



A contribuição do experimento DUNE na determinação da Violação da Simetria CP e da hierarquia de massa dos neutrinos - XXIX Congresso de Iniciação Científica

1. Nome do Pesquisador Responsável

Prof. Dr. Pedro Cunha de Holanda

2. Nome do Aluno Pesquisador

Luís Gustavo Porto Paixão

3. Instituição Sede do projeto

Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW)

Palavras-Chave: Oscilação de Neutrinos, Experimento DUNE, Violação de CP, Hierarquia de Massa, Fenomenologia de Neutrinos

1 Resumo

O estudo da fenomenologia das oscilações dos neutrinos e suas aplicações a partir do modelo padrão da física tem como base duas grandes questões que ainda se encontram em aberto. A primeira questão é de que forma se estrutura a Hierarquia de Massa dos neutrinos a partir dos três neutrinos de massa m_1 , m_2 e m_3 . A próxima questão, é sobre a Violação de Carga-Paridade (CP) no setor de neutrinos que pode estar diretamente ligada à assimetria matéria/anti-matéria do Universo. Nesse projeto de iniciação científica, será estudado como a detecção e os resultados obtidos da oscilação de neutrinos no experimento DUNE poderão indicar e esclarecer melhor esses fenômenos da violação de CP e da Hierarquia de Massa.

2 Introdução

Os neutrinos ν são partículas elementares sem carga que apresentam três tipos de sabores: eletrônico (ν_e), muônico (ν_μ) e tauônico (ν_τ). Essas partículas são consideradas a segunda mais abundante no Universo, depois do fóton. Cerca de 60 bilhões de neutrinos a cada segundo, provenientes das reações de fusão nuclear do sol, atinge 1 centímetro quadrado da Terra. Existem também os neutrinos mais antigos, conhecidos como “neutrinos relíquia”, ou CvB (Cosmic Neutrino Background), que são provenientes de reações que aconteceram em um universo bem jovem, a cerca de um segundo após o Big Bang [1].

Os estudos que levaram a formulação dessa partícula elementar têm origem no final do século XIX, com a descoberta da radioatividade do urânio por Becquerel e os subprodutos que eram então produzidos e que foram descobertos posteriormente, através dos processos de decaimento α , β e γ . Dessas partículas produzidas na radiação, o decaimento β violava a lei fundamental da física da conservação de energia e do momento angular. Porém, foi somente em 1930 que o físico Wolfgang Pauli propôs a existência do neutrino como um férmion chamada então na época de “nêutron” para solucionar o problema do decaimento β . Dois anos depois, após a descoberta do nêutron como conhecemos atualmente, por James Chadwick, Enrico Fermi renomeou a partícula proposta por Pauli e que ficou de forma definitiva conhecida como “neutrino” [2].

Assim como em muitos modelos da física, os cientistas primeiro desenvolveram a teoria dos neutrinos para explicar os resultados científicos mencionados, porém sua detecção direta ainda demorou alguns anos para ser obtida após sua formulação teórica.

Somente a partir do final da década de 50 que surgiu o primeiro experimento solar de neutrinos feito pelo físico Raymond Davis Jr para a sua detecção. Logo de início a comunidade científica teve que lidar com um problema bastante difícil na época “O problema dos neutrinos solares”, onde a quantidade de neutrinos detectados que chegavam à Terra, proveniente do interior do Sol, era menor do que o descrito pela teoria do Modelo Solar Padrão. Para solucionar esse problema o físico Bruno Pontecorvo havia proposto que os neutrinos possuíam massas não nulas e os que foram produzidos no interior do sol se transformavam em neutrinos de espécies diferentes através da mistura dos seus autoestados de interação até chegar na Terra e que esses neutrinos que eram transformados não estavam sendo detectados. Após a formulação teórica de Bruno Pontecorvo, o físico Koshiba no intuito de aumentar a sensibilidade aos neutrinos cósmicos, construiu um detector ainda maior, o Super Kamiokande, que entrou em operação em 1996. Este experimento observou o efeitos de neutrinos produzidos na atmosfera, comprovando com melhor precisão esse fenômeno novo, dessas transformações que os neutrinos possuíam da fonte até chegar aos detectores. Isso trouxe uma grande importância para o modelo padrão de partículas elementares e também para o papel que os neutrinos desempenham no universo, e devido a essas contribuições experimentais foi dado o prêmio nobel de física em 2002 para Raymond Davis Jr e para

Koshiba [3]. Hoje em dia já sabemos melhor o funcionamento dessas transformações de neutrinos e é conhecida como oscilação de neutrinos [4].

Da década de 60 até os dias de hoje já se passaram seis décadas e a oscilação dos neutrinos já tem uma comprovação muito bem estabelecida. E enquanto a descrição e a detecção dos neutrinos já foram aprimoradas, novos problemas e experimentos acabaram surgindo.

Nos modelos atuais os neutrinos são descritos pelo modelo padrão da física de partículas e é a única partícula de spin semi-inteiro (férmion), sem carga e de difícil detecção, porque além da sua oscilação, que faz com que haja transformações de espécies diferentes de neutrinos, eles também interagem somente através da força fraca e gravitacional.

Na tentativa de modernizar o conhecimento que se tem sobre os neutrinos, um grande projeto promissor de experimento está sendo feito, O Experimento de Neutrinos Subterrâneos (em inglês, *Deep Underground Neutrino Experiment - DUNE*), que poderá trazer soluções aos problemas que os físicos de neutrinos ainda não conseguiram resolver, como a Hierarquia de Massa e a Violação Carga-Paridade (CP).

O experimento DUNE é um experimento internacional de acelerador de partículas que produzirá um feixe de neutrinos e consistirá em dois detectores de neutrinos. Um desses detectores registrará as interações em partículas próximas à fonte do feixe e o outro registrará as interações em partículas mais distantes da fonte do feixe [5].

O estudo dos neutrinos no experimento DUNE é crucial porque através da detecção das oscilação de neutrinos e também dos antineutrinos no experimento, poderá se analisar as diferentes taxas com que eles oscilam e buscar uma eventual Violação CP dessa partícula [6].

Existe também outra importância fundamental no estudo dos neutrinos no experimento DUNE, que é o problema da Hierarquia de Massa dos 3 estados de massa dos neutrinos: ν_1 , ν_2 e ν_3 . O problema que surge dessa Hierarquia é que já se sabe que o estado de massa do neutrino ν_2 é maior do que o estado de massa do neutrino ν_1 , entretanto, o que não se sabe é se o estado de massa do neutrino ν_3 é maior ou menor que os outros dois estados de massa dos neutrinos ν_1 e ν_2 [7].

3 Desenvolvimento da pesquisa

Nesse presente trabalho sobre "A contribuição do experimento DUNE na determinação da violação da simetria CP e da hierarquia de massa dos neutrinos", tivemos a oportunidade de desenvolver e descrever a base da teoria das oscilações dos neutrinos tanto no vácuo como na matéria com enfoque no Experimento DUNE e os seus resultados. Com isso fizemos um estudo dos cálculos das oscilações dos neutrinos no experimento DUNE e examinamos os seus resultados e suas consequências.

Partimos então de uma apresentação de alguns resultados preliminares de oscilações de neutrinos, obtidos de cálculos realizados da probabilidade de sobrevivência da oscilação de neutrinos muônicos ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$) e a probabilidade de oscilação de neutrinos muônicos para neutrinos eletrônicos ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$), para o vácuo e para a matéria. Primeiro apresentamos os gráficos dessas probabilidades de oscilações para o vácuo. Para esses cálculos utilizaremos as aproximações para o experimento, que leva em consideração os casos em que o ângulo de mistura ϑ_{13} é bem pequeno para a probabilidade de sobrevivência do neutrino muônico, e que a variação quadrática da massa para as misturas de massa dos neutrinos $\nu_3\nu_1$ e dos neutrinos $\nu_3\nu_2$ são próximas ($\Delta m_{31}^2 \approx \Delta m_{32}^2$), tanto para a probabilidade de sobrevivência quanto para a probabilidade de transformação do neutrino muônico para o neutrino eletrônico. Utilizaremos os dados experimentais a partir de simulações feitas do experimento DUNE para o detector distante, o Long-Baseline, localizado a 1300km, com os ângulos nos valores de: $\vartheta_{23} = 0,738$

e $\vartheta_{13} = 0,148$. E a variação quadrática de massa no valor de: $\Delta m_{31}^2 = 2,457 \times 10^{-3} eV^2$ [8]. Após o desenvolvimento dos cálculos para a oscilação dos neutrinos no vácuo, em seguida realizamos a apresentação do comportamento da oscilação dos neutrinos na matéria, usando a simplificação de uma matriz de mistura 2x2 através de uma matriz de rotação, calculando e diagonalizando o hamiltoniano para encontrar os autovalores da energia e os respectivos valores dos ângulos de mistura na matéria. Realizamos também o cálculo para encontrar o valor da constante do potencial de interação na matéria.

No intuito de melhorar o entendimento da oscilação dos neutrinos na matéria, resolvemos generalizar a simplificação anterior utilizando a matriz de mistura do PMNS, que é uma matriz 3x3. A partir disso, verificamos que o ângulo de mistura ϑ_{23} não influencia na oscilação dos neutrinos na matéria e que fazendo simplificações para o cálculo da diagonalização do hamiltoniano, através dos dados e resultados do próprio experimento DUNE, chegamos a um resultado final com as fórmulas dos autovalores de energia e com o ângulo de mistura semelhantes das equações anteriores simplificadas a partir da matriz de rotação 2x2, entretanto, para esse caso da matriz de mistura 3x3 teve a diferença de apresentar o ângulo de mistura diretamente em função do ângulo ϑ_{13} . Com isso conseguimos demonstrar que, para o processo de ressonância tanto a probabilidade de oscilação dos neutrinos muônicos para os neutrinos eletrônicos quanto a probabilidade de sobrevivência dos neutrinos muônicos não sofrem interferência do efeito de matéria e as suas probabilidades apresentaram os resultados de 0,006 e 0,994, respectivamente.

Além disso, foi utilizado os dados experimentais da Simulação do Experimento DUNE [9], e através deles conseguimos obter o fluxo de neutrinos e a seção de choque. Desses dados, conseguimos plotar graficamente a taxa de eventos dos neutrinos a partir da probabilidade de oscilação de neutrinos muônicos para neutrinos eletrônicos e da probabilidade de sobrevivência da oscilação de neutrinos muônicos. Através desses gráficos foi possível fazer uma análise do fator R que é uma taxa estatística importante visualizada no experimento DUNE que leva em consideração a razão entre a taxa de evento com a taxa esperada, com isso, graficamos esse fator R em função do Δm^2 e do $\sin^2 2\vartheta$ para as mesmas probabilidades de oscilações de oscilação de neutrinos muônicos para neutrinos eletrônicos e da probabilidade de sobrevivência da oscilação de neutrinos muônicos.

Com o desenvolvimento desses cálculos utilizando os dos dados estatísticos obtidos, passamos a realizar uma melhor descrição dos fenômenos de Violação de CP e da Hierarquia de Massa que ocorrem dentro das oscilações dos neutrinos no Experimento DUNE.

References

- [1] B. R. Safdi, M. Lisanti, J. Spitz and J. A. Formaggio, Anual Modulation of Cosmic Reliz Neutrinos
- [2] Carlo Giunti, Chung W.Kim, Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics
- [3] Nobel Prize 2002. Disponí vel em <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2002/popular-information/>
- [4] David Griffiths. Introduction to Elementary Particles, Second, Revised Edition
- [5] DUNE experiment. Disponí vel em <https://www.dunescience.org/>
- [6] DUNE experiment. Disponí vel em <https://neutrinos.fnal.gov/mysteries/cp-violation/#evenmore>
- [7] DUNE experiment. Disponí vel em <https://neutrinos.fnal.gov/mysteries/mass-ordering/>
- [8] Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) ,The Physics Program for DUNE at LBNF Volume 2 (2016)
- [9] Experiment Simulation Configurations Approximating DUNE TDR. 18, Mar, 2021. Disponí vel em <https://arxiv.org/abs/2103.04797>
- [10] Digitalizador de dados: Web Plot Digitizer. Disponí vel em <https://apps.automeris.io/wpd/>
- [11] David Griffiths. Introduction to quantum mechanics (1994)