

ANÁLISE ESTATÍSTICA E PROJEÇÕES DE FAIXAS DE MASSA E ACOPLAMENTO DO AXION PARA FUTURAS PESQUISAS EXPERIMENTAIS BASEADAS NOS MODELOS KSVZ E DFSZ

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, uma partícula hipotética proposta para resolver o problema da violação da simetria CP forte na cromodinâmica quântica (QCD), também emerge como uma forte candidata para a matéria escura fria, que compõe cerca de 25% do conteúdo de massa-energia do universo. Ao longo das últimas décadas, inúmeros experimentos têm buscado detectar essa partícula, investigando suas possíveis interações fracas com fótons, elétrons e núcleos. No contexto da matéria escura, os axions são particularmente interessantes por sua capacidade de explicar observações cosmológicas e astrofísicas sem a necessidade de novas forças ou partículas além do Modelo Padrão da física de partículas (DODD, 2020).

O objetivo desta pesquisa é realizar uma análise detalhada das faixas de massa e acoplamento investigadas pelos experimentos focados na detecção de axions. Utilizando os modelos teóricos mais comuns, KSVZ (Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov) e DFSZ (Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky), esta investigação reunirá dados de massa e acoplamento dos principais experimentos em curso, incluindo ADMX, CAST, HAYSTAC, entre outros. A partir desses dados, será feita uma análise estatística para identificar regiões no espaço de parâmetros que foram pouco exploradas ou que oferecem perspectivas promissoras para futuras pesquisas.

Além da coleta e organização de dados experimentais, a pesquisa visa desenvolver uma simulação que projete as faixas de massa e acoplamento já investigadas. Isso permitirá visualizar não apenas as áreas já exploradas, mas também destacar regiões onde ainda existem lacunas significativas, gerando assim possíveis sugestões de faixas inexploradas que podem ser alvos de novos experimentos. A abordagem será complementada por uma análise estatística que identificará tendências nos dados.

Essa investigação busca contribuir para o avanço na busca pelo axion como partícula de matéria escura, fornecendo uma visão abrangente das faixas investigadas e sugerindo novos caminhos para sua detecção, conforme as previsões dos modelos KSVZ e DFSZ.

2. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em uma análise sistemática de dados experimentais relacionados à pesquisa de axions, com ênfase na massa (m_a) e no acoplamento axion-fóton ($g_{a\gamma\gamma}$). Inicialmente, os dados são coletados de experimentos importantes, como ADMX, CAST e HAYSTAC, e organizados em uma estrutura padronizada, com a massa expressa em μeV e o acoplamento em

GeV^{-1} . Esses dados são utilizados para gerar gráficos que ilustram as faixas de massa e acoplamento exploradas por cada experimento.

A análise baseia-se em métodos estatísticos e de interpolação para identificar padrões e lacunas nos dados. Utiliza-se a linguagem de programação Python, com o auxílio de bibliotecas científicas, para processar e visualizar os resultados. A partir disso, são gerados gráficos no espaço de parâmetros $m_a \times g_{a\gamma\gamma}$, onde se sobrepõem os limites estabelecidos pelos modelos teóricos KSVZ e DFSZ, bem como as faixas de exclusão experimental.

O foco principal é a identificação de regiões ainda inexploradas que possam servir de base para futuras investigações. O estudo também leva em consideração a relação entre a taxa de conversão axion-fóton ($P(a \rightarrow \gamma)$) e os parâmetros físicos, destacando a relevância de se explorar uma ampla gama de massas e acoplamentos para maximizar as chances de detecção de axions. Ao final, as simulações realizadas fornecem projeções sobre os avanços futuros na sensibilidade experimental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise abrangente dos experimentos de busca por axions revelou padrões significativos na exploração do espaço de parâmetros massa-acoplamento. Os dados coletados de 13 experimentos principais demonstram uma cobertura expressiva, embora não uniforme, abrangendo uma faixa de massa de 0 a $150 \mu eV$. A sensibilidade experimental alcançada apresenta variações consideráveis, com o melhor resultado atingindo $1.00 \times 10^{-16} GeV^{-1}$, significativamente abaixo da sensibilidade média de $5.61 \times 10^{-12} GeV^{-1}$, indicando um progresso substancial nas técnicas experimentais mais recentes.

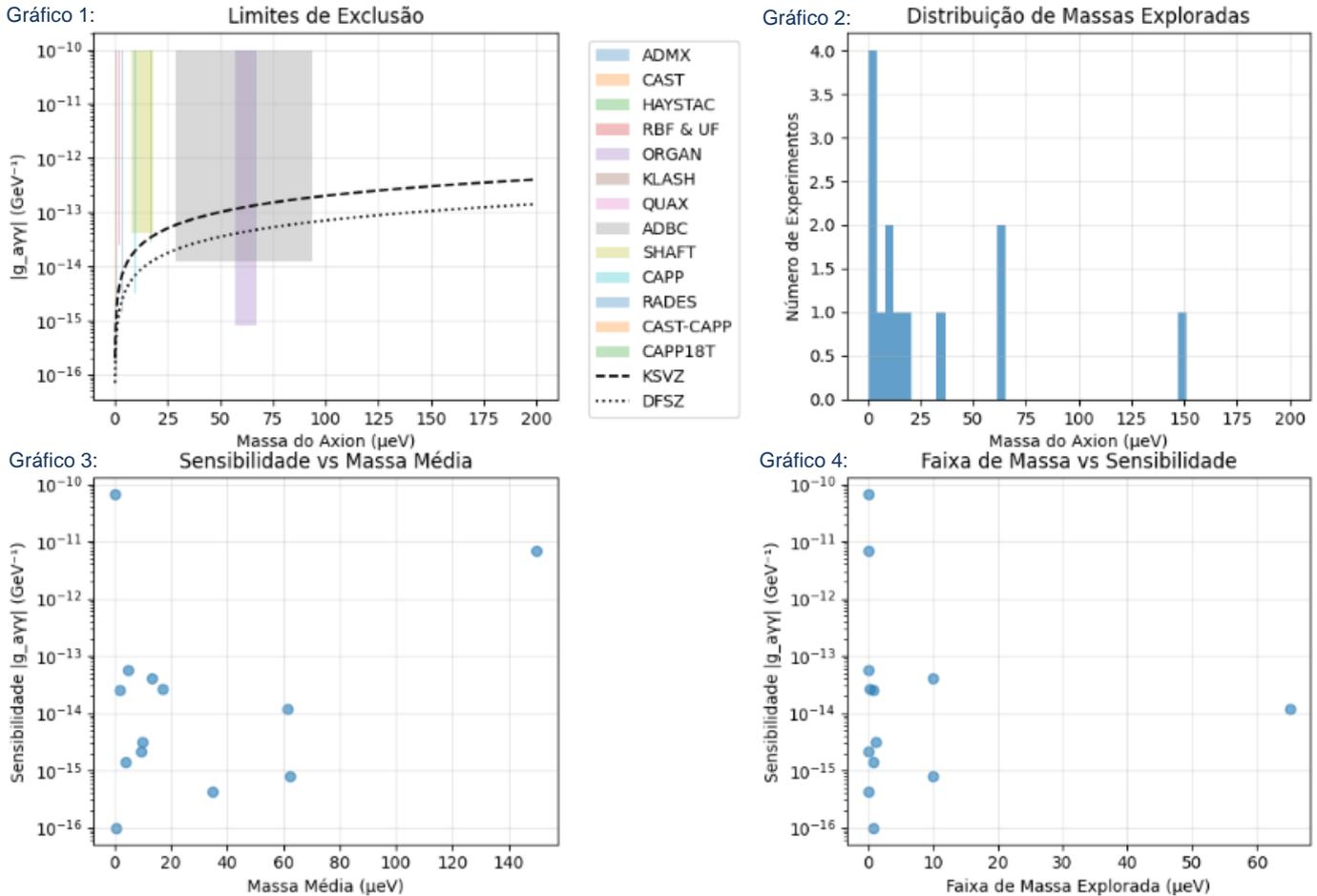
A distribuição dos experimentos no espaço de parâmetros revela cinco lacunas principais, sendo a mais significativa localizada entre 67.20 e $150.00 \mu eV$, representando um gap de $82.80 \mu eV$. Esta região inexplorada, juntamente com outras lacunas menores, mas ainda significativas (como o intervalo de $22.60 \mu eV$ entre 34.60 e $57.20 \mu eV$), sugere áreas prioritárias para futuras investigações. A massa média dos experimentos analisados, situada em $28.34 \mu eV$, indica uma tendência de concentração das investigações em massas intermediárias.

Os resultados obtidos através da análise estatística e simulações gráficas sugerem que futuros experimentos devem considerar especialmente a região de massa pouco explorada entre 67.20 e $150.00 \mu eV$, visando uma sensibilidade alvo de aproximadamente $5.61 \times 10^{-13} GeV^{-1}$. Esta recomendação baseia-se na análise das tendências observadas e na distribuição atual dos experimentos no espaço de parâmetros. Os dados mostram uma clara evolução na sensibilidade dos experimentos ao longo do tempo, com técnicas mais recentes alcançando melhores resultados, particularmente em experimentos como KLASH (ALESINI, 2017) e ORGAN (MCALLISTER, 2024), que atingiram sensibilidades notáveis em suas respectivas faixas de massa.

A comparação entre os diferentes métodos experimentais empregados revela que as cavidades de micro-ondas continuam sendo a técnica predominante, embora abordagens alternativas, como helioscópios e interferometria, também apresentem resultados promissores em faixas específicas de massa e acoplamento. Esta diversidade de métodos experimentais tem sido crucial para

expandir a cobertura do espaço de parâmetros, permitindo investigações complementares em diferentes regiões.

Figura: Resultados da implementação em Python com os dados mais recentes:



Fonte: o autor.

O Gráfico 1 apresenta os limites de exclusão para o acoplamento axion-fóton em função da massa do axion. As áreas coloridas indicam as regiões excluídas por diferentes experimentos, enquanto as linhas tracejadas e pontilhadas correspondem às previsões teóricas dos modelos KSVZ e DFSZ, respectivamente. No Gráfico 2, é exibida a distribuição de massas investigadas pelos experimentos de busca por axions. O histograma revela a concentração dos experimentos em diversas faixas de massa, destacando as regiões mais intensamente estudadas. O Gráfico 3 mostra a correlação entre a sensibilidade do acoplamento axion-fóton e a massa média investigada por cada experimento, com uma escala logarítmica no eixo vertical que permite observar a ampla gama de sensibilidades atingidas. Por fim, o Gráfico 4 ilustra a relação entre a faixa de massa explorada e a sensibilidade alcançada pelos experimentos, evidenciando como a largura da região de busca se relaciona com a capacidade de detecção de cada experimento.

É notável que os experimentos mais recentes têm conseguido se aproximar das previsões teóricas dos modelos KSVZ e DFSZ, particularmente na região de massas intermediárias. Este progresso sugere que as técnicas experimentais estão amadurecendo e se tornando cada vez mais sensíveis, aumentando as perspectivas de uma possível detecção de axions em um futuro próximo.

4. CONCLUSÕES

A avaliação dos dados coletados indica a existência de áreas promissoras para futuras investigações sobre axions, especialmente nas faixas menos exploradas mencionadas anteriormente. A partir da análise estatística e das simulações, é possível identificar lacunas nas faixas de massa e acoplamento que foram estudadas.

A junção da análise estatística com simulações gráficas pode orientar os pesquisadores na definição das próximas etapas experimentais, aumentando as chances de descobrir novas interações relacionadas aos axions. Essas recomendações devem ser levadas em conta no planejamento dos próximos experimentos, visando maximizar a eficácia na busca por matéria escura por meio da detecção de axions.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DODD, James E.; GRIPAIOS, Ben. **The ideas of particle physics**. Cambridge University Press, 2020.

ALESINI, David et al. The KLASH proposal. **arXiv preprint arXiv:1707.06010**, 2017.

MCALLISTER, Ben T. et al. Limits on Dark Photons, Scalars, and Axion-Electromagnetodynamics with the ORGAN Experiment. **Annalen der Physik**, v. 536, n. 1, p. 2200622, 2024.