Violation de CP et oscillation des mésons K neutres

Patricio Ceniceros Montero

23 Novembre 2010

Sommaire

- Présentation
- Opérateurs et propriétés des K°
- Violation de CP dans le système K°-$K^{\circ *}$
- Variation du temps de vie
- Impression et remerciements
- Conclusion

Présentation du stage

- Dates: Juin-Juillet 2010
- Lieu: LPC Clermont Ferrand
- Sujet/ objectif: « Découverte de la violation de CP et l'oscillation de mésons K neutres »
- Références:
  - J.Steinberger « K° decay and CP violation »
  - « The Feynman lectures of physics vol.III »
  - Cours de Marc Thomson

Introduction

- Découverte: 1964 par Christenson, Cronin, Fitch et Turlay.
- Violation de façon très subtile au niveau de la nature.
- Phénomène a été observé pour la 1e fois dans l'oscillation des K°-K°*.

Le méson K neutre et ses désintégrations

- Composition: $K^\circ = d\bar{s}$; $\bar{K}^\circ = \bar{d}s$
- Masse (en Mev/c²): 497,7
- Désintégration en deux pions: $K^\circ \rightarrow \pi^\circ\pi^\circ$ ou $K^\circ \rightarrow \pi^+\pi^-$
- Désintégration en trois pions: $K^\circ \rightarrow \pi^\circ\pi^\circ\pi^\circ$ ou $K^\circ \rightarrow \pi^\circ\pi^+\pi^-$

Opérateurs C, P, CP et états propres de CP

- L'opérateur C: Change une charge dans son opposée et vise versa.

$$C|K^\circ\rangle = C|d\bar{s}\rangle = |s\bar{d}\rangle = |\bar{K}^\circ\rangle$$

- L'opérateur P: Inverse les coordonnées d'espace. la parité est liée au moment cinétique orbital par: P = (-1)^(L+1). Ici L= 0.

$$P|K^\circ\rangle = -|K^\circ\rangle \qquad P|\bar{K}^\circ\rangle = -|\bar{K}^\circ\rangle$$

- L'opérateur CP: a comme valeurs propres 1 et -1. {|K∘> - |K∘>} ne le sont pas:

$$CP|K^\circ\rangle = -|\bar{K}^\circ\rangle \qquad CP|\bar{K}^\circ\rangle = -|K^\circ\rangle$$

ETATS PROPRES DE CP ET DÉSINTÉGRATIONS

- Etats correspondant aux valeurs propres de CP

➢ λ = 1: $|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^\circ\rangle - |\bar{K}^\circ\rangle)$ λ = -1 : $|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^\circ\rangle + |\bar{K}^\circ\rangle)$

- Désintégrations correspondant aux deux états propres de CP:

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

- Conséquence:

➢ Si λ = 1, alors les K1 se désintégreront uniquement sous la forme:

$K^\circ \rightarrow \pi^\circ\pi^\circ$ ou $K^\circ \rightarrow \pi^+\pi^-$

➢ Si λ = -1, alors seulement les K2 se désintégreront uniquement sous la forme:

$K^\circ \rightarrow \pi^\circ\pi^\circ\pi^\circ$ ou $K^\circ \rightarrow \pi^\circ\pi^+\pi^-$

Matrice décrivant l'évolution des mésons K neutres

- Dans le cas de deux pions: $K^\circ \rightleftharpoons \pi^+\pi^- \rightleftharpoons \bar{K}^\circ$
- S'exprime de deux façons différentes:

$$A = \langle \bar{K}^\circ | T_w | K^\circ \rangle = \langle K^\circ | T_w | \bar{K}^\circ \rangle \qquad B = \langle \bar{K}^\circ | T_w | \bar{K}^\circ \rangle = \langle K^\circ | T_w | K^\circ \rangle$$

- Matrice de transition: doit tenir compte de ces deux amplitudes dans la désintégration. Dans la base {|K∘>; |K∘*>}:

$$T_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}[(E_1+E_2) - \frac{i\hbar}{2}(\Gamma_1+\Gamma_2)] & \frac{1}{2}[(E_1-E_2) - \frac{i\hbar}{2}(\Gamma_1-\Gamma_2)] \\ \frac{1}{2}[(E_1-E_2) - \frac{i\hbar}{2}(\Gamma_1-\Gamma_2)] & \frac{1}{2}[(E_1+E_2) - \frac{i\hbar}{2}(\Gamma_1+\Gamma_2)] \end{bmatrix}$$

Les termes diagonaux sont égaux à A, les non diagonaux à B.

ÉTATS PROPRES ET ÉVOLUTION AU COURS DU TEMPS

- valeurs propres de la matrice de transition:

$$\lambda_1 = E_1 - i\hbar\frac{\Gamma_1}{2} \qquad \lambda_2 = E_2 - i\hbar\frac{\Gamma_2}{2}$$

- Vecteurs propres:

$$|K_s\rangle = |K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^\circ\rangle + |\bar{K}^\circ\rangle) \qquad |K_l\rangle = |K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^\circ\rangle - |\bar{K}^\circ\rangle)$$

- Equation de Schrödinger dans la nouvelle base propre:

$$i\hbar\frac{dC_1}{dt} = (E_1 - \frac{i\hbar\Gamma_1}{2})C_1 \qquad i\hbar\frac{dC_2}{dt} = (E_2 - \frac{i\hbar\Gamma_2}{2})C_2$$

Avec: C1= <K1 | ψ> ⇔ $C_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(C_+ + C_-)$

C2= <K2 | ψ> ⇔ $C_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(C_+ - C_-)$

Solutions et évolution dans le temps

- Solutions:

$$C_1(t) = C_1(0)\exp -i\left(\frac{E_1}{\hbar} - i\frac{\Gamma_1}{2}\right)t \qquad C_2(t) = C_2(0)\exp -i\left(\frac{E_2}{\hbar} - i\frac{\Gamma_2}{2}\right)t$$

- Interprétation:
- Probabilité de trouver un méson K dans l'état |Ks>

$$e^{-\Gamma_1 t}$$

- Probabilité de trouver un méson K dans l'état |Kl>:

$$e^{-\Gamma_2 t}$$

- $\Gamma 1$ = inverse de la durée de vie de K1 = $8{,}953 \pm 0{,}005.10^{-11}$s
- $\Gamma 2$ = inverse de la durée de vie de K2 = $5{,}116 \pm 0{,}020.10^{-8}$s

- Les durées de vie sont très différentes, $\tau 2 = 600.\ \tau 1$

RETOUR DANS LA BASE DES |K∘>-|K∘*>

- Dans la base {|K∘> - |K∘>}:

$$C_- = \frac{1}{\sqrt{2}}(C_1 - C_2) = \frac{1}{2}\left(e^{\frac{-iE_1t}{\hbar}} \cdot e^{-\frac{\Gamma_1 t}{2}} - e^{\frac{-iE_2t}{\hbar}} \cdot e^{-\frac{\Gamma_2 t}{2}}\right)$$

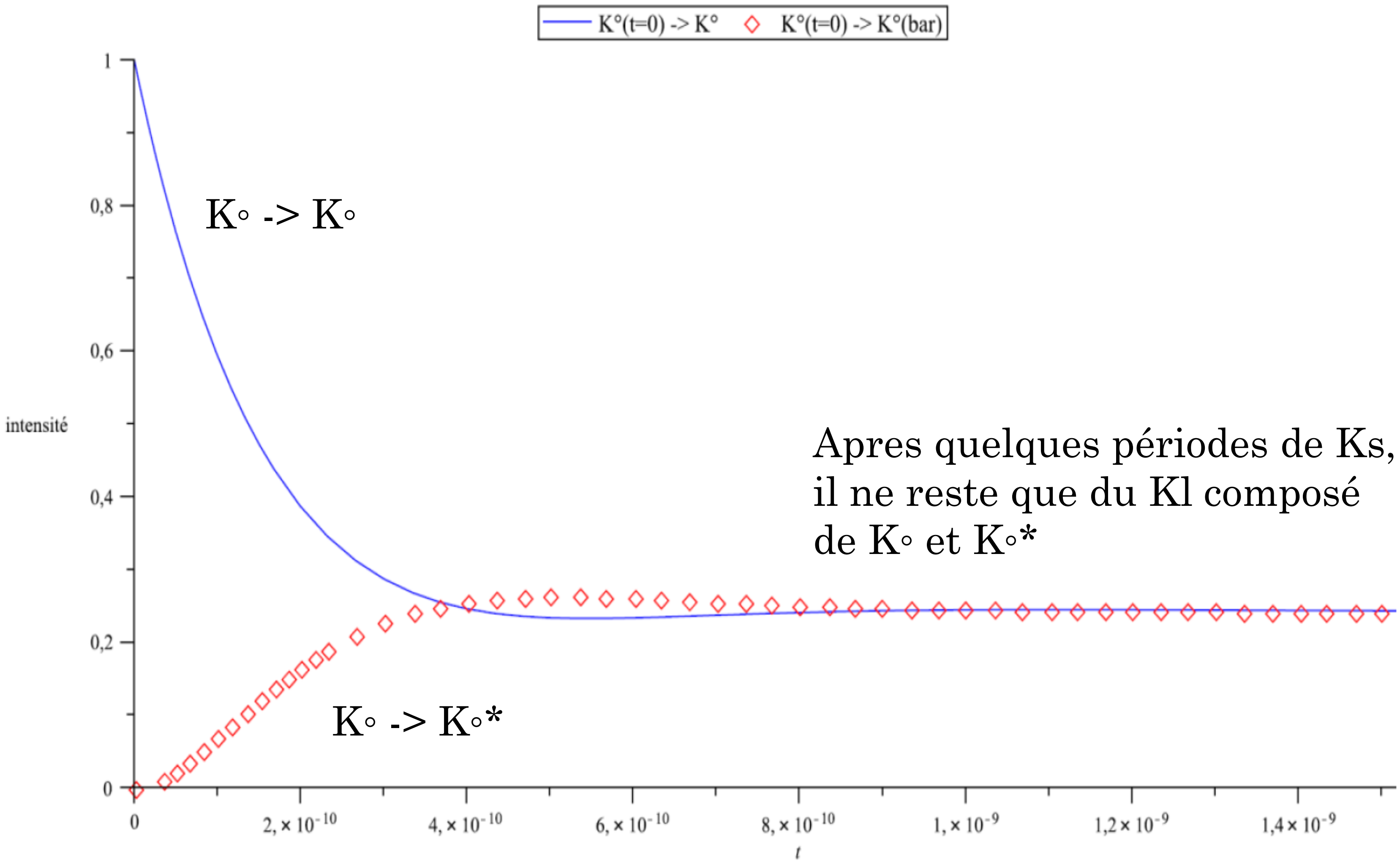
- Probabilité pour qu'un K ∘ se transforme en un K∘*:

$$|C_-|^2 = \frac{1}{4}(C_1 - C_2)^2 = \frac{1}{4}\left(e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} - 2e^{\frac{-(\Gamma_1+\Gamma_2)t}{2}} \cos\frac{\Delta E t}{\hbar}\right)$$

- Probabilité pour qu'un K∘ reste sous forme d'un K∘:

$$|C_+|^2 = \frac{1}{4}(C_1 - C_2)^2 = \frac{1}{4}(e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} + 2e^{\frac{-(\Gamma_1+\Gamma_2)t}{2}} \cos\frac{\Delta E t}{\hbar})$$

Graphique montrant évolution temporelle



Idée de la violation de CP, introduction de nouveaux états

- Expérimentalement: |K1>, |K2> différents de |Ks> et |Kl>

- Introduction de deux nouveaux états:

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

- Є = paramètre mesurant la violation de CP. C'est un nombre complexe.

$$|\epsilon| = 2,2 \cdot 10^{-3}$$

- Dans la base {|K◦ >-|K◦*>}:

$$|K_s\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1+\epsilon^2)}}((1+\epsilon)|K^\circ\rangle + (1-\epsilon)|\bar{K}^\circ\rangle) \qquad |K_l\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1+\epsilon^2)}}((1+\epsilon)|K^\circ\rangle - (1-\epsilon)|\bar{K}^\circ\rangle)$$

- Orthogonalité des nouveaux états:

$$\langle K_l|K_s\rangle = 2\epsilon$$

Matrice de transition et ses valeurs propres

- Modification des coefficients non diagonaux de la matrice de transition.
- Dans la base {|K∘> - |K∘*>}:

$$T_w = \begin{bmatrix} M - \frac{i\hbar}{2}\Gamma & M_{12} - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12} \\ M_{12}^* - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}^* & M - \frac{i\hbar}{2}\Gamma \end{bmatrix}$$

- Valeurs propres:

$$\lambda_1 = M - \frac{i\hbar}{2}\Gamma + \sqrt{\left(M_{12}^* - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}^*\right)\left(M_{12} - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}\right)}$$

et

$$\lambda_2 = M - \frac{i\hbar}{2}\Gamma - \sqrt{\left(M_{12}^* - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}^*\right)\left(M_{12} - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}\right)}$$

Equation de Schrödinger

- Etat |ψ> dans {|Ks> et |Kl>}:

$$|\psi\rangle = \frac{\sqrt{1+\alpha^2}}{2}\Big(\theta_l|K_l\rangle + \theta_s|K_s\rangle\Big)$$

- Avec: $\theta_l = C_+ + \frac{C_-}{\alpha}$ $\theta_s = C_+ - \frac{C_-}{\alpha}$ $\alpha = \frac{1-\epsilon}{1+\epsilon}$

- Après quelques calculs:

$$i\hbar\frac{d\theta_l}{dt} = \left(M_l - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_l\right)\theta_l \qquad i\hbar\frac{d\theta_s}{dt} = \left(M_s - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_s\right)\theta_s$$

- Avec:

$$M_l = M + \mathrm{Re}\sqrt{\left(M_{12}^* - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}^*\right)\left(M - \frac{i\hbar}{2}\Gamma\right)} \qquad \Gamma_l = \Gamma + 2\mathrm{Im}\sqrt{\left(M_{12}^* - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}^*\right)\left(M - \frac{i\hbar}{2}\Gamma\right)}$$

$$M_s = M - \mathrm{Re}\sqrt{\left(M_{12}^* - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}^*\right)\left(M - \frac{i\hbar}{2}\Gamma\right)} \qquad \Gamma_l = \Gamma + 2\mathrm{Im}\sqrt{\left(M_{12}^* - \frac{i\hbar}{2}\Gamma_{12}^*\right)\left(M - \frac{i\hbar}{2}\Gamma\right)}$$

Solutions

- A une constante près:

$$\theta_l(t) = \exp\left(-iM_l t + \frac{i\hbar}{2}\Gamma_l t\right) \qquad \theta_s(t) = \exp\left(-iM_s t + \frac{i\hbar}{2}\Gamma_s t\right)$$

- Etats possibles en fonction de |K1> et |K2>:

$$|\psi_2(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}(1-\epsilon)}(\theta_s(t) - \epsilon\theta_l(t))|K_1\rangle + (\theta_l(t) - \epsilon\theta_s(t))|K_2\rangle$$

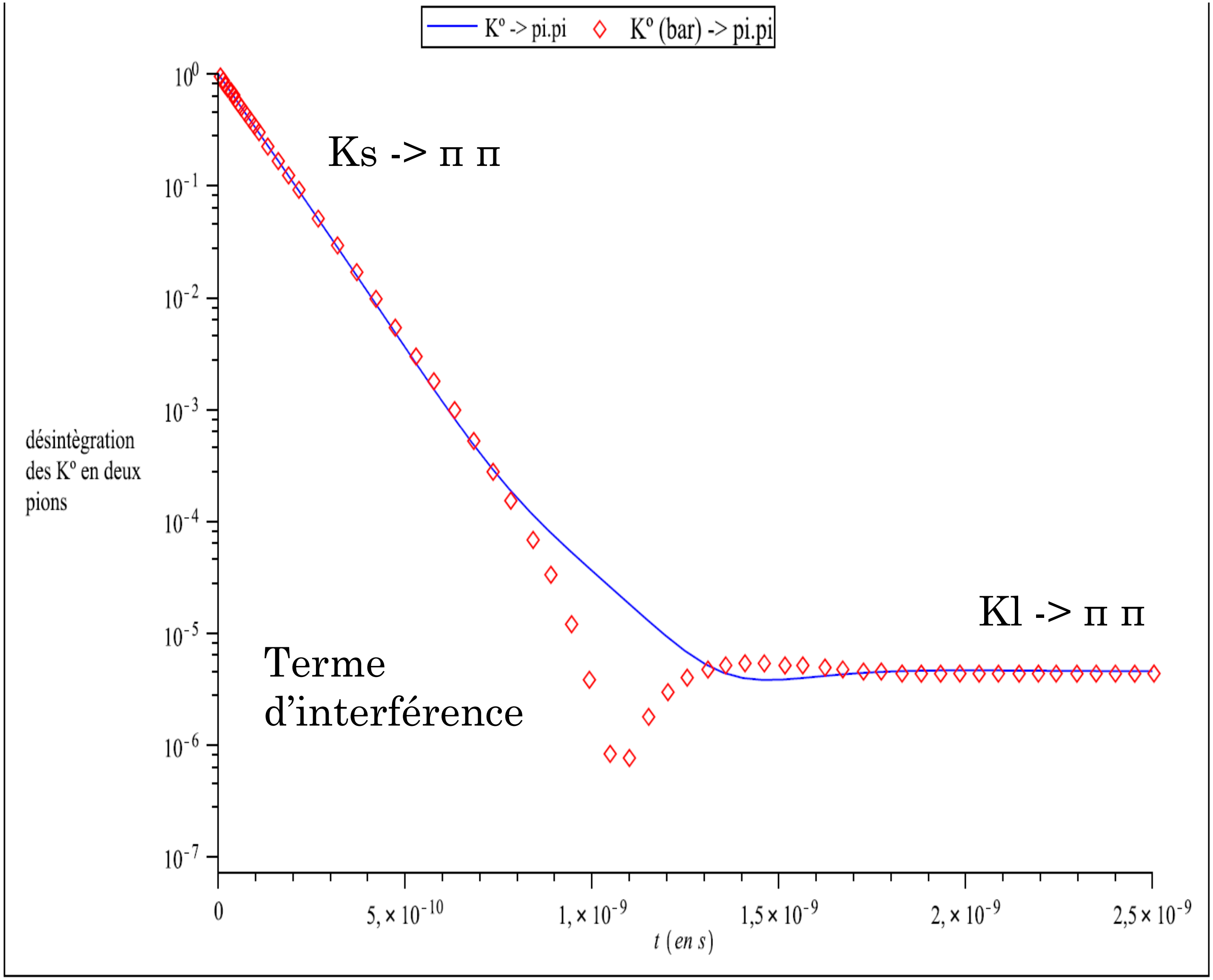
$$|\psi_1(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\epsilon)}(\theta_s(t) + \epsilon\theta_l(t))|K_1\rangle + (\theta_l(t) + \epsilon\theta_s(t))|K_2\rangle$$

- Evolution des mésons K:

Ex: P(K◦ → ππ)

$$|\langle K_1|\psi_1(t)\rangle|^2 = \left[\frac{1-2Re(\epsilon)}{2}\right]\left[\theta_s(t)^2 + |\epsilon|^2\theta_l(t)^2 + 2Re(\theta_s(t)\cdot\theta_l(t)^*)\right]$$

Graphique



K° -> pi.pi
K° (bar) -> pi.pi
Ks -> π π
Kl -> π π
Terme d'interférence
désintègration des K° en deux pions
t (en s)

Variation du temps de vie et régénération des |K∘> et |K∘*>

- Idée: régénérer Ks à partir d'un faisceau ne contenant que des Kl

- Variation infinitésimale d'un état:

$$d\psi = \frac{2i\pi N f(0) dx}{p} e^{ipx}$$ avec:

$N =$ densité de noyaux

$f(\theta) =$ amplitude de dispersion

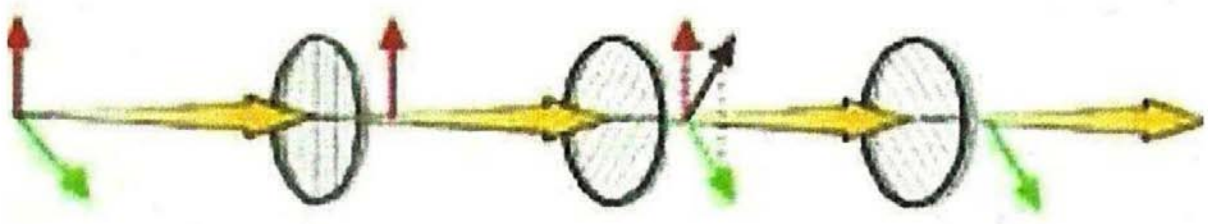
$p =$ moment des mésons K

$\rho =$ rayon de l'anneau hypothétique par lequel passe la matière

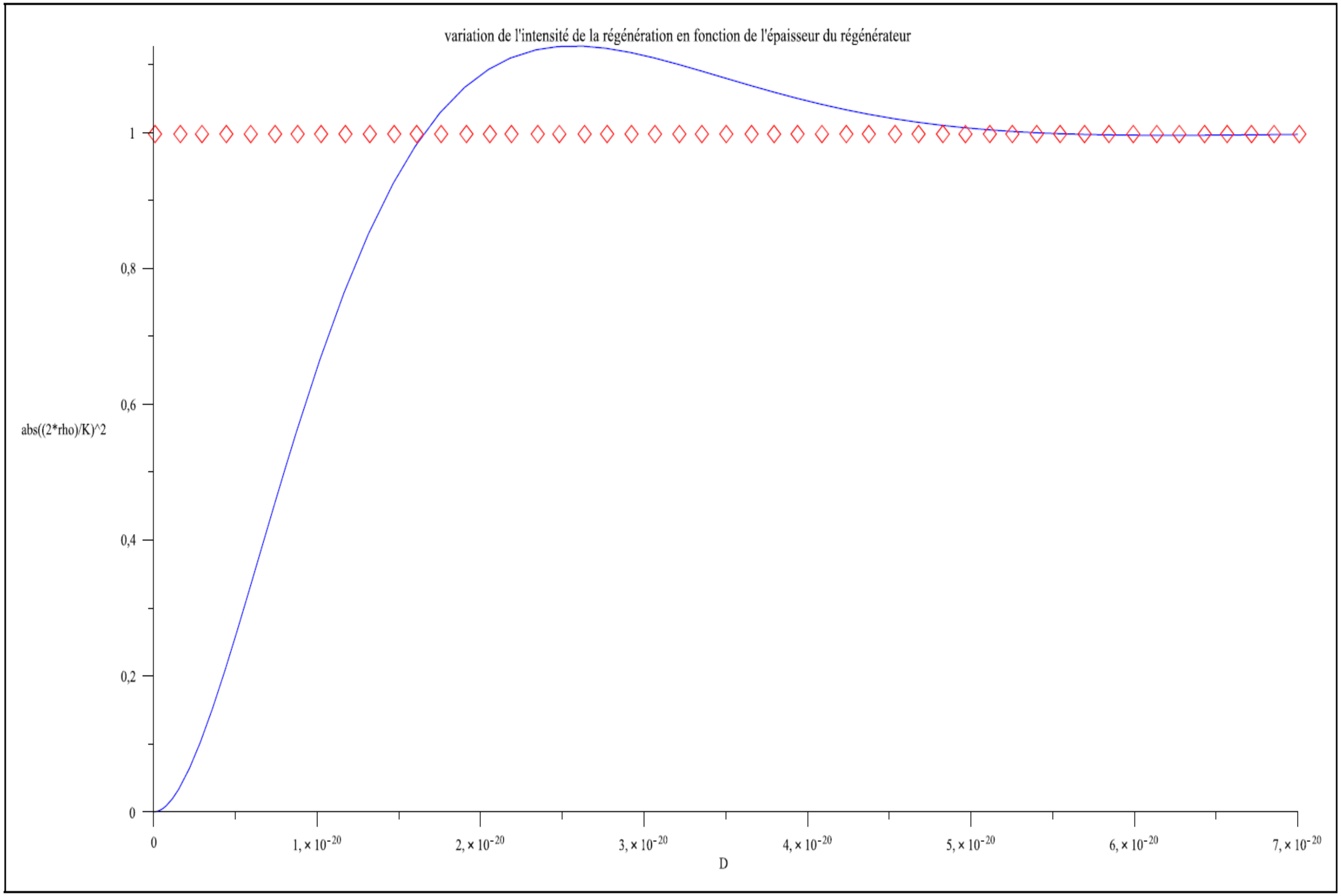
- Prise en compte dans l'équation de Schrödinger pour avoir taux de régénération:

$$\rho = -\frac{K}{2}\left(1 - e^{\frac{im\Delta MD}{p}}\right)$$

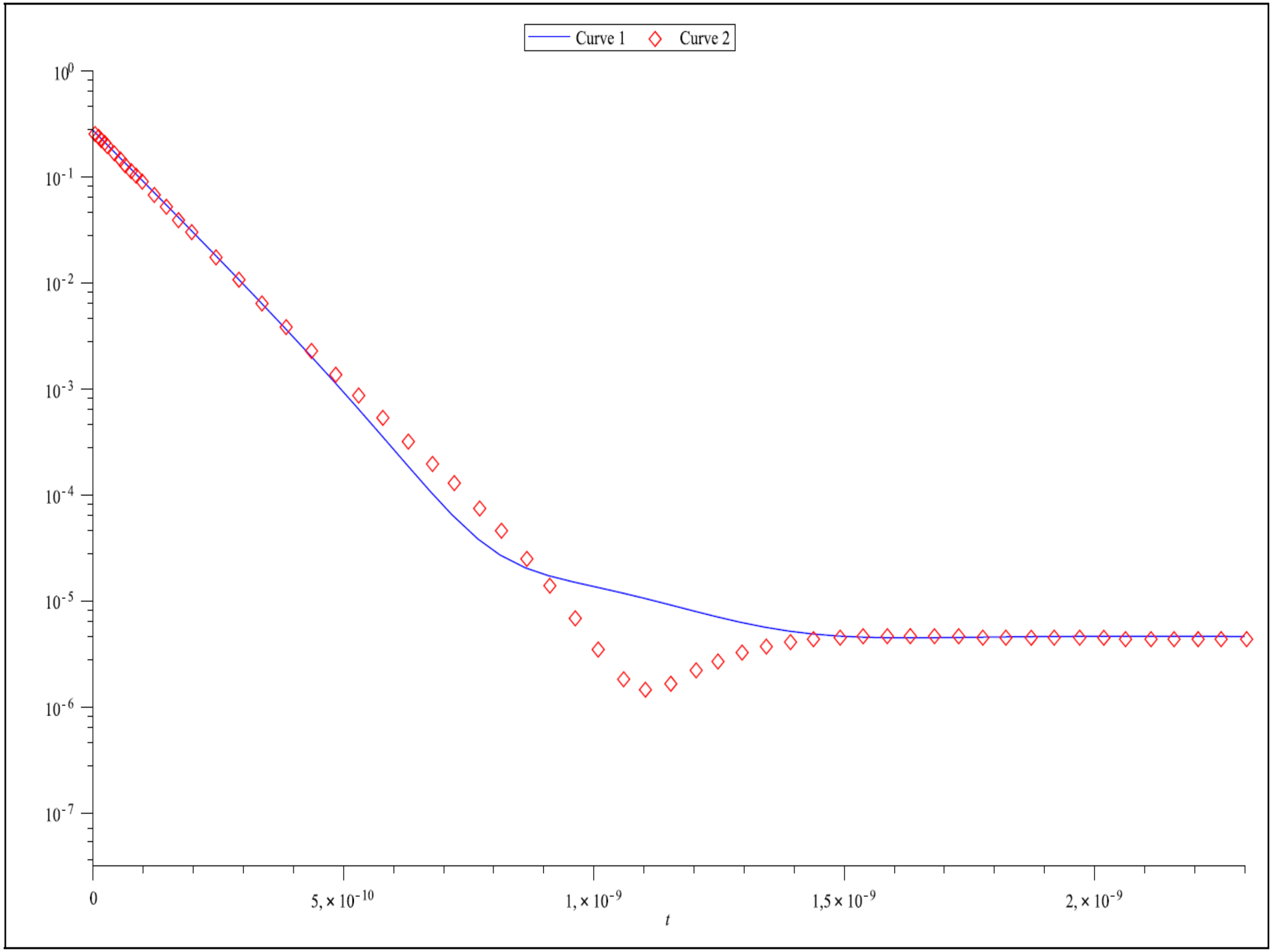
Analogie avec les ondes électromagnétiques



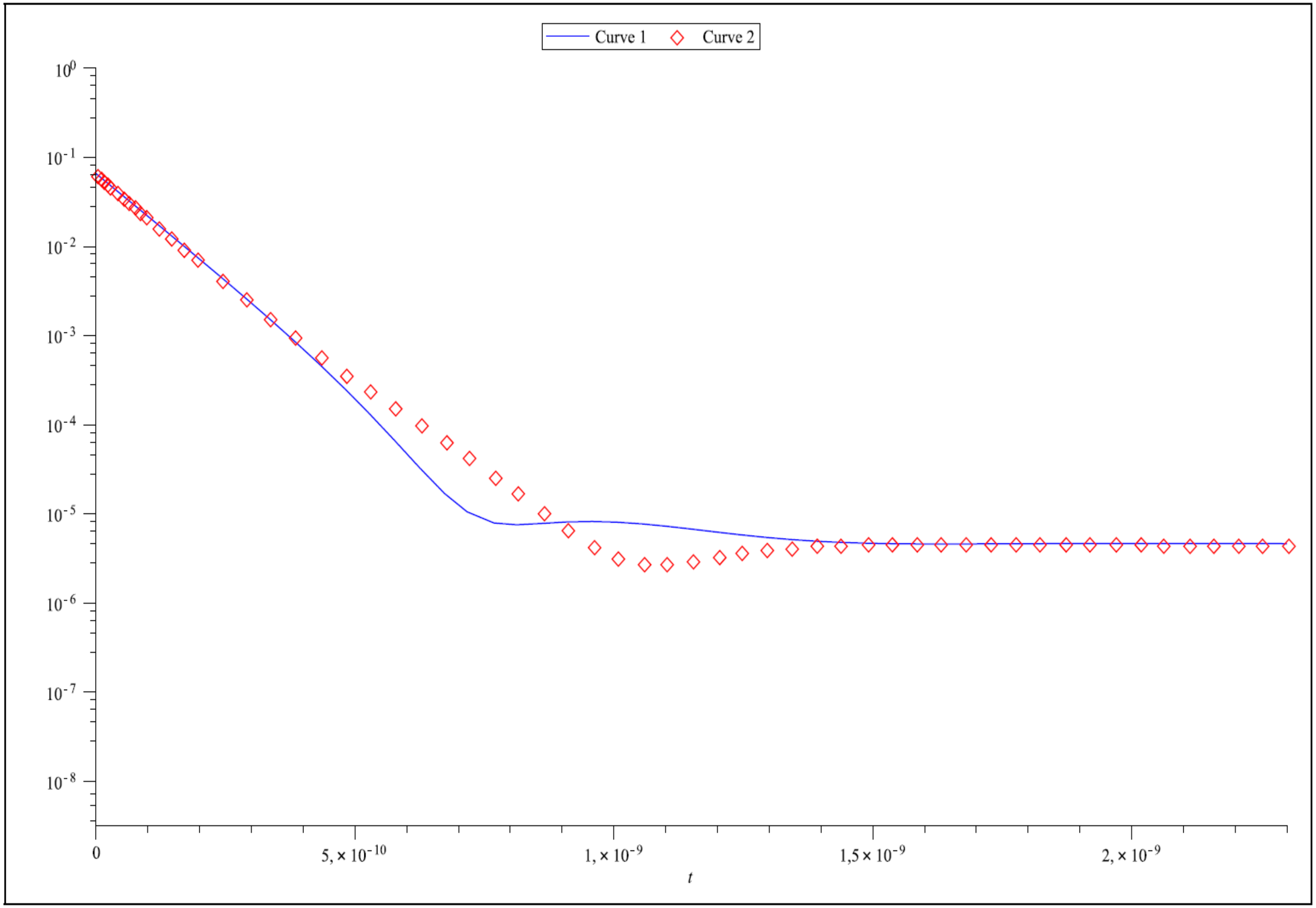
VARIATION DU TAUX DE RÉGÉNÉRATION



APPLICATION



Encore une autre application



Impression et remerciements

- Aspect humain: Possibilité de travailler avec des personnes ayant des visions différentes des choses.

- Aspect théorique: Ouverture sur une problématique récente.

- Aspect personnel :Confrontation à une nouvelle méthode de travail, grande leçon d'humilité.

- Remerciements: Jean Orloff, Vincent Morénas, Helene Fonvieille, Ziad Ajaltouni.

CONCLUSION

- Phénomène a été observé dans l'oscillation des B°-$B^{\circ *}$
- Existence d'autres modèles théoriques (ex: analyse d'isospin, modèle super faible)
- Application possible: Répondre pourquoi la matière l'a emporté sur l'antimatière lors de l'expansion de l'univers

Merci de votre attention