



# Uma abordagem da física de neutrinos pelo experimento DUNE

**Palavras-Chave:** Neutrino, DUNE, Oscilação de sabor, Violação de CP

**Autores:**

Felipe Cesário Laterza Lopes, IFGW – Unicamp

Prof. Dr. Pedro Cunha de Holanda (orientador), IFGW - Unicamp

---

## INTRODUÇÃO:

O Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) é um experimento que está sendo construído nos Estados Unidos e, quando estiver em atividade, buscará resolver diversas questões em aberto sobre a física de neutrinos. Dessa forma, este projeto de iniciação científica foi desenvolvido com o intuito de estudar sobre alguns fenômenos envolvendo neutrinos através do experimento DUNE. Mais especificamente, os objetivos traçados para este projeto foram a compreensão dos conceitos e cálculos que descrevem os modelos de neutrinos, a interpretação e análise de resultados obtidos por protótipos do DUNE, além de uma introdução a simulações teóricas e análises de seus resultados.

Com o intuito de cumprir estes objetivos, foi realizado um estudo teórico sobre tópicos necessários para uma introdução à fenomenologia de neutrinos, um estudo sobre resultados obtidos por protótipos do DUNE e, finalmente, foi desenvolvido e implementando um programa numérico para simular resultados do experimento

## METODOLOGIA:

Inicialmente, foi realizado um estudo dirigido sobre os principais tópicos a serem discutidos sobre a física de neutrinos, sendo estes: probabilidade de conversão e de sobrevivência de neutrinos, autoestados de interação e massa, hierarquia de massa e violação da simetria de carga e paridade (CP).

Dedicando-se aos estudos de probabilidades de oscilação, foi possível entender que os neutrinos possuem os diferentes autoestados, de interação e de massa. Os autoestados de interação definem a maneira com a qual os neutrinos interagem com outras partículas através da força fraca, pela conservação de quantidades físicas associadas a alguns grupos de simetria. Contudo, suas massas não são bem definidas, pois estes neutrinos não são autofunções do Hamiltoniano<sup>[1]</sup>. Dessa forma, os autoestados de massa são utilizados para definir a evolução temporal dos neutrinos conforme eles percorrem o espaço.

Para explicar resultados experimentais obtidos do problema dos neutrinos solares, foi proposto o modelo da oscilação de sabor. Conforme os neutrinos se propagam no espaço, eles possuem uma probabilidade de oscilarem entre seus autoestados de sabor, de forma que as taxas de produção dos diferentes sabores de neutrinos não equivalem às taxas de detecção deles em outros lugares do espaço.

Apesar da interação dos neutrinos com outras partículas dependerem de seu autoestado de interação, a oscilação dos neutrinos possui uma probabilidade bem definida. Tal probabilidade depende do quadrado da diferença de massa entre os tipos de neutrinos entre os quais houve a oscilação, de forma que nós conseguimos medir experimentalmente este quadrado da diferença.

Também é bem definida a correlação entre os autoestados de interação e de massa, através de uma combinação linear dos outros autoestados; os parâmetros desta correlação são definidos pela matriz PMNS (equação 1)<sup>[4]</sup>, com os coeficientes apresentados na equação 2<sup>[4]</sup>.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Estudando a oscilação de neutrino eletrônico para neutrino muônico, por exemplo, a probabilidade de oscilação é fornecida pela equação 3<sup>[4]</sup>.

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |\langle \nu_\mu | \psi(\mathbf{x}, t) \rangle|^2 = |U_{e1}^* U_{\mu1} e^{-i\phi_1} + U_{e2}^* U_{\mu2} e^{-i\phi_2} + U_{e3}^* U_{\mu3} e^{-i\phi_3}|^2 \quad (3)$$

Com este conhecimento sobre o mecanismo de oscilação dos neutrinos, foi possível compreender a caracterização do quadrado da diferença das massas. Os resultados experimentais já conhecidos indicam que há dois valores para  $\Delta m^2$ , sendo uma destas diferenças significativamente maior do que a outra. Isto indica uma proximidade entre a massa de dois autoestados, distantes do outro autoestado; mas esse conhecimento é insuficiente para definir qual a ordenação entre os autoestados (Figura 1). Para ser possível definir esta ordenação, são necessários experimentos como o DUNE, com uma maior sensibilidade de detecção.

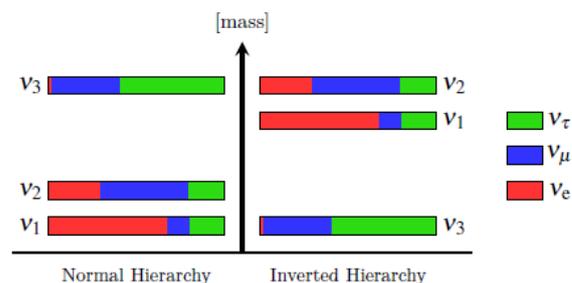


Figura 1: Diagrama da hierarquia de massa (normal e invertida)<sup>[2]</sup>

Ademais, estudando os grupos de simetria C, CP e CPT, foi possível entender que é possível que os neutrinos possuam a capacidade de violar a simetria CP<sup>[3]</sup>, algo evidenciado na teoria pela presença de um fator de  $\delta_{CP}$  na matriz PMNS. Ou seja, ao oscilarem, os neutrinos podem ter uma dependência deste fator, ainda não definido experimentalmente com precisão. É possível que o DUNE tenha uma sensibilidade experimental para, dentro dos valores de incerteza de outros parâmetros, como os ângulos de mistura, distinguir valores possíveis para este fator.

Com o conhecimento obtido na primeira parte deste projeto, foram estudados alguns artigos descrevendo resultados experimentais do ProtoDUNE, permitindo uma melhor compreensão do mecanismo de funcionamento e da análise das medições que serão feitas no experimento. Com isso, tornou-se possível a realização de simulações.

Com o conhecimento adquirido, iniciaram-se as simulações. Um programa numérico foi desenvolvido em linguagem Python, no qual são feitos os cálculos da probabilidade de oscilação no experimento DUNE, considerando o espectro de energia do experimento, as distâncias entre produção e detecção dos neutrinos, além de outros parâmetros conhecidos, como os ângulos de mistura. Além disso, foram utilizados dados do artigo “*Experiment Simulation Configurations Approximating DUNE TDR*” [5], o qual disponibiliza resultados de uma simulação baseada em GEANT4 da linha de emissão LBNF do DUNE [6], [7], [8], fornecendo então os dados de fluxo e de seção de choque esperados para as interações dos neutrinos no experimento DUNE.

Neste programa, com as probabilidades de oscilação calculadas e os dados de simulação do fluxo de neutrinos e da seção de choque, foi possível calcular o número de eventos ao integrar o produto destas grandezas. Assim, dentro dos bins de energia de sensibilidade do experimento, foram obtidas estimativas para o número de detecções nos canais de oscilação relevantes.

Com estes valores para o número de eventos, também neste programa, está sendo feita uma análise de chi-quadrado para obter a significância destes dados. Por fim, com estes dados, também estão sendo realizadas as análises da sensibilidade do experimento à hierarquia de massa e à violação de CP, de acordo com as taxas de detecção.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com os estudos realizados, os resultados vieram das simulações numéricas feitas. Utilizando a equação 3 e seus equivalentes para os diferentes canais, calculamos a probabilidade de oscilação de cada um, possibilitando a definição desta probabilidade para o espectro de energia do DUNE (Figura 2)

Por sua vez, com os dados das simulações do artigo, foram elaborados os gráficos para o fluxo de neutrinos (Figura 3) e seção de choque da interação (Figura 4).

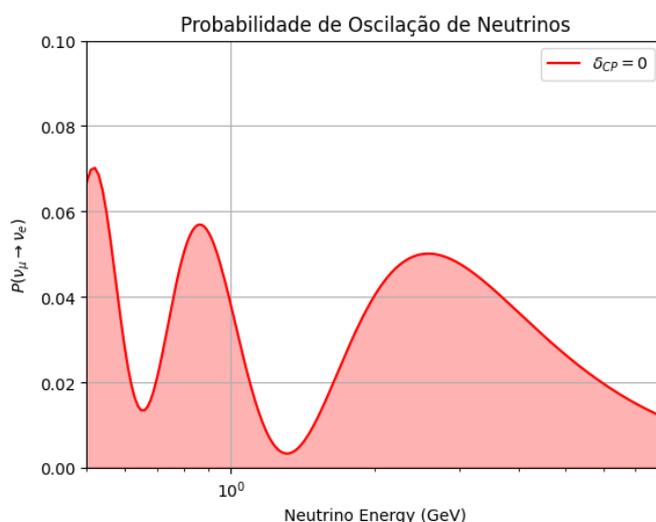


Figura 2: Gráfico para probabilidade de oscilação em função da energia

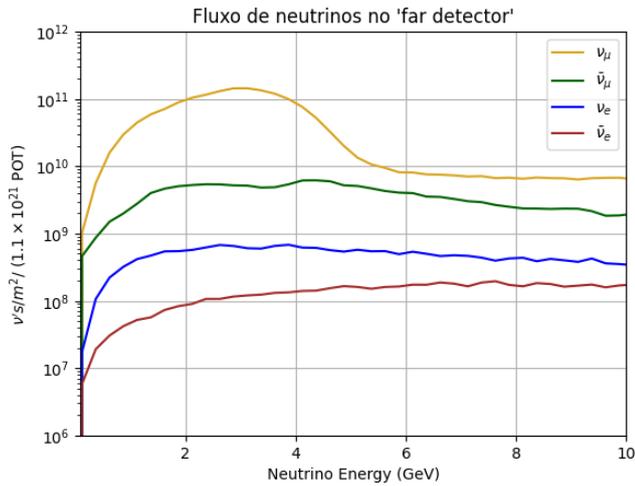


Figura 3: Fluxo de neutrinos em função da energia

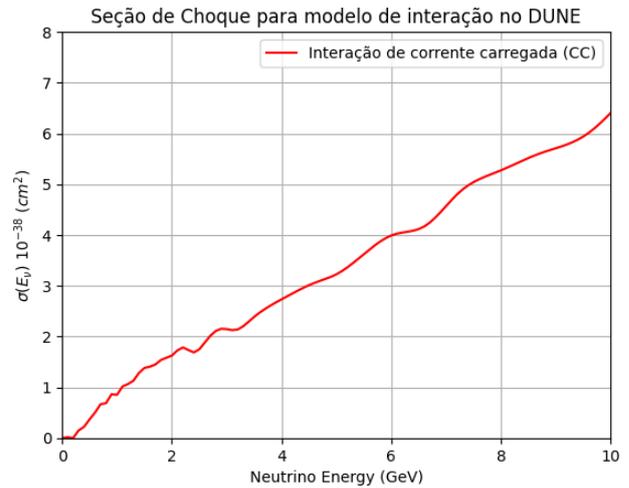


Figura 4: Seção de Choque de interação em função da energia

Finalmente, realizando a integral deste produto, conseguiu-se estimar o número de eventos para cada canal de oscilação, como é exemplificado para o canal  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  (Figura 5).

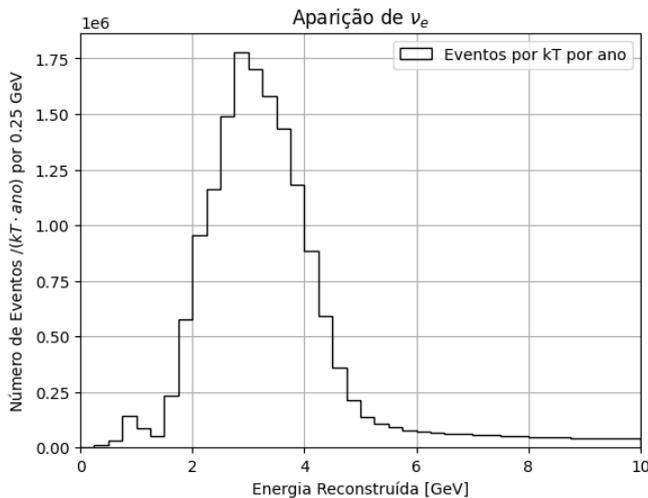


Figura 5: Número de eventos por bins de 0,25 GeV

Para as simulações realizadas neste projeto, estão sendo realizadas análises de chi-quadrado para estabelecer a significância estatística dos resultados obtidos.

Por fim, por meio da comparação de canais de oscilação como  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  e  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ , está sendo feita uma análise da sensibilidade do experimento à violação de CP. Para analisar a sensibilidade à hierarquia de massa, estão sendo comparados os dados para as simulações com os dados conhecidos da ordenação normal e da ordenação invertida.

Com estas simulações resultantes deste projeto, ocorrerá um maior entendimento da importância do experimento DUNE para a determinação experimental destes fenômenos envolvendo neutrinos

## CONCLUSÕES:

Portanto, através deste projeto de Iniciação Científica, foi possível entender melhor o fenômeno da oscilação de neutrinos, além de como este pode ser utilizado para estudar a hierarquia de massa dos neutrinos e a violação de simetria CP. Tais fenômenos possuem uma grande relevância dentro da física de neutrinos e o experimento DUNE possui um potencial para estudá-los; potencial este que está sendo descrito por meio de uma avaliação estatística das simulações realizadas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] GRIFFITHS, David. **Introduction to Elementary Particles**. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2010
- [2] FANTINI, G.; ROSSO, A. G.; VISSANI, F.; ZEMA, V. **The Formalism of Neutrino Oscillations: an Introduction**. High Energy Phys., v. 28, p. 37–119, 2018
- [3] GIUNTI, C.; KIM, C. W. **Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics**. Oxford, Oxford University Press, 2007
- [4] THOMSON, Mark. **Modern Particle Physics**. Cambridge, Cambridge University Press, 2013
- [5] DUNE: ABI, B., *et al.* **Experiment Simulation Configurations Approximating DUNE TDR**. arXiv preprint arXiv:2103.04797 [hep-ex], 2021
- [6] DUNE: ABI, B., *et al.* **Long-baseline neutrino oscillation physics potential of the {DUNE} experiment**. European Physical Journal C, v. 80, p. 978 (2020)
- [7] DUNE: ABI, B., *et al.* **Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume II DUNE Physics**. arXiv preprint arXiv:2002.03005 [hep-ex], 2020
- [8] GEANT4 Collaboration : AGOSTINELLI, S., *et al.* **GEANT4: A Simulation toolkit**. Nucl. Instrum. Meth. A, v. 506, p. 250-303, 2003