

# ELETRODINÂMICA DE BORN-INFELD NO TRATAMENTO DE PARTÍCULAS AXIÔNICAS

Jizreel Pereira da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mestre em Ensino de Física pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (jizreelsilva@yahoo.com.br)

**Resumo:** A eletrodinâmica de Born-Infeld é uma teoria que resolve o problema da autoenergia infinita da carga pontual, e sua aplicação no estudo de partículas axiônicas. Analisamos a Lagrangiana de Born-Infeld e as modificações nas equações de Maxwell. Em seguida, introduzimos o áxion, uma partícula hipotética que surge como solução para o problema da violação de simetria CP forte e um forte candidato à matéria escura. O acoplamento entre o campo do áxion e o campo eletromagnético é explorado no contexto da eletrodinâmica não linear, investigando as implicações fenomenológicas, como a birrefringência do vácuo induzida pelo áxion e suas consequências em astrofísica e cosmologia. As equações de campo resultantes são discutidas, destacando as diferenças em relação à eletrodinâmica de Maxwell-áxion e as implicações para a física de buracos negros.

**Palavras-chave:** Eletrodinâmica; Áxion; Born-Infeld; Autoenergia; Interação.

## INTRODUÇÃO

A eletrodinâmica de Maxwell, apesar de seu enorme sucesso, apresenta uma singularidade teórica notória: a autoenergia infinita de uma carga elétrica pontual. Para contornar essa dificuldade, Max Born e Leopold Infeld propuseram, em 1934, uma modificação não linear da teoria de Maxwell [1, 2].

A eletrodinâmica de Born-Infeld (BI) introduz um parâmetro de campo máximo,  $b$ , que regulariza o campo elétrico da carga pontual, resultando em uma autoenergia finita.

Paralelamente, a física de partículas moderna enfrenta seus próprios desafios, como o problema da violação de simetria Carga-Paridade (CP) na cromodinâmica quântica (QCD). A teoria de Peccei-Quinn propõe uma solução elegante através da introdução de uma nova partícula hipotética, o áxion [3-5]. O áxion não apenas resolve o problema da CP forte, mas também emergiu como um dos principais candidatos para a composição da matéria escura do universo [6-9]. Partículas do tipo áxion também surgem naturalmente em teorias de cordas, o que reforça seu interesse teórico [10].

O acoplamento do áxion com fótons é uma previsão fundamental da teoria, e seu estudo no regime de campos eletromagnéticos intensos, onde efeitos não lineares se tornam relevantes, é de grande interesse [11].

Este trabalho explora a interação entre áxions e o eletromagnetismo no âmbito da teoria de Born-

Infeld, investigando como a não linearidade da eletrodinâmica afeta a fenomenologia dos áxions.

## MATERIAL E MÉTODOS

A teoria de Born-Infeld é definida pela seguinte densidade Lagrangiana

$$\mathcal{L}_{BI} = b^2 \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{1}{2b^2} F_{\mu\nu} (\widetilde{F}^{\mu\nu})^2} \right)$$

onde  $b$  é o campo máximo de Born-Infeld. No limite de campos fracos ( $b \rightarrow \infty$ ), a Lagrangiana de Born-Infeld se reduz à Lagrangiana de Maxwell, como mostrado na Figura 1.

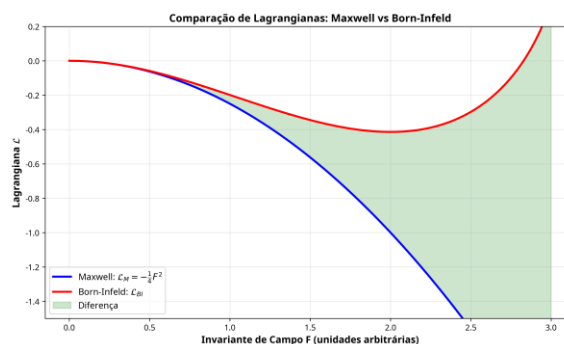


Figura 1. Comparação entre as densidades Lagrangianas de Maxwell e Born-Infeld em função do invariante de campo  $F$ . A teoria de BI converge para a de Maxwell no limite de campos fracos.

Uma das consequências mais importantes desta teoria é a modificação do campo elétrico de uma carga pontual  $q$ , que passa a ser regularizado, evitando a singularidade em  $r = 0$  e resultando em uma densidade de energia finita, como ilustrado na Figura 2.

A teoria de BI também possui implicações importantes quando acoplada à relatividade geral, levando a soluções de buracos negros regulares que evitam a singularidade central, embora a estabilidade de tais soluções seja um tópico de debate ativo [12-14].

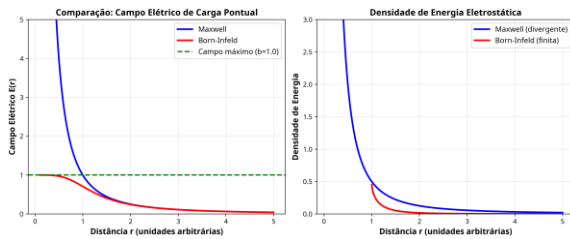


Figura 2. Esquerda: Comparação entre o campo elétrico de Maxwell (divergente em  $r = 0$ ) e o de Born-Infeld (limitado por  $b$ ). Direita: Densidade de energia correspondente, mostrando a finitude da autoenergia em BI.

Na discussão de partículas axiônicas, o áxion,  $a$ , é um campo pseudoescalar que surge da quebra da simetria de Peccei-Quinn. Sua dinâmica é descrita pela Lagrangiana

$$\mathcal{L}_a = \frac{1}{2}(\partial_\mu a)(\partial^\mu a) - V(a)$$

onde  $V(a)$  é o potencial do áxion, que lhe confere uma massa  $m_a$ . Este potencial é tipicamente periódico, como mostrado na Figura 3.

O acoplamento do áxion com o campo eletromagnético é dado pelo termo de interação

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -\frac{g_{a\gamma\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

onde  $g_{a\gamma\gamma}$  é a constante de acoplamento áxion-fóton. Este termo é crucial para a detecção experimental de áxions, como nos experimentos de haloscópio (ADMX), que buscam a conversão de áxions em fótons na presença de um campo magnético forte [15]. O espaço de parâmetros para a massa e o acoplamento do áxion é vasto, com regiões sendo exploradas por diversos experimentos (Figura 4).

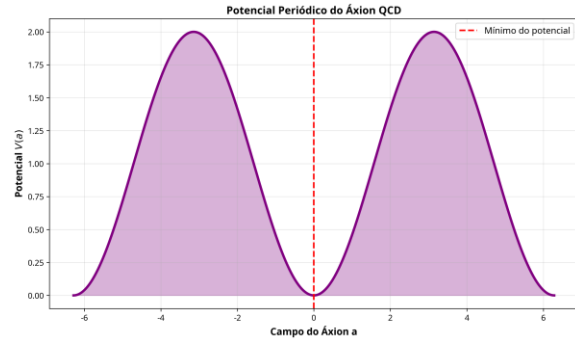


Figura 3. Forma do potencial periódico do áxion da QCD,  $V(a) \propto (1 - \cos(a/fa))$ , que gera a massa do áxion e garante a solução para o problema da CP forte.

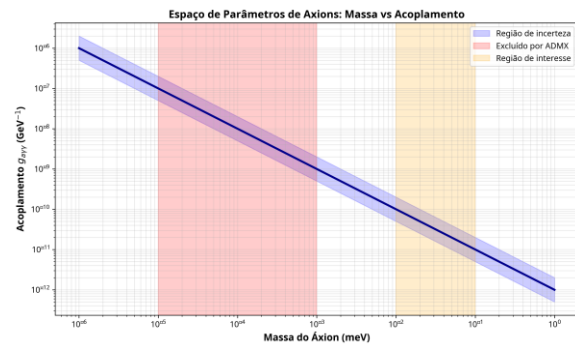


Figura 4. Espaço de parâmetros para o áxion da QCD, mostrando a relação entre a massa ( $m_a$ ) e a constante de acoplamento ( $g_{a\gamma\gamma}$ ). As regiões coloridas indicam áreas de exclusão experimental e de interesse teórico. Fonte: Adaptado de [6].

Para a discussão do acoplamento Born-Infeld-Áxion, a eletrodinâmica do áxion em um cenário não linear como o de Born-Infeld é descrita pela Lagrangiana total

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{BI} + \mathcal{L}_a + \mathcal{L}_{a\gamma\gamma}$$

O acoplamento com o áxion em um fundo de eletrodinâmica não linear induz uma resposta complexa do vácuo, que se comporta como um meio material com permissividade e permeabilidade efetivas [16].

Uma das consequências notáveis é a indução de birrefringência, mesmo em teorias não lineares que originalmente não a possuem, como a de Born-Infeld [17]. A presença do campo do áxion quebra a degenerescência entre as polarizações do fóton, fazendo com que a velocidade de propagação da luz dependa de sua polarização (Figura 5).

Este efeito é dependente da massa do áxion e da constante de acoplamento  $g_{a\gamma\gamma}$  [16, 18, 19]. A busca por birrefringência do vácuo é um teste experimental ativo da eletrodinâmica não linear [20].

A conversão ressonante de áxions em fótons é a base para experimentos de detecção como o ADMX.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A introdução da eletrodinâmica de Born-Infeld no estudo de partículas axiônicas oferece uma perspectiva teórica rica e com implicações fenomenológicas distintas em comparação com a eletrodinâmica de Maxwell. A principal modificação reside na natureza não linear da interação eletromagnética, que se manifesta de forma proeminente em regimes de campos intensos.

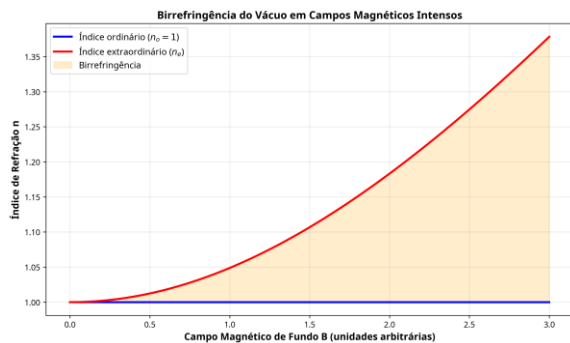


Figura 5. Ilustração da birrefringência do vácuo. Um campo magnético externo faz com que o vácuo se comporte como um cristal, com diferentes índices de refração para diferentes polarizações da luz.

Uma das consequências mais diretas é a regularização do campo elétrico, como visualizado na Figura 2. Enquanto na teoria de Maxwell a energia de uma carga pontual diverge, a teoria de Born-Infeld prevê uma autoenergia finita, eliminando uma das inconsistências teóricas do eletromagnetismo clássico. Este resultado, por si só, já justifica a exploração de teorias não lineares como a de Born-Infeld.

A fenomenologia de buracos negros também é significativamente alterada. As soluções de buracos negros carregados em relatividade geral acoplada à eletrodinâmica de Born-Infeld são regulares, ou seja, não possuem a singularidade de curvatura em seu centro, que é uma característica problemática das soluções de Reissner-Nordström (baseadas em Maxwell).

No entanto, a estabilidade dessas soluções regulares é uma questão complexa e ainda em aberto, com estudos recentes indicando possíveis instabilidades [13, 14].

A interação de áxions com tais objetos compactos poderiam levar a assinaturas observacionais únicas, por exemplo, na emissão de radiação de seus arredores.

No caso da discussão da birrefringência induzida e detecção de áxions, quando acoplada ao campo do

áxion, a não linearidade da eletrodinâmica de Born-Infeld introduz novos fenômenos. O trabalho de Paixão et al. [16] demonstra que, mesmo que a eletrodinâmica de Born-Infeld pura não apresente birrefringência, o acoplamento com o áxion induz este efeito.

Isso significa que o vácuo, na presença de um campo eletromagnético de fundo e de um campo de áxions, comporta-se como um meio anisotrópico, onde a velocidade da luz depende de sua polarização. Este fenômeno, ilustrado na Figura 5, abre uma nova janela para a detecção de áxions, complementar aos métodos tradicionais baseados na conversão áxion-fóton em cavidades ressonantes (Figura 6).

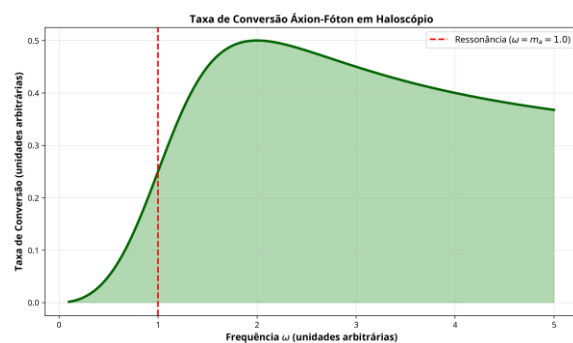


Figura 6. Taxa de conversão de áxions em fótons em um experimento de haloscópio, mostrando um pico de ressonância quando a frequência da cavidade é sintonizada com a massa do áxion ( $m_a$ ).

Levando em consideração a cosmologia do universo primordial e matéria escura, a cosmologia do universo primordial pode ser profundamente afetada pela interação entre a eletrodinâmica de Born-Infeld e os áxions. A abundância de áxions como matéria escura hoje depende crucialmente de seus mecanismos de produção no universo primitivo.

O principal mecanismo é o de misalignment, onde o campo de áxions, inicialmente deslocado de seu mínimo de potencial, começa a oscilar quando a taxa de expansão do universo,  $H$ , se torna comparável à massa do áxion,  $m_a(T)$ . A densidade de energia dessas oscilações se comporta como matéria fria e contribui para a matéria escura.

A equação de movimento para o campo de áxions em um universo em expansão é dada por

$$\ddot{a} + 3H(t)\dot{a} + m_a^2(t)a = 0$$

No entanto, na presença de campos eletromagnéticos primordiais, o termo de acoplamento  $\mathcal{L}_{a\gamma\gamma}$  introduz uma fonte adicional.

Em um cenário de Born-Infeld, a dinâmica dos campos eletromagnéticos é modificada, o que, por sua vez, altera a produção de áxions. Se campos magnéticos primordiais intensos existiram, a



saturação do campo elétrico imposta pela eletrodinâmica de Born-Infeld poderia ter suprimido a produção de áxions em comparação com a previsão da eletrodinâmica de Maxwell, alterando a abundância final de matéria escura [21, 22]. Isso impõe novos vínculos sobre o espaço de parâmetros do áxion, que devem ser reavaliados à luz de uma eletrodinâmica não linear.

Além disso, a conversão de áxions em fótons (e vice-versa) em plasmas primordiais seria afetada. A taxa de conversão depende da densidade do plasma e da intensidade dos campos magnéticos.

A eletrodinâmica de Born-Infeld, ao limitar a intensidade dos campos, poderia levar a uma taxa de termalização de áxions diferente daquela prevista pelo Modelo Padrão, com consequências para a temperatura da radiação cósmica de fundo em microondas (CMB) e para a nucleossíntese primordial.

Em suma, a eletrodinâmica de Born-Infeld não apenas oferece uma solução para o problema da autoenergia, mas também enriquece a fenomenologia do áxion, propondo novos mecanismos de detecção e alterando cenários astrofísicos e cosmológicos. A investigação mais aprofundada deste acoplamento é, portanto, um caminho promissor para a física além do Modelo Padrão.

### CONCLUSÃO

A combinação da eletrodinâmica de Born-Infeld com a física de áxions oferece um campo rico para investigação teórica com potenciais implicações fenomenológicas. A natureza não linear da teoria de Born-Infeld, ao regularizar o comportamento dos campos em altas intensidades, modifica a interação áxion-fóton de maneiras não triviais.

A indução de birrefringência e a alteração das propriedades de propagação da luz no vácuo são exemplos de fenômenos que podem, em princípio, fornecer assinaturas experimentais para sondar a natureza do eletromagnetismo e a existência de partículas axiônicas.

Futuros estudos podem explorar as consequências cosmológicas deste acoplamento, como a produção de áxions no universo primordial e seus efeitos na radiação cósmica de fundo, bem como o impacto em ambientes astrofísicos de campos magnéticos extremos, como magnetares, e na física de buracos negros carregados com campos não lineares.

### REFERÊNCIAS

[1] M. Born and L. Infeld. Foundations of the new eld theory. Proc. R. Soc. Lond. A, 144(852):425\_451, 1934.

[2] P. A. M. Dirac. A reformulation of the born-infeld electrodynamics. Proceedings of the Royal Society A, 257(1288):32\_43, 1960.

[3] R. D. Peccei and Helen R. Quinn. Cp conservation in the presence of pseudoparticles. Phys. Rev. Lett., 38:1440\_1443, 1977.

[4] Steven Weinberg. A new light boson? Phys. Rev. Lett., 40:223\_226, 1978.

[5] F. Wilczek. Problem of strong p and t invariance in the presence of instantons. Phys. Rev. Lett., 40:279\_282, 1978.

[6] C. B. Adams et al. Axion dark matter. arXiv e-prints, 2022.

[7] D. J. E. Marsh. Axion cosmology. Physics Reports, 643:1\_79, 2016.

[8] F. Chadha-Day, J. Ellis, and D. J. E. Marsh. Axion dark matter: What is it and why now? Science Advances, 8(1):eabj3618, 2022.

[9] D. J. E. Marsh. Cosmology of axion dark matter. arXiv e-prints, 2024.

[10] G. W. Gibbons and D. A. Rasheed. Sl(2,r) invariance of non-linear electrodynamics coupled to an axion and a dilaton. Physics Letters B, 365:46\_50, 1996.

[11] M. Novello and E. Goulart. Eletrodinâmica não linear: Causalidade e efeitos cosmológicos. Editora Livraria da Física, 2010.

[12] K. A. Bronnikov and R. A. Konoplya. Regular black holes sourced by nonlinear electrodynamics. Physical Review D, 105(12):124039, 2022.

[13] A. De Felice et al. Instability of nonsingular black holes in nonlinear electrodynamics. Physical Review Letters, 134(8):081401, 2025.

[14] J. G. Russo et al. Black holes and causal nonlinear electrodynamics. arXiv e-prints, 2026.

[15] R. Khawwaja et al. Axion dark matter experiment. Physical Review Letters, 123(3):031802, 2020.

[16] J. M. A. Paixão, L. P. R. Ospedal, M. J. Neves, and J. A. Helayël-Neto. The axion-photon mixing in non-linear electrodynamic scenarios. Journal of High Energy Physics, 2022(10):160, 2022.

[17] S. I. Kruglov. Nonlinear electrodynamics with birefringence. Physics Letters B, 740:126\_131, 2015.

[18] D. A. Burton, T. Dereli, and R. W. Tucker. Born-infeld axion-dilaton electrodynamics and electromagnetic con\_nement. Physics Letters B, 703(4):530\_535, 2011.



[19] O. Borysov et al. Using the nonlinear breit-wheeler process to test nonlinear electrodynamics. Physical Review D, 106(11):116015, 2022.

[20] N. Ahmadiniaz et al. Towards a vacuum birefringence experiment at the cern sps. arXiv e-prints, 2024.

[21] N. Bretón. Nonlinear electrodynamics and cosmology. Journal of Physics: Conference Series, 229:012006, 2010.

[22] S. H. Mazharimousavi and M. Halilsoy. Nonlinear maxwell's theory mimics dark energy. Annals of Physics, 460:169578, 2024.