



Estudo da oscilação de neutrinos com o software GLoBES

Study of neutrino oscillation with GLoBES Software

Isabel Maneira Ribas¹,

André Fabiano Steklain Lisbôa²

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo relatar as atividades desenvolvidas durante o período de iniciação científica, na qual houve um estudo dos neutrinos, ou seja, partículas elementares que possuem propriedades interessantes. Estudá-las pode trazer grandes contribuições para o desenvolvimento da ciência. Dessa forma, foram feitos cálculos da probabilidade de oscilação do neutrino e antineutrino do múon e fluxo dos três sabores, por meio de um pacote de software chamado GLoBES (“General Long Baseline Experiment Simulator”) que utiliza majoritariamente a linguagem de programação C++. Também foi utilizado o editor de código-fonte Visual Studio Code.

PALAVRAS-CHAVE: Experimento DUNE; GLoBES; oscilação de neutrinos.

ABSTRACT

The present work aims to report the activities developed during the period of scientific initiation, in which there was a study of neutrinos, that is, elementary particles that have interesting properties. Studying them can make great contributions to the development of science. In this way, calculations were made of the probability of oscillation of the neutrino and antineutrino of the muon and flux of the three flavors, using a software package called GLoBES (“General Long Baseline Experiment Simulator”) that mainly uses the C++ programming language. The Visual Studio Code source code editor was also used.

KEYWORDS: Experiment DUNE; GLoBES; neutrino oscillation.

INTRODUÇÃO

O Modelo Padrão é uma teoria que descreve as partículas fundamentais e como interagem para formar a matéria. Vamos nos concentrar em falar dos neutrinos que são partículas leves classificadas como léptons, não possuem carga elétrica e realizam interações por meio da força gravitacional e fraca. Eles vêm de diferentes fontes, por exemplo, o Sol, reatores nucleares, processos decorrentes de raios cósmicos e até mesmo de Supernovas. Perdendo apenas para os fótons, o neutrino é a 2ª partícula mais abundante no Universo. Porém, são difíceis de serem detectados, pois interagem pouco com a matéria. Dessa forma, são necessários grandes experimentos com fontes intensas para que seja possível estudá-los (ZUBER, 2012).

Em geral os experimentos funcionam da seguinte maneira: é utilizado toneladas de alguma substância, por exemplo, água pura que vai funcionar como um alvo para os neutrinos interagirem. A partir dessa interação são geradas outras partículas que deixam uma espécie de sinal no detector. Esses sinais são coletados e é feita uma reconstrução de energia para chegar naquele neutrino que interagiu no início (ZUBER, 2012).

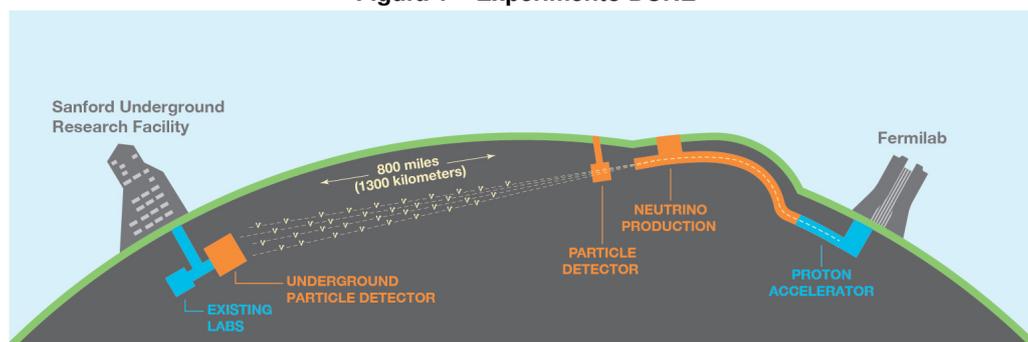
¹ Graduanda de licenciatura em física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: isabelmaneiraribas@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2885574932710919>.

² Docente no Departamento de Matemática. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: steklain@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6860638134885758>.

Existem 3 sabores de neutrinos: eletrônico ν_e , muônico ν_μ e tauônico ν_τ . Cada um está associado ao decaimento de um lépton carregado, ou seja, elétron, múon ou tau. Um fato muito interessante dessas partículas é que dependendo da distância que percorrem podem trocar de sabor, esse fenômeno é abordado pela teoria quântica de campos e chamado de oscilação de neutrinos. Os primeiros experimentos que provaram isso foi o Super-Kamiokande com T. Kajita e SNO com A. McDonald, motivo do prêmio Nobel de 2015 (FANTINI et al., 2018).

Atualmente, a grande expectativa nessa área é o Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), um experimento internacional de neutrinos que possui diversas colaborações das quais a UTFPR faz parte. Ele busca responder certas questões interessantes, por exemplo, o motivo pelo qual há mais matéria do que antimatéria e formação de buracos negros a partir de neutrinos de supernovas. O DUNE consistirá basicamente em 2 detectores: um perto da fonte do feixe de neutrinos e outro a uma distância de 1300 quilômetros, o que permitirá um estudo de oscilação, como mostra a Figura 1 (FERMILAB, 2020)

Figura 1 – Experimento DUNE



Fonte: Dune Science (2020).

Para a produção do feixe são acelerados prótons que colidem com um alvo de grafite, a partir da colisão são produzidas novas partículas que decaem e dão origem a múons e neutrinos muônicos. Por conseguinte, é colocado uma placa de aço que absorve os múons e como os neutrinos interagem pouco com a matéria eles passam, criando um feixe só de neutrinos muônicos.

O DUNE utiliza a tecnologia LArTPC (Liquid Argon Time Projection Chamber), que utiliza argônio líquido no sistema de detecção de neutrinos a fim de aumentar o alcance e precisão das medições. Sendo assim, o objetivo desse trabalho é relatar as atividades desenvolvidas durante a iniciação científica, na qual houve o estudo do Software chamado GLOBES (HUBER; LINDNER; WINTER, 2005; HUBER; KOPP et al., 2007) que permite fazer simulações de oscilações de neutrinos. Dessa maneira, utilizando essa ferramenta foram produzidos gráficos que representam probabilidades de oscilações e fluxos de neutrinos.

OSCILAÇÃO DE NEUTRINOS

Como dito anteriormente, existem 3 estados de sabor: $\nu_s = (\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$. Porém cada um destes estados é composto pela sobreposição de três estados de massa ou neutrinos físicos ν_1, ν_2, ν_3 , com massas m_1, m_2 e m_3 . Cada um dos estados de sabor podem ser descritos como uma combinação

linear dos estados de massa, por exemplo, o neutrino eletrônico (PRAIS, 2016):

$$\nu_e = U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3 \quad (1)$$

Em que U_{e1} , U_{e2} e U_{e3} são valores que representam "o quanto" que cada neutrino físico compõe o neutrino do elétron. De forma geral:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Podemos escrever esta relação da forma

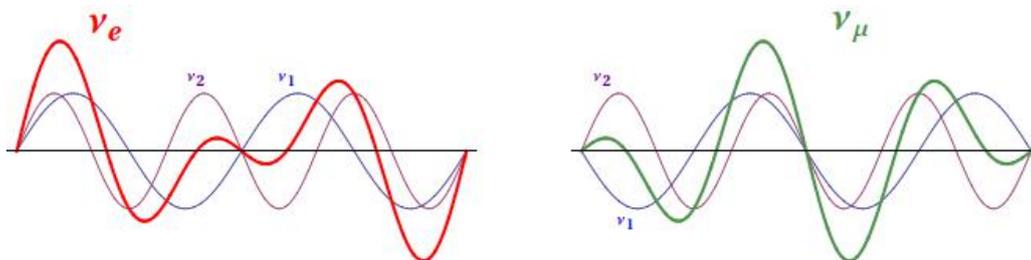
$$\nu^{(s)} = U\nu^{(m)}, \quad (3)$$

sendo U a chamada de matriz de mistura PMNS (Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata).

A matriz possui 4 parâmetros livres, dentre eles estão 3 ângulos $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ chamados de ângulos de mistura e 1 ângulo de fase δ_{CP} chamado de ângulo de violação CP.

Para ficar mais claro, pode-se pensar que cada partícula pode ser interpretada como uma onda com um formato específico que em geral são superposições de outras componentes, por exemplo, na figura 2 temos o ν_e e ν_μ formados por superposições diferentes de dois neutrinos físicos ν_1 e ν_2 . (INVISIBLES, 2014)

Figura 2 – Representação do ν_e e ν_μ como superposição de 2 estados físicos



Fonte: Invisibles (2014).

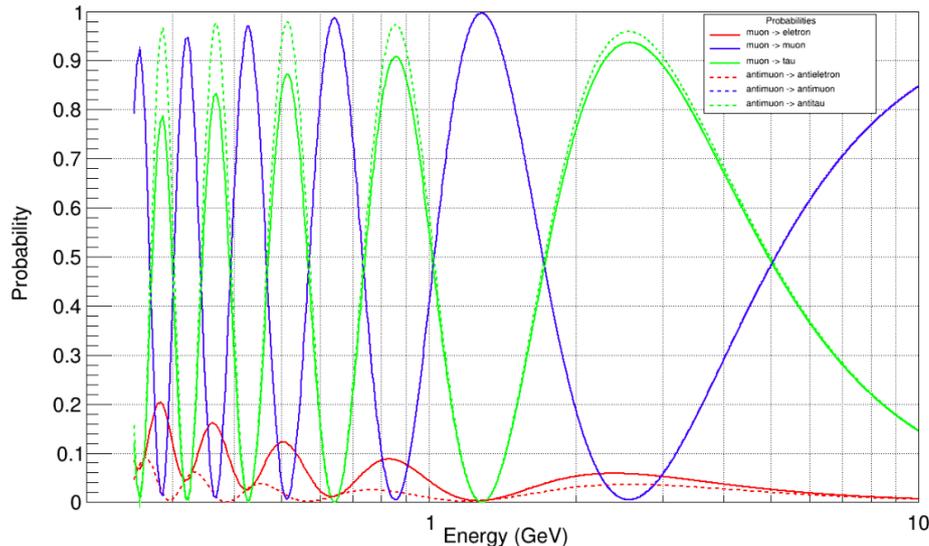
Se as velocidades dos neutrinos físicos fossem iguais, os sabores também se propagariam sem alterar a sua forma, entretanto se tiverem velocidades diferentes, os sabores variam de maneira periódica, ou seja, o ν_e oscila para ν_μ . A velocidade está relacionada com a massa, pois se ν_1 tem velocidade maior que ν_2 significa que ν_1 tem uma massa menor. Nesse contexto, outro objetivo do DUNE é solucionar o problema da hierarquia das massas, pois ainda não sabemos com exatidão a massa de cada neutrino.

GRÁFICOS PRODUZIDOS UTILIZANDO O GLOBES

É possível calcular a probabilidade com a qual um sabor de neutrino varia para outro. Essa probabilidade é uma função da razão entre a distância que a partícula vai percorrer com a energia

da partícula (FANTINI et al., 2018). No caso do experimento DUNE essa distância é de 1300 quilômetros que é a distância de um detector ao outro. Nesse trabalho, foram produzidos os gráficos de probabilidade de oscilação do neutrino ν_μ e antineutrino $\bar{\nu}_\mu$ do múon no vácuo e na matéria representados respectivamente nas figuras 3 e 4:

Figura 3 – Probabilidade do $\bar{\nu}_\mu$ e ν_μ no vácuo
Muon and antimuon probability (vacuum)



Fonte: A Autora.

Nas figuras 3 e 4 os traços não pontilhados vermelho, azul e verde representam, respectivamente, a probabilidade do neutrino do múon oscilar para neutrino do elétron, múon e tau. Os traços pontilhados vermelho, azul e verde representam, respectivamente, a probabilidade do antineutrino do múon oscilar para antineutrino do elétron, múon e tau.

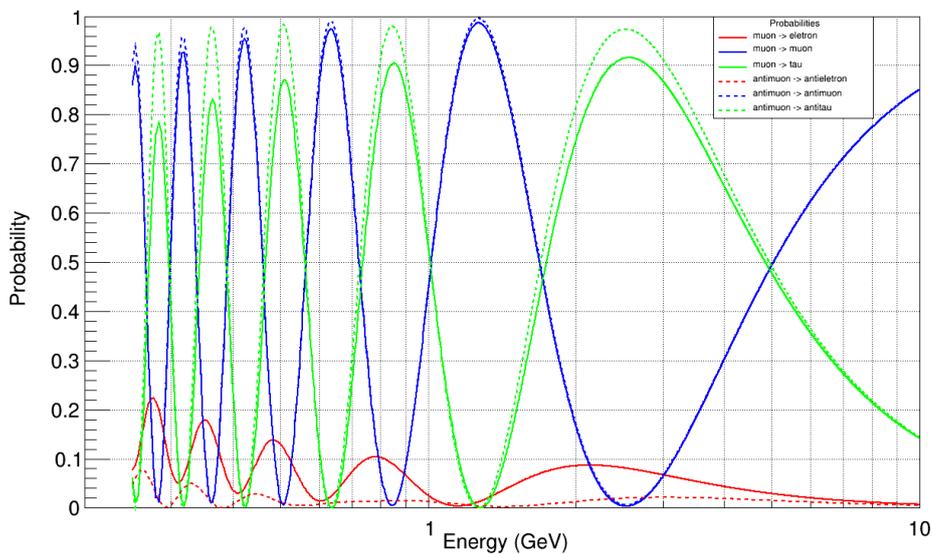
Se $\theta_{13} \rightarrow 0$ a fase perde o significado físico, desta forma neutrinos e antineutrinos oscilam da mesma maneira. De acordo com os dados que temos atualmente o δ_{CP} é entorno de 0.68π , assim, percebe pelos gráficos 3 e 4, que a oscilação de neutrinos e antineutrinos é diferente. O DUNE tem o objetivo de medir o δ_{CP} com a maior precisão possível (FANTINI et al., 2018).

Além dos gráficos de probabilidade, foi simulado o fluxo de cada sabor nos detectores, apesar de o feixe ser apenas de ν_μ devemos considerar os outros sabores, pois como já dito as fontes de neutrinos são diversas e eles oscilam. Esse gráfico está representado na figura 5.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

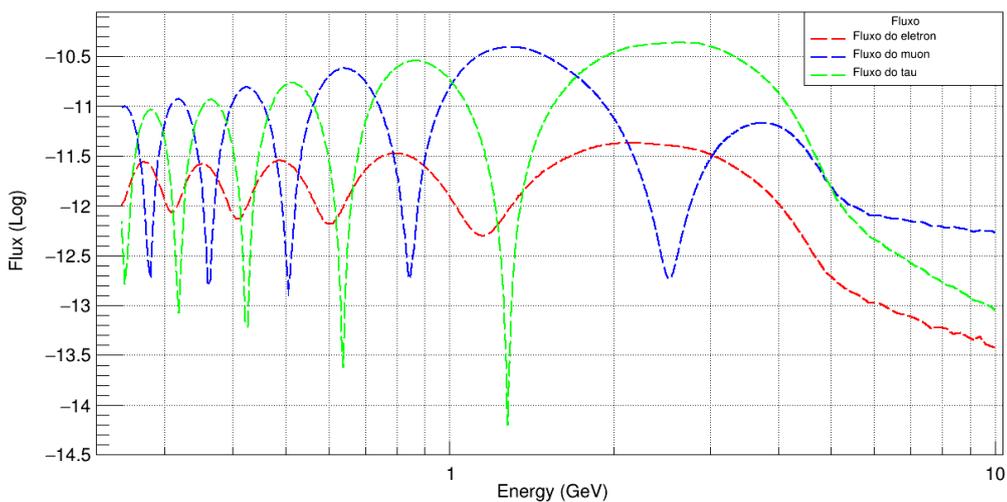
O estudo bibliográfico da física de neutrinos e a aquisição de conhecimento em relação ao software GLOBES foram realizados, dessa maneira o objetivo desse trabalho foi alcançado. Além disso, darei continuidade aos trabalhos em física de neutrinos em uma segunda iniciação científica, na qual farei implementação dos métodos para reconstrução de energia em neutrinos de supernova e estudo do software SNOwGLOBES.

Figura 4 – Probabilidade do $\bar{\nu}_\mu$ e ν_μ na matéria
Muon and antimuon probability (matter)



Fonte: A Autora.

Figura 5 – Fluxo dos três sabores de neutrinos
Neutrino Flux



Fonte: A Autora.



Agradecimentos

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao meu orientador Prof. Dr. André Fabiano Steklain Lisbôa pelos ensinamentos e paciência nesse período de iniciação científica.

Disponibilidade de Código

O código será disponibilizado através do GitHub.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

FANTINI, G. et al. Introduction to the formalism of neutrino oscillations. **The State Of The Art Of Neutrino Physics: A Tutorial For Graduate Students And Young Researchers**, p. 37–119, 2018. DOI: [10.1142/10600](https://doi.org/10.1142/10600). arXiv: [arXiv:1802.05781v2](https://arxiv.org/abs/1802.05781v2).

FERMILAB. **An International Experiment for Neutrino Science**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.dunescience.org/>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

HUBER, P.; LINDNER, M.; WINTER, W. Simulation of long-baseline neutrino oscillation experiments with GLoBES: (General Long Baseline Experiment Simulator). **Computer Physics Communications**, v. 167, n. 3, p. 195–202, 2005. ISSN 0010-4655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2005.01.003>. Disponível em: [↗](#).

HUBER, Patrick; KOPP, Joachim et al. New features in the simulation of neutrino oscillation experiments with GLoBES 3.0: (General Long Baseline Experiment Simulator). **Computer Physics Communications**, v. 177, n. 5, p. 432–438, 2007. ISSN 0010-4655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.05.004>. Disponível em: [↗](#).

INVISIBLES. **The ceaseless transformation of the three neutrinos**. [S.l.], 2014. Disponível em: <http://www.invisibles.eu/outreach/entry/ceaseless-transformation-three-neutrinos.html>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

PRAIS, Luiz Ricardo. **Oscilação de neutrinos no vácuo e o problema do neutrino solar**. 2016. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (licenciatura - Física) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.

ZUBER, Kai. **Neutrino Physics**. [S.l.]: Dresden University - Germany, 2012.