Generación de mezclas leptónicas en la simetría $\mu \leftrightarrow \tau$

Diana Carolina Rivera Agudelo

Asesor: Dr. Abdel Pérez Lorenzana

Cinvestav-IPN
Departamento de Física

May 20, 2015

Contenido

Motivación

- Neutrinos atmosféricos:
  $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu, \;\; \mu^+ \to e^+ + \nu_e + \overline{\nu}_\mu \to R \equiv \frac{\Phi_{\nu_\mu}}{\Phi_{\nu_e}} = 2.$
- S-K (1998): $R \sim 1$ sugiriendo que $\theta_{23}(\theta_{ATM}) = 45^\circ$ y $\theta_{13} = 0^\circ$.

$$\theta_{13} = 0, \;\theta_{ATM} = \pi/4 \leftrightarrow M_\nu^{\mu\leftrightarrow\tau}.$$

- PDG: $\theta_{13} \in (7.62^\circ - 9.9^\circ)$ y $\theta_{ATM} \in (37.7^\circ - 52.3^\circ)$ a 3σ.

Motivación

- Neutrinos atmosféricos:
  $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu, \;\; \mu^+ \to e^+ + \nu_e + \overline{\nu}_\mu \to R \equiv \frac{\Phi_{\nu_\mu}}{\Phi_{\nu_e}} = 2.$
- S-K (1998): $R \sim 1$ sugiriendo que $\theta_{23}(\theta_{ATM}) = 45^\circ$ y $\theta_{13} = 0^\circ$.

$$\theta_{13} = 0, \;\; \theta_{ATM} = \pi/4 \leftrightarrow M_\nu^{\mu\leftrightarrow\tau}.$$

- PDG: $\theta_{13} \in (7.62^\circ - 9.9^\circ)$ y $\theta_{ATM} \in (37.7^\circ - 52.3^\circ)$ a 3σ.

- ¿ Qué tan rota está $\mu \leftrightarrow \tau$?

Motivación

- Neutrinos atmosféricos:
  $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu, \;\; \mu^+ \to e^+ + \nu_e + \overline{\nu}_\mu \to R \equiv \frac{\Phi_{\nu_\mu}}{\Phi_{\nu_e}} = 2.$
- S-K (1998): $R \sim 1$ sugiriendo que $\theta_{23}(\theta_{ATM}) = 45^\circ$ y $\theta_{13} = 0^\circ$.

$$\theta_{13} = 0, \;\; \theta_{ATM} = \pi/4 \leftrightarrow M_\nu^{\mu\leftrightarrow\tau}.$$

- PDG: $\theta_{13} \in (7.62^\circ - 9.9^\circ)$ y $\theta_{ATM} \in (37.7^\circ - 52.3^\circ)$ a 3σ.

- ¿ Qué tan rota está $\mu \leftrightarrow \tau$?
- LSND/MiniBooNE sugiere neutrinos estériles (ν_s).

Motivación

- Neutrinos atmosféricos:
  $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu, \;\; \mu^+ \to e^+ + \nu_e + \overline{\nu}_\mu \to R \equiv \frac{\Phi_{\nu_\mu}}{\Phi_{\nu_e}} = 2.$
- S-K (1998): $R \sim 1$ sugiriendo que $\theta_{23}(\theta_{ATM}) = 45^\circ$ y $\theta_{13} = 0^\circ$.

$$\theta_{13} = 0, \;\theta_{ATM} = \pi/4 \leftrightarrow M_\nu^{\mu\leftrightarrow\tau}.$$

- PDG: $\theta_{13} \in (7.62^\circ - 9.9^\circ)$ y $\theta_{ATM} \in (37.7^\circ - 52.3^\circ)$ a 3σ.

- ¿ Qué tan rota está $\mu \leftrightarrow \tau$?
- LSND/MiniBooNE sugiere neutrinos estériles (ν_s).
- ¿ Podría la mezcla de los activos con este ν_s generar las mezclas observadas ?

Matriz de mezcla en el sector leptónico

$$\mathcal{L} \sim M_\ell \bar{\ell}_L \ell_R + M_\nu \bar{\nu_L}(\nu_L)^c, \quad \mathcal{L}_{CC} \sim \bar{\ell}_L \gamma^\mu \nu_L W_\mu \ \rightarrow U_{PMNS} = U_\ell^\dagger U_\nu P_\nu$$

Parametrización estándar. $c_{ij} \equiv \cos\theta_{ij}, s_{ij} \equiv \sin\theta_{ij}$

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - c_{23}s_{12}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} P_\nu.$$

- $U_\nu^T M_\nu U_\nu = \mathrm{Diag}\left(e^{-i\phi_1}m_1, e^{-i\phi_2}m_2, m_3\right) \equiv M_\nu^{diag}$
- U_ℓ esta asociada con la diagonalización M_ℓ.
- $P_\nu = Diag(e^{i\frac{\phi_1}{2}}, e^{i\frac{\phi_2}{2}}, 1)$, contiene las fases de Majorana.

Simetría $\mu \leftrightarrow \tau$

En una base en la que el sector leptónico cargado es diagonal...

$U_\ell = I$, $U|_{\theta_{13}=0,\ \theta_{23}=45^\circ} \leftrightarrow M_\nu$ es invariante $\mu \leftrightarrow \tau$!

$$U = U^{\mu-\tau} = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ \frac{-s_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{c_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-s_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{c_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow M_\nu^{\mu\to\tau} = \begin{pmatrix} m_1 c_{12}^2 + m_2 s_{12}^2 & (m_2 - m_1)\frac{s2_{12}}{\sqrt{8}} & (m_2 - m_1)\frac{s2_{12}}{\sqrt{8}} \\ (m_2 - m_1)\frac{s2_{12}}{\sqrt{8}} & \frac{1}{2}(m_1 s_{12}^2 + m_2 c_{12}^2 + m_3) & \frac{1}{2}(m_1 s_{12}^2 + m_2 c_{12}^2 - m_3) \\ (m_2 - m_1)\frac{s2_{12}}{\sqrt{8}} & \frac{1}{2}(m_1 s_{12}^2 + m_2 c_{12}^2 - m_3) & \frac{1}{2}(m_1 s_{12}^2 + m_2 c_{12}^2 + m_3) \end{pmatrix},$$

Simetría $\mu \leftrightarrow \tau$

En una base en la que el sector leptónico cargado es diagonal...

$U_\ell = I,\ U|_{\theta_{13}=0,\ \theta_{23}=45^\circ} \leftrightarrow M_\nu$ es invariante $\mu \leftrightarrow \tau$!

$$U = U^{\mu-\tau} = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ \frac{-s_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{c_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-s_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{c_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow M_\nu^{\mu\rightarrow\tau} = \begin{pmatrix} m_1 c_{12}^2 + m_2 s_{12}^2 & (m_2 - m_1)\frac{s2_{12}}{\sqrt{8}} & (m_2 - m_1)\frac{s2_{12}}{\sqrt{8}} \\ (m_2 - m_1)\frac{s2_{12}}{\sqrt{8}} & \frac{1}{2}(m_1 s_{12}^2 + m_2 c_{12}^2 + m_3) & \frac{1}{2}(m_1 s_{12}^2 + m_2 c_{12}^2 - m_3) \\ (m_2 - m_1)\frac{s2_{12}}{\sqrt{8}} & \frac{1}{2}(m_1 s_{12}^2 + m_2 c_{12}^2 - m_3) & \frac{1}{2}(m_1 s_{12}^2 + m_2 c_{12}^2 + m_3) \end{pmatrix},$$

Realmente: $\theta_{13} \sim 8.8^\circ$ y $\theta_{ATM} \approx \theta_{23} \sim 41.4^\circ$ (G. L. Fogli et al, arXiv:1312.2878v2 [hep-ph])

¿ Qué tan rota está $\mu \leftrightarrow \tau$?

$$M_\nu = M_\nu^{\mu\leftrightarrow\tau} + \delta M_\nu = \begin{pmatrix} m_{ee} & m_{e\mu} & m_{e\mu} \\ m_{e\mu} & m_{\mu\mu} & m_{\mu\tau} \\ m_{e\mu} & m_{\mu\tau} & m_{\mu\mu} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \hat{\delta} \\ 0 & 0 & 0 \\ \hat{\delta} & 0 & \hat{\epsilon} \end{pmatrix}.$$

$$\hat{\delta} = m_{e\tau} - m_{e\mu}, \quad \hat{\epsilon} = m_{\tau\tau} - m_{\mu\mu}.$$

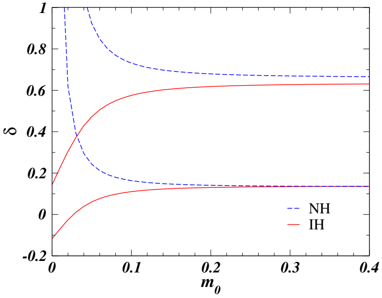
$$m_{\alpha\beta} = \sum_k U^*_{\alpha k} U^*_{\beta k} m_k, \quad m_i \equiv \mid m_i \mid \exp^{-i\phi_i}.$$

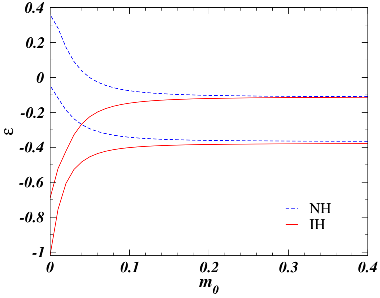
- Si la rotura es débil $\rightarrow \delta \equiv \mid \frac{\hat{\delta}}{m_{e\mu}} \mid \ll 1, \quad \epsilon \equiv \mid \frac{\hat{\epsilon}}{m_{\mu\mu}} \mid \ll 1.$

- δ , $\epsilon \rightarrow f(\theta_{ATM}, \theta_{sol}, \theta_{13}, \delta_{CP}, \Delta m^2, \delta m^2, m_0)$, $m_0 \equiv m_1(m_3)$, para NH(IH).
- $\delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ y $\Delta m^2 = m_3^2 - \frac{(m_1^2 - m_2^2)}{2}$. $\delta_{CP} = 0$

Parámetros	1σ
$\delta m^2/10^{-5} eV^2$	7.32-7.80
$\sin^2\theta_{sol}/10^{-1}$	2.91-3.25
$\Delta m^2/10^{-3} eV^2$	2.37-2.49
$\sin^2\theta_{ATM}/10^{-1}$	4.14-4.70
$\sin^2\theta_{13}/10^{-2}$	2.15-2.54

m_1	m_2
π	0
π	π
0	π
0	0





Rompimiento de $\mu - \tau$ por un ν_s

$$M_\nu = \begin{pmatrix} M^{\mu\leftrightarrow\tau} & \vec{\alpha}\, m_s \\ \vec{\alpha}^\dagger m_s & m_s \end{pmatrix}, \quad \vec{\alpha}^\dagger = (\alpha_e, \alpha_\mu, \alpha_\tau) \ll 1, m_s \gg M_{ij}^{\mu\leftrightarrow\tau}$$

- Diagonalización por bloques de $M_\nu \Rightarrow (M'_\nu)_{ij} \simeq M_{ij}^{\mu-\tau} - \alpha_i m_s \alpha_j^T$

$$\Rightarrow \delta \sim \frac{ms\alpha_e\sqrt{8}(\alpha_\mu - \alpha_\tau)}{(m_2 - m_1)S2\tau_{12}}, \; \epsilon \sim \frac{2m_s(\alpha_\mu^2 - \alpha_\tau^2)}{m_1 S^2\tau_{12} + m_2 C^2\tau_{12} + m_3}$$

- Un análisis de orden de magnitud
$\Rightarrow m_s \sim \mathcal{O}(\text{eV}) \longmapsto$ LSND/Mini-BooNE .

- La matriz que diagonaliza perturbativamente a M_ν la denotamos como
$$\mathcal{U} = \begin{pmatrix} \mathcal{U}_{ij} & \overrightarrow{S} \\ \overrightarrow{S}^\dagger & \mathcal{U}_{ss} \end{pmatrix}, \quad \overrightarrow{S}^\dagger = (\mathcal{U}_{es}, \mathcal{U}_{\mu s}, \mathcal{U}_{\tau s})$$
- Ajuste de los parámetros α_l a los datos experimentales
$S^2 2\theta_{sol} = 4|\mathcal{U}_{e1}|^2|\mathcal{U}_{e3}|^2$, $S^2 2\theta_{13} = 4|\mathcal{U}_{e3}|^2(|\mathcal{U}_{e1}|^2 + \mathcal{U}_{e2}|^2)$,
$S^2 2\theta_{ATM} = 4|\mathcal{U}_{\mu 3}|^2|\mathcal{U}_{\tau 3}|^2$, $S^2 2\theta_{e\mu} \simeq 4|\mathcal{U}_{e4}|^2|\mathcal{U}_{\mu 4}|^2$.
Con $S^2 2\theta_{e\mu} = 0.0023$, $|\Delta m^2_{41}| = 0.89eV^2$(LSND+Mini-BooNE,hep-ph/1107.1452v3)

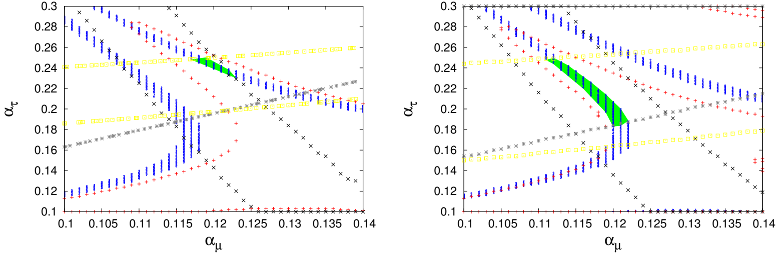


Figure : La región verde muestra los valores de α_μ y α_τ que reproducen los ángulos de mezcla experimentales. Izquierda IH, derecha NH

Oscilaciones $\nu_e \to \nu_s$ en experimentos solares

- Predicción: $\eta_s = \frac{\phi_B - \phi_{\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau}}{\phi_B - \phi_{\nu_e}} \sim 0 \pm 0.2$ [1]
- $\eta_s = \frac{P_{es}}{1 - P_{ee}}$.
- $\eta_s \approx \frac{-4U_{e1}U_{e2}U_{s1}U_{s2}}{4[U_{e1}U_{e2}]^2} \approx (1.2 - 1.9)(2.7 - 3) \times 10^{-2}$, para (NH)(IH) y $|m_0| = 0.2$ eV.

α_μ	α_τ	η_s
0.115	0.23	0.017
0.116	0.23	0.019
0.117	0.22	0.016
0.118	0.21	0.013
0.119	0.2	0.015
0.12	0.21	0.012

α_μ	α_τ	η_s
0.118	0.244	0.0276
0.119	0.244	0.029
0.12	0.24	0.028
0.121	0.24	0.0296
0.122	0.232	0.027
-	-	-

Table : NH(Izquierda), IH(derecha)

[1] M. Cirelli et all. Nuclear Physics B 708215-267 (2005)

Implicaciones sobre el término de masa efectivo en neutrinoless double-beta decay

- $|m_{ee}| = \left|\sum_{i=1}^{4} \mathcal{U}_{ei}^2 m_i\right|$.
- $0.1 \leq \alpha_\mu \leq 0.14$, $0.2 \leq \alpha_\tau \leq 0.23$ para NH and $0.12 \leq \alpha_\mu \leq 0.14$, $0.24 \leq \alpha_\tau \leq 0.26$ para IH.

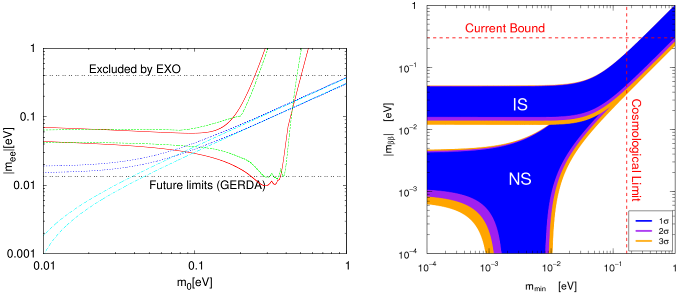


Figure : rojo(4ν's) y azul claro(3ν's) para NH. Verde(4ν's) y azul(3ν's) para IH. La figura de la derecha es la convencional en el caso de 3 ν's

Conclusiones

- La propuesta de que un ν_s con masa de $\sim$ 1eV pueda ser el causante del rompimiento de $\mu - \tau$ es viable y sus acoplamientos con el sector activo son $\alpha_l \sim 0.2$.
- Se encontró que este escenario es viable para $m_0 \gtrsim 0.1$ (Espectro cuasidegenerado)
- La fracción η_s de ν_s provenientes de oscilaciones de ν_e a la escala solar fue calculada en este escenario y es compatible con la η_s calculada con los datos experimentales reportada en la literatura.
- Este escenario tiene implicaciones directas sobre m_{ee} del proceso $\beta\beta_{0\nu' s}$. La región m_{ee} se ensancha respecto a la de $3\nu' s$ activos.
- En partícular si se observa una señal en el rango 0.01-0.4 eV podría ser un indicio positivo de este escenario
- La no observación de señal en experimentos como GERDA prácticamente descartaría el escenario propuesto.

Gracias!!