# ESTRUCTURA DE LA MATERIA 4

CURSO DE VERANO 2021

## CLASE 17

RODOLFO SASSOT

# CLASE 17: Neutrinos, CP

Temas: masas de neutrinos, el problema de los neutrinos solares, oscilaciones, CP

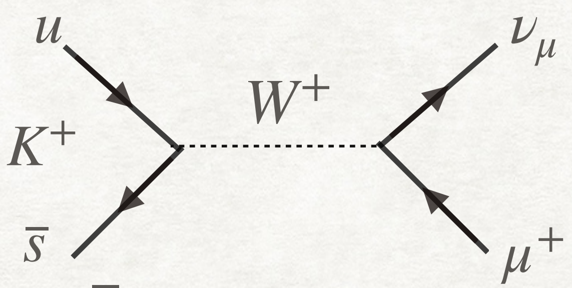
mecanismo de ruptura espontánea genera masas para quarks físicos

(y no para los autoestados débiles $d', s', b'$)

de la clase 14

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

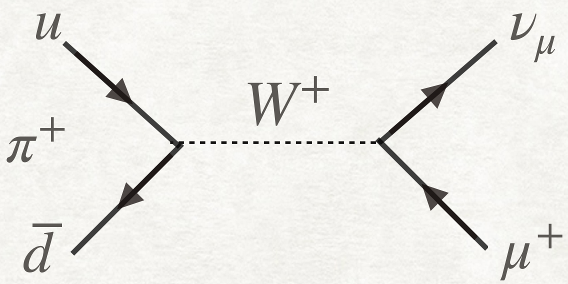
$\sim \sin\theta_c$



$\bar{s} = \underline{\bar{d}' \sin\theta_c} + \bar{s}' \cos\theta_c$

$\ll$

$\sim \cos\theta_c$



$\bar{d} = \underline{\bar{d}' \cos\theta_c} - \bar{s}' \sin\theta_c$

Cabibbo Kobayashi Maskawa

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix} \qquad \begin{cases} d' \equiv d\cos\theta_c + s\sin\theta_c \\ s' \equiv -\, d\sin\theta_c + s\cos\theta_c \end{cases} \qquad \begin{cases} d \equiv d'\cos\theta_c - s'\sin\theta_c \\ s \equiv d'\sin\theta_c + s'\cos\theta_c \end{cases}$$

$\theta_c \simeq 13^o$

$\sin^2\theta_c \simeq 0.05$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{dd} & U_{ds} & U_{db} \\ U_{sd} & U_{ss} & U_{sb} \\ U_{bd} & U_{bs} & U_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$m_d = 4.7\ ^{+0.5}_{-0.3}\, MeV$

$m_s = 95\ ^{+9}_{-6}\, MeV$

$m_b = 4180\ ^{+40}_{-30}\, MeV$

$(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)_L$ son autoestados débiles, qué pasa si se generaran masas a $(\nu_1, \nu_2, \nu_2)$?

# CLASE 17: Neutrinos, CP

$(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)_L$ son autoestados débiles, qué pasa si se generaran masas a $(\nu_1, \nu_2, \nu_2)$?

$\Longrightarrow$ consecuencias medibles: $\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix}$ interacción con $h$

oscilaciones cuánticas $|\Psi(t) > = e^{-i/\hbar E_1 t} |\phi_1 > + e^{-i/\hbar E_2 t} |\phi_2 > + \ldots$

(R. Davies M. Koshiba Nobel 2002, A. McDonald T. Kajita 2015)

# CLASE 17: Neutrinos, CP

## el problema de los neutrinos solares (~1968)

$$4p \longrightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu_e \qquad \phi_{\nu_e} \sim 10^{11}\,\frac{\nu_e}{cm^2\,s}$$

1964 R. Davies, J. Bahcall

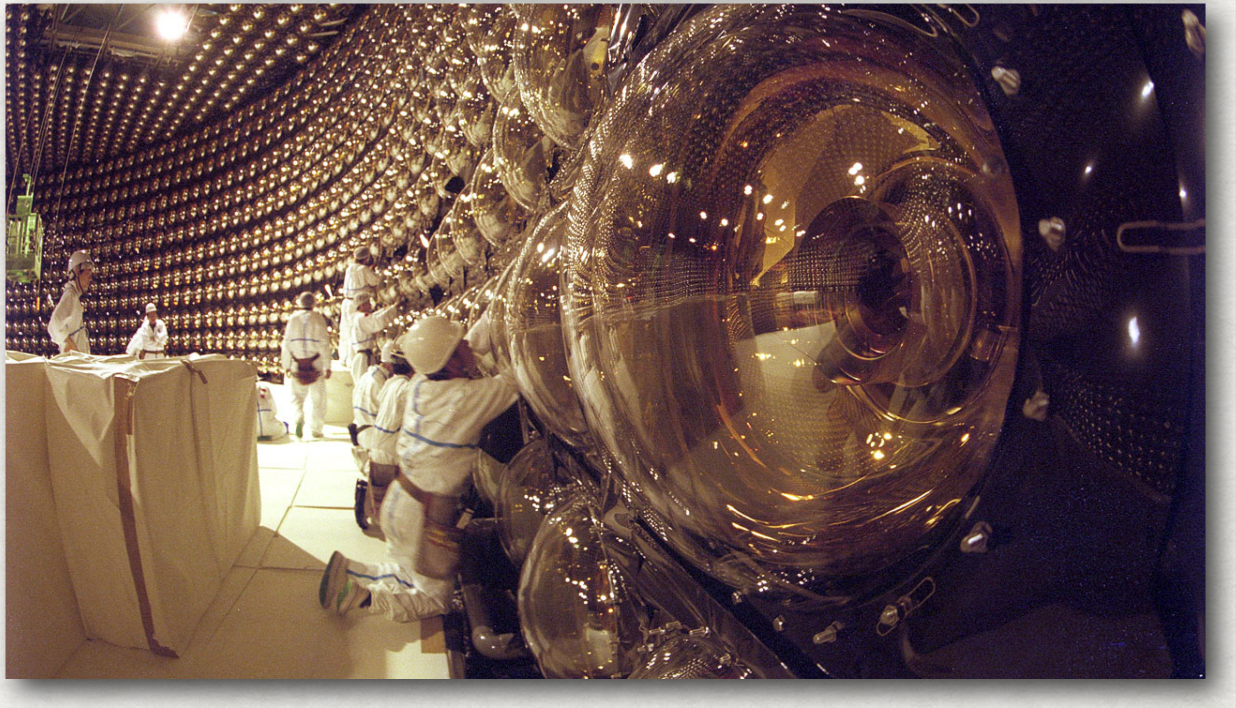
40.000 l $^{37}$Cl

$$\nu_e + {}^{37}Cl \longrightarrow {}^{37}Ar + e^-$$

1968 $\sim 1/3$ 'deficit'

1989 Kamiokande

3.000.000 l $H_2O$



# CLASE 17: Neutrinos, CP

## el problema de los neutrinos solares (~1968)

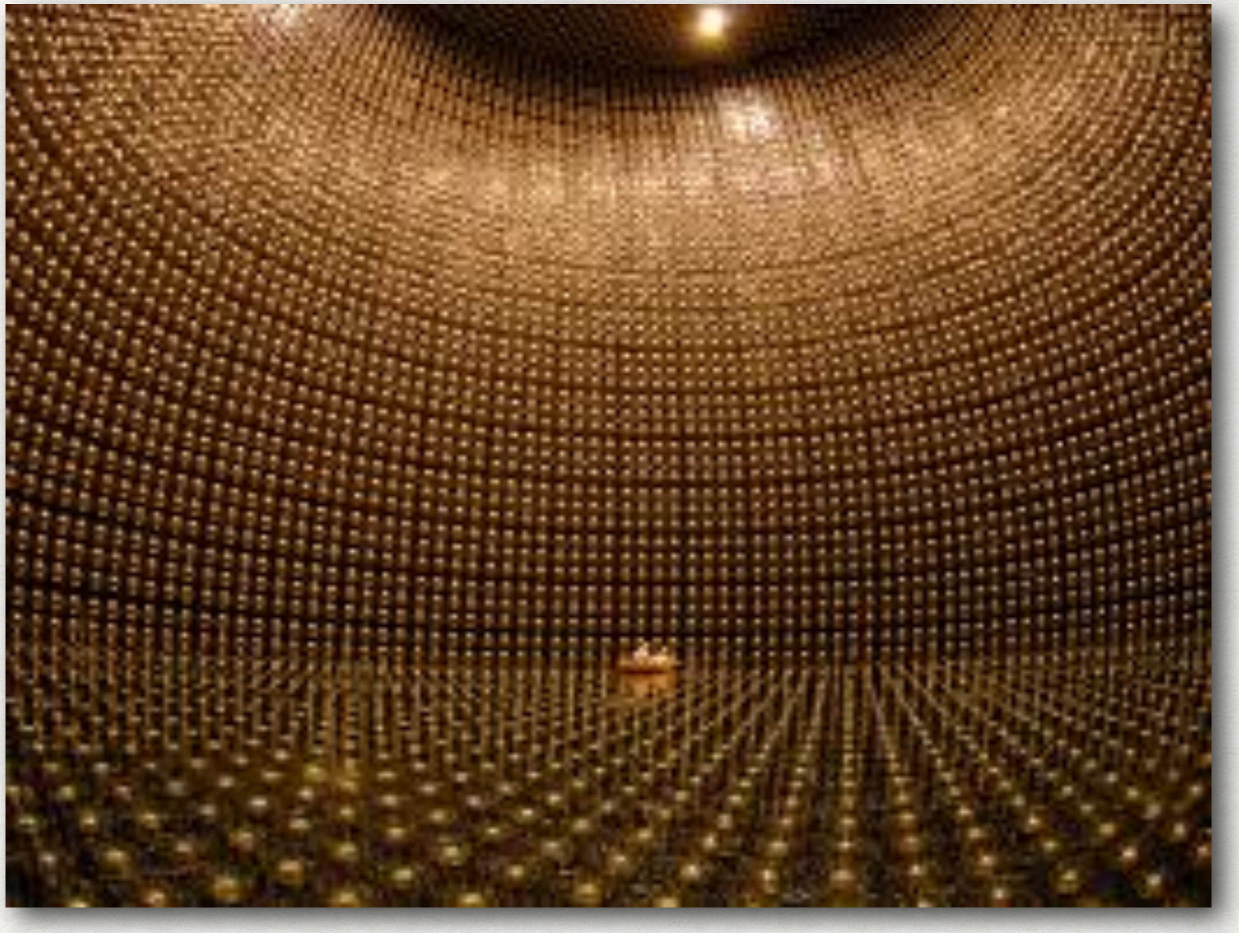
$$4p \longrightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu_e \qquad \phi_{\nu_e} \sim 10^{11} \frac{\nu_e}{cm^2\, s}$$

1964 R. Davies, J. Bahcall

40.000 l $^{37}$Cl

$$\nu_e + {}^{37}Cl \longrightarrow {}^{37}Ar + e^-$$

1968 $\sim 1/3$ 'deficit'



1989 Kamiokande

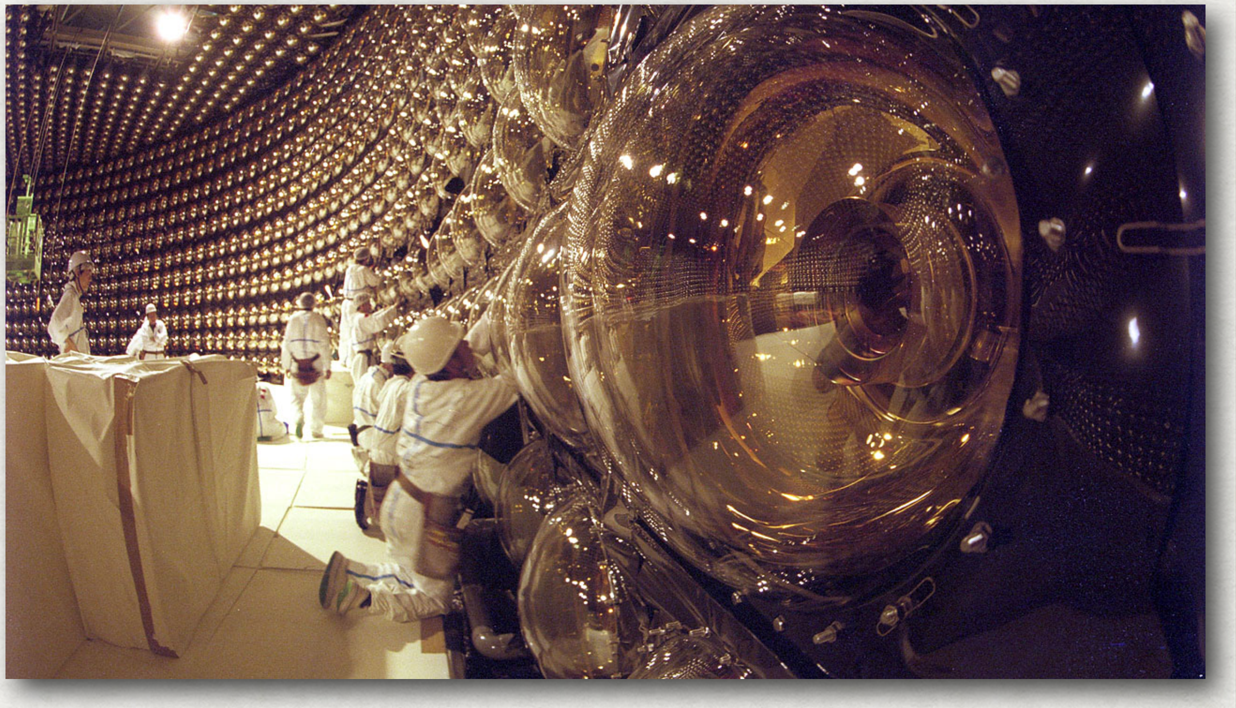
3.000.000 l $H_2O$

1996 Super-Kamiokande

50.000.000 l $H_2O$

2001 Subdury

1.000.000 l $D_2O$ 'esquizofrenia'



# CLASE 17: Neutrinos, CP

B. Pontecorvo (1957)

## oscilaciones de neutrinos:

$$\begin{pmatrix}\nu_\mu \\ \nu_e\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\nu_1 \\ \nu_2\end{pmatrix}$$

$$\begin{cases}\nu_\mu = \nu_1\cos\theta + \nu_2\sin\theta \\ \nu_e = -\,\nu_1\sin\theta + \nu_2\cos\theta\end{cases} \qquad \begin{cases}\nu_1 = \nu_\mu\cos\theta - \nu_e\sin\theta \\ \nu_2 = \nu_\mu\sin\theta + \nu_e\cos\theta\end{cases} \qquad \begin{array}{l}\underline{\nu_1(t) = \nu_1(0)\,e^{-iE_1t}} \\ \nu_2(t) = \nu_2(0)\,e^{-iE_2t}\end{array}$$

si se generan con $p$ fijo $\qquad E_i \simeq p + \dfrac{m_i^2}{2p} \qquad (E_i \gg m_i)$

si a $t = 0 \quad \nu_\mu(0) = 1 \qquad \underline{\nu_1(0) = \nu_\mu(0)\cos\theta} \qquad \nu_2(0) = \nu_\mu(0)\sin\theta$

$$\nu_\mu(t) = \underline{\nu_1(t)}\,\cos\theta + \nu_2(t)\,\sin\theta \;\; = \nu_\mu(0)\,\cos^2\theta\,e^{-iE_1t} + \nu_\mu(0)\,\sin^2\theta\,e^{-iE_2t}$$

$$A_\mu = \frac{\nu_\mu(t)}{\nu_\mu(0)} = \cos^2\theta\,e^{-iE_1t} + \sin^2\theta\,e^{-iE_2t}$$

$$A_\mu A_\mu^* = 1 - \sin^2(2\theta)\,\sin^2\left(\frac{E_2 - E_1}{2}t\right)$$

# CLASE 17: Neutrinos, CP

B. Pontecorvo (1957)

## oscilaciones de neutrinos:

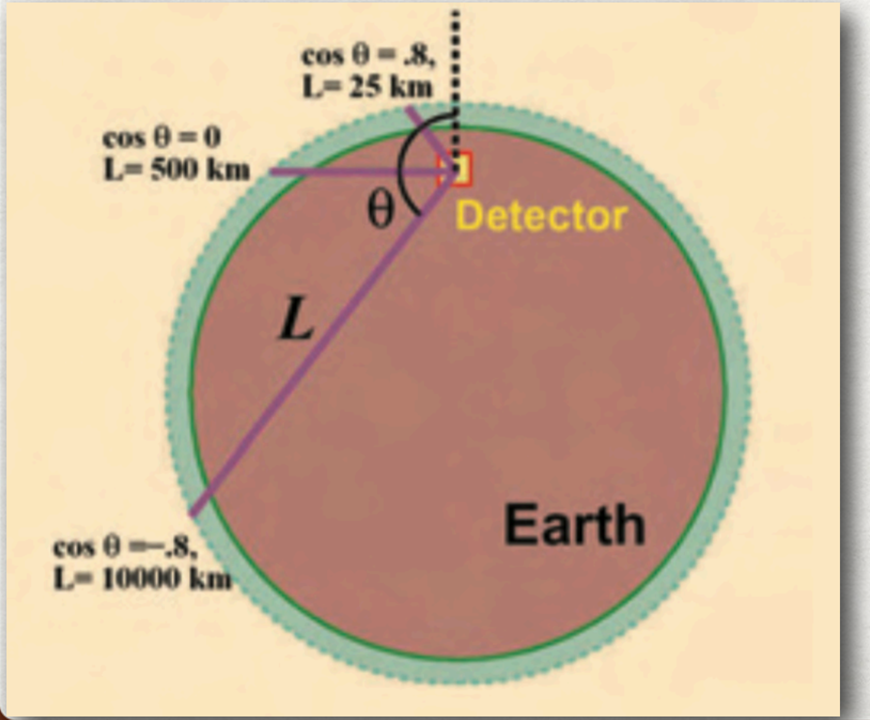
$$A_\mu A_\mu^* = 1 - \sin^2(2\theta)\ \sin^2\left(\frac{E_2 - E_1}{2}t\right)$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2 \simeq 2p(E_2 - p) - 2p(E_1 - p) \qquad E_i \simeq p + \frac{m_i^2}{2p}$$

$$\simeq 2p(E_2 - E_1)$$

$$P(\nu_\mu \to \nu_\mu) = A_\mu A_\mu^* = 1 - \sin^2(2\theta)\ \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4p}t\right) = 1 - \sin^2(2\theta)\ \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 c^4\, L}{4E\hbar c}\right)$$

$$E_i \gg m_i \quad v \simeq c \quad E \simeq p \quad t \simeq \frac{L}{c}$$



$$\Delta m_{12}^2 = 7.53 \pm 0.18\ 10^{-5}\, eV^2$$

$$\Delta m_{23}^2 = 2.546 \pm 0.034\ 10^{-3}\, eV^2$$

$$\theta_{12} \simeq 17.89^o$$

$$\theta_{23} \simeq 9.17^o$$

# CLASE 17: Neutrinos, CP

## oscilaciones de kaones: violación de CP

$$\Gamma(\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_L) \overbrace{\underbrace{\neq}_{\text{P}} \Gamma(\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_R) \underbrace{\neq}_{\text{C}}}^{\text{CP}} \Gamma(\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_R)$$

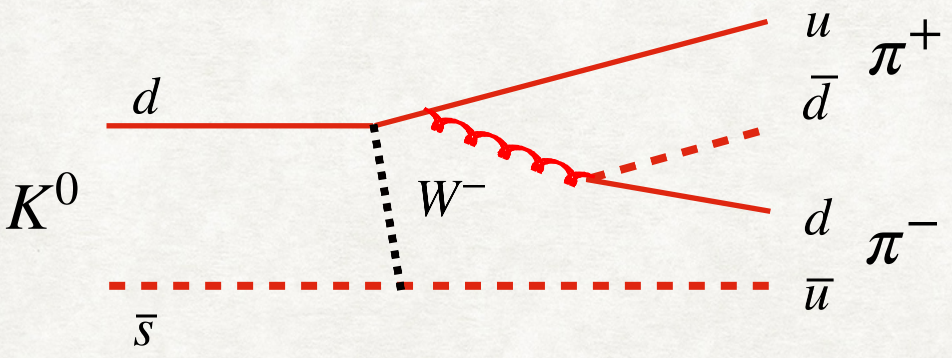
V. Fitch J. Cronin (Nobel 1980)

teorema CPT : invariancia Lorentz + causalidad + QFT implican que CPT es buena simetría

1964 Violación de CP oscilaciones de kaones neutros ($K^0 \equiv d\bar{s},\ \bar{K}^0 \equiv s\bar{d}$)

2001 en mesones B (SLAC) ($B^0 \equiv d\bar{b}, \bar{B}^0 \equiv b\bar{d}$)

2019 en mesones D (LHC) ($D^0 \equiv c\bar{u}, \bar{D}^0 \equiv u\bar{c}$)



$$CP\,|K^0> = -\,|\bar{K}^0>$$

$$|K_L> = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\,|K^0> + |\bar{K}^0>\,\right] \quad CP\,|K_L> = -\,|K_L>$$

$$|K_S> = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\,|K^0> - |\bar{K}^0>\,\right] \quad CP\,|K_S> = +\,|K_S>$$

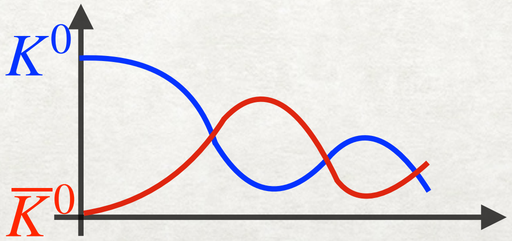
$$\pi^- + p \longrightarrow K^0 + \Lambda^0$$

$$\pi^+ + p \longrightarrow \bar{K}^0 + p + K^+$$

$$K_L \longrightarrow 3\pi \qquad (\tau_L \simeq 0.517\,10^{-7} s) \qquad CP = -1$$

$$K_S \longrightarrow 2\pi \qquad (\tau_S \simeq 0.893\,10^{-10} s) \qquad CP = +1$$

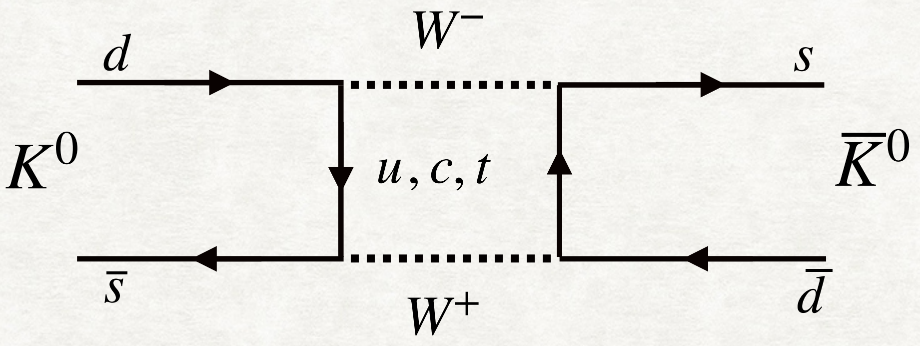
$$|K_0> = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\,|K_L> + |K_S>\,\right]$$



# CLASE 17: Neutrinos, CP

**oscilaciones de kaones:** violación de CP

$$\frac{K_L \longrightarrow \pi^0\pi^0}{K_S \longrightarrow \pi^0\pi^0} = (2.28 \pm 0.02)\ 10^{-3}$$



$$\Gamma(K^0 \longrightarrow \overline{K}^0) \neq \Gamma(\overline{K}^0 \longrightarrow K^0)$$

$$\begin{cases} K_L \longrightarrow e^+ + \nu_e + \pi^- \\ K_L \longrightarrow e^- + \overline{\nu}_e + \pi^+ \end{cases}$$

materia/anti-materia

asimetría bariónica

$$\frac{\Gamma(K_L \longrightarrow e^+ + \nu_e + \pi^-) - \Gamma(K_L \longrightarrow e^- + \overline{\nu}_e + \pi^+)}{\Gamma(K_L \longrightarrow e^+ + \nu_e + \pi^-) + \Gamma(K_L \longrightarrow e^- + \overline{\nu}_e + \pi^+)} = (3.32 \pm 0.06)\ 10^{-3}$$