

ANÁLISE ESTATÍSTICA GLOBAL DE LIMITES PARA ÁXIONS NO ACOPLAMENTO AXION-FÓTON

RAFAEL OLIVEIRA ALVES¹; WERNER KRAMBECK SAUTER²

¹Universidade Federal de Pelotas – rafael_alvescnt@hotmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – werner.sauter@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O axion é uma partícula hipotética proposta originalmente para resolver o problema da violação da simetria CP forte na cromodinâmica quântica (QCD) e, ao mesmo tempo, constitui uma candidata bem fundamentada para a matéria escura fria, responsável por cerca de 25% do conteúdo de massa-energia do universo. Essa dupla relevância — conceitual e cosmológica — explica o interesse contínuo da comunidade: desde detectores de laboratório até observações astrofísicas, diversos experimentos procuram sinais fracos de interação entre axions e o conteúdo eletromagnético (fótons), elétrons ou núcleos, que poderiam confirmar sua existência e clarificar seu papel cosmológico (DODD, 2020; RAFFELT, 1996). Em particular, o acoplamento fóton–axion $g_{a\gamma\gamma}$ oferece canais observacionais diretos explorados por haloscópios (p.ex. ADMX, HAYSTAC), helioscópios (p.ex. CAST, IAXO) e por limites indiretos derivados de observações astrofísicas; essas estratégias experimentais tornam o estudo de $g_{a\gamma\gamma}(m_a)$ central para avaliar até que ponto as previsões dos modelos KSVZ e DFSZ são testadas.

Apesar da grande quantidade de resultados publicados, a literatura apresenta uma heterogeneidade considerável em formatos, coberturas de massa, pressupostos experimentais e disponibilização de incertezas, o que dificulta combinações reprodutíveis e comparações quantitativas. O repositório *AxionLimits* (O'HARE, 2020) consolida muitas dessas curvas em formato acessível, oferecendo uma base global valiosa; contudo, a existência dessa compilação não elimina a necessidade de um procedimento padronizado e estatisticamente consistente para transformar os dados brutos em curvas combinadas interpretáveis.

O objetivo deste trabalho é, portanto, construir e documentar um *pipeline* reprodutível que use a base *AxionLimits* (≈ 180 artigos com dados experimentais publicados), normalize unidades e metadados, interpole cada curva em uma malha logarítmica comum e calcule um envelope experimental acompanhado de bandas de incerteza por *bootstrap*; adicionalmente, propõe-se uma combinação estatística aproximada baseada em modelos hierárquicos bayesianos para obter estimativas de credibilidade e identificar discrepâncias entre experimentos. Complementam a análise projeções por simulação (toy-MC) para cenários instrumentais (ex.: ganho por aumento de exposição ou redução de *background*) e um mapa de cobertura por massa que evidencia regiões pouco exploradas.

Os resultados apresentados nesse trabalho buscam fornecer uma curva combinada de sensibilidade com bandas de incerteza associadas, além de um mapa de cobertura experimental que evidencia as faixas de massa mais e menos exploradas pela literatura atual. A interpretação desses resultados indica onde os experimentos existentes já tangenciam as previsões dos modelos de axion de QCD e aponta faixas de massa/acoplamento com potencial de maior retorno experimental, oferecendo subsídios quantitativos para priorização de esforços instrumentais e observacionais. WEINBERG (1996) e RAFFELT (1996) contextualizam a importância dessas comparações para avaliar o progresso na busca por axions e para planejar experimentos futuros.

2. METODOLOGIA

Os dados analisados correspondem a um conjunto heterogêneo de aproximadamente 180 artigos, cada um contendo pares massa–limite para o acoplamento fóton–axion. Esse material está disponibilizado de forma organizada e acessível graças à colaboração internacional reunida no repositório AxionLimits (O’HARE, 2020). A etapa inicial do trabalho consistiu em leitura robusta e padronização desses arquivos: foi implementado um *parser* que lida com formatos variados (delimitadores diferentes, notações científicas variadas, cabeçalhos ausentes) e converte unidades para um padrão único (massa em μeV e $g_{a\gamma\gamma}$ em GeV^{-1}).

Para permitir comparações ponto a ponto entre experimentos adotamos uma representação contínua das curvas em uma malha logarítmica unificada. Cada curva original foi interpolada no espaço log–log, utilizando interpolações lineares em $\log m$ – $\log g$ ou *splines* cúbicas quando a suavidade local justificava; a escolha de trabalhar em escala logarítmica preserva dependências de potência e minimiza extrapolações inverossímeis. O envelope experimental bruto foi então calculado como o mínimo ponto-a-ponto sobre as curvas interpoladas e, para mitigar artefatos numéricos e picos isolados, aplicou-se filtragem por mediana seguida de suavização de Savitzky–Golay sobre $\log_{10} g$, de modo a manter a tendência física local sem introduzir vieses sistemáticos significativos.

A quantificação de incerteza foi tratada por duas vias complementares. Em primeiro lugar, adotou-se um esquema de reamostragem (*bootstrap over experiments*): ao gerar réplicas por amostragem com reposição do conjunto de curvas e recalculando o envelope em cada réplica, obtivemos bandas empíricas de variabilidade que expressam a sensibilidade da fronteira experimental à heterogeneidade do conjunto. Em segundo lugar, para uma combinação estatística mais fundamentada, formulamos um modelo hierárquico bayesiano em escala logarítmica em que cada observação $\log \tilde{g}_k(m)$ é modelada como gaussiana em torno de um valor combinado $\mu(m)$ com variância composta $\sigma_k^2 + \tau^2$, onde σ_k representa a incerteza experimental disponível e τ captura variações não explicadas entre experimentos. Quando apropriado, consideramos também impor correlação suave em $\mu(m)$ por meio de processos Gaussianos ou trabalhar em janelas de massa para reduzir o custo computacional sem perder coerência física.

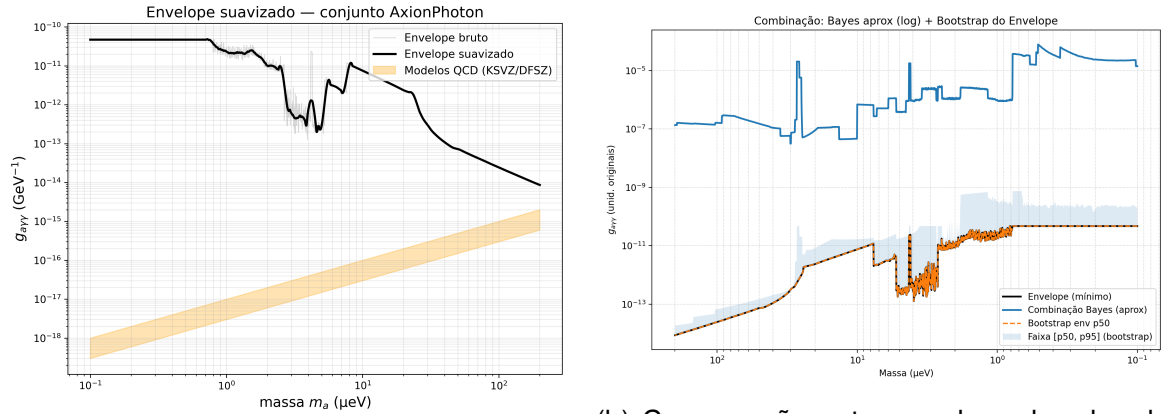
A implementação foi feita em Python 3.11 utilizando bibliotecas padrão de tratamento numérico e estatístico (*numpy*, *pandas*, *scipy*, *joblib*), armazenamento columnar (*parquet*) para reprodutibilidade, e *PyMC/ArviZ* para a inferência bayesiana; *notebooks* documentam cada etapa e sementes fixas garantem reprodutibilidade das análises de *bootstrap* e MCMC. Validamos o pipeline por meio de verificações de consistência — por exemplo, reproduzindo o envelope com o subconjunto de curvas usado no ano anterior e comparando interpolação linear log–log com *spline* cúbica — e produzimos produtos finais que incluem o envelope suavizado, mapas de cobertura por massa e curvas combinadas com bandas de incerteza, fornecendo assim um instrumento reprodutível e quantitativo para orientar interpretações físicas e decisões experimentais futuras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os procedimentos de ingestão, padronização e interpolação foram concluídos produzindo um envelope experimental consolidado para o acoplamento fóton–axion $g_{a\gamma\gamma}(m_a)$ em uma malha logarítmica entre 0,1 e 200 μeV . Após filtragem por mediana e suavização Savitzky–Golay aplicada em $\log_{10} g$, a curva final sintetiza o limite mais restritivo disponível por massa; numericamente, o envelope suavizado varia aproximadamente entre $g \approx 8,6 \times 10^{-15}$ (mínimo local) e $g \approx 4,7 \times 10^{-11}$

(máximo no grid), com valor mediano em torno de $5,2 \times 10^{-12}$. Esta curva representa, de forma reproduzível e documentada, a fronteira experimental atual para o acoplamento axion–fóton, pronta para comparação direta com previsões teóricas (KSVZ/DFSZ) e para uso em discussões sobre prioridades experimentais.

A variabilidade do envelope foi avaliada por bootstrap sobre experimentos, que fornece bandas empíricas de incerteza, e por uma combinação hierárquica bayesiana aplicada em janelas de massa, cuja estimativa mediana resulta em limites ligeiramente mais conservadores que o mínimo ponto-a-ponto — evidenciando que parte do envelope bruto reflete heterogeneidade experimental.



(a) Envelope suavizado do acoplamento $g_{a\gamma\gamma}$ como função da massa m_a .

(b) Comparação entre envelope, bandas de bootstrap e estimativa hierárquica bayesiana.

Figura 1: Resultados principais da análise combinada dos limites experimentais

4. CONCLUSÕES

O principal avanço do trabalho é de natureza metodológica e de reprodutibilidade: foi desenvolvido um pipeline computacional robusto capaz de usar, padronizar e representar de forma contínua um conjunto heterogêneo e extenso de limites experimentais sobre o acoplamento fóton–axion. A inovação consiste na integração de etapas automatizadas — parser tolerante a formatos variados, normalização de unidades, interpolação log–log em malha unificada e armazenamento columnar — com procedimentos estatísticos explícitos (reamostragem bootstrap e esquema hierárquico bayesiano) que permitem quantificar a estabilidade e a confiabilidade da fronteira experimental. Esse arcabouço transforma a prática usual de montar envelopes empíricos em um processo reproduzível, auditável e passível de refinamento sistemático.

Do ponto de vista metodológico, a contribuição inclui a combinação de filtros numéricos (mediana local, Savitzky–Golay) para tratamento de artefatos, e a adoção de modelos probabilísticos hierárquicos para incorporar dispersões entre experimentos quando possível. Paralelamente, a disponibilização de outputs intermediários (curvas interpoladas em formato columnar, réplicas bootstrap, scripts e notebooks) assegura que outras equipes possam reproduzir, validar e estender a análise — por exemplo, substituindo hipóteses sobre incertezas experimentais ou adotando processos Gaussianos para impor correlação espacial em massa. Assim, o trabalho atua tanto como instrumento de síntese do conhecimento experimental atual quanto como plataforma para testes de cenários instrumentais e de análises estatísticas alternativas. O trabalho encontra-se em estágio avançado, contando

com produtos intermediários e figuras geradas e devidamente documentadas, aqui brevemente introduzidas. Os próximos passos envolvem a execução final do MCMC para o modelo hierárquico, acompanhada de diagnóstico detalhado, bem como a inclusão sistemática das incertezas experimentais reportadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

O'HARE, C. **cajohare/AxionLimits: AxionLimits**. Zenodo, v1.0, Julho de 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3932430. Disponível em: <<https://cajohare.github.io/AxionLimits/>>.

SCHWARTZ, M. D. **Quantum Field Theory and the Standard Model**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. ISBN 978-1-107-03473-1.

SREDNICKI, M. **Quantum Field Theory**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

CHENG, T.-P.; LI, L.-F. **Gauge Theory of Elementary Particle Physics**. Oxford: Oxford University Press, 1984.

RAFFELT, G. G. **Stars as Laboratories for Fundamental Physics: The Astrophysics of Neutrinos, Axions, and Other Weakly Interacting Particles**. Chicago: University of Chicago Press, 1996.

WEINBERG, S. **The Quantum Theory of Fields. Vol. II: Modern Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

DURRER, R.; NERONOV, A. **Cosmological Magnetic Fields: Their Generation, Evolution and Observation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

LARKOSKI, A. J. **Elementary Particle Physics: An Intuitive Introduction**. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. ISBN 978-1-108-49698-8.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical Recipes in FORTRAN 77: The Art of Scientific Computing**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. ISBN 0-521-43064-X.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D.; BURDEN, A. M. **Numerical Analysis**. 10th ed. Boston: Cengage Learning, 2015. ISBN 978-1-305-26536-7.

MCKINNEY, W. **Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython**. 3rd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2022.