

# Estudo dos Resultados de Desaparecimento de Neutrinos Muônicos do MINOS

Abner Leonel Gadelha Gomes<sup>1</sup>, Ricardo Avelino Gomes<sup>1</sup>

Instituto de Física<sup>1</sup>, CEP 74001-470 Goiânia-GO, Brasil

**abner.leonel@hotmail.com, ragomes@if.ufg.br**

Palavras chaves : Neutrinos, Oscilação Padrão, Interações não-padrão (NSI).

## 1 INTRODUÇÃO

Experimentos recentes mostraram que os neutrinos podem converter de um sabor para outro. Como já conhecido, estas partículas estão associadas com seus respectivos léptons  $e$ ,  $\mu$  e  $\tau$ . Se um neutrino provém de uma dessas três partículas temos então respectivamente os neutrinos eletrônico, muônico e tauônico ( $\nu_e, \nu_\mu$  e  $\nu_\tau$ ). Tais experimentos dão fortes indicações de que os neutrinos têm diferentes massas, fato já bem consolidado e aceito pelas observações. O modelo de oscilação de neutrino resolve o problema do neutrino Solar, entretanto, para isto surgem mudanças no Modelo Padrão da física de partículas elementares. Porém, assim como o modelo de oscilação, existem outros que procuram dar soluções viáveis para o comportamento anômalo dos neutrinos, como por exemplo os modelos de decaimento e descoerência, que apesar de não serem tão abordados devido ao sucesso que o modelo de oscilação teve com os resultados preliminares, não estão descartados. Então, será que o modelo de oscilação apesar de ser o que melhor se adapta até agora aos experimentos de neutrinos estaria correto? Só a evolução das pesquisas sobre essas partículas podem responder esta questão. Neste trabalho será abordado um estudo de fenomenologia a partir de resultados publicados pelo experimento MINOS (P. Adamson et al, 2008) que busca contribuir para estas pesquisas. Vamos falar um pouco do que se trata o Problema do Neutrino Solar, da Oscilação de Neutrinos e de alguns resultados obtidos deste estudo.

### 1.1 O Problema do Neutrino Solar

Em meados do século XIX, Lord Rayleigh tentava estimar a idade do Sol. Para isto, começou a realizar alguns cálculos, e supôs portanto que a fonte de energia do Sol deveria ser a gravitacional, suposição coerente para época. Toda energia era liberada na forma de radiação e esta taxa de radiação Solar era conhecida e deveria ser constante. Baseado nisto, Rayleigh publicou que

---

<sup>1</sup> Revisado pelo orientador

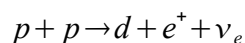
**Orientador:** Ricardo Avelino Gomes/ **Orientando:** Abner Leonel Gadelha Gomes

a idade do Sol deveria ser muito menor do que a prevista por geólogos, tal como ilustrada na teoria da evolução de Darwin.

Ainda no século XIX, em 1896 com a descoberta da radioatividade por Becquerel e os estudos que surgiram a partir de então com os Curies, passou-se a acreditar que a fonte principal de energia do Sol seria a provocada pela fissão nuclear. Mas, uma questão que derrubou esta ideia foi o fato de o Sol não ser composto de substância radioativa, o Sol é feito quase que por inteiro de hidrogênio e hélio (elementos como urânio e rádio não estão presentes na composição do Sol). O desenvolvimento da física nuclear e atômica estava crescendo quando por volta de 1920, Aston trabalhava na medida de pesos atômicos juntamente com Eddington observaram que o peso de quatro átomos de hidrogênio era maior que um átomo de hélio com massa igual a quatro unidades atômicas. Com a contribuição de Einstein para a física nuclear no que diz respeito a relação massa-energia e com os trabalhos de Aston e Eddington, tornou-se favorável que a fusão nuclear fosse a fonte de energia do Sol. A fusão de quatro átomos de hidrogênio estaria energeticamente dentro do previsto. A sugestão de que o poder do Sol estava na fusão nuclear foi dada por Eddington e de fato ele estava correto.

Os anos que se seguiram ficaram voltados para o desenvolvimento da física nuclear. Em 1930 Chadwick descobre o nêutron e Pauli para favorecer seus estudos introduz a existência de uma partícula que foi denominada de neutrino. Os estudos de Chadwick, Pauli, e outros foram motivados para descobrir como se dava o processo de fusão nuclear no interior do Sol. Nas estrelas mais pesadas, o mecanismo é o chamado ciclo CNO (carbono, nitrogênio e oxigênio) em que o processo de fusão é catalizado por pequenas quantidades desses três elementos. O Sol é uma estrela relativamente leve e por isso o mecanismo predominante é o chamado **cadeia pp**. Este processo está dividido basicamente em quatro passos.

### **1º Passo: Dois prótons produzem um dêuteron.**



No caso acima temos um par de hidrogênio representados como prótons combinando para fazer um dêuteron, um pósitron e um neutrino eletrônico. O dêuteron é um hidrogênio que possui um nêutron, portanto, na fusão temos um próton, um neutron e um neutrino eletrônico que é o decaimento inverso do nêutron. O pósitron pode também estar do outro lado da reação como um elétron.

**2º Passo: Deuteron mais próton produzindo  ${}^3\text{He}$ .**



O deuteron produzido no primeiro passo junta-se a outro próton formando núcleo de hélio com massa atômica três. Da junção do deuteron com o próton é liberado um fóton. Para o hélio produzido temos três opções de junções, ilustradas a seguir.

**3º Passo:  ${}^3\text{He}$  produzindo partícula  $\alpha$  ou  ${}^7\text{Be}$ .**



O  ${}^3\text{He}$  pode se juntar com algum outro próton e formar uma partícula  $\alpha$  (núcleo de hélio com massa igual a quatro). Dessa junção, o próton é convertido em um neutron e são emitidos um pósitron e um neutrino eletrônico. A segunda opção são dois núcleos de  ${}^3\text{He}$  formando uma partícula  $\alpha$  e dois prótons. O núcleo de  ${}^3\text{He}$  ainda pode se juntar a partícula  $\alpha$  produzida para formar um núcleo de  ${}^7\text{Be}$  (berílio de massa sete) com emissão de um fóton.

**4º Passo: Berílio produzindo partícula  $\alpha$ .**



O berílio pode absorver o elétron e produzir lítio que por sua vez ao se juntar com um próton gera duas partículas  $\alpha$ . O berílio pode se juntar também a um próton e gerar um fóton mais um átomo de boron que se transforma em um estado excitado do berílio (com massa oito) junto a um pósitron e um neutrino eletrônico. O berílio excitado forma um par de partículas  $\alpha$ .

Dentre as partículas formadas pela cadeia pp, emergem praticamente intactos pela passagem através do Sol. Portanto, são importantes para o estudo do interior do Sol.

Na cadeia pp, os neutrinos produzidos de cada reação do processo possuem diferentes faixas de energias que começam da reação inicial  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ . Em 1968, Ray Davis registrou o primeiro experimento a medir neutrinos Solares usando um grande tanque de cloro na mina de Homestake localizada na Dakota do Sul (as minas são utilizadas por estarem no subsolo, isso evita que os raios cósmicos interfiram de forma significativa nos resultados). A forma como o experimento funciona é através da interação de um neutrino pelo cloro transformando-o em argônio pela reação  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e$ , que é basicamente uma reação do tipo  $\nu_e + n \rightarrow p + e$ . Foi deste experimento que surgiu o problema do neutrino Solar, o experimento de Davis coletava os átomos de argônio, que deveria ser próximo do número que Bahcall estimou, entretanto o experimento forneceu apenas um terço deste número.

## 1.2 Oscilação Padrão de Neutrinos

No começo, muitos cientistas acreditavam no possível erro experimental para explicar o problema obtido entre o cálculo de Bahcall e os argônios do experimento de Davis. Contudo, experimentos subsequentes com diferentes formas de detecções mostraram que o resultado de Davis persistia confirmando assim o déficit.

Bruno Pontecorvo em 1968 sugeriu que os neutrinos eletrônicos eram transformados em diferentes espécies durante a viagem do Sol à terra, como por exemplo em anti-neutrinos ou neutrinos muônicos na qual os experimentos não tinham sensibilidade para detecção, esse mecanismo foi chamado de oscilação de neutrinos. A teoria se baseia na mecânica quântica de mistura de estados que classicamente seria como osciladores acoplados.

Sabemos que existem três tipos de neutrinos hoje em dia, isto torna o cálculo mais complicado. Essencialmente temos que os neutrinos interagem como auto estados de sabor,  $\nu_e$  viaja com elétron,  $\nu_\mu$  com múon e  $\nu_\tau$  com tau. Elas se propagam como auto estados de massa, são os neutrinos físicos  $\nu_1, \nu_2$  e  $\nu_3$ . O auto-estado de sabor é uma combinação linear com os aut-estados de massa (formas oscilatórias), cada um dos sabores de neutrinos carregam três diferentes massas em proporções diferentes (como batimentos de um oscilador acoplado).

Esta mesma mistura pode ser representada com quarks. Os auto estados de sabor podem ser expressos em função dos auto estados de massa, a partir de uma transformação vetorial, representados de acordo com a matriz seguinte as vezes chamada de *matriz PMNS*:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}}_{\text{Base de Sabor}} = \underbrace{\begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix}}_{\text{Base de Mistura}} \underbrace{\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}}_{\text{Base de Massa}} \rightarrow \nu^{(s)} = U\nu^{(m)}. \quad (5)$$

Os coeficientes da matriz  $U$  também chamada de matriz de mistura fornece a já comentada proporção de cada neutrino físico que compõe um neutrino de sabor. Tal matriz é unitária por definição  $UU^\dagger = I$ , sendo  $I$  a matriz identidade. Isto garante a ortonormalidade dos estados físicos, o que implica que os estados de sabor são também ortonormais.

A matriz de mistura pode ser expressa em termos dos três ângulos de mistura e o fator de fase  $\delta$ :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{13}c_{12}s_{23}e^{+i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{13}c_{12}s_{23}e^{+i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{12}c_{23}e^{+i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{13}s_{12}c_{23}e^{+i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Onde  $\theta_{ij}$  é o ângulo de mistura entre  $i$ -ésimo e  $j$ -ésimo estado de massa,  $s_{ij} = \text{sen}\theta_{ij}$  e  $c_{ij} = \text{cos}\theta_{ij}$ . A fase de Dirac,  $\delta$ , permite a possibilidade de violação CP nos modelos de aparecimento de neutrino. A representação da matriz de mistura pode também ser escrita em uma forma fatorada [7]:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{+i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Resolvendo o problema com a eq.(7) obtemos uma forma mais geral da probabilidade de sobrevivência. Desta forma mais geral, apenas um termo sobrevive por ser quantitativamente muito maior que os outros. Portanto, a probabilidade de sobrevivência é basicamente:

$$P_{\mu \rightarrow \mu} = 1 - \text{sen}^2 2\theta_{32} \text{sen}\left(1,27 \cdot \Delta m_{23}^2 \cdot L/E\right). \quad (9)$$

Na eq.(9) acima já estamos considerando que o neutrino é uma partícula relativística. No último trabalho pibic, o desenvolvimento destas contas foram colocadas de forma mais elaborada.

### 1.3 Neutrinos Massivos

Os neutrinos estão divididos em três tipos de massa (diferença das massas ao quadrado na verdade) :

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2, \quad \Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2, \quad \Delta m_{31}^2 = m_3^2 - m_1^2. \quad (9)$$

Onde temos que  $\Delta m_{31}^2 = \Delta m_{21}^2 + \Delta m_{32}^2$ . Na hierarquia normal, os experimentos de oscilação mostram que uma das massas é pequena e as outras são maiores. Os neutrinos massivos  $\nu_1$  e  $\nu_2$  estão estreitamente espaçados entre si e  $\nu_3$  está mais isolado. Esta estrutura é algo análogo dos léptons carregados ( $e$  e  $\mu$  possuem massas parecidas,  $\tau$  possui massa muito maior), e dos quarks ( $d$  e  $s$  possuem massas próximas,  $b$  possui uma massa grande;  $u$  e  $c$  possuem massas relativamente próximas, e  $t$  possui uma massa muito grande). Devido a isso a massa de  $\nu_3$  é maior quando comparada com a dos outros dois neutrinos. Pode haver uma hierarquia invertida do espectro do neutrino com  $\nu_3$  menor do que  $\nu_1$  e  $\nu_2$ .

### 1.4 Evidências Experimentais

A Colaboração Super-Kamiokande (SuperK) apresentou seus resultados de neutrinos Solares em 2001. SuperK usa água como detector; o detector é sensível a neutrinos muônicos e tauônicos tão bem quanto para neutrinos eletrônicos (Y. Ashie et al, 2005). O processo ocorre de um espalhamento elástico neutrino-elétron  $\nu + e \rightarrow \nu + e$  onde o elétron emitido na água é detectado pela radiação de Cerenkov. O neutrino detectado pode ser de qualquer tipo, entretanto, a eficiência de detecção é 6,5 vezes maior para neutrinos eletrônicos do que para outros tipos. Neste experimento foi registrado aproximadamente 45% do número que havia sido previsto, claro que pra afirmar isso, foram considerados que todos neutrinos ainda se mantinham eletrônicos. Então, se algum neutrino tivesse sido transformado em outro tipo, poderia o fluxo total real ser maior. De fato, devemos nos lembrar que o experimento era menos eficiente na detecção em outros sabores e por isso não se sabe qual é a fração de neutrinos que são convertidos. Para isso, sabia-se que os dados do Homestake eram puramente de neutrinos eletrônicos, contudo, as condições em que Homestake era realizado impossibilitava uma comparação eficiente com SuperK.

Um certo experimento (SNO) em Sudbury Neutrino Observatory usava um mecanismo semelhante ao do SuperK, ao invés de água comum, utilizava-se de água pesada ( $D_2O$ ). Isso provoca uma diferença na detecção. O uso de água pesada faz surgir duas novas reações devido aos

nêutrons presentes e isto possibilita a separação entre as medidas do fluxo de neutrinos eletrônicos e o fluxo total de neutrinos. Em 2001, a colaboração SNO publicou seus primeiros resultados e obtiveram 35% do fluxo previsto, ou seja, fazendo comparação com SuperK, 10% dos neutrinos detectados deveriam ser as partículas convertidas. Porém, sabemos que o detector era 6,5 vezes mais eficiente para neutrinos eletrônicos, por isso, se eles foram  $\nu_e$ , então, foram responsáveis por  $6,5 \times 10 = 65\%$  e  $35 + 65 = 100$ , ou seja, os resultados são consistentes (J. Hosaka et al, 2006). Apesar de ser relativamente simples o raciocínio anterior, ficou claro para muitos pesquisadores que o problema do neutrino Solar estava resolvido e que a oscilação de neutrinos estava comprovada. Entretanto, os que não estavam convencidos argumentavam que a utilização de diferentes instrumentos de medidas tomadas sobre diferentes condições não serviam de modo convincente. Portanto, a proposta que se seguiu foi a de se utilizar um experimento que fornecesse medidas do fluxo total e do fluxo de neutrinos eletrônicos em uma mesma condição experimental. Os resultados foram melhorados pelo próprio SNO em 2002 quando foi publicado os parâmetros preliminares do modelo de oscilação para o caso de neutrinos Solares.

O Sol, obviamente, não é a única fonte de neutrinos, existem também fontes de neutrinos terrestres produzidos por materiais radioativos, reatores nucleares, e aceleradores de partículas, fontes atmosféricas pelos raios cósmicos e fontes astronômicas, as supernovas.

Foi possível estudar outras fontes de neutrinos como os neutrinos atmosféricos. Apesar dos experimentos de neutrinos atmosféricos não terem relação com o problema dos neutrinos Solares, o fenômeno que ocorre com os neutrinos atmosféricos são os mesmos só que em contextos diferentes.

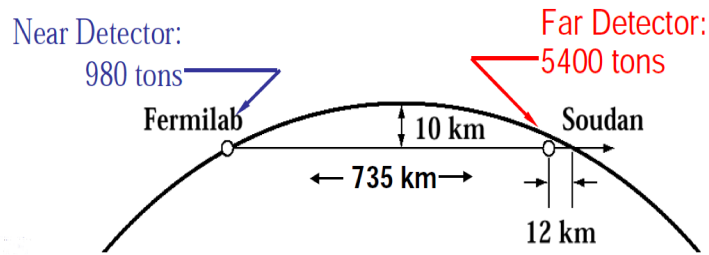
O experimento MINOS foi e ainda é um grande contribuidor para os mistérios que envolvem os neutrinos. O experimento MINOS estuda o setor atmosférico e produziu resultados importantes em relação aos fenômenos que ocorrem com os neutrinos.

## 1.5 O Experimento MINOS

O experimento MINOS em funcionamento desde 2005 foi proposto inicialmente para estudar o comportamento anômalo dos neutrinos. Não demorou muito para obter resultados que consolidaram o fenômeno da oscilação como sendo o modelo melhor dentre todos que explicava o comportamento anômalo dos neutrinos (J. Kopp, P. A. N. Machado, and S. J. Parke, 2010).

O experimento está localizado no Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory) a nordeste do estado de Illinois, EUA. O MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) é um experimento proposto para medir os parâmetros de oscilação de neutrinos no setor atmosférico, via os eventos de desaparecimento de neutrinos muônicos. É composto de uma linha de feixe de neutrinos (NuMI-Neutrinos at the Main Injector), dois cintiladores magnetizados de plástico e

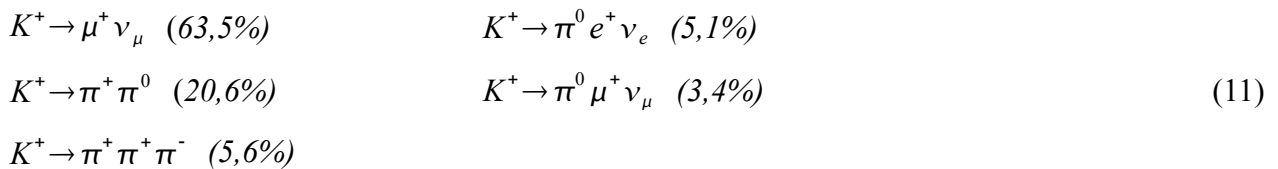
detectores de aço. Os dois detectores que o experimento constitui são conhecidos por Near Detector (Fermilab) pesando 980 toneladas e Far Detector (Soudan, Minnesota, EUA) com 5400 toneladas e estão distanciados por 734 km, e 713 metros abaixo do Solo, veja fig.(1).



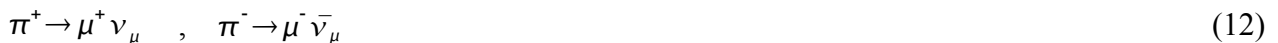
**Figura 1:** Localização do MINOS, detectores e suas profundidades.

Os resultados publicados pelo MINOS de desaparecimento de neutrinos muônicos descrevem bem o modelo de oscilação e desfavorecem os modelos alternativos como decaimento puro dentro de partículas mais leves e a descoerência quântica de neutrinos.

É utilizado uma quantidade de prótons no alvo (POT - protons on target) para produzir o feixe NuMI. Da colisão com folha de grafite é produzido várias partículas das quais uma grande quantidade é considerada ruído. Utilizando-se campo magnético, as partículas podem ser separadas. A configuração otimizada para neutrinos de NuMI focaliza em  $\pi^+$  e  $K^+$ , resultando em um feixe composto de 92,9% de  $\nu_\mu$ , 5,8% de  $\bar{\nu}_\mu$ , e 1,3% de  $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ , devido aos seguintes decaimentos (P. Adamson, 2010):



Os números entre parênteses são as probabilidades (razão de ramificação) do determinado canal. As partículas  $\pi^+$  e  $\pi^-$  decaem em praticamente 100% das vezes.



Atualmente, o experimento está funcionando em uma configuração de anti-neutrinos, ou seja, por analogia, nessa configuração o experimento focaliza  $\pi^-$  e  $K^-$ . Isto está sendo feito para se verificar a simetria dos resultados, entretanto, como é utilizado prótons para produção do feixe, a porcentagem de  $\bar{\nu}_\mu$  produzida não é a mesma de  $\nu_\mu$  na configuração neutrinos, sendo muito inferior a 92,9%, causando uma diferença estatística nos resultados.



## 2 OBJETIVOS

Neste trabalho procuramos estudar o modelo de oscilação de neutrinos e o experimento MINOS. Foram estudados de forma menos intensa outros experimentos similares ao MINOS com intuito de observar a relação entre os resultados publicados de desaparecimento de neutrinos muônicos (D. G. Michael, 2006). Sabemos que os parâmetros publicados pelos diversos experimentos devem ser próximos uns dos outros. Nesse passo, foram reproduzidos os resultados do MINOS (P. Adansom, 2008) e feito um processo de verificação dos dados extraídos por comparação com os dados originais. Fizemos um estudo de interações não-padrão e propormos uma oscilação extra no modelo de oscilação acrescentando, portanto, dois outros parâmetros e pudemos fazer ajustes dos dados extraídos com intuito de melhorar a concordância entre o modelo e os resultados experimentais.

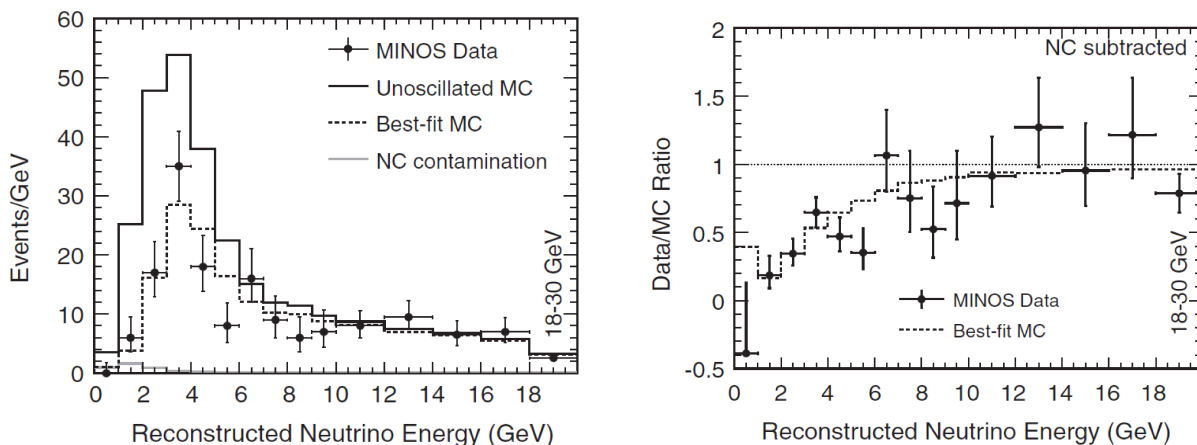
## 3 METODOLOGIA

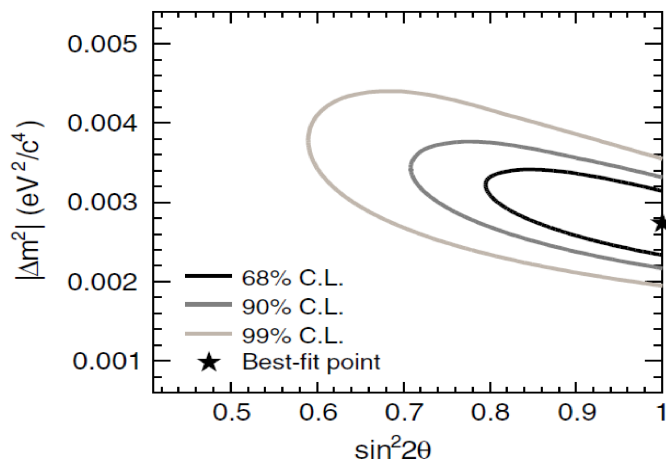
Extraímos os dados (P. Adansom, 2008) pelo método de digitalização dos pontos reproduzidos pelos resultados publicados. Os dados extraídos foram plotados e foi feita uma verificação da qualidade da extração através do teste de  $\chi^2$ . A simulação e os gráficos foram feitos no pacote *R*.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Evolução dos Resultados do MINOS

Como já dito, o MINOS começou a funcionar em 2005, desde então vem divulgando seus resultados e melhorando os parâmetros de oscilação cada vez mais com o aumento estatístico. Em



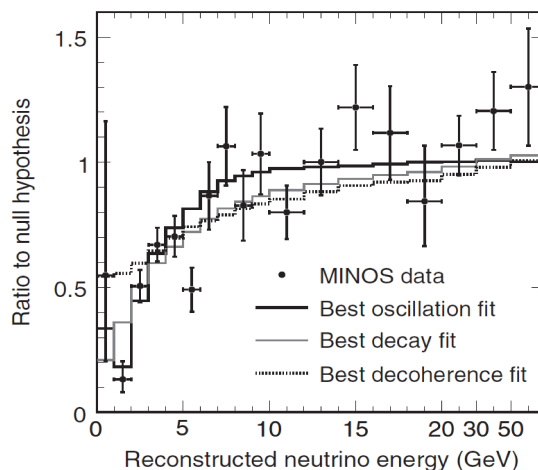
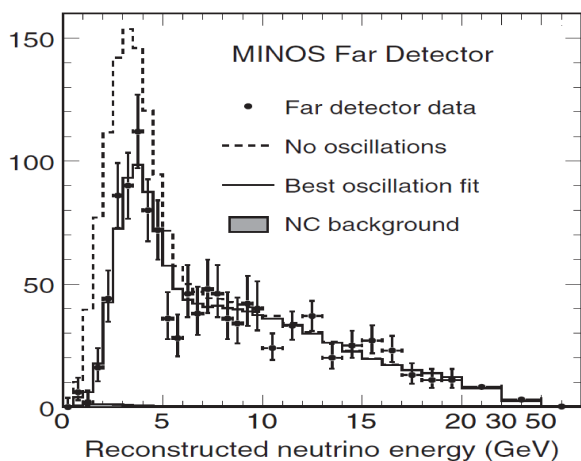


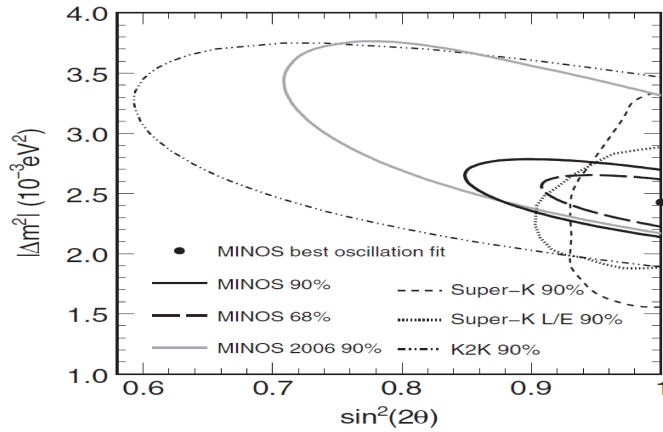
**Figura 2:** Resultados de desaparecimento de  $\nu_\mu$  no experimento MINOS em 2006.

2006 foram publicados os seguintes resultados (D. G. Michael, 2006), fig.(2).

A estatística utilizada foi de  $1,27 \times 10^{20}$  POT, e os parâmetros obtidos para esta estatística foram  $\Delta m_{23}^2 = 2,74 \times 10^{-3} \text{eV}^2/c^4$  e  $\sin^2 2\theta_{23} = 0,87$ . Foram observados 215 eventos e eram esperados  $336 \pm 14$  eventos caso não houvesse oscilação. O gráfico, fig.(2), que nos permite observar a relação  $\Delta m_{23}^2$  por  $\sin^2 2\theta_{23}$  mostra a região onde podemos encontrar estes dois parâmetros e marca o melhor ponto nessa região que produz o melhor ajuste.

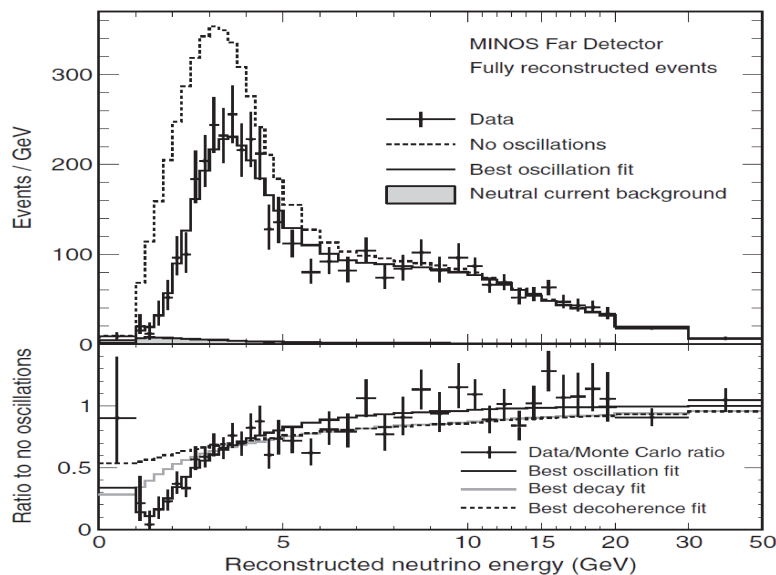
Dois anos mais tarde, foram publicados novos resultados de desaparecimento de neutrinos muônicos. Para estes resultados foram utilizados uma estatística de  $3,36 \times 10^{20}$  POT, os parâmetros publicados foram  $\Delta m_{23}^2 = 2,43 \times 10^{-3} \text{eV}^2/c^4$  (68% C.L) e  $\sin^2 2\theta_{23} = 1,00$  (90% C.L), com  $\chi^2 = 90$  por 97 graus de liberdade. O desfavorecimento para o modelo de decaimento é de  $3,7\sigma$  e para descoerência é de  $5,7\sigma$ . Foram observados 848 eventos e eram esperados  $1065 \pm 60$  eventos caso não houvesse oscilação. Com o aumento da estatística pode-se ver através dos gráficos da fig.(3) que os resultados estão melhores (P. Adansom, 2008).





**Figura 3:** Resultados de desaparecimento de neutrinos muônicos de 2008.

Neste ano, a colaboração MINOS publicou seu mais recente e último resultado na configuração  $\nu_\mu$ . Foram utilizados uma estatística de  $7,25 \times 10^{20}$  POT e foram observados 1986 eventos, sendo o esperado, 2451 eventos se não houvesse oscilação, mostrando que com o aumento da estatística, a oscilação fica ainda mais evidente. O desfavorecimento com relação aos modelos de decaimento de descoerência foram respectivamente  $7\sigma$  e  $9\sigma$ , ou seja, o aumento estatístico contribuem para um desfavorecimento ainda maior dos outros modelos. Os parâmetros obtidos foram  $\Delta m_{23}^2 = 2,32 \times 10^{-3} eV^2/c^4$  e  $\sin^2 2\theta_{23} = 1,00$ . Observe nos gráficos da fig.(4) abaixo que com uma estatística maior, o melhor ajuste foi melhorado significativamente.



**Figura 4:** Resultados de desaparecimento de neutrinos muônicos de 2011.

## 4.2 Interações Não Padrão (NSI) e a Fenomenologia

No último tópic foram apresentados os resultados de desaparecimento de neutrinos muônicos com intuito de mostrar a evolução destes resultados e como a oscilação padrão se ajustava ainda mais aos dados de acordo com aumento da estatística e aumentava o desfavorecimento de outros modelos.

A aceitação da oscilação padrão é quase que unânime pela comunidade científica, entretanto, há uma região onde a oscilação não se adequa tão bem aos dados permitindo a possibilidade de acrescentar algum tipo de interação para que os resultados sejam melhorados.

Podemos neste caso, reconsiderar por exemplo os modelos de decaimento (V. Barger et al, 1999 ), e descoerência (G. L. Fogli et al, 2003) dados respectivamente pelas equações abaixo:

$$P = \text{sen}^4 \theta_{23} + \cos^4 \theta_{23} \times \exp(-\alpha L/E) \quad (13)$$

onde  $\alpha = m^2/\tau_0$  e

$$P = 1 - \frac{\text{sen}^2 2\theta_{23}}{2} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\mu^2 L}{2E_\nu}\right) \right] \quad (14)$$

onde  $\mu^2$  é um parâmetro de descoerência.

Para sermos mais claros, a ideia seria propor que além da oscilação houvesse algo a mais, como por exemplo um decaimento ou descoerência quântica.

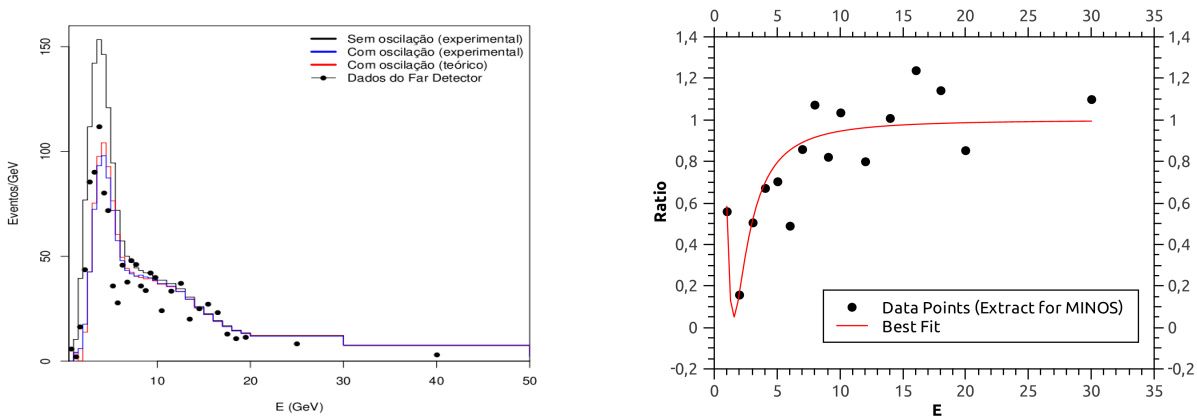
Mostramos na seção (1.2) que a oscilação em sua forma geral possui termos que envolvem neutrinos eletrônicos, entretanto, estes termos podem ser desprezados em relação ao termo que envolve neutrinos muônicos com tauônicos.

Na tentativa de melhorar os resultados publicados pelo MINOS podemos acrescentar uma oscilação não padrão na oscilação padrão. Esta oscilação não padrão seria uma interação desconhecida e seus parâmetros não teriam relação com  $\Delta m_{21}^2$  e  $\Delta m_{31}^2$  e seus respectivos senos.

Na nossa investigação trabalhamos com os resultados de 2008 (P. Adamson et al, 2008), reproduzimos os resultados do MINOS e fizemos um ajuste com a oscilação padrão para compararmos os nossos resultados com o do MINOS e obtemos:

Tabela 1: Resultados dos ajustes com oscilação padrão.

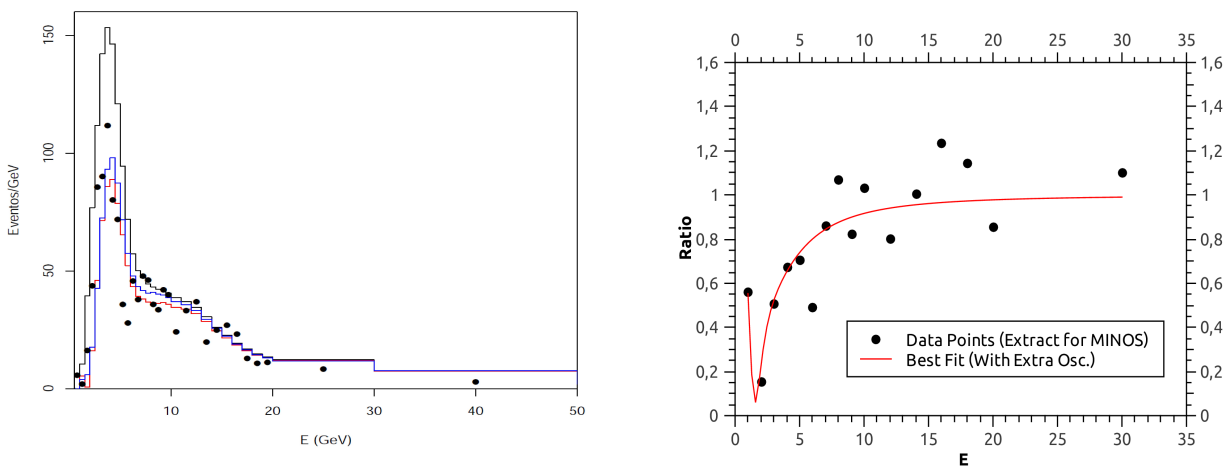
$\chi^2$	$\bar{R}^2$	$\Delta m_{23}^2$	$\text{sen}^2 2\theta_{23}$
26/31	0,63	$2,59 \cdot 10^{-3} \pm 1,7 \cdot 10^{-4}$	$0,952 \pm 0,107$



**Figura 5:** Resultados obtidos usando oscilação padrão.

Os parâmetros obtidos são aceitáveis e comparando o teste do  $\chi^2$  com o publicado vemos que a extração de dados foi satisfatória.

Com esta verificação pudemos usar os resultados com segurança para um estudo fenomenológico. Acrescentamos uma nova oscilação na oscilação padrão e com os conhecimentos adquiridos até aqui, procuramos fazer um ajuste coerente com os dados, veja fig.(6) e tabela (2).



**Figura 6:** Resultados obtidos utilizando oscilação não padrão.

Tabela 2 : Resultados dos ajustes com interações não padrões.

$\chi^2$	$\bar{R}^2$	$\Delta m_{23}^2$	$\text{sen}^2 2\theta_{23}$	$\Delta m_{2x}^2$	$\text{sen}^2 2\theta_{2x}$
28/31	0,61	$2,58 \cdot 10^{-3} \pm 2,4 \cdot 10^{-4}$	$0,68 \pm 0,01$	$7,94 \cdot 10^{-3} \pm 3,14 \cdot 10^{-3}$	$0,019 \pm 0,006$

Visualmente, percebemos que o acréscimo de uma oscilação não padrão pode sim melhorar os resultados já publicados, entretanto, propor uma interação desconhecida exige cuidados especiais, pois não sabemos o que seria esta interação e portanto não temos como saber a princípio a

região em que se encontram estes parâmetros. Temos que fazer um "chute", encontrar uma região onde os resultados comecem a melhorar e então estudar profundamente esta região quando encontrada.

Analizando o  $\chi^2$  vemos que este primeiro resultado ficou um pouco pior do que o do MINOS, entretanto, por termos mais parâmetros a ajustar, o  $\bar{R}^2$  foi melhorado, algo já esperado. Vemos a possibilidade de melhorar estes resultados apesar deste resultado preliminar.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho mostramos como surgiram os mistérios que envolvem os neutrinos começando pelo problema do neutrino Solar e as ideias desenvolvidas para explicar este fenômeno. Foram apresentados alguns experimentos de neutrinos e focamos principalmente no experimento MINOS. Apresentamos o modelo de oscilação padrão e um estudo fenomenológico de interações não padrão com dados publicados pelo MINOS.

Procuramos melhorar os resultados e adicionar uma interação não padrão. Para os próximos passos, procuraremos determinar a região de contorno onde se encontram os melhores parâmetros ajustados e trabalharemos também com os últimos resultados publicados (P. Adamson et al, 2011). Podemos considerar os outros modelos nessa pesquisa tal como decaimento e descoerência.

## 6 REFERÊNCIAS

P. Adamson et al. [MINOS Collaboration]. **Measurement of Neutrino Oscillations with the MINOS detectors in the NuMI beam.** Phys. Rev. Lett. 101, 131802, 2008.

P. Adamson et al. [MINOS Collaboration]. **Measurement of the Neutrinos Mass Splitting and Flavor Mixing by MINOS.** Phys. Rev. Lett. 106, 181801, 2011.

P. Adamson et al. [MINOS Collaboration]. **Neutrino and Antineutrino Inclusive Charged-Current Cross Section Measurements with the MINOS Near Detector.** Phys. Rev. Lett. 106, 181801, 2010.

V. Barger et al. **Neutrino Decay as an explanation of atmospheric neutrino observations.** Phys. Rev. Lett. 82, 13, 1999.

D. G. Michael et al. [MINOS Collaboration]. **Measurement of the Ratios of Branching Fractions  $B_{\tau}$ .** Phys. Rev. Lett. 96, 191801, 2006.

J. Hosaka et al. Phys. Rev. **Solar Neutrino measurements in SuperK**. D 73, 112001, 2006.

J. Kopp, P.A.N. Machado, and S. J. Parke. **Interpretation of MINOS data in terms of nonstandard neutrino interactions**. Phys. Rev. D 82, 113002, 2010.

G. L. Fogli et al. **Status of atmospheric neutrinos  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillations and decoherence after the first k2k spectral data**. Phys. Rev. D, 2003.

E. Roulet. Phys. Rev. **Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein effect with flavor-changing neutrino interactions**. D 44, R935, 1991.

L. Wolfenstein. Phys. Rev. D. **Neutrino oscillations in matter**. 17, 2369, 1978.