

# Entendendo a oscilação de neutrinos usando a analogia de precessão de spin

Palavras chaves: Neutrinos, física de partículas, precessão de spin

Sabrina Camargo Zani    IMECC - Unicamp

Orlando L. G. Peres (Orientador)    IFGW - Unicamp

## 1 Introdução

O neutrino é uma partícula elementar, isto é, um constituinte indivisível da matéria. Ele não dispõe de carga elétrica, então não sente a força eletromagnética, nem de carga de cor, então também não interage via força forte, e possui uma massa tão pequena que, até alguns anos atrás, acreditava-se ser inexistente (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005). A existência dessa partícula foi inicialmente sugerida em 1931 pelo físico austríaco W. Pauli como solução para o impasse da conservação de energia no decaimento radioativo beta encontrado por J. Chadwick (MIGUEZ, 2010).

Por causa de suas características, o neutrino é muito difícil de ser detectado, já que interage apenas via força fraca, a qual tem bósons mediadores massivos, o que limita muito seu alcance (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005). Então a ideia de sua existência foi, a princípio, encarada com ceticismo pela comunidade científica. Mas, mais adiante, E. Fermi formulou uma teoria para o decaimento beta que envolvia essa nova partícula, que foi considerada bastante consistente (MIGUEZ, 2010).

Foi apenas em 1956 que um experimento de C. L. Cowan e F. Reines (COWAN et al., 1956) obteve sucesso detectando antineutrinos gerados por um reator nuclear. Para isso foi usado um tanque de cerca de 1400 litros de água com cloreto de cádmio. As anti-partículas foram detectadas a partir das reações de decaimento de  $\beta$ -inverso,

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (1)$$

que ocorriam no detector (MIGUEZ, 2010).

Ainda no século XX, foi notado que os neutrinos podem ser classificados em três tipos (sabores) de acordo com o lépton que os acompanha na interação fraca. O primeiro, presente no decaimento beta, é o neutrino do elétron ( $\nu_e$ ), além dele existem o neutrino do múon ( $\nu_\mu$ ) e o neutrino do tau ( $\nu_\tau$ ). Posteriormente, foi proposto que cada uma dessas partículas é, na verdade, uma

superposição de estados quânticos dos chamados *neutrinos físicos* ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ), que seriam partículas com massa  $m_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , e sem cargas de cor ou elétrica. Assim, os neutrinos  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  são criados e aniquilados pela interação via força fraca (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005).

A partir das reações nucleares que acontecem em sua superfície, o Sol produz neutrinos de elétron. O fluxo e espectro desses neutrinos é previsto pelo *Modelo Solar Padrão* (MSP). Porém, desde 1966, com o experimento de Homestake, foi mostrado que o fluxo detectado não confere com o previsto pelo MSP.

Até 2002 as taxas de capturas de neutrinos foram: pelo experimento de Homestake, que utiliza o processo em que um neutrino eletrônico interage com um átomo de cloro como método de detecção, formando um átomo de argônio e um elétron,  $(34 \pm 7)\%$  da prevista pelo MSP; pelos experimentos SAGE (Soviet-American Gallium Experiment) e Gallex - atualmente chamado de GNO, que utilizam o processo em que um neutrino interage com um átomo de gálio formando um elétron e um átomo de germânio como método de detecção foi  $(55 \pm 6)\%$  do previsto (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005); pelo experimento Super-Kamiokande, um dos pioneiros na utilização do método de espalhamento de elétrons por neutrinos como princípio de detecção, foi  $(48 \pm 2)\%$  do previsto (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005).

No final de 2002, o experimento Sudbury Neutrino Observatory (SNO), no Canadá, foi capaz de medir não somente o fluxo de neutrinos de elétron mas também o dos outros dois sabores, neutrino do tau e neutrino do múon, que não procuravam ser detectados pelos outros experimentos. Para isso, foi usado o espalhamento de neutrinos em água pesada ( $D_2O$ ). Nela, a quantidade maior de nêutrons por molécula propicia as interações de *corrente neutra* (sem troca de cargas elétricas dos leptons iniciais e finais), que afeta igualmente os três sabores de neutrino (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005).

Assim como nos outros experimentos, no SNO foi detectado um déficit no fluxo de neutrinos eletrônicos, dessa vez de  $(35 \pm 2)\%$  do previsto pelo MSP. No entanto, o fluxo total de neutrinos - dos três sabores de neutrinos - foi  $(101 \pm 12)\%$  do esperado, uma taxa que condiz o MSP (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005). Ou seja, o fluxo que deveria ter apenas neutrinos eletrônicos, tem os três sabores de neutrinos.

## 2 Metodologia

O projeto foi desenvolvido a partir do estudo de diferentes literaturas, selecionadas para cada etapa pelo orientador. Esse estudo está foi feito a partir da leitura, apresentação e discussão das referências.

Os temas de tratados, em ordem, foram mecânica quântica (TOWNSEND, 2012a), princípios básicos da física de partículas (GRIFFITHS, 2008)- em especial o que é o neutrino e como ele se relaciona -, o modelo de oscilação de neutrino por diferença de massa (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005), a oscilação no vácuo e na matéria e a analogia com precessão de spin (TOWNSEND, 2012b).

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Oscilação de sabores de neutrinos

Em resposta ao problema do neutrino solar, surge a ideia da oscilação de neutrino, em que os neutrinos estariam sendo convertidos sucessivamente entre os três sabores no trajeto entre o Sol e a Terra. Dentre os vários modelos criados para explicar esse fenômeno, apenas o de *oscilação de neutrino induzida por diferença de massa*, uma junção do modelo de *oscilação no vácuo* com o efeito *Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW)* (MIKHEYEV; SMIRNOV, 1985; WOLFENSTEIN, 1978), foi capaz de reproduzir todos os dados experimentais disponíveis (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005).

Em mecânica quântica, "oscilação" é o nome dado para a dependência periódica das soluções no tempo ou no espaço. Esse tipo de solução é encontrado quando mede-se um observável que não é diagonal na base de auto-estados da Hamiltoniana (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005). Nesses casos, não estão bem definidos os valores das grandezas que não comutam com a grandeza que foi medida.

Como dito anteriormente, os neutrinos são superposições de estados quânticos dos neutrinos físicos. Estes têm massa bem definida, enquanto os neutrinos eletrônico, muônico e tauônico têm sabores bem definidos, mas não massas. Dessa maneira, não se pode determinar a energia e o sabor do neutrino ao mesmo tempo, o que nos leva ao fenômeno de oscilação. Em uma linguagem mais técnica, os neutrinos  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  são *auto-estados de interação* e os neutrinos físicos são *auto-estados de propagação*, e dizemos que o primeiro conjunto forma a *base de interação*, ou *base de sabor* ( $\nu^{(s)}$ ), e que o segundo forma a *base de massa* ( $\nu^{(m)}$ ) (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005).

Essas bases podem ser relacionadas por uma transformação unitária usando a chamada "matriz de mistura" ( $U$ ), conforme descrito em

$$\nu^{(s)} = U \nu^{(m)}. \quad (2)$$

Finalmente, a probabilidade de conversão de um neutrino de elétron em um neutrino de outro sabor no vácuo será dada então pela expressão (VALVIDIESSO; GUZZO, 2005)

$$P_{e\alpha}(t) = |\langle \nu_\alpha | \nu_e(t) \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta E}{2} t \quad (3)$$

### 3.2 Uma partícula de spin- $\frac{1}{2}$ em um campo magnético

A oscilação de neutrinos no vácuo pode ser descrita pela *equação de Schrödinger*

$$i \frac{d}{dt} \rho^s(t) = [H', \rho^s], \quad (4)$$

em que  $\rho^s$  é o operador matriz densidade e  $H'$  é a Hamiltoniana da oscilação no vácuo, ambos na base dos auto-estados de sabor. Para que haja oscilação de sabor, as massas dos neutrinos físicos devem ser não degeneradas,  $m_i \neq m_j$ , quando  $i \neq j$  (PRADELLA, 2018).

Usando a representação matricial de  $\rho^s$  e  $H'$  em termos das *matrizes de Pauli* e com mais

algumas manipulações, concluimos que

$$H' = -\frac{1}{2} \vec{\sigma} \cdot \vec{B} \quad \text{e} \quad \rho^s = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \vec{\sigma} \cdot \vec{S}), \quad (5)$$

em que  $\vec{B}$  é o vetor de componentes  $\text{Tr}(H' \sigma_k) = B_k$  e  $\vec{S}$  é o vetor de componentes  $\text{Tr}(\rho^s \sigma_k) = S_k$  (PRADELLA, 2018). Substituindo esses valores na Equação (4), encontramos

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times \vec{B}, \quad (6)$$

que é exatamente a equação de precessão de spin- $\frac{1}{2}$  ao redor de um campo magnético  $\vec{B}$  com fator giromagnético  $\gamma = 1$  (PRADELLA, 2018). Dessa maneira, podemos usar o último fenômeno como analogia para explicar a oscilação de sabores de neutrino.

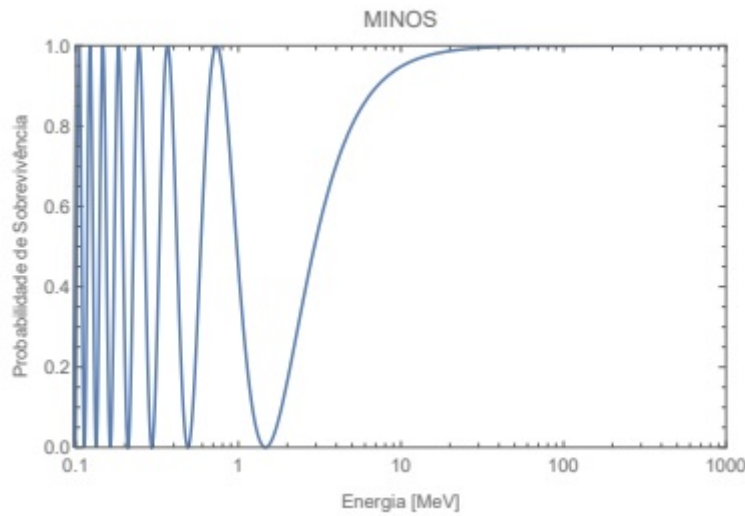


Figura 1: Probabilidade de oscilação de sabor para o experimentos MINOS

## 4 Conclusão

O modelo de oscilação de neutrino induzida por diferença de massa é uma solução para o problema do neutrino solar, que surgiu da incompatibilidade dos valores previstos pelo MSP com os dados experimentais. Matematicamente, é possível construir uma analogia entre a oscilação de sabores do neutrino e o que ocorre com uma partícula de  $spin - \frac{1}{2}$  em um campo magnético. O escopo do projeto é o estudo de um a partir do outro. Para isso, foi necessário um estudo preparatório da mecânica quântica e do neutrino a partir da física de partículas.

## Referências

COWAN, C. L. et al. Detection of the free neutrino: a confirmation. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 124, n. 3212, p. 103–104, 1956. ISSN 0036-8075. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/124/3212/103>.

- GRIFFITHS, D. J. *Introduction to elementary particles 2th ed.* Boston, MA: Wiley-Vch, 2008. 470 p.
- MIGUEZ, B. S. R. *Extraíndo Limites para o Fluxo Difuso de Neutrinos Não-Eletrônicos de Supernovas dos Dados do SNO.* 55 p. Dissertação (Mestrado em física) — Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2010. [Link para a Tese](#). Acesso em: 23 abril de 2021.
- MIKHEYEV, S. P.; SMIRNOV, A. Y. Resonance Amplification of Oscillations in Matter and Spectroscopy of Solar Neutrinos. *Sov. J. Nucl. Phys.*, v. 42, p. 913–917, 1985.
- PRADELLA, T. M. Sistemas de dois níveis em física de oscilação de neutrinos. In: *2019 Congresso de Iniciação Científica*. Campinas, SP: [s.n.], 2018. [Apresentação no 2019 Congresso de Iniciação Científica, Campinas, UNICAMP, Brasil](#).
- TOWNSEND, J. S. *A Modern Approach to Quantum Mechanics*. 2. ed. [S.l.]: University Science Books, 2012. 571 p.
- TOWNSEND, J. S. *Time Evolution*. [S.l.]: University Science Books, 2012.
- VALVIDIESSO, G. A.; GUZZO, M. M. Compreendendo a oscilação dos neutrinos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, v. 27, n. 4, p. 495–506, 2005.
- WOLFENSTEIN, L. Neutrino Oscillations in Matter. *Phys. Rev. D*, v. 17, p. 2369–2374, 1978.