Évidences expérimentales de la violation de *CP* dans les désintégrations des mésons neutres

- introduction générale et démarche historique
  (violation de ***CP*** dans le Modèle Standard : la matrice ***CKM***)
- formalisme de l'évolution d'un système méson - antiméson neutre
- résultats expérimentaux concernant le système $K^0 - \bar{K}^0$
- (LE résultat expérimental concernant le système $B^0 - \bar{B}^0$)

$$P : \vec{x} \to -\vec{x} \qquad T : t \to -t$$

$$C : \; M, \tau, Q_i \to M, \tau, -Q_i \quad (\approx \text{particule} \;\to\; \text{antiparticule})$$

Axiome : *CPT* est une symétrie parfaite pour toutes les interactions.
La nature est décrite par une théorie des champs locale invariante pour les transformations de Lorentz comme le Modèle Standard et la plupart de ses extensions

- ***C, P, T*** symétries parfaites dans les interactions fortes, électromagnétiques et gravitationnelles

- ***C, P*** violés de façon maximale par les interactions faibles

- ***CP*** symétrie non prise en défaut par la plupart des interactions faibles

- Deux évidences expérimentales de la violation de ***CP*** $K^0 - \bar{K}^0$
  - certaines désintégrations des systèmes de mésons $B^0 - \bar{B}^0$
  - certaines désintégrations des systèmes de mésons

Premières observations expérimentales:
de la découverte du K^0 (1947)
aux systèmes $K^0 - \bar{K}^0$ et $K_1^0 - K_2^0$

1947 : Découverte expérimentale du K^0

Rochester et Butler : chambre de Wilson + rayonnement cosmique

$V^0 \to \pi^+\pi^-$ $\quad \tau \approx 10^{-10}\,s$ $\qquad K^0 \to \pi^+\pi^-$

1953 : Schéma de Gell-Mann et Nishijima : étrangeté

L'étrangeté est conservée dans les interactions fortes et violées dans les interactions faibles.
***K^0* et autres hadrons produits par paires par interaction forte et désintégration faible (lente).**

1955 : Modèle de Gell-Mann et Pais $K^0 - \bar{K}^0$

Modèle de Gell-Mann-Pais

$$\begin{pmatrix} K^+ \\ K^0 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \bar{K}^0 \\ K^- \end{pmatrix}$$

$S = +1 \qquad S = -1$

Modèle des quarks

$$\begin{pmatrix} \bar{d} \\ s \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} d \\ \bar{s} \end{pmatrix}$$

$\bar{K}^0 \neq K^0$

$$CP\left|K^0\right\rangle = e^{i\alpha}\left|\bar{K}^0\right\rangle = \left|\bar{K}^0\right\rangle$$

$$CP\left|\bar{K}^0\right\rangle = e^{i\alpha}\left|K^0\right\rangle = \left|K^0\right\rangle$$

$\alpha = 0$ par convention

Modes de désintégration

Hadronique

$K^0 \equiv \bar{K}^0$

$K^0, \bar{K}^0 \to \pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0 \qquad CP = +1$

$K^0, \bar{K}^0 \to \pi^+\pi^-\pi^0 \qquad CP = -1$ dominant

$K^0, \bar{K}^0 \to \pi^0\pi^0\pi^0 \qquad CP = -1$

Semi leptonique

$\Delta S = \Delta Q$

$$\left.\begin{array}{l} K^0 \to \pi^- l^+ \nu_l \\ \bar{K}^0 \to \pi^+ l^- \bar{\nu}_l \end{array}\right\} l = e, \mu$$

étiquetage de l'étrangeté

Autres modes $R.B. \leq 10^{-3}$

$CP(\pi^+\pi^-\pi^0) = -1$

dominant ⇨

$CP(2\pi) = 1$

$J^P(\pi^\pm, K) = 0^-$

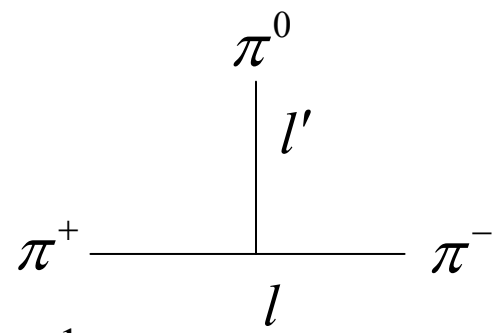
$J^{PC}(\pi^0) = 0^{-+}$

$\vec{l} + \vec{l}' = \vec{J}(K^+) = 0$

$l = l' = 0, 2, \ldots \quad CP = -1$

$l = l' = 1, 3, \ldots \quad CP = +1$

$l = l' > 0$ défavorisés par barrière centrifuge



Valeurs et vecteurs propres de S et de CP

Vecteurs propres respectant la conservation de CP

$$CP\left|K^0\right\rangle = \left|\bar{K}^0\right\rangle$$

$$CP\left|\bar{K}^0\right\rangle = \left|K^0\right\rangle$$

$$\left|K_1^0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K^0\right\rangle + \left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \qquad CP = +1 \qquad \left|K^0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K_1^0\right\rangle + \left|K_2^0\right\rangle\right) \qquad S = +1$$

$$\left|K_2^0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K^0\right\rangle - \left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \qquad CP = -1 \qquad \left|\bar{K}^0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K_1^0\right\rangle - \left|K_2^0\right\rangle\right) \qquad S = -1$$

Orthogonalité : $\left\langle K_2^0 \middle| K_1^0 \right\rangle = \left\langle \bar{K}^0 \middle| K^0 \right\rangle = 0$

Evolution indépendante des deux états propres de CP

$$I_1(t) = I_{10}\exp\left(-t/\tau_1\right)$$

$$I_2(t) = I_{20}\exp\left(-t/\tau_2\right)$$

1956 : Découverte du K_2^0 par Landé, Lederman et al. au BNL

Prédiction de l'existence d'un mode de désintégration $K_2 \rightarrow$ état propre $CP = -1$

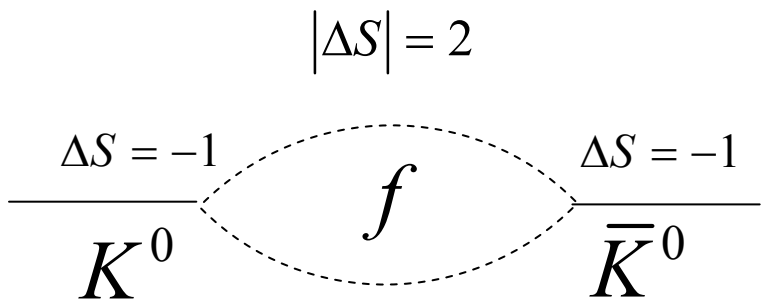
$$K_2 \rightarrow \begin{matrix} \pi^+\pi^-\pi^0 \\ \pi^0\pi^0\pi^0 \end{matrix}$$

Espace de phases : $M_K \approx 500MeV \approx 3M_\pi \approx 420MeV \Rightarrow \begin{matrix} \Gamma_1 \gg \Gamma_2 \\ \tau_1 \ll \tau_2 \end{matrix}$

Oscillations

	$K^0, \bar{K}^0 \to \pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0$
$K^0 \equiv \bar{K}^0$	$K^0, \bar{K}^0 \to \pi^+\pi^-\pi^0$
	$K^0, \bar{K}^0 \to \pi^0\pi^0\pi^0$

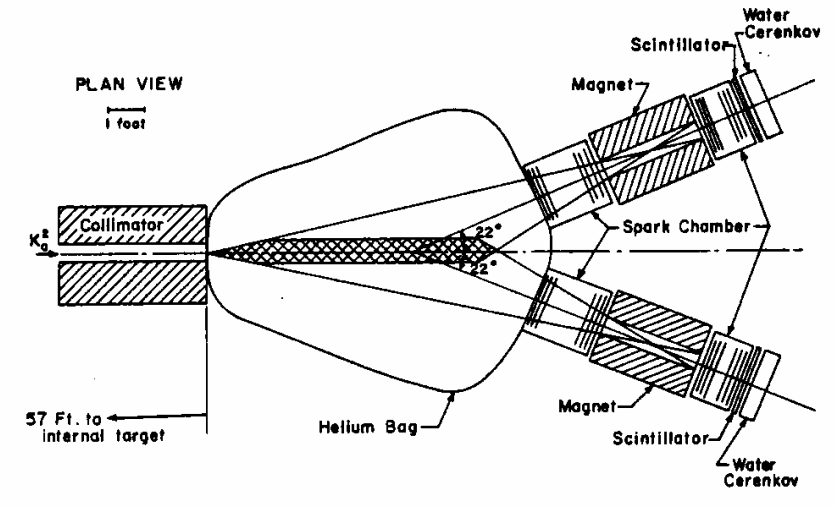
Oscillations $K^0 \leftrightarrow f \leftrightarrow \bar{K}^0$
au deuxième ordre

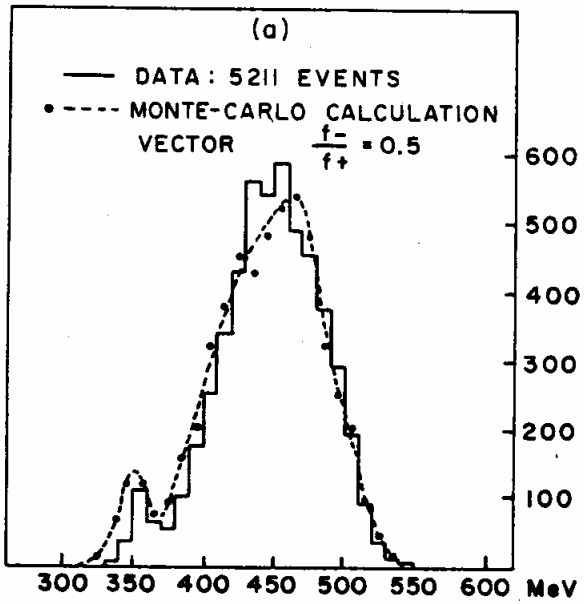


Découverte de la violation de *CP* (1964)

1964 : Mise en évidence de la violation de CP.
Christenson, Cronin, Fitch , Turlay

Détecteur à deux bras spectrométriques à l'AGS de BNL
Distance cible – détecteur : $L \approx 300\ \gamma c \tau_S$





$m*(MeV)$

Distribution de masse invariante $m*$ des deux produits chargés supposés être des $\pi^{\pm}$ dans les désintégrations

$$K_2^0 \rightarrow \pi^{\pm} l^{\mp} \nu$$

$$K_2^0 \rightarrow \pi^{+} \pi^{-} \pi^{0}$$

$M_{K^0} \approx 500 MeV$

Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 138

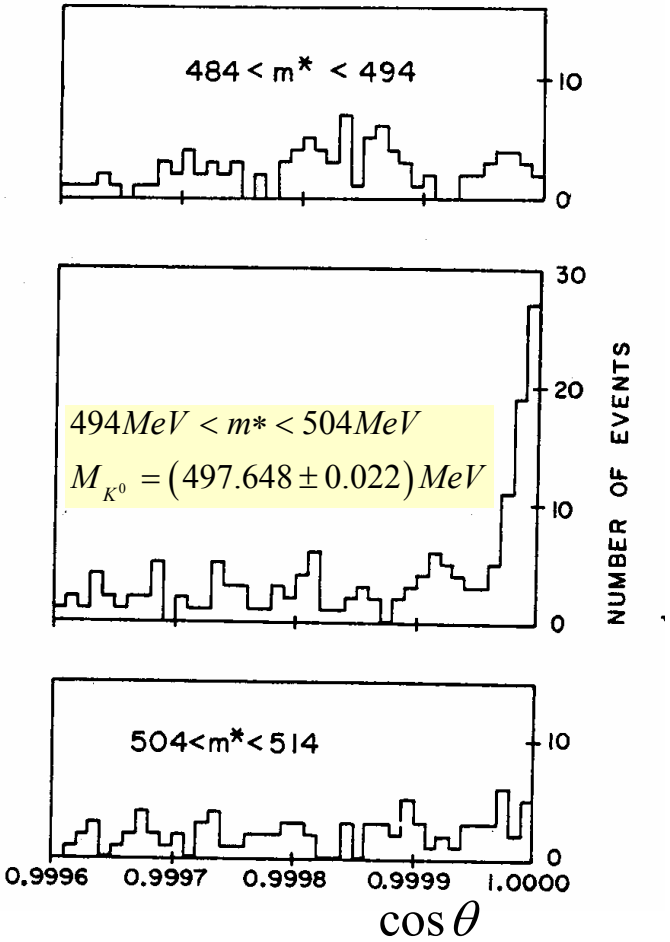
Expérience de Christenson et al. : résultats

Distribution angulaire *cos θ*
entre impulsions initiale et finale
en fonction de la masse invariante

$$m* = (499.1 \pm 0.8)\,MeV \quad \text{pour } \cos\theta > 0.99999$$

$$M_{K^0} = (497.648 \pm 0.022)\,MeV$$

Excès d'événements vers l'avant au dessus du bruit :
45±9 sur un total de 22 700 K_2^0
Aucun modèle de désintégration en trois corps ne peut expliquer le pic vers l'avant.

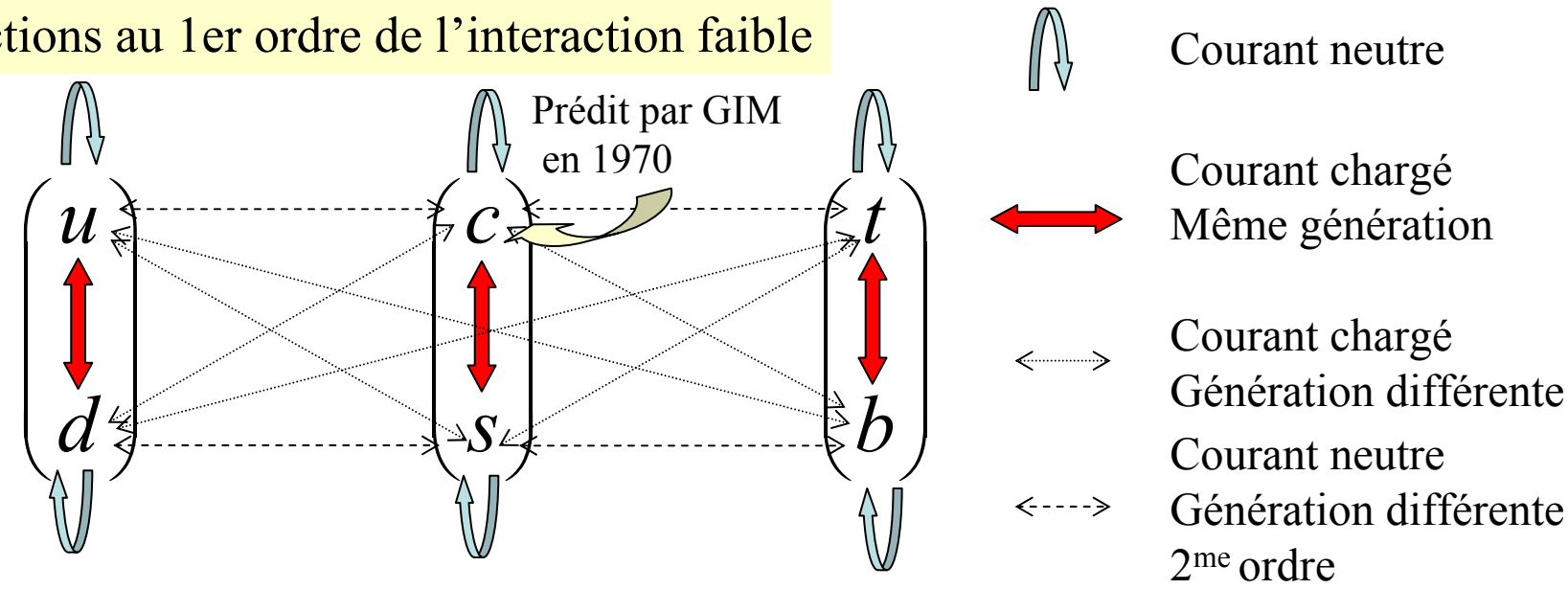


$$R = \frac{K_2^0 \to \pi^+\pi^-}{K_2^0 \to \text{ modes chargés}} = (2.0 \pm 0.4)\cdot 10^{-3}$$

Le modèle de Kobayashi - Maskawa de la violation naturelle de CP dans le Modèle Standard (1973)

1973 : Modèle de Kobayashi-Maskawa explique la violation de CP par une 3me famille de quarks

Interactions au 1er ordre de l'interaction faible



Mélange entre états propres de la masse et de l'interaction faible

Matrice de rotation unitaire CKM : 3 angles de rotation et une phase non triviale

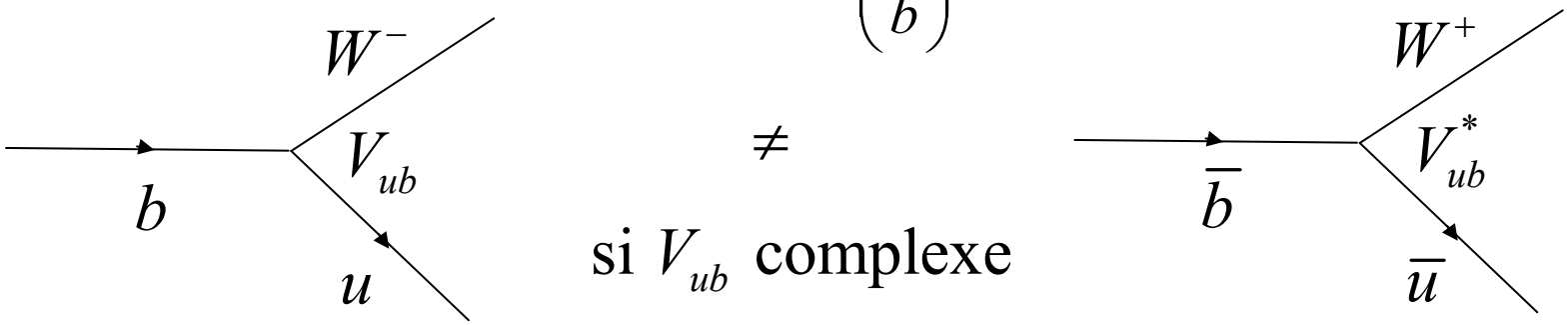
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} d \\ s \\ u \end{pmatrix} \qquad V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

$$\sum_{j}^{\in d,s,b} V_{ij} V_{ij}^{*} = 1 \qquad \forall i \in u,c,t$$

1973 : Modèle de Kobayashi - Maskawa explique la violation de *CP* par la valeur non - nulle de la phase non – triviale.

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{CC} \div \begin{pmatrix} \bar{u} & \bar{c} & \bar{t} \end{pmatrix} \gamma^{\mu} \left(1-\gamma_5\right) \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} W_{\mu}^{\dagger} + h.c =$$

$$\begin{pmatrix} \bar{u} & \bar{c} & \bar{t} \end{pmatrix} \gamma^{\mu} \left(1-\gamma_5\right) V \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} W_{\mu}^{\dagger} + h.c.$$



1974 : découverte du J/ψ et du quark *c* par Richter et al. et par Ting et al.
1976 : découverte du Υ et du quark *b* par Lederman et al.
1995 : découverte du quark *t*

Applicable directement au $B^0 - \bar{B}^0$ $K \to B$

Formalisme du mélange entre mésons $K^0 - \bar{K}^0$

1 - Hamiltonien effectif, valeurs et vecteurs propres

1 - Hamiltonien effectif, valeurs et vecteurs propres
2 - Oscillations
3 – Désintégrations
4 - Les modes de violation de *CP*

Mélange $K^0 - \bar{K}^0$: Matrices de masse et de désintégration et évolution

$$\left|\psi(t)\right\rangle = a(t)\left|K^0\right\rangle + \bar{a}(t)\left|\bar{K}^0\right\rangle \qquad + \sum_f c_f(t)\left|f\right\rangle$$

$$i\partial_t \left|\psi(t)\right\rangle = \mathcal{H}\left|\psi(t)\right\rangle = \mathcal{H}_0\left|\psi(t)\right\rangle + \mathcal{H}_w\left|\psi(t)\right\rangle$$

$\mathcal{H}_0$: Hamiltonien des interactions fortes et électromagnétiques

$\mathcal{H}_w$: Perturbation faible : $K^0 \to f, \bar{K}^0 \to f, K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$

Hamiltonien effectif - approximation de Weisskopf-Wigner

- $\left|\psi(0)\right\rangle = a(0)\left|K^0\right\rangle + \bar{a}(0)\left|\bar{K}^0\right\rangle$
- évolution des $c_f(t)$ ignorée $\qquad \left|\psi(t)\right\rangle \Rightarrow \left|K(t)\right\rangle$
- $t \gg t_S \approx 10^{-23}\,s$

Hamiltonien effectif - approximation de Weisskopf-Wigner

Désintégration et mélange

$$i\partial_t \begin{pmatrix} a(t) \\ \bar{a}(t) \end{pmatrix} = \mathcal{H}_{eff} \begin{pmatrix} a(t) \\ \bar{a}(t) \end{pmatrix}$$

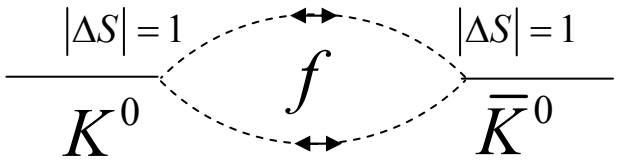
$$\mathcal{H}_{eff} = \begin{pmatrix} \langle K^0 | \mathcal{H}_{eff} | K^0 \rangle & \langle K^0 | \mathcal{H}_{eff} | \bar{K}^0 \rangle \\ \langle \bar{K}^0 | \mathcal{H}_{eff} | K^0 \rangle & \langle \bar{K}^0 | \mathcal{H}_{eff} | \bar{K}^0 \rangle \end{pmatrix}$$

$$= \mathcal{M} - i\frac{\Gamma}{2} = \begin{pmatrix} M - i\dfrac{\Gamma}{2} & M_{12} - i\dfrac{\Gamma_{12}}{2} \\ M_{12}^* - i\dfrac{\Gamma_{12}^*}{2} & M - i\dfrac{\Gamma}{2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} M_{11} = M_{22} = M_{K^0} = M_{\bar{K}^0} \equiv M \\ \Gamma_{11} = \Gamma_{22} = \Gamma_{K^0} = \Gamma_{\bar{K}^0} \equiv \Gamma \end{cases}$$

Hermiticité de $\mathcal{M}$ et Γ $\begin{cases} M_{12} = M_{21}^* \\ \Gamma_{12} = \Gamma_{21}^* \end{cases}$

Interprétation des termes des matrices de l'hamiltonien effectif



Terme d'absorption

f virtuels

f réels

$$\mathcal{H} = \mathcal{M} - i\frac{\Gamma}{2} = \begin{pmatrix} M & M_{12} \\ M_{12}^* & M \end{pmatrix} - \frac{i}{2}\begin{pmatrix} \Gamma & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{12}^* & \Gamma \end{pmatrix}$$

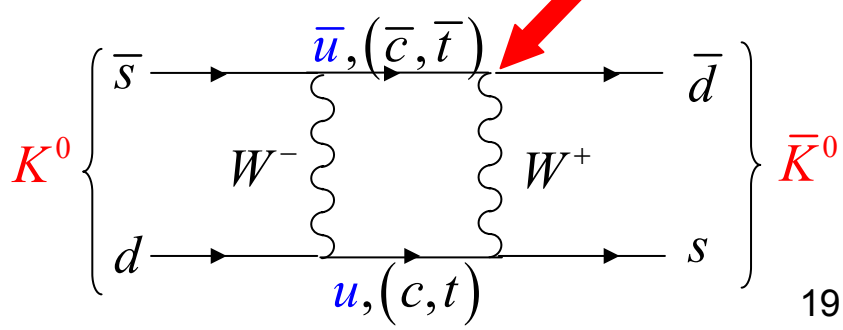
Terme de dispersion

M_0

$K^0 \to f$

$\bar{K}^0 \to f$

$$\div V_{is}^* V_{id} \;;\; \div \left(\frac{m_i}{M_W}\right)^2 \quad i \in u, c, t$$



Vecteurs propres

$$\mathcal{H}\begin{pmatrix}\left|K_S^0(t)\right\rangle\\ \left|K_L^0(t)\right\rangle\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\omega_S\\ \omega_L\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\left|K_S^0(t)\right\rangle\\ \left|K_L^0(t)\right\rangle\end{pmatrix} \qquad \Leftrightarrow \qquad \det\left(\mathcal{H}-\omega 1\right)=0$$

$$\left|K_S^0\right\rangle=\left(p\left|K^0\right\rangle+q\left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \qquad \left|K^0\right\rangle=\frac{1}{2p}\left(\left|K_S^0\right\rangle+\left|K_L^0\right\rangle\right)$$

$$\left|K_L^0\right\rangle=\left(p\left|K^0\right\rangle-q\left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \qquad \left|\bar{K}^0\right\rangle=\frac{1}{2q}\left(\left|K_S^0\right\rangle-\left|K_L^0\right\rangle\right)$$

$$\frac{q}{p}=\sqrt{\frac{\left(M_{12}^*-i\Gamma_{12}^*/2\right)}{\left(M_{12}-i\Gamma_{12}/2\right)}}$$

Normalisation : $|p|^2+|q|^2=1$

Non-orthogonalité : $\left\langle K_L^0\middle|K_S^0\right\rangle=|p|^2-|q|^2$

Valeurs propres

$$\omega_S=M_S-i\frac{\Gamma_S}{2}$$

$$\omega_L=M_L-i\frac{\Gamma_L}{2}$$

$$\begin{cases}\Delta M=M_L-M_S=-2\Re e\left(\dfrac{q}{p}\left(M_{12}-i\Gamma_{12}/2\right)\right)\\ \Delta\Gamma=\Gamma_L-\Gamma_S=4\Im m\left(\dfrac{q}{p}\left(M_{12}-i\Gamma_{12}/2\right)\right)\\ M=\left(M_S+M_L\right)/2\\ \Gamma=\left(\Gamma_S+\Gamma_L\right)/2\end{cases}$$

Evolution indépendante des deux états propres

$$I_S(t)=I_{S0}\exp\left(-t\Gamma_S\right)$$

$$I_L(t)=I_{L0}\exp\left(-t\Gamma_L\right)$$

Formalisme du mélange entre mésons $K^0 - \bar{K}^0$

2 - Oscillations

1 - Hamiltonien effectif, valeurs et vecteurs propres
2 - Oscillations
3 – Désintégrations
4 - Les modes de violation de *CP*

Notation et principes généraux des calculs

Valeurs et vecteurs propres de la vie moyenne

$$\Delta M = M_L - M_S = -2\Re e\left({}^{q}\!/_{p} \left(M_{12} - i\Gamma_{12}/2\right)\right)$$

$$\omega_{S,L} = M_{S,L} - i\frac{\Gamma_{S,L}}{2}$$

$$\Delta\Gamma = \Gamma_L - \Gamma_S = 4\Im m\left({}^{q}\!/_{p} \left(M_{12} - i\Gamma_{12}/2\right)\right)$$

$$\Gamma = \left(\Gamma_S + \Gamma_L\right)/2$$

$$\left|K_S^0\right\rangle = \left(p\left|K^0\right\rangle + q\left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \qquad \left|K^0\right\rangle = \frac{1}{2p}\left(\left|K_S^0\right\rangle + \left|K_L^0\right\rangle\right)$$

$$\left|K_L^0\right\rangle = \left(p\left|K^0\right\rangle - q\left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \qquad \left|\bar{K}^0\right\rangle = \frac{1}{2q}\left(\left|K_S^0\right\rangle - \left|K_L^0\right\rangle\right)$$

$$\frac{q}{p} = \sqrt{\frac{\left(M_{12}^* - i\Gamma_{12}^*/2\right)}{\left(M_{12} - i\Gamma_{12}/2\right)}}$$

Notation

$\left|\boldsymbol{K}(\boldsymbol{t})\right\rangle$ état en t d'un système $\left|K(0)\right\rangle = \left|K^0\right\rangle$

$\left|\bar{\boldsymbol{K}}(\boldsymbol{t})\right\rangle$ état en t d'un système $\left|\bar{K}(0)\right\rangle = \left|\bar{K}^0\right\rangle$

$$\boldsymbol{g}_+(t) = \left(\exp\left(-i\omega_S t\right) + \exp\left(-i\omega_L t\right)\right)/2$$

$$\boldsymbol{g}_-(t) = \left(\exp\left(-i\omega_S t\right) - \exp\left(-i\omega_L t\right)\right)/2$$

$$\left|\boldsymbol{g}_\pm(t)\right|^2 = \frac{1}{2}\exp\left(-\Gamma t\right)\left(\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right) \pm \cos\left(\Delta m\, t\right)\right)$$

$$\boldsymbol{g}_+^*(t)\,\boldsymbol{g}_-(t) = \frac{1}{2}\exp\left(-\Gamma t\right)\left(\sinh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right) + i\sin\left(\Delta m\, t\right)\right)$$

Évolution temporelle

$$\left|K(0)\right\rangle = \frac{1}{2p}\left\{\left|K_S^0\right\rangle + \left|K_L^0\right\rangle\right\}$$

$$\left|K(t)\right\rangle = \frac{1}{2p}\left\{\left|K_S^0\right\rangle \exp(-i\omega_S t) + \left|K_L^0\right\rangle \exp(-i\omega_L t)\right\} = g_+(t)\left|K^0\right\rangle + \frac{q}{p} g_-(t)\left|\bar{K}^0\right\rangle$$

$$\left|\bar{K}(0)\right\rangle = \frac{1}{2q}\left\{\left|K_S^0\right\rangle - \left|K_L^0\right\rangle \backslash\right\}$$

$$\left|\bar{K}(t)\right\rangle = \frac{1}{2q}\left\{\left|K_S^0\right\rangle \exp(-i\omega_S t) - \left|K_L^0\right\rangle \exp(-i\omega_L t)\right\} = g_+(t)\left|\bar{K}^0\right\rangle + \frac{p}{q} g_-(t)\left|K^0\right\rangle$$

Amplitude

$A(t)$: projection de $\left|K(t)\right\rangle$ sur $\begin{cases} \left|K^0\right\rangle, \left|\bar{K}^0\right\rangle \\ \left|K_S^0\right\rangle, \left|K_L^0\right\rangle \\ \left|f\right\rangle \end{cases}$

$$A(t) = \sum_i A_i(t)$$

$\bar{A}(t)$: projection de $\left|\bar{K}(t)\right\rangle$

Taux et asymétries

$$d_t\Gamma(t) = \left|A(t)\right|^2$$

$$\mathcal{A}(t) = \frac{d_t\Gamma_1(t) - d_t\Gamma_2(t)}{d_t\Gamma_1(t) + d_t\Gamma_2(t)}$$

Oscillations entre K^0 et $\bar{K}^0$

$$\left|K^0\right\rangle = \frac{1}{2p}\left(\left|K_S^0\right\rangle + \left|K_L^0\right\rangle\right)$$

$$\left|\bar{K}^0\right\rangle = \frac{1}{2q}\left(\left|K_S^0\right\rangle - \left|K_L^0\right\rangle\right)$$

$\left|K(t)\right\rangle$ état en t d'un système $\left|K(0)\right\rangle = \left|K^0\right\rangle$

$\left|\bar{K}(t)\right\rangle$ état en t d'un système $\left|\bar{K}(0)\right\rangle = \left|\bar{K}^0\right\rangle$

$$g_+(t) = \left(\exp\left(-i\omega_S t\right) + \exp\left(-i\omega_L t\right)\right)/2$$

$$g_-(t) = \left(\exp\left(-i\omega_S t\right) - \exp\left(-i\omega_L t\right)\right)/2$$

$$\left|K(t)\right\rangle = g_+(t)\left|K^0\right\rangle + \frac{q}{p} g_-(t)\left|\bar{K}^0\right\rangle$$

$$\left|\bar{K}(t)\right\rangle = g_+(t)\left|\bar{K}^0\right\rangle + \frac{p}{q} g_-(t)\left|K^0\right\rangle$$

Amplitudes

$$\left\langle K^0 \middle| K(t)\right\rangle = \left\langle \bar{K}^0 \middle| \bar{K}(t)\right\rangle = \boxed{g_+(t)}$$

$$\left\langle K^0 \middle| \bar{K}(t)\right\rangle = \frac{q}{p}\boxed{g_-(t)}$$

$$\left\langle \bar{K}^0 \middle| K(t)\right\rangle = \frac{p}{q}\boxed{g_-(t)}$$

Oscillations entre K^0 et $\bar{K}^0$

$$\left\langle K^0 \middle| K(t) \right\rangle = \left\langle \bar{K}^0 \middle| \bar{K}(t) \right\rangle = g_+(t) \qquad \left\langle K^0 \middle| \bar{K}(t) \right\rangle = \frac{q}{p} g_-(t) \qquad \left\langle \bar{K}^0 \middle| K(t) \right\rangle = \frac{p}{q} g_-(t)$$

$$\left| \boldsymbol{g}_\pm(\boldsymbol{t}) \right|^2 = \frac{1}{2} \exp(-\Gamma t) \left(\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2} t \right) \pm \cos(\Delta m t) \right)$$

$$\boldsymbol{g}_+^*(t) \boldsymbol{g}_-(t) = \frac{1}{2} \exp(-\Gamma t) \left(\sinh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2} t \right) + i \sin(\Delta m t) \right)$$

Taux

$$d_t\Gamma\left(K^0(t) \,|\, K^0\right) = d_t\Gamma\left(\bar{K}^0(t) \,|\, \bar{K}^0\right) = \frac{\exp(-\Gamma t)}{2} \left(\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma t}{2} \right) + \cos(\Delta M t) \right)$$

$$d_t\Gamma\left(K^0(t) \,|\, \bar{K}^0\right) = \frac{|q|^2}{|p|^2} \frac{\exp(-\Gamma t)}{2} \left(\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma t}{2} \right) - \cos(\Delta M t) \right)$$

$$d_t\Gamma\left(\bar{K}^0(t) \,|\, K^0\right) = \frac{|p|^2}{|q|^2} \frac{\exp(-\Gamma t)}{2} \left(\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma t}{2} \right) - \cos(\Delta M t) \right)$$

$$\boxed{d_t\Gamma\left(K^0(t) \,|\, K^0\right) = d_t\Gamma\left(\bar{K}^0(t) \,|\, \bar{K}^0\right)} \qquad \boxed{d_t\Gamma\left(K^0(t) \,|\, \bar{K}^0\right) \neq d_t\Gamma\left(\bar{K}^0(t) \,|\, K^0\right)}$$

Formalisme du mélange entre mésons $K^0 - \bar{K}^0$

3 - Désintégrations

1 - Hamiltonien effectif, valeurs et vecteurs propres
2 - Oscillations
3 – Désintégrations
4 - Les modes de violation de *CP*

Taux de désintégration vers un même canal

$K^0 \to f$

$\bar{K}^0 \to f$

$$g_+ = \frac{1}{2}\left(\exp\left(-i\omega_S t\right) + \exp\left(-i\omega_L t\right)\right) = A\left(K(t) \to K^0\right) = A\left(\bar{K}(t) \to \bar{K}^0\right)$$

$$g_- = \frac{1}{2}\left(\exp\left(-i\omega_S t\right) - \exp\left(-i\omega_L t\right)\right) = \frac{p}{q} A\left(K(t) \to \bar{K}^0\right) = \frac{q}{p} A\left(\bar{K}(t) \to K^0\right)$$

$$A_f = \textit{amplitude } K^0 \to f$$

$$\bar{A}_f = \textit{amplitude } \bar{K}^0 \to f$$

$$\left\langle f \middle| K(t) \right\rangle = g_+(t) A_f + \frac{q}{p} g_-(t) \bar{A}_f$$

$$\left\langle f \middle| \bar{K}(t) \right\rangle = g_+(t) \bar{A}_f + \frac{p}{q} g_-(t) A_f$$

$$\boxed{\begin{aligned} \left\langle f \middle| K(t) \right\rangle &= A_f \left(g_+(t) + \lambda_f g_-(t)\right) \\ \left\langle f \middle| \bar{K}(t) \right\rangle &= \frac{p}{q} A_f \left(g_-(t) + \lambda_f g_+(t)\right) \end{aligned} \qquad \lambda_f = \frac{q\,\bar{A}_f}{p\,A_f}}$$

Taux de désintégration vers un même canal

$K^0 \to f$
$\bar{K}^0 \to f$

$$\lambda_f = \frac{q\,\bar{A}_f}{p\,A_f} \quad = \quad \boxed{\begin{aligned} d_t\Gamma\left(K(t)\to f\right) &= \left|A_f\right|^2\left[\left|g_+(t)\right|^2 + \left|\lambda_f\right|^2\left|g_-(t)\right|^2 + 2\Re e\left(\lambda_f g_+^*(t)\,g_-(t)\right)\right] \\ d_t\Gamma\left(\bar{K}(t)\to f\right) &= \left|\bar{A}_f\right|^2\left[\left|g_+(t)\right|^2 + \left|\lambda_f^{-1}\right|^2\left|g_-(t)\right|^2 + 2\Re e\left(\lambda_f g_+^*(t)\,g_-(t)\right)\right] \\ &= \left|\frac{p}{q}\right|^2\left|A_f\right|^2\left[\left|\lambda_f\right|^2\left|g_+(t)\right|^2 + \left|g_-(t)\right|^2 + 2\Re e\left(\lambda_f g_-^*(t)\,g_+(t)\right)\right] \end{aligned}}$$

$$\left|\boldsymbol{g}_\pm(\boldsymbol{t})\right|^2 = \frac{1}{2}\exp\left(-\Gamma t\right)\left(\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right) \pm \cos\left(\Delta m\, t\right)\right)$$

$$\boldsymbol{g}_+^*(t)\,\boldsymbol{g}_-(t) = \frac{1}{2}\exp\left(-\Gamma t\right)\left(\sinh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right) + i\sin\left(\Delta m\, t\right)\right)$$

Taux de désintégration vers le canal *CP* conjugué

$K^0 \to \bar{f}$
$\bar{K}^0 \to \bar{f}$

$$\boxed{\frac{d\Gamma\left(K(t)\to\bar{f}\right)}{dt}, \frac{d\Gamma\left(\bar{K}(t)\to\bar{f}\right)}{dt}: \qquad A_f \to \bar{A}_{\bar{f}} \qquad \left|\frac{p}{q}\right| \to \left|\frac{q}{p}\right|}$$

Formalisme du mélange entre mésons $K^0 - \bar{K}^0$

4 - Les modes de violation de *CP*

1 - Hamiltonien effectif, valeurs et vecteurs propres
2 - Oscillations
3 – Désintégrations
4 - Les modes de violation de *CP*

Les phases dans la désintégration vers des états finals conjugués de *CP*

$$CP\left|K^0\right\rangle = e^{i\alpha_K}\left|\bar{K}^0\right\rangle$$

$$CP\left|f\right\rangle = e^{i\alpha_f}\left|\bar{f}\right\rangle$$

$$A_f = A\left(K^0 \to f\right) = \sum_j \left|A_j\right| e^{i\left(\delta_j+\phi_j\right)} \begin{cases} \sum_j \text{amplitudes partielles…} \\ \phi_j \text{ : phases faibles} \\ \delta_j \text{ : phases fortes} \end{cases}$$

Phases faibles violent *CP* : $A\left(K^0 \to f\right) \to A\left(\bar{K}^0 \to \bar{f}\right) \;\Rightarrow\; \phi_j \to -\phi_j$

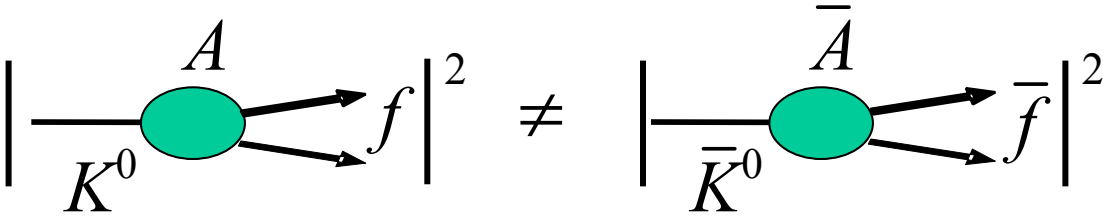
V_{CKM} dans le Modèle Standard

Phases fortes : interactions fortes entre hadrons finals de désintégration

$$A\left(K^0 \to f\right) \to A\left(\bar{K}^0 \to \bar{f}\right) \;\Rightarrow\; \delta_j \to \delta_j$$

$$\bar{A}_{\bar{f}} = A\left(\bar{K}^0 \to \bar{f}\right) = e^{i\left(\alpha_f-\alpha_B\right)} \sum_j \left|A_j\right| e^{i\left(\delta_j-\phi_j\right)}$$

Violation directe ou violation dans la désintégration vers des états finals conjugués de *CP*.



$$\frac{A_f}{\bar{A}_{\bar{f}}} = \frac{\sum_j |A_j| e^{i(\delta_j+\phi_j)}}{e^{i(\alpha_f-\alpha_B)} \sum_j |A_j| e^{i(\delta_j-\phi_j)}} \Rightarrow \left|\frac{A_f}{\bar{A}_{\bar{f}}}\right| = \left|\frac{\sum_j |A_j| e^{i(\delta_j+\phi_j)}}{\sum_j |A_j| e^{i(\delta_j-\phi_j)}}\right|$$

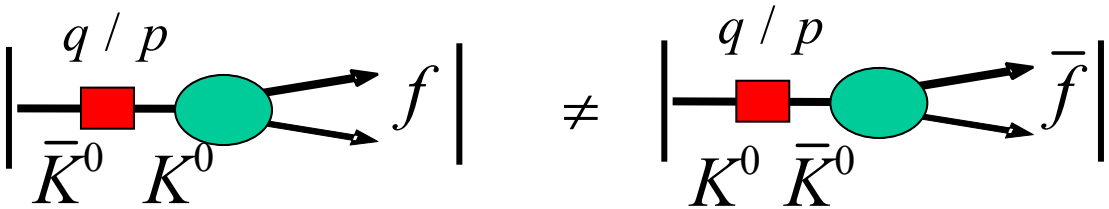
indépendant des conventions de phases fortes δ_j et faibles ϕ_j

Si conservation de *CP*

Violation directe de CP

$$\frac{A_f}{\bar{A}_{\bar{f}}} = \frac{\sum_j |A_j| e^{i(\delta_j)}}{e^{i(\alpha_f-\alpha_B)} \sum_j |A_j| e^{i(\delta_j)}} = \frac{1}{e^{i(\alpha_f-\alpha_B)}} \Rightarrow \left|\frac{A_f}{\bar{A}_{\bar{f}}}\right| = 1 \Rightarrow \boxed{\left|\frac{A_f}{\bar{A}_{\bar{f}}}\right| \neq 1}$$

Violation indirecte ou violation dans le mélange



$$\left|\frac{q}{p}\right| \neq 1 \;\Rightarrow$$

$$\Im m\left(M_{12}\Gamma_{12}^{*}\right) \neq 0$$

$$\left|K(t)\right\rangle = g_{+}(t)\left|K^{0}\right\rangle - \frac{q}{p} g_{-}(t)\left|\bar{K}^{0}\right\rangle$$

$$\left|\bar{K}(t)\right\rangle = g_{+}(t)\left|\bar{K}^{0}\right\rangle - \frac{p}{q} g_{-}(t)\left|K^{0}\right\rangle$$

Seul mode possible si $A\left(K^{0} \to f\right) = A\left(\bar{K}^{0} \to \bar{f}\right)$ $\left\{\begin{matrix} f \equiv \pi^{-} l^{+} \nu_{l} \\ \bar{f} \equiv \pi^{+} l^{-} \bar{\nu} \end{matrix}\right\} \Delta S = \Delta Q$

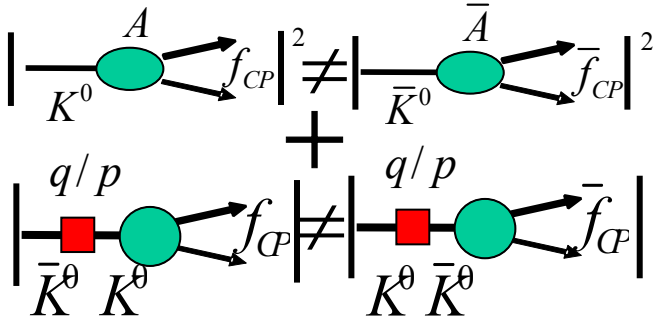
$$K(t)\begin{cases} \Gamma_{KK}(t): & K^{0} \to \pi^{-} l^{+} \nu_{l} \\ \left|\frac{q}{p}\right|^{2} \Gamma_{K\bar{K}}(t): & \bar{K}^{0} \to \pi^{+} l^{-} \bar{\nu}_{l} \end{cases} \qquad \bar{K}(t)\begin{cases} \Gamma_{K\bar{K}}(t): & \bar{K}^{0} \to \pi^{+} l^{-} \bar{\nu} \\ \left|\frac{p}{q}\right|^{2} \Gamma_{K\bar{K}}(t): & K^{0} \to \pi^{-} l^{+} \nu_{l} \end{cases}$$

$$\mathcal{A}_{SL}(t) = \mathcal{A}_{SL} = \frac{\Gamma\left(\bar{K}(t) \to \pi^{-} l^{+} \nu_{l}\right) - \Gamma\left(K(t) \to \pi^{+} l^{-} \bar{\nu}_{l}\right)}{\Gamma\left(\bar{K}(t) \to \pi^{-} l^{+} \nu_{l}\right) + \Gamma\left(K(t) \to \pi^{+} l^{-} \bar{\nu}_{l}\right)} = \frac{1 - \left|q/p\right|^{4}}{1 + \left|q/p\right|^{4}}$$

Interférence entre violations directe et indirecte vers le même état f_{CP}

$$K^0 \to f_{CP} \;:\; \pi\,\pi \begin{cases} K^0 \to f_{CP} \\ K^0 \to \bar{K}^0 \to f_{CP} \end{cases}$$

$$\bar{K}^0 \to f_{CP} \;:\; \pi\,\pi \begin{cases} \bar{K}^0 \to f_{CP} \\ \bar{K}^0 \to K^0 \to f_{CP} \end{cases}$$



$$\boxed{\lambda_{fCP} = \frac{q\,\bar{A}_{fCP}}{p\,A_{fCP}} \neq 1}$$

Cas le plus intéressant : $\left|\frac{q}{p}\right| = \left|\frac{\bar{A}_{fCP}}{A_{fCP}}\right| = \left|\lambda_{fCP}\right| = 1$ mais $\Im m\left(\lambda_{fCP}\right) \neq 0$

Absence de violation indirecte

Absence de violation directe

Interférence entre violations directe et indirecte

$$d_t\Gamma\left(K(t)\to f_{CP}\right)=\left|A_{fCP}\right|^2\left[\left|g_+(t)\right|^2+\left|\lambda_{fCP}\right|^2\left|g_-(t)\right|^2+2\Re e\left(\lambda_{fCP}g_+^*(t)g_-(t)\right)\right]$$

$$d_t\Gamma\left(\bar{K}(t)\to f_{CP}\right)=\left|\bar{A}_{fCP}\right|^2\left[\left|g_+(t)\right|^2+\left|\lambda_{fCP}^{-1}\right|^2\left|g_-(t)\right|^2+2\Re e\left(\lambda_{fCP}^{-1}g_+^*(t)g_-(t)\right)\right]$$

$$\left|g_\pm(t)\right|^2=\frac{1}{2}\exp(-\Gamma t)\left(\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right)\pm\cos(\Delta m t)\right)$$

$$g_+^*(t)g_-(t)=\frac{1}{2}\exp(-\Gamma t)\left(\sinh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right)+i\sin(\Delta m t)\right)$$

$$\lambda_{fCP}=\frac{q\,\bar{A}_{fCP}}{p\,A_{fCP}}$$

$$\left|K_{S,L}^0\right\rangle=p\left|K^0\right\rangle\pm q\left|\bar{K}^0\right\rangle$$

Taux

$$\boxed{\eta_{fCP}=\left|\eta_{fCP}\right|\exp\left(i\phi_{fCP}\right)=\frac{1-\lambda_{fCP}}{1+\lambda_{fCP}}=\frac{A\left(K_L\to f_{CP}\right)}{A\left(K_S\to f_{CP}\right)}}$$

$$d_t\Gamma\left(\overset{(-)}{K}(t)\to f_{CP}\right)\div\ \exp(-\Gamma_S t)+\left|\eta_{fCP}\right|^2\exp(-\Gamma_L t)$$

$$\pm 2\exp(-\Gamma t)\left(\Re e\left(\eta_{fCP}\right)\cos(\Delta M t)-\Im m\left(\eta_{fCP}\right)\sin(\Delta M t)\right)$$

Interférence entre violations directe et indirecte

$$d_t\Gamma\left(\overset{(-)}{K}(t)\to f_{CP}\right)\div\ \exp(-\Gamma_S t)+\left|\eta_{fCP}\right|^2\exp(-\Gamma_L t)\qquad \eta_{fCP}=\left|\eta_{fCP}\right|\exp\left(i\phi_{fCP}\right)=\frac{1-\lambda_{+-}}{1+\lambda_{+-}}$$

$$\pm 2\exp(-\Gamma t)\left(\Re e\left(\eta_{fCP}\right)\cos(\Delta M\,t)-\Im m\left(\eta_{fCP}\right)\sin(\Delta M\,t)\right)$$

Asymétrie $\mathcal{A}_{fCP}(t)=\dfrac{d_t\Gamma\left(K(t)\to f_{CP}\right)-d_t\Gamma\left(\bar{K}(t)\to f_{CP}\right)}{d_t\Gamma\left(K(t)\to f_{CP}\right)+d_t\Gamma\left(\bar{K}(t)\to f_{CP}\right)}$

$$\boxed{\mathcal{A}_{fCP}(t)=2\frac{\exp\left(-\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right)\left(\Re e\left(\eta_{fCP}\right)\cos(\Delta M\,t)-\Im m\left(\left(\eta_{fCP}\right)\right)\sin(\Delta M\,t)\right)}{1+\left|\eta_{fCP}\right|^2\exp(-\Delta\Gamma t)}}$$

$$\boxed{si\ \left|\lambda_{fCP}\right|=1\Rightarrow\mathcal{A}_{fCP}(t)=\exp\left(-\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right)\left(-\Im m\left(\lambda_{fCP}\right)\sin(\Delta M\,t)\right)}$$

Résultats expérimentaux

Système $K^0 - \bar{K}^0$

$$\left|\frac{p}{q}\right| \approx 1 \;\Rightarrow\; \frac{p}{q} = \frac{1+\tilde{\varepsilon}}{1-\tilde{\varepsilon}} \qquad \tilde{\varepsilon} \ll 1$$

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{p-q}{p+q}$$

Masses et vies moyennes

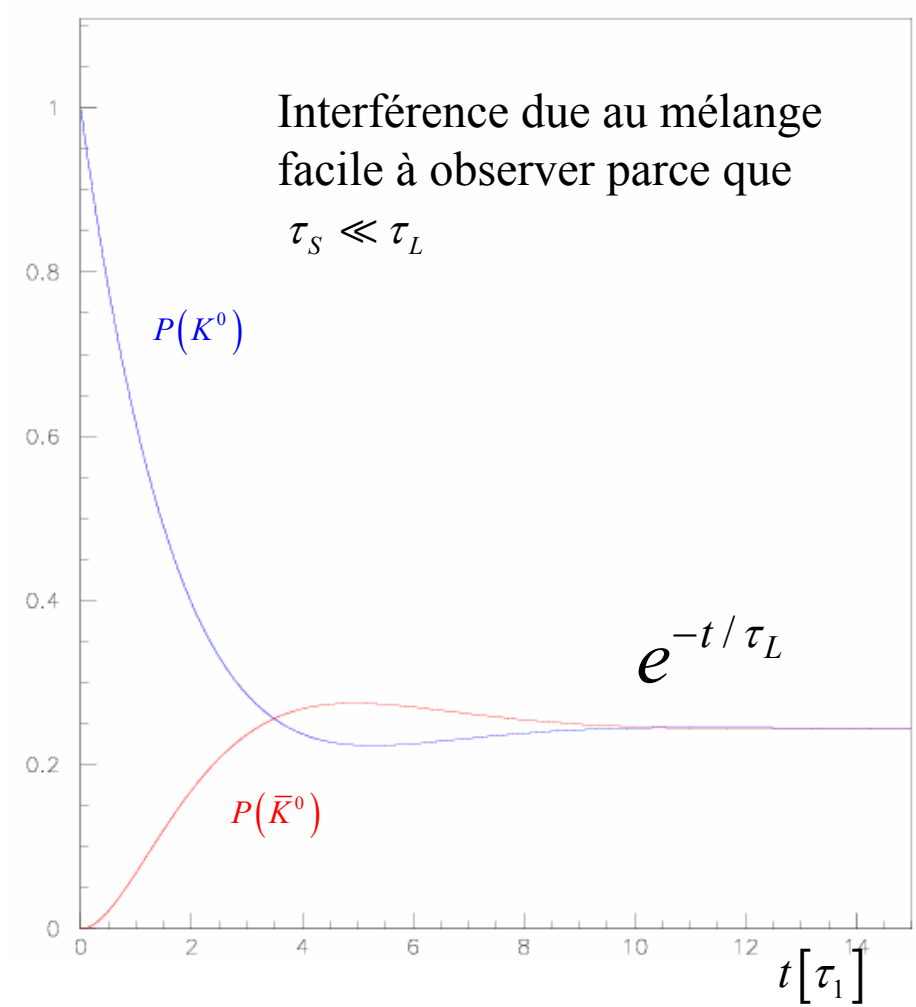
$$\tau_S = (0.8953 \pm 0.0006)10^{-10}\, s \ll \tau_L = (0.518 \pm 0.004)10^{-7}\, s$$

$$\Gamma_S \approx \Delta\Gamma \gg \Gamma_L$$

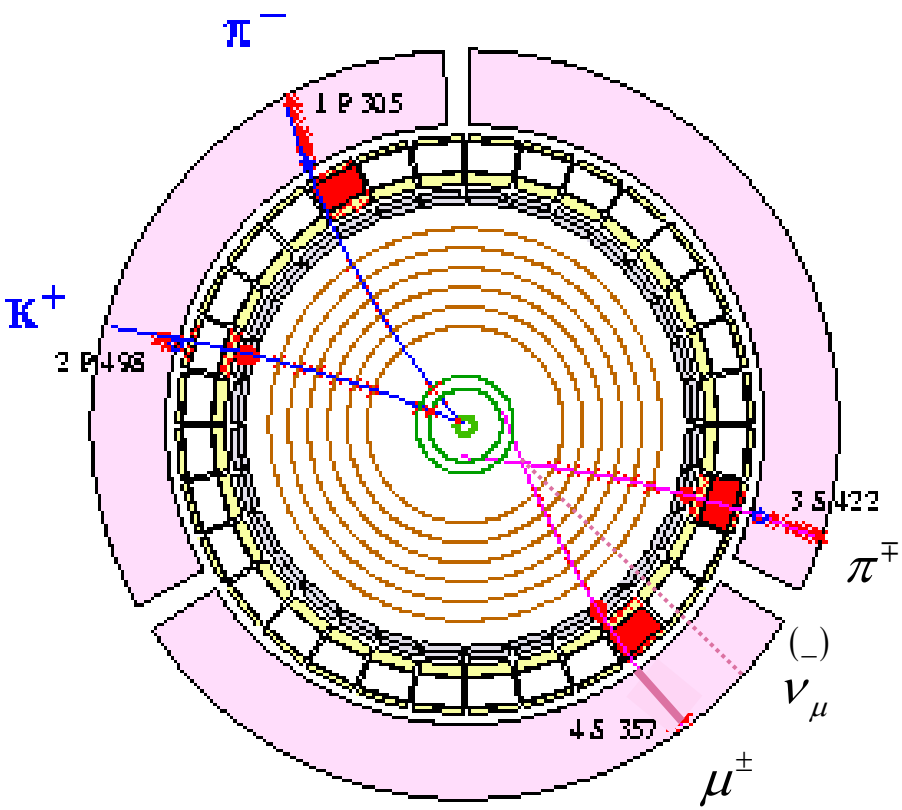
$$M = (497.648 \pm 0.022)\, MeV$$

$$\Delta M = M_L - M_S = (3.483 \pm 0.006) \cdot 10^{-12}\, MeV$$

$$\approx 10^{-14}\, M$$



Expérience CPLEAR au CERN:annihilations proton - antiproton au repos : Violation dans le mélange dans le mode semi-leptonique



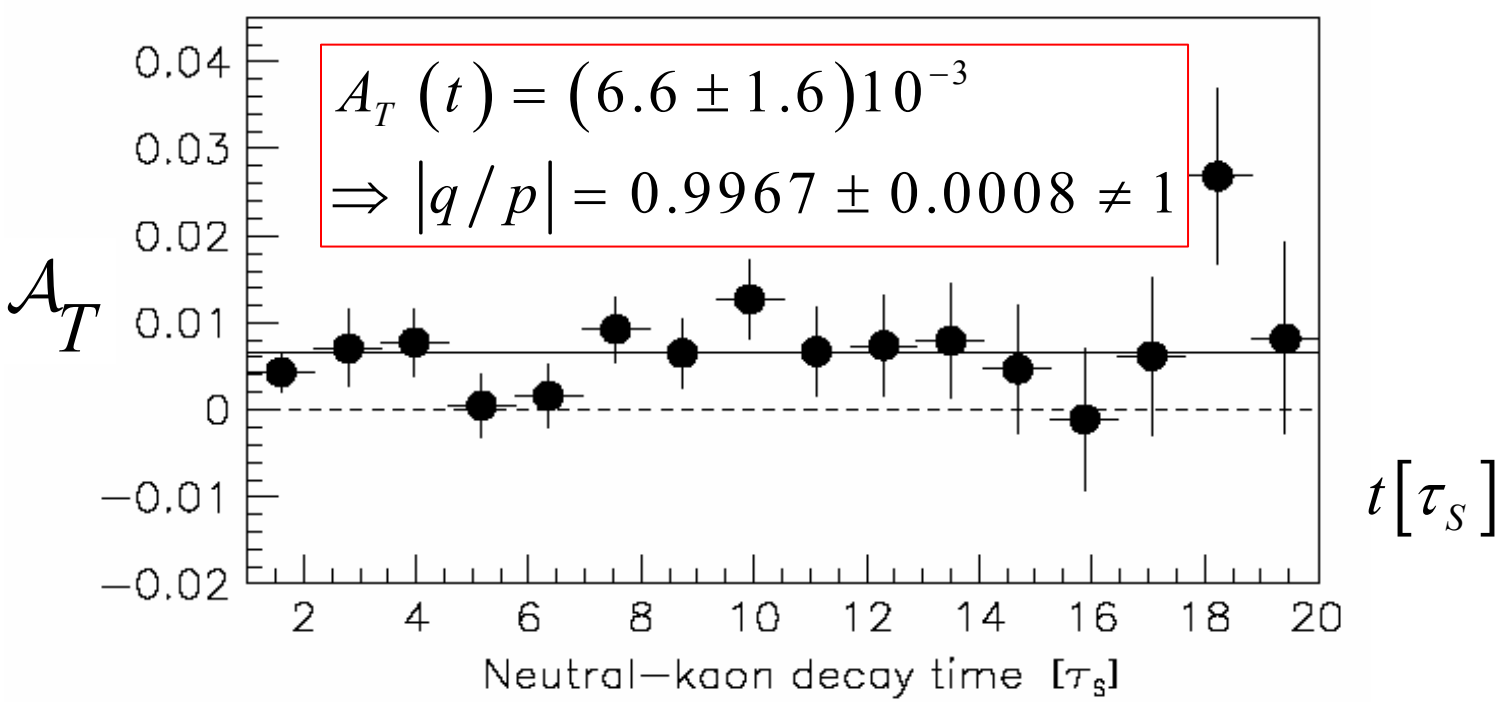
$$\bar{p}p \rightarrow \begin{cases} K^{-}\pi^{+}K^{0} \rightarrow K^{-}\pi^{+}\pi^{-}l^{+}\nu_{l} \\ K^{+}\pi^{-}\bar{K}^{0} \rightarrow K^{+}\pi^{-}\pi^{+}l^{-}\bar{\nu}_{l} \end{cases}$$

Étiquetage étrangeté

Vertex secondaire

CPLEAR : Violation dans le mélange dans le mode semi-leptonique

$$\mathcal{A}_T(t) = \mathcal{A}_T = \frac{\Gamma\left(\bar{K}(t) \to \pi^- l^+ \nu_l\right) - \Gamma\left(K(t) \to \pi^+ l^- \bar{\nu}_l\right)}{\Gamma\left(\bar{K}(t) \to \pi^- l^+ \nu_l\right) + \Gamma\left(K(t) \to \pi^+ l^- \bar{\nu}_l\right)} = \frac{1 - |q/p|^4}{1 + |q/p|^4}$$



Recherche de violation directe dans la désintégration $K^0, \bar{K}^0 \to f_{CP}$

$$K^0 \to f_{CP} \equiv \pi\,\pi \qquad CP\left|\pi\,\pi\right\rangle = +1\left|\pi\,\pi\right\rangle$$

$$\bar{K}^0 \to f_{CP} \equiv \pi\,\pi \qquad CP\left|K_L^0\right\rangle = -1\left|K_L^0\right\rangle \text{ si conservation de } CP$$

Amplitudes partielles : deux états d'isospin dans l'état final
deux modes d'interactions fortes

$$A_f = A\left(K^0 \to f\right) = \sum_j \left|A_j\right| e^{i\left(\delta_j + \phi_j\right)}$$

$$\begin{pmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{pmatrix} I = 1 \qquad \Rightarrow \pi\,\pi \begin{cases} I = 0 \\ \cancel{I = 1} \\ I = 2 \end{cases} \Rightarrow \begin{array}{ll} \left|\pi^+\pi^-\right\rangle = \sqrt{\frac{2}{3}}\ \left|\pi^+\pi^-\,|_{I=0}\right\rangle + \sqrt{\frac{1}{3}} & \left|\pi^+\pi^-\,|_{I=2}\right\rangle \\ \left|\pi^0\pi^0\right\rangle = -\sqrt{\frac{1}{3}}\ \left|\pi^0\pi^0\,|_{I=0}\right\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}} & \left|\pi^0\pi^0\,|_{I=2}\right\rangle \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} K^+ \\ K^0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \bar{K}^0 \\ K^- \end{pmatrix} I = \frac{1}{2}$$

Amplitudes de désintégration vers l'état final π π tenant compte des effets d'isospin

$$\begin{pmatrix} A\left(\left|K^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^- \,|_I\right\rangle\right) = A_I \exp\left(i\delta_I\right) \\ A\left(\left|\bar{K}^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^- \,|_I\right\rangle\right) = \bar{A}_I \exp\left(i\delta_I\right) \end{pmatrix}$$

δ_I phase due aux interactions fortes $\pi\pi$ dans l'état final

Commune à K^0 et $\bar{K}^0$

Différentes pour $I = 0$ et $I = 2$

$$A\left(\left|K_S^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^- \,|_I\right\rangle\right) = \left(pA_I + q\bar{A}_I\right)\exp\left(i\delta_I\right)$$

$$A\left(\left|K_L^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^- \,|_I\right\rangle\right) = \left(pA_I - q\bar{A}_I\right)\exp\left(i\delta_I\right)$$

$$\boxed{\begin{aligned}
&A\left(\left|K_S^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^-\right\rangle\right)\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\left(\left(pA_0 + q\bar{A}_0\right)\exp\left(i\delta_0\right)\right) + \sqrt{\frac{1}{3}}\left(\left(pA_2 + q\bar{A}_2\right)\exp\left(i\delta_2\right)\right)\right) \\
&A\left(\left|K_L^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^-\right\rangle\right)\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\left(\left(pA_0 - q\bar{A}_0\right)\exp\left(i\delta_0\right)\right) + \sqrt{\frac{1}{3}}\left(\left(pA_2 - q\bar{A}_2\right)\exp\left(i\delta_2\right)\right)\right) \\
&A\left(\left|K_S^0\right\rangle \to \left|\pi^0\pi^0\right\rangle\right)\left(-\sqrt{\frac{1}{3}}\left(\left(pA_0 + q\bar{A}_0\right)\exp\left(i\delta_0\right)\right) + \sqrt{\frac{2}{3}}\left(\left(pA_2 + q\bar{A}_2\right)\exp\left(i\delta_2\right)\right)\right) \\
&A\left(\left|K_L^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^-\right\rangle\right)\left(-\sqrt{\frac{1}{3}}\left(\left(pA_0 - q\bar{A}_0\right)\exp\left(i\delta_0\right)\right) + \sqrt{\frac{2}{3}}\left(\left(pA_2 - q\bar{A}_2\right)\exp\left(i\delta_2\right)\right)\right)
\end{aligned}}$$

règle favorisant $\Delta I = \frac{1}{2}$ $\qquad A_0, \bar{A}_0 \gg A_2, \bar{A}_2$

Paramètres mesurables pour mesurer la violation directe de CP

$$\left(\begin{array}{l} \eta_{+-} = |\eta_{+-}| \exp(i\phi_{+-}) = \dfrac{A(K_L \to \pi^+\pi^-)}{A(K_S \to \pi^+\pi^-)} = \dfrac{1-\lambda_{+-}}{1+\lambda_{+-}} \\ \eta_{00} = |\eta_{00}| \exp(i\phi_{00}) = \dfrac{A(K_L \to \pi^0\pi^0)}{A(K_S \to \pi^0\pi^0)} = \dfrac{1-\lambda_{00}}{1+\lambda_{00}} \end{array}\right) \quad \eta_{+-} = \eta_{00} = 1 \text{ si conservation de } CP$$

Relations arithmétiques entre η_{+-} ,η_{00} et $A_0, A_2, \bar{A}_0, \bar{A}_2, \delta_0, \delta_2$

$$\varepsilon_I = \frac{A(K_L^0 \to \pi^+\pi^- |_I)}{A(K_S^0 \to \pi^+\pi^- |_I)} = \frac{pA_I - q\bar{A}_I}{pA_I + q\bar{A}_+} \quad I = 0,2$$

$$\omega = \frac{A(K_S^0 \to \pi^+\pi^- |_{I=2})}{A(K_S^0 \to \pi^+\pi^- |_{I=0})} = \frac{pA_2 + q\bar{A}_2}{pA_0 + q\bar{A}_0} \approx 0.05 \qquad \Delta I = \frac{1}{2} \Rightarrow \omega^2 \approx 0$$

$$\boxed{\begin{array}{ll} \varepsilon \equiv \varepsilon_0 & \\ \varepsilon' = \dfrac{\omega}{\sqrt{2}}(\varepsilon_2 - \varepsilon_0) & \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \eta_{+-} = \varepsilon + \varepsilon' \\ \eta_{00} = \varepsilon - 2\varepsilon' \end{array} \end{array}}$$

Paramètres mesurables: comment détecter la violation directe dans la désintégration de la violation indirecte, due au mélange

Test de l'absence de violation directe dans la désintégration:

si CP conservé

$$A\left(\left|K^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^- \,|_I\right\rangle\right) = A_I \exp\left(i\delta_I\right) = A\left(\left|\bar{K}^0\right\rangle \to \left|\pi^+\pi^- \,|_I\right\rangle\right) = \bar{A}_I \exp\left(i\delta_I\right)$$

$$\varepsilon_I = \frac{pA_I - q\bar{A}_I}{pA_I + q\bar{A}_+} = \frac{p-q}{p+q} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon \equiv \varepsilon_0 = \varepsilon_2 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon' = \frac{\omega}{\sqrt{2}}\left(\varepsilon_2 - \varepsilon_0\right) = 0$$

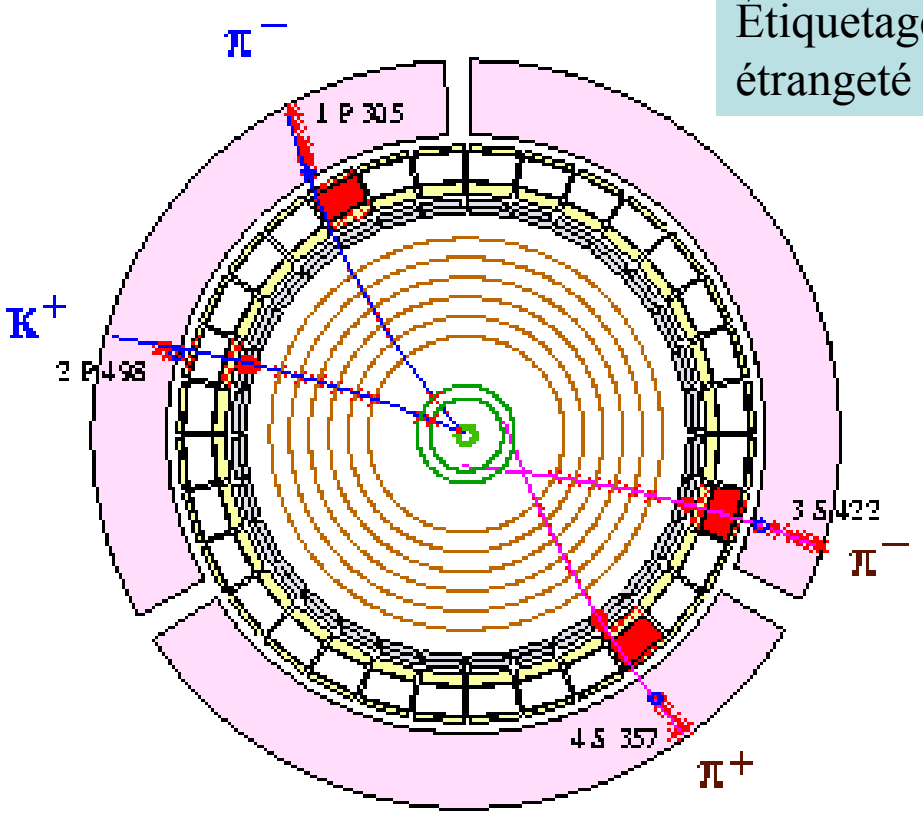
$$\begin{pmatrix} \eta_{+-} = \varepsilon + \varepsilon' \\ \eta_{00} = \varepsilon - 2\varepsilon' \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\eta_{+-} = \eta_{00} = \varepsilon}$$

Mesures de $|\eta_{+-}|, \phi_{+-}, |\eta_{00}|$ et ϕ_{00} dans l'expérience CPLEAR du CERN : annihilations proton - antiproton au repos

Marquage $\bar{p}p \rightarrow \begin{cases} K^+\pi^-K^0 \rightarrow K^+\pi^-\boxed{\pi^+\pi^-} \\ K^-\pi^+\bar{K}^0 \rightarrow K^-\pi^+\boxed{\pi^+\pi^-} \end{cases}$

Étiquetage étrangeté

Vertex secondaire



CPLEAR

$$\mathcal{A}_{fCP}(t) = 2\frac{|\eta_f|\exp\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right)\cos(\Delta M t - \phi_f)}{1+|\eta_f|^2\exp(-\Delta\Gamma t)}$$

$$f_{CP} = \pi^0\pi^0$$

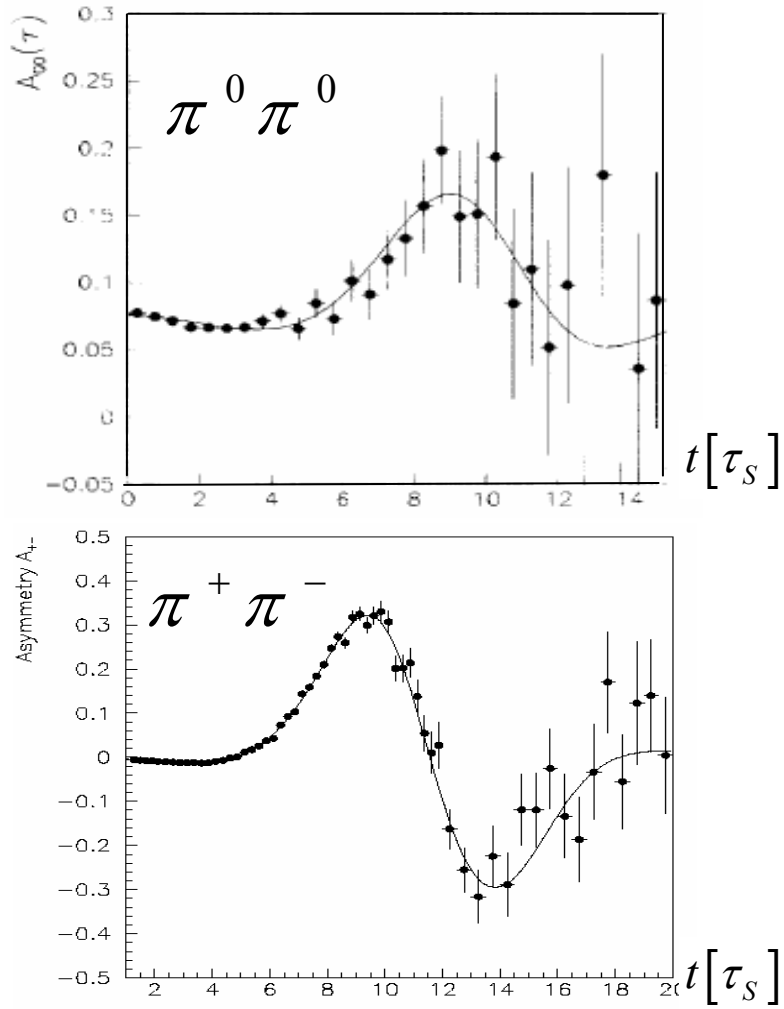
$$|\eta_{00}| = (2.47 \pm 0.31 \pm 0.24)\cdot 10^{-3}$$

$$\phi_{00} = 42.00^\circ \pm 5.6^\circ \pm 1.9^\circ$$

$$f_{CP} = \pi^+\pi^-$$

$$|\eta_{+-}| = (2.264 \pm 0.023 \pm 0.026)\cdot 10^{-3}$$

$$\phi_{+-} = 43.19^\circ \pm 0.53^\circ \pm 0.28^\circ$$



Moyenne PDG

$$|\eta_{+-}| = (2.286 \pm 0.014)\cdot 10^{-3} \qquad \phi_{+-} = 43.49^\circ \pm 0.06^\circ$$

$$|\eta_{00}| = (2.276 \pm 0.014)\cdot 10^{-3} \qquad \phi_{00} = 43.51^\circ \pm 0.05^\circ$$

Pas de violation directe ?? En tout cas $\varepsilon'/\varepsilon << 1$

Expériences NA48 au SPS du CERN et KTeV au Tevatron du FNAL

Mesure simultanée de $K_S^0, K_L^0 \to \pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0$

$$\frac{\dfrac{\Gamma\left(K_L \to \pi^0\pi^0\right)}{\Gamma\left(K_S \to \pi^0\pi^0\right)}}{\dfrac{\Gamma\left(K_L \to \pi^+\pi^=\right)}{\Gamma\left(K_S \to \pi^+\pi^=\right)}} = \left|\frac{\eta_{00}}{\eta_{+-}}\right|^2 = \left|\frac{\varepsilon - 2\varepsilon'}{\varepsilon + \varepsilon'}\right| = 1 - 6\Re e\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right) + \mathcal{O}\left(\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right)^2\right)$$

MOTIVATION

1993

NA31 au CERN :

$$\left\{\begin{array}{l} \Re e\left(\dfrac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right) = (2.30 \pm 0.65)\cdot 10^{-3} \\ \left|\dfrac{\eta_{00}}{\eta_{+-}}\right| = 0.9931 \pm 0.0020 \end{array}\right\}$$

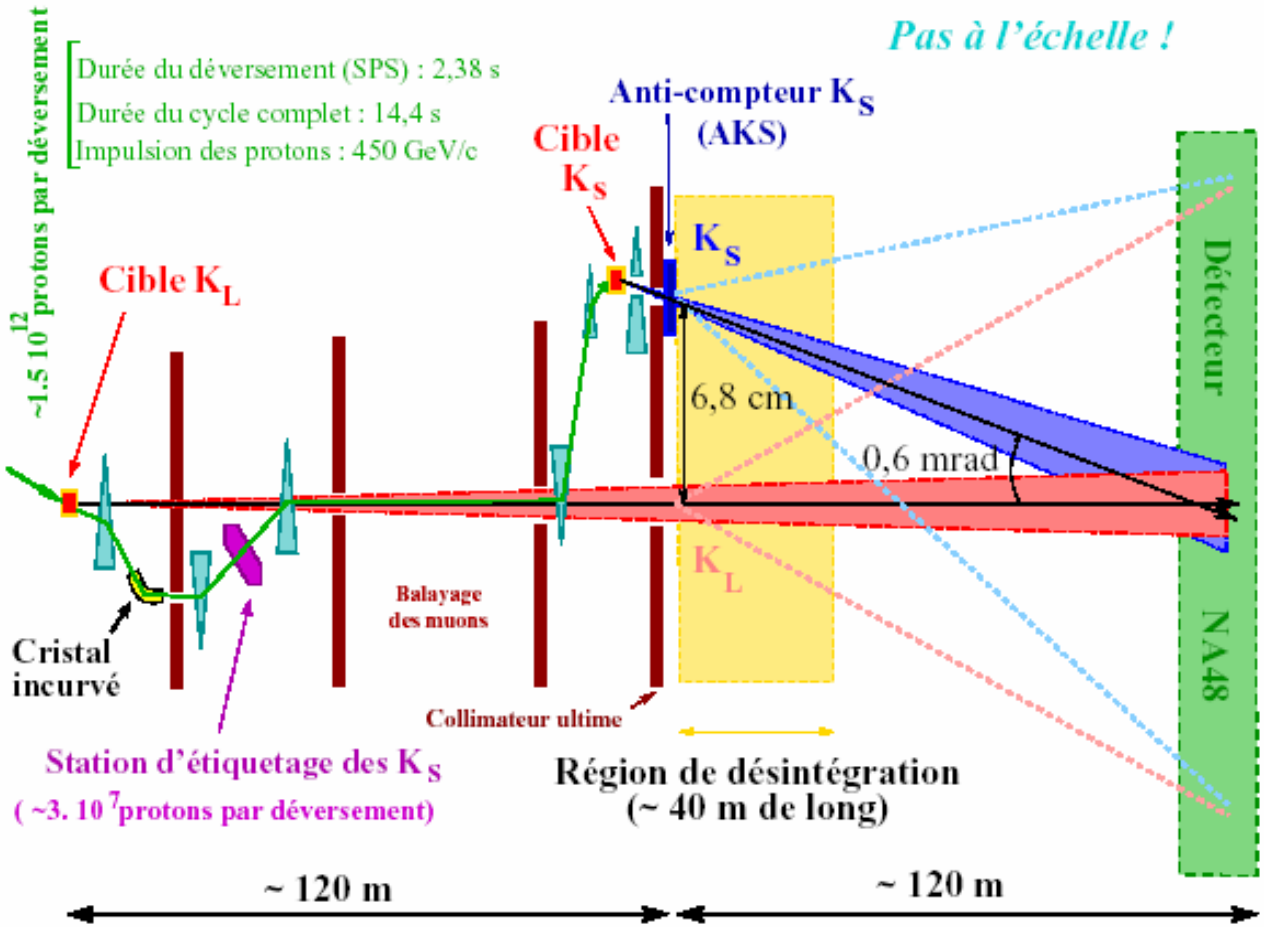
effet de 3.5σ

E731 au FNAL :

$$\left\{\begin{array}{l} \Re e\left(\dfrac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right) = (0.74 \pm 0.52 \pm 0.29)\cdot 10^{-3} \\ \left|\dfrac{\eta_{00}}{\eta_{+-}}\right| = 0.9904 \pm 0.0084 \pm 0.0036 \end{array}\right\}$$

pas d'effet

Originalité du faisceau de l'expérience NA48 au SPS du CERN



K_S^0 et K_L^0
voient le même détecteur
au même moment
$\Rightarrow$
Annulation des
effets systématiques

Etiquetage

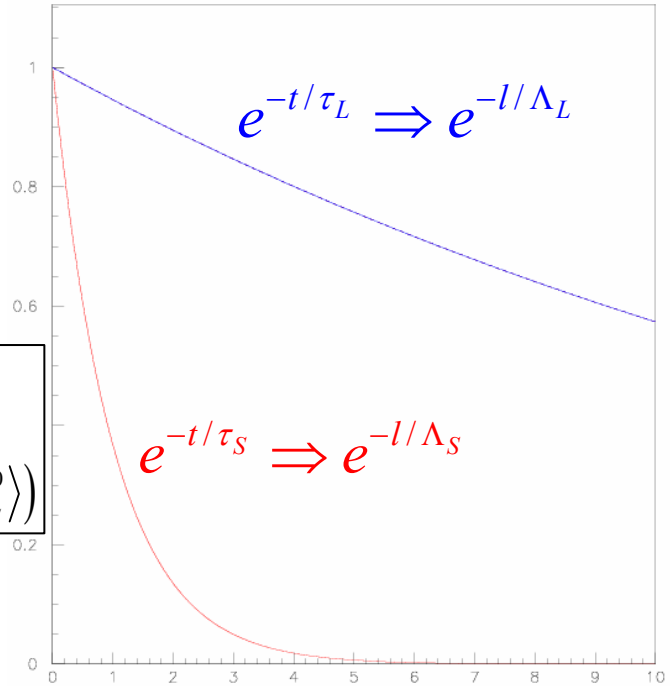
K_S^0 si $t_p\left(\text{station étiquetage}\right) - t_{K\to\pi\pi}\left(\text{détecteur}\right) \in \left[-2ns, +2ns\right]$

K_L^0 si pas K_S^0

Régénération cohérente vers l'avant des K_S^0 dans la matière Indépendante de CP

$K^- p$
$\downarrow$
$\bar{K}^0 n$

$$\left|\bar{K}^0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K_S^0\right\rangle - \left|K_L^0\right\rangle\right)$$



$$\left|K_L^0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K^0\right\rangle - \left|\bar{K}^0\right\rangle\right)$$

régénérateur

$$\left(\alpha(t)\left|K_S^0\right\rangle + \beta(t)\left|K_L^0\right\rangle\right)$$

$$\begin{pmatrix} d \\ \bar{s} \end{pmatrix} : K^0 N \to K N(\pi \ldots)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{d} \\ s \end{pmatrix} : \begin{array}{l} \bar{K}^0 N \to \bar{K} N(\pi \ldots) \\ \bar{K}^0 N \to \Lambda, \Sigma \pi(\pi \ldots) \end{array}$$

$$\sigma_T\left(K^0 N\right) < \sigma_T\left(\bar{K}^0 N\right)$$

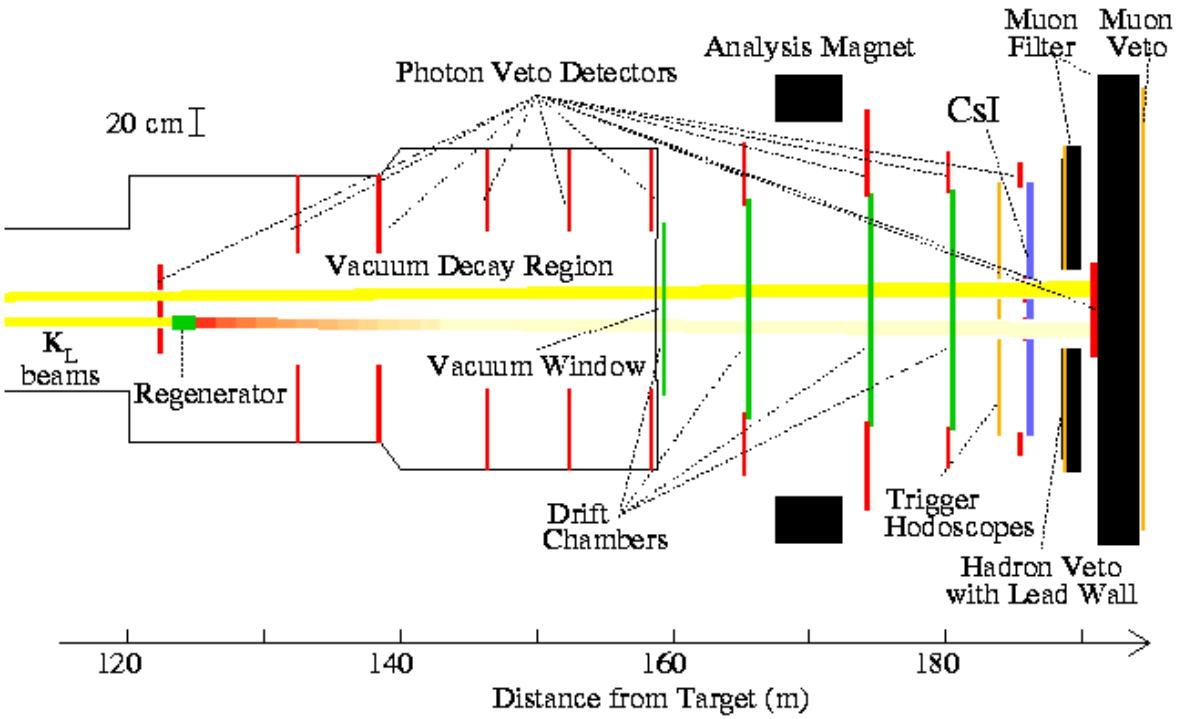
Amplitudes de diffusion vers l'avant

$$f(0) < \bar{f}(0)$$

0 $\qquad L \gg \Lambda_S \qquad$ $L[\Lambda_S = \gamma c \tau_S]$

Problème pratique : contamination par régénération incohérente

La méthode de KTeV au Tevatron du FNAL



K_S^0 et K_L^0
voient le même détecteur
au même moment
$\Rightarrow$
Annulation des
effets systématiques

Deux faisceaux de K_L^0 produits sur une cible en amont:

1 - chambre à vide dirigée vers le détecteur : faisceau pur de K_L^0

2- chambre à vide contient une cible régénératrice : mélange de K_L^0 et K_S^0

Évidence expérimentale de la violation directe de CP ou violation dans la désintégration

NA48 : $\Re e\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right) = (1.47 \pm 0.22) \cdot 10^{-3}$

KTeV $\Re e\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right) = (2.07 \pm 0.28) \cdot 10^{-3}$

$\Re e\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right) = (1.67 \pm 0.26) \cdot 10^{-3}$

$\left|\frac{\eta_{00}}{\eta_{+-}}\right| = 0.9950 \pm 0.0008$

Effet de 6.5 σ

La violation de CP dans le système $K^0 - \bar{K}^0$

$$CP = -1 \qquad CP = +1$$

$$\left| K_L^0 \right\rangle = \left| K_2^0 \right\rangle + \tilde{\varepsilon} \left| K_1^0 \right\rangle$$

Directe - désintégration

$$\varepsilon' \approx 10^{-6}$$

Indirecte - mélange

$$\varepsilon \approx \tilde{\varepsilon} \approx 10^{-3}$$

$$\pi\pi$$

$$CP = +1$$

Un exemple de résultat expérimental
dans le système $B^0 - \overline{B}^0$

37 ans après la découverte de la violation de CP
dans le système $K^0 - \overline{K}^0$

Système $B^0 - \overline{B}^0$

$$K^0 \to B^0 \begin{pmatrix} d \\ \overline{s} \to \overline{b} \end{pmatrix} \qquad \overline{K}^0 \to \overline{B}^0 \begin{pmatrix} \overline{d} \\ s \to b \end{pmatrix}$$

$$M_{B^0} = (5279.4 \pm 0.5)\, MeV \approx 10 M_{K^0}$$

$$\Downarrow$$

221 modes de dégration vus ou recherchés

$$\Downarrow$$

Pas d'argument d'espace des phases

$$\tau_S \equiv \tau_L = (1.536 \pm 0.014) \cdot 10^{-12}\, s$$

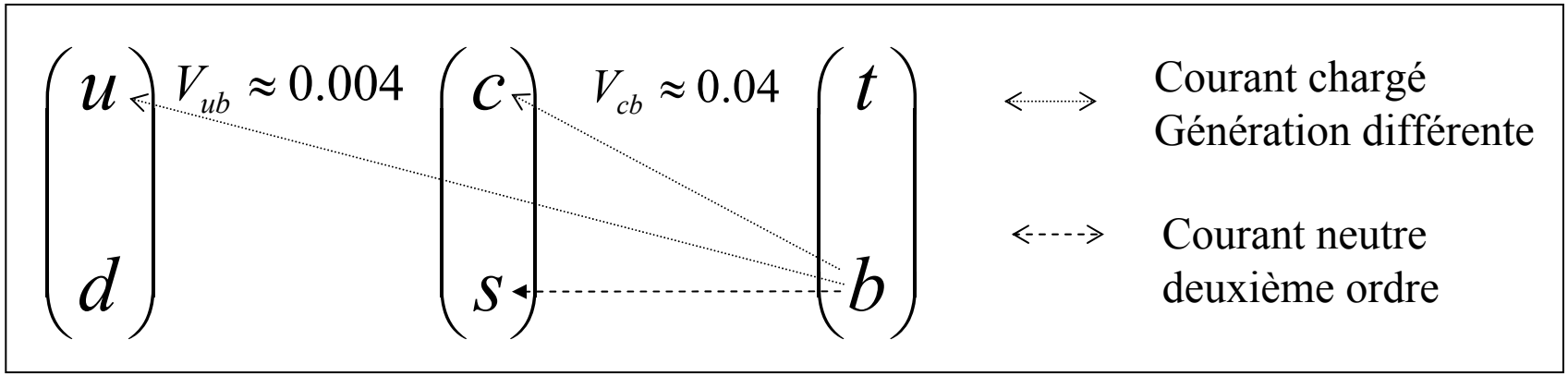
$$\Downarrow$$

K^0: Etats propres du temps de vie : K_S^0, K_L^0

B^0: Etats propres de la masse : B_H^0, B_L^0

$$\Delta M_{B^0} = M_{B_H^0} - M_{B_L^0} = (3.304 \pm 0.046) \cdot 10^{-10}\, MeV \approx 10^{-13} M_{B^0}$$

Modes de désintégration de système $B^0 - \overline{B}^0$



$$\Gamma(b \to c) \gg \Gamma(b \to s) \gg \Gamma(b \to d)$$

B.R.	$B^0 \to D^- l^+ \nu_l$	10%
	$B^0 \to D + \text{mésons}(u,d,s)$	$\leq 1\%$
	$B^0 \to K + \text{mésons}(u,d)$	$\leq 10^{-4}$
	$B^0 \to \text{hadrons}(u,d)$	$\leq 10^{-5}$
	$\to \pi^+ \pi^-$	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$

Etiquetqge : $B^0 \to D^- l^+ \nu$

$\overline{B}^0 \to D^+ l^- \nu$

Les usines à $B^0 - \overline{B}^0$

KEKB au KEK

PEP-II au SLAC

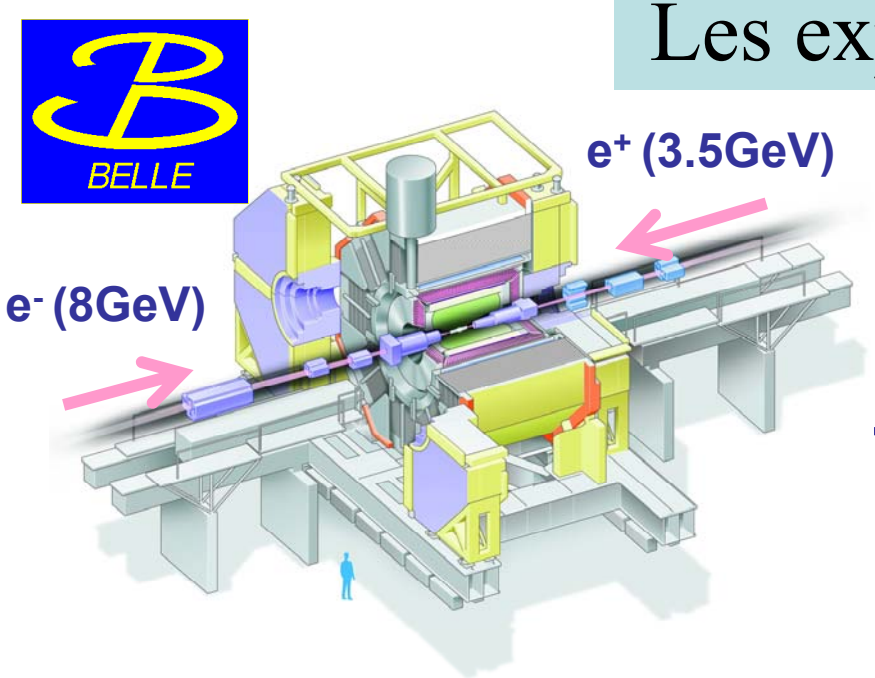
$$e^+e^- \rightarrow \sqrt{s} = 10580\,MeV = M_{\Upsilon(4S)}$$

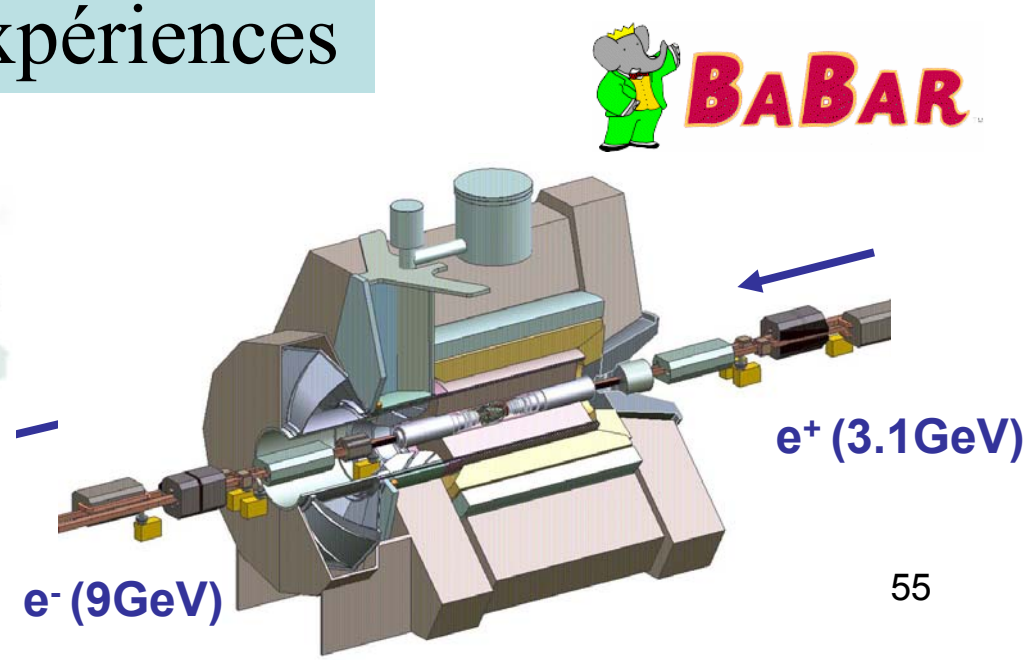
$$\Upsilon(4S) : \begin{pmatrix} b \\ \overline{b} \end{pmatrix} \qquad \Upsilon(4S) \rightarrow B\,\overline{B} \quad R.B. = 96\%$$

$$M_{\Upsilon(4S)} - 2M_B = 21\,MeV \Rightarrow p_B = 335\,MeV/c \Rightarrow \beta\gamma c\tau_B \approx 20\,\mu m$$

Faisceaux asymétriques $\Rightarrow \beta\gamma c\tau_B \approx 200\,\mu m$

Les expériences





Désintégration des paires cohérentes

$$\Upsilon(4s) \rightarrow B^0 \overline{B}^0$$

$$\swarrow \qquad \searrow$$

en t_1 : f_1 $\qquad$ f_2 : en t_2

Conservation de l'étrangeté aussi longtemps que B^0 et $\overline{B}^0$ coexistent: ils évoluent en phase.

Les interférences commencent à partir du temps t_1 de la première désintégration et durent jusqu'au temps $t_2 = t_1 + \Delta t$ de la deuxième désintégration.

$$\phi \rightarrow K^0 \overline{K}^0$$

$$\swarrow \qquad \searrow$$

en t_1 : f_1 $\qquad$ f_2 : en t_2

Désintégration et étiquetage des paires cohérentes

$$\Upsilon(4s) \to B^0 \overline{B}^0$$

$$\swarrow \qquad \searrow$$

en t_1 : f_1 $\qquad$ f_2 : en t_2

$$\lambda_f = \frac{q\,\overline{A}_f}{p\,A_f}$$

f_1 choisi tel que $B^0 \not\to f_1 \Rightarrow A_{f1} = 0$ et $\overline{A}_{f1} = 1$

L' observation de f_1 étiquette le premier méson comme un $\overline{B}^0$

$\Rightarrow$ En $t = t_1$, le second méson est un B^0

L'évolution du second méson à parir de $t = t_1$ est celle d'un état initial B^0 pur

$$d_t\Gamma\left(B(\Delta t) \to f_2\right) = \left|A_{f2}\right|^2 \left[\left|g_+(\Delta t)\right|^2 + \left|\lambda_{f2}\right|^2 \left|g_-(\Delta t)\right|^2 + 2\Re e\left(\lambda_{f2} g_+^*(\Delta t)\, g_-(\Delta t)\right)\right]$$

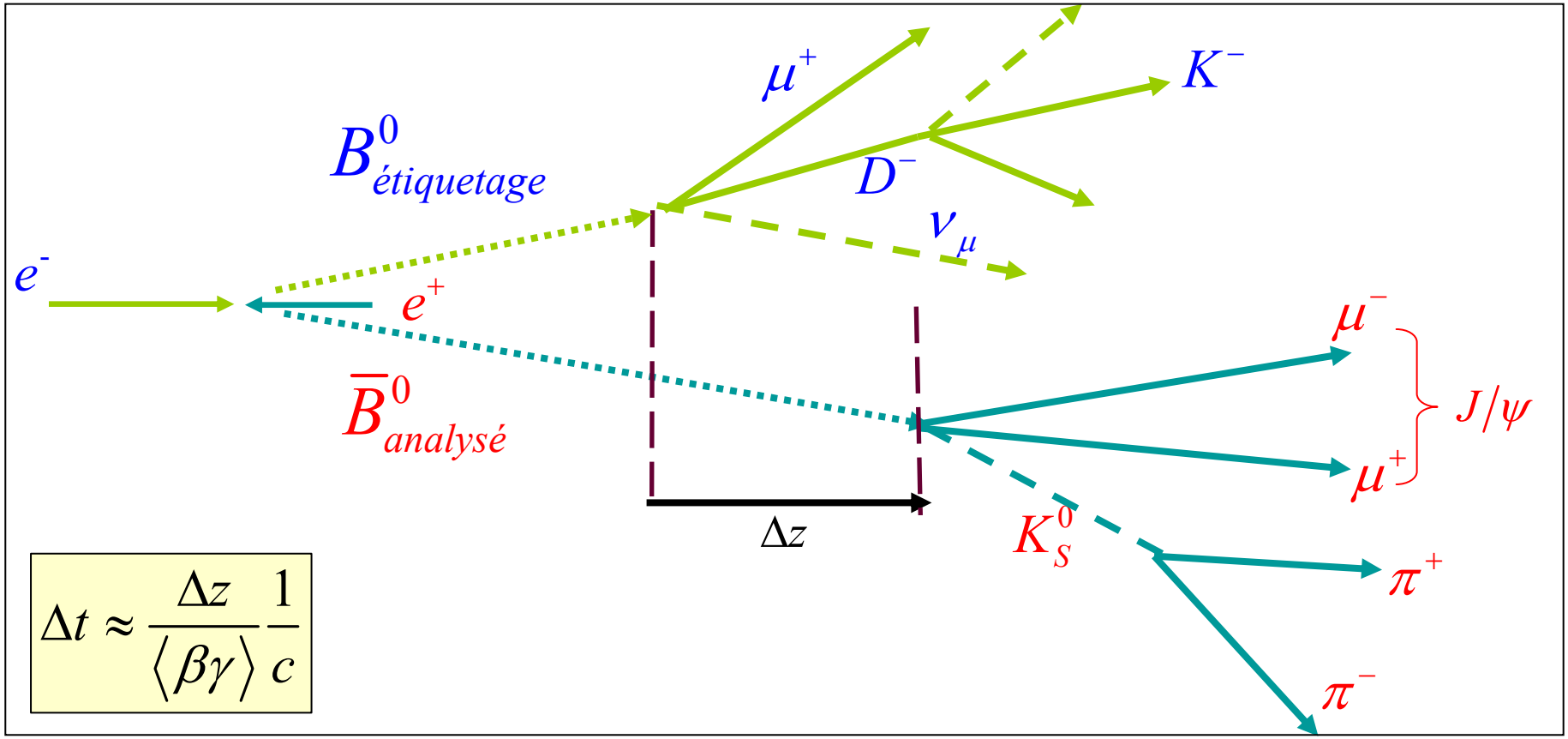
$$\Gamma_L = \Gamma_S = \Gamma \Rightarrow$$

$$d_t\Gamma\left(B(\Delta t) \to f_2\right) = \exp(-\Gamma\,\Delta t)\left|A_{f2}\right|^2 \left\{\left(1 + \left|\lambda_{f2}\right|^2\right) + \left(1 - \left|\lambda_{f2}\right|^2\right)\cos(\Delta M\,\Delta t) - 2\Im m\left(\lambda_{f2}\right)\sin(\Delta M\,\Delta t)\right\}$$

f_1 choisi tel que $\overline{K}^0 \not\to f_1 \Rightarrow A_{f1} = 1$ et $\overline{A}_{f1} = 0$

$$d_t\Gamma\left(\overline{B}(\Delta t) \to f_2\right) = \exp(-\Gamma\,\Delta t)\left|\overline{A}_{f2}\right|^2 \left\{\left(1 + \left|\lambda_{f2}\right|^2\right) - \left(1 - \left|\lambda_{f2}\right|^2\right)\cos(\Delta M\,\Delta t) + 2\Im m\left(\lambda_{f2}\right)\sin(\Delta M\,\Delta t)\right\}$$

Étiquetage et état final propre de CP "en or" : $CP\left|J/\psi\ K_S^0\right\rangle = -1\left|J/\psi\ K_S^0\right\rangle$



$$\Delta t \approx \frac{\Delta z}{\langle \beta\gamma \rangle}\frac{1}{c}$$

$$B^0_{étiquetage} \to D^-\mu^+\nu_\mu\ (5\%)$$
$$\searrow K^- + X\ \ (27\%)$$

$$\overline{B}^0_{analysé} \to J/\psi\ K_S^0\ (0.85\%)$$
$$\searrow \quad \searrow \pi^+\pi^-\ (69\%)$$
$$\searrow\ \mu^+\mu^-\ (6\%)$$

Signal de violation directe et d'interférence

$B^0 - \bar{B}^0$

$f_{CP} = J/\psi\, K_S^0$

$$f_{CP} = J/\psi\, K_S^0 \quad CP\left|J/\psi\, K_S^0\right\rangle = -1\left|J/\psi\, K_S^0\right\rangle$$

$$d_t\Gamma\left(B(t)\to f_{CP}\right) = \exp(-\Gamma t)\left|A_{fCP}\right|^2\left\{\left(1+\left|\lambda_{fCP}\right|^2\right)+\left(1-\left|\lambda_{fCP}\right|^2\right)\cos(\Delta M\, t)-2\Im m\left(\lambda_{fCP}\right)\sin(\Delta M\, t)\right\}$$

$$d_t\Gamma\left(\bar{B}(t)\to f_{CP}\right) = \exp(-\Gamma t)\left|A_{fCP}\right|^2\left\{\left(1+\left|\lambda_{fCP}\right|^2\right)-\left(1-\left|\lambda_{fCP}\right|^2\right)\cos(\Delta M\, t)+2\Im m\left(\lambda_{fCP}\right)\sin(\Delta M\, t)\right\}$$

$$\mathcal{A}_{fCP}(t) = \frac{d_t\Gamma\left(B(t)\to f_{CP}\right)-d\Gamma\left(\bar{B}(t)\to f_{CP}\right)}{d_t\Gamma\left(B(t)\to f_{CP}\right)+d\Gamma\left(\bar{B}(t)\to f_{CP}\right)}$$

$$\mathcal{A}_{fCP}(t) = C_{fCP}\cos(\Delta M\, t)+S_{fCP}\sin(\Delta M\, t)$$

$$C_{fCP} = \frac{1-|\lambda_{fCP}|^2}{1+|\lambda_{fCP}|^2}$$ violation directe

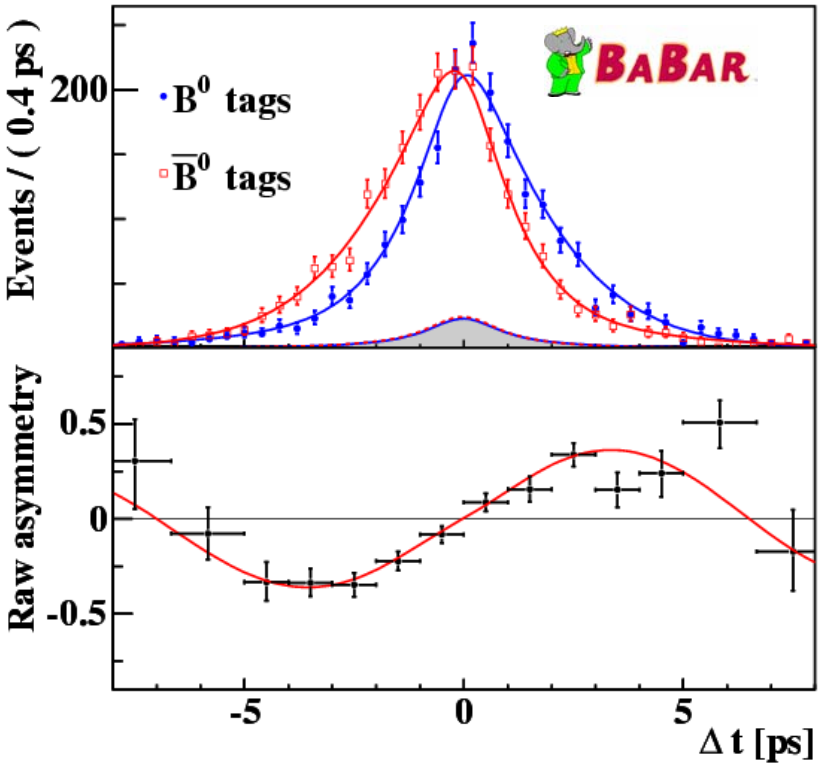
$$\lambda_{fCP} = \frac{q\,\bar{A}_{fCP}}{p\,A_{fCP}}$$

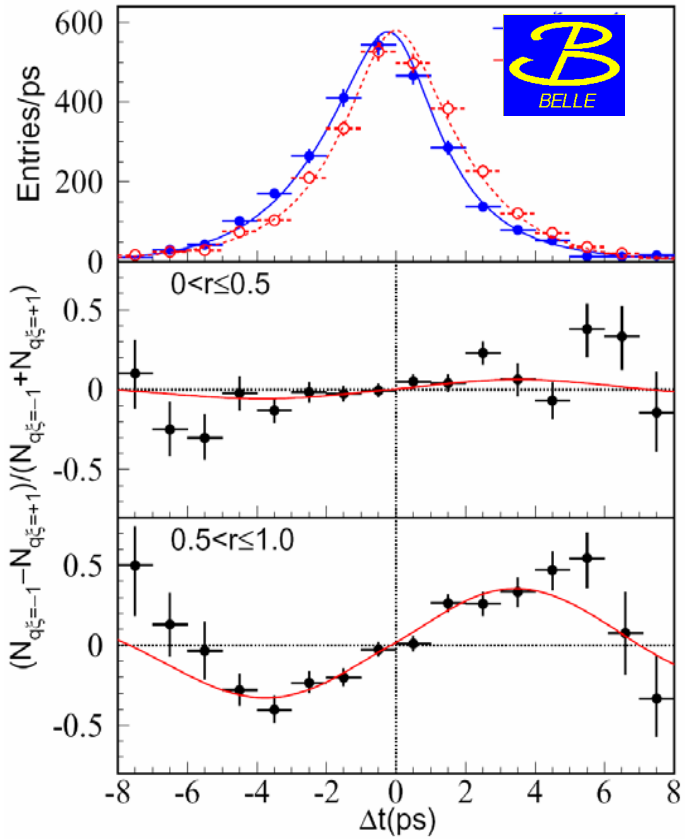
$$S_{fCP} = \frac{-2\,\mathrm{Im}\,\lambda_{fCP}}{1+|\lambda_{fCP}|^2}$$ interférence

Violation de CP par interférence

$B^0 - \overline{B}^0$

$f_{CP} = J/\psi\, K_S^0$





227M paires BB

7730 événements étiquetés pour CP

152M paires BB

4347 événements étiquetés pour CP

Limite sur la violation de CP directe

$$\left|\lambda_{fCP}\right| = \left|\overline{A}/A\right| = 0.950 \pm 0.031 \pm 0.013 \qquad \left|\lambda_{fCP}\right| = \left|\overline{A}/A\right| = 1.007 \pm 0.041 \pm 0.033$$