

Projeto de Pesquisa - Edital
04/2022
(PIC/PIBIC/PIBITI/PIBIC-AF)

Título do Projeto: Eletromagnetismo com violações da simetria
de Lorentz

30 de junho de 2022

RESUMO

A Relatividade Restrita (RR) amadureceu no começo do século XX, incorporando na descrição da natureza uma nova interpretação do espaço e do tempo e trazendo como uma nova simetria fundamental da física a *simetria de Lorentz*, que engloba além das já conhecidas rotações tridimensionais, as chamadas *transformações de Lorentz*, que podem ser entendidas como rotações generalizadas que misturam tempo e espaço. A Teoria Eletromagnética (TE) de Maxwell foi a primeira teoria que se reconheceu como compatível com a simetria de Lorentz: na verdade, foi justamente a aparente incompatibilidade entre a TE e a mecânica clássica que motivou os célebres trabalhos de Einstein, que popularizaram a relatividade. Podemos dizer, assim, que a relatividade é o que é para que a TE seja relativística. Contudo, nas últimas décadas, motivadas pela expectativa de nova física na escala de Planck, tem ocorrido um sistemático estudo de teorias que admitem pequenas violações da simetria de Lorentz (VL). Naturalmente, a TE é um dos focos desses estudos, sendo uma teoria muito bem conhecida do ponto de vista teórico, e que conta com experimentos bastante sensíveis, que podem mesmo alcançar o grau de sensibilidade necessária para perceber eventuais efeitos de VL oriundos da escala de Planck. Este projeto dedica-se a expor alguns dos possíveis efeitos que surgem na TE devido a presença de VL.

Palavras chave: Relatividade Restrita, Simetria de Lorentz, Eletromagnetismo, Violações de Lorentz.

1 Introdução e Contextualização

A teoria eletromagnética de Maxwell se estabeleceu no século XIX, unificando uma série de fenômenos ligados à eletricidade, ao magnetismo e à óptica. No começo do século XX, percebeu-se uma inconsistência existente entre a teoria de Maxwell e a mecânica Newtoniana, e a solução para essa inconsistência levou ao que chamamos de Relatividade Restrita (RR). Na RR, os conceitos Newtonianos de espaço e tempos absolutos são substituídos pelo espaçotempo tetradimensional de Minkowsky. A simetria fundamental do espaço de Minkowsky é a chamada *Simetria de Lorentz*, que substitui a simetria Galileana da mecânica de Newton.

Hoje em dia, junto da Mecânica Quântica e a Relatividade Geral (que descreve a interação gravitacional), a RR é um dos elementos essenciais para a descrição das interações fundamentais que encontra no Modelo Padrão das Partículas Elementares, e no chamado Modelo Λ CDM da Cosmologia, suas mais importantes realizações. Este sucesso não veio sem trazer novos enigmas, que prenunciam a física do século XXI: a questão da quantização da gravitação, da matéria e da energia escura, etc... são perguntas fundamentais não respondidas dentro das teorias atualmente aceitas.

Por exemplo, a incorporação de efeitos quânticos de gravitação na escala de Planck $\ell_P \sim \sqrt{G\hbar/c^3} \sim 10^{-35}\text{m}$ sugere que a descrição do espaço-tempo como uma variedade contínua e diferenciável deixa de ser válida [1, 2], o que sugere que a simetria de Lorentz possa ser de alguma forma modificada numa escala mais fundamental. A física que conhecemos passa assim a ser entendida como uma teoria efetiva, que pode incorporar pequenas violações da simetria de Lorentz [3, 4] como uma "lembrança" da nova física da escala de Planck. Há aqui uma ideia fundamental do método científico em pauta: como toda teoria física, a Relatividade Restrita também teria o seu domínio de validade, e da exploração dos limites deste domínio novos conhecimentos podem ser descobertos.

Motivado essas ideias, um amplo programa de estudos tem se desenvolvido nas duas últimas décadas, girando em torno do conhecido *Modelo Padrão Estendido* (SME, do inglês "Standard Model Extension"), uma generalização do modelo padrão das partículas elementares, incorporando de forma sistemática a violação da simetria de Lorentz. Por

exemplo, a teoria de Maxwell usual, na RR, pode ser descrita pela Lagrangeana

$$\mathcal{L}^{ED} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}. \quad (1.1)$$

A partir dessa Lagrangeana, pode-se obter a forma covariante das equações de Maxwell. Dentro do formalismo do SME, é assumido que o eletromagnetismo pode incorporar pequenas correções, envolvendo tensores de fundo constantes. Impondo que a simetria de calibre usual do eletromagnetismo não seja alterada, pode-se concluir que existe um conjunto muito limitado de correções que podem ser incorporadas, e que se resumem à Lagrangeana

$$\mathcal{L}_{SME}^{ED} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \frac{1}{4}(k_F)^{\mu\nu\rho\sigma}F_{\mu\nu}F_{\rho\sigma} + \frac{1}{2}(k_{AF})^\mu\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma}A^\nu F^{\rho\sigma}. \quad (1.2)$$

Os dois novos termos violam a simetria de Lorentz por conterem tensores constantes (que não se transformam frente a uma mudança de referencial) $(k_F)^{\mu\nu\rho\sigma}$ e $(k_{AF})^\mu$. Entendendo-se esses termos como uma pequena perturbação da física já conhecida, uma miríade de efeitos devidos à violação de Lorentz podem ser sistematicamente derivados, e comparados com observações experimentais. Vínculos muito fortes sobre os valores das componentes de $(k_F)^{\mu\nu\rho\sigma}$ e $(k_{AF})^\mu$ são obtidos, e o resultado final desse ciclo de estudo teórico e experimental é que conseguimos verificar a validade da simetria de Lorentz com uma precisão cada vez maior, sensível até a potenciais efeitos oriundos da escala de Planck.

2 Objetivos

Este projeto busca estudar algumas das modificações decorrentes de dos novos termos que aparecem em (1.2) nas propriedades fundamentais do eletromagnetismo.

A partir de (1.2), podemos encontrar equações de Maxwell modificadas. É curioso que, formalmente, tais equações não são novas: correspondem ao eletromagnetismo em um meio dielétrico. As constantes k_F em particular podem ser entendidas como constantes de permissividade e permeabilidade não isotrópicos. A diferença, claro, está na interpretação: a equação (1.2) é entendida como uma *equação no vácuo*, ou seja, essas propriedades eletromagnéticas não triviais seriam observadas, por exemplo, na propagação da luz no vácuo. Isso gera sinais astrofísicos muito importantes, que levam a vínculos bastante fortes sobre esses coeficientes.

Já o coeficiente k_{AF} aparece multiplicando o fator $\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma}A^\nu F^{\rho\sigma}$, que é uma generalização para 3+1 dimensões do termo de Chern-Simons (CS). Na eletrodinâmica planar, o termo de CS tem imensa importância por incorporar efeitos topológicos no eletromagnetismo, ou seja, a influência de propriedades globais dos campos e do espaçotempo em que habitam. Essa relação enseja uma breve introdução à física de 2+1 dimensões no projeto, que representa uma área de pesquisa muito contemporânea e interessante, na interface entre teoria de campos e física de matéria condensada – desta última, os estudos recentes sobre materiais como grafeno tem motivado um interesse crescente por teorias como a de CS, que naturalmente vivem em 2+1 dimensões [5].

Os objetivos específicos podem ser assim descritos:

- Familiarizar-se com a formulação covariante do eletromagnetismo. Perceber que as equações de Maxwell podem ser escritas de forma covariante, e que são obtidas a partir da Lagrangeana (1.1). Esse estudo será feito a partir de notas de aula do curso de Relatividade Restrita, fornecidas pelo orientador, e de referências como [6, 7].
- Familiarizar-se com o conceito de *simetria de calibre*, no caso, a simetria $U(1)$ do eletromagnetismo, e perceber como ela conduz naturalmente à forma da Lagrangeana exibida em (1.1). Referências [6, 7].

- Estudar as propriedades básicas do eletromagnetismo em 2+1 dimensões, em particular o termo de CS. Perceber as sutilezas acerca da sua invariância de calibre, e o fato desse termo induzir uma massa para o fóton. Referências [8, 9].
- Estudar as modificações induzidas no eletromagnetismo pelas correções presentes em (1.2), em particular, relacionando as contribuições de k_F com os efeitos de um meio dielétrico. Referências [10, 11].

3 Metodologia

A componente fundamental do trabalho de Iniciação Científica é o estudo individualizado do aluno, treinando a independência e a auto-iniciativa fundamentais para a pesquisa científica. Este estudo será acompanhado pelo orientador, através de encontros semanais. A maior parte da bibliografia será de livros universitários de nível de graduação em física e artigos científicos.

4 Plano de Trabalho

O seguinte cronograma norteará, aproximadamente, a evolução do estudante dentro do projeto proposto.

- Terceiro Quadrimestre de 2022
 - Formulação covariante do eletromagnetismo. Simetria de Calibre.
- Primeiro Quadrimestre de 2023
 - Fundamentos do eletromagnetismo em $2+1$. Teoria de Chern-Simons.
- Segundo Quadrimestre de 2023
 - Eletromagnetismo com violações de Lorentz, seguindo as referências [10, 11]

Referências Bibliográficas

- [1] Ambjørn, Jan and Jurkiewicz, Jerzy and Loll, Renate, "Emergence of a 4D world from causal quantum gravity", Physical Review Letters (2004), 131301.
- [2] Doplicher, Sergio and Fredenhagen, Klaus and Roberts, John E., "The Quantum structure of space-time at the Planck scale and quantum fields", Commun. Math. Phys. (1995), 187--220.
- [3] Colladay, Don and Kostelecky, V. Alan, "Lorentz-violating extension of the standard model", Phys. Rev. (1998), 116002.
- [4] A. F. Ferrari, "A busca por violações da simetria de Lorentz: testando os princípios da relatividade restrita na escala de Planck", Rev. Bras. Ensino Fís. 41 (4) 2019, <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0092>.
- [5] E. Witten, "Three lectures on topological phases of matter," Riv. Nuovo Cim. 39 (2016) no.7, 313-370, doi:10.1393/ncr/i2016-10125-3 [arXiv:1510.07698].
- [6] Introduction to Electrodynamics, David J. Griffiths, Prentice Hall.
- [7] Special Relativity, A. P. French, W. W. Norton & Company.
- [8] Teoria Quântica dos Campos, Marcelo Otávio Caminha Gomes, Edusp, 2015, 536p, ISBN 10: 8531415470.
- [9] Zanelli, Jorge. "Introductory lectures on Chern-Simons theories." AIP Conference Proceedings. Vol. 1420. No. 1. American Institute of Physics, 2012.
- [10] V. A. Kostelecky and M. Mewes, "Signals for Lorentz violation in electrodynamics," Phys. Rev. D 66, 056005 (2002) doi:10.1103/PhysRevD.66.056005 [arXiv:hep-ph/0205211].
- [11] Q. G. Bailey and V. A. Kostelecky, "Lorentz-violating electrostatics and magnetostatics," Phys. Rev. D 70, 076006 (2004) doi:10.1103/PhysRevD.70.076006 [arXiv:hep-ph/0407252].