

Desafios em astropartículas

Clarissa Siqueira

Observatório Nacional

Resumo

A área de astropartículas ocupa uma posição central na investigação de questões fundamentais da física moderna, conectando física de partículas, cosmologia e astrofísica. Dentre os principais problemas destacamos a natureza da matéria escura e da energia escura, a inflação primordial, a assimetria matéria-antimatéria do universo e a origem de mensageiros cósmicos de altíssimas energias. Neste artigo, revisamos as principais evidências observacionais da matéria escura, que abrangem diferentes escalas, desde as de galáxias até as cosmológicas, e discutimos os dois cenários mais explorados para sua natureza: buracos negros primordiais e novas partículas fundamentais além do Modelo Padrão. Exploramos os principais gargalos teóricos e experimentais que desafiam a solução da busca pela natureza da matéria escura, destacando os associados a distribuições de massa estendidas para buracos negros primordiais e à ausência de sinais de partículas massivas fracamente interagentes em experimentos de detecção direta, indireta e em aceleradores. Discutimos ainda o papel dos experimentos de próxima geração, incluindo telescópios de raios gama de muito alta energia e detectores multimessageiros. Por fim, concluimos que a combinação entre observações de alta precisão e avanços teóricos será decisiva para elucidar a microfísica da matéria escura e aprofundar nossa compreensão do universo extremo.

Abstract

Astroparticle physics plays a central role in addressing fundamental questions in modern physics by connecting particle physics, cosmology, and astrophysics. Among the main problems, we highlight the nature of dark matter and dark energy, primordial inflation, the matter-antimatter asymmetry of the universe, and the origin of ultra-high-energy cosmic messengers. In this article, we review the main observational evidence for dark matter, which spans scales from galactic to cosmological, and discuss the two most explored scenarios for its nature: primordial black holes and new fundamental particles beyond the Standard Model. We explore the main theoretical and experimental bottlenecks that challenge the search for the nature of dark matter, highlighting those associated with extended mass distributions of primordial black holes and the absence of weakly interacting massive particle signals in direct, indirect, and accelerator detection experiments. We also discuss the role of next-generation experiments, including very high-energy gamma-ray telescopes and multi-messenger detectors. Finally, we conclude that the combination of high-precision observations and theoretical advances will be crucial to elucidating the microphysics of dark matter and deepening our understanding of the extreme universe.

Palavras-chave: astropartículas; matéria escura; partículas fundamentais; buracos negros primordiais; multimessageiros; métodos de detecção.

Keywords: astroparticles; dark matter; fundamental particles; primordial black holes; multimessengers; detection methods.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7n1.52150](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7n1.52150)

1 Introdução

A área de astropartículas reúne três grandes áreas da física, incluindo física de partículas, cosmologia e astrofísica, com o intuito de desvendar grandes mistérios da física moderna. A compreensão da origem e evolução do Universo, de seus constituintes fundamentais e de suas interações, tem evoluído significativamente com o avanço das tecnologias nessa direção, incluindo desde teles-

cópios que cobrem diferentes escalas de energia, expandindo para altíssimas energias, até robustos experimentos realizados em terra, como detectores de partículas [1, 2]. Apesar dos avanços tecnológicos, os principais problemas em aberto envolvendo o Universo e seus constituintes permanecem sem resposta.

De fato, um dos mais relevantes problemas em aberto atuais na área de astropartículas é ampla-

mente conhecido como problema da massa faltante ou matéria escura (ME). As observações indicam que 85% do conteúdo de matéria do Universo [3] é composto por essa tal matéria que não interage com a luz, é fria no universo primordial e cosmologicamente estável. As evidências de sua existência surgem em escalas que vão desde galáxias até escalas cosmológicas [4, 5]. Apesar de observarmos os efeitos gravitacionais da ME, desconhecemos sua natureza fundamental. Duas grandes vertentes abordam o problema da ME: supor que seja uma partícula elementar adicional ao Modelo Padrão da Física de Partículas (MP) ou que seja um buraco negro primordial (PBH, sigla do inglês *Primordial Black Hole*) [5–7]. As buscas por sinais de ME têm sido extensas, sem nenhuma resposta até então [8–10]. Dedicaremos a maior parte deste artigo a este problema, que será detalhado nas seções seguintes.

Além da ME, a compreensão do universo primordial também se apresenta como um forte desafio em astropartículas. As flutuações primordiais, observadas por meio da radiação cósmica de fundo (CMB, sigla do inglês *Cosmic Microwave Background Radiation*) [3], são consistentes com a existência de um período de aceleração rápida, conhecido como período inflacionário ou inflação. A inflação cósmica explica muito bem o surgimento das perturbações primordiais, a homogeneidade e planitude observadas através da CMB, entretanto, a microfísica envolvida com a inflação e a dinâmica do período de reaquecimento permanecem desconhecidas [11–13]. Alguns modelos inflacionários preveem a formação de relíquias como buracos negros primordiais, que podem ser conectados à física da ME, e ondas gravitacionais. Uma possível detecção ou exclusão destes mensageiros poderia trazer informações valiosas a respeito daquele período primordial [14].

Podemos ainda citar, além da inflação e da ME, outros problemas que envolvem as grandes áreas de cosmologia, física de partículas e astrofísica, dentre os quais o problema da massa dos neutrinos se destaca [15], uma vez que gera impactos teóricos para a física de partículas e para a cosmologia. Além deste, a natureza da energia escura [16], componente com pressão negativa adicionada ao Modelo Cosmológico Padrão (MCP) para explicar a expansão acelerada observada atualmente, que, quando tratada como

uma constante, naturalmente leva ao problema da constante cosmológica [17]. Além disso, observações recentes apontam para uma componente não-constante [18], que evolui com o tempo, o que traz implicações diretas para a construção do MCP. Outro problema em aberto é a assimetria matéria/antimatéria [19], usualmente tratada por meio de mecanismos como a bariogênese, que não são explicados pelo MP, pois exigem uma fonte adicional de violação de conjugação de carga e paridade, conhecida como violação CP.

Finalmente, mensageiros cósmicos de alta energia constituem outra grande fronteira da área. A origem e os mecanismos de aceleração dos raios cósmicos, particularmente em energias ultra-altas acima de 10^{19} eV, ainda são pouco compreendidos [20, 21], assim como as fontes responsáveis pelo fluxo difuso de neutrinos astrofísicos observado pelo IceCube [22, 23] e o neutrino mais altamente energético na escala de PeV, sem origem definida, observado pelo KM3NeT [24]. O surgimento da astronomia multimessageira, que combina fótons, neutrinos, raios cósmicos e ondas gravitacionais, tem aberto oportunidades sem precedentes para o estudo de ambientes astrofísicos extremos e para a busca de assinaturas de nova física [25, 26]. Ao mesmo tempo, essa abordagem impõe desafios teóricos e observacionais significativos, exigindo uma modelagem consistente entre os diferentes mensageiros e um controle cuidadoso dos ruídos astrofísicos.

Neste contexto, a área de astropartículas busca desvendar e compreender questões fundamentais da física moderna, contando com experimentos de altas e altíssimas energias, combinando a cosmologia de alta precisão, a astronomia multimessageira e experimentos em laboratórios, com o intuito de compreender o universo extremo e de buscar por sinais de nova física, incluindo a natureza da ME e da energia escura. Neste trabalho, iremos focar no estado da arte da busca por sinais da ME. Na Seção 2, discutiremos as principais evidências que apontam para a existência da ME, na Seção 3, discutiremos as principais vertentes que buscam solucionar o problema da ME, na Seção 4, discutiremos os principais desafios encontrados em cada uma destas vertentes e seguiremos, na Seção 5, para nossas conclusões.

2 Evidências de matéria escura

Há mais de um século, foram observadas as primeiras evidências da existência de matéria escura, muito bem abordadas pelo artigo de revisão *The history of dark matter*, escrito por Gianfranco Bertone e Dan Hooper [27]. As principais e mais comentadas evidências da ME vêm de estudos de dinâmica de estrelas, galáxias e aglomerados de galáxias, do processo de formação de estruturas e da radiação cósmica de fundo. Cada uma delas será brevemente detalhada a seguir, seguindo uma abordagem histórica.

As primeiras evidências da existência de ME surgiram por meio do estudo de dinâmicas de estrelas em nossa galáxia, por Lord Kelvin e Henry Poincaré, no final do século XIX [28, 29]. Neste período, já se falava sobre a existência de corpos ou estrelas escuras; inclusive, o primeiro a utilizar o termo “matéria escura” foi Poincaré. Eles fizeram as primeiras estimativas da densidade local de matéria em nossa galáxia. E nos trabalhos seguintes, Ernst Öpik e James Kapteyn formularam modelos dos movimentos das estrelas em nossa galáxia, sempre comentando a respeito da existência de uma matéria faltante ou matéria escura [30, 31]. Vale mencionar que muitos outros artigos foram publicados nesta linha, e sugerimos a leitura das referências citadas em [27].

Uma das mais comentadas e usualmente tratadas como uma das primeiras evidências de ME vem do estudo de aglomerados de galáxias realizado por Fritz Zwicky na década de 30. Zwicky primeiro percebeu uma alta dispersão de velocidades no aglomerado Coma e decidiu estimar sua massa baseada em dados astrofísicos e previu que a dispersão de velocidades era bem menor que a observada [32]. Em um trabalho seguinte, Zwicky estimou a massa total do aglomerado Coma utilizando o teorema do virial. Esta foi a primeira vez que o teorema foi aplicado a aglomerados de galáxias, e Zwicky estimou que havia cerca de 400 vezes mais massa que a observada por meio da luz [33].

Vários estudos realizados no século XX estimaram as curvas de rotação de galáxias próximas sempre com altas velocidades circulares, indicando a presença de matéria não luminosa nas regiões externas das galáxias. Destaca-se entre eles a tese de Babcock [34]. Nos anos 70, no-

vas técnicas de medidas com espectrógrafo criado por Kent Ford permitiram uma revolução no estudo de curvas de rotação de galáxias. Tais estudos foram realizados por Ford e Vera Rubin, que estimaram as curvas de rotação para diversas galáxias produzindo uma das mais contundentes evidências de matéria faltante em galáxias [35]. Posteriormente, estudos com a linha de 21 cm também apontaram para a existência desta matéria não luminosa [36].

Diante de todas as evidências citadas, fica claro que há uma grande quantidade de matéria não luminosa em nosso universo. Essas evidências ficam ainda mais fortes após a observação de uma colisão de dois aglomerados de galáxias, evento amplamente conhecido como *bullet cluster*, onde há uma discrepância entre as curvas de nível da distribuição de massa dos aglomerados após a colisão geradas por raios X e lentes gravitacionais, evento que pôs em xeque uma possível explicação do problema da ME mediante uma modificação da dinâmica newtoniana [4].

Ressaltamos também a predição da abundância de ME a partir da CMB, utilizando como base o MCP, também conhecido como Λ CDM, cuja medida mais recente foi realizada pelo satélite Planck [3]. Tal medida nos indica que a ME não-bariônica¹ compõe cerca de 27% do conteúdo energético do Universo, o que compõe cerca de 85% da matéria presente no Universo. Vale ressaltar que o papel da ME também é essencial no processo de formação de estruturas, fazendo com que as galáxias e aglomerados se formem em tempo hábil [37].

Apesar de todas as evidências mencionadas acima, não temos informação suficiente sobre a natureza da ME. A seguir, discutiremos algumas das principais vertentes atuais que buscam dar luz a este problema.

3 Principais candidatos à matéria escura

Atualmente, dois principais cenários são amplamente considerados na tentativa de explicar a natureza da ME: a hipótese de que a ME seja constituída por PBHs e a hipótese de que seja formada por novas partículas fundamentais além

¹Ou seja, que não é composta por bárions ou matéria ordinária, conhecida

do MP. Ambas as possibilidades são capazes de reproduzir a abundância cosmológica observada de ME e são consistentes com o conjunto atual de evidências astrofísicas e cosmológicas. Nesta seção, apresentamos uma breve revisão dos aspectos gerais de cada um desses cenários.

3.1 Buracos Negros Primordiais (PBHs)

Buracos negros primordiais são buracos negros que poderiam ter sido formados no universo primordial, muito antes da formação das primeiras estrelas [38–40]. Os mecanismos específicos de formação destes buracos negros ainda não estão completamente estabelecidos, entretanto, o cenário mais amplamente estudado envolve o colapso gravitacional de flutuações de densidade primordiais suficientemente amplificadas durante a era de radiação. Outros mecanismos possíveis incluem transições de fase cosmológicas, colapso de defeitos topológicos e cenários inflacionários não padrão [39].

Limites teóricos e observacionais impõem restrições à massa dos PBHs. Um limite inferior pode ser obtido devido à evaporação por radiação de Hawking e observações da radiação cósmica de fundo, fornecendo $m_{\text{PBH}}^{\text{min}} \simeq 0,1 \text{ g} \approx 10^{-35} M_{\odot}$. Por outro lado, ao exigirmos que a evaporação dos buracos negros não afete a nucleossíntese primordial (BBN)² e outras sondas cosmológicas não sejam significativamente perturbadas, limites superiores são estabelecidos com valores típicos da ordem de $m_{\text{PBH}}^{\text{max}} \sim \mathcal{O}(1-10) M_{\odot}$, dependendo das hipóteses adotadas. Tais hipóteses nos fornecem um espaço de parâmetros de 35 ordens de magnitude a ser explorado.

Contudo, grande parte da região acima mencionada já está excluída por limites teóricos e experimentais, de modo que apenas uma faixa estreita desse espaço, que é compreendida entre $10^{-16} M_{\odot}$ e $10^{-11} M_{\odot}$, permanece compatível com PBHs compondo toda a ME do Universo, como pode ser visto na Fig. 1. Vale salientar que esta análise baseia-se na suposição de uma distribuição de massa monocromática, ou seja, em que todos os PBHs foram produzidos com a mesma massa. Deve-se notar, entretanto, que essa conclusão pode ser substancialmente modificada no caso de distribuições de massa estendidas, o que

²Período de formação dos primeiros núcleos leves.

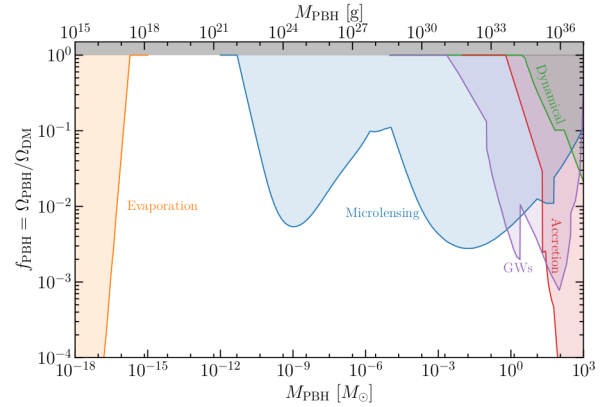


Figura 1: Abundância relativa *versus* massa de PBHs, mostrando o intervalo no qual as PBHs ainda são capazes de fornecer a abundância total de ME [41] supondo uma distribuição monocromática.

será discutido na Subseção 4.1.

3.2 Partículas fundamentais

Outra grande classe de soluções para o problema da ME consiste em supor que ela seja composta por partículas elementares, ou seja, por partículas além do MP. De forma geral, a partir das evidências, conseguimos identificar alguns requisitos que as partículas de ME devem preencher, dentre eles: serem frias ou não relativísticas na época do desacoplamento, eletricamente neutras, fracamente interagentes, estáveis em escalas cosmológicas e não bariônicas. É importante ressaltar que o MP não possui candidatas que atendam a esses requerimentos, portanto, a existência de ME aponta naturalmente para a necessidade de uma física além do MP. Embora o MP seja extraordinariamente bem testado em escalas experimentalmente acessíveis, ou seja, na escala eletrofraca, sabe-se que ele é incompleto. Como evidência, por exemplo, há neutrinos massivos, o que sugere a necessidade de diversas extensões teóricas do MP. Ressaltamos que muitas delas predizem candidatas viáveis à ME.

Neste sentido, limites experimentais impõem vínculos inferiores e superiores para a massa dessas partículas, resultando em um amplo intervalo permitido que se estende desde candidatas ultraleves até com massas extremamente elevadas, como mostrado na Fig. 2, varrendo um espaço de parâmetros de cerca de 90 ordens de magnitude.

Entre as candidatas mais estudadas destacam-se as partículas massivas fracamente interagentes

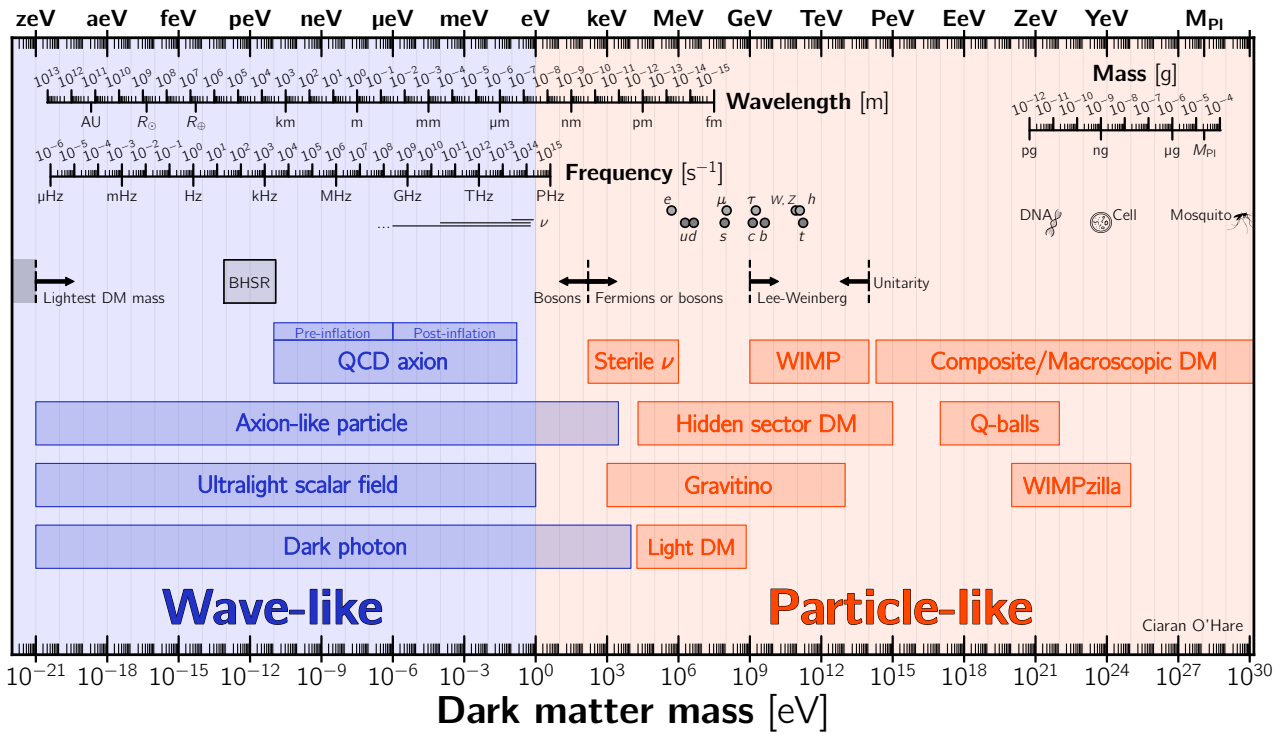


Figura 2: Principais candidatos à ME do ponto de vista da física de partículas. Figura disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dark_matter_candidates.pdf.

(Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs) [42–44]. Nesse cenário, supomos que tais partículas estariam inicialmente em equilíbrio térmico com o plasma do MP no universo primordial, interagindo tipicamente na escala eletrofraca. Sua abundância de relíquias, neste caso, é determinada pelo mecanismo de *freeze-out*, no qual a taxa de aniquilação equipara-se à taxa de expansão cósmica, levando ao congelamento da densidade comóvel de ME e fixando sua abundância atual [3]. O mais interessante aspecto das WIMPs está na predição de fornecer a abundância correta de ME observada pelo satélite Planck [3] com uma seção de choque na escala eletrofraca, detectável pelos experimentos atuais; este fato ficou amplamente conhecido como “milagre das WIMPs”. A busca por partículas do tipo WIMP intensificou-se nas últimas décadas. Nenhum sinal foi observado até então; iremos discutir mais detalhes na Seção 4.2.

Conforme discutido anteriormente, apesar de muito bem estabelecidas, vimos anteriormente que as WIMPs compõem apenas uma pequena faixa de massa entre todos os possíveis candidatos à ME. Além das WIMPs, podemos destacar partículas ultraleves, como áxions ou partículas do

tipo áxion. Estas partículas possuem forte apelo, por estarem conectadas à solução do problema de CP forte na cromodinâmica quântica, por meio do mecanismo de Peccei-Quinn [6, 45–47]. Os áxions são pseudo-escalares associados à quebra de simetria e foram propostos por Wilczek e Weinberg [46, 47]. O mecanismo de produção destas partículas difere das WIMPs e está associado à produção não-térmica, que envolve o *misalignment* ou desalinhamento do campo e resulta em uma população de partículas frias.

Outras possibilidades surgem com partículas ultraleves, cujo comprimento de onda de de Broglie torna-se relevante com relação às suas dimensões físicas. Possuem massa na escala de 10^{-22} eV e são conhecidas como matéria escura *Fuzzy* [48, 49]. Seus possíveis mecanismos de produção ainda estão em aberto, e seus efeitos quânticos podem ser observados em larga escala. Inclusive, já se estuda a possibilidade de buscar por estas partículas ultraleves por meio de interferômetros de ondas gravitacionais [50]. Elas também têm chamado bastante atenção por fornecer uma solução para o problema de excesso de sub-halos previsto em cenários de ME fria.

Vale salientar que os candidatos acima menci-

onados diferem consideravelmente entre si, possuindo assinaturas bem distintas, tanto do ponto de vista cosmológico quanto do observacional. Isto se reflete tanto nos mecanismos de produção quanto em suas possíveis detectabilidades, caracterizando linhas de pesquisa distintas. Em conjunto, tais cenários ilustram a diversidade que esta abordagem traz para explicar o problema da ME. Ressaltamos que diversos experimentos ao redor do mundo buscam encontrar sinais destas partículas, impondo fortes vínculos sobre o espaço de parâmetros, estreitando a faixa de possibilidades para explicar a natureza fundamental da ME.

4 Desafios encontrados na busca por matéria escura

Conforme mencionado anteriormente, uma busca exaustiva tem sido realizada nas últimas décadas para desvendar o mistério da ME. Nesta seção, discutiremos alguns desafios encontrados na tentativa de detectar PBHs e as típicas WIMPs.

4.1 Buracos negros primordiais

Conforme mencionado anteriormente, existe uma forte restrição ao espaço de parâmetros dos PBHs. Atualmente, supondo uma distribuição monocromática, ficamos com apenas 5 ordens de grandeza nas quais os PBHs poderiam compor toda a ME do Universo. O ponto mais relevante neste aspecto é que supor que todas as PBHs possuem a mesma massa, apesar de ser a hipótese mais simples, não pode ser realista. Estudos recentes que consideram uma função de massa estendida restringem significativamente o espaço de parâmetros, o que pode ser visto na Fig. 1 da referência [51]. Obviamente, os resultados dependem dos parâmetros utilizados para descrever a função de massa, mas, claramente, os vínculos impostos são bem mais restritivos. A seguir, discutiremos desafios enfrentados pelas WIMPs.

4.2 Partículas fundamentais

Conforme discutido, uma das mais amplamente estudadas candidatas à ME do ponto de vista de física de partículas são as WIMPs, com

forte apelo tanto do ponto de vista observacional quanto teórico. Nas últimas décadas, diversos instrumentos foram construídos com o objetivo de sondar por seus sinais, dado o potencial de detectabilidade dessas partículas.

Atualmente, três métodos se destacam na busca por sinais de WIMPs: a detecção direta, a busca em aceleradores de partículas e a detecção indireta, que serão descritos a seguir. Devido à distribuição de ME em nossa galáxia, podemos esperar que partículas de ME interajam com partículas-alvo dos detectores terrestres; esta é a chamada detecção direta. Outro importante método de busca por ME é através dos aceleradores de partículas, como o LHC. A partir da colisão de prótons em altas energias, esperamos que partículas de ME sejam produzidas. A terceira forma de buscar por sinais de ME é através da detecção indireta, na qual buscamos por partículas estáveis que possam ter sido produzidas pela aniquilação ou pelo decaimento de ME, como neutrinos, fótons e antimatéria [52].

Entretanto, a insistente busca por WIMPs nos levou a melhorar consideravelmente a sensibilidade dos instrumentos, contribuindo para entendermos o que não pode ser ME. Experimentos de detecção direta, como XENONnT [8], Lux-Zeplin [9] e PandaX-4T [53], têm imposto severos limites sobre o espaço de parâmetros das WIMPs, como foi amplamente discutido na revisão recente de Arcadi et al. [54]. Buscas por candidatos alternativos ou por sinais de WIMPs mais leves (na escala sub-GeV) [55] ou mais pesados (na escala de TeV) [56] tornaram-se intensas. Além destes possíveis cenários, mecanismos de produção alternativos, como o *freeze-in* [57], ou o impacto de cosmologia não-padrão também têm sido explorados [58, 59].

Do ponto de vista experimental, a nova geração de telescópios e detectores de raios gama de energias muito altas, como o Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO) [60] e Southern Wide-field Gamma-ray Observatory (SWGGO) [61], promete um grande ganho em sensibilidade ao fluxo de raios gama na escala de TeV (cerca de uma ordem de grandeza comparada aos experimentos atuais), região na qual os experimentos de detecção direta perdem sensibilidade. A possibilidade de sondar a região que fornece a abundância correta de ME traz uma nova expectativa aos entu-

siastas das WIMPs.

No que concerne à detecção indireta, não podemos deixar de mencionar que alguns excessos acima do ruído foram observados, como o excesso no centro galáctico na escala de GeV detectado pelo Fermi-LAT [62], o excesso na escala de TeV observado pelo H.E.S.S. [63], também no centro galáctico, e o excesso de pósitrons observado pelo AMS-02 [64]. Todos esses sinais ainda permanecem em aberto, e as WIMPs figuram entre os possíveis candidatos para explicá-los [65].

Portanto, fica evidente que a busca por desvendar a natureza da matéria escura constitui um dos principais desafios na área de astropartículas.

5 Conclusões

A área de astropartículas destaca-se como uma das fronteiras da física moderna. Espera-se que os futuros experimentos destinados a sondar energias extremamente altas contribuam de maneira decisiva para elucidar esses desafios. Certamente, experimentos de raios gama de energias muito altas, raios cósmicos de ultra-altas energias, neutrinos e ondas gravitacionais serão centrais nesse propósito.

Conforme discutido, dentre os principais desafios, temos a compreensão das componentes fundamentais do Universo, do universo extremo e de suas partículas de altíssimas energias, além de estudar possíveis efeitos de quebra de invariância de Lorentz, de gravitação quântica, de assinaturas de ME, da assimetria matéria-antimatéria do universo, do período inflacionário, entre outros.

Por fim, discutimos os principais desafios na busca pela natureza da ME. Vimos que as principais vertentes que abordam o problema são os PBHs e as partículas fundamentais. Os principais desafios atuais encontram-se na busca por cenários alternativos às WIMPs padrão devido à sua ausência de detecção, como modificação do conteúdo do universo primordial, mecanismos alternativos de produção, setores escondidos, entre outros.

Do ponto de vista experimental, não podemos deixar de mencionar a região do neutrino *floor* em experimentos de detecção direta, o excesso observado no centro galáctico e a necessidade de utilizar os experimentos futuros para melhor distin-

ção entre sinal e ruído, além de explorar energias mais altas para diminuir as incertezas na cauda do espectro observado, superar o conhecido *MeV gap*, através dos experimentos futuros AmegoX, COSI e Gecco. Sobre as PBHs, experimentos capazes de explorar a região de massa asteroidal ainda permitida seriam cruciais e ainda precisam ser desenvolvidos. Além do mais, explorar com mais cuidado a interface entre PBHs e partículas fundamentais também permanece em aberto.

Finalmente, trouxemos aqui alguns dos principais desafios envolvidos na área de astropartículas, esperamos que os experimentos futuros consigam trazer luz a esses problemas.

Agradecimentos

A autora agradece a Jacinto Paulo Neto e Maíra Dutra pelos comentários e sugestões. O CNPq apoia CS por meio dos processos 304944/2025-4 e 406718/2025-3. CS recebe apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por meio do processo 2021/01089-1.

Sobre a autora

C. Siqueira (csiqueira@on.br) é especialista em fenomenologia de matéria escura, com ênfase em cenários nos quais a matéria escura é composta por partículas fundamentais além do Modelo Padrão. Possui ampla experiência tanto no estudo de mecanismos de produção dessas partículas no universo primordial quanto em estratégias observacionais e experimentais para sua detecção indireta e direta. É membro da colaboração do Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO), dedicada à busca por sinais astrofísicos de matéria escura por meio de observações de raios gama de muito alta energia. Atualmente, é Pesquisadora Adjunta I do Observatório Nacional.

Referências

- [1] T. K. Gaisser, R. Engel e E. Resconi, *Cosmic Rays and Particle Physics* (Cambridge University Press, 2016).

- [2] E. W. Kolb e M. S. Turner, *The Early Universe* (Addison-Wesley, 1990).
- [3] Planck Collaboration, *Planck 2018 results: VI. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020). [ArXiv:1807.06209](#).
- [4] D. Clowe et al., *A direct empirical proof of the existence of dark matter*, *Astrophys. J. Lett.* **648**, L109 (2006). [ArXiv:astro-ph/0608407](#).
- [5] G. Bertone, D. Hooper e J. Silk, *Particle dark matter: evidence, candidates and constraints*, *Physics Reports* **405**(5–6), 279 (2005). [ArXiv:hep-ph/0404175](#).
- [6] D. J. E. Marsh, *Axion cosmology*, *Physics Reports* **643**, 1 (2016). [ArXiv:1510.07633](#).
- [7] B. Carr, F. Kühnel e M. Sandstad, *Primordial black holes as dark matter*, *Physical Review D* **94**(8), 083504 (2016). [ArXiv:1607.06077](#).
- [8] XENON Collaboration, *First Dark Matter Search Results from the XENONnT Experiment*, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 041003 (2023). [ArXiv:2303.14729](#).
- [9] LZ Collaboration, *First Dark Matter Search Results from the LUX-ZEPLIN (LZ) Experiment*, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 041002 (2023). [ArXiv:2207.03764](#).
- [10] AMS Collaboration and Aguilar, M. and others, *Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons*, *Physical Review Letters* **122**(4), 041102 (2019).
- [11] A. H. Guth, *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*, *Physical Review D* **23**(2), 347 (1981).
- [12] A. D. Linde, *A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems*, *Physics Letters B* **108**(6), 389 (1982).
- [13] A. A. Starobinsky, *A new type of isotropic cosmological models without singularity*, *Physics Letters B* **91**(1), 99 (1980).
- [14] C. Caprini et al., *Science with the space-based interferometer eLISA. II: gravitational waves from cosmological phase transitions*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **04**, 001 (2016). [ArXiv:1512.06239](#).
- [15] P. Fisher, B. Kayser e K. S. McFarland, *Neutrino Mass and Oscillation*, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **49**, 481 (1999). [ArXiv:hep-ph/9906244](#).
- [16] J. A. Frieman, M. S. Turner e D. Huterer, *Dark Energy and the Accelerating Universe*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **46**(Volume 46, 2008), 385 (2008).
- [17] S. Weinberg, *The cosmological constant problem*, *Reviews of Modern Physics* **61**(1), 1 (1989).
- [18] A. G. Adame et al., *DESI 2024 VI: cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **02**, 021 (2025). [ArXiv:2404.03002](#).
- [19] M. Dine e A. Kusenko, *Origin of the matter-antimatter asymmetry*, *Reviews of Modern Physics* **76**(1), 1 (2003).
- [20] K. Kotera e A. V. Olinto, *The Astrophysics of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **49**(1), 119 (2011). [ArXiv:1101.4256](#).
- [21] R. Alves Batista et al., *Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies*, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **6**, 23 (2019). [ArXiv:1903.06714](#).
- [22] IceCube Collaboration and Aartsen, M. G. and others, *Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector*, *Science* **342**(6161), 1242856 (2013).
- [23] IceCube Collaboration and Aartsen, M. G. and others, *Characteristics of the Diffuse Astrophysical Electron and Tau Neutrino Flux with Six Years of IceCube High Energy Cascade Data*, *Physical Review Letters* **125**(12), 121104 (2020). [ArXiv:2001.09520](#).

- [24] S. Aiello et al., *Observation of an ultra-high-energy cosmic neutrino with KM3NeT*, *Nature* **638**(8050), 376 (2025), [Erratum: *Nature* 640, E3 (2025)].
- [25] B. P. Abbott et al., *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger**, *The Astrophysical Journal Letters* **848**(2), L12 (2017).
- [26] P. Mészáros et al., *Multi-messenger astrophysics*, *Nature Reviews Physics* **1**(10), 585 (2019).
- [27] G. Bertone e D. Hooper, *History of dark matter*, *Reviews of Modern Physics* **90**(4), 045002 (2018). [ArXiv:1605.04909](https://arxiv.org/abs/1605.04909).
- [28] Thomson, Baron Kelvin, W., *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light* (Cambridge University Press, 2010).
- [29] H. Poincaré, *The Milky Way and the Theory of Gases*, *Popular Astronomy* **14**, 475 (1906).
- [30] E. Öpik, *The question of selective absorption of light in space viewed from the viewpoint of the dynamics of the universe* (2022), translated from Russian and commented by Jaan Einasto and Peeter Tenjes. [ArXiv:2203.14871](https://arxiv.org/abs/2203.14871).
- [31] J. H. Oort, *The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems*, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands* **6**, 249 (1932). Disponível em <https://cds.cern.ch/record/436532>, acesso em mar. 2026.
- [32] F. Zwicky, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, *Helv. Phys. Acta* **6**, 110 (1933).
- [33] F. Zwicky, *On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae*, *The Astrophysical Journal* **86**, 217 (1937).
- [34] H. W. Babcock, *The rotation of the Andromeda Nebula*, *Lick Observatory Bulletins* **19**, 41 (1939).
- [35] V. C. Rubin e W. K. Ford, Jr., *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, *Astrophysical Journal* **159**, 379 (1970).
- [36] K. C. Freeman, *On the Disks of Spiral and S0 Galaxies*, *Astrophysical Journal* **160**, 811 (1970).
- [37] C. S. Frenk e S. D. M. White, *Dark matter and cosmic structure*, *Annalen der Physik* **524**(9–10), 507 (2012). [ArXiv:1210.0544](https://arxiv.org/abs/1210.0544).
- [38] A. Escrivà, F. Kühnel e Y. Tada, *Primordial black holes*, in *Black Holes in the Era of Gravitational-Wave Astronomy*, editado por M. A. Sedda, E. Bortolas e M. Spera (Elsevier, 2024), 261–377. [ArXiv:2211.05767](https://arxiv.org/abs/2211.05767).
- [39] J. Auffinger, *Primordial black hole constraints with Hawking radiation—A review*, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **131**, 104040 (2023).
- [40] A. Arbey, *Primordial black holes, a small review*, in *58th Rencontres de Moriond on Very High Energy Phenomena in the Universe* (2024). [ArXiv:2405.08624](https://arxiv.org/abs/2405.08624).
- [41] B. J. Carr e A. M. Green, *The History of Primordial Black Holes*, in *Primordial Black Holes* (Springer Nature Singapore, 2025), 3–33. [ArXiv:2406.05736](https://arxiv.org/abs/2406.05736).
- [42] B. W. Lee e S. Weinberg, *Cosmological Lower Bound on Heavy Neutrino Masses*, *Physical Review Letters* **39**, 165 (1977).
- [43] H. Goldberg, *Constraint on the Photino Mass from Cosmology*, *Physical Review Letters* **50**, 1419 (1983).
- [44] G. Jungman, M. Kamionkowski e K. Griest, *Supersymmetric Dark Matter*, *Physics Reports* **267**, 195 (1996).
- [45] R. D. Peccei e H. R. Quinn, *CP Conservation in the Presence of Instantons*, *Physical Review Letters* **38**, 1440 (1977).
- [46] S. Weinberg, *A New Light Boson?*, *Physical Review Letters* **40**, 223 (1978).

- [47] F. Wilczek, *Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons*, *Physical Review Letters* **40**, 279 (1978).
- [48] W. Hu, R. Barkana e A. Gruzinov, *Fuzzy Cold Dark Matter: The Wave Properties of Ultralight Particles*, *Physical Review Letters* **85**, 1158 (2000).
- [49] L. Hui et al., *Ultralight Scalars as Cosmological Dark Matter*, *Physical Review D* **95**, 043541 (2017).
- [50] P. C. Moreira Delgado, *Theoretical and Phenomenological Cosmology: Early Universe and Gravitational Wave Physics*, Tese de Doutorado, Jagiellonian U. (2024). Disponível em <https://inspirehep.net/literature/2911877>, acesso em mar. 2026.
- [51] B. Carr et al., *Primordial black hole constraints for extended mass functions*, *Physical Review D* **96**(2), 023514 (2017). [ArXiv:1705.05567](https://arxiv.org/abs/1705.05567).
- [52] M. Cirelli, A. Strumia e J. Zupan, *Dark matter*, *SciPost Physics Reviews* (2026). [ArXiv:2406.01705](https://arxiv.org/abs/2406.01705).
- [53] PandaX Collaboration, *Dark Matter Search Results from the PandaX-4T Commissioning Run*, *Physical Review Letters* **127**(26), 261802 (2021). [ArXiv:2107.13438](https://arxiv.org/abs/2107.13438).
- [54] G. Arcadi et al., *The waning of the WIMP: endgame?*, *The European Physical Journal C* **85**(2), 152 (2025). [ArXiv:2403.15860](https://arxiv.org/abs/2403.15860).
- [55] M. Dutra, C. Siqueira e T. M. Venters, *Constraining light dark matter in vector-scalar portals with COSI and AMEGO-X* (2025). [ArXiv:2508.15891](https://arxiv.org/abs/2508.15891).
- [56] G. N. Fortes et al., *Present and future constraints on secluded dark matter in the Galactic Halo with TeV Gamma-ray observatories*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **07**(07), 043 (2023). [ArXiv:2212.05075](https://arxiv.org/abs/2212.05075).
- [57] R. de Souza et al., *Dark Matter freeze-in during warm inflation and the seesaw mechanism*, *Journal of High Energy Physics* **04**(4), 125 (2025). [ArXiv:2412.06778](https://arxiv.org/abs/2412.06778).
- [58] P. Arias et al., *Reconstructing non-standard cosmologies with dark matter*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **10**(10), 047 (2019). [ArXiv:1906.04183](https://arxiv.org/abs/1906.04183).
- [59] G. Arcadi et al., *Roads for right-handed neutrino dark matter: Fast expansion, standard freeze-out, and early matter domination*, *Physical Review D* **105**(3), 035016 (2022). [ArXiv:2108.11398](https://arxiv.org/abs/2108.11398).
- [60] A. Acharyya et al., *Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to a dark matter signal from the Galactic centre*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **01**(01), 057 (2021). [ArXiv:2007.16129](https://arxiv.org/abs/2007.16129).
- [61] SWGO Collaboration, *Science Prospects for the Southern Wide-field Gamma-ray Observatory* (2023).
- [62] L. Goodenough e D. Hooper, *Possible Evidence For Dark Matter Annihilation In The Inner Milky Way From The Fermi Gamma Ray Space Telescope*, Tech. rep., Fermilab, PUB-09-494-A (2009). [ArXiv:0910.2998](https://arxiv.org/abs/0910.2998).
- [63] F. Aharonian, *Spectrum and variability of the Galactic Center VHE gamma-ray source HESS J1745-290*, *Astronomy & Astrophysics* **503**(3), 817 (2009). [ArXiv:0906.1247](https://arxiv.org/abs/0906.1247).
- [64] M. Aguilar et al., *Precision Measurement of the $(e^+ + e^-)$ Flux in Primary Cosmic Rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*, *Physical Review Letters* **113**, 221102 (2014).
- [65] I. Cholis et al., *Return of the templates: Revisiting the Galactic Center excess with multimessenger observations*, *Physical Review D* **105**(10), 103023 (2022). [ArXiv:2112.09706](https://arxiv.org/abs/2112.09706).