

Matéria escura, energia escura e história da ciência na educação científica

RESUMO

Este artigo tem como objetivo investigar a evolução histórica dos conceitos de matéria escura e energia escura, e os conhecimentos existentes sobre estes dois fenômenos, de modo a subsidiar atividades de educação e divulgação científica. A fundamentação teórica para este trabalho foi realizada a partir de uma revisão bibliográfica que permitiu a análise de teses, dissertações, artigos e trabalhos acadêmicos tanto da área de astrofísica, quanto da área de ensino de ciências. A análise bibliográfica realizada envolveu também artigos originais escritos por cientistas como U. Le Verrier, A. Einstein, F. Zwicky, G. Gamow, V. Rubin, S. Perlmutter e A. Riess que estão disponíveis e abertos para serem lidos na internet. Em particular foram investigados o modelo cosmológico padrão, assim como as observações e os dados experimentais existentes. Para colocar em perspectiva os desafios contemporâneos acerca da natureza da matéria escura e da energia escura, são analisados alguns exemplos históricos de dilemas enfrentados no passado pela comunidade científica sobre as órbitas dos planetas Urano e de Mercúrio e acerca da existência de epiciclos, do calórico e do éter luminífero.

PALAVRAS-CHAVE: Astrofísica. História da Física. Setor Escuro.

Ricardo Roberto Plaza Teixeira
rteixeira@ifsp.edu.br
orcid.org/0000-0001-7124-1774
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de São Paulo (IFSP),
Caraguatatuba, São Paulo, Brasil

Diego Corrêa Peres de Souza
peres.souza@aluno.ifsp.edu.br
orcid.org/0000-0003-1740-7213
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de São Paulo (IFSP),
Caraguatatuba, São Paulo, Brasil

INTRODUÇÃO

No início da terceira década do século XXI, a melhor explicação que temos para as características do universo como conhecemos é o Modelo Cosmológico Padrão que foi construído ao longo de um século pela comunidade de astrofísicos: é o chamado Modelo Λ CDM – *Lambda Cold Dark Matter* – ou, em português, Lambda Matéria Escura Fria, que se baseia na ideia de que o universo é isotrópico e homogêneo em larga escala e que é consistente com os dados existentes atualmente, por exemplo, sobre a expansão do universo e a radiação cósmica de fundo (SILVA NETO, 2017).

Dentre os principais parâmetros cosmológicos deste modelo estão: a taxa de expansão do Universo (mais conhecida como constante de Hubble), a densidade de matéria ordinária (ou bariônica), a densidade de matéria escura, a densidade de energia escura, a idade do Universo e o parâmetro de desaceleração (que é negativo, pois a expansão do universo está se acelerando). A letra grega Lambda (Λ) indica a constante cosmológica que está associada à aceleração da expansão do universo.

Os principais desafios existentes na atualidade para a consolidação do Modelo Cosmológico Padrão estão relacionados a uma caracterização mais bem definida sobre a matéria escura, cujos indícios acerca da sua existência surgiram primeiramente nos anos 1930, e a energia escura, cuja existência se tornou uma necessidade a partir de dados obtidos no final dos anos 1990.

Estes são dois dos principais “mistérios” situados na fronteira da ciência atual enfrentados pelos astrofísicos: 1) Qual é a natureza da matéria invisível responsável pelas características observadas atualmente para as galáxias e os aglomerados de galáxias? 2) O que provoca a aceleração da expansão do universo? Essas que são as duas componentes do chamado “setor escuro” – constituído, respectivamente, pela matéria escura e pela energia escura – correspondem hoje a cerca de 95% do universo (LANDIM, 2017) e apresentam um acoplamento eletromagnético nulo ou extremamente pequeno (HORVATH *et al.*, 2007).

Segundo o sumário disponibilizado no site da “WMAP – *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*”¹, uma sonda da NASA cuja missão é estudar o espaço profundo em fevereiro de 2021, em termos aproximados e percentuais, a composição percentual do universo é a seguinte: 4,6% de matéria bariônica; 23,3% de matéria escura; e 72,1% de energia escura.

A introdução do estudo acerca do setor escuro em atividades de ensino de ciências e de divulgação científica pode colaborar com o processo de aprendizagem dos alunos em disciplinas como a física, enriquecer a cultura científica deles e motivá-los para pensar acerca de temas científicos da atualidade (GUSMÃO; VALENTE; DUARTE, 2017).

MATÉRIA ESCURA

O que é observado atualmente de diferentes formas – como por exemplo, pela velocidade de rotação das estrelas da periferia de galáxias em torno do seu centro – é que deve existir muito mais matéria nas galáxias do que aquela que podemos enxergar a partir da radiação total produzido pelas estrelas e pelo gás existentes

nestas galáxias: essa é a denominada matéria escura. Essa matéria escura está distribuída em “*halos*” que envolvem e permeiam as galáxias.

Resumidamente, as observações em diferentes escalas astronômicas e cosmológicas apontam para as seguintes características da matéria escura: ela é eletricamente neutra, não relativística e estável em escalas cosmológicas. Além disso, ela é não bariônica (PEEBLES, 2017), ou seja, não é composta por prótons e nêutrons e, portanto, é diferente da matéria que compõe os elementos da tabela periódica. A matéria escura se encontra em todos os sistemas confinados gravitacionalmente, desde as pequenas galáxias até os aglomerados de galáxias. Ela funciona como um poço de potencial gravitacional para a formação destas que são as estruturas cósmicas de nosso universo. As principais evidências da existência de matéria escura no universo envolvem dados sobre as curvas de rotação de estrelas nas bordas das galáxias espirais, sobre a velocidade de dispersão de galáxias em aglomerados e sobre lentes gravitacionais.

Não se sabe qual é o *spin* das partículas de matéria escura e, portanto, não se sabe qual o tipo de estatística que ela obedece, se a de Fermi-Dirac ou se a de Bose-Einstein. Aliás, não há consenso se a matéria escura é constituída de uma partícula fundamental: a proposta MOND (“Dinâmica Newtoniana Modificada”), que será discutida mais a frente, vai contra essa noção.

Os candidatos à matéria escura têm massas variando desde 10^{-22} eV/c² até 5 massas solares, em uma faixa de variação gigantesca. Algumas das partículas candidatas a comporem a matéria escura são WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particle*), MACHOs (*Massive Compact Halo Object*), áxions e fótons escuros (*dark photons*). Vários grupos de pesquisa e laboratórios por todo o mundo estão empenhados na procura por matéria escura, inclusive o LHC - *Large Hadron Collider* (SÁNCHEZ–VEJA, 2021).

As evidências iniciais acerca da matéria escura surgiram na primeira metade do século XX. A maioria das galáxias se encontra em famílias, chamadas de aglomerados. O aglomerado “*Cluster*” de Coma, em específico, conta com mais de mil galáxias e um diâmetro de cerca de 20 milhões de anos luz, estando situado a uma distância de aproximadamente 320 milhões de anos-luz da Terra ou 100 megaparsecs (SESSIONS, 2019), tendo em sua região central duas galáxias elípticas gigantes, NGC 4874 e NGC 4889 (VIKHLININ *et al.*, 2001).

Na década de 1930, o astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974) mediu a massa do aglomerado de galáxias de Coma e verificou em seus cálculos que esse valor era 400 vezes maior do que a soma das massas visíveis das suas galáxias; nas palavras do próprio Zwicky, a densidade do aglomerado de Coma, obtida a partir dos seus efeitos gravitacionais, “teria que ser 400 vezes maior do que o valor derivado das observações da matéria luminosa” (ZWICKY, 1933). A grande dispersão nas velocidades aparentes de galáxias dentro do aglomerado de Coma, com diferenças que ultrapassam 2.000 km/s (BERTONE; HOOPER, 2016), indicam que deve haver nele muito mais massa do que aquela associada às suas estrelas (ANISIU, 2018): existe uma matéria “faltante” ou “invisível” – a matéria escura – responsável por manter o aglomerado coeso (STEINER, 2006). Alguns anos depois, ao estudar o aglomerado de Virgem (Virgo), o astrônomo Sinclair Smith (1899-1938) confirmou os resultados obtidos por Zwicky (SMITH, 1936).

O problema detectado por Zwicky nos anos 1930 foi amplamente ignorado por várias décadas (RUBIN, 2006), tornando-se uma espécie de “curiosidade” que precisaria ser resolvida em algum momento futuro (HERNÁNDEZ-ARBOLEDA; RODRIGUES, 2021). Essa questão só voltou a ser enfrentada pela comunidade científica nos anos 1970, pela astrônoma Vera Cooper Rubin (1928-2016) e sua equipe, a partir do estudo da rotação de galáxias espirais que indicava que a velocidade de rotação das estrelas periféricas era duas vezes maior que o previsto teoricamente apenas pela matéria visível. A velocidade de rotação de galáxias espirais caía muito pouco com a distância ao centro da galáxia (RUBIN; FORD JR.; THONNARD, 1978), mas pelo efeito gravitacional da massa das estrelas visíveis, essa velocidade de rotação deveria cair consideravelmente com a distância ao centro.

Em particular, foi medida a existência dessa discrepância na velocidade de rotação de estrelas periféricas da galáxia de Andrômeda (RUBIN; FORD JR., 1970), a galáxia mais próxima da nossa Via Láctea, também conhecida como M31, indicando a existência de matéria escura (LUIZ, 2017): a velocidade de rotação da periferia era muito mais próxima da velocidade de rotação da região mais próxima do centro do que esperaria a partir da massa visível desta galáxia (Figura 1). Como analogia, a título de comparação, no Sistema Solar, a velocidade de translação orbital de um planeta é inversamente proporcional à raiz quadrada do raio da órbita: este é um corolário decorrente da Terceira Lei de Kepler (os quadrados dos períodos das órbitas dos planetas ao redor do Sol são diretamente proporcionais aos cubos dos raios médios dessas órbitas), que por sua vez pode ser derivada a partir das leis de Newton para a mecânica clássica.

Figura 1 – Velocidade de rotação das estrelas em função da distância ao centro de galáxias espirais



Fonte: Autores (2021).

O raciocínio indicando a ausência de massa pode ser obtido utilizando a equação da Gravitação Universal para a velocidade de rotação das estrelas na periferia de galáxias espirais e igualando a força gravitacional com a força centrípeta (GUSMÃO; VALENTE; DUARTE, 2017). A explicação usual dada atualmente para esta discrepância é que existe alguma coisa que denominamos **matéria escura** que só interage gravitacionalmente e que está distribuída pela galáxia de modo que a massa galáctica cresce linearmente com a distância a partir do centro, deixando a constância da curva de rotação consistente com a física

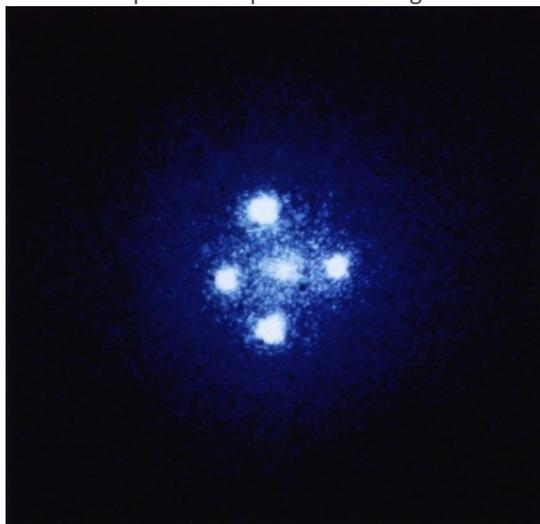
newtoniana (RUBIN, 2011): a análise das curvas de rotação de galáxias espirais produz uma das principais evidências para a existência de matéria escura nelas em uma quantidade igual a cerca de várias vezes a quantidade da matéria ordinária.

Foi a determinação de Vera Rubin, ao longo de pelo menos três décadas, que ajudou a estabelecer a importância da matéria escura no universo, uma consequência sobretudo de sua meticulosa pesquisa sobre as velocidades de estrelas periféricas de galáxias espirais. Na verdade, estudos sobre a interação gravitacional no âmbito das galáxias já vinham sendo trabalhados por Vera Rubin desde a sua juventude no seu mestrado e doutorado: o mestrado deu origem a uma publicação intitulada *“Differential rotation of the inner metagalaxy”* (RUBIN, 1951) e os resultados do doutorado foram publicados no artigo intitulado *“Fluctuations in the space distribution of the galaxies”* (RUBIN, 1954). Em ambas as pesquisas, nota-se uma preocupação com a forma como as galáxias permaneciam juntas devido à interação gravitacional (PANEK, 2014).

Uma galáxia é um sistema complexo que se mantém coeso pela gravidade. Essa força gravitacional é dominada pela matéria escura, cuja distribuição é muito mais estendida do que a parte visível das galáxias e tem uma forma esferoidal. A matéria comum da qual somos feitos, denominada de "matéria bariônica", é composta principalmente de hidrogênio e hélio, constituintes majoritários de maior parte das estrelas. Embora a matéria escura contribua com cerca de 84% da massa total do universo, a radiação eletromagnética é produzida apenas pelos bárions e, portanto, pela matéria bariônica convencional (FERRERAS, 2019).

Melhorar a caracterização das chamadas lentes gravitacionais é uma das formas que podem ser utilizadas para permitir um conhecimento melhor sobre onde se encontram grandes concentrações de matéria escura. Se um objeto situado a uma distância muito grande da Terra se desdobra para nós em quatro visualizações quando o observamos, e se não é possível notar qualquer obstáculo visível no meio da trajetória da luz que pudesse produzir este efeito, essa “lente gravitacional” (Figura 2) pode ser causada por matéria escura. Portanto, as lentes gravitacionais podem ser utilizadas para investigações sobre matéria escura.

Figura 2 – Efeito produzido por uma lente gravitacional



Fonte: NASA e ESA (Imagem de domínio público disponível no link https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_lens#/media/File:Einstein_cross.jpg).

As ondas gravitacionais, que foram detectadas pela primeira vez em 2015, são provocadas pela fusão (“coalescência”) de objetos com grandes massas, como buracos negros. Uma possibilidade acerca da natureza da matéria escura é que ela possa ser constituída de buracos negros massivos primordiais que teriam se formado logo após o Big Bang, devido à alta densidade de matéria existente durante a expansão inicial do universo. Nesse caso, a detecção de matéria escura poderia ser feita por meio da mensuração das ondas gravitacionais produzidas pela fusão destes buracos negros (GARCÍA-BELLIDO, 2017). O estudo das possíveis relações existentes entre buracos negros primordiais e a matéria escura tem se aprofundado recentemente, porque há a possibilidade de os buracos negros primordiais serem tão numerosos como as estrelas (CHO, 2017).

Curiosamente nas galáxias espirais, cuja matéria bariônica (como os prótons e os nêutrons) que constitui as estrelas e gases se distribui na forma aproximada de um disco, a distribuição de matéria escura tem uma forma aproximadamente esférica. O motivo pelo qual isso ocorre está relacionado ao fato de que a matéria escura, muito provavelmente não-bariônica, interage somente gravitacionalmente formando halos esféricos. Por outro lado, a matéria bariônica pode também interagir com o campo eletromagnético, emitindo radiação, perdendo energia, colapsando em corpos de maior densidade como estrelas, mas ao mesmo tempo conservando o momento angular, o que leva à formação de discos. A retirada pela radiação da energia de agitação térmica da matéria bariônica faz com que essa última consiga atingir altas densidades, algo que é inacessível para a matéria escura. Isso explicaria o motivo pelo qual o centro das galáxias espirais conta com uma maior presença de matéria bariônica em relação à matéria escura, enquanto na periferia dessas galáxias o oposto acontece (HERNÁNDEZ-ARBOLEDA; RODRIGUES, 2021). Assim, a matéria escura mais próxima de nós é aquela situada na nossa própria galáxia e que afeta significativamente a velocidade das estrelas periféricas em torno do seu centro.

O estudo da presença de matéria escura em galáxias antigas é importante, como é o caso da Galáxia Tucana II, uma galáxia anã esferoidal com cerca de 13 bilhões de anos de idade e que é satélite da Via Láctea, isso porque revela muito sobre o passado do Universo (CHITI *et al.*, 2021), em particular sobre o período imediatamente posterior ao Big Bang. Portanto, o estudo da matéria escura permitirá também compreender melhor a evolução do universo desde o seu início.

ENERGIA ESCURA

Edwin Hubble (1889-1953), no final dos anos 1920, realizou um trabalho pioneiro por meio do estudo do efeito Doppler na análise de *redshifts* (desvios para o vermelho) de galáxias distantes, o que permitiu concluir que o universo se encontra em expansão (SOARES, 2009). A idade do universo, estimada atualmente em cerca de 13,73 bilhões de anos, pelos dados do WMAP¹, é da ordem de grandeza do tempo de Hubble, que por sua vez é igual ao inverso da constante de expansão, a chamada constante de Hubble. Isso é consistente em termos dimensionais, pois essa constante tem a dimensão de velocidade dividida pela dimensão de distância, ou seja, tem dimensão de inverso do tempo. No Sistema Internacional, a sua unidade é $1/s$ ou s^{-1} . Mais recentemente, no que diz respeito

à idade do universo, a Colaboração Planck estimou-a como sendo de aproximadamente 13,8 bilhões de anos (PLANCK COLLABORATION, 2021).

Em 1917, Albert Einstein (1879-1955) deu início à cosmologia moderna postulando um modelo de universo estático consistente com a sua Teoria da Relatividade Geral que tinha sido proposta em um trabalho publicado pouco antes, no final de 1915. Em 1931, Einstein se retratou de sua proposta inicial em favor de um modelo de universo dinâmico, de acordo com as novas evidências experimentais acerca da expansão do universo, encontradas por Hubble no final da década de 1920 (NUSSBAUMER, 2014).

O físico George Gamow (1904-1968), um dos proponentes da teoria do Big Bang, considerou em um trabalho publicado em 1948, intitulado “A origem dos Elementos Químicos” (“*The Origin of Chemical Elements*”), que o processo de produção dos elementos químicos deveria ter começado em um tempo inicial t_0 (ALPHER; BETHE; GAMOW, 1948). A partir de então, a Teoria do Big Bang foi ganhando robustez e colecionando evidências experimentais a seu favor, como a descoberta da radiação cósmica de fundo de micro-ondas em 1965, por Arno Penzias (1933-) e Robert Woodrow Wilson (1936-). Em particular, o modelo explicativo proposto por Alpher, Bethe e Gamow adquiriu força, também, porque foi capaz de prever a abundância de elementos leves no Universo (Hidrogênio e Hélio), bem como a razão entre a matéria bariônica e a radiação cósmica de fundo de micro-ondas.

Uma descoberta inesperada, entretanto, aconteceu em 1998. Até então, acreditava-se que a expansão do universo estivesse se desacelerando com o tempo, devido à força gravitacional da matéria presente nos corpos celestes, que pelo fato de ser atrativa, teria como efeito frear a expansão do universo; porém medições cosmológicas das supernovas do tipo Ia mostraram que, na verdade, paradoxalmente, a expansão do universo está acontecendo aceleradamente (JESUS, 2010). Essa descoberta causou um grande alvoroço nos meios científicos, porque para que o universo esteja se expandindo aceleradamente é necessário que exista uma “energia escura”, cuja origem é desconhecida até o presente momento, e que seria “repulsiva”, ao contrário da interação gravitacional que é atrativa. Em números aproximados, o Universo consiste em 4,6% de matéria bariônica, 23,3% de matéria escura e 72,1% de energia escura. A energia escura é o nome dado, portanto, para o agente responsável pela atual expansão acelerada do universo (SOARES, 2009). Em certo sentido, a **energia escura** (assim como, também, a matéria escura) é o nome que damos para uma parte da nossa ignorância. É possível deduzir algumas características da energia escura, mas não sabemos o que ela é de fato.

Os dados indicam que a expansão do universo não foi constante ao longo do tempo e que essa expansão começou a se acelerar mais recentemente (ROOS, 2008), há cerca de 5 bilhões de anos (RIESS; TURNER, 2008).

A energia escura é estudada investigando seu efeito na expansão do universo, especificamente sondando a relação entre a distância da fonte de luminosidade e o desvio para o vermelho (*redshift*) de “velas padrão”, como as supernovas do tipo Ia (SATHYAPRAKASH *et al.*, 2019). Desse modo, uma pergunta importante para as pesquisas futuras é se a energia escura seria apenas uma forma de constante cosmológica – o modelo mais simples para a energia escura (RAJVANSHI;

CHAKRABORTY; BAGLA, 2019) – ou se ela teria características diferenciadas e, portanto, “flutuaria” pelo espaço-tempo (BERNARDI, 2020).

Foram os dados obtidos por duas equipes de cientistas, no final dos anos 1990, que provocaram a necessidade de uma mudança no modelo cosmológico padrão que até então supunha um universo em expansão desacelerada (LIMA; SANTOS, 2018). Os dados de observações espectrais e fotométricas de dez supernovas do tipo IA, analisados pela equipe liderada pelo astrofísico Adam Guy Riess (1969-), no final da década de 1990, se mostraram consistentes com um universo com constante cosmológica positiva e em expansão acelerada (RIESS *et al.*, 1998).

Paralelamente, a partir da análise de 42 supernovas do tipo IA, descobertas pelo “*Supernova Cosmology Project*”, os dados obtidos pela equipe do astrofísico Saul Perlmutter (1959-) também indicaram que a constante cosmológica deveria ter um valor não nulo positivo com confiança de 99%, o que implica em um universo cuja expansão está se acelerando (PERMUTTER *et al.*, 1999). O Prêmio Nobel de Física de 2011 foi concedido para Saul Perlmutter, Adam Riess e Brian Schmidt, por causa de seus trabalhos pioneiros em energia escura (BANKS, 2011).

O limite de Schenberg-Chandrasekhar que vale cerca de 1,4 massas solares e que varia ligeiramente de acordo com a metalicidade estelar, é a massa máxima para estrelas anãs brancas sem que ocorra o seu colapso devido à atração gravitacional (EVANGELISTA, 2019). Estrelas com massas situadas um pouco além desse limite, quando explodem, convertem sempre aproximadamente a mesma quantidade de massa em energia (são as chamadas supernovas do tipo IA ou SNE IA) e servem como padrão universal para medir distâncias.

A explosão ocorre quando a atração gravitacional (devido à matéria que vai sendo acrescida à estrela) se torna maior que a pressão de degenerescência dos elétrons, o que rompe o equilíbrio entre estas duas forças antagônicas, algo que é calculado usando a relatividade geral no caso da pressão gravitacional no sentido interno e a mecânica quântica no caso da pressão dos elétrons no sentido externo. O que se observa, usando-se essas “velas padrões”, é que existe uma proporcionalidade entre a velocidade de afastamento das galáxias e a distância (HORVATH, 2020).

A energia escura é uma espécie de antigravidade que está associada à aceleração da expansão do universo e que parece ser o componente dominante do universo físico, mas não existe ainda uma explicação teórica consistente acerca da sua natureza. Energia escura e matéria escura são dois fenômenos que indicam que podem estar incompletos o Modelo Padrão das partículas elementares (WOITHE; KERSTING, 2020) e/ou a Teoria da Relatividade Geral que versa sobre a gravidade (SPERGEL, 2015). Talvez uma revolução em nossa compreensão dos fundamentos física será necessária para a resolução destes dois problemas.

A natureza da energia escura está entre os mais atraentes de todos os problemas pendentes em ciências físicas (Albrecht *et al.* 2006). Essas circunstâncias exigem um programa de observação ambicioso para determinar as propriedades da energia escura da melhor forma possível. Com isto em mente, o projeto “*Dark Energy Task Force – DETF*”² foi criado em 2005 para determinar a natureza da Energia Escura. O “*Dark Energy Survey – DES*”³, por sua vez, é um esforço colaborativo internacional para mapear centenas de milhões de galáxias, detectar milhares de supernovas e encontrar padrões de estrutura cósmica que

possam revelar a natureza da energia escura que está acelerando a expansão de nosso Universo, bem como para fornecer dados e informações sobre energia escura por meio de seu *website*. Uma questão importante a ser enfrentada pelos astrofísicos nas pesquisas que se realizarão no futuro envolverá saber se o agente que acelera o universo é a constante cosmológica ou algum outro tipo de campo (LIMA; SANTOS, 2019).

SETOR ESCURO E HISTÓRIA DA CIÊNCIA

O setor escuro do universo é constituído pela matéria escura, cujas primeiras indicações de existência remontam à década de 1930, e pela energia escura, cujas primeiras indicações de existência ocorreram na década de 1990 (SODRÉ JR., 2010). O setor escuro afeta o setor visível apenas por meio dos potenciais gravitacionais que produzem (MOTTA, 2013). Quase toda a informação de fora da nossa galáxia a qual temos acesso direto nos é transmitida pela radiação eletromagnética, mas a maior parte do conteúdo do universo (setor escuro) não interage por esse meio (OLIVEIRA, 2010).

O paradigma da cosmologia atual propõe que o universo tenha curvatura espacial nula e seja dominado por energia escura e matéria escura fria. O chamado modelo cosmológico padrão atual explica diversos fenômenos com uma precisão considerável, tais como a abundância dos elementos leves, a radiação cósmica de fundo e a distribuição das galáxias no espaço (SODRÉ JR., 2010), mas permanecem os mistérios acerca da matéria escura e da energia escura. Quanto ao setor escuro, em certo sentido, a energia escura é um mistério ainda maior que a matéria escura (SODRÉ JR., 2010): existe a expectativa da detecção de partículas de matéria escura fria – para um ajuste com os dados experimentais, provavelmente a maior parte da matéria escura terá que ser não relativística e, portanto, deverá mover-se com velocidades muito inferiores à da luz (FRÓES, 2014) – em experimentos em grandes aceleradores, como o LHC, ou em minas profundas ou até mesmo por observações feitas no espaço, mas a energia escura possivelmente será muito mais difícil de ser detectada e estudada. Como não se sabe a verdadeira natureza da matéria escura ou da energia escura, não se deve, *a priori*, excluir a possibilidade inclusive de que exista algum tipo de acoplamento entre elas, ou seja, de que os componentes do setor escuro interajam entre si, algo importante para ser investigado no futuro (BOLOTIN *et al.*, 2013; BERNARDI, 2020).

No que tange à energia escura, o seu modelo mais aceito atualmente é o de uma constante cosmológica, mas é preciso que se desenvolva uma física mais fundamental sobre o que causa essa tal constante, de modo a explicar o seu único efeito passível de análise que é o gravitacional. Há, portanto, um problema de ausência de modelos para a energia escura (que eventualmente poderá ser superado no futuro), algo que não ocorre com a matéria escura, para a qual já existem vários modelos propostos.

Os dilemas enfrentados pela astrofísica atual, com a existência da matéria escura e da energia escura, podem ser compreendidos de modo mais amplo pela análise da evolução histórica de alguns conceitos científicos no passado. O estudo da história da ciência apresenta um potencial didático muito grande para o ensino de ciências, pois permite compreender que a construção do conhecimento

científico é um processo coletivo e não linear, repleto de idas e vindas, de zigzagues, de contradições e descobertas inesperadas.

Uma versão caricata da história da ciência deve ser evitada, pois o reducionismo não colabora com a reflexão e a aprendizagem efetiva de conceitos científicos. A afirmação comum, por exemplo, de que Newton “descobriu” a teoria da Gravitação Universal no momento que viu uma maçã caindo de uma árvore está, na verdade, prestando um tipo de desserviço à ciência (MARTINS, 2006): por ser simplista e mistificadora, ela obscurece a realidade por trás do processo de construção histórica do conhecimento científico. Novas ideias são produzidas coletivamente a partir da análise atenta a respeito das concepções anteriores, de modo a permitir concluir o que está errado no “quebra-cabeça” da ciência, colaborando com o acúmulo de conhecimento coletivo e, em alguns casos, produzindo mudanças de paradigmas na forma de revoluções científicas (KUHN, 2017).

No caso do problema relativo à matéria escura, existem propostas alternativas que tentam explicar as observações sob uma outra perspectiva, pela ideia de que o problema deva ser resolvido não pela postulação da existência de algum tipo de matéria escura, mas sim pela suposição de que a teoria gravitacional utilizada está errada nas escalas observadas nos levando equivocadamente a acreditar que a matéria escura exista: sob esta perspectiva, para tentar superar os problemas, são propostas, por exemplo, teorias modificadas da gravitação (VELTEN, 2021).

A Dinâmica Newtoniana Modificada (MOND, da sigla em inglês para “*Modified Newtonian Dynamics*”), elaborada no início dos anos 1980, pelo físico israelense Mordehai Milgrom (1946-), é uma hipótese que propõe, em algumas situações específicas, uma mudança nas leis de Newton para explicar discrepâncias como as encontradas nas curvas de rotação de galáxias espirais (VELTEN, 2008). Segundo MOND, para acelerações muito baixas (muito menores que 10^{-10} m/s^2), a Segunda Lei de Newton seria alterada e a força passaria a ser proporcional à aceleração ao quadrado, ou seja, a relação entre força e aceleração não seria mais linear (MILGROM, 1983). De acordo com MOND, essa violação da mecânica newtoniana ocorreria somente para acelerações extremamente pequenas, características, por exemplo, dos movimentos de estrelas em galáxias, mas muito abaixo de qualquer coisa normalmente encontrada no âmbito do Sistema Solar ou na Terra.

A mecânica newtoniana pode ser modificada de outras formas, como, por exemplo, supondo que a constante gravitacional seja uma função da distância ou, alternadamente, supondo que a razão entre massa gravitacional e massa inercial seja uma função da distância. A dependência da distância, em cada caso, pode ser ajustada para ser relevante nas escalas adequadas (SABAT; BANI-ABDOH; MOUSA, 2020). A MOND e propostas de teorias similares de gravidade modificada são alternativas à hipótese de que a dinâmica das galáxias é determinada por halos de matéria escura (HERNÁNDEZ-ARBOLEDA; RODRIGUES, 2021).

Da mesma forma como ocorre para a matéria escura, para explicar a aceleração cósmica, os astrofísicos se deparam com duas possibilidades: ou cerca de 70% do universo existe em uma forma exótica, chamada de energia escura, que exhibe uma força gravitacional repulsiva oposta à gravidade atrativa da matéria comum, ou a Relatividade Geral deve ser substituída por uma nova teoria da gravidade em escalas cósmicas. Quer-se dizer, ou faltam dados experimentais, ou

a teoria está incompleta e deverá ser ampliada e corrigida no futuro, da mesma forma como fez a relatividade de Einstein em relação à mecânica newtoniana.

PARALELOS HISTÓRICOS

Em 1781, o astrônomo William Herschel (1738-1822) descobriu Urano, o primeiro planeta a ser encontrado pelo uso de telescópio, ao contrário de Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno que já eram conhecidos e caracterizados como planetas desde a antiguidade. Entretanto, os cientistas notaram que os cálculos matemáticos feitos utilizando a mecânica clássica não conseguiam reproduzir a órbita de Urano de forma exata. Em 1845, o francês Urbain Le Verrier (1811-1877) – e, em paralelo, o inglês John C. Adams (1819-1892) – sugeriram a existência de um novo planeta, Netuno, cujo campo gravitacional seria o responsável pelos desvios da órbita de Urano. No ano seguinte, em 1846, Netuno – o oitavo planeta do Sistema Solar – foi observado pelos astrônomos Johann G. Galle (1812-1910) e Heinrich Louis d'Arrest (1822-1875). O fato de que a descoberta de Netuno foi prevista matematicamente é considerado uma realização importante da mecânica newtoniana (MILONE *et al.*, 2010). Nas palavras do diretor do Observatório de Paris na época, François Arago (1786-1853), Le Verrier descobriu Urano “com a ponta da caneta”, ou seja, a partir de cálculos matemáticos que indicaram a sua posição no céu noturno, para onde foram apontados os telescópios que o avistaram.

Le Verrier enfrentou também um outro problema astronômico, dessa vez relacionado à órbita do planeta mais próximo do Sol, Mercúrio, e não dos planetas mais distantes do Sol, como foram os casos de Urano e Netuno. Como ocorrera com Urano, existia uma anomalia na órbita planetária de Mercúrio. Isto levou Le Verrier a propor a mesma solução para esse problema que aquela que tinha dado para o problema da discrepância da órbita de Urano: ele então conjecturou que deveria existir um outro planeta que ele denominou “Vulcano”, cujo campo gravitacional afetaria a órbita de Mercúrio (LE VERRIER, 1859). Le Verrier por muitos anos tentou encontrar a posição deste hipotético planeta (que seria um planeta “intra-mercuriano”, pois teria um raio orbital menor que o de Mercúrio), sem nunca ter sucesso nesta empreitada, pois nunca foi encontrado algum planeta mais próximo do Sol que Mercúrio.

O periélio (ponto da órbita situado mais próximo do Sol) de Mercúrio avança um pouco a cada órbita, num fenômeno chamado precessão do periélio, algo que era conhecido há muito tempo. O problema estava no fato que a discrepância entre o valor estimado pela mecânica clássica (considerando a atração gravitacional do Sol e as perturbações dos planetas conhecidos até então) e o valor observado era de 43 segundos de arco por século (LE VERRIER, 1859).

O problema na discrepância da órbita de Mercúrio só foi solucionado satisfatoriamente ao se questionar os fundamentos teóricos utilizados. Foi isso que fez Einstein quando em 1915, propôs a sua Teoria da Relatividade Geral, uma teoria geométrica da gravidade que passou a ser explicada pelo encurvamento do espaço-tempo quadridimensional e que, em certas situações, como nas proximidades de grandes concentrações de matéria (que é o que ocorre com a órbita de Mercúrio devido à sua proximidade em relação ao Sol), provocava resultados diferentes daqueles que eram obtidos com a Teoria da Gravitação

Universal de Newton. A dedução matemática da órbita de Mercúrio no artigo “*Explanation of the Perihelion Motion of Mercury from General Relativity Theory*” (“Explanação do Periélio do Movimento de Mercúrio a partir da Teoria da Relatividade Geral) por Einstein em 1915, de modo consistente com os dados experimentais, é considerada uma das primeiras evidências experimentais da Teoria da Relatividade Geral (EINSTEIN, 1915).

Quando há alguma discrepância na física entre valores observados experimentalmente e valores previstos teoricamente há sempre duas possibilidades: ou se pensa que há algo ainda não observado experimentalmente, afetando os resultados, ou se questiona os fundamentos teóricos das leis físicas existentes (GEWANDSZNAJDER; ALVES–MAZZOTTI, 1998). Desse modo, o problema atual sobre a natureza da matéria escura pode ser analisado a partir dos dilemas enfrentados no século XIX pelos astrônomos ao se depararem com as discrepâncias existentes nas órbitas de Urano e de Mercúrio: ou a teoria está correta, mas são necessários mais dados e informações (como no caso de Urano) ou é a teoria que tem que ser reformulada e o problema não está na ausência de dados e informações (como no caso de Mercúrio). Situações históricas distintas defrontando diferentes problemas acabaram encontrando maneiras divergentes de resolvê-los. Isto mostra que o uso de paralelos históricos no ensino também tem os seus limites.

Alguns problemas enfrentados pela comunidade científica ao longo da história, permitem ter uma noção mais ampla dos desafios existentes para os cientistas quando surgem conflitos entre previsões teóricas e dados experimentais. Vamos analisar a seguir brevemente três casos relacionados a desafios como estes: os epiciclos, o calórico e o éter.

O mistério da chamada “dança” dos planetas, inclusive com planetas em alguns momentos apresentando movimentos retrógrados em relação ao movimento das estrelas fixas, pode ser abordado como um paralelo histórico para a problematização acerca das possibilidades existentes para enfrentar o atual problema da matéria escura. Uma tentativa de solução para este problema foi feita pelo artifício chamado epiciclo (GUEDES, 2011). Essa solução já havia sido pensada previamente por Apolônio, mas foi Ptolomeu, na antiguidade, que a implementou e trabalhou com a parte matemática ligada a este problema. Posteriormente, com os trabalhos de Copérnico, Kepler, Galileu e outros, se percebeu que a solução para resolver este problema estava, na verdade, em alterar radicalmente dois pressupostos teóricos que eram assumidos antes como fundamentalmente verdadeiros: 1. era necessário colocar o Sol, no lugar da Terra, na posição central em torno do qual orbitavam os planetas; 2. era necessário abandonar a exigência de que os movimentos orbitais dos planetas fossem necessariamente circulares e adotar a hipótese de que as órbitas fossem elípticas.

No final do século XVIII, com a revolução industrial ocorrendo a “pleno vapor” na Inglaterra, uma questão que desafiava os cientistas na época era sobre a natureza do calor. Os químicos Joseph Black (1728-1799) e Antoine Lavoisier (1743-1794) e a divulgadora da ciência Janet Marcet (1769-1858) defenderam a ideia de que o calor era uma substância material, um fluido imponderável, cuja ausência produziria a sensação de frio entre os seres vivos (PULIDO; SILVA, 2011). Entretanto, os experimentos realizados pelo conde Rumford ou Benjamin Thompson (1753-1814) e por Humphry Davy (1778-1829), nos últimos anos do

século XVIII, evidenciaram que o calor não tinha existência material e que poderia ser indefinidamente criado por atrito, indicando, portanto, uma relação entre calor (energia térmica) e energia cinética. Segundo afirmou o próprio Conde Rumford em 1798: “aquilo que um corpo isolado ou um sistema de corpos pode continuar a fornecer sem limitação não pode ser uma substância material” (SOUSA E BRITO, 2008).

As “Equações de Maxwell” apresentadas por James Clerck Maxwell (1831-1879) em 1873 no “*Treatise on Electricity and Magnetism*” (“Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo”), sintetizaram os conhecimentos sobre o eletromagnetismo. A luz, de acordo com esta obra, era uma onda eletromagnética. Mas para os físicos do século XIX, que tinham a mecânica clássica como paradigma fundamental da física, uma onda necessitava de um meio físico para ondular ou oscilar. Por isso foi postulada a existência do éter luminífero, um meio que para ser adequado para a propagação de fenômenos eletromagnéticos deveria ter algumas propriedades bastante exóticas: ele deveria ser infinitamente rígido e infinitamente elástico, algo bem diferente de tudo o que existia até então (SOUSA E BRITO, 2008). O experimento realizado em 1887 por Albert Abraham Michelson (1852-1931) e Edward Williams Morley (1838-1923) tentou medir a velocidade da Terra em relação a este hipotético éter, pela mensuração da velocidade da luz medida em direções perpendiculares ao suposto “vento de éter” criado pelo movimento da Terra. Mesmo com as medições tendo sido realizadas com um grande grau de precisão, não foi possível comprovar a existência deste vento de éter: não haveria qualquer indício de que a Terra se movesse em relação a um éter imóvel, que se existisse seria uma espécie de referencial absoluto para a física. Este problema só foi resolvido plenamente com a postulação da Teoria da Relatividade Especial por Albert Einstein em 1905 que tem como um de seus postulados o princípio segundo o qual a velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais inerciais (TIPLER; LLEWELLYN, 2014).

A análise dos três exemplos anteriores, acerca dos epiciclos, do calórico e do éter luminífero, é útil para ponderar e refletir sobre as formas como a astrofísica poderá evoluir nas próximas décadas para tentar criar explicações robustas sobre a natureza da matéria escura e da energia escura. Estes são três exemplos de modelos que se mostraram insuficientes e foram superados, com o tempo, por explicações melhores. Obviamente há diversos outros modelos que se mostram valiosos, até hoje, no modo como explicam os fenômenos em questão, como é o caso da nucleossíntese primordial, que formou os elementos mais leves logo após o Big Bang, bem como da nucleossíntese estelar, que explica como são formados, no coração das estrelas, por fusão nuclear, diversos outros elementos da tabela periódica.

É importante também refletir que quando há uma inconsistência entre previsões teóricas e dados experimentais, provavelmente o caminho menos custoso para a maioria dos cientistas seja “apostar” na incompletude do conjunto de dados experimentais, visto que a estruturação de um novo edifício teórico ou mesmo a elaboração de uma correção acerca da teoria científica em vigor são propostas que implicam em mudanças de paradigmas, algo que não é fácil de ser executado, pelo fato de, em certo sentido, desafiar o *status quo* estabelecido na ciência em uma determinada época: os casos de Galileu e de Darwin são propícios para ilustrar, no limite, esta questão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo investigou os conhecimentos existentes neste início da terceira década do século XXI acerca da matéria escura e da energia escura. Procurou-se também analisar o processo histórico que redundou na produção dos conhecimentos atuais sobre o denominado setor escuro do universo. O uso de temas relacionados à astronomia – e, também, à astrofísica e à cosmologia – na divulgação científica se apresenta como uma possibilidade enriquecedora para os participantes devido ao seu caráter interdisciplinar e à sua capacidade de impulsionar o desenvolvimento de tecnologias, de despertar habilidades como a observação, de incentivar o senso crítico e de sensibilizar sobre questões cósmicas, possibilitando contextualizar a existência humana no contexto do universo em que vivemos (CARNEIRO; LONGHINI, 2015). Além disso, verifica-se que temas relacionados à astronomia, astrofísica e cosmologia são considerados muito interessantes por alunos em idade escolar (FRÓES, 2014), interesse esse que pode ser aprofundado e aperfeiçoado por atividades de divulgação científica.

Pode também ser de grande valor didático, em atividades de educação e divulgação científica, incentivar reflexões acerca de episódios da história da ciência que permitam “atacar” questões desafiadoras da ciência atual em busca de soluções, traçando paralelos históricos e elaborando conjecturas que tenham poder explicativo sobre dilemas enfrentados por cientistas nos dias de hoje, como, por exemplo, a respeito da natureza da matéria escura e da energia escura, dois dos principais problemas situados na fronteira da física contemporânea. A facilidade de acesso, pela internet, aos artigos originais escritos por cientistas em alguns momentos decisivos da história da ciência, é também uma ferramenta com um grande poder educacional, pois permite que os alunos em certo sentido “bebam água na fonte” e se defrontem com os problemas reais vivenciados pelos cientistas, ao invés de interagirem com as versões “reconstruídas” racionalmente, desde então, sobre estes momentos históricos, sob o pretexto de tornar mais fácil a compreensão ou de tornar mais lógico o processo de construção de conhecimento.

Pesquisar sobre a física do desconhecido em certo sentido é algo bem mais desafiador que estudar a física daquilo que já é conhecido e explicado de modo consensual: assim, o estudo acerca de temas contemporâneos da ciência consegue de fato estimular o interesse de muitos jovens pela ciência. Neste sentido, pode ocorrer um expressivo ganho com o trabalho didático sobre matéria escura e de energia escura em atividades educacionais em sala de aula ou em atividades de extensão de divulgação científica.

Dark matter, dark energy and history of science in science education

ABSTRACT

This article aims to investigate the historical evolution of the concepts of dark matter and dark energy, and the knowledge about these two phenomena, in order to subsidize scientific education and dissemination activities. The theoretical basis for this work was based on a bibliographic review that allowed the analysis of theses, dissertations, articles and academic works both in the area of astrophysics and in the area of science teaching. The bibliographic analysis carried out also involved original papers written by scientists such as U. Le Verrier, A. Einstein, F. Zwicky, G. Gamow, V. Rubin, S. Perlmutter and A. Riess that are available and open to be read on the internet. In particular, the standard cosmological model was investigated, as well as existing observations and experimental data. To put the contemporary challenges about the nature of dark matter and dark energy in perspective, some historical examples of dilemmas faced in the past by the scientific community about the orbits of the planets Uranus and Mercury and about the existence of epicycles, caloric and luminiferous ether.

KEYWORDS: Astrophysics. History of Physics. Dark Sector.

NOTAS

1. https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr3/parameters_summary.cfm
2. <https://www.nsf.gov/mps/ast/aaac/detf.jsp>
3. <https://www.darkenergysurvey.org/>

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFSP pelo financiamento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, A *et al.* **Report of the Dark Energy Task Force**. ArXiv, 2006. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0609/0609591.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2021.

ALPHER, R. A.; NETHE, H.; GAMOW, G. The Origin of Chemical Elements. **Physical Review**, v. 73, n. 7, p. 803-804, 1948. Disponível em: <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.73.803>. Acesso em: 12 fev. 2021.

ANISIU, M. Vera Rubin and the hypothesis of dark matter existence. **Didactica Mathematica**, v. 36, p. 13-23, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333131297_Vera_Rubin_and_the_hypothesis_of_dark_matter_existence. Acesso em: 22 jan. 2021.

BANKS, M. Dark-energy pioneers scoop Nobel prize. **Physics World**, 4 oct. 2011. Disponível em: <http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/oct/04/dark-energy-pioneers-scoop-nobel-prize>. Acesso em: 20 jan. 2021.

BERNARDI, F. F. **Modelos de energia escura acoplada à matéria escura**. São Paulo: Doutorado (USP), 2020. Disponível em: <https://s3.cern.ch/inspire-prod-files-c/c3988359b3eb3612263b8c297435db2e>. Acesso em: 12 fev. 2021.

BERTONE, G.; HOOPER, D. **A History of Dark Matter**. ArXiv, 2016. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1605.04909.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2021.

BOLOTIN, Y. L. *et al.* **A Thousand Problems in Cosmology: Interaction in the Dark Sector**. ArXiv, 2013. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1312.6556.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

CARNEIRO, D. L. C. M.; LONGHINI, M. D. Divulgação científica: as representações sociais de pesquisadores brasileiros que atuam no campo da astronomia. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 20, p7-35, 2015. Disponível em: <https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/204/307>. Acesso em: 21 fev. 2021.

CHITI, A. *et al.* **An extended halo around an ancient dwarf galaxy.** ArXiv, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2012/2012.02309.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2021.

CHO, A. Is dark matter made of black holes? **Science Magazine**, Feb. 9, 2017. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/news/2017/02/dark-matter-made-black-holes>. Acesso em: 27 jan. 2021.

EINSTEIN, A. Explanation of the Perihelion Motion of Mercury from General Relativity Theory (translation to English from the original paper published in German). **Prussian Academy of Sciences**, Berlin, 18 November 1915. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228923053_Einstein's_PaperExplanation_of_the_Perihelion_Motion_of_Mercury_from_General_Relativity_Theory. Acesso em: 10 fev. 2021.

EVANGELISTA, E. de F. D. Dedução do limite de Chandrasekhar: uma abordagem didática dos trabalhos originais do autor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 2, e20180167, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0167>. Acesso em: 31 jan. 2021.

FERRERAS, I. **Fundamentals of Galaxy Dynamics, Formation and Evolution.** London, UK: UCL Press, 2019.

FRÓES, A. L. D. 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/pdf/rbef/v36n3/16.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021.

GARCÍA-BELLIDO, J. Massive Primordial Black Holes as Dark Matter and their detection with Gravitational Waves. **Journal of Physics**, Conference Series, v. 840, 012032, 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/840/1/012032/pdf>. Acesso em: 28 jan. 2021.

GEWANDSZNAJDER, F.; ALVES–MAZZOTTI, A. J. **O método nas ciências naturais e sociais.** São Paulo: Pioneira, 1998.

GUEDES, L. L. S. **Epíclis de Ptolomeu e Matéria Escura.** 2011. Disponível em: <http://astronomia.blog.br/epiciclos-de-ptolomeu-e-materia-escura/>. Acesso em: 10 fev. 2021.

GUSMÃO, T. de C.; VALENTE, J. de A.; DUARTE, S. B. A matéria escura no universo - uma sequência didática para o ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 4, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0088>. Acesso em: 25 jan. 2021.

HERNÁNDEZ-ARBOLEDA, A.; RODRIGUES, D. C. Rotação de galáxias e matéria escura. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 6-33, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrologia/article/view/33939>. Acesso em: 10 fev. 2021.

HORVATH, J. E. *et al.* **Cosmologia Física**: Do micro ao macro cosmos e vice-versa. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2007.

HORVATH, J. E. Alguns conceitos no ensino da Cosmologia que quase sempre levam a confusão. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0130>. Acesso em: 21 dez. 2021.

JESUS, J. F. **Energia Escura e Aceleração do Universo**: Aspectos Conceituais e Testes Observacionais. São Paulo: Tese de Doutorado – IAG-USP, 2010. Disponível em: http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/t_jose_f_jesus_0.pdf. Acesso em: 20 jan. 2021.

KUHN, T. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 2017.

LANDIM, R. C. G. **Cosmologia do setor escuro**. São Paulo: Mestrado (IF-USP), 2017. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-02032017-212255/publico/main.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021.

LE VERRIER, U. Théorie du mouvement de Mercure. **Annales de l'Observatoire Imperial de Paris**, Recherches Astronomiques, tome 5, chapitre 15, 1859. Disponível em: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1859AnPar...5....1L>. Acesso em: 12 fev. 2021.

LIMA, J. A. S.; SANTOS, R. C. 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 fev. 2021.

LIMA, J. A. S.; SANTOS, R. C. Do Eclipse Solar de 1919 ao Espetáculo das Lentes Gravitacionais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, supl. 1, e20190199, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2019-0199>. Acesso em: 21 jan. 2021.

LUIZ, V. V. F. **Matéria escura e o modelo do dubleto inerte**. São Paulo: Dissertação de Mestrado – IFT/UNESP, 2017. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154264/luiz_vvf_me_ift.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 31 jan. 2021

MARTINS, R. de A. **A maçã de Newton**: história, lendas e tolices. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MILGROM, M. A modification of the newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. **The Astrophysical Journal**, v. 270, p. 365-370, 1983. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/pdf/1983ApJ...270..365M7>. Acesso em: 13 fev. 2021.

MILONE, A. de C. *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 fev. 2021.

MOTTA, M. K. F. **O universo escuro: observáveis e degenerescências**. Campinas, SP: Doutorado (UNICAMP), 2013. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/278597>. Acesso em: 12 fev. 2021.

NUSSBAUMER, H. **Einstein's conversion from his static to an expanding universe**. ArXiv, 2014. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1311.2763>. Acesso em: 29 jan. 2021.

OLIVEIRA, F. A. **Reduzindo o setor escuro do Universo: uma nova cosmologia acelerada com criação de matéria escura fria**. São Paulo: Mestrado IAG-USP, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14131/tde-13072010-160841/publico/DissertacaoVF.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2021.

PANEK, R. **De que é feito o universo?** Rio de Janeiro: Zahar, 2014.

PEEBLES, P. J. E. Growth of the nonbaryonic dark matter theory. **Nature Astronomy**, v. 1, 0057, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41550-017-0057>. Acesso em: 21 dez. 2021.

PERLMUTTER, S. *et al.* Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. **Astrophysical Journal**, v. 517, p. 565-586, 1999. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/307221/pdf>. Acesso em: 28 jan. 2021.

PLANCK COLLABORATION. **Planck 2018 results**. VI. Cosmological parameters. ArXiv, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1807.06209.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2021.

PULIDO, M. D.; SILVA, A. N. Do calórico ao calor: uma proposta de ensino de química na perspectiva histórica. **História da Ciência e Ensino – Construindo Interfaces**, PUC-SP, v. 3, p. 52-77, 2011. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/hcensino/article/view/5628/4342>. Acesso em: 10 fev. 2021.

RAJVANSHI, M. P.; CHAKRABORTY, T.; BAGLA, J. S. **Gravitational collapse and structure formation in an expanding universe with dark energy**. ArXiv, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1803.04267.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2021.

RIESS, A. G. *et al.* Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. **The Astronomical Journal**, v. 116, p. 1009-1038, 1998. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/300499/pdf>. Acesso em: 26 jan. 2021.

RIESS, A. G.; TURNER, M. S. The Expanding Universe: From Slowdown to Speed Up. **Scientific American**, 2008. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/expanding-universe-slows-then-speeds/>. Acesso em: 14 fev. 2021.

ROOS, M. **Expansion of the Universe: Standard Big Bang Model**. ArXiv, 2008. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/0802.2005>. Acesso em: 14 fev. 2021.

RUBIN, V. C. Differential rotation of the inner metagalaxy. **The Astronomical Journal**, v. 56, n. 1190, p. 47-48, 1951. Disponível em: <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/seri/AJ.../0056//0000047.000.html>. Acesso em: 29 mar. 2021.

RUBIN, V. C. Fluctuations in the space distribution of the galaxies. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 40, n. 7, p. 541-549, 1954. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC527992/>. Acesso em: 22 jan. 2021.

RUBIN, V. C.; FORD JR., W. K. Rotation of the Andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions. **The Astrophysical Journal**, v. 159, p. 379-403, 1970. Disponível em: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1970ApJ...159..379R>. Acesso em: 21 jan. 2021.

RUBIN, V. C.; FORD JR., W. K.; THONNARD, N. Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV-Systematic dynamical properties, SA through SC. **The Astrophysical Journal**, v. 225, L, p. 107–111, 1978. Disponível em: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1978ApJ...225L.107R>. Acesso em: 21 jan. 2021.

RUBIN, V. C. Seeing dark matter in the Andromeda galaxy. **Physics Today**, v. 59, n. 12, p. 8-9, 2006. Disponível em: <http://www.ifsc.usp.br/~hoyos/courses/2016/FCM0102/Vera-Rubin-Dark-Matter.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2021.

RUBIN, V. C. An interesting voyage. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 49, p. 1-28, 2011. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-astro-081710-102545>. Acesso em: 23 jan. 2021.

SABAT, H. A.; BANI-ABDOH, R. Z.; MOUSA, M. S. **A Suggested Alternative to Dark Matter in Galaxies: I. Theoretical Considerations**. ArXiv, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2008/2008.01819.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021.

SÁNCHEZ–VEGA, B. L. Matéria escura axiônica. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 66-78, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrofisica/article/view/33930>. Acesso em: 10 fev. 2021.

SATHYAPRAKASH, B. S. *et al.* **Cosmology and the Early Universe**. ArXiv, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1903.09260.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021.

SESSIONS, L. **The Coma Cluster of galaxies**. April 19, 2019. Disponível em: <https://earthsky.org/clusters-nebulae-galaxies/the-coma-berenices-galaxy-cluster>. Acesso em: 27 jan. 2021.

SILVA NETO, G. P. da. Estimando parâmetros cosmológicos a partir de dados observacionais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 2, e2318, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v40n2/1806-1117-rbef-40-02-e2318.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

SMITH, S. The Mass of the Virgo Cluster. **The Astrophysical Journal**, v. 83, p. 23-30, 1936. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/pdf/1936ApJ....83...23S>. Acesso em: 11 fev. 2021.

SOARES, D. C. de L. **A idade do universo, a constante de Hubble e a expansão acelerada**. 2009. Disponível em: <http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ageunv/idadeunv.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2021.

SODRÉ JR., L. O lado escuro do Universo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 2. 27, n. especial, p. 743-769, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2010v27nespp743>. Acesso em 10 fev. 2021.

SOUSA E BRITO, A. A. de. “Flogisto”, “Calórico” & “Éter”. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 20, n. 3/4, p. 51-63, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.mec.pt/pdf/ctm/v20n3-4/v20n3-4a08.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

SPERGEL, D. N. The dark side of cosmology: Dark matter and dark energy. **Science**, v. 347, n. 6226, p. 1100-1102, 2015. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/347/6226/1100.full>. Acesso em: 12 fev. 2021.

STEINER, J. E. A origem do Universo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 20, n. 58, set./dez. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142006000300022>. Acesso em: 31 jan. 2021.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

VELTEN, H. E. S. MOND: uma alternativa à mecânica newtoniana. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 3, 3314, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000300014>. Acesso em: 13 fev. 2021.

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

VIKHLININ, A. *et al.* **Zooming in on the Coma Cluster with Chandra**: compressed warm gas in the brightest cluster galaxies. ArXiv, 2001. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0102483.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2021.

WOITHE, J.; KERSTING, M. **Bend it like dark matter!** ArXiv, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2010/2010.14826.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2021.

ZWICKY, F. The redshift of extragalactic nebulae (translation to English from the original paper published in German). **Helvetica Physica Acta**, v. 6, p. 110-127, 1933. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1711/1711.01693.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2021.

Recebido: 08 abr. 2021

Aprovado: 25 abr. 2022

DOI: 10.3895/actio.v7n2.14046

Como citar:

TEIXEIRA, R. R. P.; SOUZA, D. C. P. de. Matéria escura, energia escura e história da ciência na educação científica. **ACTIO**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 1-22, mai./ago. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/actio>>. Acesso em: XXX

Correspondência:

Ricardo Roberto Plaza Teixeira

Avenida Bahia, 1739, Indaiá, Caraguatatuba, SP, Brasil, CEP: 11665-071

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

