 10 ⁻³	S=1.8	Γ_{27} $\bar{\Lambda}_c^- X$	(5.0 ± 2.1) %				
Γ_{10} $D_2^0(2460)^- \ell^+ \nu_\ell \times$ $B(D_2^0 \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-)$	(1.21 ± 0.33) × 10 ⁻³	S=1.8	Γ_{28} $\bar{c} X$	(95 ± 5) %				
Γ_{11} $\bar{D}^{(*)} n \pi \ell^+ \nu_\ell (n \geq 1)$	(2.3 ± 0.5) %		Γ_{29} $c X$	(24.6 ± 3.1) %				
Γ_{12} $\bar{D}^{*0} \pi^- \ell^+ \nu_\ell$	(4.9 ± 0.8) × 10 ⁻³		Γ_{30} $\bar{c} c X$	(119 ± 6) %				
Γ_{13} $D_1(2420)^- \ell^+ \nu_\ell \times$ $B(D_1^- \rightarrow \bar{D}^{*0} \pi^-)$	(2.80 ± 0.28) × 10 ⁻³							
Γ_{14} $D_1^*(2430)^- \ell^+ \nu_\ell \times$ $B(D_1^{*-} \rightarrow \bar{D}^{*0} \pi^-)$	(3.1 ± 0.9) × 10 ⁻³		Inclusive modes					
Γ_{15} $D_2^*(2460)^- \ell^+ \nu_\ell \times$ $B(D_2^{*-} \rightarrow \bar{D}^{*0} \pi^-)$	(6.8 ± 1.2) × 10 ⁻⁴		Γ_{31} $D^- \pi^+$	(2.68 ± 0.13) × 10 ⁻³				
Γ_{16} $\rho^- \ell^+ \nu_\ell$	[a] (2.07 ± 0.34) × 10 ⁻⁴	S=1.4	Γ_{32} $D^- \rho^+$	(7.8 ± 1.3) × 10 ⁻³				
Γ_{17} $\pi^- \ell^+ \nu_\ell$	[a] (1.42 ± 0.06) × 10 ⁻⁴		Γ_{33} $D^- K^0 \pi^+$	(4.9 ± 0.9) × 10 ⁻⁴				
Γ_{18} $\pi^- \mu^+ \nu_\mu$			Γ_{34} $D^- K^*(892)^+$	(4.5 ± 0.7) × 10 ⁻⁴				
			Γ_{35} $D^- \omega \pi^+$	(2.8 ± 0.6) × 10 ⁻³				
			Γ_{36} $D^- K^+$	(2.0 ± 0.6) × 10 ⁻⁴				
			Γ_{37} $D^- K^+ \bar{K}^0$	< 3.1 × 10 ⁻⁴	CL=90%			
			Γ_{38} $D^- K^+ \bar{K}^*(892)^0$	(8.8 ± 1.9) × 10 ⁻⁴				
			Γ_{39} $\bar{D}^0 \pi^+ \pi^-$	(8.4 ± 0.9) × 10 ⁻⁴				
			D, D*, or D_s modes					
			Γ_{40} $D^*(2010)^- \pi^+$	(2.76 ± 0.13) × 10 ⁻³				
			Γ_{41} $D^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	(8.0 ± 2.5) × 10 ⁻³				
			Γ_{42} $(D^- \pi^+ \pi^+ \pi^-)$ nonresonant	(3.9 ± 1.9) × 10 ⁻³				
			Γ_{43} $D^- \pi^+ \rho^0$	(1.1 ± 1.0) × 10 ⁻³				
			Γ_{44} $D^- a_1(1260)^+$	(6.0 ± 3.3) × 10 ⁻³				
			Γ_{45} $D^*(2010)^- \pi^+ \pi^0$	(1.5 ± 0.5) %				
			Γ_{46} $D^*(2010)^- \rho^+$	(6.8 ± 0.9) × 10 ⁻³				
			Γ_{47} $D^*(2010)^- K^+$	(2.14 ± 0.16) × 10 ⁻⁴				
			Γ_{48} $D^*(2010)^- K^0 \pi^+$	(3.0 ± 0.8) × 10 ⁻⁴				
			Γ_{49} $D^*(2010)^- K^+ K^*(892)^+$	(3.3 ± 0.6) × 10 ⁻⁴				
			Γ_{50} $D^*(2010)^- K^+ \bar{K}^0$	< 4.7 × 10 ⁻⁴	CL=90%			
			Γ_{51} $D^*(2010)^- K^+ \bar{K}^*(892)^0$	(1.29 ± 0.33) × 10 ⁻³				
			Γ_{52} $D^*(2010)^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	(7.0 ± 0.8) × 10 ⁻³				S=1.3
			Γ_{53} $(D^*(2010)^- \pi^+ \pi^+ \pi^-)$ non-resonant	(0.0 ± 2.5) × 10 ⁻³				
			Γ_{54} $D^*(2010)^- \pi^+ \rho^0$	(5.7 ± 3.2) × 10 ⁻³				
			Γ_{55} $D^*(2010)^- a_1(1260)^+$	(1.30 ± 0.27) %				
			Γ_{56} $D^*(2010)^- \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	(1.76 ± 0.27) %				
			Γ_{57} $D^{*-} 3\pi^+ 2\pi^-$	(4.7 ± 0.9) × 10 ⁻³				
			Γ_{58} $\bar{D}^*(2010)^- \omega \pi^+$	(2.89 ± 0.30) × 10 ⁻³				
			Γ_{59} $D_1(2430)^0 \omega \times$ $R(D_1(2430)^0 \rightarrow D^{*-} \pi^+)$	(4.1 ± 1.6) × 10 ⁻⁴				

Etc !!!

- Dans les détecteurs, on « voit » les produits de désintégrations stables (p, γ , e) ou à durée de vie longue (K, π , μ) grâce au boost relativiste

Le modèle standard en résumé



FERMIONS

La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.

Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.

ANTIMATIÈRE

A chaque particule correspond une antiparticule.

		LEPTONS peuvent se déplacer librement		QUARKS prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.	
Première famille	ÉLECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est de -1.	NEUTRINO ÉLECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.	DOWN Sa charge électrique est $-1/3e$. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.	UP Sa charge électrique est $+2/3e$. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.	
Deuxième famille	MUON Un compagnon plus massif de l'électron.	NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	ÉTRANGE (STRANGE) Un compagnon plus lourd du quark down.	CHARME (CHARM) Un compagnon plus lourd du quark up.	
Troisième famille	TAU Un compagnon encore plus lourd que le muon.	NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	BEAUTÉ (BEAUTY, BOTTOM) Un compagnon encore plus lourd du quark down.	TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du quark up.	

BOSONS VECTEURS

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

PHOTON

Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.



GLUON

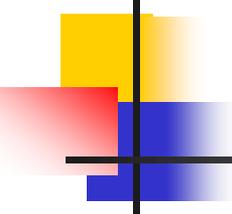
Porteur de la force "forte" entre quarks.



BOSONS INTERMÉDIAIRES : W^+ , W^- et Z^0

Porteurs de la force "faible", responsable des désintégrations radioactives.

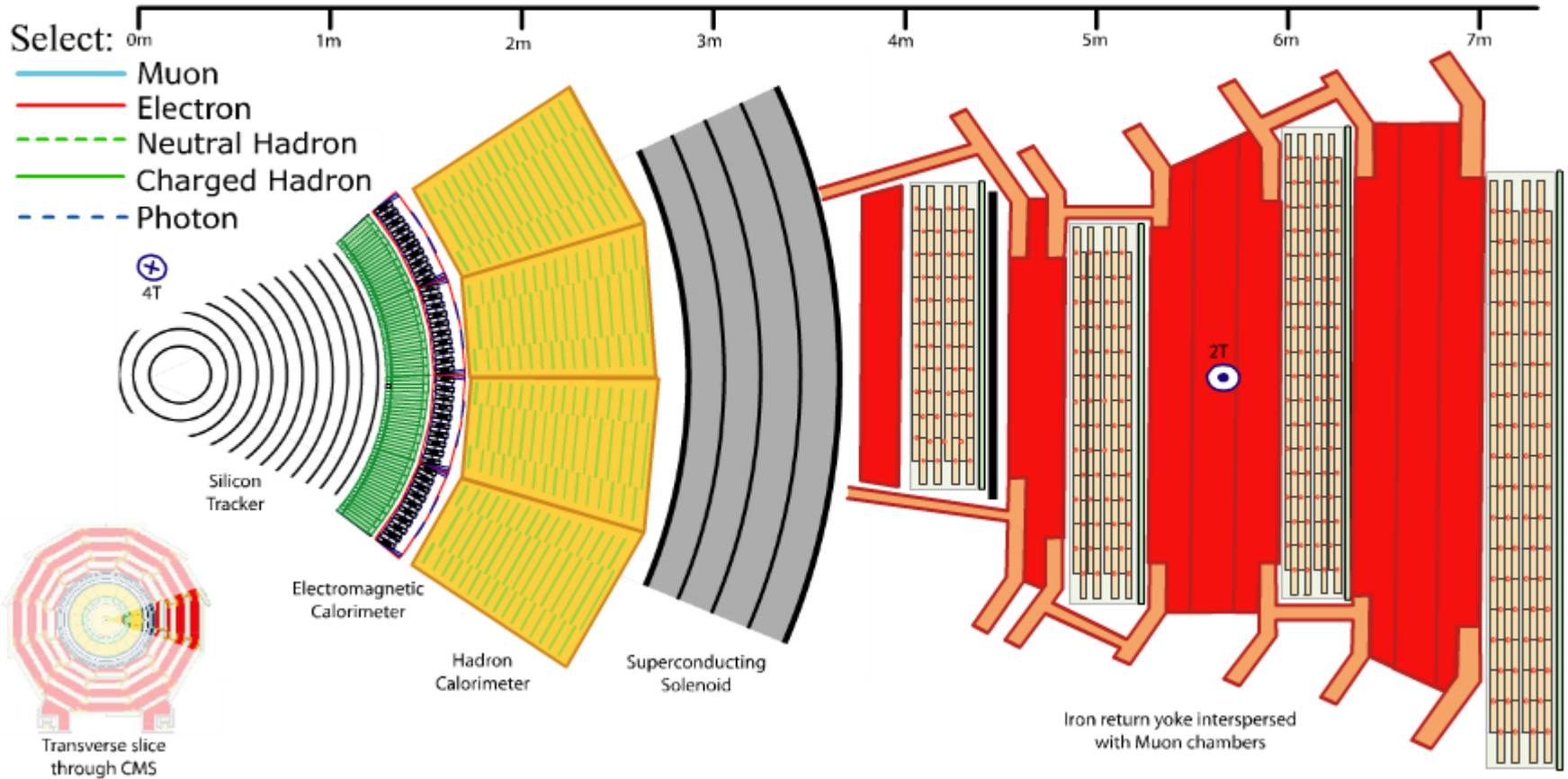




Concrètement...

- Le LHC produit des collisions (20Million/s)
- Les expériences détectent les particules créées lors des collisions et leurs produits de désintégrations
- Toutes les collisions ne sont pas intéressantes, de plus, on ne pourrait pas tout enregistrer pour des questions d'espace de stockage et de vitesse de lecture, donc on filtre les événements en se basant sur quelques informations du détecteur
- Les données intéressantes sont « reconstruites ». A partir des informations du détecteurs on calcule pour chaque particule:
 - La trajectoire → détecteurs de trace
 - L'énergie → calorimètre
 - L'impulsion → champ magnétique
 - La masse → effet cherenkov, détecteurs de muons,...
- Les données reconstruites peuvent ensuite être analysées

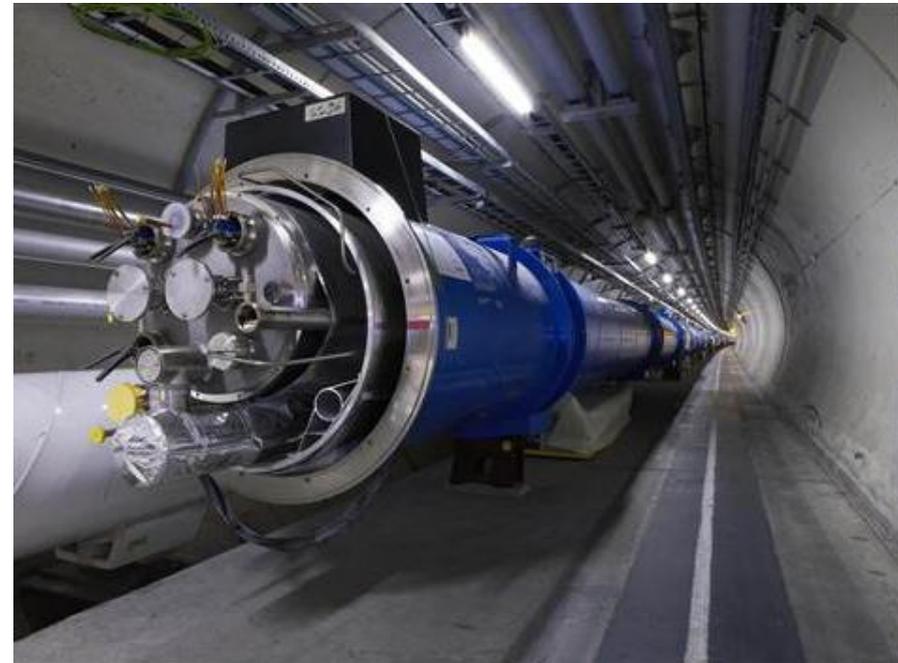
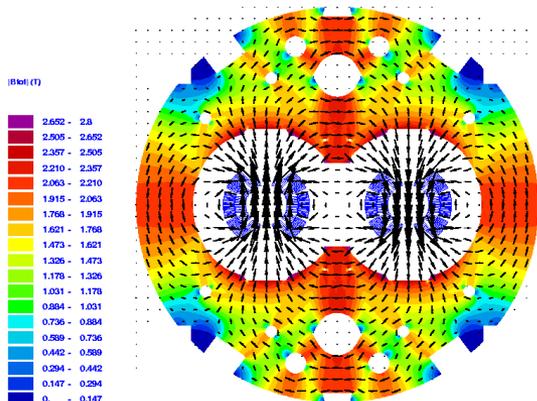
Fonctionnement d'un détecteur



Le LHC: un défi technologique

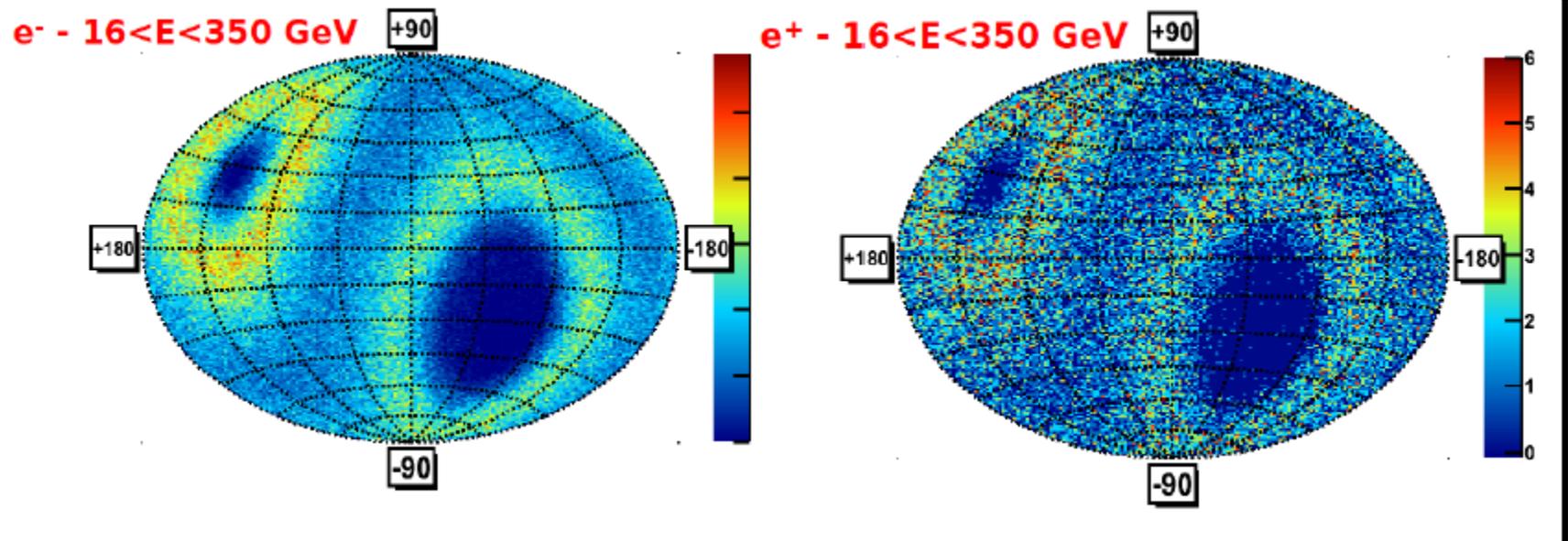
- Les protons sont accélérés par des champs électriques
- Ils sont maintenus sur la trajectoire courbée par des champs magnétiques
- LHC: 9600 aimants dont 1232 dipôles (courbure), 392 quadrupoles (focalisation), etc..
- Champs magnétique dans les dipôles: 8.33T
- Technologie supraconductrice: fonctionne à 1.9K (-271.3 °C)
- Vide extrême dans l'enceinte des faisceaux: 10 fois plus poussé que sur la lune
- 120 MW de consommation électrique

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



Recherche d'antimatière dans l'univers

- La fraction de positron semble isotrope : pas de source privilégiée



- En 1998, AMS-01 avait aussi cherché des noyau d'anti-hélium : pas de trace!