

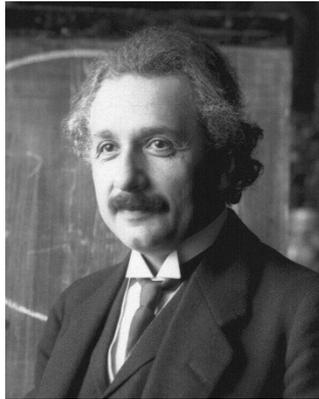


# L'anti-matière

ou notre reflet dans un miroir

# Invention et découverte

1905 : Einstein



Relativité restreinte



Mécanique quantique

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



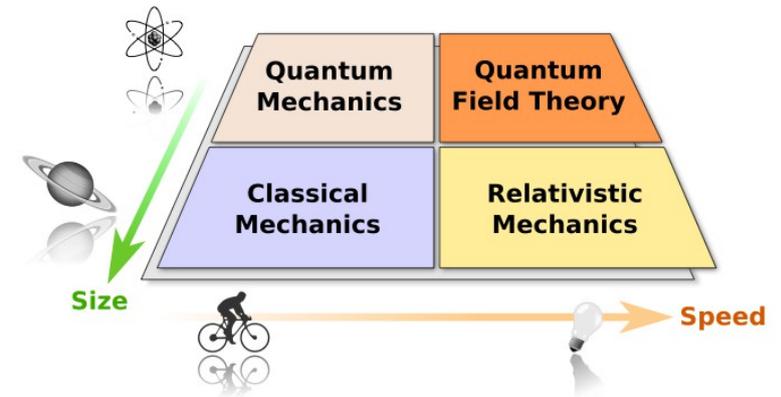
Schrödinger et Dirac  
partage le prix Nobel en  
1933

# Le positon

## Equation du mouvement d'un électron

1928, Dirac

- mécanique quantique
- cas relativiste
- Equation de Dirac
- $i\hbar \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H(t) |\psi(t)\rangle$
- où  $H(t) = mc^2\alpha_0 - c\boldsymbol{\alpha}\cdot\mathbf{p}$
- 2 solutions :
- énergie positive  $\Rightarrow$  électron
- énergie négative  $\Rightarrow$  positon



# Le positon

## Equation du mouvement d'un électron

1928, Dirac

- mécanique quantique
- cas relativiste
- Equation de Dirac
- $i\hbar \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H(t) |\psi(t)\rangle$
- où  $H(t) = mc^2\alpha_0 - c\alpha.p$
- 2 solutions :
- énergie positive  $\Rightarrow$  électron
- énergie négative  $\Rightarrow$  positon

## Observation :

1932, Anderson

- enregistre dans une chambre de Wilson, une particule avec les même caractéristiques que l'électron mais une charge opposée

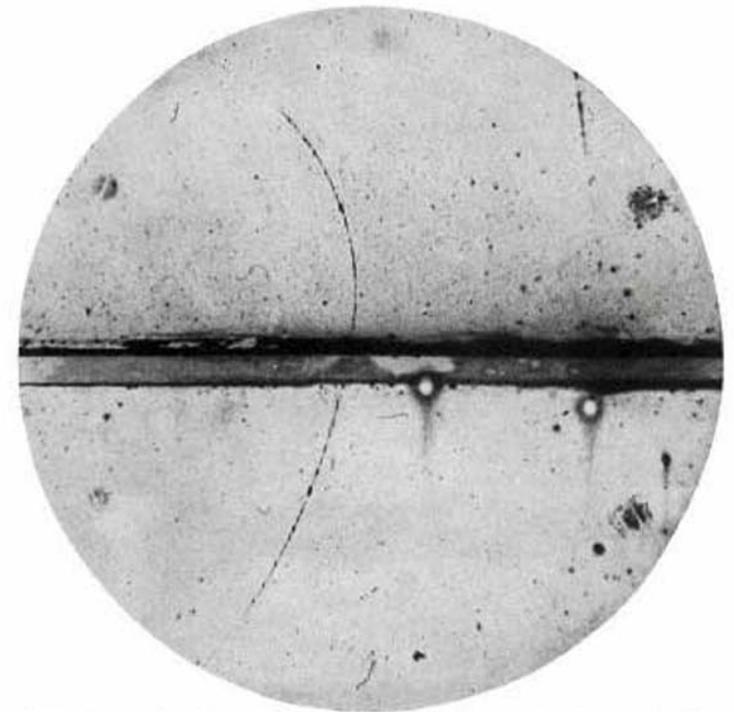
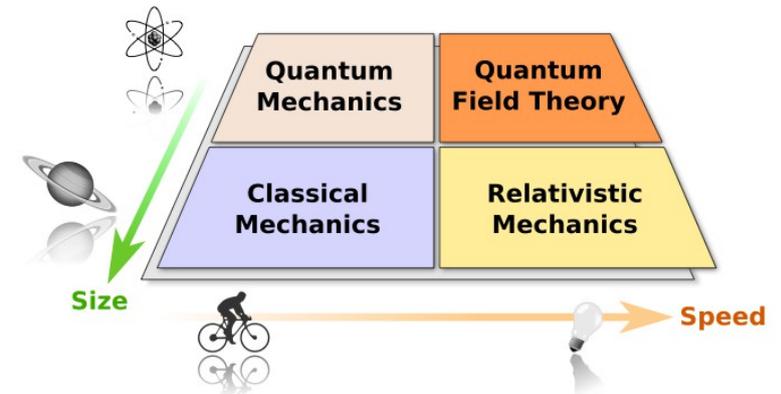


Fig. 1. A 65 million volt positron ( $H_p = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_p = 1.5 \times 10^6$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

# Le positon

Equation du n  
1928, Dirac

- mécanique
- cas rel
- Equati
- $i\hbar \frac{d}{dt} \psi = H(t) \psi$
- où  $H(t)$
- 2 solut
- énergie
- énergie

Observation :  
1932, Anderson  
→ enregis  
particu  
l'électr

## L'ANTI-MATIÈRE

**spin** : moment angulaire interne d'une particule.

positon = anti-électron  
la découverte de l'anti-électron marque la naissance de l'**anti-matière**

Le concept peut-être généralisé à toute particule.

Ainsi à chaque particule correspond une anti-particule :

- de même masse
- de même *spin*
- de charge opposée

Par convention, l'anti-particule de  $x$  est notée :  $\bar{x}$

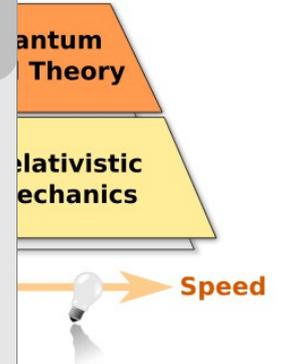


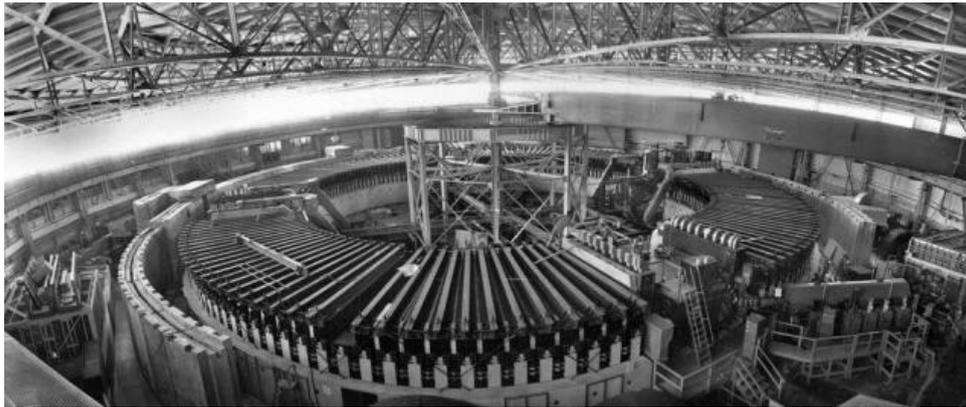
FIG. 1. A 65 million volt positron ( $H_D = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_D = 1.5 \times 10^6$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

# Invention et découverte

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

→ L'anti-matière n'est pas un fantôme de science-fiction !

# L'antimatière autour de nous

Peu d'antimatière autour de nous :

- matière et antimatière s'annihilent !  
→ ex :  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma \gamma$
- dans un monde de matière, l'antimatière ne survit pas longtemps !

On l'utilise pourtant :

- TEP : Tomographie par Émission de Positrons



# L'antimatière autour de nous

2 sources naturelles

- rayons cosmiques
- radioactivité

pas de source massive dans l'Univers !

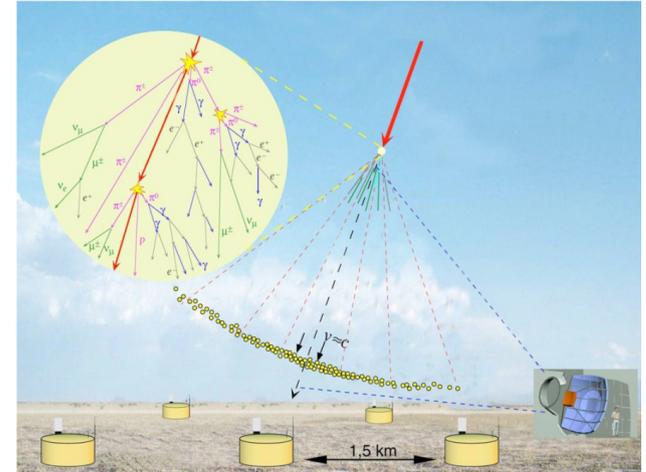
production

- accélérateur de particules

$$E = mc^2$$

Difficile à :

- produire
- stocker



# L'absence d'antimatière

---

Au début de l'Univers : autant de matière que d'antimatière

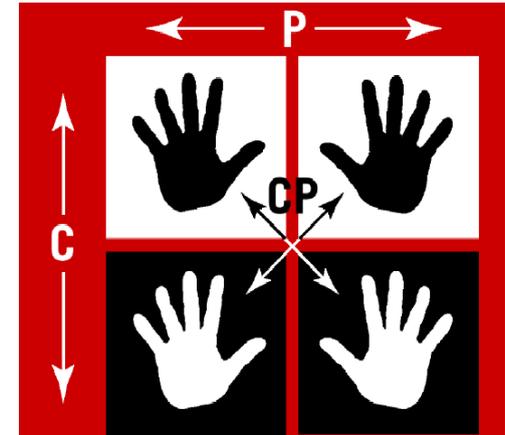
Pourquoi l'antimatière a-t-elle disparu ?

- est-elle l'exact opposée de la matière ?

# La symétrie matière-antimatière

## Les symétries C et P

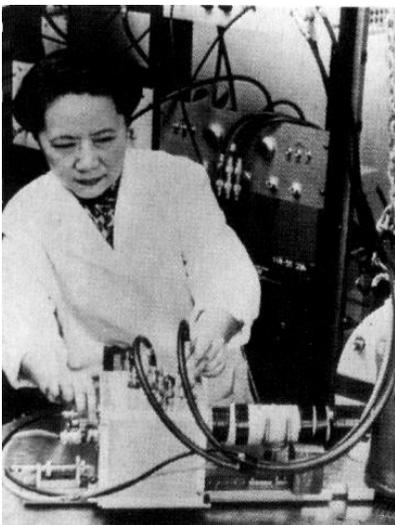
- C : renversement des charges
- P : parité (symétrie miroir)



Interactions forte et électromagnétiques respectent C et P

Pas l'interaction faible

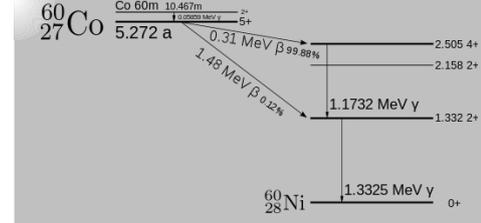
→ proposition de Lee & Yang (1956), expérience de Mme Wu (1957)



→ Droite et gauche sont fondamentalement différents

→ la symétrie CP semble conservée

# L'expérience de Mme Wu (1956)



## Mise en œuvre d'une proposition de Lee & Yang

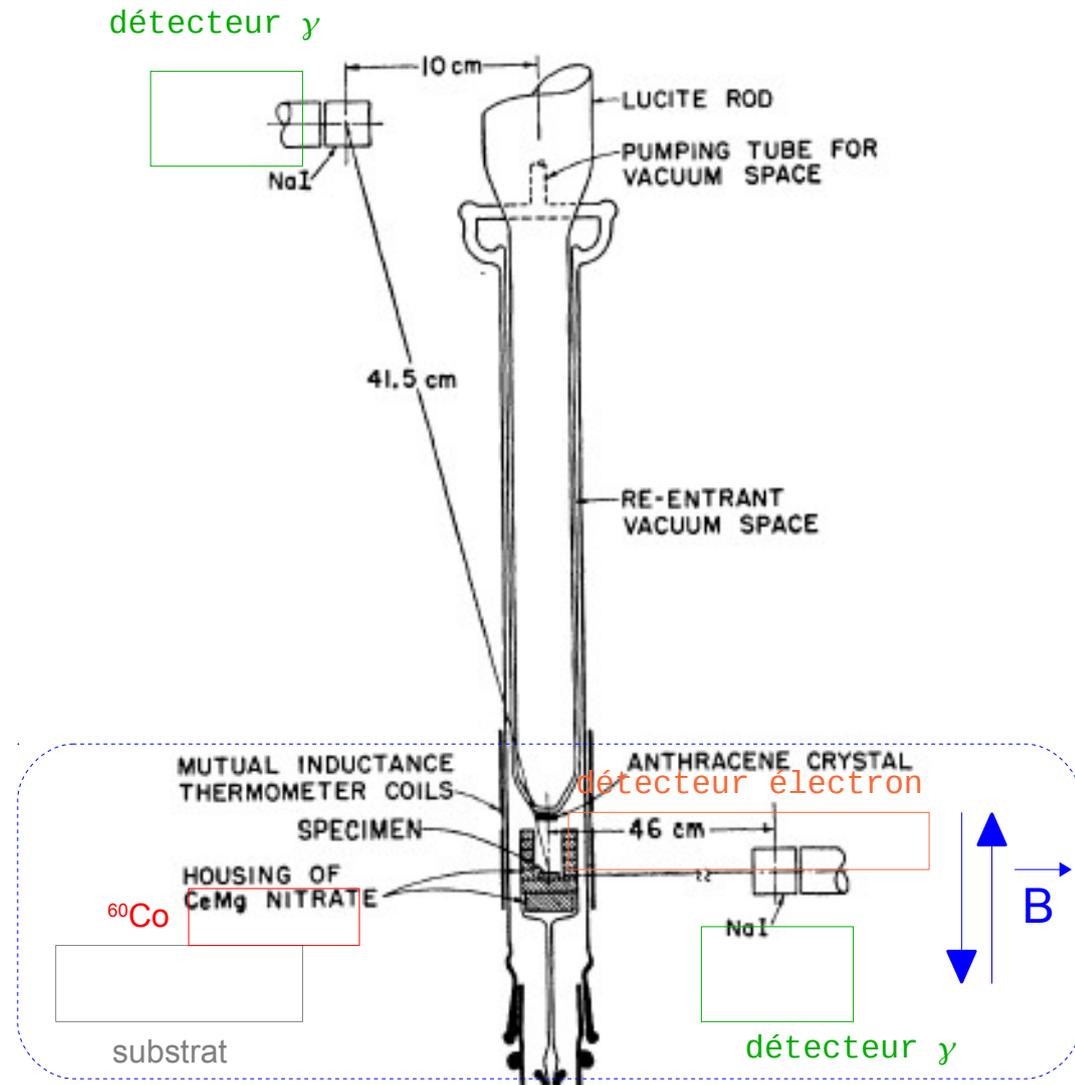
- conceptuellement simple
- défi expérimentale

## Etude de la désintégration $\beta$ de l'atome de Cobalt polarisé

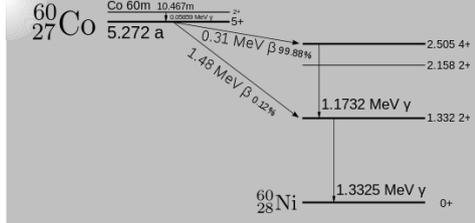
- ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \bar{e} + \nu + 2\gamma$
- fine couche de  ${}^{60}\text{Co}$  sur un substrat de CeMg nitrate

## Polarisation du Cobalt

- à ultra basse température
  - refroidissement à Hélium liquide
  - démagnétisation du substrat
- champ magnétique
- mesure de la polarisation avec la détection des photons



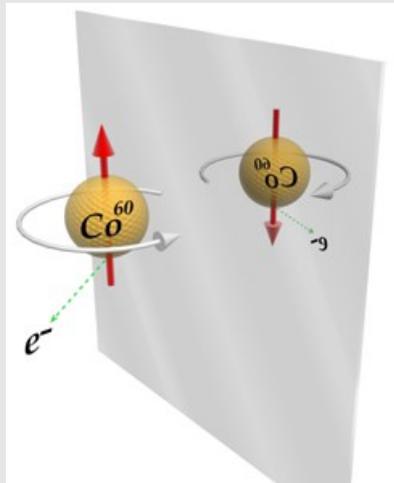
# L'expérience de Mme Wu (1956)



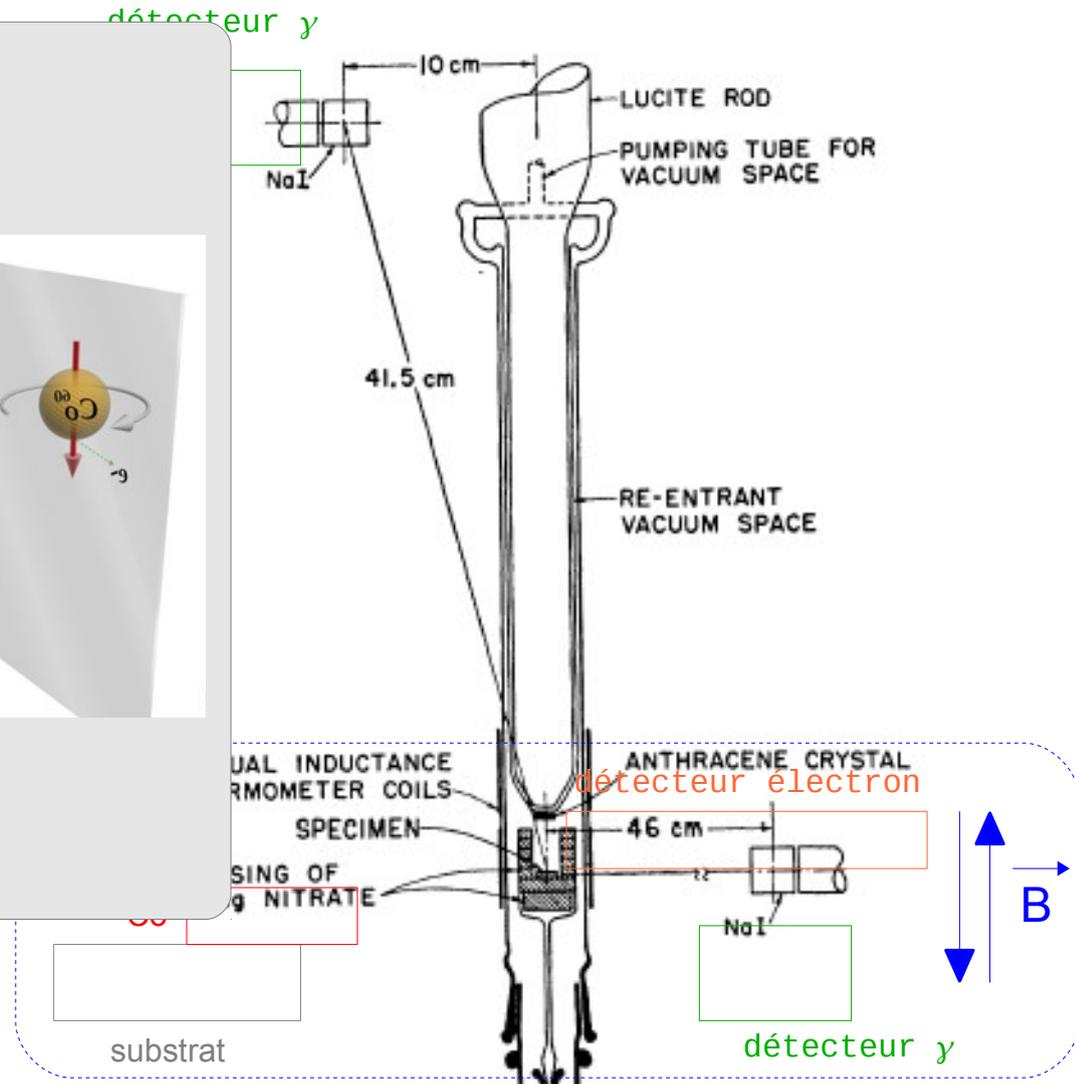
La violation de la parité

## Interprétation

- dans le reflet
- corrélation opposée
- l'interaction faible se comporte différemment



↳ la parité n'est pas conservée



→ refroidissement à hélium liquide

→ démagnétisation du substrat

- champ magnétique
- mesure de la polarisation avec la détection des photons

# Confirmation par Lederman (1957)

## Etude de la polarisation des muons issus de la désintégration de pions

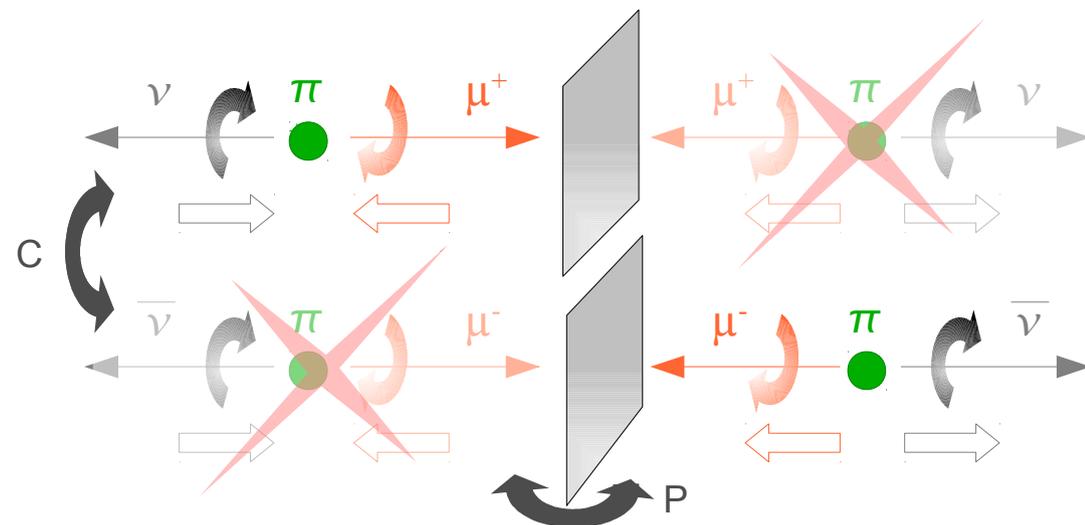
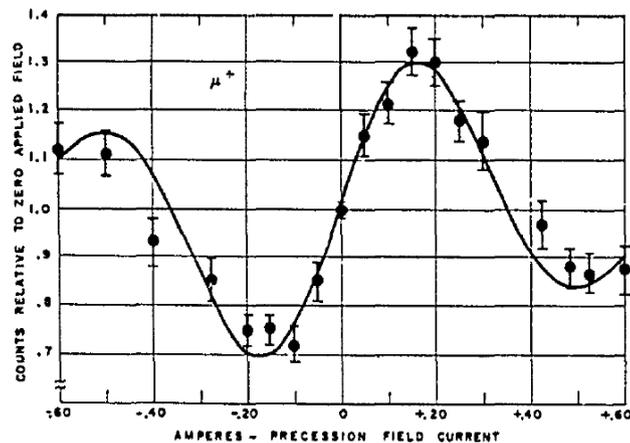
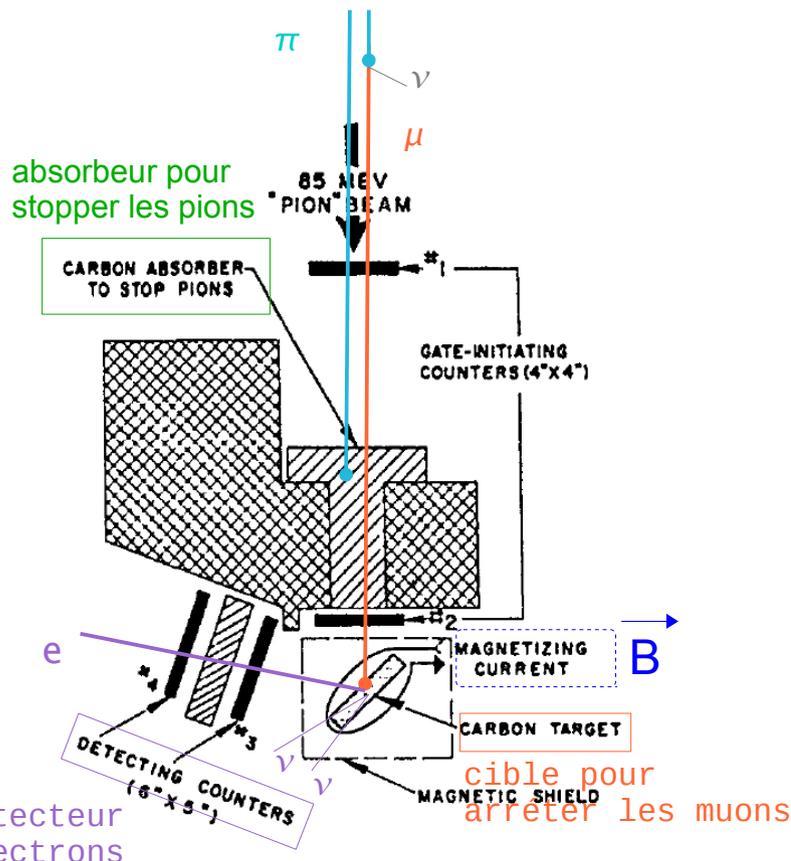
$$\rightarrow \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$$

$$\hookrightarrow e^\pm + 2 \nu$$

→ distribution angulaire des électrons dépend de la polarisation des muons

## Résultat :

↘ polarisation longitudinale des muons



# Conséquence : la symétrie CP

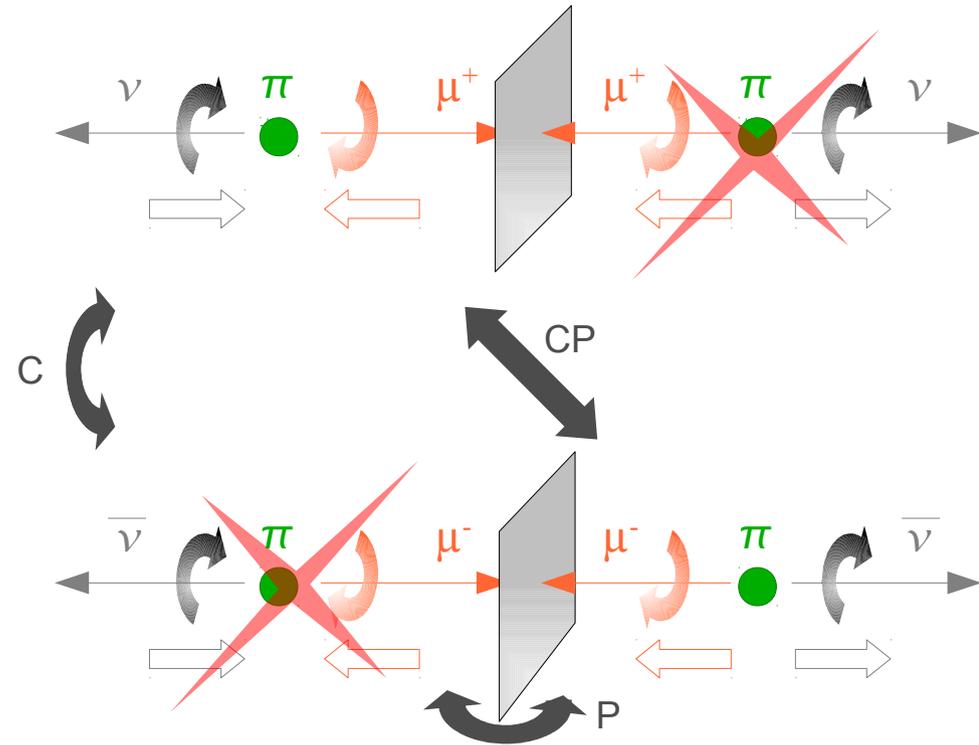
L'interaction faible ne conserve pas :

- la parité
- la conjugaison de charge
- cette violation est « maximale »  
(hélicité du neutrino)

➤ la nature a choisie entre la droite et la gauche ! entre  $\oplus$  et  $\ominus$  !

Mais :

- l'interaction faible semble conserver la combinaison CP (parité x conjugaison de charge)
- l'anti-matière se comporte comme la matière vue dans un miroir



# Découverte de la violation de CP

1964 : Christenson, Cronin, Fitch et Turlay observe la désintégration du  $K_L$  en 2  $\pi$  !!

-  $BR(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-) \approx 0.002$

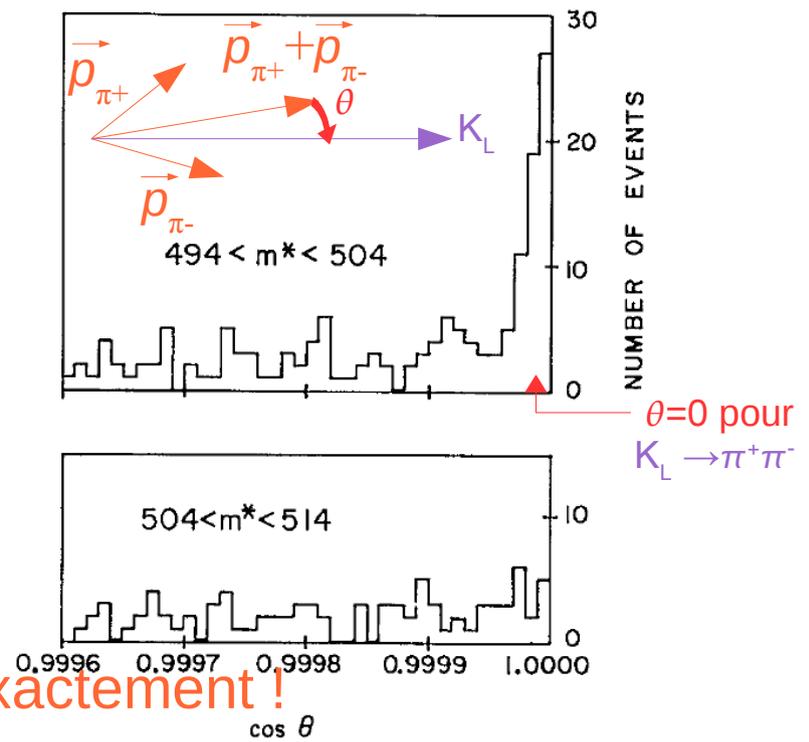
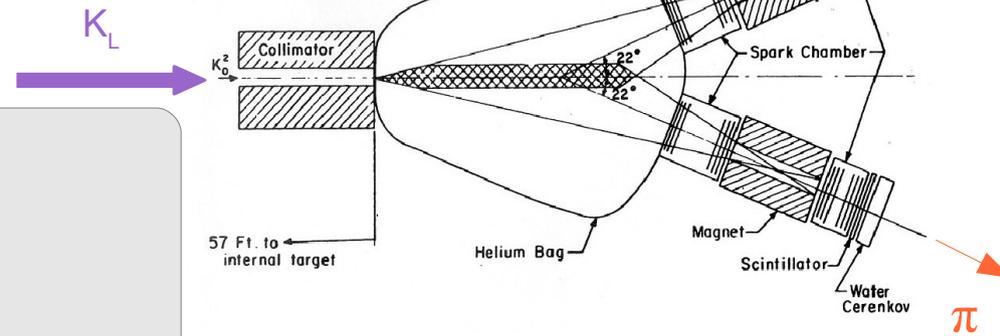
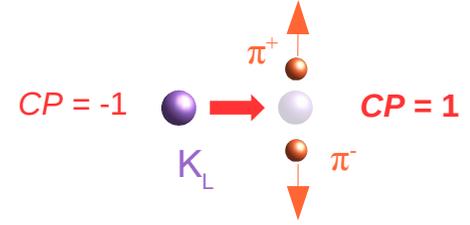
La violation de CP

L'antimatière n'est pas l'exact image de la matière dans le miroir CP !

Il existe une infime différence entre les 2 :

- un sujet d'étude riche
- ... et toujours d'actualité

↳ matière et anti-matière ne se reflètent pas exactement !



# Conclusions

---

L'antimatière est une réalité

- indispensable !
- présente au début de l'Univers, il n'y a plus aujourd'hui de sources massives d'antimatière
- quelques sources naturelles (petites !):
  - rayons cosmiques
  - radioactivité

C'est la symétrie presque exacte de la matière

- matière et antimatière s'annihilent
- leurs petites différences nous en apprennent beaucoup sur les interactions fondamentales => **LHCb** !

Asymétrie insuffisante pour expliquer la disparition de l'antimatière dans l'Univers

- **pourquoi l'antimatière a disparu ?**
- d'autres sources d'asymétrie ?