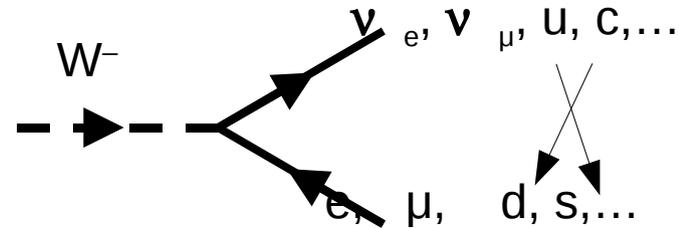
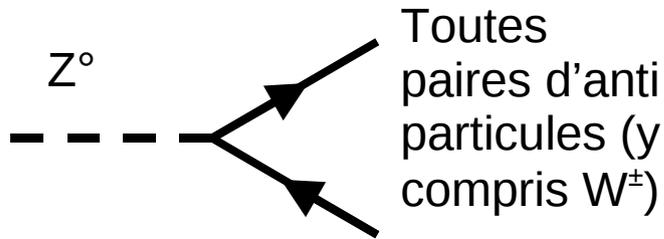


# L'interaction faible



Mélange des quarks  
 Par matrice CKM :

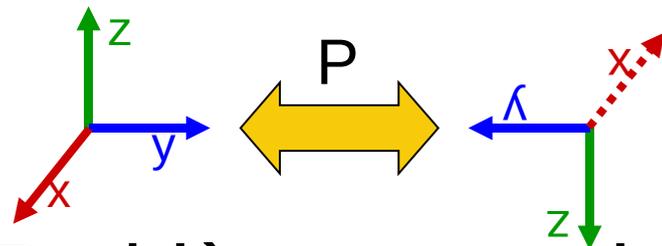
$$\begin{bmatrix} 0.9753 & 0.221 & 0.003 \\ 0.221 & 0.9747 & 0.040 \\ 0.009 & 0.039 & 0.9991 \end{bmatrix}$$

- Violation de symétrie : saveur pas conservée par force faible (mélange des saveurs)
- Nous allons voir que d'autres symétries ne sont pas conservées par la force faible

# La parité

§ 4.2

- P : opération de renversement des coordonnées spatiales



$$\begin{aligned}x &\leftrightarrow -x \\p &\leftrightarrow -p \\L &\leftrightarrow L \\(L = x \wedge p)\end{aligned}$$

- Problème : puzzle  $\theta\tau$  (1956)
  - Deux particules de masse et temps de vie *identiques*, se désintègrent dans des modes de parités *opposés*...
  - $\theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  &  $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$
- Solution : même particule  $\theta^+ = \tau^+ = K^+$

Cours Centrale - Raphaël Granier

# Violation de la parité

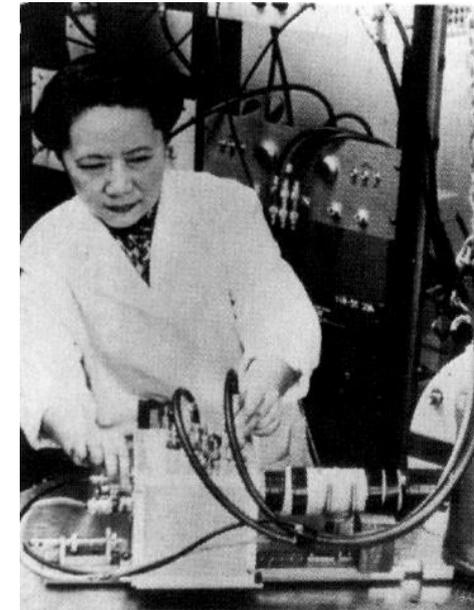
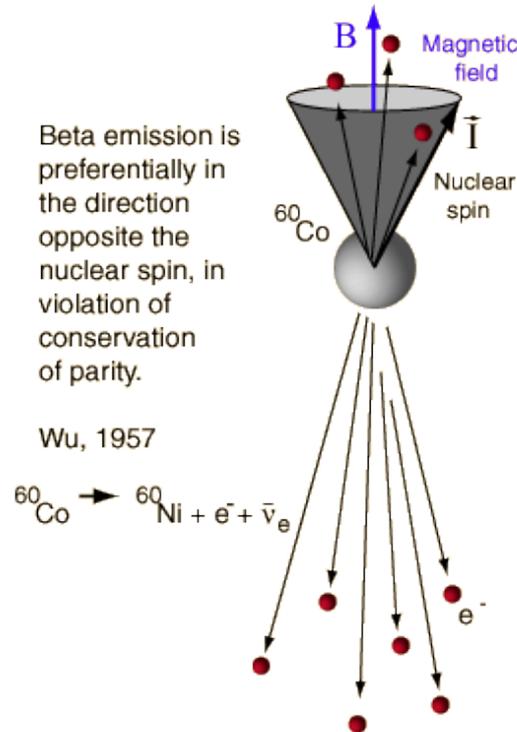


- 1956 : Lee et Yang
  - Interaction faible viole P ?
- 1957 : l'expérience de M<sup>me</sup> Wu
  - Le montre...



Désintégration

${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$   
dans champ magnétique B,  
électron est émis à l'opposé  
de B !



Cours Centrale - Raphaël Granier

# Interprétation de la violation de la parité

- L'interaction faible ne concerne que la composante gauche des particules (et la droite des antiparticules)
- **Gauche = spin anti-aligné avec l'impulsion** 
- **Pas de neutrino droit**
- **Pas d'antineutrino gauche**
- **Donc symétrie C (particule  $\leftrightarrow$  antiparticule) violée aussi !**

Cours Centrale - Raphaël Granier



# Propriété de l'Opérateur Parité, Parité d'un système de particules

- $P^2 \psi = \lambda^2 \psi = \psi$  donc  $\lambda = 1$  ou  $-1$
- **Moment cinétique** :  $P Y_l^m = (-1)^l Y_l^m$
- **Parité intrinsèque d'une particule** :
  - On a mesuré que les pions ont parité  $-1$  :  $P(\pi) = -(\pi)$
  - Proton et neutron ont parité  $+1$  (choix arbitraire)
- **Systeme de particules** :
  - Nbre quantique multiplicatif : produit des parités intrinsèques et du moment cinétique :

$$\mathcal{P}|\pi\pi\rangle = (-1)^2 \times (-1)^l |\pi\pi\rangle \qquad \mathcal{P}|\pi\pi\pi\rangle = (-1)^3 \times (-1)^l |\pi\pi\pi\rangle$$

# Symétrie de Conjugaison de charge C

## particule $\leftrightarrow$ antiparticule

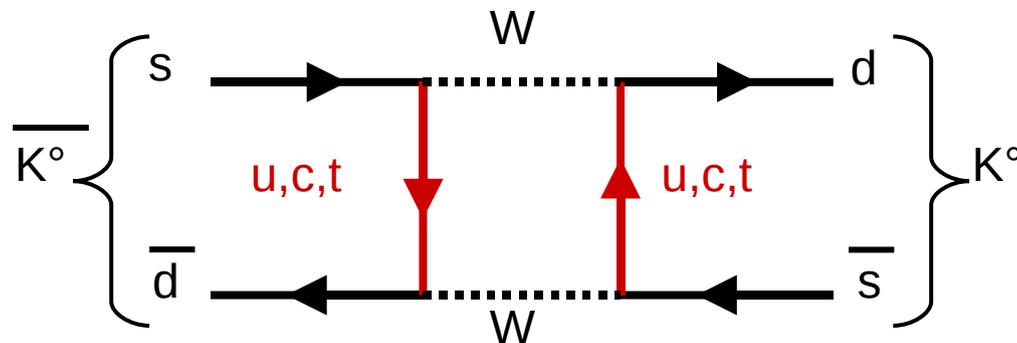
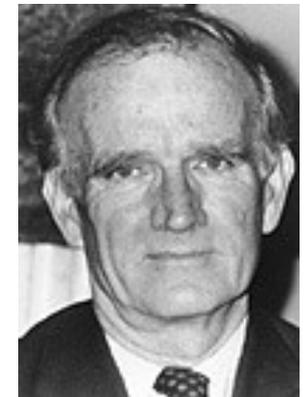
- Échange une **particule** et son **anti-particule**, i.e. **Nbres quantiques (charge, saveur,...) opposés**
- Valeurs propres +1 ou -1
- États propres de C = particules qui sont leur propre anti-particule. Ex: photon,  $\pi^0$ 
  - Système de  $\pi^0$  : inchangé
  - $C|\pi^0\pi^0\rangle = |\pi^0\pi^0\rangle$        $C|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle = |\pi^0\pi^0\pi^0\rangle$
  - Système de  $\pi^+$  (bosons) :

$$C|\pi^+\pi^-\rangle = (-1)^l|\pi^+\pi^-\rangle$$

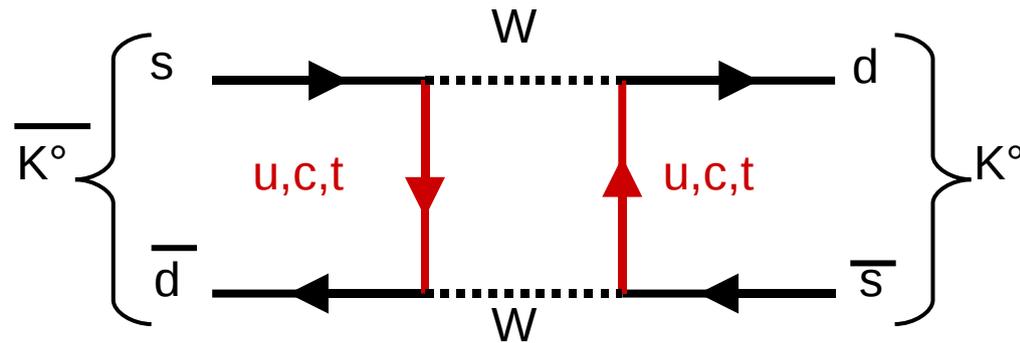
# Violation de CP



- # 1957 : Violation *maximale* de C et P
  - Mais C x P semblait conservée :
    - CP(Neutrino gauche) = Antineutrino droit
  - jusqu'à...
- # 1964 : découverte par Christensen, Cronin, Fitch & Turlay d'une *légère* violation de CP dans le système  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$
- # 1973 : expliquée par Kobayashi & Maskawa s'il existe **un troisième doublet de quarks !**



# Le système des Kaons neutres



- Les états propres de « saveurs » ne sont pas les états propres « faibles »
- Oscillations  $K^0 \leftrightarrow \text{anti-}K^0$  possibles

# Oscillation des kaons neutres (rappel)

- $K^0$  et anti- $K^0$  ne sont pas états propres de H
- On définit  $K_1$  et  $K_2$ , dont la saveur n'évolue pas :

$$K_1 = \frac{K^0 + \bar{K}^0}{\sqrt{2}} \quad K_2 = \frac{K^0 - \bar{K}^0}{\sqrt{2}}$$

$$a_i(t) = a_i(0) e^{-i\frac{m_i c^2}{\hbar}t} e^{-\frac{\gamma_i}{2\hbar}t}$$

Ici : t = temps propre  
= temps dans réf  
de repos  
de la particule

- On détermine l'évolution des  $K^0$  et anti- $K^0$  dans la base formée par  $K_1$  et  $K_2$

$$\begin{aligned} \langle \bar{K}^0 | \psi(t) \rangle &= \bar{a}(t) = \frac{a_1(t) - a_2(t)}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{1}{2} \left( e^{-i\frac{m_1 c^2}{\hbar}t} e^{-\frac{t}{2\tau_1}} - e^{-i\frac{m_2 c^2}{\hbar}t} e^{-\frac{t}{2\tau_2}} \right) \end{aligned}$$

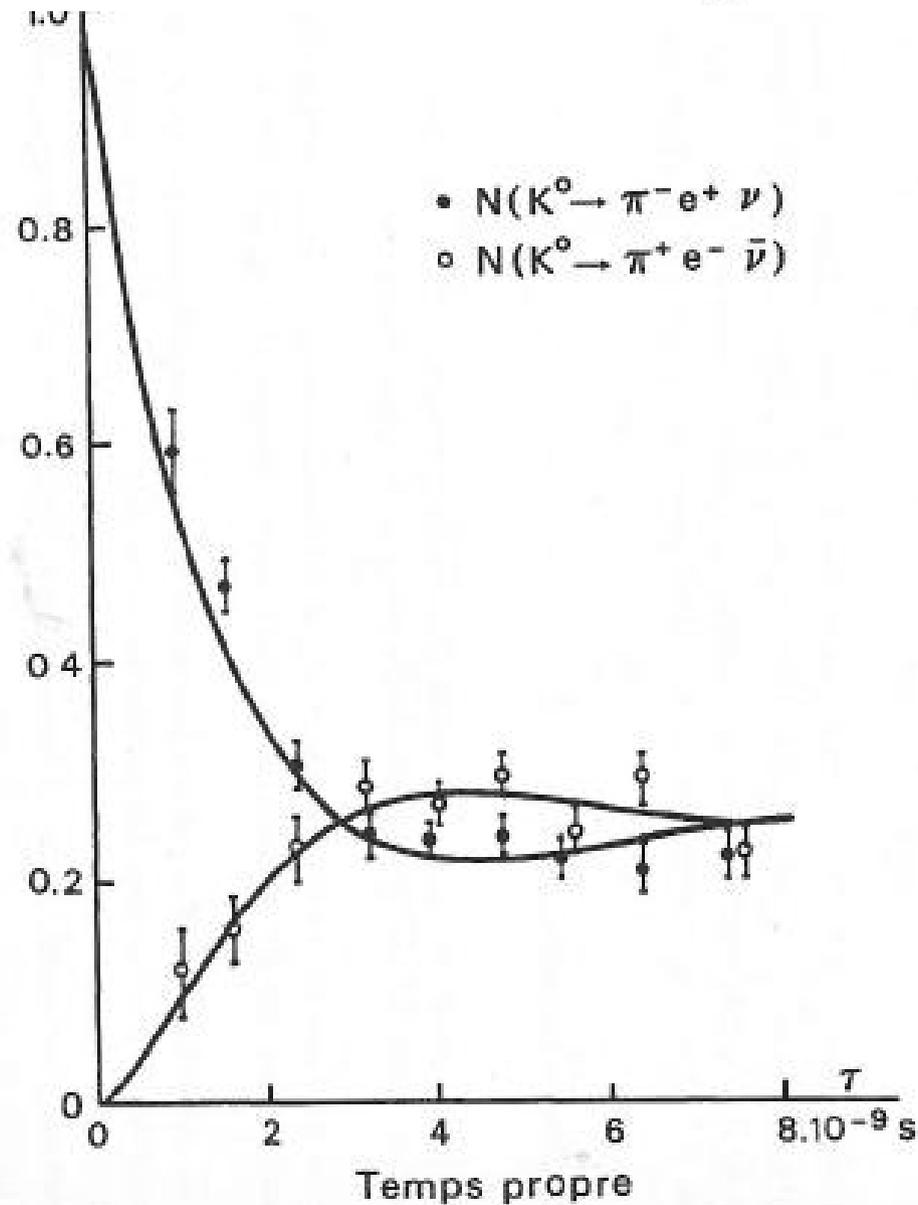
# Oscillation des kaons neutres (rappel)

- Étant donné un état initial  $K^0$ , on calcule la probabilité d'être dans un état anti- $K^0$  à l'instant  $t$ 
  - $K_1$  et  $K_2$  ont a priori différentes masses et différents temps de vie
  - $\Delta m$  = différence de masse entre  $K_1$  et  $K_2$

$$|\bar{a}(t)|^2 = \frac{1}{4} \left( e^{-\frac{t}{\tau_1}} + e^{-\frac{t}{\tau_2}} - 2 \cos\left(\frac{\Delta m \cdot c^2}{\hbar} t\right) e^{-\frac{t}{2\tau_1}} e^{-\frac{t}{2\tau_2}} \right)$$

# Oscillation des kaons neutres (rappel)

$$|\bar{a}(t)|^2 = \frac{1}{4} \left( e^{-\frac{t}{\tau_1}} + e^{-\frac{t}{\tau_2}} - 2 \cos\left(\frac{\Delta m \cdot c^2}{\hbar} t\right) e^{-\frac{t}{2\tau_1}} e^{-\frac{t}{2\tau_2}} \right)$$



# Symétrie CP et les Kaons

- $K_1$  et  $K_2$  sont états propres de CP :
  - $CP |K_1\rangle = + |K_1\rangle$  et  $CP |K_2\rangle = - |K_2\rangle$
- **Si CP est conservée, produits de désintégration ont le meme nbre CP**

$$CP|\pi^0\pi^0\rangle = +|\pi^0\pi^0\rangle, \quad CP|\pi^+\pi^-\rangle = +|\pi^+\pi^-\rangle, \quad CP|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle = -|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle$$

Particule	Masse (MeV)	Temps de vie (seconde)	Proba.	Mode
$K_1$	497,7	$0,9 \cdot 10^{-10}$	69%	$\pi^+ \pi^-$
			31%	$\pi^0 \pi^0$
$K_2$	497,7	$5,2 \cdot 10^{-8}$	39%	$\pi^\pm e^\mp \nu_e$
			27%	$\pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$
			21%	$3 \pi^0$
			13%	$\pi^+ \pi^- \pi^0$

# Symétrie CP et les Kaons

- $K_1$  et  $K_2$  sont états propres de CP :
  - $CP |K_1\rangle = + |K_1\rangle$  et  $CP |K_2\rangle = - |K_2\rangle$
- **Si CP est conservée**, produits de désintégration ont le meme nbre CP

$$CP|\pi^0\pi^0\rangle = +|\pi^0\pi^0\rangle, \quad CP|\pi^+\pi^-\rangle = +|\pi^+\pi^-\rangle, \quad CP|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle = -|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle$$

Particule	Masse (MeV)	Temps de vie (seconde)	Proba.	Mode
$K_1$	497,7	$0,9 \cdot 10^{-10}$	69%	$\pi^+ \pi^-$
			31%	$\pi^0 \pi^0$
$K_2$	497,7	$5,2 \cdot 10^{-8}$	39%	$\pi^\pm e^\mp \nu_e$
			27%	$\pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$
			21%	$3 \pi^0$
			13%	$\pi^+ \pi^- \pi^0$

**Mais... CP légèrement violée...**

# Violation de CP dans le système des Kaons neutres

- $K_1$  et  $K_2$  ne sont pas tout à fait états propres de l'Hamiltonien...

$$|K_L\rangle = \frac{(|K_2\rangle + \epsilon|K_1\rangle)}{\sqrt{1 + |\epsilon|^2}}$$

$$|K_S\rangle = \frac{(|K_1\rangle + \epsilon|K_2\rangle)}{\sqrt{1 + |\epsilon|^2}}$$

- $K_S$  et  $K_L$  ne sont pas tout à fait états propres de CP...

- **$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$  ou  $\pi^0 \pi^0$  possible !**

– **Probabilité ~ 0.001**

–  **$\epsilon \sim 2.3 \cdot 10^{-3}$**

# Pour résumer...

$$K_1 = \frac{K^0 + \bar{K}^0}{\sqrt{2}} \quad K_2 = \frac{K^0 - \bar{K}^0}{\sqrt{2}}$$

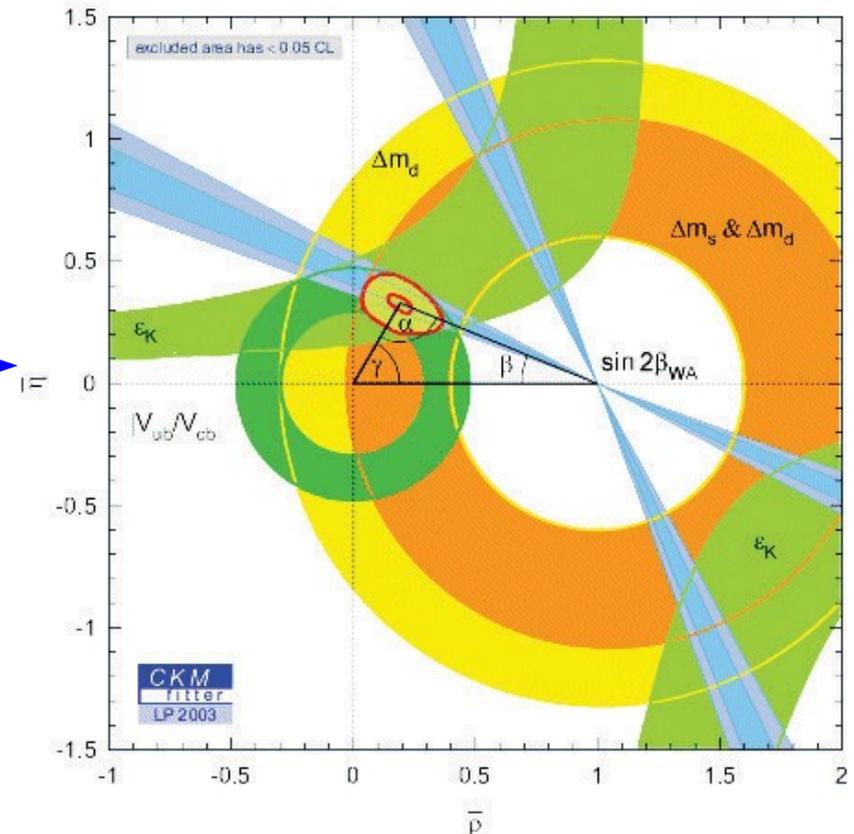
$$|K_L\rangle = \frac{(|K_2\rangle + \epsilon|K_1\rangle)}{\sqrt{1 + |\epsilon|^2}} \quad |K_S\rangle = \frac{(|K_1\rangle + \epsilon|K_2\rangle)}{\sqrt{1 + |\epsilon|^2}}$$

États	Masse et durée de vie	Vecteurs propres de
$K_0$ et $\bar{K}^0$	en principe égales en pratique pas définies	étrangeté, isospin contenus en quark définis
$K_1$ et $K_2$	non définies	$\mathcal{CP}$
$K_S$ et $K_L$	$\Delta m = 3,49 \cdot 10^{-12} \text{ MeV}/c^2$ $\tau_S = 0,9 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ $\tau_L = 5,2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$	Hamiltonien

# Matrice Cabibbo Kobayashi Maskawa

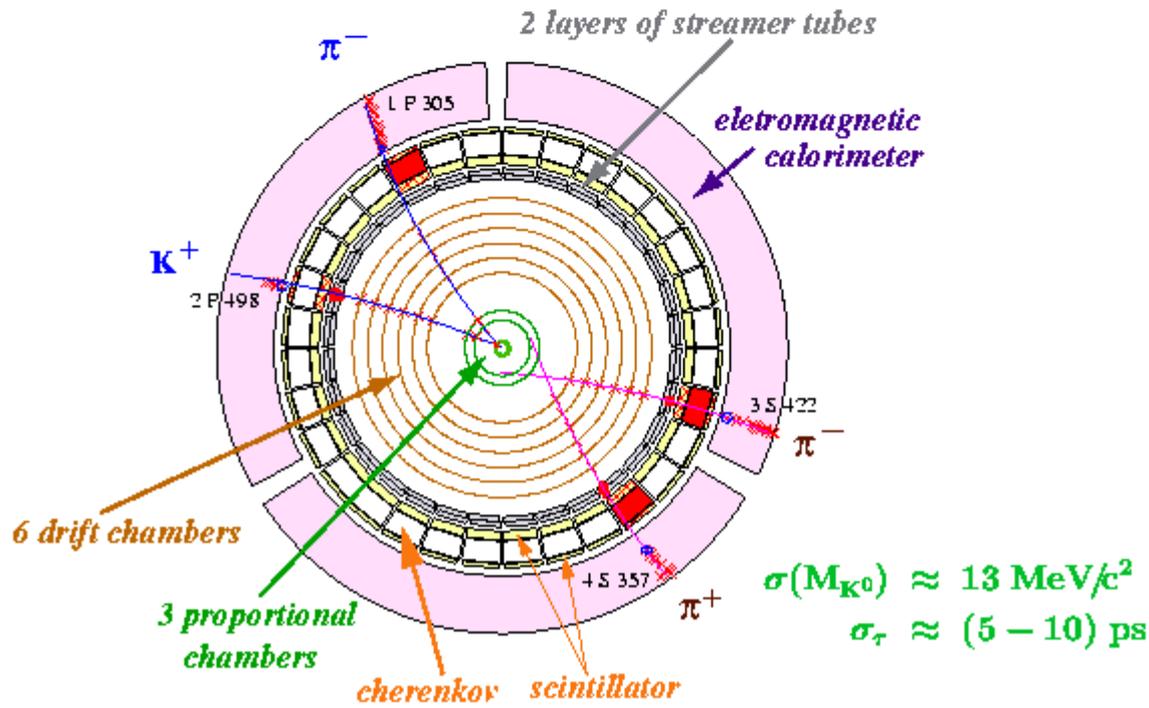
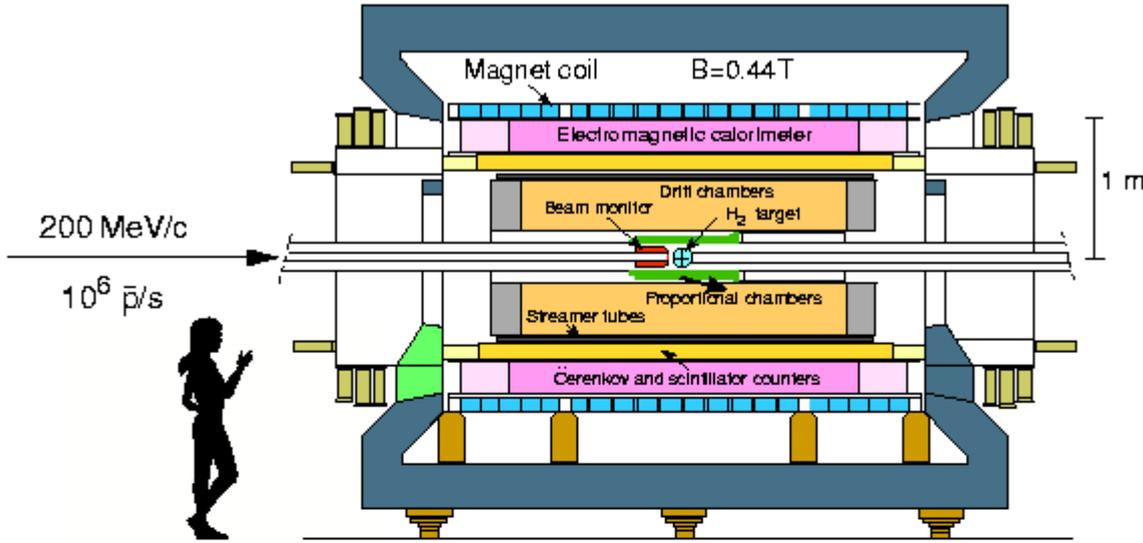
- Une matrice donne la correspondance (u,c,t)  
(d,s,b)  $\longrightarrow$
- Contient la violation de CP ! (contenue dans phase complexe)
- Testée de façon redondante  $\longrightarrow$
- En particulier, explique la violation CP dans le secteur des Kaons neutres

$$\begin{bmatrix} 0.9753 & 0.221 & 0.003 \\ 0.221 & 0.9747 & 0.040 \\ 0.009 & 0.039 & 0.9991 \end{bmatrix}$$

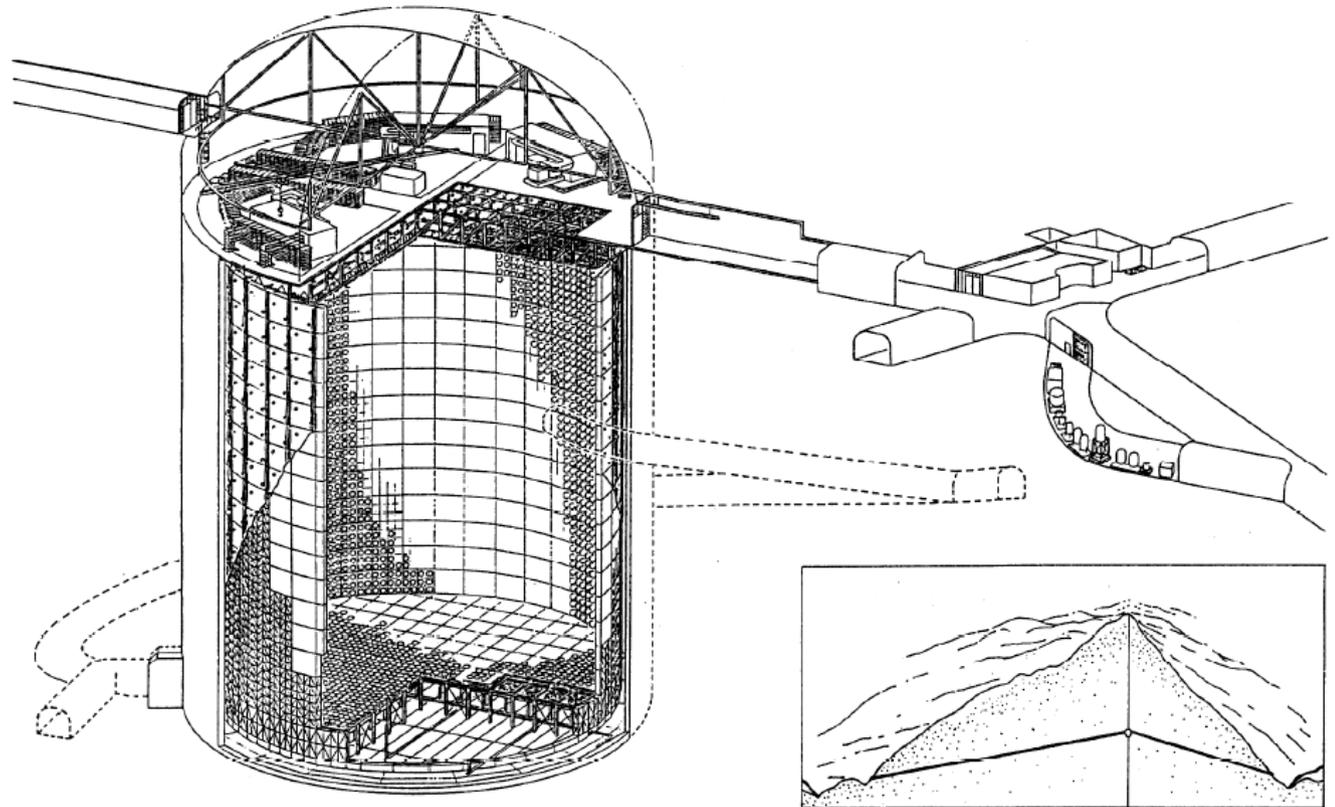
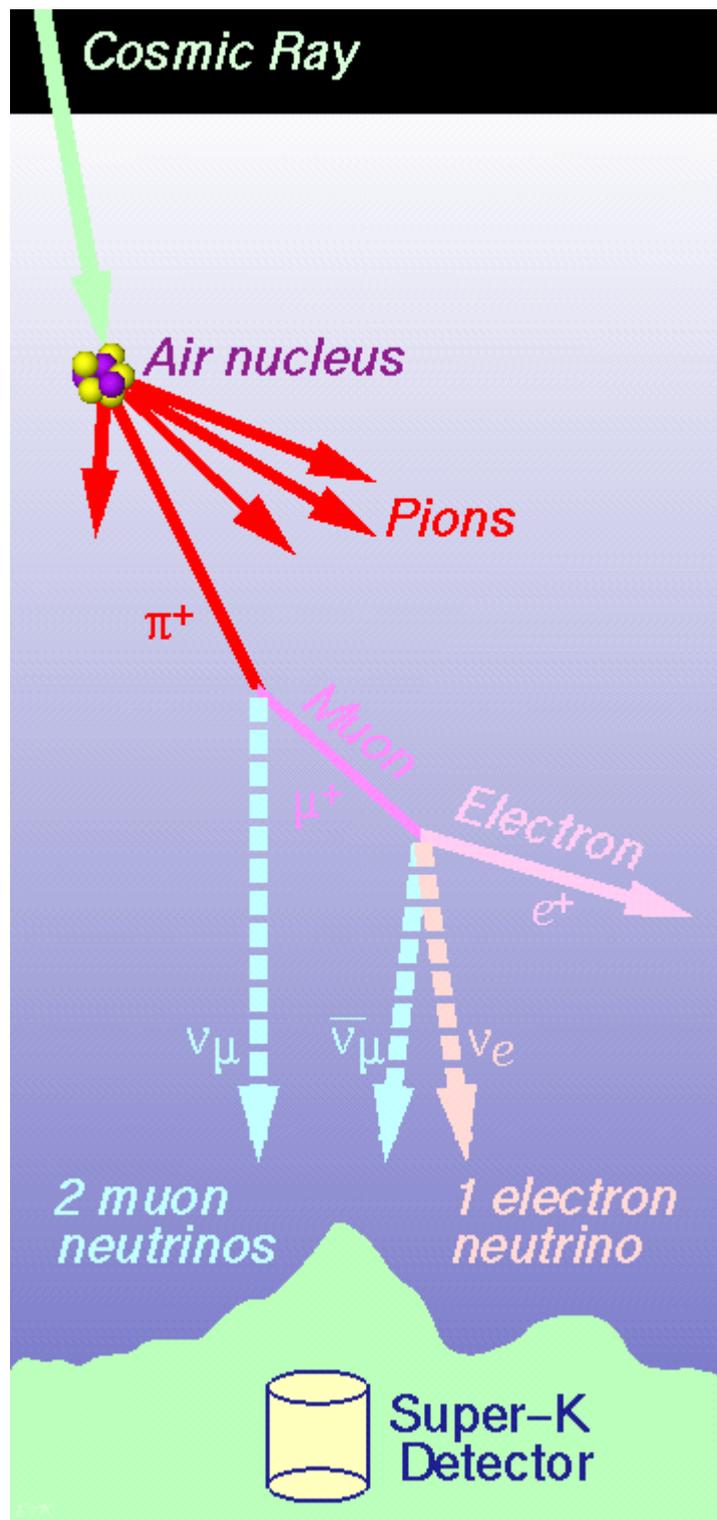


# The CPLEAR Detector

## Mesure de la Violation de T avec CPLEAR



# Oscillations de Neutrinos Atmosphériques : Super-Kamiokande



# Oscillations de Neutrinos

## Atmosphériques :

### Super-Kamiokande

