

# ESTUDO DE OSCILAÇÕES DE NEUTRINOS EM TRÊS FAMÍLIAS

Henrique Evangelista de Oliveira<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

Sabe-se 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 podem trocar sabor durante a sua evolução, fenômeno conhecido como oscilação de neutrinos.

Este projeto estuda o atual status das evidências experimentais de oscilação de sabor de neutrinos. Como resultado final, mostra-se que o atual esquema de oscilação, onde todas as probabilidades de oscilação podem ser calculadas utilizando uma aproximação em somente duas famílias de neutrinos, não é mais uma hipótese de trabalho, mas um resultado experimental.

## 2- Probabilidades

Abaixo estão algumas probabilidades de oscilação características dos experimentos estudados.

Probabilidade de oscilação de neutrinos em três famílias para CHOOZ:

$$P_{ee} = 1 - \cos^4(\Theta_{13})\text{sen}^2(2\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{21}^2 L/4E) - \text{sen}^2(2\Theta_{13}) [\cos^2(\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) + \text{sen}^2(\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{32}^2 L/4E)] \quad (1)$$

Probabilidade de oscilação de neutrinos em três famílias para MINOS:

$$P_{\mu\mu} = 1 - \text{sen}^2 4\Theta_{13}\text{sen}^4\Theta_{23}\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) - \text{sen}^2 2\Theta_{23}\cos^2 2\Theta_{13}\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) \quad (2)$$

## 3 – Experimentos

Apresentamos os dados experimentais dos experimentos analisados: CHOOZ, MINOS E KamLAND

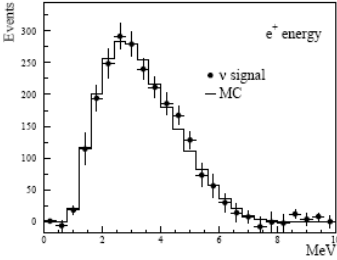


Figura 1: CHOOZ

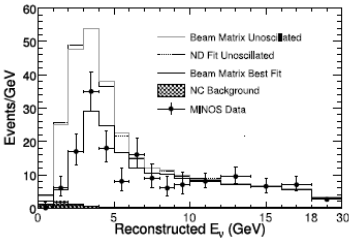


Figura 2: MINOS

## 4- Análise dos dados

Dada a probabilidade (1), segundo os dados da figura 1, temos que ela deve ser maior que 0,95, portanto devemos ter três condições simultâneas:

$$\cos^4(\Theta_{13})\text{sen}^2(2\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{21}^2 L/4E) < 0,05$$

$$\text{sen}^2(2\Theta_{13})\cos^2(\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) < 0,05$$

$$\text{sen}^2(2\Theta_{13})\text{sen}^2(\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{32}^2 L/4E) < 0,05$$

Dada a probabilidade (2), segundo os dados da figura 2, temos que, para uma energia maior que 10 GeV ela deve ser maior que 0,95, portanto devemos ter duas condições simultâneas:

$$\text{sen}^2 4\Theta_{13}\text{sen}^4\Theta_{23}\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) < 0,05$$

$$\text{sen}^2 2\Theta_{23}\cos^2 2\Theta_{13}\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) < 0,05$$

Após análise detalhada, organizamos os resultados na tabela 1.

Tabela 1: Possibilidades para CHOOZ e MINOS

CHOOZ	MINOS
(1) $\text{sen}^2(2\Theta_{13}) < 0,05$ $\text{sen}^2(2\Theta_{12}) < 0,05$	(A) $\text{sen}^2 4\Theta_{13} < 0,05$ $\text{sen}^2 2\Theta_{23} < 0,05$
(2) $\text{sen}^2(2\Theta_{13}) < 0,05$ $\Delta m_{21}^2 < 5,3 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$	(B) $\text{sen}^2 4\Theta_{13} < 0,05$ $\Delta m_{31}^2 < 2,4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
(3) $\cos^4(\Theta_{13}) < 0,05$ $\cos^2(\Theta_{12}) < 0,07$	(C) $\cos^2 2\Theta_{13} < 0,05$ $\text{sen}^4\Theta_{23} < 0,26$
(4) $\cos^4(\Theta_{13}) < 0,05$ $\Delta m_{31}^2 < 6,3 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$	(D) $\cos^2 2\Theta_{13} < 0,05$ $\Delta m_{31}^2 < 5,7 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
(5) $\cos^4(\Theta_{13}) < 0,05$ $\text{sen}^2(\Theta_{12}) < 0,07$	(E) $\text{sen}^4\Theta_{23} < 0,05$ $\cos^2 2\Theta_{13} < 0,07$
(6) $\cos^4(\Theta_{13}) < 0,05$ $\Delta m_{32}^2 < 6,3 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$	(F) $\text{sen}^4\Theta_{23} < 0,05$ $\Delta m_{31}^2 < 2,9 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
(7) $\text{sen}^2(\Theta_{12}) < 0,05$ $\text{sen}^2(2\Theta_{13}) < 0,05$	(G) $\text{sen}^2 2\Theta_{23} < 0,05$ $\text{sen}^2 4\Theta_{13} < 0,03$
(8) $\text{sen}^2(\Theta_{12}) < 0,05$ $\Delta m_{31}^2 < 5,3 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$	(H) $\text{sen}^2 2\Theta_{23} < 0,05$ $\Delta m_{31}^2 < 1,9 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
(9) $\cos^2(\Theta_{12}) < 0,05$ $\cos^4(\Theta_{13}) < 0,05$	
(10) $\cos^2(\Theta_{12}) < 0,05$ $\Delta m_{21}^2 < 5,3 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$	
(11) $\cos^2(\Theta_{12}) < 0,05$ $\text{sen}^2(2\Theta_{13}) < 0,05$	
(12) $\cos^2(\Theta_{12}) < 0,05$ $\Delta m_{32}^2 < 5,3 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$	

## 5- Discussões

A tabela 1 mostra as possibilidades encontradas para CHOOZ e MINOS. Essas possibilidades foram usadas para analisar a probabilidade de MINOS para uma energia de 2,5 GeV, que deve estar, segundo o experimento MINOS, entre 0,4 e 0,6, ou seja,  $0,4 < P_{\mu\mu} < 0,6$ .

Análise pelo limite superior

$$P_{\mu\mu} < 0,6$$

$$[\text{sen}^2 4\Theta_{13}\text{sen}^4\Theta_{23} + \text{sen}^2 2\Theta_{23}\cos^2 2\Theta_{13}] \text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) > 0,4$$

Para as possibilidades 1A, 1C, 1D, 1E, 1F, 1G e 1H da tabela não há resultados consideráveis.

Para as possibilidades 1B da tabela, temos:  $\text{sen}^2 2\Theta_{23} > 0,66$  e  $\Delta m_{31}^2 > 1,8 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

Estendemos essa mesma análise para todas as possibilidades da tabela 1, não encontrando nenhum resultado favorável, a mais do que tínhamos encontrado.

Análise pelo limite inferior

$$P_{\mu\mu} > 0,4$$

$$[\text{sen}^2 4\Theta_{13}\text{sen}^4\Theta_{23} + \text{sen}^2 2\Theta_{23}\cos^2 2\Theta_{13}] \text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) < 0,6$$

Feitas as análises, temos que:  $\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) < 0,96$  e  $\Delta m_{31}^2 < 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

KamLAND

Para o experimento KamLAND, temos que  $p < 0,7$ . Usando (1) e feitas todas as análises chegamos a:  $\Delta m_{21}^2 > 1,9 \times 10^{-6} \text{ eV}^2$ . Analisando a figura 3, entre 30 Km/Mev < L/E < 70 Km/Mev, observamos quase uma oscilação, ou seja:

$$\Delta m_{21}^2 L/4E \sim \pi$$

$$\Delta m_{21}^2 / 4[70 - 30] \sim \pi$$

$$\Delta m_{21}^2 \sim 7,5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

Portanto temos:  $1,8 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 < \Delta m_{31}^2 < 2,4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  e  $1,9 \times 10^{-6} \text{ eV}^2 < \Delta m_{21}^2 < 7,5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ , ou seja:  $\Delta m_{31}^2$  é bem maior que  $\Delta m_{21}^2$

$\Delta m_{32}^2$  também é grande. Portanto, podemos aproximar na fórmula de probabilidade acima  $\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) = 1/2$  e  $\text{sen}^2(\Delta m_{32}^2 L/4E) = 1/2$ .

$$P_{ee} = 1 - \cos^4(\Theta_{13})\text{sen}^2(2\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{21}^2 L/4E) \text{sen}^2(2\Theta_{13}) [\cos^2(\Theta_{12})/2 + \text{sen}^2(\Theta_{12})/2]$$

$$P_{ee} = \text{sen}^4(\Theta_{13}) + \cos^4(\Theta_{13})\text{sen}^2(2\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{21}^2 L/4E)$$

Da condição 1B temos que  $\text{sen}^2 4\Theta_{13} < 0,05$ , portanto  $\cos^2 2\Theta_{13} > 0,95$  e chegamos à:

$$P_{ee} = \text{sen}^2(2\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{21}^2 L/4E)$$

## 6- Conclusão

Da análise dos dados vemos que podemos aproximar a probabilidade em três famílias dada por:

$$P_{ee} = 1 - \cos^4(\Theta_{13})\text{sen}^2(2\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{21}^2 L/4E)$$

$$\text{sen}^2(2\Theta_{13}) [\cos^2(\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) + \text{sen}^2(\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{32}^2 L/4E)]$$

para uma probabilidade apenas em duas famílias dada por:

$$P_{ee} = \text{sen}^2(2\Theta_{12})\text{sen}^2(\Delta m_{21}^2 L/4E).$$