



As Transformações de Lorentz com aplicações e complicações em física de neutrinos

The Lorentz Transformations with applications and complications in neutrino physics

Gabrieli Salmória¹, André Fabiano Steklain Lisbôa²

RESUMO

Neste trabalho apresentamos os conceitos essenciais da Relatividade Especial e as Transformações de Lorentz associadas, que descrevem as mudanças nas medidas de espaço e tempo em função do movimento relativo entre diferentes observadores. Em seguida usaremos as oscilações de neutrinos para explorar a possibilidade de que estes sistemas físicos violem a invariância com relação a estas transformações, que é uma propriedade chave no Modelo Padrão de partículas elementares. Para isso foram geradas simulações destas oscilações, com e sem termos de quebra desta simetria, usando a ferramenta GLOBES (Global Long Baseline Experiment Simulator).

PALAVRAS-CHAVE: Física de neutrinos; Teoria Padrão Transformações de Lorentz.

ABSTRACT

In this work, we present the essential concepts of Special Relativity and the associated Lorentz Transformations, which describe changes in space and time measurements as a function of relative movement between different observers. We will then use neutrino oscillations to explore the possibility that such physical systems violate invariance with respect to these transformations, a key property in the Standard Model of elementary particles. To this end, simulations of these oscillations were generated, with and without terms of breaking this symmetry, using the GLOBES (Global Long Baseline Experiment Simulator) tool.

KEYWORDS: Neutrino physics; Standard Theory Lorentz Transformations.

INTRODUÇÃO

A teoria da relatividade especial de Albert Einstein foi um marco revolucionário na física. Essa teoria introduz a noção de espaço-tempo, que é uma única entidade de quatro dimensões que combina o espaço e o tempo em um único conceito. O postulado central da relatividade especial é o que afirma que a velocidade da luz (c) é a mesma para todos os observadores, independentemente de suas velocidades relativas (COSTA, 2011). Esta observação é central na derivação das transformações de Lorentz, que descrevem como medidas de espaço e tempo se alteram em relação ao movimento relativo de observadores (AITCHISON; HEY, 2003). As transformações de Lorentz são uma modificação das transformações de Galileu, que são incompatíveis com a relatividade especial.

Estas transformações desempenham um papel crucial no Modelo Padrão da Física de partículas, que é um paradigma da teoria quântica de campos. O Modelo Padrão une relatividade especial e

¹ Bolsista da UTFPR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: gabrielisalmoreia@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8349603256967541>.

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



mecânica quântica para propor uma teoria auto-consistente das partículas no Universo. Para isso, deve haver covariância com relação às transformações de Lorentz. Porém, existem fenômenos físicos comprovados experimentalmente que não podem ser explicados pelo Modelo Padrão, tais como a oscilação dos neutrinos.

Os neutrinos são partículas subatômicas com carga elétrica neutra, gerados em diversos processos nucleares, como na fusão nuclear no interior do Sol e em explosões de supernovas. No entanto, sua detecção é um desafio significativo devido à sua interação fraca com a matéria. Neutrinos possuem três diferentes “sabores”: neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau, a depender de qual lépton carregado participa dos decaimento beta. No entanto, conforme se propagam, os sabores de neutrinos podem ser detectados em sabores diferentes dos que foram originalmente produzidos, fenômeno que é chamado de oscilação. Uma consequência deste fenômeno é que neutrinos possuem massa (extremamente pequena), o que não é descrito pelo Modelo Padrão.

Por serem uma janela para uma física além do Modelo Padrão neutrinos, podem também confirmar outras teorias, tais como a violação da invariância de Lorentz e da simetria CPT (Carga, Paridade e Inversão temporal). Estas teorias propõem uma extensão do Modelo Padrão para abranger termos de quebra destas simetrias. A confirmação desta violação traz implicações profundas para a física atual, que deverá ser totalmente revista.

O objetivo deste trabalho é explorar a violação das Transformações de Lorentz e sua relação com a física de neutrinos utilizando o pacote GLoBES (General Long Baseline Experiment Simulator) com as configurações do experimento DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment). A expectativa é compreender como o experimento pode ajudar a colocar novos limites nos valores possíveis dos termos de quebra.

TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

A Relatividade Especial é uma teoria da física que foi desenvolvida por Albert Einstein em 1905 para descrever as propriedades do espaço e do tempo, e como eles estão relacionados com o movimento de objetos em alta velocidade. Essa teoria introduz a noção de espaço-tempo, que é uma única entidade de quatro dimensões que combina o espaço e o tempo em um único conceito. A partir dos postulados da relatividade e da constância da luz, a teoria estabelece que a medida do tempo e do espaço depende do observador e do movimento relativo entre eles, mas a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, independentemente de suas velocidades relativas (COSTA, 2011).

As transformações de Lorentz são um conjunto de equações matemáticas que descrevem como as medidas de tempo e espaço mudam quando vistas por diferentes observadores em movimento relativo uns aos outros. Elas foram desenvolvidas pelo físico Hendrik Lorentz no final do século XIX, que inicialmente interpretou as transformações como consequência do comportamento das forças elétricas e moleculares, sendo que as primeiras eram afetadas pelo potencial retardado de Heaviside resultante das cargas em movimento (PROKHOVNIK, 1993). Posteriormente a interpretação de Einstein prevaleceu e estas transformações foram incorporadas à teoria da relatividade especial ou seja respeitam os dois postulados principais vistos anteriormente.



Podemos construir as equações que conectam a posição e o tempo do evento nos referenciais S e S' usando um fator de contração / dilatação que depende da velocidade relativa v_0 entre os dois sistemas. Obtemos as seguintes Equações, que são conhecidas como as transformações de Lorentz (COSTA, 2011):

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - v_0t), \\ y' = y, \\ z' = z, \\ ct' = \gamma(ct - \beta x), \end{cases} \quad (1)$$

onde,

$$\beta = \frac{v_0}{c}, \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}}. \quad (3)$$

Estas equações demonstram a dependência das medidas de posição e tempo no referencial S' daquelas no referencial S , bem como a velocidade relativa v_0 entre os referenciais e a velocidade da luz c .

Neste sistema de equações, podemos observar as relações entre as variáveis descritas em cada um dos referenciais. Note que, o fator γ se relaciona com as variáveis x e t representando uma dilatação/contração do espaço-tempo, como previsto pela teoria da relatividade especial.

ALÉM DE LORENTZ: UMA VIOLAÇÃO EM NEUTRINOS

O Modelo Padrão descreve as partículas elementares e suas interações fundamentais, incluindo os neutrinos, que são partículas leptônicas eletricamente neutras e interagem apenas via interação fraca e gravitacional. Dentro deste modelo, temos três tipos de neutrinos ou sabores: neutrino do elétron (ν_e), neutrino do múon (ν_μ) e neutrino do tau (ν_τ). Experimentos com neutrinos confirmaram um fenômeno conhecido como oscilação de neutrinos, onde neutrinos de um sabor específico podem ser detectados como outro sabor enquanto se propagam na matéria ou no vácuo (ZUBER, 2012). Esse fenômeno revela que os neutrinos têm massa, desafiando a concepção anterior de que eram partículas não massivas. É importante observar, no entanto, que estados de sabor não possuem massa definida, sendo combinações de autoestados de massa. Temos

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

sendo U a matriz de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS). Esta matriz depende dos ângulos de mistura θ_{12} , θ_{13} e θ_{23} , além da fase δ_{CP} (FANTINI et al., 2018).

A evolução temporal no vácuo se dá de acordo com o Hamiltoniano



$$H_{vac} = U \begin{pmatrix} m_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3^2 \end{pmatrix} U^\dagger, \quad (5)$$

sendo que as oscilações ocorrem pelo fato de as massas dos neutrinos não serem iguais. Dado que o Modelo Padrão não possui um mecanismo de geração de massa para os neutrinos (ZUBER, 2012), existe a necessidade de complementar ou modificar a teoria.

A simetria CPT é fundamental no Modelo Padrão. Ela garante que as características de uma partícula e sua antipartícula permaneçam idênticas. Seus três pilares são: A invariância de Lorentz, hermeticidade do hamiltoniano e a localidade. A possibilidade de violação da invariância de Lorentz (*Lorentz Invariance Violation* - LIV) sugere uma nova física além do Modelo Padrão, manifestando - se por meio de alterações nas propriedades das partículas, onde os neutrinos são cruciais neste estudo, pois a LIV pode modificar suas propriedades. Existem extensões do Modelo Padrão que incluem termos de quebra. Tais termos podem ser agrupados em um Hamiltoniano, dado por (BARENBOIM et al., 2018)

$$H_{LIV} = \begin{pmatrix} a_{ee} & a_{e\mu} & a_{e\tau} \\ a_{ee}^* & a_{\mu\mu} & a_{\mu\tau} \\ a_{e\tau}^* & a_{\mu\tau}^* & a_{\tau\tau} \end{pmatrix} - \frac{4}{3}E \begin{pmatrix} c_{ee} & c_{e\mu} & c_{e\tau} \\ c_{ee}^* & c_{\mu\mu} & c_{\mu\tau} \\ c_{e\tau}^* & c_{\mu\tau}^* & c_{\tau\tau} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Este Hamiltoniano influencia na oscilação dos neutrinos no vácuo e pode produzir efeitos observáveis, assim como explicar discrepâncias observadas experimentalmente, como o LSND e MicroBoone (KOSTELECKÝ; MEWES, 2003). Várias experiências e observatórios estão atualmente envolvidos na busca por sinais de interações não padrão de neutrinos.

RESULTADOS E APLICAÇÕES

O projeto DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) é um experimento na área da física de neutrinos, com o objetivo principal de investigar propriedades fundamentais dessas partículas (FERMILAB, 2020). Será instalado no Laboratório Nacional de Fermi (Fermilab), nos Estados Unidos, e conta com uma colaboração internacional envolvendo diversos países, inclusive o Brasil.

O experimento visa testar a Teoria CPT, medindo a diferença entre a probabilidade de oscilação de neutrinos e antineutrinos em curtas e longas distâncias através de aceleradores, e detectores de neutrinos subterrâneos.

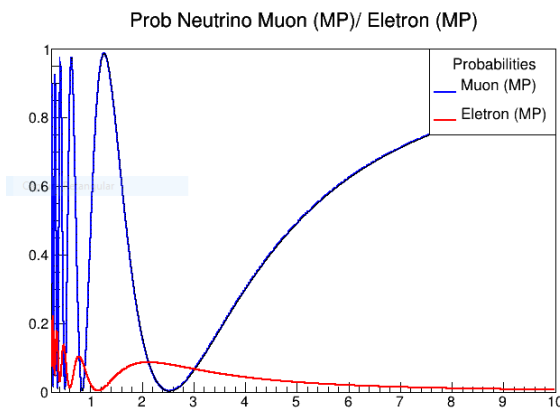
Durante o período que antecede a inauguração do laboratório, utilizamos o pacote GLoBES (Global Long Baseline Experiment Simulator) (HUBER; LINDNER; WINTER, 2005; HUBER; KOPP et al., 2007) para fazer possíveis previsões sobre os resultados. O GLoBES é uma ferramenta de simulação e análise que permite estudar os efeitos de diferentes parâmetros e cenários nos resultados experimentais. As probabilidades de oscilação no vácuo para para uma distância de propagação de 1300 km estão mostradas na figura 1.

Neste trabalho o cálculo das probabilidades do GLoBES foi adaptado para incluir a influência dos termos provenientes da LIV. Por fim, apresentamos os resultados gráficos das figuras 2 e 3



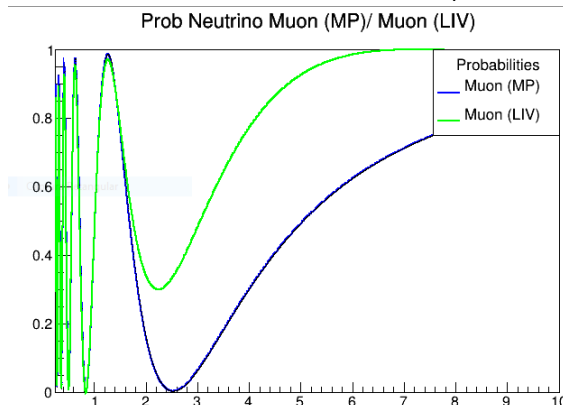
obtidos em nossa análise utilizando a ferramenta GLOBES com os parâmetros DUNE. Observe que as probabilidades sofrem alteração sob influência destes termos.

Figura 1 – Probabilidade do neutrino do múon e do neutrino do elétron (ν_e) no MP



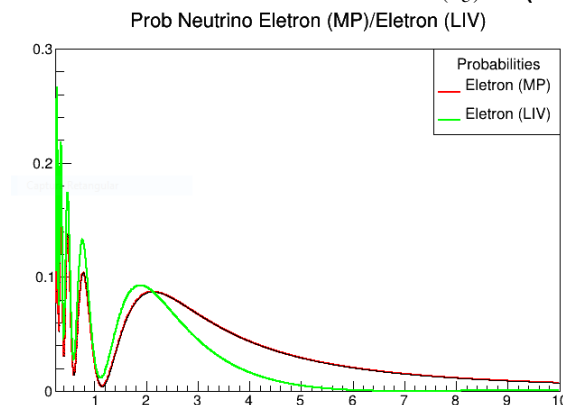
Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 2 – Probabilidade do neutrino múon (ν_μ) no (MP) e no (LIV)



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 3 – Probabilidade do neutrino elétron (ν_e) no (MP) e no (LIV)



Fonte: Autoria Própria (2023)



CONCLUSÃO

A introdução das Transformações de Lorentz e a Relatividade Especial permitiram uma nova perspectiva na evolução da física teórica, abrindo caminho para a o estudo dos neutrinos e suas possibilidades.

No âmbito específico dos neutrinos, investigamos a possível violação de Lorentz e do Modelo Padrão, e suas implicações. A análise realizada utilizando a ferramenta GloBES no experimento DUNE para construção dos gráficos permitiu visualizar as diferenças de probabilidade de encontrar essas partículas. Essas violações, bem como o experimento DUNE podem abrir caminho para descobertas revolucionárias e avanços significativos no entendimento da natureza fundamental das partículas.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador Prof. Dr. André Fabiano Steklain Lisbôa pela orientação valiosa durante minha iniciação científica e à UTFPR por fornecer o suporte e os recursos necessários para meu projeto de pesquisa.

Disponibilidade de Código

Os gráficos de probabilidade apresentados neste trabalho foram produzidos utilizando a biblioteca GloBES. O código será disponibilizado através do GitHub.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- AITCHISON, Ian J R; HEY, Anthony J G. **Gauge theories in particle physics: A practical introduction**-Third edition. São Paulo: Copyright IOP Publishing Ltd., 2003.
- BARENBOIM, Gabriela et al. Exploring the intrinsic Lorentz-violating parameters at DUNE. **Physics Letters B**, 2018.
- COSTA, Pedro Contino da Silva. **Transformações de Lorentz e seus invariantes**. São Paulo, 2011. Universidade Estadual Paulista-Botucatu.
- 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.



**XIII Seminário de Extensão e Inovação
XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR



SEI-SICITE
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: [↗](#).

KOSTELECKÝ, V. Alan; MEWES, Matthew. **Lorentz and CPT violation in neutrinos**. Bloomington, U. S. A, ago. 2003.

PROKHOVNIK, S. J. The Physical Interpretation of Special Relativity-a Vindication of Hendrik Lorentz. **Zeitschrift fur Naturforschung - Section A Journal of Physical Sciences**, v. 48, n. 8-9, p. 925–931, 1993. ISSN 18657109. DOI: [10.1515/zna-1993-8-915](https://doi.org/10.1515/zna-1993-8-915).

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