

ESTABELECENDO LIMITES NOS PARÂMETROS DE OSCILAÇÃO DE NEUTRINOS INDEPENDENTE DE EFEITOS DA MATÉRIA

José Tarcísio Costa¹; Pedro Cunha de Holanda¹

¹INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, UNICAMP 13083-970 CAMPINAS SP, BRAZIL

Financiado pelo PIBIC/CNPq

1- Introdução

Hoje se sabe por diversos resultados experimentais que os neutrinos são partículas massivas. Além disso, os neutrinos são criados e detectados como uma mistura de auto-estados de massa e, portanto durante a sua evolução, podem trocar de sabor, fenômeno conhecido como oscilação de neutrinos. O objetivo desse projeto é estudar o quanto podemos investigar os parâmetros de oscilação de neutrinos sem utilizar qualquer informação sobre os parâmetros solares. Para isso realizou-se a análise dos resultados dos experimentos CHOOZ[1], Minos[2], KamLAND[3] e, por fim, Super Kamiokande[4], a partir de um mínimo de suposições sobre o fluxo inicial de neutrinos solares.

2- Abordagem teórica

Equação de evolução temporal para o caso mais geral, no caso de o meio ser o vácuo os parâmetros V_{cc} e V_{nc} são nulos.

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_a \\ \nu_b \end{pmatrix} = \left(U \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix} U^{-1} + \begin{pmatrix} V_{cc} + \frac{1}{2}V_{nc} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}V_{nc} \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \nu_a \\ \nu_b \end{pmatrix}_{t=0},$$

Os termos a e b – que correspondem a dois auto-estados são, respectivamente: $\frac{m_1^2}{2E}$ e $\frac{m_2^2}{2E}$

Dessa equação, extraímos as probabilidades de oscilação:

Vácuo

$$P(\nu_a \rightarrow \nu_a) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right) \quad (1)$$

Matéria

$$P(\nu_a \rightarrow \nu_a) = 1 - \sin^2(2\tilde{\theta}) \sin^2\left(\frac{\Delta \tilde{m}^2}{4E} L\right) \quad (2)$$

Onde os parâmetros se relacionam da seguinte maneira:

$$\sin(2\tilde{\theta}) = \frac{\frac{\Delta m^2}{4E} \sin(2\theta)}{\sqrt{\left(\frac{\Delta m^2}{4E} \cos(2\theta) - \frac{V_{cc}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m^2}{4E} \sin(2\theta)\right)^2}}$$

$$\frac{\Delta \tilde{m}^2}{4E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m^2}{4E} \cos(2\theta) - \frac{V_{cc}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m^2}{4E} \sin(2\theta)\right)^2}}$$

As probabilidades analisadas para o caso dos neutrinos solares, derivam das equações (1) e (2) e são:

Dia – Não há interação com a matéria

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e)^{Dia} = P(\nu_e \rightarrow \nu_e)(1 - \sin^2\theta) + (1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_e)) \sin^2\theta \quad (3)$$

Noite – Há interação com a matéria da Terra

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e)^{Noite} = P(\nu_e \rightarrow \nu_e)(1 - P(\nu_b \rightarrow \nu_e)^{Terra}) + (1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_e))P(\nu_b \rightarrow \nu_e)^{Terra}$$

$$P(\nu_b \rightarrow \nu_e)^{Terra} = \sin^2\theta + \left[\sin^2(\theta - 2\tilde{\theta}) - \sin^2\theta \right] \sin^2\left(\frac{\Delta \tilde{m}^2}{2E} R_T \cos\theta_z\right) \quad (4)$$

3 – Experimentos Estudados

Curvas de exclusão dos experimentos feitos com neutrinos provenientes de reatores nucleares:

CHOOZ Experiment

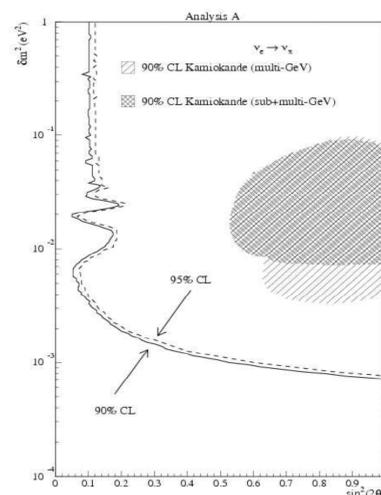


Fig. 1 Curva de exclusão do experimento CHOOZ

CHOOZ não detectou oscilações de neutrinos.

Minos

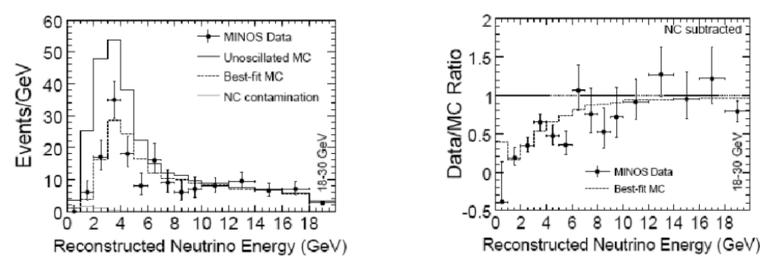


Fig. 2(a) Eventos detectados no FD em função da energia.(b) Probabilidade de Sobrevivência dos neutrinos com base nos eventos detectados no FD.

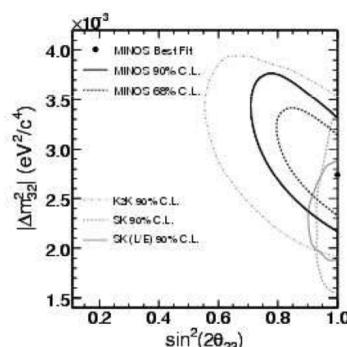


Fig. 3 Curva de exclusão para o experimento MINOS.

Minos detectou oscilações de neutrinos.

Kamland

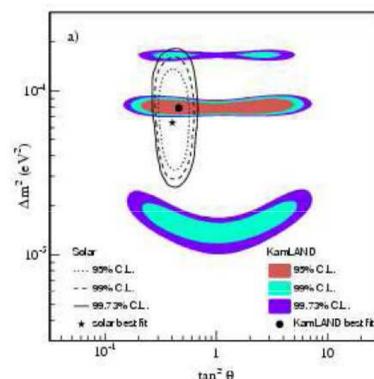


Fig. 4 Curva de exclusão para KamLAND

Foram observados eventos com energia acima de 3,2 Mev. O valor esperado sem oscilação era $365,2 \pm 23,7$. O valor observado foi 258, ou seja, KamLand detectou oscilação de neutrinos.

4 – Resultados

Análise dos resultados obtidos por SuperKamiokande, que trabalhou com neutrinos solares:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e)^{Dia} = 0,34$$

Pela equação (3), temos o intervalo dos parâmetros:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \text{ e } \sin^2\theta = [0; 0,34]$$

A assimetria Dia-Noite de observação é dada pela seguinte expressão:

$$A = \frac{\Phi_{Dia} - \Phi_{Noite}}{\frac{1}{2}(\Phi_{Dia} + \Phi_{Noite})}$$

O fluxo Φ é dado pela expressão:

$$\Phi_{Dia/Noite} = P(\nu_e \rightarrow \nu_e)^{Dia/Noite} + \frac{1}{7}(1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_e)^{Dia/Noite})$$

A assimetria observada em Super Kamiokande foi : $-0,017 \pm 0,0016$. Partindo do limite inferior, temos $A = -0,033$. Com isso, temos, das duas equações acima:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e)^{Noite} \leq 0,3570$$

6- Conclusão

Combinando esse resultado com o intervalo dos parâmetros encontrado anteriormente e utilizando o par de equações (4), temos:

$$\Delta m^2 \geq 1,49E^{-7} \text{ eV}^2$$

Esse é o limite estabelecido pelos dados do experimento Super-Kamiokande para a oscilação em duas famílias dos neutrinos provenientes do Sol.

Vimos que é possível estabelecer limites nos parâmetros de oscilação sem levarmos em conta dados sobre o Sol.

7 – Bibliografia

- [1] M. Apollonio *et al.*, Phys. Lett. B 466 (1999) 415
- [2] D. G. Michael *et al.*, Phys Rev. Lett. 97 (2006) 191801
- [3] T. Araki *et al.*, Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 081801
- [4] J. Osaka *et al.*, Phys. Ver. Lett. D 73 (2006) 112001