

FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS DOS CONCEITOS DE MATÉRIA ESCURA E ENERGIA ESCURA PARA O ENSINO DE FÍSICA

Diego Corrêa Peres de Souza

Universidade de Caxias do Sul

peres.souza@aluno.ifsp.edu.br

<https://orcid.org/0000-0003-1740-7213>

Ricardo Roberto Plaza Teixeira

Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Caraguatatuba

rteixeira@ifsp.edu.br

<http://orcid.org/0000-0001-7124-1774>

RESUMO

Este artigo tem como objetivo investigar as possibilidades educacionais do uso no ensino de Física dos conceitos de matéria escura e energia escura em atividades de sala de aula e de divulgação científica. Para a fundamentação teórica do trabalho desenvolvido, foi feita uma ampla revisão bibliográfica da literatura científica sobre temas como matéria escura, energia escura e ensino de Física, por meio da leitura e análise de teses, dissertações, artigos em revistas especializadas, trabalhos apresentados em congressos acadêmicos e livros científicos. Uma ênfase foi conferida para a evolução histórica dos conceitos de matéria escura e de energia escura, o chamado setor escuro. Os argumentos físicos, para as evidências experimentais acerca da existência de ambas, são apresentados, a partir dos seus efeitos gravitacionais. Os desafios existentes atualmente pelas questões associadas à natureza da matéria escura e da energia escura são comparados com os problemas que existiam na História da Astronomia do século XIX referentes às órbitas dos planetas Urano e Mercúrio. Este trabalho também procura investigar formas pelas quais temas situados na fronteira da Física atual podem ser trabalhados educacionalmente.

Palavras-chave: astrofísica; história da ciência; gravitação; fronteira da ciência.

SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF THE CONCEPTS OF DARK MATTER AND DARK ENERGY FOR PHYSICS TEACHING

ABSTRACT

This article aims to investigate the educational possibilities of using the concepts of dark matter and dark energy in Physics teaching in classroom and scientific dissemination activities. For the theoretical basis of the work developed, a wide bibliographic review of the scientific literature was made on topics such as dark matter, dark energy and Physics Teaching, through the reading and analysis of theses, dissertations, articles in specialized journals, works presented in academic congresses and scientific books. An emphasis was given to the historical evolution of the concepts of dark matter and dark energy, the so-called dark sector. The physical arguments, for the experimental evidence about the existence of both, are presented, based on their gravitational effects. The challenges that exist today due to issues associated with the nature of dark matter and dark energy are compared with the

problems that existed in the History of Astronomy in the 19th century regarding the orbits of the planets Uranus and Mercury. This work also seeks to investigate ways in which themes located on the frontier of current Physics can be worked on educationally.

Keywords: *astrophysics; history of science; gravitation; science frontier.*

FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS DE LOS CONCEPTOS DE MATERIA OSCURA Y ENERGÍA OSCURA PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo investigar las posibilidades educativas del uso de los conceptos de materia oscura y energía oscura en la enseñanza de la Física, en las actividades de aula y en la divulgación científica. Para la base teórica del trabajo desarrollado se realizó una amplia revisión bibliográfica de la literatura científica sobre temas como materia oscura, energía oscura y enseñanza de la Física, mediante la lectura y análisis de tesis, disertaciones, artículos en revistas especializadas, trabajos presentados en congresos académicos y libros científicos. Se hizo énfasis en la evolución histórica de los conceptos de materia oscura y energía oscura, el llamado sector oscuro. Se presentan los argumentos físicos, para las evidencias experimentales sobre la existencia de ambos, a partir de sus efectos gravitatorios. Se comparan los desafíos que existen en la actualidad por cuestiones asociadas a la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura con los problemas que existieron en la Historia de la Astronomía en el siglo XIX respecto a las órbitas de los planetas Urano y Mercurio. Este trabajo también busca investigar formas en que temas ubicados en la frontera de la Física actual pueden ser trabajados educativamente.

Palabras clave: *astrofísica; historia de la ciencia; gravitación; frontera científica.*

1 INTRODUÇÃO

Este artigo objetiva investigar as possibilidades educacionais do uso no ensino de Física dos conceitos de matéria escura e energia escura (o chamado setor escuro), em atividades de sala de aula e de divulgação científica.

As pesquisas em torno dos conceitos de matéria escura e energia escura – o setor escuro corresponde a cerca de 95% do conteúdo de massa-energia do universo, que é invisível pelo espectro eletromagnético e só se manifesta pela ação gravitacional (Zimdahl, 2021) – vêm se intensificando nos últimos anos e são importantes inclusive na busca por uma nova Teoria da Gravitação (Velten, 2020), que seja mais ampla que a Teoria da Relatividade Geral no escopo de fenômenos explicados.

De acordo com o modelo cosmológico padrão, o universo tem em sua constituição os seguintes três componentes fundamentais: matéria bariônica, matéria escura e energia escura (Fróes, 2014). Pelos dados existentes em maio de 2023, para os principais parâmetros cosmológicos, apresentados pelo WMAP – Wilkinson Microwave Anisotropy Probe¹, o universo é constituído aproximadamente do seguinte modo em termos percentuais: 4,6% de matéria bariônica ou convencional (a matéria da qual nós somos feitos), 23,3% de matéria escura e 72,1% de energia escura. Estas porcentagens

evidenciam a nossa ignorância atual e os desafios apresentados pela Astrofísica para o futuro próximo: tudo que conseguimos observar, ao longo de todo o espectro eletromagnético, compõe menos que 5% do Universo (Clegg, 2019).

A introdução do estudo da matéria escura e da energia escura – temas situados na fronteira da ciência atual – em atividades de ensino, permite trabalhar não somente com tópicos de Física Moderna e Contemporânea (como a Teoria da Relatividade, a Física de Partículas e a Astrofísica), mas também com áreas da Física Clássica, como é o caso da Gravitação Newtoniana. Apesar de serem desconhecidas as explicações para estes dois fenômenos, a Física envolvida na sua detecção pode ser trabalhada, em caráter introdutório, junto a alunos do ensino médio, por exemplo.

O trabalho com o setor escuro permite também ressaltar aspectos acerca da natureza da ciência e do “fazer científico”: como existem muitas teorias concorrentes para explicar estes fenômenos, isto possibilita destacar o caráter provisório do conhecimento científico e familiarizar os alunos com os métodos usados pelos cientistas para selecionar as teorias científicas que melhor explicam os fenômenos estudados (Woithe; Kersting, 2020). Esta última característica é fundamental que seja trabalhada em aulas de disciplinas científicas nos dias de hoje, sobretudo tendo em vista o crescimento de movimentos de negação da ciência que se aproveitam consideravelmente do desconhecimento de muitas pessoas acerca de como a ciência trabalha.

A proposta de discussão sobre do que é feito o mundo permite provocar a curiosidade dos alunos acerca dos problemas relacionados à natureza da matéria escura e da energia escura, cujos desdobramentos podem influenciar inclusive o entendimento cosmológico existente atualmente sobre o início do universo (Aguiar, 2010). Há evidências obtidas em pesquisas da área educacional mostrando que existe uma quantidade considerável de alunos que se interessa por fenômenos científicos aparentemente misteriosos ou por fenômenos que os cientistas ainda não conseguem explicar (Woithe; Kersting, 2020). Além disso, o estudo do setor escuro permite trabalhar com alguns conceitos importantes que são abordados durante o aprendizado de Física no ensino médio, tais como as leis de conservação e as formas de interações existentes na natureza (Gusmão; Valente; Duarte, 2017).

Ao longo deste trabalho, após a introdução, os conceitos de matéria escura e de energia escura são discutidos de modo a elucidar a Física que os explica, bem como a evolução histórica de ambos até a atualidade. Na sequência, são discutidas as possibilidades existentes para o ensino dos dois conceitos que constituem os temas centrais deste artigo. Finalmente, nas considerações finais é realizada uma análise panorâmica das ideias discutidas neste artigo.

2 MATÉRIA ESCURA

O estudo da matéria escura está bastante relacionado ao conceito de gravidade no âmbito da Física. Newton por meio de estudos dos manuscritos de seus predecessores, tais como, por exemplo, Galileu e Kepler, conseguiu dar um passo significativo para responder a esta questão pela proposição da Teoria da Gravitação Universal: dois corpos atraem-se com força proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa seus centros de massa. Entretanto a expressão matemática existente para a força gravitacional, aplicada aos dados experimentais existentes atualmente sobre massas, não consegue explicar plenamente algumas características de grandes estruturas do universo, como galáxias e aglomerados de galáxias.

A matéria escura é uma forma de matéria não bariônica, ou seja, que não é constituída por prótons e nêutrons e que, portanto, não está presente entre os elementos da tabela periódica. Ela constitui cerca de 85% da matéria total do universo e aproximadamente um quarto da densidade total de massa-energia. A matéria escura só interage gravitacionalmente; por não interagir eletromagneticamente, ela não emite luz e, portanto, não pode ser detectada em nenhuma parte do espectro eletromagnético, nem observada por qualquer tipo de telescópio (Lopes, 2019). Deste modo, a única forma que temos atualmente para detectar e postular a sua existência se dá por meio dos efeitos gravitacionais decorrentes da matéria escura.

A matéria escura não pode ser explicada pela Teoria da Gravitação aceita atualmente – a Teoria da Relatividade Geral – a não ser pela suposição de que existe muito mais matéria no universo do que aquela que pode ser observada a partir da radiação eletromagnética produzida por estrelas e gases (Hernández-Arboleda; Rodrigues, 2021). Além disso, ao contrário da matéria ordinária estelar e do gás interestelar, que nas galáxias espirais se distribui na forma de um disco plano, a matéria escura precisa ter uma distribuição na forma de um halo aproximadamente esférico (ou esferoidal) que se localiza em torno do núcleo central dessas galáxias e envolve os discos galácticos como um todo.

O estudo acerca da detecção da matéria escura está associado ao denominado teorema do virial que relaciona a energia cinética e a energia potencial, em termos de uma média temporal, de corpos com órbitas produzidas pela ação gravitacional, como por exemplo, no caso das órbitas dos planetas em torno do Sol e no caso das órbitas das estrelas situadas nas regiões mais periféricas de uma galáxia espiral em torno do centro galáctico (Ladera; Alomá; León, 2010). Esta relação abre possibilidades didáticas interessantes para a abordagem acerca deste tema a partir dos fundamentos da Física Clássica.

As principais evidências experimentais de origem gravitacional acerca da existência da matéria escura são as altas velocidades das galáxias em aglomerados, observadas nos anos 1930 por Fritz Zwicky (1898-1974), bem como as altas velocidades de estrelas periféricas de galáxias espirais, observadas nos anos 1970 por Vera Rubin (1928-2016). Em ambos os casos, estas velocidades não podem ser previstas teoricamente a não ser que: 1. exista algum tipo de matéria “invisível” que produz efeitos gravitacionais bastante significativos ou 2. que a teoria da gravitação que prevalece na atualidade (Teoria da Relatividade Geral) seja modificada no âmbito galáctico e intergaláctico. Em particular, a denominada distribuição kepleriana de velocidades não é observada na rotação de estruturas de grande escala, como as galáxias espirais, e este desvio fornece evidências convincentes da presença de matéria não luminosa, ou seja, de matéria escura (Sharma; Anu; Chauhan, 2017). Portanto, sabemos atualmente que é necessário que exista a matéria escura para formar estruturas cósmicas colapsadas, como galáxias, pelo desenvolvimento de poços de potencial que impulsionam a aglomeração de matéria (Velten, 2021).

Pelas suas consequências gravitacionais, é possível afirmar que a quantidade de matéria escura que está presente no universo é um fator cerca de cinco vezes maior que a matéria ordinária (bariônica) que compõe as estrelas, planetas, galáxias e tudo aquilo que consta na tabela periódica e no modelo padrão das partículas elementares.

Uma das possibilidades no que diz respeito à obtenção de evidências experimentais que possam colaborar para definir a natureza da matéria escura, está na detecção de partículas elementares hipotéticas das quais a matéria escura seria feita, os áxions, partículas neutras muito leves e com massas muito pequenas, da ordem de 10^{-5} eV/c² (Klaer; Moore, 2017), estáveis (com baixíssima probabilidade de se desintegrar) e pouco interagentes, sugeridas na década de 1970 (Sánchez-Vega, 2021). Isto, em tese, poderia ocorrer por meio de vestígios deixados por essas partículas em aceleradores como o LHC (Large Hadron Collider), o grande colisor de prótons do Centro Europeu de Investigação

Nuclear, situado na cidade de Genebra, na Suíça, ou por meio de detectores localizados em minas profundas (Bertolami; Gomes, 2017).

Outras partículas conjecturadas como candidatas a constituírem a matéria escura (Nascimento, 2018) são os “Halos de Objetos Compactos Massivos” (“Massive Compact Halo Objects” – MACHOs), as “Partículas Massivas Fracamente Interativas” (“Weakly Interacting Massive Particles” – WIMPs), os fótons escuros (“dark photons”) e os neutralinos. Os MACHOs seriam constituídos de matéria ordinária (não teriam qualquer caráter exótico) com uma luminosidade muito fraca para ser detectada — como anãs marrons e buracos-negros, por exemplo. Em particular, os Buracos Negros Primordiais — um tipo hipotético de buraco negro que teria se formado logo após o Big Bang — são considerados candidatos plausíveis à matéria escura. As WIMPs são partículas que interagem muito pouco com a matéria comum e mais fracamente ainda entre elas mesmas, e por terem essas características, são também candidatas à matéria escura. O fóton escuro, por sua vez, é uma partícula hipotética que atuaria como mediadora de força, de modo semelhante ao fóton no eletromagnetismo, mas que estaria potencialmente conectada à matéria escura. O neutralino é uma partícula conjecturada com comportamentos fenomenológicos similares ao neutrino e que é prevista pela supersimetria (denominada SUSY, devido à contração do termo em inglês “supersymmetry”), um tipo de simetria que relacionaria cada partícula do modelo padrão com um determinado spin a outra partícula com um spin diferente por meia unidade; assim para cada bóson existira um férmion correspondente e vice-versa.

Deste modo, há a possibilidade de que a solução para o problema da natureza da matéria escura implique em uma ampliação do modelo padrão da Física de Partículas, pela inclusão de novas partículas elementares e talvez de novas interações (Dorsch, 2021).

Na internet podem ser encontrados diversos sites que abordam o tema da matéria escura de perspectivas variadas e com diferentes propósitos. Em particular, o site “Educational Resources for Dark Matter Day”² apresenta uma indicação de vários recursos didáticos (em inglês) que podem ser úteis para serem usados em atividades educacionais e de divulgação científica sobre matéria escura.

3 ENERGIA ESCURA

Em um trabalho de 1929, o astrônomo Edwin Hubble (1889-1956) apresentou evidências de que as galáxias estão se afastando entre si e que a velocidade de recessão (de afastamento) de uma galáxia aumenta com sua distância da Terra (Roos, 2008), propriedade esta que atualmente é conhecida como “Lei de Hubble” e que também foi proposta pelo astrônomo Georges Lemaître (1894-1966). A implicação lógica desta constatação experimental é que o universo está se expandindo.

No final da década de 1940, o físico George Gamow (1904-1968) estabeleceu os fundamentos da Teoria do Big Bang, em um trabalho que, a partir das evidências experimentais existentes, deduzia que o processo de produção dos elementos químicos (nucleossíntese) deveria ter começado em um tempo inicial correspondente a uma singularidade primordial.

Ao longo da segunda metade do século XX, novas evidências para a Teoria do Big Bang surgiram como, por exemplo, a medida da radiação cósmica de fundo: esta teoria científica foi sendo aperfeiçoada, transformando-se no núcleo do modelo cosmológico padrão que até a década de 1990 supunha um universo em expansão desacelerada (Lima; Santos, 2018), pois a única força que atua em grandes escalas é a interação gravitacional

que, pelo fato de ser atrativa, necessariamente tem a tendência de desacelerar a expansão cósmica.

No final da década de 1990, entretanto, a partir da observação de supernovas do tipo Ia, utilizadas como velas padrão (Joyce, 2014), para a determinação de distâncias entre galáxias e entre aglomerados de galáxias, os trabalhos realizados por Adam Guy Riess (1969-) e Saul Perlmutter (1959-) apresentaram evidências sólidas de que, paradoxalmente, a expansão do universo está se acelerando e não desacelerando como se imaginava antes. O agente desconhecido causador da aceleração da expansão do universo foi denominado de energia escura e compõe mais de 70% do universo (Abramo, 2009). Entender a natureza da energia escura talvez seja um dos maiores desafios da Física atual (Lívio, 2009).

A descoberta da aceleração da expansão do universo no final dos anos 1990 modificou drasticamente a visão prevalecente sobre o cosmos (Costa, 2018), com uma mudança de paradigma em um nível similar ao que ocorreu com a descoberta, nos anos 1920, que o universo estava em expansão.

O ano de 1998 se tornou decisivo para a Cosmologia, pelo fato de dois grupos de pesquisa independentes chegarem à mesma conclusão, inesperada até então, de que a expansão do universo está se acelerando e não se desacelerando como seria esperado pelo efeito da atração gravitacional entre os diferentes corpos com massa existentes no cosmos (Novosyadlyj, 2013). A nova imagem do universo foi fruto de uma revolução do tipo daquela realizada por Copérnico (1473-1543): a maior parte do universo é constituída de uma componente com massa gravitacional efetivamente negativa – um fluido com pressão negativa (Graef, 2012) – para a qual a força gravitacional não é mais atrativa (Linder, 2007).

A forma mais simples de explicar a aceleração da expansão do universo é pela introdução da denominada constante cosmológica que, na prática, age como uma força repulsiva nas equações oriundas da Relatividade Geral. A atuação da energia escura em oposição à gravidade produz situações contraintuitivas que podem ser trabalhadas em atividades educacionais: por exemplo, se a constante cosmológica fosse muito grande, objetos que fossem largados na proximidade da superfície da Terra poderiam sair voando e subir para o céu em vez de cair para o chão, contradizendo a experiência cotidiana (PEREIRA, 2019).

A partir dos dados cosmológicos existentes, a idade estimada para o Universo (definida como o tempo transcorrido desde o *Big Bang* até a atualidade) é de aproximadamente 13,73 bilhões de anos, de acordo com o sumário do WMAP³ (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), consultado em maio de 2023. Por sua vez, a atual fase de expansão acelerada do universo se iniciou aproximadamente 10 bilhões de anos após o *Big Bang* (Frieman; Turner; Huterer; 2008), quando a componente de energia escura se tornou dominante: antes disto, a expansão do universo era muito mais lenta e gradual (Kak, 2021). Ao contrário da matéria escura que está concentrada no halo das galáxias, a energia escura não está concentrada em absoluto em regiões específicas do universo (Horvath et al., 2007). A determinação do mecanismo responsável pela aceleração cósmica é com certeza um problema intrigante (Oliveira, 2015) que tem desafiado os astrofísicos a encontrarem uma solução.

Uma fonte de dados, informações, notícias e recursos educacionais para pesquisa a respeito da energia escura é o levantamento DES - “*Dark Energy Survey*” que está

disponível para ser consultado na *internet*⁴. Existe uma participação brasileira neste levantamento, por meio do consórcio DES-Brazil⁵.

4 ENSINO SOBRE MATÉRIA ESCURA E ENERGIA ESCURA

A Astronomia é considerada um campo do conhecimento motivador, interdisciplinar, acessível e relevante para a formação dos cidadãos, pois favorece o contato direto e experimental com a natureza, desenvolve a cultura científica, permite uma aproximação com os métodos da Ciência, guarda uma forte relação com a evolução do pensamento humano, fomenta a alfabetização científica, esclarece a respeito de pseudociências, estimula a imaginação, amplia a compreensão acerca do universo e promove a aprendizagem autônoma (Marques, 2017). Portanto, as contribuições do trabalho com temas de Astronomia em atividades de ensino e de divulgação científica vão muito além da função de apenas veicular conhecimentos.

O trabalho didático na área de ensino de Física envolvendo temas de fronteira da Ciência, como os dois constituintes do setor escuro (matéria escura e energia escura), pode parecer despropositado, à primeira vista, sob a argumentação de que ainda não se conhece de forma definitiva e minimamente consensual a natureza da matéria escura e da energia escura: afinal de contas, poderia se indagar, como e por qual motivo se deveria ensinar acerca daquilo sobre o que ainda não existe uma explicação científica bem estabelecida e aceita pela comunidade científica? Qual seria o objetivo de ensinar sobre aquilo que se desconhece? A resposta a esta indagação depende do pressuposto acerca de qual é o objetivo para se trabalhar didaticamente com um determinado conteúdo científico: para ensinar sobre a estrutura interna conceitual de uma teoria científica ou para ensinar sobre o modo científico de pensar acerca dos problemas existentes? Ambos os objetivos são igualmente válidos e podem coexistir ao longo do processo de ensino-aprendizagem, mas se em algum momento o intuito principal é ensinar os alunos a pensarem cientificamente, ou seja, ensinar sobre como cientistas enfrentam os problemas com os quais se encontram ao longo do processo de produção de conhecimento, o trabalho pedagógico com temas de fronteira da Ciência pode ser bastante útil. Uma educação científica que aborde também as características relacionadas à natureza da ciência pode colaborar consideravelmente para a formação de uma cidadania mais esclarecida e com um maior nível de consciência sobre aspectos da ciência relacionados mais diretamente à vida em sociedade (Praia; Gil-Perez; Vilches, 2007).

Para tentar entender os dilemas enfrentados pelos astrofísicos diante dos problemas referentes à natureza da matéria escura e da energia escura, pode ser útil refletir sobre problemas e dilemas similares enfrentados por cientistas no passado. Basicamente, sempre que há uma discordância entre dados experimentais e previsões teóricas, esta discrepância pode ser explicada de duas formas: ou supondo que os dados experimentais existentes sejam insuficientes (e neste caso, quando novos dados forem incorporados, a discordância desaparecerá) ou supondo que a teoria existente esteja incompleta, não modelando bem as características da natureza em algum âmbito (e, neste caso, quando surgir uma nova teoria mais completa e que modele melhor a natureza, a discordância desaparecerá).

Dois exemplos da História da Astronomia no século XIX podem ser úteis didaticamente para traçar paralelos e compreender essa questão. O primeiro refere-se à trajetória do planeta Urano: a órbita deste que é o sétimo planeta em torno do Sol – e que

tinha sido descoberto em 1781 pelo astrônomo William Herschel (1738-1822) – é discrepante com a previsão teórica feita pela mecânica newtoniana, a partir dos dados existentes sobre as massas do Sol e dos seis planetas interiores em relação à sua órbita. Esta discrepância levou à previsão, em 1845, por Urbain Le Verrier (1811-1877), da existência de um oitavo planeta, Netuno (que seria o causador das discrepâncias). Em 1846, Netuno foi descoberto exatamente onde os cálculos teóricos apontavam (Milone et al., 2010). Neste caso, a solução para o dilema enfrentado pelos cientistas foi inferir que existiam objetos (dados) não observados que provocavam a discrepância observada experimentalmente, e não por questionar as leis fundamentais da Física, na época, a Teoria da Gravitação Universal de Newton.

Por outro lado, na mesma época, era conhecido que o planeta mais próximo do Sol, Mercúrio, também tinha discrepâncias em sua órbita que não eram plenamente explicadas pela mecânica clássica: o famoso problema da precessão do periélio da órbita de Mercúrio. De modo análogo, em 1859, o mesmo Urbain Le Verrier propôs a existência de um planeta hipotético situado mais próximo do Sol, chamado Vulcano e que não teria sido ainda observado. A procura por Vulcano durou muitos anos, sempre com resultados infrutíferos. Foi somente por meio da Teoria da Relatividade Geral, proposta em 1915 por Albert Einstein (1879-1955), que se tornou possível prever matematicamente de modo correto a precessão do periélio da órbita de Mercúrio (Forrester, 2019).

Assim, resumidamente, o problema com a órbita de Urano só foi resolvido supondo a existência de objetos que ainda não tinham sido observados (o planeta Netuno), enquanto o problema com a órbita de Mercúrio só foi resolvido questionando os fundamentos teóricos da Física da época e, neste caso, produzindo uma verdadeira revolução científica, a Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

No caso atual da matéria escura (e o mesmo acontece com a energia escura), os físicos se encontram, em certo sentido, diante de um dilema análogo. O uso de exemplos retirados dos anais da História da Ciência, como estes, em sala de aula, podem colaborar significativamente para que os alunos compreendam com mais profundidade a complexidade envolvida na produção do conhecimento científico. O recurso à História da Física contribui para compreender como ocorre o processo de aceitação e consolidação de teorias científicas e para evidenciar o caráter não linear do desenvolvimento dos conhecimentos da Física (Pereira; Araújo, 2019).

Problemas atuais como os associados ao setor escuro podem ser úteis para discutir temas de Filosofia da Ciência em sala de aula, como, por exemplo, sobre a condição de falseabilidade de Popper e sobre o papel da indução na Ciência, de modo que os alunos consigam superar concepções equivocadas e compreendam em um nível mais profundo os modos como os conhecimentos existentes nos dias de hoje foram produzidos pela comunidade de físicos (Reynolds, 2015).

Dados de pesquisas indicam que o trabalho didático sobre matéria escura e energia escura suscita um interesse substancial de natureza teórica, contextual e tecnológica entre os alunos (Silva; Silva, 2022), além de demandar uma abordagem histórico-epistemológica no ensino de Física que permite fomentar uma visão mais contemporânea da natureza da ciência (Moriggi, 2023; Costa et al., 2023). Adicionalmente, a exploração de temas atuais como estes e que inter-relacionam a Física e a Astronomia, pode contribuir significativamente para o envolvimento dos estudantes no processo de aprendizagem, promovendo tanto o interesse, quanto o desenvolvimento de uma consciência acerca do modo como a ciência é produzida.

A incorporação de temas de Astrofísica no currículo do ensino médio representa uma estratégia eficaz para introduzir conceitos fundamentais da Física Moderna e Contemporânea (Busatto et al., 2018). A natureza interdisciplinar da Astrofísica permite a abordagem de fenômenos complexos, como a matéria escura e a energia escura, de

maneira acessível aos estudantes. Ao explorar os princípios físicos subjacentes aos fenômenos astronômicos, os alunos são expostos a conceitos-chave de áreas da Física, como a Teoria da Relatividade, a Mecânica Quântica, a Física Nuclear e a Física de Partículas.

O estudo da Astrofísica oferece também oportunidades para aplicar métodos de investigação científica e tecnológica, o que não apenas estimula o interesse dos alunos pela ciência, mas também proporciona uma base sólida para compreender os avanços científicos: isto é importante porque não basta apenas apresentar as ideias trazidas pela Física Moderna e Contemporânea, mas também trabalhar com as evidências existentes a respeito destas ideias e os fundamentos sobre os quais elas se assentam. Em particular, trabalhar com questões situadas na fronteira da ciência atual e que não estão ainda completamente compreendidas, colabora para que a escola se torne um espaço gerador de perguntas e não apenas um repositório de respostas (Ximenes, 2016).

A unidade temática "Terra e Universo" da BNCC (Brasil, 2017) proporciona um contexto propício para a discussão de conceitos de astrofísica situados na fronteira da ciência atual, como a matéria escura e a energia escura, que podem ser pensados em escalas de distâncias gigantescas, como as escalas de tamanho das galáxias (Cirillo, 2021), e, até mesmo, as escalas de tamanho cósmicas. Ao explorar as interações entre os objetos existentes no Universo, os estudantes são introduzidos à compreensão da complexidade do cosmos e dos fenômenos que o regem (Leão; Teixeira, 2020). Essa abordagem facilita a análise de questões relacionadas à Física, à Cosmologia e à Astronomia, permitindo que os alunos explorem o desconhecido e desenvolvam habilidades de pensamento crítico ao investigar fenômenos que desafiam nossa compreensão atual do universo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desafios postos pelas evidências experimentais bastante fortes sobre a existência tanto da matéria escura, quanto da energia escura levam os físicos aos seguintes questionamentos: O que pode estar causando o aumento das velocidades das estrelas periféricas de galáxias espirais em torno de seus centros? O que pode estar causando a aceleração da expansão do universo? Em ambos os casos, basicamente há dois tipos de soluções sendo tentadas para desvendar e elucidar estes enigmas contemporâneos da Astrofísica (Waga, 2005).

O primeiro tipo de proposta de solução, de caráter mais conservador, propõe procurar por novas partículas ou novas componentes ainda desconhecidas, da constituição do universo que interagiriam com o resto do cosmos e entre si, de modo a provocar os comportamentos aos quais associamos genericamente os conceitos de matéria escura e energia escura. O segundo tipo de solução, de caráter mais revolucionário, propõe correções na Teoria da Relatividade Geral ou até mesmo uma nova Teoria da Gravitação que provoque por decorrência os comportamentos do setor escuro. Cada um destes dois tipos de solução traz diferentes consequências para a Física e para a forma como a ciência explica os comportamentos do cosmos.

O dilema atual vivido pela Astrofísica, portanto, é o seguinte: ou faltam dados ou a teoria atual da gravitação é incompleta. De forma mais específica: ou a matéria e a energia escuras são ingredientes fundamentais do universo cuja natureza será determinada em algum momento ou a Relatividade Geral é incompleta para descrever os fenômenos observados e ela deverá sofrer correções ou até mesmo deverá surgir uma nova Teoria da Gravitação (Velten, 2020). Com certeza, é necessário que nos próximos anos e décadas sejam destinados muitos recursos financeiros e humanos para tentar encontrar uma

explicação física para a matéria escura e para a energia escura. Este é um dos maiores desafios colocados para as próximas gerações de físicos.

Uma quantidade considerável de alunos se interessa por fenômenos científicos situados na fronteira do conhecimento, particularmente em áreas relacionadas à Astronomia e à Astrofísica, bem como por questões sobre as quais ainda não há explicações razoavelmente consensuais no âmbito científico. O entusiasmo acerca do estudo de uma determinada área é um fator que colabora para fazer com que os alunos se dediquem com muito mais afinco aos seus estudos em temas científicos e se aprofundem naqueles tópicos pelos quais sintam maior interesse. No caso do estudo da matéria escura e da energia escura, este tipo de curiosidade pelo “desconhecido”, ou seja, por problemas científicos ainda não resolvidos, é algo que pode ser usado como recurso para criar oportunidades para a aprendizagem de conceitos científicos, pelo fato de conectar efetivamente as motivações dos alunos com os conteúdos de Física a serem trabalhados em sala de aula.

REFERÊNCIAS

ABRAMO, Raul. O estranho universo em que vivemos. **Ciência e Cultura**, v. 61, n. 4, p. 23-27, 2009. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v61n4/10.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2023.

AGUIAR, Ricardo Rechi. **Tópicos de astrofísica e cosmologia**: uma aplicação de física moderna e contemporânea no ensino médio. Dissertação (Mestrado) - USP, São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-25012011-112911/en.php>. Acesso em: 10 ago. 2023.

BERTOLAMI, Orfeu; GOMES, Cláudio. Matéria escura. **Revista de Ciência Elementar**, v. 5, n. 4, 064, 2017. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2017/064/>. Acesso em: 14 ago. 2023.

BRASIL. MEC. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: Ministério da Educação, 2017. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>. Acesso em: 2 abr. 2024.

BUSATTO, Cassiano Zolet *et al.* O ensino de física moderna e contemporânea na educação básica: conteúdos trabalhados pelos docentes. **Revista CIATEC-UPF**, v.10, n. 1, p.104-115, 2018. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/ciatec/article/view/8388>. Acesso em: 2 abr. 2024.

CIRILLO, Cintia Aparecida. **Matéria escura**: proposta de uma unidade de ensino potencialmente significativa para a introdução de física contemporânea no ensino médio. 2021. 34 f. Produto Educacional de Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2021. Disponível em: <https://mnpef.propg.ufabc.edu.br/wp-content/uploads/2021/12/Produto-Cintia-Aparecida-Cirillo.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2024.

CLEGG, Brian. **Dark matter & dark energy**: the hidden 95% of the universe. Londres, Reino Unido: Icon Books, 2019.

COSTA, Francisco Ernandes Matos. Compreendendo o Universo numa Perspectiva Newtoniana. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 2, e2308, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/bYsWvVygmDBbxwmfdBhKqgH/?lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2023.

COSTA, Matheus Agenor Gomes da *et al.* Astrofísica no Novo Ensino Médio: Uma abordagem prática da Matéria Escura no contexto de uma disciplina eletiva. **Anais do XVI Encontro de Física do ITA (EFITA)**, São José dos Campos, 2023. Disponível em: https://www.efita.ita.br/wp-content/uploads/2023/10/2023-10-04-Anais_do_XVI_EFITA.pdf. Acesso em: 2 abr. 2024.

DORSCH, Gláuber Carvalho. Um escuro quarto do Universo. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 34-57, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrofísica/article/view/33753>. Acesso em: 10 ago. 2023.

FORRESTER, Rochelle. **History of Astronomy**: From the Ptolemaic System to General Relativity. Humanities Commons, 2019. Disponível em: <https://hcommons.org/deposits/objects/hc:27114/datastreams/CONTENT/content>. Acesso em: 12 ago. 2023.

FRIEMAN, Joshua TURNER, Michael; HUTERER, Dragan. Dark Energy and the Accelerating Universe. **ArXiv**, 2008. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/0803.0982.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2023.

FRÓES, André Luís Delvas. Astronomia, astrofísica e cosmologia para o ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 3, 3504, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/788HtL95HTqRDYmmgwntPCh/?lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2023.

GRAEF, Leila Lobato. **Um modelo para decaimento da energia escura**. São Paulo: Mestrado – USP, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-08082012-150548/pt-br.php>. Acesso em: 12 ago. 2023.

GUSMÃO, Thiago; VALENTE, Julia; DUARTE, Sergio José Barbosa. A matéria escura no universo: uma sequência didática para o ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 4, e4504, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/f94zbn936VbJgscj3ykpnKc/?lang=pt#>. Acesso em: 12 ago. 2023.

HERNÁNDEZ-ARBOLEDA, Alejandro; RODRIGUES, Davi Cabral. Rotação de galáxias e matéria escura. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 6-33, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrofísica/article/view/33939>. Acesso em: 14 ago. 2023.

HORVATH, Jorge Ernesto *et al.* **Cosmologia física**: do micro ao macro cosmos e vice-versa. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2007.

JOYCE, Austin *et al.* Beyond the cosmological standard model. **ArXiv**, 2014. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1407.0059.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2023.

KAK, Subhash. Information Theory of Evolutionary Stages in Noninteger Dimensional Spaces. **Techrxiv**, 2021. Disponível em: https://www.techrxiv.org/articles/preprint/Information_Theory_of_Evolutionary_Stages_in_Noninteger_Dimensional_Spaces/13775005/1. Acesso em: 14 ago. 2023.

KLAER, Vincent; MOORE, Guy. The dark-matter axion mass. **ArXiv**, 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1708.07521.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2023.

LADERA, Celso; ALOMÁ, Eduardo; LEÓN, Pilar. The Virial Theorem and its applications in the teaching of Modern Physics. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 4, n. 2, p. 260-266, 2010. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3696144>. Acesso em: 10 ago. 2023.

LEÃO, Renata Sá Carneiro; TEIXEIRA, Maria do Rocio Fontoura. A educação em astronomia na era digital e a BNCC: convergências e articulações. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 30, p. 115-131, 2021. Disponível em: <https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/498>. Acesso em: 2 abr. 2024.

LIMA, José Ademir Sales; SANTOS, Rose Clivia. 100 Anos da Cosmologia Relativística (1917-2017). Parte I: Das Origens à Descoberta da Expansão Universal (1929). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 1, e1313, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v40n1/1806-1117-rbef-40-01-e1313.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2023.

LINDER, Eric. Resource Letter: Dark Energy and the Accelerating Universe. **ArXiv**, 2007. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/0705.4102.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2023.

LÍVIO, Mário. A energia escura e o futuro do universo. **Dicta & Contradicta**, São Paulo, n. 4, dez. 2009. Disponível em: <http://www.dicta.com.br/edicoes/edicao-4/a-energia-escura-e-o-destino-do-universo/>. Acesso em: 10 ago. 2023.

LOPES, Letícia Padula. **Elaboração e avaliação de uma história em quadrinhos de ficção científica sobre matéria escura e a estrutura da Ciência**: uma proposta executada no planetário da Unipampa. TCC - Unipampa Bagé, RS, 2019. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/4805/1/TCC%20Let%c3%adcia%20Lopes%202019.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MARQUES, Joana Brás Varanda. **Educação não-formal e divulgação da astronomia no Brasil**: atores e dinâmica da área na perspectiva da complexidade. Tese (Doutorado) - UFSCar, São Carlos, SP, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9613?show=full>. Acesso em: 10 ago. 2023.

MILONE, André de Castro *et al.* **Introdução à astronomia e astrofísica**. São José dos Campos, SP: INPE, 2010. Disponível em: <http://www.inpe.br/ciaa2018/arquivos/pdfs/completo.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2023.

MORIGGI, Andressa Varriale. **“Matéria escura e energia escura” no ensino médio**: um tema de física moderna e contemporânea epistemologicamente efervescente. 2023. 243 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/268220/001188212.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 2 abr. 2024.

NASCIMENTO, Elizangela Anazilda do. **Candidatos à matéria escura no universo: MACHOs E WIMPs**. Campina Grande, PB: Dissertação (Mestrado) - UFCG, 2018. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFCG_08f6c04119f272ace9c82dc26a93d659. Acesso em: 14 ago. 2023.

NOVOSYADLYJ, Bohdan *et al.* Dark energy: observational evidence and theoretical models. Volume 1. Dark energy and dark matter in the universe in three volumes. **ArXiv**, 2013. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1502.04177.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2023.

OLIVEIRA, Felipe Andrade. **Cosmologias aceleradas com criação de matéria**: teoria e testes observacionais. São Paulo: Doutorado IAG-USP, 2015. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14131/tde-14102015083201/publico/tese_Felipe_Oliveira_VF.pdf. Acesso em: 14 ago. 2023.

PEREIRA, João Alberto Mesquita. Introducing dark energy in the classroom using paradoxes. **IOP Conference Series: Journal of Physics**, v. 1286, 012008, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1286/1/012008/pdf>. Acesso em: 13 ago. 2023.

PEREIRA, Nádia Vilela; ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira de. Uma proposta de ensino a partir da história da física. **E-Mosaicos**, v. 8, n. 19, p. 92-114, 2019. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/e-mosaicos/article/view/42890>. Acesso em: 10 ago. 2023.

PRAIA, João; GIL-PEREZ, Daniel; VILCHES, Amparo. O papel da natureza da ciência na educação para a cidadania. **Ciência & Educação**, v. 13, n. 02, p. 141-156, 2007. Disponível em: http://educa.fcc.org.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132007000200001&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 12 ago. 2023.

REYNOLDS, Mark Anthony. The Duhem-Quine thesis and the dark matter problem. **ArXiv**, 2015. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1507.06282.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2023.

ROOS, Matts. Expansion of the Universe: Standard Big Bang Model. **ArXiv**, 2008. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/0802.2005>. Acesso em: 14 ago. 2023.

SÁNCHEZ–VEGA, Bruce Lehmann. Matéria escura axiônica. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 66-78, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astronomia/article/view/33930>. Acesso em: 13 ago. 2023.

SHARMA, Gazal; ANU; CHAUHAN, Bhag Chand. Dark matter and neutrinos. **ArXiv**, 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1711.10564.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2023.

SILVA, Renato Gomes da; SILVA, Ítalo Batista da. Investigação do ensino de astronomia (Matéria Escura - ME) no nível médio em duas escolas públicas estaduais do Rio Grande do Norte (RN). **HOLOS**, v. 7, 2022. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/10776>. Acesso em: 2 abr. 2024.

VELTEN, Hermano. Matéria escura, energia escura e a busca por uma nova teoria para a gravitação. **Cadernos de Astronomia**, v. 1, n. 1, p. 40-51, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astronomia/article/view/31674/21243>. Acesso em: 11 ago. 2023.

VELTEN, Hermano. Matéria escura e as estruturas cósmicas. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 58-65, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astronomia/article/view/33609>. Acesso em: 10 ago. 2023.

WAGA, Ioav. Cem anos de descobertas em Cosmologia e novos desafios para o século XXI. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v27n1/a18v27n1.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2023.

WOITHE, Julia; KERSTING, Magdalena. Bend it like dark matter! **ArXiv**, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2010/2010.14826.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2023.

XIMENES, Samuel Jorge Carvalho. **Matéria escura no ensino médio**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Samuel_Ximenes/dissertacao_Samuel_Ximenes.pdf. Acesso em: 2 abr. 2024.

ZIMDAHL, Winfried. Big bang & energia escura: problemas atuais da cosmologia. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 106-114, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astronomia/article/view/33624/22915>. Acesso em: 11 ago. 2023.