

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

José Tarcísio Costa<sup>1</sup>; Pedro Cunha de Holanda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INSTITUTO 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, fenômenos 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

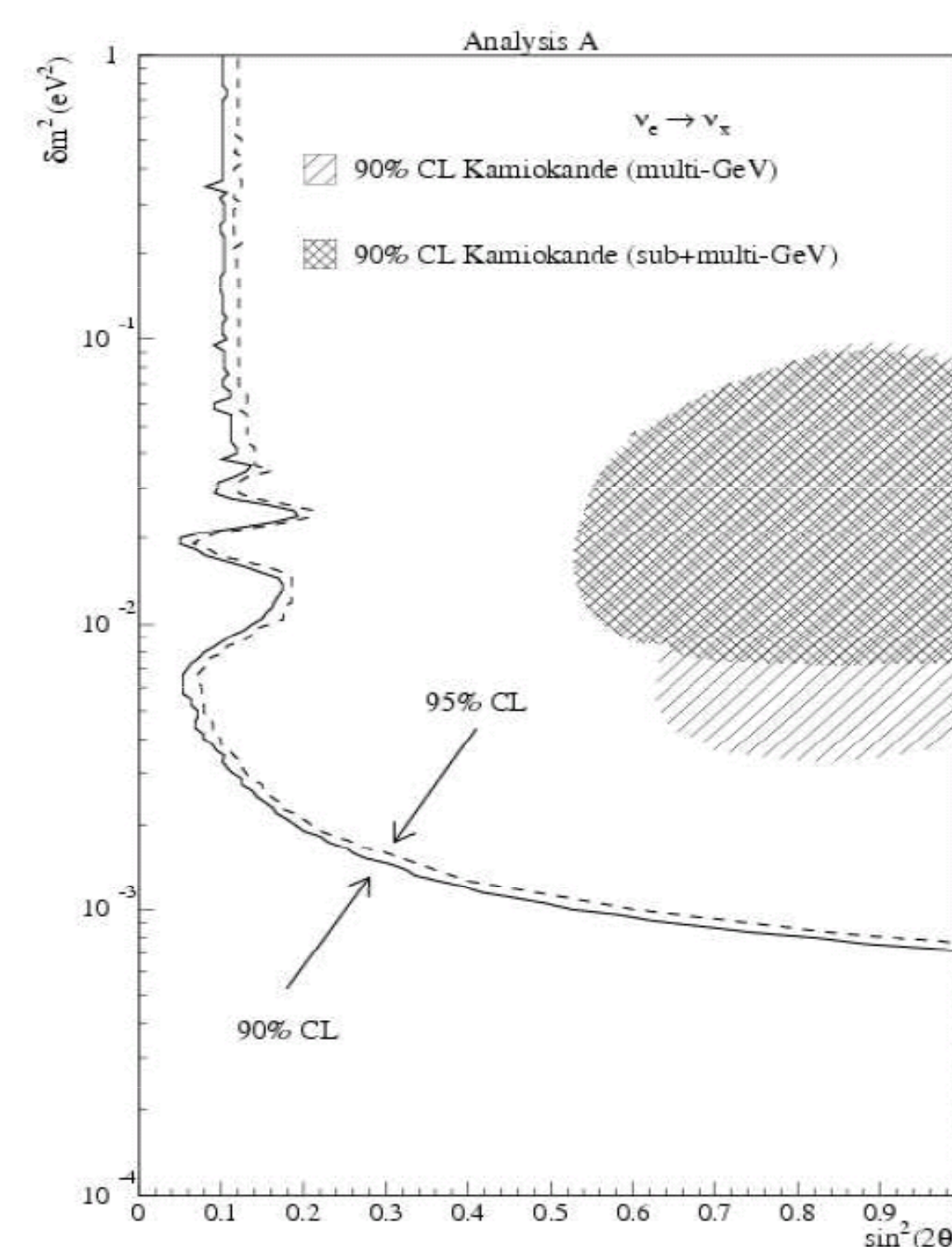


Fig. 1 Curva de exclusão do experimento CHOOZ

CHOOZ não detectou oscilações de neutrinos.

### Minos

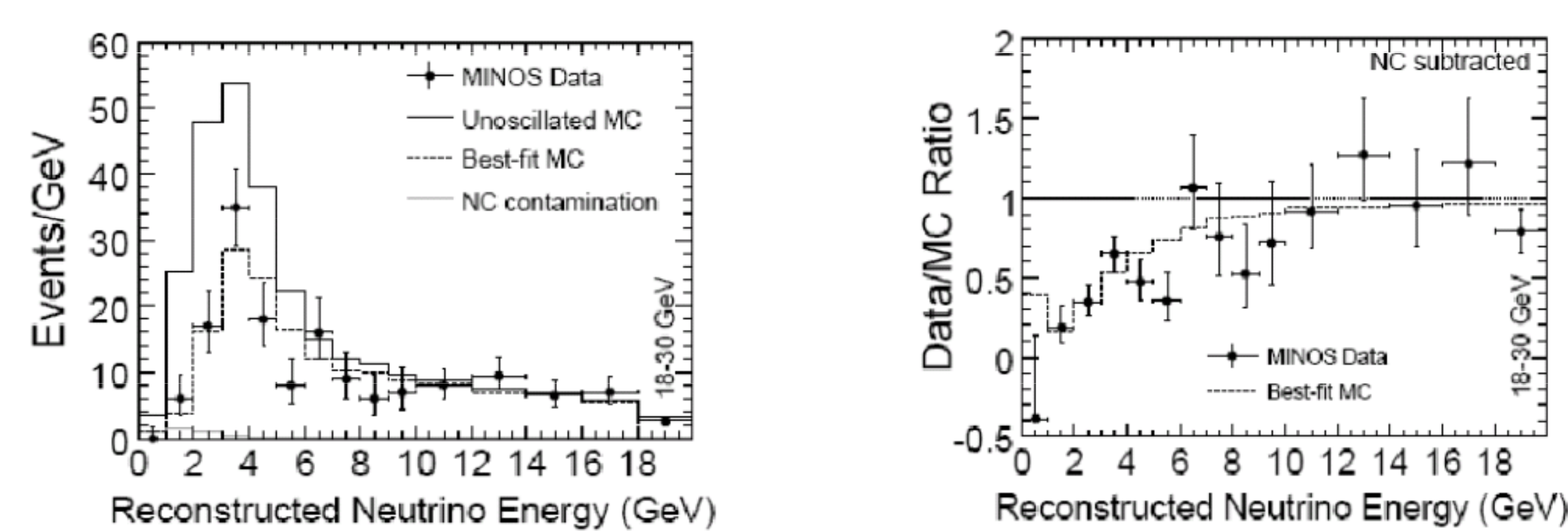


Fig. 2(a) Eventos detectados no FD em função da energia.(b) Probabilidade de Sobrevivência dos neutrinos com base nos eventos detectados no FD.

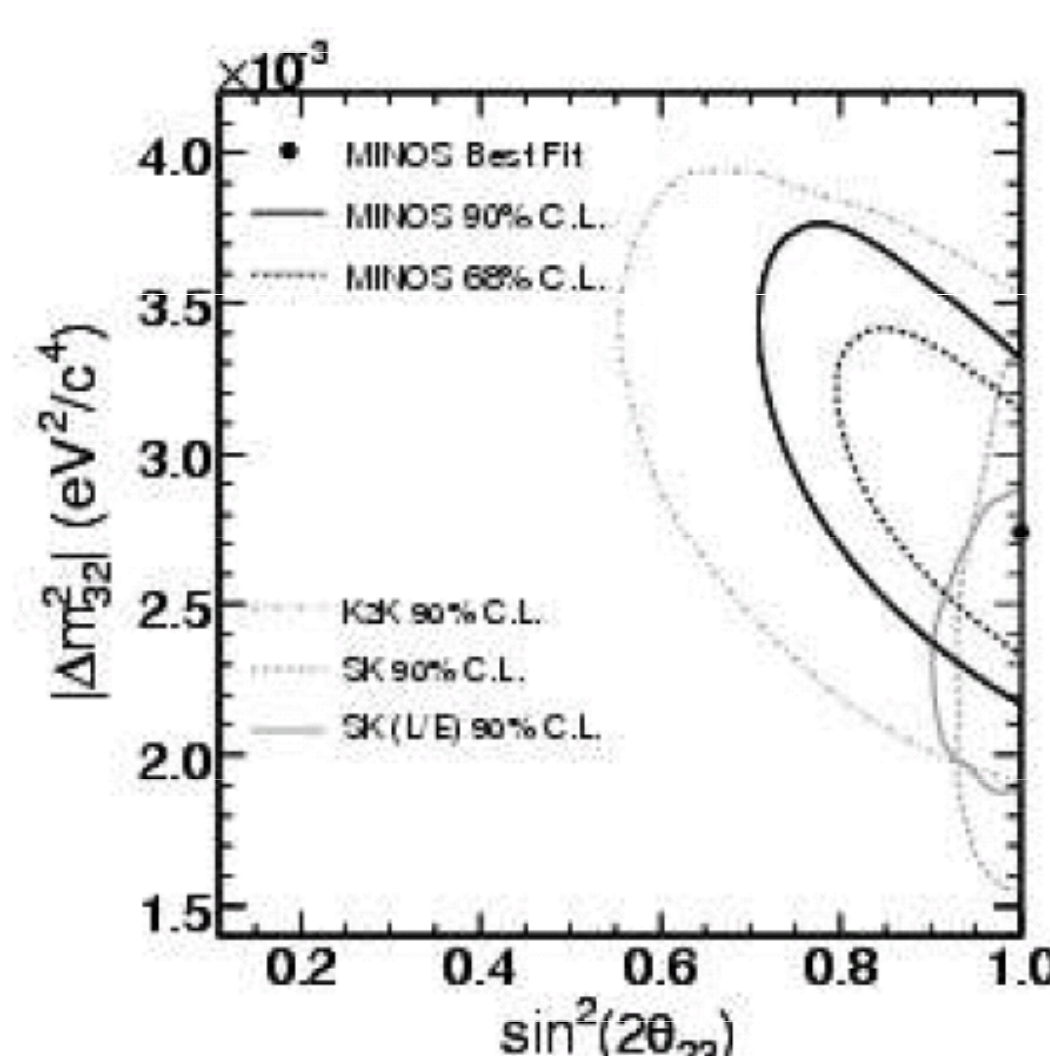


Fig. 3 Curva de exclusão para o experimento MINOS.

Minos detectou oscilações de neutrinos.

### Kamland

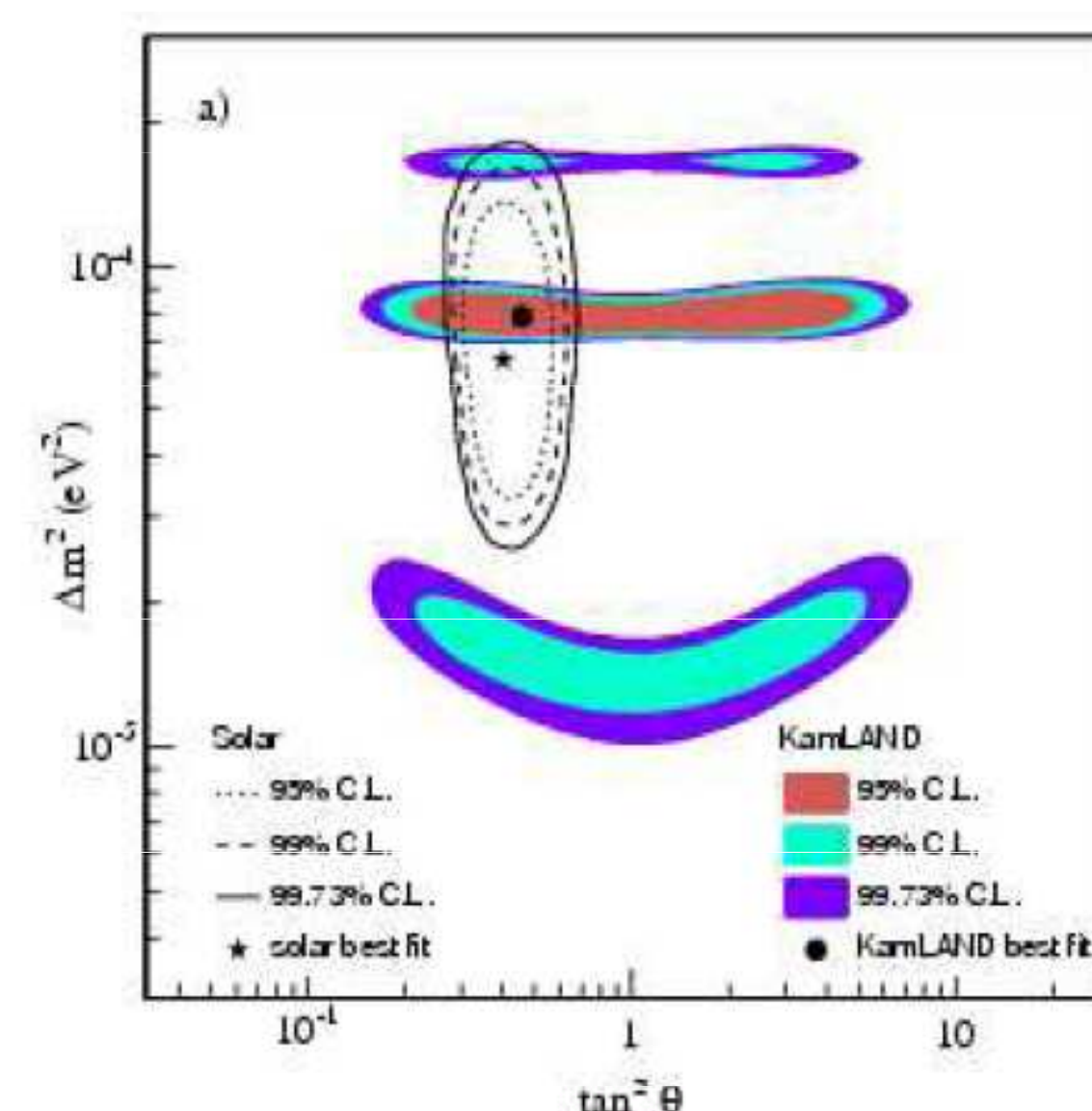


Fig. 4 Curva de exclusão para KamLAND

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  $\Phi$  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