

Trabalho

Título em Português:

Busca indireta de matéria escura com observatórios de raios gama

Título em Inglês:

Indirect dark matter searches with gamma-ray observatories

Autor:

Lorenzo Mendes Vasconcellos de Oliveira

Instituição:

Universidade de São Paulo

Unidade:

Instituto de Física de São Carlos

Orientador:

Luiz Vitor de Souza Filho

Área de Pesquisa / SubÁrea:

Física das Partículas Elementares e Campos

Agência Financiadora:

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

BUSCA INDIRETA DE MATÉRIA ESCURA COM OBSERVATÓRIOS DE RAIOS GAMA

Lorenzo Mendes Vasconcellos de Oliveira

Luiz Vitor de Souza Filho

USP-IFSC

lorenzomevo@usp.br

Objetivos

Atualmente, acredita-se que a densidade de matéria do Universo é constituída principalmente por uma componente desconhecida, denominada Matéria Escura (DM). Acredita-se também que a DM é formada por uma nova partícula elementar neutra, estável e não-bariônica. Em ambientes de alta densidade do Universo, a DM pode auto-aniquilar e produzir um forte sinal de raios gama. Nunca foi detectado qualquer sinal de matéria escura e os dados têm sido usados para reduzir o espaço de parâmetros permitido para as partículas de matéria escura. Este projeto aborda um modelo de física de partículas para além do modelo padrão, adicionando um setor escuro e uma nova simetria ao modelo já conhecido. Esta análise tem como objetivo melhorar a sensibilidade de detecção de um sinal de matéria escura que poderá ser obtido por observatórios de raios gama.

Métodos e Procedimentos

O modelo de DM deste trabalho é o *Dark Photon*, que adiciona um setor escuro com uma simetria $U(1)$ que dá origem a um bóson escuro

massivo que dá o nome ao modelo. Este bóson se acopla às correntes eletromagnéticas do modelo padrão, o que permite que seja detectado a partir de interações com fótons. Por isso tratamos do processo de decaimento de um *Dark Photon* em 3 fótons, que é chamado de tridente. Neste processo, caso a massa do *Dark Photon* seja muito menor que a massa do férmion mais leve, a lagrangiana do modelo pode ser simplificada no contexto de teoria de campos efetiva e se torna uma lagrangiana de Euler-Heisenberg:

$$L = \frac{\epsilon\alpha^2}{45m_e} (14F'_{\mu\nu}F^{\nu\lambda}F_{\lambda\rho}F^{\rho\mu} - 5F'_{\mu\nu}F^{\mu\nu}F_{\alpha\beta}F^{\alpha\beta})$$

Com $F'_{\mu\nu}$ e $F_{\mu\nu}$ são os tensores de força dos campos do *Dark Photon* (A') e do fóton (A) respectivamente. A partir da lagrangiana encontramos o vértice relevante para a interação utilizando o pacote FeynRules para o software Mathematica e utilizamos este vértice como entrada para o software CalcHEP, que é capaz de calcular a taxa de decaimento do processo a partir de integrações por Monte Carlo. Para as simulações, os valores dos parâmetros do modelo foram fixados de forma arbitrária ($\epsilon = 10^{-4}$ e $m_{A'} = 10^{-6}$ GeV), mas respeitando a hipótese de que $m_{A'} \ll 2m_e$, já

que podemos obter o espectro de forma independente dos parâmetros.

Resultados

Após as integrações por Monte Carlo, foi possível obter o espectro normalizado em função da variável $x = 2E_\gamma m_{A'}$ a seguir

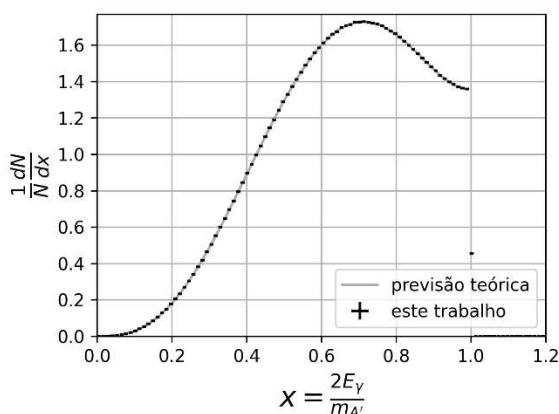


Figura 1: Espectro normalizado dos fótons emitidos

Conclusões

A forma do espectro obtido está de acordo com o calculado teoricamente, com o corte em $x=1$ devido à conservação de 4-momento também de acordo com o esperado. No entanto este resultado foi calculado no referencial do *Dark Photon*, ou seja, para obtermos um sinal que pode ser medido por observatórios é necessário mudarmos de referencial, que pode ser feito pela aplicação de um boost. Além disso, este resultado é válido apenas em um regime de massas específico, mas pode ser expandido para massas mais próximas à do elétron a partir de correções com termos de ordens maiores em $(m_{A'}/m_e)$.

Agradecimentos (opcional)

Agradeço à FAPESP pelo financiamento e viabilização deste projeto. Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho, por tudo que

me ensinou durante o período. Também agradeço a todos os integrantes do grupo APOEMA, professores e alunos, que me guiaram durante este período.

Referências

LINDEN, Tim; NGUYEN, Thong TQ; TAIT, Tim MP. Indirect searches for dark photon-photon tridents in celestial objects. **arXiv preprint arXiv:2402.01839**, 2024.

POSPELOV, Maxim; RITZ, Adam; VOLOSHIN, Mikhail. Bosonic super-WIMPs as keV-scale dark matter. **Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology**, v. 78, n. 11, p. 115012, 2008.

CHEUNG, Kingman et al. Searching for Dark Photon Tridents Through Primordial Black Hole Signatures. **arXiv preprint arXiv:2503.04175**, 2025.

FABBRICHESI, Marco; GABRIELLI, Emidio; LANFRANCHI, Gaia. **The physics of the dark photon: a primer**. Cham, Switzerland: Springer, 2021.

ALLOUL, Adam et al. FeynRules 2.0—A complete toolbox for tree-level phenomenology. **Computer Physics Communications**, v. 185, n. 8, p. 2250-2300, 2014.

BELYAEV, Alexander; CHRISTENSEN, Neil D.; PUKHOV, Alexander. CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model. **Computer Physics Communications**, v. 184, n. 7, p. 1729-1769, 2013.

MCDERMOTT, Samuel D.; PATEL, Hiren H.; RAMANI, Hari Krishnan. Dark photon decay beyond the Euler-Heisenberg limit. **Physical Review D**, v. 97, n. 7, p. 073005, 2018.

CIRELLI, Marco; STRUMIA, Alessandro; ZUPAN, Jure. Dark matter. **arXiv preprint arXiv:2406.01705**, 2024.

INDIRECT DARK MATTER SEARCHES WITH GAMMA RAY OBSERVATORIES

Lorenzo Mendes Vasconcellos de Oliveira

Luiz Vitor de Souza Filho

USP-IFSC

lorenzomevo@usp.br

Objectives

Nowadays, it is generally accepted that the matter density of the universe mainly consists of an unknown component, called Dark Matter (DM). It is also believed that DM is formed of a new neutral, stable and non-baryonic elementary particle. In high density environments of the Universe DM may self-annihilate and produce a strong gamma-ray signal. No dark matter signal has ever been detected, and the data has been used to shrink the allowed parameter space for dark matter particles. This project studies a particle physics model beyond the Standard Model, adding a dark sector and a new symmetry to the Standard Model. The main objective of this analysis is to improve the detection sensitivity to a dark matter signal that could be detected by gamma-ray observatories.

Materials and Methods

This work's DM model is the Dark Photon, which adds a new dark sector with a U(1) symmetry that originates a new dark boson with the model's name. This boson couples to the electromagnetic currents of the Standard Model,

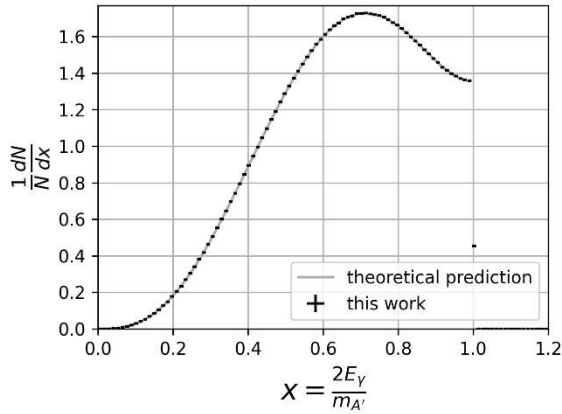
which enables us to detect it from photon interactions. Therefore, we study the decay process of the dark photon into 3 photons, which is called a "trident". In this decay, if the dark photon mass is much smaller than the lightest fermion, the model's lagrangian can be simplified in the context of effective field theory and becomes an Euler-Heisenberg lagrangian:

$$L = \frac{\epsilon\alpha^2}{45m_e} (14F'_{\mu\nu}F^{\nu\lambda}F_{\lambda\rho}F^{\rho\mu} - 5F'_{\mu\nu}F^{\mu\nu}F_{\alpha\beta}F^{\alpha\beta})$$

Where $F'_{\mu\nu}$ and $F_{\mu\nu}$ are the field strength tensors of the dark photon (A') and the photon (A) respectively. From the lagrangian we find the relevant vertex of the interaction using the FeynRules package for the software Mathematica and use this vertex as input for the CalcHEP software, that can find the decay width from Monte Carlo integrations. For these simulations the values of the model's parameters were chosen arbitrarily ($\epsilon = 10^{-4}$ and $m_{A'} = 10^{-6}$ GeV), while still respecting the hypothesis that $m_{A'} \ll 2m_e$, as we can obtain the spectrum independently from these parameters.

Results

From the Monte Carlo integrations it was possible to obtain the following normalized spectrum as function of the new Variable $x = 2E_\gamma/m_{A'}$:



Picture 1: Photon normalized spectrum

Conclusions

The spectrum aligns with the analytical calculations, with the cutoff at $x=1$ explained by 4-momentum conservation as expected. However this result was calculated in the dark photon rest frame, which means we need to change frames to obtain a signal measurable by observatories, which can be done by the application of a boost. In addition, this result is valid only in a strict mass regime, although it can be expanded for masses closer to the electron by new terms of higher order in $(m_{A'}/m_e)$.

Acknowledgements (optional)

I acknowledge FAPESP, for financial support and making this project possible. I also acknowledge my supervisor Dr. Luiz Vitor de Souza Filho for all he taught me during the project. Finally, I acknowledge all members of the group APOEMA, teachers and students, who guided me through the project.

References

LINDEN, Tim; NGUYEN, Thong TQ; TAIT, Tim MP. Indirect searches for dark photon-photon tridents in celestial objects. **arXiv preprint arXiv:2402.01839**, 2024.

POSPELOV, Maxim; RITZ, Adam; VOLOSHIN, Mikhail. Bosonic super-WIMPs as keV-scale dark matter. **Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology**, v. 78, n. 11, p. 115012, 2008.

CHEUNG, Kingman et al. Searching for Dark Photon Tridents Through Primordial Black Hole Signatures. **arXiv preprint arXiv:2503.04175**, 2025.

FABBRICHESI, Marco; GABRIELLI, Emidio; LANFRANCHI, Gaia. **The physics of the dark photon: a primer**. Cham, Switzerland: Springer, 2021.

ALLOUL, Adam et al. FeynRules 2.0—A complete toolbox for tree-level phenomenology. **Computer Physics Communications**, v. 185, n. 8, p. 2250-2300, 2014.

BELYAEV, Alexander; CHRISTENSEN, Neil D.; PUKHOV, Alexander. CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model. **Computer Physics Communications**, v. 184, n. 7, p. 1729-1769, 2013.

MCDERMOTT, Samuel D.; PATEL, Hiren H.; RAMANI, Harikrishnan. Dark photon decay beyond the Euler-Heisenberg limit. **Physical Review D**, v. 97, n. 7, p. 073005, 2018.

CIRELLI, Marco; STRUMIA, Alessandro; ZUPAN, Jure. Dark matter. **arXiv preprint arXiv:2406.01705**, 2024.