

Além das galáxias brilhantes: a descoberta da matéria escura e o papel de Vera Rubin

Beyond the bright galaxies: the discovery of dark matter and the role of Vera Rubin

Julia Medeiros^{*1}, Gabriela Kaiana Ferreira²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física, Araranguá, SC, Brasil.

²Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Física, Florianópolis, SC, Brasil.

Recebido 17 de agosto de 2024. Revisado em 03 de dezembro de 2024. Aceito em 03 de janeiro de 2025.

Desde a década de 1930 os cientistas enfrentavam dificuldades para calcular a massa de aglomerados de galáxias a partir da luminosidade, pois os efeitos gravitacionais observados não correspondiam à soma das massas visíveis. Esse ponto volta a ser uma questão em debate na comunidade científica em função de uma série de estudos ao longo do último século, incluindo os realizados pela astrônoma Vera Rubin e seus colaboradores, que analisaram a rotação de galáxias e observaram que as curvas de velocidades divergiam das previsões teóricas. Atualmente, a explicação mais aceita é de que existe uma entidade, denominada de matéria escura, capaz de interagir apenas gravitacionalmente, que explica a constância das curvas de rotação das galáxias. E, ainda, existe em uma quantidade significativamente maior que a matéria ordinária. Este artigo apresenta uma discussão histórico-epistemológica sobre o processo de construção do conceito de matéria escura e, associado a isso, evidencia a exemplar contribuição de Vera Rubin para a Ciência. Dentre os resultados da pesquisa, foram identificados diversos elementos para análise e interpretação, sob a perspectiva filosófica de Thomas Kuhn. Como bem indicado pela literatura especializada da educação em ciências, esses apontamentos podem contribuir substancialmente para uma maior compreensão da Natureza da Ciência.

Palavras-chave: Matéria escura, História e Filosofia da Ciência, Natureza da Ciência, Mulheres na Ciência.

Since the 1930s, scientists had faced challenges in calculating the mass of galaxy clusters from their luminosity, since the gravitational effects were not compatible with the sum of the visible masses. This point once again became a matter of debate in the scientific community due to a series of studies over the past century, including those conducted by astronomer Vera Rubin and her collaborators, who analyzed the rotation of galaxies and observed that the velocity curves diverged from theoretical predictions. Currently, the most accepted explanation is that there is an entity, called dark matter, capable of interacting only gravitationally, which explains the constancy of the galaxies' rotation curves. It also exists in significantly greater quantities than ordinary matter. This article presents a historical-epistemological discussion about the process of constructing the concept of dark matter and, associated with this, highlights Vera Rubin's exemplary contribution to Science. Among the results of the research, several elements were identified for analysis and interpretation, from the philosophical perspective of Thomas Kuhn. As is well indicated by the specialized literature on science education, these points can contribute substantially to a greater understanding of the Nature of Science.

Keywords: Dark matter, History and Philosophy of Science, Nature of Science, Women in Science.

1. Introdução

No âmbito da educação científica, por vezes o conteúdo científico é abordado de modo isolado à sua origem, história, lacunas e potencial para avanço em pesquisa. Segundo Neves [1]: “a História da Ciência pode subsidiar não só o ensino em si, mas a pesquisa sobre conceituação espontânea e sobre os próprios rumos das pesquisas científicas”. De maneira consoante, os autores Vital e Guerra [2] expressam que a ênfase histórica no ensino

[...] pode contribuir para humanizar a Ciência, motivar os alunos, promover a reflexão sobre o papel da Ciência na sociedade contemporânea e a discussão sobre o seu processo de construção, facilitando a compreensão dos limites e possibilidades do conhecimento científico.

Na apresentação da prática científica como atividade humana, vale destacar a necessidade de que seja fomentado o sentimento de pertencimento e identificação ao grupo de pessoas capazes de efetuar contribuições para o conhecimento científico [3]. Quando constatado o potencial de humanização das abordagens históricas,

*Endereço de correspondência: julia.medeiros@posgrad.ufsc.br

distanciando-se das idealizações da Ciência, têm-se a oportunidade de revelar as questões problemáticas existentes no ambiente científico, como o preconceito por gênero [4]. De acordo com a historiadora da Ciência Londa Schiebinger [5] tradicionalmente a historiografia negligencia o importante papel das mulheres na Ciência. Escrever sobre o passado das cientistas é um caminho para a manutenção da pluralidade e diversidade na Ciência e, também, uma possibilidade para o reconhecimento das relações sociais de opressão baseadas em gênero.

O apagamento histórico da presença de mulheres na Ciência acaba refletindo em uma escassez de estudos que a partir da abordagem da História da Ciência (HC) tratem de elucidar as contribuições das mulheres na área [6]. Para contornar esse panorama, recentes trabalhos no campo da educação em ciências expõem narrativas históricas sobre eventos científicos cujas contribuições das cientistas exerceram papel fundamental para o progresso da Ciência.

O trabalho de Vieira, Massoni e Alves-Brito [7] destaca a história da astrofísica Cecilia Payne (1900–1979). Em uma época em que as universidades impunham restrições educacionais às mulheres e não concediam títulos acadêmicos a elas, mesmo após completarem os estudos, Payne foi pioneira ao determinar a composição química das estrelas em seu doutorado. Até então, acreditava-se que as estrelas eram compostas em maior preponderância por elementos metálicos, como o ferro, mas ela demonstrou, usando a análise do espectro estelar, que são formadas principalmente por hidrogênio e hélio. Sua conclusão contradizia a visão predominante e foi inicialmente rejeitada pela comunidade científica. Apesar de ter sido subvalorizada profissionalmente por ser mulher, sua contribuição é atualmente reconhecida como um marco para a área.

O trabalho de Maia Filho e Silva [8] destaca o experimento WS de 1950, conduzido pela física Chien-Shiung Wu (1912–1997) em colaboração com seus parceiros de pesquisa. Esse experimento foi pioneiro na demonstração experimental do entrelaçamento quântico, fenômeno essencial para avanços modernos como a teleportação, criptografia e computação quântica. Entre as contribuições mais notáveis de Wu às teorias físicas, incluem-se a comprovação experimental da violação da Lei de Paridade, a demonstração da teoria de Fermi sobre o decaimento beta, e sua ampla pesquisa em Física Nuclear. Essas descobertas consolidam sua posição de destaque na Segunda Revolução Quântica.

Os autores Pires e Peduzzi [9] apresentam, a partir de um estudo histórico-epistemológico, o episódio de detecção dos pulsares evidenciando o protagonismo da astrônoma Jocelyn Bell Burnell (1943–). Em 1967, durante seu doutorado, Jocelyn Bell Burnell identificou o primeiro sinal pulsado de ondas de rádio, corroborando observacionalmente a existência dos pulsares. Inicialmente, o sinal foi apelidado de “*Little Green Men*” (em português, “Homenzinhos Verdes”) devido à sua

regularidade, que levou a especulações sobre uma possível origem extraterrestre. Essa descoberta significativa no campo da Astronomia proporcionou uma melhor compreensão dos pulsares, que são estrelas de nêutrons em rápida rotação.

Todos esses trabalhos fazem uso da HC como suporte às discussões sobre Ciência e sobre a presença de mulheres nas disciplinas científicas. Como indicado pelas pesquisas em ensino, as abordagens em História e Filosofia da Ciência (HFC) promovem a apresentação dos conhecimentos científicos e a discussão da Natureza da Ciência (NdC) [10], pois possibilitam que sejam tratadas, em sala de aula, questões como: a mutabilidade das ideias científicas; a suscetibilidade a interpretações conflitantes dos seus objetos de estudo; a simbiose entre observação e expectativas prévias; sua relação com a cultura e a sociedade; que é uma atividade humana, entre outras [11].

Reconhece-se ainda o potencial das discussões sobre os assuntos tratados pela Física Moderna e Contemporânea (FMC) [12] e, de modo particular, o uso da HC no ensino dos conteúdos da Astronomia, Astrofísica e Cosmologia [7, 9, 13]. Outrossim, a introdução de temas científicos atuais nas atividades de ensino de ciências e de divulgação científica é umas das possibilidades que pode propiciar o enriquecimento da cultura científica dos alunos [14].

Considerando-se a concepção de que cabe à historiografia da Ciência, além de apresentar os elementos históricos que envolvem os importantes eventos científicos, também dar visibilidade à participação e contribuição das mulheres que atuaram diretamente na evolução das suas áreas de estudo, o episódio de descoberta da matéria escura fornece elementos que possibilitam a promoção de discussões sobre a HC e das mulheres na Ciência. Ademais, devido a sua complexidade, os desafios associados à compreensão da natureza da matéria escura e da elaboração desse conhecimento científico podem ser colocados em perspectiva com os referenciais da epistemologia da Ciência.

Em vista disso, neste artigo propõe-se realizar um relato histórico sobre o desenvolvimento conjunto da Astronomia, Astrofísica e Cosmologia no último século, sobretudo a respeito dos aspectos envolvidos no episódio de elaboração do conhecimento da matéria escura. Para isso tem-se a descrição de pesquisas marcantes que ajudaram na redefinição do que se compreendia até então sobre a composição do cosmos. Mostrando que sua maior parte é composta por um tipo de matéria não ordinária que ainda hoje não é compreendida totalmente.

De maneira associada à apresentação histórica do desenvolvimento do conceito de matéria escura, promove-se uma discussão histórico-epistemológica do processo, com o intuito de encontrar soluções ao problema de pesquisa determinado: “Qual papel a pesquisa da astrônoma Vera Rubin exerceu no desenvolvimento conceitual da matéria escura? E, quais reflexões sobre Natureza

da Ciência podem ser exploradas através da análise do processo histórico de elaboração desse conceito?”. Assim sendo, o referencial da Filosofia da Ciência de Thomas Kuhn, fundamentou o quadro de reflexões histórico-epistemológicas que puderam ser extraídas a partir da análise da narrativa histórica.

Em relação aos aspectos metodológicos, a presente pesquisa, de caráter bibliográfico, fundamenta-se em literatura primária, redigida pela própria Vera Rubin [15] e/ou demais cientistas envolvidos no episódio analisado, e secundária, como biografias da cientista [16, 17]. Sequencialmente, a organização do artigo inicia com a apresentação de uma narrativa histórica que contextualiza desde o princípio as pesquisas relativas à matéria escura. Após a descrição da história de gênese conceitual da matéria escura, são evidenciados os elementos da NdC que podem ser elencados a partir da análise interpretativa dos fatos, apoiando-se em referenciais modernos selecionados da Filosofia da Ciência. Ao final, realiza-se uma síntese das discussões que puderam ser elencadas, bem como as expectativas quanto a novos temas de pesquisa que possam advir desses resultados.

2. Ideias Iniciais Sobre o Universo Escuro

Há muito tempo se discute sobre a presença de coisas invisíveis no Universo. No século V a.C. o filósofo Filolau levantou a hipótese da existência de um planeta invisível oposto à Terra. Mais tarde, os atomistas argumentavam que o Universo continha um número infinito de mundos invisíveis e, de modo contrário, o filósofo Aristóteles afirmava que a matéria que não podia ser observada não existia [18]. O astrônomo e físico Galileu Galilei contestou tal percepção ao utilizar seu telescópio para provar que o Universo era uma construção física, não apenas uma ideia filosófica. Suas observações mostraram que “*o Universo pode conter matéria que não pode ser percebida por meios comuns [...] e que a introdução de novas tecnologias pode revelar-nos formas de matéria que antes eram invisíveis*” [18].

As ideias que inauguram a possibilidade de um Universo escuro remontam aos séculos XVIII e XIX, com a proposição da existência de estrelas escuras. A primeira previsão sobre objetos massivos e invisíveis no Universo, remonta a 1784, quando o reverendo John Michell imaginou que pudesse existir uma estrela cerca de 500 vezes maior que o Sol, mas de igual densidade e que nem mesmo a luz poderia escapar da sua atração gravitacional, assim como ocorre no que hoje conhecemos como buracos negros [19].

Apenas em 1844 os astrônomos começaram a compreender realmente que os objetos invisíveis no Universo poderiam ser identificados por sua influência gravitacional, quando o matemático e astrônomo Friedrich Wilhelm Bessel notou pequenas estranhezas nos movimentos das estrelas Sirius e Procyon, explicadas pela presença de

um objeto escuro [20]. O mesmo aconteceu ao planeta Netuno, que pôde ser identificado devido às perturbações gravitacionais na órbita de Urano [21].

Dentre os primeiros cientistas a pesquisarem sobre a matéria invisível, o físico William Thomson – conhecido como Lord Kelvin – foi o primeiro a se questionar se seria possível calcular sua quantidade na Via Láctea, que na época era considerada todo o Universo [18]. Seus cálculos intrigaram o matemático Henri Poincaré, que em 1906 sugeriu que essa quantidade seria igual ou inferior à da matéria visível [22].

Os astrônomos já sabiam que estrelas e nuvens de gás orbitam em torno do centro da nossa galáxia. Mas a suposição de que poderia existir alguma substância invisível era tão incomum que por muito tempo foi ignorada. No início do século XX, o astrônomo Ernst Öpik discute pela primeira vez o problema da matéria invisível na vizinhança solar da Via Láctea, averiguando por meio de cálculos que seu efeito era provavelmente devido as estrelas que só poderiam ser detectadas com equipamentos mais sofisticados [23]. O termo matéria escura foi introduzido pelo astrônomo Jacobus Kapteyn, para denominar a matéria que não poderia ser observada, que também fez uma estimativa para a quantidade de matéria escura do Universo utilizando um modelo físico específico [24].

Na virada para a década de 1920, o trabalho do astrônomo Harlow Shapley com o mapeamento de galáxias inspirou outros cientistas a estudarem sobre o assunto, despertando a ideia de que o Universo poderia ter mais matéria escura do que aquela visível [25]. Já em 1922, o físico e astrônomo James Jeans estimou que para cada estrela brilhante no Universo há cerca de três estrelas escuras [26]. Nota-se que a existência de algo não visível intriga cientistas ao longo dos séculos e é um campo fértil para discussões sobre a matéria escura.

3. A Origem Histórica das Pesquisas Sobre a Matéria Escura

Na contemporaneidade, a história dos esforços para se compreender a matéria invisível além das especulações sobre os entes invisíveis do Universo, começa na década de 1920, quando o astrônomo Jan Oort sugere que a Via Láctea poderia ter uma quantidade de matéria extra, provinda de estrelas pouco luminosas, em sua explicação para as velocidades das estrelas [15]. Alguns anos depois, o astrônomo Fritz Zwicky, ao pesquisar sobre as galáxias e seus aglomerados, sugeriu, de modo semelhante, que as galáxias precisavam de mais matéria do que se presumia. Em seus trabalhos, ambos os pesquisadores utilizaram equipamentos de espectroscopia.

Os espectrógrafos tiveram papel fundamental para o avanço das pesquisas em Astronomia, Astrofísica e Cosmologia. Cada elemento da tabela periódica pode absorver ou emitir uma série única de linhas de radiação eletromagnética. A espectroscopia consiste na medida

da intensidade dessa radiação em diferentes faixas de energia que, no estudo dos objetos celestes – estrelas e nuvens de gás nas galáxias, por exemplo – pode revelar a composição, temperatura e tamanho, bem como se estão se afastando ou se aproximando da Terra, no movimento chamado de velocidade radial [27]. Nos estudos sobre o cosmos concebidos no século passado, foram utilizados principalmente dados espectrais da região da luz visível e das ondas de rádio.

Os trabalhos de Zwicky se sobressaem ao serem os primeiros a observarem as velocidades radiais das galáxias, e não apenas as velocidades das estrelas que as compõem individualmente [28]. Em 1931, dois colegas de Zwicky, os astrônomos Edwin Hubble e Milton Humason, publicaram uma versão melhorada da relação simples entre distância e velocidade para galáxias distantes, incluindo detalhes das velocidades de sete dos objetos mais brilhantes do aglomerado de Coma – um aglomerado de mais de mil galáxias situadas a cerca de 322 milhões de anos-luz da Terra [29].

Até a metade do século XX, devido à limitação dos instrumentos e técnicas disponíveis, pouco se estudava sobre as regiões mais externas das galáxias. Os astrônomos presumiam que – fazendo uma analogia com o sistema solar – as partes mais externas das galáxias eram controladas principalmente pela gravidade da concentração de estrelas massivas e nuvens de gás da região interna. Em 1619, o astrônomo Johannes Kepler afirmava em sua Lei dos Períodos que, quanto maior a distância de um planeta ao seu Sol, mais lentamente ele iria se mover [30]. Tendo em vista esse conhecimento estabelecido, entende-se que a velocidade orbital deve diminuir com a distância ao centro da órbita e, conseqüentemente, qualquer situação em que as velocidades dos corpos astronômicos estejam de acordo com essa lei, chama-se o movimento descrito de “Kepleriana”. De forma gráfica, a mudança da rotação geral com a distância ao centro da galáxia pode ser compreendida com a visualização da curva da velocidade média de rotação em função da distância ao centro galáctico. A análise desse modelo de gráfico, denominado de curva de rotação, permitiu que os pesquisadores fizessem importantes descobertas sobre o cosmos.

No entanto, a teoria desenvolvida por Kepler não fornece informações sobre a dinâmica desses movimentos. Tais aspectos são tratados pela Lei da Gravitação Universal, desenvolvida pelo físico e matemático Isaac Newton no ano de 1687. A teoria diz que os objetos se atraem com uma força diretamente proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional à distância que os separa ao quadrado. Dentre as conseqüências que derivam dessa teoria, tem-se o teorema das cascas esféricas, mostrando que a atração gravitacional de uma esfera sobre algo fora dela é a mesma caso toda sua massa estivesse concentrada em seu centro. Além disso, a força gravitacional é efeito unicamente da massa contida entre a distância de um

certo ponto e o centro da esfera, destarte, a soma das contribuições das porções mais distantes ao centro é nula [31]. Na Astrofísica, o teorema pode determinar, por exemplo, como a massa de uma galáxia se distribui com a distância ao centro.

Em modelos físicos, combinando a teoria gravitacional com as curvas de rotação das galáxias, torna-se possível extrair dados sobre a distribuição de massa na galáxia, bem como a quantidade total. Desse modo, os dados colhidos por Zwicky o permitiram analisar a dinâmica geral das cerca de oitocentas galáxias que compõem Coma, observando que 7 delas apresentavam diferenças de velocidade que não concordavam com a expectativa teórica – as variações chegavam a mais de 2.000 quilômetros por segundo – o que de acordo com os pressupostos teóricos, resultaria em desintegração, no entanto, as galáxias do aglomerado permaneciam juntas [28].

Zwicky avaliou criticamente os métodos para se calcular as massas das galáxias, notando que aqueles baseados na luminosidade ou no movimento interno não eram confiáveis por conta da pequena quantidade de dados disponíveis, fazendo-se necessário um aperfeiçoamento da matemática empregada na análise dinâmica do aglomerado de Coma. Com isso em mente, Zwicky [28] calculou o quão massivo deveria ser Coma para manter seu aglomerado de galáxias, chegando à conclusão de que

[...] a densidade média [de matéria] no sistema Coma teria que ser pelo menos 400 vezes maior do que aquela obtida com base em observações de luminosidade. Se isto fosse confirmado, obteríamos o resultado surpreendente de que a matéria escura está presente em quantidade muito maior do que a matéria luminosa [...] estas considerações mostram que a grande dispersão no sistema Coma (e outros densos aglomerados nebulares) abriga um problema que ainda não é compreendido.

Para explicar as rápidas velocidades das galáxias, Zwicky argumentou que elas deveriam ter grandes quantidades de massa invisível, a qual denominou *dunkle materie* (do alemão, matéria escura), que forneceria a força gravitacional suficiente para manter as galáxias unidas no aglomerado [28]. Essa não foi a primeira menção ao termo matéria escura em um artigo científico, como mencionado anteriormente a autoria é atribuída a Kapteyn (1922).

Em 1936, o astrônomo Sinclair Smith, investigando o aglomerado de Virgem, deduziu, a partir da análise de galáxias em uma amostra seis vezes maior que a de Zwicky, que “o aglomerado não está se condensando nem se desintegrando, mas é um conjunto bastante estável, mais ou menos mantido unido por seu campo gravitacional” [32]. Com isso, Smith estimou uma massa 200 vezes maior para o aglomerado de Virgem do que o valor

estimado por Hubble – baseado no brilho superficial das galáxias que compõem o aglomerado.

O próximo avanço no estudo do tema remonta ao ano de 1939 pelo astrônomo Horace Babcock que, em meio ao contexto da Segunda Guerra Mundial, desenvolveu um dos primeiros estudos em grande escala sobre os movimentos das galáxias [33]. Em sua tese de doutorado, utilizando o registro de espectros, por meio dos comprimentos de onda de luz emitida, o cientista objetivava investigar o movimento no interior das galáxias para deduzir suas propriedades, como a distribuição de massa e valor de massa total, e extrair informações sobre seu processo de evolução [34]. Os dados obtidos mostraram pela primeira vez grandes valores para a velocidade da nuvem de gás afastada do centro da galáxia M31 – também conhecida como galáxia de Andrômeda – contrariamente ao que era esperado [15]. As velocidades com que cinco regiões H II¹ giravam, eram quase constantes para as partes externas de M31, o que resultava em uma massa muito maior do que o valor sugerido por Hubble [34].

Em 1940, durante o estudo da luminosidade e dinâmica da galáxia NGC 3115, Oort também mencionou haver um excesso de massa nas regiões externas, com uma proporção de massa e luz de aproximadamente 250 para 1 [36]. O cientista sugeriu que esse excesso poderia ser explicado por uma densidade relativa extrema de estrelas anãs pouco luminosas ou material interestelar na galáxia. Em 1937, Zwicky observou que para determinar a massa das galáxias a partir da luminosidade “*devemos saber quanta matéria escura está incorporada nas nebulosas na forma de estrelas frias, corpos sólidos [...] e gases*” [37], reforçando a ideia de que a matéria escura consistia em corpos frios e, portanto, por serem pouco luminosos os astrônomos não conseguiam detectar. Na época, a comunidade científica deu pouca importância a essas intrigantes constatações. Mas novas evidências para a matéria escura surgiram nas décadas de 1950 e 1960, com o apoio dos radioastrônomos.

Em 1954, o astrofísico Martin Schwarzschild reanalisou os dados das pesquisas de Zwicky e Smith e descartou suas investigações devido ao “*valor desconcertantemente alto para a relação massa-luminosidade do aglomerado Coma*” [38] especulando que a presença de estrelas fracas e com baixa luminosidade explicariam o excesso de massa calculado, tomando como exemplo a sugestão de Oort. No ano de 1957, o astrônomo Geoffrey Burbidge corroborou a posição de Zwicky da existência de uma grande fração de matéria escura em regiões de galáxias, em uma distribuição bastante diferente daquela observada opticamente [39]. No mesmo ano, o astrofísico Hendrik van de Hulst, o radioastrônomo Ernst Raimond

e o astrônomo Hugo van Woerden obtiveram a curva de rotação de M31 com observações em rádio da linha² de 21 cm do H I, com um alcance de aproximadamente 25 kpc³ [41]. Analisando os dados da curva de rotação de M31, o astrônomo Maarten Schmidt obteve razões de massa-luminosidade de pelo menos 20 e potencialmente aumentando com a distância ao centro da galáxia [42]. Em 1960, os astrônomos Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge e Kevin Prendergast ajustaram uma curva de rotação para a galáxia NGC 5055 e compararam o resultado com uma curva obtida anteriormente para a Via Láctea. A dinâmica observada indicou que, nas regiões externas da galáxia, a curva se estabilizava [43].

A discrepância dos dados para as velocidades podia ser explicada pela presença de estrelas muito fracas ou outros objetos celestes que não podiam ser visualizados, ou então, de uma massa extra nos aglomerados. A última solução não era bem aceita, pois implicava que “[...] *cerca de 99% da massa do Universo permaneceu invisível até agora, e talvez seja desagradável para os astrônomos e cosmólogos pensar que as suas teorias são com base em observações de menos de 1% da matéria que realmente existe!*” [44]. O problema passa a ser chamado de instabilidade galáctica, uma vez que sem a presença da massa adicional e invisível as galáxias seriam instáveis.

O debate sobre as diferentes estimativas das massas das galáxias se intensificou um pouco antes da assembleia geral da União Astronômica Internacional (IAU, na sigla original em inglês) realizada no ano de 1961 [44]. No ano de 1962, a astrônoma Vera Cooper Rubin, em seu artigo para o periódico científico *The Astronomical Journal*, divulgou o resultado da sua pesquisa sobre a dinâmica estelar a mais de 26 mil anos-luz do centro da nossa galáxia, aproximadamente a distância que o Sol está localizado. Encontrando curvas de rotação praticamente planas, ela afirmou que “*A diminuição na velocidade de rotação esperada para as órbitas Keplerianas não foi encontrada. É mostrado que erros sistemáticos de observação não serão responsáveis pelo formato da curva*” [45]. Vera Rubin calculou que as estrelas da Via Láctea pareciam se mover mais rápido do que é determinado pela Lei da Gravitação de Newton. Essa constatação não teve grande impacto na época e, após a publicação em artigo, alguns astrônomos contestaram, afirmando que o resultado não podia estar correto ou que os dados não eram suficientemente bons para sustentar a afirmação [46]. Na época, como professora na Universidade de Georgetown, Rubin utilizava

² A linha de 21 cm resulta da transição do estado de energia dos átomos de hidrogênio neutros. Essa mudança libera uma pequena quantidade de energia na forma de um fóton com comprimento de onda de 21 cm, que corresponde à frequência de 1.420,4 MHz, dentro do espectro de ondas de rádio [35].

³ O parsec (pc) é a unidade de distância astronômica para a qual 1 UA (unidade astronômica) subtende um ângulo de exatamente 1 segundo de arco e é equivalente a 3,26 anos-luz [40]. Para distâncias grandes, pode ser usado com o prefixo quiloparsecs (kpc), que são iguais a 1000 parsecs.

¹ H II é definida como a região de gás interestelar ionizado composta principalmente por hidrogênio. Essas regiões se formam ao redor de estrelas mais quentes e luminosas que emitem radiação ultravioleta suficiente para ionizar o gás hidrogênio neutro (H I) circundante. Esses locais de intensa formação estelar desempenham um papel crucial na estrutura e evolução das galáxias [35].

principalmente dados de outros astrônomos em seus trabalhos, impossibilitando que pudesse contradizer de forma mais contundente as críticas recebidas.

Nos anos de 1963 e 1964, ao analisar a dinâmica da galáxia M31, o radioastrônomo Morton Roberts identificou a mesma anomalia da não diminuição da velocidade de rotação [47]. Ao traçar a curva de rotação para a galáxia, pôde ser afirmado que era “*plana e não diminui como é esperado para as órbitas Keplerianas*” [45], reforçando com a observação “*o quão pobre era a nossa suposição do movimento Kepleriano, mesmo a distâncias de cerca de 20 kpc do núcleo*” [47].

Nesse contexto, a cosmologia passava por uma profunda modificação devido à evidência observacional da origem, por expansão do espaço-tempo, para o surgimento do Universo, denominada de teoria do Big Bang. O principal objetivo das pesquisas era determinar se o Universo continuava a se expandir, ou seja, se poderia ser considerado aberto ou fechado, caso caminhasse para uma expansão inversa. Para compreender a questão, os cientistas teóricos se questionavam se a massa total do Universo seria suficiente para promover a união das galáxias e se existia um valor de massa crítica para reverter a expansão cosmológica. Em 1967 os cosmólogos passaram a chamar de massa faltante aquela que não poderia ser visualizada, mas era necessária para que o Universo fosse fechado [48]. Nessa fase, acreditava-se que até três quartos da massa do Universo poderia ser invisível. Contudo, os sinais que apontavam para a necessidade da existência de matéria adicional no Universo não despertaram a atenção dos astrônomos.

Em 1970, Vera Rubin e o físico e astrônomo Kent Ford conseguiram traçar uma curva de rotação da galáxia M31, com dados mais distantes do que haviam sido feitos até então em comprimentos de onda ópticos. Assim como Roberts, concluíram que a curva de rotação para a galáxia era plana longe do seu núcleo, não havendo qualquer sinal de que as velocidades radiais diminuíssem com a distância, divergindo das velocidades Keplerianas. No centro da galáxia M31, a curva de velocidade de rotação (Figura 1) sobe abruptamente até um máximo de 225 km/s (eixo vertical esquerdo no gráfico) ao longo de 0,4 kpc (ou 1.300 anos-luz, eixo horizontal superior no gráfico), caindo em seguida para um mínimo de velocidade a uma distância do centro da galáxia de aproximadamente 2 kpc (6.500 anos-luz) [49].

Essa ascensão e queda iniciais na distribuição das velocidades de rotação das estrelas no núcleo podem ser compreendidas sabendo-se que o movimento estelar é proveniente da atração gravitacional exercida pela massa total localizada dentro da órbita. Na região central da galáxia, sua massa aumenta com a distância do seu centro, pois mais estrelas e gás são abrangidos, mas além dos 0,4 kpc há uma região onde “*a densidade é muito baixa e as velocidades de rotação são muito pequenas*” aproximadamente 55 km/s [49].

Após o valor mínimo na distância de 2 kpc, a curva de rotação sobe continuamente em direção a um máximo

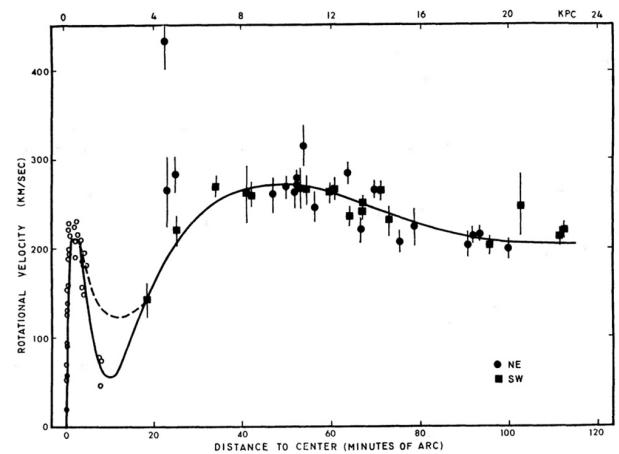


Figura 1: Curva de velocidade de rotação de M31 medida por Rubin e Ford [49].

de velocidade em 9 kpc, atingindo 270 km/s, para então decrescer durante algum tempo e permanecer plana com 250 km/s em 24 kpc, valor limite para a distância do conjunto de dados disponíveis. A forma da curva de rotação entre 3 e 24 kpc do centro é ditada pela quantidade de material no disco além do centro da galáxia e estava em claro desacordo com a expectativa teórica de uma órbita Kepleriana, a qual previa a diminuição dos valores para as velocidades de rotação [49]. Em 1966 os astrônomos Stephen Gottesman, Rod Davies e Vincent Reddish, ao pesquisarem a galáxia M31, obtiveram resultados para a curva de rotação semelhantes aos de Roberts e de Rubin e Ford [50].

Vera Rubin elaborou um plano de estudo sistemático adequado aos telescópios que tinha à sua disposição objetivando compreender mais profundamente como as galáxias giram e comparar observações ópticas e de rádio, algo que poucos grupos de astrônomos tinham como interesse de pesquisa na época. As observações ópticas e de rádio em conjunto, realizadas por Rubin, levaram os teóricos a executarem simulações computacionais as quais mostravam que para as galáxias desenvolverem-se tinham de ter mais matéria do que aquela que poderia ser vista. Especificamente, precisaria existir matéria com luminosidade tão baixa que até poderia ser detectada pelos telescópios, mas isso seria em uma quantidade dez vezes maior do que da matéria visível. Nesse momento, fortalecia-se o argumento favorável à existência da matéria escura, contudo, alguns astrônomos ainda questionavam os dados rádio astronômicos. Acreditava-se que as estrelas mais próximas do núcleo de uma galáxia deveriam mover-se muito mais rápido do que as estrelas mais distantes, mas ao invés disso, as estrelas mais exteriores de M31 tinham velocidades semelhantes às das mais próximas do núcleo – eram duas vezes mais rápidas do que o previsto teoricamente considerando-se apenas a matéria visível [14].

Devido a limitação dos dados de rádio, que restringiam a informação a 26 kpc, os cientistas especularam sobre

a quantidade de estrelas anãs, fracas demais para serem visíveis, que seriam necessárias para explicar a massa tão significativa, e em um grande raio que evitava a diminuição da velocidade. Através de cálculos, encontraram que tais estrelas precisariam estar distribuídas uniformemente por todo o disco estendido da galáxia. Mais tarde, Roberts abrangeu sua análise às espirais M81 e M101, descobrindo que elas também tinham curvas de rotação planas [15]. À medida que os artigos mostrando as curvas de rotação planas eram publicados, Rubin e Ford começaram a colaborar com Roberts. Os três mediram as velocidades das estrelas e das nuvens de gás em outras galáxias além de M31 e puderam descrever curvas de rotação planas para cada uma [51].

Em 1973, o astrofísico Jeremiah Ostriker e o físico James Peebles, com o auxílio de modelos computacionais e cálculos relativos à forma como as galáxias se mantêm unidas a longo prazo, avançaram em defesa da matéria escura [52]. Eles descobriram, assim como outros pesquisadores suspeitavam, que um disco giratório de estrelas ou gás se tornaria extremamente instável, levando à formação de uma estrutura de barra⁴ gigante. Mas isso não ocorreu para a nossa galáxia, ou para qualquer espiral barrada média. Logo, embora os dados das curvas de rotação das galáxias indicassem haver uma grande quantidade de matéria invisível influenciando gravitacionalmente, ela não poderia se localizar no disco plano onde reside a matéria visível.

Os cientistas apresentaram como solução ao problema do disco giratório, a possibilidade de que a matéria escura se distribuisse esfericamente, na forma de um halo de matéria pouco luminosa que garantiria estabilidade ao sistema galáctico [52]. Desse modo, tem-se uma reconstrução do que se compreendiam da estrutura das galáxias, devendo agora serem compostas por uma protuberância central brilhante (bojo); um disco de gás, poeira e estrelas; e um halo esférico de matéria que as envolvem e permeiam. Em um artigo sobre as massas das galáxias e do Universo, Ostriker, Peebles e o astrofísico Amos Yahil [54], escreveram que:

Existem razões, cada vez mais numerosas e qualitativas, para acreditar que as massas das galáxias comuns podem ter sido subestimadas por um fator de 10 ou mais. Uma vez que a densidade média do Universo é calculada multiplicando a densidade numérica observada das galáxias pela massa típica por galáxia, a densidade média da massa do Universo teria sido subestimada pelo mesmo fator.

Os três autores perceberam que as curvas de rotação planas das galáxias espirais implicam em um aumento

da massa com a distância do centro, em outras palavras, a massa contida numa esfera responde ao aumento da distância de modo diretamente proporcional ao raio. Esse resultado, mostrava o desacordo entre a distribuição de massa e de estrelas luminosas nas galáxias, reforçando a ideia de que halos galácticos massivos e invisíveis contribuem com pelo menos dez vezes mais massa do que as estrelas luminosas localizadas no disco plano e no núcleo [54]. Fortalecia-se o argumento de que o nosso Universo contém enormes quantidades de matéria escura, apesar de que ainda fosse insuficiente para bloquear sua expansão [55].

Quase simultaneamente, a equipe dos cosmólogos Jaan Einasto, Ants Kaasik e Enn Saar, ao revisitarem os dados de velocidades radiais e distâncias para mais de 100 pares de galáxias publicados por outros cientistas, construíram uma justificativa baseada na existência de coroas galácticas massivas, concluindo que a “*massa das coroas galácticas excede a massa das populações de estrelas conhecidas numa ordem de grandeza*” [56] e, isso significava que aglomerados de galáxias deveriam conter matéria escura.

No cenário de rápido desenvolvimento da cosmologia, a astrônoma Vera Rubin estudava galáxias espirais, produzindo sistematicamente curvas de rotação em uma maior quantidade do que qualquer outro astrônomo óptico antes dela havia conseguido, contribuindo imensamente para a avaliação das especulações teóricas [16]. Rubin e sua equipe optaram por observar galáxias altamente inclinadas para que pudessem obter dados mais precisos para as velocidades rotacionais e das massas que eram deduzidas. Além disso, a seleção de galáxias a serem estudadas precisava abranger uma grande variedade de raios, massas e luminosidades. A criteriosa análise dos espectros galácticos feita por Rubin culminou na publicação de duas dúzias de artigos no *The Astrophysical Journal*.

Em 1978, Rubin, Ford e o físico Norbert Thonnard (Figura 2) – colegas de pesquisa do Departamento de Magnetismo Terrestre da Instituição Carnegie de Washington – a partir da observação telescópica, obtiveram um conjunto de dados de alta qualidade e credibilidade para os espectros de doze galáxias espirais de alta luminosidade, do tipo Sc⁵ da classificação de Hubble. Foram analisadas as massas e as relações de massa e luminosidade de duas maneiras diferentes. Em uma delas, adotou-se a imagem padrão da galáxia em forma de disco e na outra a abordagem de Ostriker, Peebles e Yahil, assumindo a distribuição esférica de massa. Tanto o modelo de disco quanto da esfera para a distribuição de massa reproduzia as curvas de rotação planas.

⁴ As galáxias espirais barradas possuem uma estrutura central de estrelas dispostas na forma de barra retilínea que atravessa o centro e se estende por uma parcela do disco galáctico [53]. A Via Láctea é um exemplo de galáxia espiral barrada.

⁵ Na classificação para o formato de galáxias desenvolvida por Edwin Hubble em 1926 as galáxias espirais são divididas em três grupos: Sa (espirais fortemente enroladas), Sb (espirais mais fracamente ligadas) e Sc (espirais abertas). Ao longo do século percebeu-se que o sistema era insuficiente para classificá-las [57].



Figura 2: Kent Ford (esquerda), Norbert Thonnard e Vera Rubin em 1984 [16].

No artigo publicado foi escrita a seguinte nota ao final: “*As observações aqui apresentadas são, portanto, uma condição necessária, mas não suficiente para halos massivos*” [58]. Essa situação enfatiza o receio dos cientistas em estabelecer conexões diretas entre as observações colhidas e a presença de matéria escura. Em retrospecto, pode-se considerar esse o primeiro agrupamento de evidências, fundamentadas em observações ópticas, da presença de matéria escura em halos galácticos, tal como os teóricos defendiam há pelo menos cinco anos.

No mesmo ano, houve mais um rápido avanço no estudo das curvas de rotação das galáxias. O radioastrônomo Albert Bosma pesquisou a presença de hidrogênio em 25 galáxias espirais, mapeando com a mais alta resolução até onde alcançavam as observações de rádio, aproximadamente 40 kpc. Como resultado, ele mostrou que apesar das curvas de rotação para comprimentos de onda no óptico, que terminavam em raios pequenos (até 5–10 kpc), ainda poderem ser consistentes com uma massa total apenas estelar, dentro das incertezas, as curvas de rotação eram planas além da periferia do disco estelar visível, até o último ponto da medição [59].

Em 1980, novas observações realizadas por Rubin e seus colaboradores, tinham como amostra 21 galáxias do tipo Sc. Vera Rubin e Kent Ford foram pioneiros na investigação das regiões exteriores e da dinâmica da maioria dessas galáxias, assim como na publicação de um estudo sistemático das suas curvas de rotação. A grandes distâncias do centro das galáxias, a massa implícita continuava a aumentar cada vez mais, mesmo no limite onde nenhuma matéria podia ser vista [60]. O comentário de Vera no artigo de 1980 publicado no *The Astrophysical Journal* sobre essa constatação foi que “*É inevitável a conclusão de que existe matéria não luminosa para além da galáxia óptica*” [60]. A matéria escura parecia estar preferencialmente no entorno das galáxias, o que resultava em profundas consequências aos teóricos que trabalhavam com a origem e formação de galáxias no início do Universo e com o próprio Universo.

Outro aspecto tratado por Vera Rubin na pesquisa correspondia à quantidade de vezes que essas galáxias estudadas poderiam girar, comparando as semelhanças das curvas de rotação obtidas com seus dados. Uma das maiores galáxias espirais conhecidas, a UGC 2885, “*passou por menos de dez rotações nas suas partes exteriores desde a origem do Universo*”, mantendo sua estrutura espiral simétrica [60]. Ademais, pôde-se perceber que a borda externa de um braço de uma galáxia espiral gira mais rapidamente que a borda interna do braço seguinte, sinalizando que o padrão espiral das galáxias é determinado por uma onda que gira e avança mais lentamente do que o movimento contínuo das estrelas [15]. Nos braços das galáxias há fluxos de gás interestelar, tanto neutros quanto eletricamente carregados, que se chocam e desencadeiam a formação das estrelas à medida que as ondas de poeira vagam por eles [61]. Ou seja, a matéria escura é um ente fundamental para a existência e evolução das galáxias.

No ano de 1982, Rubin, Ford e Thonnard se uniram ao astrônomo e astrofísico David Burstein para fazer uma análise mais completa da distribuição de massa da mesma amostra de galáxias dos trabalhos anteriores e identificaram várias conexões entre propriedades fundamentais, como massa e luminosidade. O primeiro parágrafo do artigo que resultou dessa colaboração, apontava que a amostragem de “*galáxias espirais normais tem relevância para os problemas maiores da matéria não luminosa no Universo e da massa do Universo*” [62]. Já o parágrafo que encerra o trabalho, afirmava que [62]:

Uma vez que a maioria das galáxias Sc nesta amostra não estão em grandes aglomerados, todas estas conclusões são consistentes com a presença de halos massivos virtualmente não luminosos em galáxias Sc de campo. As distribuições de ambas as formas de matéria (luminosa e não luminosa) parecem estar fortemente acopladas na imagem óptica.

Nesse momento, havia um entusiasmo geral pela ideia de haver uma grande quantidade de matéria escura abundante nos aglomerados de galáxias. Os artigos de Vera Rubin publicados em 1978, 1980 e 1982 documentam sua posição favorável ao argumento de que a matéria escura está aglomerada, na forma de halo, ao redor das galáxias.

Ainda em 1982, dando continuidade a suas observações, Vera Rubin pôde determinar as propriedades rotacionais de 23 galáxias do tipo Sb (Figura 3). A investigação termina em 1985, quando galáxias do tipo Sa são adicionadas ao conjunto estudado. Os dados utilizados foram criteriosamente selecionados e a amostra observacional abrangia uma grande faixa de valores para a luminosidade. Com isso, pôde ser identificado que as curvas de rotação das galáxias eram semelhantes e não refletiam diferenças estruturais marcantes para as três classes. Rubin ponderou que “*As curvas de rotação que obtivemos para as galáxias Sa, Sb e Sc têm pouca relação*

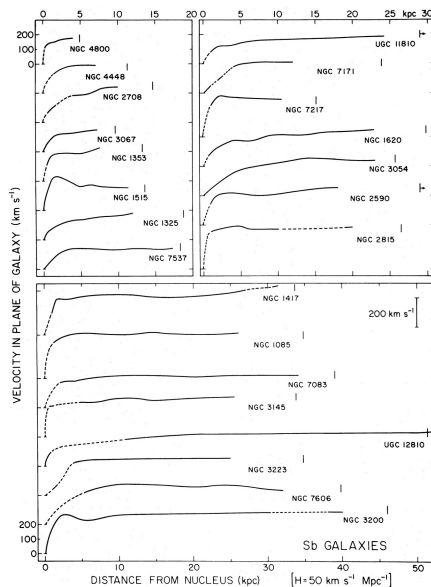


Figura 3: Vinte e três curvas de rotação plana para galáxias Sb [63].

com as curvas de rotação que seriam previstas a partir da distribuição da luminosidade óptica nestas galáxias” [64].

Os avanços atingidos até o final dos anos oitenta, a partir das teorias, observações e simulações computacionais que foram desenvolvidas e que poderiam explicar parte do intrigante movimento dos objetos celestes estimulava a confiança dos pesquisadores e interesse pelas surpresas que o Universo poderia revelar [15]. As constatações provenientes do estudo de Vera Rubin sobre a dinâmica de galáxias de campo e de galáxias em aglomerados forneceram uma ampla evidência observacional para a existência da matéria escura, sua distribuição no Universo e impacto no ambiente das galáxias. Os principais artigos publicados por Rubin sobre curvas de rotação fizeram uma contribuição significativa na determinação de uma teoria cosmológica capaz de explicar a dinâmica das galáxias.

4. O Que Sabemos Sobre a Matéria Escura

Por muito tempo acreditou-se que o que se chamava de matéria escura era apenas matéria pouco luminosa que os telescópios ainda não conseguiam detectar. Tinha-se como pensamento comum, que os prováveis constituintes da matéria escura seriam estrelas pouco massivas ou remanescentes de estrelas grandes e supermassivas mortas. Alguns cientistas até sugeriram que a matéria escura poderia ser formada por fragmentos que nunca se tornaram luminosos como planetas semelhantes a Júpiter e buracos negros do Universo primitivo [15].

Os físicos conheciam razoavelmente a quantidade de matéria ordinária, normal, ou bariônica, existente desde o instante seguinte ao Big Bang. Contudo, a maior parte

da massa do Universo, pelo menos com base nas melhores estimativas dos cientistas na época, não poderia ser bariônica. Outro argumento favorável à existência de uma matéria não bariônica resultou das questões não respondidas da Cosmologia. Após a sua definitiva aceitação pela comunidade científica, por volta dos anos 1970, diversas especulações sobre a natureza peculiar da matéria escura circulavam na literatura especializada. O primeiro candidato a partícula de matéria escura foram os neutrinos leves e pesados, mas logo a hipótese foi descartada [15]. Outras potenciais partículas foram propostas, o astrofísico e astrônomo Gary Steigman e o cosmólogo Michael Turner eram defensores de uma partícula massiva de interação fraca, denominada WIMP [65]. Na década de 1980 o áxion é apresentado como uma partícula de matéria escura [66]. Para todas essas partículas os físicos concebiam experiências na tentativa de confirmar se existiam de fato.

Ao invés de recorrerem à hipótese da existência de um tipo de matéria invisível e não luminosa, alguns cientistas optaram pela modificação da teoria gravitacional como forma de explicar os efeitos observados nas curvas de rotação das galáxias. Essas teorias alternativas à matéria escura sugerem que a gravitação, conforme a conhecemos, pode não ser completamente precisa em escalas cosmológicas.

O físico Mordehai Milgrom, sugeriu que as Leis de Newton, desenvolvidas no século XVII, não eram suficientes para a descrição da dinâmica das galáxias. A solução elaborada na década de 1980, em conjunto com o físico Jacob Bekenstein, para explicar a curva de rotação plana de uma galáxia, foi a chamada Dinâmica Newtoniana Modificada, ou MOND (em inglês, *Modified Newtonian Dynamics*) [67]. A teoria sugere que as Leis de Newton precisam ser modificadas em baixas acelerações (como as encontradas nas regiões externas das galáxias), onde a gravidade seria mais forte do que o previsto. Isso explicaria as curvas de rotação planas sem a necessidade de matéria escura. No entanto, a MOND enfrenta dificuldades para explicar observações em grandes escalas, como a formação de estruturas no Universo e as lentes gravitacionais, que são bem explicadas pelo modelo da matéria escura. Ainda que a modificação fosse capaz de reconstruir a planicidade característica das curvas, poucos cientistas adotaram uma reavaliação⁶ tão radical das Leis de Newton na escala galáctica ou da existência da matéria escura [15].

Mais recentemente, a partir dos anos 2000, alguns teóricos passaram a investigar as Teorias de Imersão de Nash aplicadas à Relatividade Geral⁷ e, especificamente, sua versão em cinco dimensões (5D). Essas teorias

⁶ Mais informações a respeito da possibilidade de reavaliação podem ser encontradas no trabalho dos autores Lima, Alves-Brito e Nascimento [68], que aprofundam a discussão sobre o embate entre a Dinâmica Newtoniana Modificada e a matéria escura à luz de diferentes concepções epistemológicas.

⁷ A Teoria da Relatividade Geral de Einstein (1915) surge como uma generalização da Teoria da Relatividade Especial (ou

exploram a ideia de que o nosso Universo em quatro dimensões pode estar imerso em um espaço-tempo de dimensões superiores, e os efeitos gravitacionais que associamos à matéria escura poderiam ser explicados por essa imersão em dimensões extras [70, 71]. O conceito geométrico sugere que uma variedade de dimensões menores pode ser imersa em uma variedade de dimensões maiores. Quando aplicado à Física, admite-se que nosso Universo de quatro dimensões, sendo três espaciais e uma temporal ($3D + 1D$) pode estar imerso em um espaço-tempo de $5D$. Nesse contexto, os efeitos que interpretamos como matéria escura seriam projeções das propriedades geométricas da quinta dimensão no nosso espaço-tempo, logo, a gravidade modificada seria uma manifestação da curvatura adicional introduzida pela dimensão extra. As teorias de gravidade branária⁸, como o modelo de Randall-Sundrum, introduzido pelos físicos teóricos Lisa Randall e Raman Sundrum no ano de 1999, exploram ideias semelhantes, sugerindo que a matéria escura e a energia escura são na verdade projeções de fenômenos em dimensões extras [73, 74].

Nas últimas décadas, observações em diversas faixas espectrais não foram capazes de detectar a matéria escura, que parece não irradiar significativamente nas regiões do ultravioleta, da luz visível, infravermelha ou dos raios X, além disso, sabe-se que não é composta por gás ou estrelas com baixa luminosidade [15]. Atualmente, os cientistas da área da Física de Partículas propõem, como constituinte da matéria escura, uma nova partícula fundamental, que ainda não descobrimos ou identificamos, mas que é percebida através do efeito da sua atração gravitacional sobre a matéria comum [14]. A assinatura da matéria escura é apenas o efeito da sua interação gravitacional, mas com estudos continuados em todas as regiões do espectro eletromagnético, espera-se que mais respostas sobre as suas propriedades sejam delineadas [15].

Assim como o conceito de matéria escura, a energia escura, também desempenha um papel fundamental na composição do Universo. Embora ambas sejam componentes principais do cosmos, elas possuem dinâmicas e propriedades distintas: a matéria escura influencia a

formação e a rotação das galáxias, enquanto a energia escura está associada à aceleração da expansão do Universo em escalas cosmológicas. Devido à complexidade associada à natureza de ambas, não estamos tão mais perto de uma resposta para explicá-las do que estavam os cientistas do século passado e suas origens misteriosas constituem dois dos principais dilemas da Astrofísica Moderna. Isso se acentua ao sabermos que cerca de 95% do conteúdo massa-energia do Universo é constituído por entes escuros, sendo no total, em números aproximados, 69% de energia escura, 26% de matéria escura e 5% de matéria bariônica, portanto, a matéria escura corresponde a 84% da massa total do Universo [75].

5. Reflexões Epistemológicas Sobre a Descoberta da Matéria Escura

Durante o século XX, os astrônomos aprenderam que o Universo está cheio de galáxias, que o Universo está se expandindo e que as galáxias estão se separando umas das outras. Mas talvez mais importante do que a compreensão dos novos fatos individuais, seja a percepção de que o Universo é mais complexo e misterioso do que se havia alguma vez imaginado [15]. Em vista disso, as reflexões epistemológicas podem auxiliar no melhor entendimento dos processos que geram conclusões como essas. Em particular, para a narrativa histórica do episódio de descoberta da matéria escura é possível desenvolver uma análise interpretativa dos acontecimentos a partir de uma visão baseada na epistemologia da Ciência do físico e historiador Thomas Kuhn⁹ [76, 77].

O modelo epistemológico proposto por Kuhn para a compreensão da Ciência utiliza conceitos, e suas respectivas definições, em sua teoria. Dentre eles, neste trabalho serão explorados os conceitos de “ciência normal”, “paradigma”, “anomalia” e “descoberta científica”. Em síntese, segundo os pressupostos epistemológicos de Kuhn, o desenvolvimento científico se dá a partir de uma série de períodos de ciência normal, onde a comunidade científica trabalha com base em um paradigma vigente/dominante. Até que, com a identificação de uma anomalia no paradigma, ele é abalado, em um processo inerente à descoberta científica. Se o paradigma, devido a sua quantidade de anomalias, não suplanta a crise causada no corpo conceitual da Ciência, tem-se a ruptura e adoção de um novo candidato a paradigma, marcando o advento da “revolução científica”.

Ao estudarem a dinâmica celeste, os problemas de pesquisas que motivaram os cientistas não intencionavam diretamente produzir alguma real modificação dos conteúdos da Ciência. Nessa circunstância, entende-se que a produção científica para o estudo do Universo

restrita) – que introduz a hipótese revolucionária da velocidade da luz constante. A teoria geral inclui a gravitação às ideias da relatividade, e a partir de um conjunto de equações do campo gravitacional, possibilitou a percepção de que a matéria do Universo estabelece como que sua geometria espaço-tempo deve se curvar [69].

⁸ Os modelos de branas oferecem uma abordagem fenomenológica de testar algumas das previsões e correções inovadoras à Relatividade Geral. A teoria de Branas-mundo propõe que o Universo observável pode ser um subespaço de dimensões menores, chamado “brana”, imerso em um espaço-tempo de dimensões superiores, chamado “bulk”. Enquanto as partículas e os campos do Modelo Padrão permanecem confinados à brana, a gravidade é livre para acessar o bulk. No limite de baixas energias, a gravidade está localizada na brana e as previsões da Relatividade Geral são recuperadas. No entanto, em altas energias, a gravidade pode “vazar” para o bulk, exibindo comportamentos característicos de dimensões superiores [72].

⁹ O Ensaio Introdutório escrito pelo filósofo da Ciência Ian Hacking para o 50º aniversário da edição de “A Estrutura das Revoluções Científicas” de Thomas Kuhn também será utilizado como referencial na análise.

caracterizava-se pela execução da ciência normal, a qual Kuhn [77] denota como a

[...] pesquisa firmemente baseada em uma ou mais realizações científicas passadas. Essas realizações são reconhecidas durante algum tempo por alguma comunidade científica específica como proporcionando os fundamentos para sua prática posterior.

Logo, as ideias dos cientistas que pesquisavam sobre o movimento, forma e distribuição de matéria nas galáxias estavam firmemente atreladas ao compromisso com a ciência normal, que determina, por exemplo, tanto aquilo que compõe o Universo, quanto, de maneira implícita, o que ele não pode conter [77].

Em vista disso, os pesquisadores começaram suas investigações formulando perguntas de pesquisa a respeito da identificação das propriedades das galáxias, presumindo que os resultados observacionais, por exemplo, as curvas de rotação e a quantidade de matéria calculada, estivessem de acordo com a teoria newtoniana. Os dados colhidos eram modelados a partir de analogias com os sistemas clássicos conhecidos e os resultados de pesquisa eram analisados a partir dos pressupostos estabelecidos pelo conhecimento científico aceito até então. Os pesquisadores, portanto, compartilhavam entre si uma série de regras e padrões para a prática científica previamente estabelecidos [77]. No episódio, a ciência normal empreendida estava imersa em paradigmas que, em certa medida, determinavam quais eram as perguntas a serem feitas pelos cientistas e como as comunidades científicas deveriam trabalhar para respondê-las [77].

Porém, o trabalho científico realizado na ciência normal foi abalado quando esses métodos – leis e instrumentos, por exemplo – legitimados pela tradição científica passaram a ser insuficientes para a explicação dos fatos [77]. Exemplificando esse quadro, o paradigma newtoniano e, por consequência, dos entes que compõem o Universo, foi desestabilizado pela divergência dos resultados para a velocidade de rotação das galáxias ao que se era esperado, e deixou de ser suficiente para a explicação das curvas nas várias pesquisas feitas. Ainda que, os instrumentos de pesquisa, como os espectrógrafos, que ofereceram uma maior quantidade de dados para os cientistas trabalharem, mostrassem o alcance das tecnologias que puderam ser concebidas com aporte no paradigma.

No acúmulo das evidências de vários estudos ao longo de décadas, concluiu-se que as curvas de rotação das galáxias eram planas, podendo até aumentar ligeiramente a grandes distâncias do centro delas. O Universo precisaria de mais matéria do que os cientistas pensavam para que fosse possível explicar as rápidas velocidades das estrelas e da nuvem de gás das galáxias. Os astrônomos não sabiam o que ela era ou onde realmente estava, mas a dinâmica celeste sugeria a existência de uma forma adicional de matéria. Essa matéria extra foi chamada de

“matéria escura”, em homenagem aos primeiros astrônomos, das décadas de 1920 e 1930, que notaram pela primeira vez os movimentos anômalos das galáxias [17].

A percepção pelos cientistas desse novo fenômeno que não era previsto, ou seja, uma anomalia no paradigma que governava a ciência normal, foi fundamental na trajetória da descoberta científica da matéria escura [77]. Como explica Kuhn, a “*consciência da anomalia inaugura um período no qual as categorias conceituais são adaptadas até que o que inicialmente era considerado anômalo se converta no previsto. Nesse momento completa-se a descoberta*” [77].

Neste artigo, optou-se por tratar o episódio como uma descoberta. Distanciando-se de uma visão ingênua, empirista e socialmente neutra, como um acontecimento causado por um indivíduo isolado e genial que descobre algo, o significado atribuído ao termo está associado à noção de que as descobertas científicas são produto do trabalho coletivo dos cientistas ao longo de um período. Explicitando-se os esforços, percalços, dúvidas e controvérsias que envolvem o desenvolvimento de um novo conceito, indo de encontro ao sentido da palavra proposto por Kuhn [77]. Deve-se advertir ainda sobre o equívoco de que descobrir algo seja um ato simples e único, atribuído a um indivíduo em alguma época específica. Entende-se que descobrir algo corresponde “*a um desenvolvimento complexo que se estende tanto no espaço como no tempo*” [76].

A descoberta científica, semelhante a uma realização, surge em diferentes lugares e momentos através dos esforços de vários colaboradores, que após o compartilhamento de ideias e sua discussão crítica, organicamente se estabelece na consciência comunitária. As grandes descobertas sobre o cosmos no século passado até hoje em dia, exigiram o movimento articulado de observação, desenvolvimento de instrumentos, teoria, intuição e um pouco de acaso. Comumente vê-se nomes de cientistas atribuídos à descoberta da matéria escura, contudo, é incerto apontar apenas uma pessoa como a responsável por tal feito, seja por haver poucas evidências ou pela complexidade inerente à sua determinação. Na opinião do filósofo e historiador da Ciência William Vanderburgh, “*Dado o tempo que a comunidade astronômica levou a aceitar a evidência da matéria escura, é razoável dizer que nenhum cientista foi o descobridor*” [34].

Partindo de uma leitura não anacrônica da história do episódio, compreende-se que seja mais importante tentar destacar os cientistas que contribuíram à descoberta científica, ao invés de apontar indevidamente personagens específicos da HC como um único responsável pelo grande feito. Percebe-se ainda que as contribuições daqueles cujo trabalho foi injustamente negligenciado devem ser reconhecidas. No que diz respeito à história da descoberta da matéria escura, Vera Rubin teve papel fundamental para a consolidação da sua existência como constituinte do Universo e para os estudos que buscavam entendê-la. Essas valiosas contribuições, fazem com que a cientista seja considerada como uma das principais

personagens do episódio científico e, portanto, é essencial que suas contribuições sejam relatadas e divulgadas.

Após a identificação da anomalia – curvas de rotação planas e não Keplerianas para as galáxias – a matéria escura não foi aceita de modo imediato e unânime como ente que compõe o Universo. Os cientistas por muito tempo acreditaram que a apuração dos resultados das pesquisas que expunham as lacunas do arsenal teórico seria decorrente dos instrumentos observacionais, que poderiam gerar incertezas nos dados espectrais. Essa opinião estava amparada no fato de que não podiam observar diretamente o que estava acontecendo nas regiões de galáxias e, além disso, de que a radioastronomia era uma disciplina científica relativamente nova, fazendo com que os cientistas se sentissem inseguros com os próprios dados. Embora as evidências tenham sido construídas durante anos e em frentes de pesquisa diferentes, muitos investigadores acreditavam que não faltava massa alguma no Universo, seguindo seus precedentes e compromissados com o paradigma.

Durante o episódio de descoberta da matéria escura proliferaram diferentes versões de teorias que buscavam explicar o que era verificado. Isto evidencia que a Ciência tem em sua essência “problemas” sem soluções imediatas, abordados de diferentes maneiras ao longo do tempo, e cujas “soluções” provisórias são construídas pelos esforços dos cientistas em abordá-los. Esses conhecimentos provisórios ou que sabemos que sofrem modificações com o tempo, possibilitaram que os cientistas prosseguissem em suas pesquisas sobre a matéria escura. Ao se depararem com a anomalia no paradigma, o raciocínio de alguns dos cientistas embasava-se no argumento teórico de que algo – matéria escura – deveria existir para explicar a inexistência de outra coisa – a instabilidade do disco galáctico, por exemplo – mas por não haverem provas contundentes que corroborassem a hipótese, a comunidade científica em geral exigia a apresentação de maiores evidências para que fosse então confirmada. Outros grupos de cientistas apresentaram como solução a possibilidade de que houvesse uma grande quantidade de objetos celestes – estrelas pouco massivas ou remanescentes de estrelas grandes e supermassivas mortas – que exerciam influência gravitacional, mas não podiam ser visualizados. Mas com o tempo, a hipótese foi descartada por não constituir a melhor explicação à anomalia.

Quando a matéria escura é adicionada à lista de elementos que compõem o Universo, modifica-se o que se sabia até então sobre o conceito basilar de matéria. O processo de aceitação dos resultados das pesquisas exigiu tempo e ainda mais evidências para que os cientistas se convencessem. Como sumariza Rubin, “*Pensávamos que estávamos estudando o Universo [...] Agora sabemos que estávamos estudando apenas uma pequena fração disso*” [78]. Essa pequena fração era aquela iluminada por estrelas, gás e poeira, a outra parte, constitui-se de algo totalmente diferente, que não pode ser observado. Do final da década de 1930 até os anos de 1950 houve um período de hiato na pesquisa sobre a matéria escura. Em

1940, o astrônomo e cosmólogo Erik Holmberg expressou dúvidas quanto à sua existência [79]:

Não parece ser possível aceitar as altas velocidades [nos aglomerados de galáxias de Virgem e Coma] como pertencentes a membros do aglomerado, a menos que suponhamos que uma grande quantidade de massa – a maior parte da massa total do aglomerado – é proveniente de um material escuro distribuído entre os membros do aglomerado – uma suposição improvável.

Nesse cenário, os cientistas podiam apresentar explicações errôneas frente aos resultados de pesquisa, com o tempo e amadurecimento das ideias, isso pôde ser mais facilmente esclarecido. Vera Rubin relata que no ano de 1967, ao se deparar com os resultados da curva de rotação plana para as galáxias, teve um pensamento precipitado: “*deve haver algum mecanismo para acelerar estrelas que se moviam muito lentamente ou desacelerar estrelas que se moviam muito rápido*” [46], porém, essa primeira opinião rapidamente foi descartada pela cientista.

Nota-se, portanto, a dificuldade em promover o convencimento na comunidade científica, principalmente para a aceitação de algo que existe, mas não pode ser observado. Esses aspectos certamente influenciaram no tempo em que a dúvida da presença ou não da matéria escura no Universo persistiu na Ciência. Segundo Kuhn, as características dos episódios de descobertas incluem [77]:

[...] a consciência prévia da anomalia, a emergência gradual e simultânea de um reconhecimento tanto no plano conceitual como no plano da observação e a consequente mudança das categorias e procedimentos paradigmáticos – mudança muitas vezes acompanhada por resistência.

Sobre o que finalmente fez os cientistas se convencerem da existência da matéria escura, na opinião de Rubin [15]

A mudança veio de muitas direções [...] Quando o conceito de um potencial gravitacional diferente, não definido pela luz, surgiu, foi meio chocante. A ideia de que quando pensávamos que estávamos estudando o Universo, estávamos apenas estudando 5% do Universo era incrível. Demorou um pouco para que todos aceitassem o fato de que praticamente tudo o que aprendemos em Astronomia foi aprendido por meio de fótons. Há algumas exceções – raios cósmicos, alguns neutrinos, algumas coisas que passam e que não são fótons. Mas praticamente tudo o que aprendemos sobre o Universo, aprendemos através dos fótons. De repente, tivemos de

compreender que ninguém jamais nos prometeu que toda a matéria irradiaria fótons – que grande parte do cosmos poderia ser escura. Isso amplia sua visão.

Lentamente, a comunidade científica ligada às áreas da Astronomia, Astrofísica e Cosmologia, passou a reconhecer que o Universo poderia conter mais elementos do que aparentava, ao adotar a existência da matéria escura ao paradigma newtoniano. A quantidade inegável de dados e o amplo estudo sobre as inesperadas velocidades obtidas para as galáxias e seus componentes exigiam uma explicação que, finalmente, pôde ser encontrada ao admitir-se a presença de uma grande quantidade de matéria escura no Universo. No entanto, esse reconhecimento está atrelado aos seus efeitos gravitacionais, que não podem ser explicados pela matéria ordinária e, não fornecem informações sobre a sua natureza, que ainda é desconhecida.

A matéria escura não advém de meras suposições e sim dos seus observáveis efeitos gravitacionais sobre a matéria visível, o que a diferencia diametralmente do famoso episódio do éter no século XIX – meio hipotético no qual a luz se propagava. Destarte, os avanços nas pesquisas sobre matéria escura também possibilitaram o progresso de outros assuntos como a maior compreensão sobre a composição, evolução e processo de formação do cosmos. A astrônoma Sandra Faber afirma que o trabalho desenvolvido por Rubin e Ford e demais colaboradores de pesquisa [80]:

[...] abriu corajosamente o assunto, as grandes irregularidades na expansão cósmica fazem agora parte da tradição cósmica padrão. Na verdade, são induzidos pelas massas muito maiores dos superaglomerados de galáxias devido aos seus grandes componentes de matéria escura.

Os trabalhos de Rubin foram imprescindíveis para a redefinição do que se compreendia do cosmos. Mesmo quando não recebeu o reconhecimento externo dos seus resultados, Rubin continuou seus estudos sobre as galáxias, evidenciando um fator inerentemente científico, mas que nem sempre é reconhecido como tal, a persistência do cientista. A escolha e análise crítica dos dados observacionais feita pela cientista durante sua pesquisa certamente desempenharam um importante papel no episódio de descoberta. Seus dados espectrais revelaram a onipresença das curvas de rotação planas para as galáxias, corroborando a hipótese da existência da matéria escura. O fato das estrelas e o gás galáctico girarem com velocidade semelhante mesmo a distâncias variadas do núcleo foi descrito como uma descoberta genuína por Peebles, – laureado com o prêmio Nobel de Física em 2019 – acrescentando que “*Foram Rubin e Ford que descobriram a universalidade, ou quase universalidade, das curvas de rotação planas*” [81].

Com o tempo, cada vez mais espectros obtidos traziam os mesmos resultados inegáveis, fazendo com que os teóricos passassem a aderir à matéria escura como solução para explicá-los. Como discorreu Rubin, “*as pessoas compreenderam que se quiséssemos salvar as Leis de Newton, teríamos de ter muito mais matéria que não fosse luminosa*” [82]. Ainda assim, os problemas de pesquisa não foram suplantados, outras questões estão em aberto.

Sobre a constituição da matéria escura, ainda permanecem dúvidas e uma grande variedade de teorias. A hipótese das partículas fundamentais, por exemplo, é frequentemente contestada por ser postulada sem apoio à detecção experimental. Isto posto, escancarar as concepções errôneas na imagem da Ciência é um dos papéis relevantes dos episódios de descoberta, que muitas vezes têm sua importância medida pela métrica do impacto e extensão que a sua anomalia prenuncia [77]. Como comentou Faber em conjunto com o astrônomo James Gallagher em 1979 na *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, apesar das incertezas, dos erros e outros problemas a serem resolvidos, “*é provável que a descoberta da matéria invisível perdure como uma das principais conclusões da Astronomia moderna*” [83].

6. Considerações Finais

As pesquisas de Rubin, assim como de outros cientistas que investigaram a matéria escura ao longo do século XX abrangem muito mais do que um catálogo de artigos. No caso da astrônoma, sua contribuição no desenvolvimento desse conhecimento científico foi elencada de diferentes formas. Em 2013, a organização *American Physical Society* fez uma homenagem “*Em reconhecimento à pesquisa pioneira de Vera C. Rubin e W. Kent Ford Jr., cujas medições das curvas de rotação galáctica forneceram evidências da existência de matéria escura*” [84]. Após o falecimento de Vera Rubin em dezembro de 2016, sua pesquisa foi reconhecida pela revista *Nature* e pelo jornal *Washington Post* como responsável pela confirmação da existência da matéria escura [85, 86]. No entanto, o jornal *Los Angeles Times* optou por dizer que ela “*encontrou evidências*” [87] de matéria escura distribuída em halos ao redor das galáxias. O jornal *The New York Times* cita a explicação de Ostriker de que o trabalho de Vera certificou a maioria dos astrônomos da existência da matéria escura, embora “*ajudasse o fato de que, ao mesmo tempo, a Física teórica estava explodindo com novas ideias*” [88].

Sabe-se que as evidências observacionais de Vera Rubin não foram únicas, contudo, suas pesquisas ao longo de pelo menos três décadas foram fundamentais para que aqueles que duvidavam da existência da matéria escura passassem a se convencer dela. O episódio científico de descoberta da matéria escura ofereceu ricas discussões sobre elementos epistemológicos a partir da análise e interpretação dos fatos pelos pressupostos de Thomas

Kuhn, logo, pode se considerar que a introdução do tema nessa perspectiva é uma possibilidade para que seja desenvolvida uma melhor compreensão da NdC. Alguns dos principais conceitos da teoria kuhniana – “ciência normal”, “paradigma”, “anomalia” e “descoberta científica” – puderam ser elencados realizando-se um paralelo com os acontecimentos envolvidos no obstáculo ao conhecimento científico pela experiência dos cientistas que se incumbiram de estudá-lo.

Sabendo-se que as atividades de educação e divulgação científica podem ser subsidiadas pela investigação da história da Astronomia, Astrofísica e Cosmologia, acredita-se que a pesquisa aqui desenvolvida traga contribuições para o Ensino de Física em pelo menos três aspectos. O primeiro refere-se à discussão histórica acerca do desenvolvimento dos conhecimentos sobre matéria escura, destacando a relevância de abordar temas da FMC [12]. Explorar temas relevantes e atuais da FMC tem o potencial de despertar a curiosidade e o interesse dos estudantes que estão imersos em uma cultura tecnológica, informatizada e digital, podendo ainda ser inspiração para carreiras nas áreas de Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática. Especificamente o ensino sobre o episódio da matéria escura, ao tratar de fenômenos não observáveis, oportuniza o estímulo ao pensamento abstrato e desafia os estudantes a refletirem sobre o papel da Ciência em compreender com mais profundidade questões fundamentais na formação e evolução do Universo, bem como a influência desse tipo de questão na construção da nossa visão de mundo atual.

O segundo aspecto diz respeito ao destaque dado à cientista Vera Cooper Rubin, que através de suas pesquisas contribuiu para o progresso científico na sua área de estudo, apesar das barreiras e dificuldades enfrentadas em toda a sua trajetória iniciando ainda na escola, algo comum a inúmeras outras mulheres nas ciências. Desde criança, Vera já demonstrava inclinação para a área científica, e relata ter sido desestimulada pelo seu professor de ciências do ensino médio [82]. Foi a única mulher a obter graduação em Astronomia no *Vassar College* no ano de 1948 – uma instituição exclusivamente feminina. Logo após graduar-se, teve negado seu pedido para ingressar na Universidade de Princeton para realizar seus estudos de pós-graduação pelo fato de que mulheres não poderiam ter acesso a essa prestigiosa instituição em áreas como Física e Astronomia [15].

Ao longo de sua vida, a astrofísica foi uma defensora ativa da representatividade feminina em sua área, enfrentando situações discriminatórias e desenvolvendo estratégias com os recursos disponíveis para que outras mulheres cientistas pudessem alcançar seu pleno potencial, assim como os colegas homens [16]. Reconhecer identidades e contribuições dessas personagens que contribuíram com a construção da Ciência, apesar dos desafios e obstáculos enfrentados, possibilita que professores e alunos compreendam o papel da diversidade de

pessoas no empreendimento científico e a importância da incorporação de políticas de acesso e permanência para populações sub-representadas nas ciências.

O terceiro aspecto consiste no potencial de discussões sobre NdC que o episódio de descoberta da matéria escura pode fomentar nas aulas de Física. Por ter sido um longo processo de construção de conhecimento e que ainda está em aberto, compreende-se que os aspectos sobre a NdC presentes nesse episódio científico não são estanques àqueles apontados nas reflexões epistemológicas deste trabalho. Sugere-se como elemento de discussão complementar sobre o episódio: demonstrar a importância das comunidades científicas na manutenção e reavaliação do paradigma; a interação, robustez e atuação das comunidades científicas; disposição e resistência em reconhecer as deficiências do paradigma vigente; relevância dos problemas na Ciência; o papel do desenvolvimento das simulações nas pesquisas sobre matéria escura e o peso dos resultados que foram inferidos delas em comparação aos dados rádio astronômicos; e a possibilidade de reconstrução da compreensão sobre a estrutura das galáxias.

Outrossim, na interpretação exposta neste trabalho, entende-se que a matéria escura é coerente com o paradigma newtoniano e sua proposição surge como solução aos resultados anômalos para o movimento, distribuição de massa, forma, entre outras propriedades das galáxias, ao passo que acaba afetando o paradigma da composição de matéria no Universo, que pode agora ser invisível. Reconhece-se ainda que a revolução científica, na definição de Kuhn, é algo duradouro na HC. Como indicado pelo físico Max Planck, “*uma nova verdade científica não triunfa convencendo seus oponentes e fazendo com que vejam a luz, mas porque seus oponentes finalmente morrem e uma nova geração cresce familiarizada com ela*” [77]. Em outras palavras, mesmo imersos às evidências e ao ambiente de estruturação de um novo paradigma, nem sempre os cientistas aceitam o conhecimento científico proveniente da transformação na estrutura conceitual da Ciência. A revolução científica é um processo longo que, por sua magnitude e impacto nas comunidades científicas, ocorre poucas vezes na HC. Contudo, Vanderburgh reconhece o episódio de descoberta da matéria escura como o propulsor de uma revolução científica. O filósofo e historiador parte da elaboração de duas classes possíveis de soluções gerais para a matéria escura [34]:

(1) *há muito mais massa em sistemas astrofísicos de grande escala do que pode ser detectada por qualquer meio direto; ou (2) nossa melhor teoria da gravidade, a Teoria Geral da Relatividade de Einstein, não se aplica a esses sistemas e, portanto, precisa ser substituída. Na primeira opção, o excesso de massa fica ‘escuro’ no sentido que não emite nem absorve radiação eletromagnética em qualquer comprimento de onda. Esta é*

uma das razões para pensar que o excesso de massa provavelmente não é qualquer forma de matéria com a qual já estamos familiarizados (prótons, nêutrons, etc.). Na segunda opção, alguma nova teoria será necessária para substituir a Relatividade Geral como a teoria descrevendo interações gravitacionais que ocorrem em distâncias iguais ou superiores do que o raio de uma galáxia.

Para concluir que [34]:

Ambas as opções (1) e (2) são excitantes: seja qual for o caminho que a discrepância dinâmica seja finalmente resolvida, encontramos-nos potencialmente agora no limiar de uma revolução científica kuhniana, seja na física da matéria ou na teoria da gravidade. Historiadores, sociólogos e filósofos da Ciência estão, portanto, em condições de assistir a uma revolução científica tal como acontece – se apenas o mundo natural e a engenhosidade humana conspirarem para apresentar uma solução viável para a discrepância dinâmica.

Como indicado na defesa supracitada, a resposta sobre se passamos por uma revolução científica ou se uma está para acontecer, dependerá além dos esforços intelectuais humanos, de tempo e disposição da natureza em esclarecer as questões ainda em aberto sobre a matéria escura. Kuhn declara que “a descoberta de um novo tipo de fenômeno é necessariamente um acontecimento complexo, que envolve o reconhecimento tanto da existência de algo, como de sua natureza” [77]. Apesar de não sabermos do que é feita a matéria escura, sua natureza é percebida por sua ação gravitacional sobre a matéria ordinária/visível/bariônica.

No sentido de promover discussões sobre a NdC, atentando a uma visão mais crítica sobre as relações de Gênero e Ciência, apesar de ter sido reconhecida por diversos prêmios ao longo de sua trajetória como pesquisadora, Vera Rubin, tal qual Chien-Shiung Wu e Jocelyn Bell Burnell, cientistas que também fizeram contribuições inestimáveis para a Ciência, foi relegada à láurea do Prêmio Nobel [8, 9].

Como observou Lisa Randall “De todos os grandes avanços na Física durante o século XX, este certamente deveria estar no topo, tornando-o merecedor do prêmio mais proeminente do mundo nesta área” [89]. Os que se opunham à sua nomeação justificaram que a cientista não o merecia por não ter sido a primeira astrônoma a mostrar as curvas de rotação planas das galáxias, a principal evidência indireta da existência de matéria escura [17]. De fato, Rubin foi apenas uma dentre os muitos cientistas que trabalharam para solucionar o enigma da matéria escura, porém, seu papel de destaque esteve em oferecer os resultados suficientemente completos para convencer a comunidade de astrônomos

de que as curvas de rotação planas eram reais. Outro motivo apresentado seria por conta da matéria escura ser um conceito postulado, cuja natureza exata ainda é desconhecida [17].

Porém, pela descoberta da energia escura, que explica a expansão acelerada do Universo, foi atribuído o prêmio Nobel em 2011, mesmo os cientistas não a compreendendo completamente. Ainda que os dados observacionais que forneceram evidências da existência de matéria escura sejam análogos àqueles que mostraram a expansão acelerada do Universo, indicando a existência de energia escura, nenhum pesquisador recebeu a honraria por sua descoberta. Longe de ser um acontecimento isolado, a negligência¹⁰ da instituição do Prêmio Nobel, principalmente com as mulheres cientistas, é algo já apontado em pesquisas sobre a HC [6, 9]. Isto posto, uma investigação que busque problematizar, analisar e compreender a trajetória de uma cientista que se destacou na pesquisa, em particular a história da astrônoma Vera Rubin, preocupando-se em sinalizar o contexto de sub-representação das mulheres nos resultados das ciências e em proporcionar pertinentes discussões sobre Gênero e Ciência, parece profícua [91]. O estudo biográfico e análise de aspectos da trajetória acadêmica de Vera Rubin a partir da perspectiva de gênero é discutido em Medeiros e Ferreira [92].

Em suma, aos cientistas contemporâneos cabe a ambiciosa tarefa de desenvolver tecnologias de detecção capazes de mapear e estudar essa matéria onipresente que não se revela facilmente, reconhecendo que terão como subsídio dados de apenas 5% do Universo que é luminoso [15]. Uma das homenagens à Vera Rubin, o recente telescópio que leva o seu nome – *Vera C. Rubin Observatory* – têm como objetivo primordial responder muitas das questões que foram iluminadas pelo seu trabalho, como: O que é matéria escura? Onde está a matéria escura? E, como a matéria escura está distribuída no Universo? Nas próprias palavras de Rubin, parafraseando o escritor Marcel Proust, “*As verdadeiras descobertas astronômicas vêm de olharmos com novos olhos e de fazermos novas perguntas*” [15].

Referências

- [1] M.C.D. Neves, Revista Ciência & Educação **5**, 75 (1998).
- [2] A. Vital e A. Guerra, Revista Ensaio, Belo Horizonte **19**, 3 (2017).
- [3] B. Heerdt e I.L. Batista, Investigações em Ensino de Ciências **21**, 30 (2016).
- [4] I. Gurgel, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **37**, 333 (2020).
- [5] L. Schiebinger, *O feminismo mudou a ciência* (EDUSC, Bauru, 2001).

¹⁰ Segundo a historiadora da Ciência Margaret Rossiter [90] esse fenômeno é chamado de “Efeito Matilda” e explica os casos em que a participação das mulheres na atividade científica tem seu mérito diminuído ou atribuído a um homem em publicações e premiações, por exemplo.

- [6] M.D. Cordeiro, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **34**, 669 (2017).
- [7] P.C. Vieira, N.T. Massoni e A. Alves-Brito, Revista Brasileira de Ensino de Física **43**, e20210028 (2021).
- [8] A.M. Maia Filho e I. Silva, Revista Brasileira de Ensino de Física **41**, e20180182 (2019).
- [9] L.N. Pires e L.O.Q. Peduzzi, Investigações em Ensino de Ciências **27**, 108 (2022).
- [10] L.O.Q. Peduzzi e A.C. Raicik, Investigações em Ensino de Ciências **25**, 19 (2020).
- [11] B.A. Moura, Revista Brasileira de História da Ciência **7**, 32 (2014).
- [12] T.G. Nascimento e M.A.S. Alvetti, Ciência & Ensino **1**, 29 (2006).
- [13] A.B. Henrique, *Discutindo a Natureza da Ciência a partir de episódios da História da Cosmologia*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo (2011).
- [14] R.R.P. Teixeira e D.C.P. Souza, ACTIO: Docência em Ciências **7**, 1 (2022).
- [15] V.C. Rubin, *Bright Galaxies, Dark Matters* (Springer, New York, 1996), v. 1.
- [16] J. Mitton e S. Mitton, *Vera Rubin: A Life* (Belknap Press of Harvard University Press, Londres, 2021), v. 1.
- [17] A.J. Yeager, *Bright Galaxies, Dark Matter, and Beyond: The Life of Astronomer Vera Rubin* (The MIT Press, Londres, 2021), v. 1.
- [18] G. Bertone e D. Hooper, American Physical Society: Review of Modern Physics **90**, 1(2018).
- [19] J.M. Michell, Philosophical Transactions of the Royal Society **74**, 35 (1784).
- [20] F.W. Bessel, Royal Astronomical Society **6**, 136 (1844).
- [21] D. Krajinovic, Astronomy and Geophysics **57**, 1 (2016).
- [22] H. Poincaré, Popular Astronomy **14**, 475 (1906).
- [23] E. Öpik, Moscow University **21**, 1 (1915).
- [24] J.C. Kapteyn, The Astrophysical Journal **55**, 302 (1922).
- [25] H. Shapley, Publications of the Astronomical Society of the Pacific **31**, 261 (1919).
- [26] J.H. Jeans, Royal Astronomical Society **52**, 122 (1922).
- [27] A. Hernández-Arboleda e D.C. Rodrigues, Cadernos de Astronomia **2**, 6 (2021).
- [28] F. Zwicky, General Relativity and Gravitation **41**, 222 (2009).
- [29] E. Hubble e M.L. Humason, Astrophysical Journal **74**, 43 (1931).
- [30] J. Kepler, em: *The Harmony of the World*, traduzido por E.J. Aiton, A.M. Duncan e J.V. Field (American Philosophical Society, Filadélfia, 1997).
- [31] I. Newton, em: *Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, traduzido por A.K.T. Assis e F.D. Joly (EDUSP, São Paulo, 2012).
- [32] S. Smith, Astrophysical Journal **83**, 23 (1936).
- [33] H.W. Babcock, Lick Observatory bulletin **19**, 41 (1939).
- [34] W.L. Vanderburgh, Journal for the History of Astronomy **45**, 141 (2014).
- [35] L.S. Sparke e J.S. Gallagher III, *Galaxies in the Universe: An Introduction* (Cambridge University Press, Nova Iorque, 2007), v. 1.
- [36] J.H. Oort, Astrophysical Journal **91**, 273 (1940).
- [37] F. Zwicky, The Astrophysical Journal **86**, 217 (1937).
- [38] M. Schwarzschild, The Astronomical Journal **59**, 274 (1954).
- [39] G.R. Burbidge, Physical Review **107**, 269 (1957).
- [40] D. Halliday, *Fundamentos da Física* (LTC, Rio de Janeiro, 2012), v. 1.
- [41] H.C. Van de Hulst, E. Raimond e H. Van Woerden, Bulletin of the Astronomical Institutes of The Netherlands **14**, 1 (1957).
- [42] M. Schmidt, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands **14**, 17 (1957).
- [43] E.M. Burbidge, G.R. Burbidge e K.H. Prendergast, Astrophysical Journal **131**, 282 (1960).
- [44] J. Neyman, T. Page e E. Scott, The Astronomical Journal **66**, 533 (1961).
- [45] V.C. Rubin, J. Burley, A. Kiasatpoor, B. Klock, G. Pease, E. Rutsheidt e C. Smith, The Astronomical Journal **67**, 491 (1962).
- [46] V.C. Rubin, The Annual Review of Astronomy and Astrophysics **49**, 1 (2011).
- [47] M.S. Roberts, The Astrophysical Journal **144**, 639 (1966).
- [48] P.J.E. Peebles e R.B. Partridge, Astrophysical Journal **148**, 713 (1967).
- [49] V.C. Rubin e W.K. Ford, The Astrophysical Journal **159**, 379 (1970).
- [50] S.T. Gottesman, R.D. Davies e V.C. Reddish, The Royal Astronomical Society **133**, 359 (1966).
- [51] K. Ford, V.C. Rubin e M.S. Roberts, Astronomical Journal **76**, 22 (1971).
- [52] J.P. Ostriker e P.J.E. Peebles, The Astrophysical Journal **186**, 467 (1973).
- [53] D. Mihalas e J. Binney, *Galactic Astronomy: Structure and Kinematics* (W.H. Freeman and Company, Nova Iorque, 1981).
- [54] J.P. Ostriker, P.J.E. Peebles e A. Yahil, The Astrophysical Journal **193**, L1 (1974).
- [55] J. Swart, The Renaissance of General Relativity in Context **16**, 1 (2019).
- [56] J. Einasto, A. Kaasik e E. Saar, Nature **250**, 309 (1974).
- [57] E.P. Hubble, The Astrophysical Journal **64**, 321 (1926).
- [58] V.C. Rubin, W.K. Ford e N. Thonnard, The Astrophysical Journal **225**, L107 (1978).
- [59] A. Bosma, *The Distribution and Kinematics of Neutral Hydrogen in Spiral Galaxies of Various Morphological Types*. Tese de Doutorado, Universidade de Groningen, Groningen (1978).
- [60] V.C. Rubin, W. Ford e N. Thonnard, The Astrophysical Journal **238**, 471 (1980).
- [61] B.T. Draine, *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium* (Princeton University Press, Princeton, 2011), v. 1.
- [62] D. Burstein, V.C. Rubin, N. Thonnard e W.K. Ford, The Astrophysical Journal **253**, 70 (1982).
- [63] V.C. Rubin, W.K. Ford, N. Thonnard e D. Burstein, The Astrophysical Journal **261**, 439 (1982).
- [64] V.C. Rubin, D. Burstein, W.K. Ford e N. Thonnard, The Astrophysical Journal **289**, 81 (1985).
- [65] G. Steigman e M.S. Turner, Nuclear Physics B **253**, 375 (1985).

- [66] J. Ipser e P. Sikivie, *Physical Review Letters* **50**, 12 (1983).
- [67] M.A. Milgron, *The Astrophysical Journal* **270**, 365 (1983).
- [68] N.W. Lima, A. Alves-Brito e M.M. Nascimento, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20210382 (2022).
- [69] I.C. Moreira, *Revista Educação Pública* **2**, 1 (2005).
- [70] M.D. Maia, A.J.S. Capistrano e D. Muller, *International Journal of Modern Physics* **18**, 1273 (2009).
- [71] M.D. Maia e E.M. Monte, *Physics Letters A* **297**, 9 (2002).
- [72] R. Maartens e K. Koyama, *Living Reviews in Relativity* **7**, 7 (2004).
- [73] L. Randall e R. Sundrum, *Physical Review Letters* **83**, 1 (1999a).
- [74] L. Randall e R. Sundrum, *Physical Review Letters* **83**, 1 (1999b).
- [75] I. Ferreras, *Fundamentals of Galaxy Dynamics: Formation and Evolution* (UCL Press, Londres, 2019).
- [76] T.S. Kuhn, *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change* (The University of Chicago Press, Chicago, 1997).
- [77] T.S. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Perspectiva, São Paulo, 2018).
- [78] V.C. Rubin, *Highlights of Astronomy* (Springer, Heidelberg, 1986).
- [79] E. Holmberg, *Carnegie Institution of Washington* **633**, 1 (1940).
- [80] S. Faber, *Scientific American*, 29 de dezembro de 2016, disponível em: <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/vera-rubins-contributions-to-astronomy/>.
- [81] J. Peebles, em: *Vera's Challenge to Modern Cosmology* (Nova York, 2019).
- [82] V.C. Rubin, *Vera Rubin: interview by David DeVorkin and Ashley Yeager* (American Institute of Physics, Nova York, 2007).
- [83] S.M. Faber e J.S. Gallagher, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **17**, 135 (1979).
- [84] American Physical Society, Carnegie Institution, Department of Terrestrial Magnetism, 8 de novembro de 2013, disponível em: <https://www.aps.org/funding-recognition/historic-sites/carnegie-institution>.
- [85] N.A. Bahcall, *Nature* **542**, 1 (2017).
- [86] M. Schudel, *Vera Rubin: Astronomer Who Proved Existence of Dark Matter Dies at 88* (Washington Post, Washington, 2016).
- [87] H. Blume, *Pioneering Astronomer Vera Rubin Dies at 88: She Helped Find Evidence of Dark Matter* (Los Angeles Times, California, 2016).
- [88] D. Overbye, *Vera Rubin: Opened Doors in Astronomy, and for Women* (New York Times, New York, 2016).
- [89] L. Randall, *Why Vera Rubin Deserved a Nobel* (The New York Times, New York, 2017).
- [90] M.W. Rossiter, *Social Studies of Science* **23**, 325 (1993).
- [91] L. Schiebinger, *História, Ciências, Saúde* **15**, 269 (2008).
- [92] J. Medeiros, G.K. Ferreira, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **41**, 598 (2024).