



Física da Oscilação de Neutrinos

Juliana T. de Araújo*, Orlando L. G. Peres

Resumo

Neste trabalho introduzimos o formalismo da teoria de oscilação de neutrinos e apresentamos a probabilidade de sobrevivência para duas famílias no vácuo, na matéria uniforme e não uniforme. Consideramos também o caso de três neutrinos no vácuo. Nesse modelo, o neutrino pode ser escrito como uma mistura de sabores, o que faz com que a partícula oscile entre as três famílias durante seu trajeto. Esse fenômeno pode resolver o *problema do neutrino solar*, que constatou um desaparecimento no fluxo de neutrinos eletrônicos, mas não no fluxo total (levando em conta a contribuição de todos os sabores). Ao calcular as probabilidades, vemos que elas dependem da diferença do quadrado das massas, o que vai de encontro com o Modelo Padrão, pois este não previa massa para os neutrinos.

Palavras-chave:

Neutrinos, oscilação, mistura de sabores.

Introdução

Os neutrinos são léptons com massa muito pequena que não possuem carga elétrica e, embora sejam muito abundantes no universo, interagem muito pouco com a matéria. Eles podem ser classificados em três sabores: neutrino do elétron, múon e tau, sendo que o primeiro tipo é abundantemente produzido no Sol.

Muitos experimentos tentaram medir o fluxo de neutrinos solares que chegavam na Terra, detectando menos partículas do que o previsto pelo Modelo Solar Padrão. Contudo, o *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO)¹ mediu o fluxo total de neutrinos solares, obtendo um resultado de acordo com a previsão teórica. Assim, para explicar os resultados experimentais, foi proposto o fenômeno de oscilação de sabores, em que o neutrino pode ser escrito como uma mistura de sabores. Isso faz com que o neutrino oscile entre as três famílias durante sua trajetória. A principal consequência desse modelo é o requerimento da massa do neutrino, fato que não era considerado pelo Modelo Padrão.

Na teoria de oscilação em três famílias, há um parâmetro ainda não determinado que descreve a violação de simetria carga-paridade (CP), a qual acredita-se ser a causa do universo ter mais matéria do que anti-matéria. Assim, investigações para a confirmação de violação de CP na oscilação de neutrinos são muito importantes, pois seria um grande passo para explicar a assimetria bariônica no universo.

O objetivo desse trabalho é apresentar a fundamentação teórica do modelo e calcular a probabilidade de ocorrer oscilação no vácuo considerando conversão entre dois e três sabores, bem como na matéria uniforme e não uniforme para duas famílias.

Resultados e Discussão

Na teoria de oscilação existem os neutrinos físicos (auto-estados de propagação ou de massa) com massas m_1 , m_2 e m_3 bem definidas e os neutrinos de sabor (auto-estados de interação). Eles formam duas bases, cujas componentes se relacionam da forma:

$$\nu_\alpha = \sum_{i=0}^3 U_{\alpha i} \nu_i, \text{ onde } \alpha = e, \mu \text{ ou } \tau \quad (1)$$

e U é uma matriz unitária que depende do ângulo de mistura, da diferença do quadrado das massas e, para três neutrinos, também da fase de violação de CP (δ).

Para obtermos a probabilidade de sobrevivência, precisamos resolver a equação de Schrödinger utilizando o Hamiltoniano do meio em questão. Assim, para o caso do vácuo e considerando apenas dois sabores, temos:

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m^2 x / 4E) \quad (2)$$

Na matéria uniforme, a fórmula é análoga, apenas substituindo a diferença de massas e o ângulo de mistura pelos mesmos parâmetros na matéria. Já para a matéria não uniforme no regime adiabático, onde $d\tilde{\theta}/dx \approx 0$, e sem considerar a interferência quântica, temos (onde o '0' significa posição de origem):

$$P_{ee}^{(ad)} = 1/2(1 + \cos 2\tilde{\theta}_0 \cos 2\theta) \quad (3)$$

E no regime não adiabático, no qual pode haver transições entre os estados $\tilde{\nu}_1$ e $\tilde{\nu}_2$, temos:

$$P_{ee} = 1/2[1 + (1 - 2X)^2 \cos 2\tilde{\theta}_0 \cos \theta], \quad (4)$$

onde X é a probabilidade de haver transição entre $\tilde{\nu}_1$ e $\tilde{\nu}_2$. Por fim, se $\Delta m^2_{31} \approx \Delta m^2_{32}$, P_{ee} no vácuo para 3 v:

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \cos^4 \theta_{13} \sin^2(\Delta m^2_{21} / 4E) - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta m^2_{32} / 4E) \quad (5)$$

Conclusão

Portanto, a principal consequência do modelo é que a oscilação é induzida pela diferença de massa dos neutrinos. Além disso, verificamos da equação (2) que o comprimento de oscilação aumenta com a energia e diminui com o aumento de Δm^2 . Já para a matéria não uniforme, não temos de fato uma oscilação, pois a probabilidade de sobrevivência não evolui com a distância. Por fim, temos que a equação (5), para o caso do elétron, se reduz à probabilidade para dois neutrinos quando fazemos a aproximação $\theta_{13} \ll 1$, o que de fato ocorre na natureza.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Orlando Peres por me orientar e ao CNPq por ter apoiado e fomentado esse projeto.

¹ SNO Collaboration, <http://www.sno.phy.queensu.ca>