

Material Suplementar para “Da Lei de Titius-Bode ao embate entre a Matéria Escura e a Dinâmica de Newton Modificada: uma trajetória epistemológica pela Astronomia”

Apêndice 1 - Material de Apoio para a Intervenção Didática¹

A1. Diálogo Inicial: Astronomia e Astrofísica: pode o conceito de ciência mudar com o tempo?

Muitos pensadores admitem que a ciência, como produção humana, é historicamente construída, e, portanto, econômica, política, cultural e socialmente limitada no espaço e no tempo. Neste sentido, o conceito de ciência, é dinâmico, variando com o tempo [1, 2]. Entre as ciências básicas, a Astronomia talvez seja um dos exemplos mais interessantes para refletirmos sobre essa interpretação dinâmica do conceito de ciência ao longo do tempo. Poderíamos citar inúmeros casos na História da Astronomia que serviriam, sem alarde, para ratificar essa premissa. Apenas para citar um dos mais emblemáticos, devemos lembrar que até o século XVII não havia distinção entre Astrologia e Astronomia. Sabemos que, para a comunidade científica contemporânea, Astronomia é considerada ciência enquanto Astrologia é rotulada como pseudociência.

Vamos, ao longo deste texto, retomar a discussão acerca do que é ciência, não ciência, pseudociência, metafísica. Por ora, gostaríamos, também, de lembrar que a definição de Astrofísica surge, historicamente e de certa maneira, como uma afronta à maneira positivista de vislumbrar o mundo. Na visão positivista do Universo (ver detalhes mais adiante neste texto), jamais cientistas poderiam, por exemplo, conhecer a composição química de planetas, estrelas e outros objetos celestes. Como a ciência positivista é intrinsecamente definida pela realização canônica da experimentação, Auguste Comte, um dos mais proeminentes positivistas da história, sentenciou no século XIX que jamais se poderia realizar um experimento para saber, por exemplo, de que era constituído os astros. Até aquele momento, a Física Clássica parecia ter respondido a todas as perguntas. O mundo era simplesmente cartesiano, baseado em leis causais. A Astronomia explicava bem o relógio do mundo e respondia, com precisão, onde (posição) e quando (tempo) um astro poderia ser encontrado.

No final daquele mesmo século, no entanto, o arcabouço teórico sólido por trás da espectroscopia, ou seja, o estudo da dispersão da luz, já colocava por terra as ideias positivistas acerca de se conhecer a constituição dos objetos celestes apesar de suas distâncias astronômicas à Terra. A Astrofísica nasce, portanto, na virada do século XIX e se ratifica como proeminente campo de investigação da Física e da Astronomia no início do século 20 com o advento da Mecânica Quântica, da Relatividade Especial e Geral e os avanços em Física Nuclear. Cabia à Astrofísica ampliar os horizontes científicos da Astronomia clássica. Caberia a ela romper os limites de se conhecer apenas as variáveis posição e tempo. Caberia a ela se perguntar para além

¹ Material de apoio desenvolvido para o curso de extensão Astrofísica e Epistemologia Contemporânea.

de “onde” e “quando” e colocar à mesa da ciência perguntas “como” e “por que”. Hoje sabemos que a Astrofísica é uma ciência de fronteira do conhecimento que, para avançar, será preciso “dialogar” mais ainda com outros campos do conhecimento. Além disso, a Astrofísica contemporânea tem nos colocado perguntas fundamentais acerca da Natureza que buscam por respostas. Entender, por exemplo, de que é constituído 95% do Universo é, talvez, um de seus objetivos mais ambiciosos no presente século e um dos maiores desafios da ciência contemporânea. Quem viver, verá!

A2. Primeira Discussão: a Lei de Titius-Bohde e o verificacionismo

No final do século XIX, o pensador brasileiro Pedro Américo [3], em seu trabalho sobre a gênese e desenvolvimento da ciência, indica que a fundação daquilo que denominamos, hoje, ciência moderna pode ser associado ao trabalho de três pensadores europeus – René Descartes, Francis Bacon e Galileu Galilei [4]. Diferentes autores contemporâneos apontam os mesmos nomes para indicar o nascimento da ciência moderna. Embora os métodos de pesquisa propostos por esses cientistas não coincidam – considera-se, de uma forma geral, que suas propostas fundamentam o que se denomina por “método científico”.

Atualmente, entretanto, quando o termo “método científico” é empregado em livros didáticos e no discurso não especializado, sua acepção normalmente pode ser associada com elementos do que havia sido proposto originalmente por Francis Bacon e que, hoje, estaria orientado ao que denominamos de Empirismo em uma versão ingênua. A visão empirista ingênua, ademais, usualmente, é associada a uma metodologia indutivista ingênua, formando o que alguns autores denominam de método empirista-indutivista ingênuo. De uma forma bem geral, podemos dizer que a versão ingênua desse sistema filosófico pode ser sintetizado em duas afirmações: “1) A fonte principal do conhecimento é a observação e 2) Há observações neutras, não carregadas de teorização, e estas devem servir de base para a ciência” [5].

O indutivismo, por sua vez, propõe que as leis físicas devem ser obtidas a partir da generalização de relações obtidas a partir de um conjunto finito de dados [5], ou seja, a partir dessa base empírica estabelecida como verdadeira (registrada fielmente através dos sentidos) pode-se derivar/induzir afirmações universais - as leis e teorias [6]. Dessa forma, pode-se imaginar que o sucesso de uma lei pode ser verificado quando a extrapolação dos dados originais permite que a lei continue sendo usada corretamente. Ou seja, a partir da lei obtida com um conjunto finito de dados, pode-se fazer previsões teóricas sobre o que deve acontecer em situações ainda não testadas. Quando as previsões são testadas e confirmadas, tem-se a validação, confirmação ou verificação da lei proposta. Por isso, essa tendência também pode ser denominada de verificacionista.

Um exemplo de como isso pode ser feito é o caso da Lei de Titius-Bohde, a qual relaciona o raio da órbita do planeta e seu ordenamento no sistema solar. Quando Titius propôs tal lei, o raio das órbitas de Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno eram conhecidas. A partir desses dados, foi possível propor o seguinte enunciado:

Normalizando o raio da órbita da Terra para 10, então o raio de todas as órbitas planetárias pode ser dado por $r_n = 4 + 3.2^n$, onde $n = -\infty$ para Mercúrio, e 0,1,2,3... para os planetas subsequentes [7, p. 1, tradução nossa].

Com essa formulação, era possível descrever os raios das órbitas dos planetas conhecidos na época de Titius, conforme mostramos na Tabela 1.

Tabela 1: Raio das órbitas dos planetas conhecidos na época de Titius e descrição da lei de Titius-Bohde. Adaptado de [7].

N	Planeta	Raio conhecido	Raio previsto pela Lei de Titius-Bode
$-\infty$	Mercúrio	3,9	4
0	Vênus	7,2	7
1	Terra	10	10
2	Marte	15,2	16
3	Ceres		28
4	Júpiter	52	52
5	Saturno	95,5	100
6	Urano		196

Para que a Lei de Titius-Bohde pudesse ser considerada correta era necessária a existência de um planeta entre Marte e Júpiter, de forma que Júpiter pudesse ser associado a $n=4$. Anos mais tarde, o asteroide Ceres não somente foi descoberto nessa região, como o raio de sua órbita foi identificado como 27,7 (enquanto a previsão teórica era 28) garantindo a validade da Lei para o sistema solar conhecido. Conforme comentamos, entretanto, o método indutivo é verificacionista, e o seu sucesso depende das previsões corretas que faz. Assim, quando Urano foi descoberto, com raio da órbita igual a 192, a Lei de Titius-Bohde consagrou-se como uma lei bem-sucedida.

Entretanto, após o período de verificação da Lei de Titius-Bohde, novos corpos celestes foram descobertos ao redor do Sol, como Netuno e Plutão. De acordo com a Lei de Titius-Bohde, os raios de suas órbitas deveriam ser 388 e 772 respectivamente. Os raios observados, entretanto, são 300,9 e 395. Este caso histórico pode ser entendido como um exemplo que levanta dúvidas sobre a eficácia do "método empirista-indutivista" de fazer ciência².

Os dois pressupostos que estabelecemos como os pilares do método empirista-indutivista, a dizer, a ausência de concepções prévias ao experimento, e a obtenção de leis a partir da generalização de dados, que, na sequência, são verificadas, foram e têm sido alvo de duras críticas ao longo do desenvolvimento da epistemologia do século XX e XXI. O episódio narrado nessa seção evidencia um desses problemas, que chamaremos de "O Problema da Indução" [6]. Discutiremos esse problema, em detalhe, e, depois, traremos outro exemplo da história da Astronomia que indica que, concepções prévias não somente não atrapalham o desenvolvimento da ciência como podem ser fonte de grandes revoluções.

Em lógica, o método dedutivo é associado ao uso de silogismos, isto é, estruturas do seguinte tipo:

Todo homem é mortal.
João é homem.
Logo, João é mortal.

As duas primeiras sentenças são chamadas premissas e última, conclusão. Se as duas premissas são verdadeiras, certamente, a conclusão também será verdadeira – propriedade do pensamento dedutivo chamada de transmissão da verdade [8, 9]. Isso acontece porque João é um caso particular de um conjunto cuja propriedade é conhecida. Isso pode ser representado pela Figura A1:

² Deve-se ressaltar que não há problemas em generalizar leis a partir de dados. O problema é considerar que uma conclusão obtida por tal método é uma verdade absoluta e imutável.

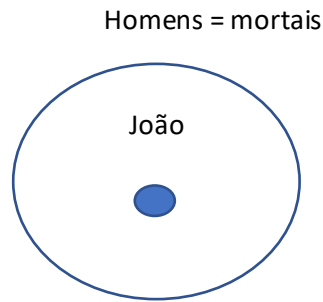


Figura A1: João é um caso particular do conjunto de homens.

No método indutivo, por outro lado, parte-se de um experimento único, sobre um determinado fenômeno, e, a partir disso, generaliza-se para todos os corpos. Mede-se, por exemplo, uma propriedade de uma barra de ferro ou de um conjunto finito de barras de ferro. A partir dos resultados obtidos, generaliza-se aquela propriedade para todas as barras de ferro. Ao contrário do pensamento dedutivo, não há nenhuma garantia que essa generalização esteja correta, pois partiu-se da propriedade de um particular para afirmar uma propriedade do conjunto todo:



Figura A2: Representação do esquema lógico subjacente ao indutivismo.

Portanto, o método indutivo faz justamente o oposto do método dedutivo. Filósofos como Hume defenderam que não há nenhum motivo para acreditarmos que o método indutivo possa ser válido. Não é porque o Sol nasceu todos os dias até hoje que ele nascerá também amanhã. Como tudo em Filosofia, o problema nunca é trivial, e existem diferentes propostas de defesa do pensamento indutivo que o reformulam em uma forma menos ingênua do que é generalizado no discurso popular. De qualquer forma, deve-se ter em mente que o indutivismo na sua forma mais ingênua não é possível de ser sustentado.

Outro ponto relacionado ao indutivismo que pode ser criticado é a noção de que o cientista, ao fazer o experimento, deve se despir de suas concepções prévias e observar o que a natureza quer dizer. Se isso fosse feito assim, a verdade é que a execução de qualquer experimento seria impossível. Ao fazer um determinado experimento, o cientista supõe quais variáveis podem ser importantes. Se não soubesse ele teria que repetir o mesmo experimento nas diferentes fases da Lua, nas diferentes épocas do ano, nas diferentes horas do dia, mudando as cores da parede da sala, em silêncio, fazendo barulho, etc. Haveria infinitas variáveis para serem analisadas [6].

Dessa forma, embora o indutivismo possa ser considerado um possível método de pesquisa, deve-se ter em mente que o cientista não chega ao experimento sem concepções

prévias, ele já possui uma teoria e uma expectativa sobre os possíveis resultados, senão não faria aquele experimento [10], e, também, que a indução não pode garantir a validade universal de uma certa relação encontrada. De qualquer forma, deve-se reconhecer que isso não significa que o indutivismo não esteja presente na ciência; é sua versão ingênua, que alega ser o único método científico e ser capaz de obter leis universais, que foi duramente criticada na epistemologia contemporânea.

Entretanto, não são apenas as concepções teóricas que permitem o avanço da ciência. Conforme discutido por Silveira [11], concepções metafísicas, isto é, visões sobre como a realidade deve ser, inspiram a ciência e muitas vezes motivam grandes revoluções. O pesquisador brasileiro aponta exemplos claros disso no caso da revolução heliocêntrica:

No meio de todos os assentos, o Sol está no trono. Neste belíssimo templo poderíamos nós colocar esta luminária noutra posição melhor de onde ela iluminasse tudo ao mesmo tempo? Chamaram-lhe corretamente a Lâmpada, o Mente, o Governador do Universo; Hermes Trimegisto chama-lhe o Deus Visível; a Electra de Sófocles chama-lhe O que vê tudo. Assim, o Sol senta-se como num trono real governando os seus filhos, os planetas que giram à volta dele. [11, p. 488]

Além de Copérnico, Kepler também trazia motivações neoplatonistas:

Em primeiro lugar, a menos que talvez um cego possa negá-lo perante ti, dentre todos os corpos do Universo, o mais notável é o Sol, cuja essência integral nada mais é que a mais pura das luzes(...), a fonte da visão, pintor de todas as cores (...), denominado rei dos planetas (...), coração do mundo (...), olho do mundo; por sua beleza, é o único que podemos considerar merecedor do Deus Altíssimo (...) [11, p. 489]

A3. Segunda Discussão: a Lei da Gravitação Universal e a visão refutacionista

A constatação das limitações do método empirista-indutivista ganhou força no pensamento epistemológico do século XX e influenciou profundamente diferentes tendências sobre a natureza da ciência, sem, entretanto, deixar de estar presente no discurso popular e nos livros didáticos. Assim, as perguntas como a ciência se desenvolve e como seria o ideal de desenvolvimento da ciência voltam a ser questionadas por diferentes pensadores.

Uma dessas propostas, que segue sendo utilizada para refletir sobre a ciência até hoje, foi realizada pelo filósofo austríaco Karl Popper, que, em oposição ao empirismo, propôs que a ciência evolui por uma sequência de conjecturas e refutações. Isto é, ao invés de partir dos dados dos experimentos, o cientista parte de conjecturas sobre o mundo, elabora proposições sobre como o mundo deve ser. Essas conjecturas podem, então, ser estruturadas usando o pensamento dedutivos para inferir conclusões que possam ser submetidas a um experimento que a teste. Popper explica, entretanto, que a concordância da teoria com o experimento não é garantia da veracidade da teoria. Isto acontece, pois o pensamento dedutivo, embora seja transmissor da verdade, não é transmissor da falsidade. Ou seja, com premissas falsas pode-se chegar a uma conclusão verdadeira. Por exemplo,

Corpos carregados eletricamente (com cargas de sinais opostos) se atraem à distância.

O Sol e a Terra são corpos eletricamente carregados.

Logo, o Sol e a Terra se atraem.

No caso mostrado, embora a conclusão seja verdadeira, as premissas são falsas. Logo, se uma teoria chega a uma conclusão que está em concordância com os dados experimentais, isso não garante que a teoria seja verdadeira. Com isso, assumindo que o método científico deve ser pautado no raciocínio dedutivo e não indutivo, Popper [12] propõe que os experimentos podem apenas refutar uma teoria, mas nunca provar que ela é verdadeira. Dessa forma, tudo que um experimento pode fazer é corroborar, fortalecer uma teoria. Mesmo assim, todo conhecimento é, em última instância, conjectural.

Além disso, para Popper, não nos interessa saber como o cientista chega nessas leis. Pode ser através de alguma analogia, crença pessoal ou intuição física – o contexto da descoberta é repleto de elementos subjetivos e nuances psicológicas. O caráter racional ou científico da teoria se dá por como ela é tratada em sua justificação.

Assim, na construção de Popper, para que uma proposição possa ser considerada científica não é necessário que ela seja comprovada; mas o que é necessário é que seja possível estabelecer um teste crucial, capaz de refutar a teoria, isto é, uma hipótese é considerada científica se ela impedir algo de acontecer de forma a poder ser testada. É a possibilidade de refutar (e não de confirmar) uma teoria que a torna científica. Se o experimento discorda da previsão teórica, a teoria científica deve ser abandonada. Se o experimento concorda, não podemos dizer que a teoria foi confirmada, apenas que ela foi corroborada. Assim, embora nunca possamos saber se chegamos à Verdade, podemos ao menos nos afastar das afirmações falsas.

Por meio desse esquema, Popper explica por que a Teoria da Relatividade Geral (TRG) pode ser considerada científica enquanto o Marxismo não. No caso da TRG, Einstein fez previsões teóricas muito precisas, de forma que era possível montar uma observação que refutasse as previsões da teoria, como a observação de uma estrela atrás do Sol em um eclipse. Se ao fazer a observação, a estrela não fosse observada, a teoria teria sido refutada. O fato de a previsão ter se confirmado, entretanto, não garante a verdade da teoria, apenas a corrobora. O Marxismo, por outro lado, fez diversas previsões, como o fato de a revolução comunista dever ter começado em um país industrializado, como a Alemanha. A revolução, entretanto, começou na Rússia – um país camponês. Diante desse fato, hipóteses *ad hoc* foram acrescentadas ao arcabouço teórico original de forma que os dados pudessem ser explicados *a posteriori*. Assim, o Marxismo consegue explicar qualquer fenômeno social, pois toda vez que uma previsão não concorda com a teoria, hipóteses adicionais são usadas de forma a explicar os dados. Ou seja, é impossível refutar o marxismo. O mesmo acontece com a astrologia, com a religião, e tantos outros temas. Quando alguém de um signo não apresenta o perfil psicológico adequado, recorre-se ao ascendente, à posição da Lua, e assim por diante, de forma que uma explicação astrológica é sempre encontrada para cada perfil estabelecido.

De forma mais específica, Popper lista quatro estratégias que costumam ser usados para evitar a refutação de uma teoria (e que só atrasam o desenvolvimento da ciência) [13]: introduzir hipóteses *ad hoc*, mudar as definições existentes, duvidar da confiabilidade do experimentador, duvidar da capacidade do teórico que não produz

ideias que podem salvar a teoria. Nosso objetivo, agora, é usar a proposta de Popper para analisar a Lei da Gravitação Universal de Newton – uma noção proposta há mais de três séculos e presente em todos os cursos de física da educação básica e do ensino superior em física e exatas. Após apresentar as conjecturas que levam à Lei da Gravitação Universal, vamos fazer o que Popper propõe – vamos submetê-la a um teste crucial que pode a corroborar ou a refutar.

Neste momento, não temos o interesse de seguir a trajetória histórica de Newton, mas somente fazer um “experimento mental” com a proposta de Popper. Para chegar à Lei da Gravitação Universal, vamos fazer as seguintes conjecturas:

- a) Existe uma força entre os corpos materiais cujo módulo só depende de suas massas e da distância entre eles, e sua direção se encontra ao longo do segmento que conecta os centros de massa desses corpos.
- b) A expressão dessa força tem caráter universal.
- c) As três leis de Newton são verdadeiras.
- d) As três leis de Kepler são verdadeiras.
- e) O módulo da aceleração centrípeta de um corpo em movimento pode ser escrito como $a_c = \frac{v^2}{R}$

Partindo da Terceira Lei de Kepler, podemos afirmar que o semieixo maior das órbitas dos planetas ao redor do Sol (R) ao cubo dividido por seu período de translação (T) ao quadrado é igual a uma constante K^3 :

$$\frac{R^3}{T^2} = K \quad (1)$$

Considerando que a força gravitacional exercida pelo Sol no planeta $F_g(S \rightarrow P)$ é a responsável por esse movimento e que ela pode ser considerada do tipo centrípeta, é possível fazer a seguinte relação:

$$F_g(S \rightarrow P) = \frac{m_p v^2}{R} = \frac{m_p 4\pi^2 R}{T^2} \quad (2)$$

Onde m_p é a massa do planeta. De (1), temos que $T^2 = KR^3$. Substituindo em (2):

$$F_g(S \rightarrow P) = \frac{m_p 4\pi^2}{KR^2} = \frac{K' m_p}{R^2} \quad (3)$$

Assim, a força do Sol no planeta é proporcional à massa do planeta e à distância inversa ao quadrado entre eles. Já que estamos procurando por uma Lei Universal, a força correspondente que o planeta faz ao Sol deve ter uma expressão simétrica:

³ Esse curso foi pensado para ser apresentado em etapas introdutórias da graduação ou voltado para o professor da educação básica. Por isso, usamos a discussão para o caso particular de órbitas circulares. A generalização para órbitas elípticas exige um aprofundamento matemático que foge ao escopo desse trabalho. Uma apresentação de tal generalização pode ser encontrada no seguinte site: <http://astro.if.ufrgs.br/kepleis/kepleis.htm>

$$F_g(P \rightarrow S) = \frac{K'' m_S}{R^2} \quad (4)$$

Onde m_S é a massa do Sol. De acordo com a Terceira Lei de Newton (4) e (3) devem ser iguais. Então:

$$\frac{K' m_P}{R^2} = \frac{K'' m_S}{R^2} \quad (5)$$

A única possibilidade para ambas as expressões na equação (5) serem iguais é reconhecendo $K' = G m_S$ e $K'' = G m_P$, onde G é uma constante de proporcionalidade, que chamamos de constante gravitacional. Então, a Lei da Gravitação Universal de Newton para dois corpos quaisquer (com massa m_1 e m_2) pode ser escrita como:

$$F_g = \frac{G m_1 m_2}{R^2} \quad (6)$$

Alcançamos o nosso primeiro objetivo, que era encontrar uma expressão para força gravitacional, a qual foi obtida a partir de cinco conjecturas. Para que nossa proposição possa ser considerada científica é necessário montar um teste crucial capaz de a refutá-la ou corroborá-la. Se essa experiência for possível, a proposição é dita científica. Se os resultados do experimento corroborarem suas previsões, a proposição pode ser considerada válida e, se os resultados do experimento contradisserem as previsões, ela deve ser refutada. Se a contradição do experimento não faz com que a proposição seja refutada, mas apenas para ser alterada por afirmações *ad hoc*, isso significa que a Lei de Newton não é científica, como o marxismo.

Uma maneira possível de testar a validade da Lei da Gravitação Universal de Newton é analisar se sua previsão para a chamada “curva de velocidade” de galáxias e outros sistemas estelares concorda com a observação astronômica.

a) Montando um experimento crucial: a curva de rotação das Galáxias

Curva de velocidade é o nome dado à distribuição da velocidade de objetos ou pontos que estão se movendo em torno de um centro ou eixo fixo em função de seu raio de rotação, ou seja, um gráfico de v (r) por r. Em um corpo rígido, como um disco circular, a velocidade de qualquer ponto é dada por:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (7)$$

Por ser um corpo rígido, sua velocidade angular (ω) é constante ao longo de todo o disco e pode ser calculada como:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (8)$$

O que nos leva a

$$v = \omega \cdot r \tag{9}$$

Neste caso, é possível perceber que a velocidade é uma função linear crescente da distância do centro.

Uma situação totalmente diferente pode ser encontrada no nosso Sistema Solar, cujo Sol não gira como um corpo rígido. As velocidades orbitais dos planetas em nosso Sistema Solar diminuem com a distância do Sol. Isso ocorre basicamente devido ao fato de que a massa do Sistema Solar está concentrada no Sol. Assim, como $F \sim 1 / r^2$, a força gravitacional que mantém um planeta em sua órbita diminui com a distância do Sol, de forma que uma força menor significa uma velocidade orbital menor. As velocidades orbitais devem cair de maneira semelhante com a distância em qualquer outro sistema astronômico cuja massa esteja concentrada em direção ao centro. Como discutido em [14], os braços espirais da Via Láctea giram como corpos rígidos, de forma que o raio de corotação encontra-se próximo à órbita solar galáctica, enquanto que o gás e as estrelas do disco galáctico apresentam rotação diferencial. E, neste caso, devemos considerar que a força gravitacional desempenha o papel de força centrípeta. Usando as expressões (3) e (6), temos:

$$\frac{Gm_1m_2}{r^2} = \frac{m_2v^2}{r} \tag{10}$$

Isolando a velocidade v , podemos encontrar,

$$v = \sqrt{\frac{Gm_1}{r}} \tag{11}$$

o que significa que a velocidade é proporcional ao inverso da raiz quadrada da distância ao centro⁴. Esta relação é válida para qualquer sistema no qual há um objeto de baixa massa em órbita de um objeto massivo, cujo centro está aproximadamente no centro da órbita.

Na Figura A3, apresentamos a curva de velocidade do nosso Sistema Solar. No eixo x, consta a distância entre o planeta e o Sol nas Unidades Astronômicas (AU) e no eixo y, representamos a velocidade dos planetas em quilômetros/segundo. Dados empíricos da velocidade média para cada planeta são representados em pontos vermelhos, enquanto a previsão matemática da Lei de Gravitação Universal de Newton é representada em uma linha azul tracejada. É possível notar que há um bom acordo entre dados empíricos e teoria. Um empirista afirmaria que a teoria é confirmada, enquanto um racionalista como Popper diria que essa teoria foi corroborada.

⁴ Novamente, reforçamos que estamos usando a aproximação de órbita circular. A velocidade de um planeta em uma órbita elíptica é variável. Assim, tem-se a aproximação de uma velocidade média obtida tomando o raio como o semieixo maior da órbita.

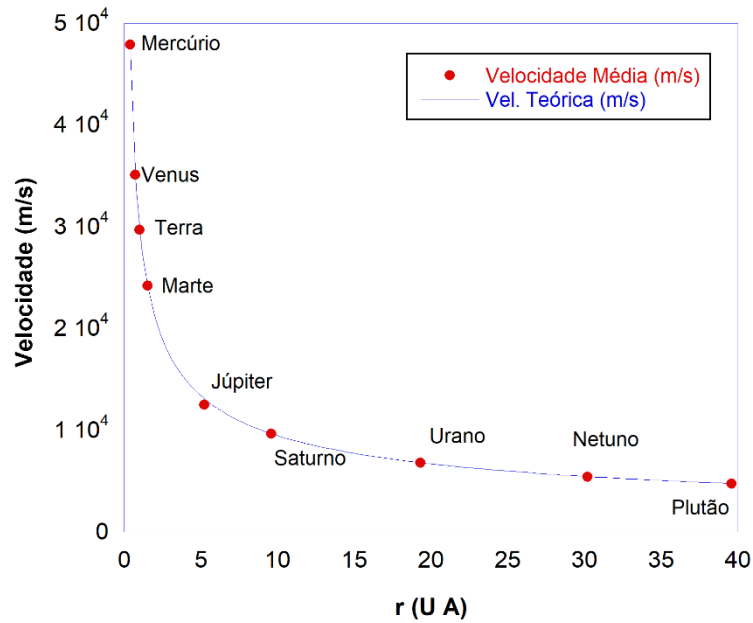


Figura A3: Curva de velocidade do Sistema Solar.

Além disso, alguém poderia argumentar que a Lei de Gravitação Universal de Newton foi construída a partir da Terceira Lei de Kepler para o nosso Sistema Solar, por isso espera-se que ela concorde com dados empíricos. A questão sobre a validade universal da lei de Newton só aparece quando pensamos em outras escalas astronômicas. Sabemos que é válido para o nosso sistema solar, mas é válido para a nossa própria galáxia? Ou outras galáxias?

Vejamos uma galáxia espiral como exemplo (já que a Via Láctea é uma galáxia espiral) e, mais especificamente, um tipo de galáxia espiral que tem uma protuberância muito massiva cercada por um disco no qual encontramos seus braços espirais e um halo aproximadamente esférico. Isso é mostrado na Figura A4. O movimento medido das estrelas no disco mostra que ele não gira como um corpo sólido. Cada estrela segue sua própria órbita; algumas estrelas têm períodos orbitais mais curtos ou mais longos que o Sol dependendo se sua órbita é interna ou externa à trajetória do Sol respectivamente. Argumentamos então que existe uma "rotação diferencial".

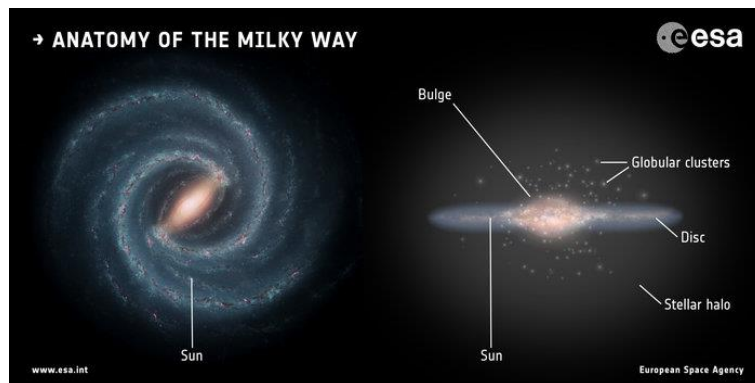


Figura A4: Anatomia da Via Láctea – um exemplo de Galáxia Espiral, com seus principais componentes galácticos (halo, bojo e disco) bem como o Sol e os aglomerados globulares destacados. Fonte:

Em um modelo muito simplificado, podemos imaginar que toda a massa da galáxia esteja posicionada na região do núcleo. Isso criaria duas zonas de curva de velocidade na galáxia. A zona um (dentro do núcleo) é composta por estrelas que aumentam sua velocidade à medida que o raio aumenta. Isso acontece porque, como eles estão em uma zona muito massiva, quanto mais longe do centro, mais massa interna à sua órbita existe para participar da força gravitacional. Na zona dois, a curva de velocidade obedece ao comportamento de Kepler, já que quase toda a massa está concentrada no núcleo. Isso é representado na Figura A5 pela linha vermelha. No entanto, se considerarmos que a matéria fora do núcleo também conta, a taxa de queda da curva deve ser menor. Nós chamamos isso de “previsão da massa-luminosidade”. Isto é o que os astrônomos esperam obter quando os dados observacionais reais de matéria luminosa são usados - o que é representado pela linha azul.

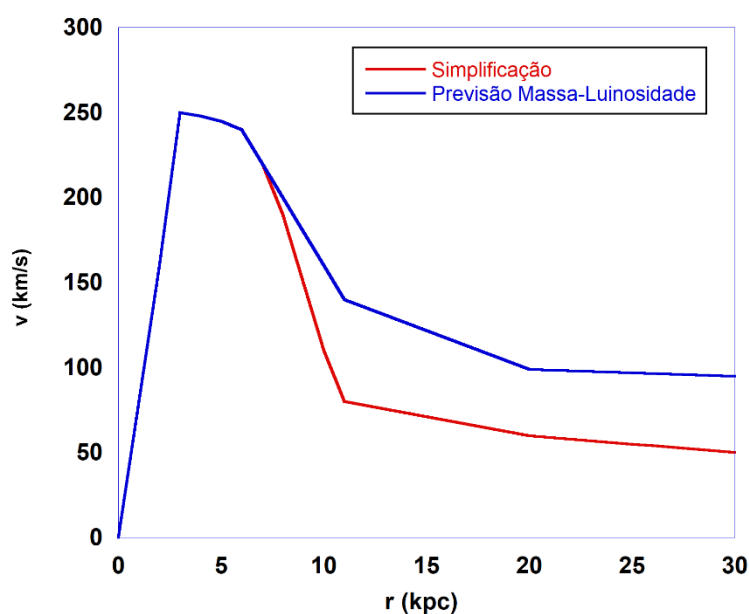


Figura A5: Representação da curva de rotação de uma galáxia a partir da previsão da Lei da Gravitação Universal para Galáxias Espirais de acordo com o modelo simplificado (linha azul) e de acordo com dados de matéria luminosa (linha vermelha).

Estamos finalmente prontos para confrontar a Lei de Gravitação Universal de Newton com dados empíricos em "teste crucial", como proposto por Popper. A curva azul mostrada na Figura A5 representa a previsão feita pela Lei de Newton, que é usualmente computada considerando os dados observacionais sobre a luminosidade das estrelas em uma galáxia espiral. Se os dados empíricos dessas velocidades estelares concordarem com a previsão teórica, temos uma corroboração da Lei de Newton, se eles não concordarem, refutamos a Lei de Newton de acordo com Popper. O confronto com dados empíricos é representado na Figura A6.

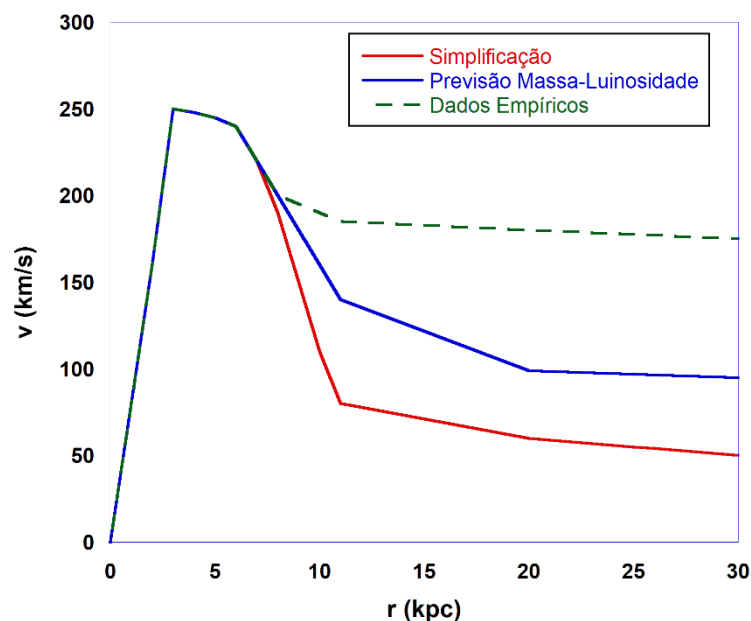


Figure A6: Representação da curva de rotação para uma galáxia a partir do modelo simplificado (linha vermelha), da previsão da matéria luminosa (linha azul), e de dados empíricos (linha verde).

Dados empíricos (linha pontilhada verde) mostram que as velocidades de estrelas são muito mais altas do que era previsto pela Lei de Newton para a zona longe do núcleo ("previsão de matéria luminosa"). Este comportamento é observado em muitas galáxias [15]. Em termos popperianos, os resultados do teste crucial refutaram a Lei da Gravitação Universal de Newton. Ademais, devemos lembrar que a Teoria da Relatividade Geral (TRG), desenvolvida por Einstein na primeira metade do século XX, também já aponta para as limitações da Gravitação Newtoniana. A TRG não somente apresenta uma nova visão sobre a própria gravitação, associando-a à geometria do espaço-tempo; mas também indica que a fonte da gravitação não depende somente da massa de um corpo, sendo função da energia e até mesmo da pressão interna do sistema. De forma mais rigorosa, na TRG, a geometria do espaço depende está associada com o tensor de momento-energia.

Apesar do resultado negativo do experimento crucial (e das limitações teóricas já apresentadas pela TRG), todos ainda estão aprendendo sobre a dinâmica de Newton e a gravitação no ensino médio e nos cursos de graduação em Engenharia e Física. De acordo com a visão de ciência de Popper [12] estritamente, assim, estamos aprendendo pseudociência?

Nossa resposta é não, e nosso ponto é que nós não refutamos a Lei da Gravitação Universal de Newton. A aparente refutação baseia-se na descrição da refutação através de testes cruciais feitos por Popper [12], segundo os quais é preciso confrontar uma "teoria" com um "experimento". Este modelo epistemológico é representado na Figura A8.

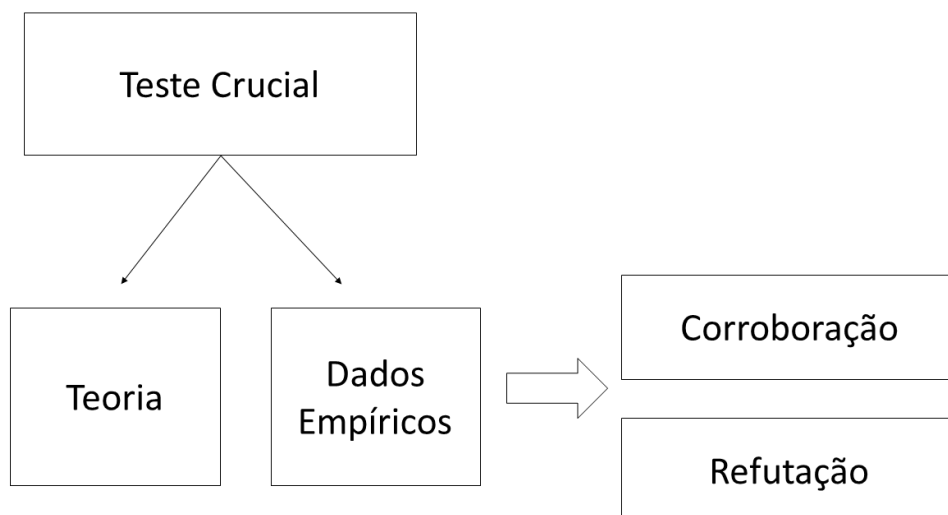


Figura A8: Modelo de refutação. O teste crucial é definido como o confronto entre uma teoria e um experimento. Se o experimento concordar com a previsão teórica, a teoria é corroborada. Se o experimento não concorda com a previsão teórica, a teoria é refutada.

Quando nos aproximamos do experimento, entretanto, percebemos que seus resultados nunca são dados empíricos puros, mas foram construídos tomando outras teorias como premissas válidas. No caso apresentado na Figura A7, por exemplo, estamos confrontando a previsão da Lei de Newton em associação com a matéria luminosa observada, com resultados experimentais. Para construir a linha de previsão de Newton, alguém deve considerar as seguintes suposições: A Lei da Gravitação Universal de Newton é universal, a Segunda Lei do Movimento de Newton é universal e o modelo que relaciona massa e luminosidade está correto (temos três pressupostos teóricos e não apenas um). Por outro lado, para construir a linha de dados empíricos, alguém tem que assumir que o efeito doppler relativista está correto (uma quarta suposição teórica).

Assim, quando o resultado empírico não corresponde à previsão teórica, não temos uma refutação obrigatória de uma teoria, uma vez que os dados empíricos também são embebidos em teoria. O que enfrentamos, então, é uma inconsistência mútua: quando todas essas quatro suposições teóricas são reunidas, elas produzem resultados inconsistentes. Isso é tudo o que podemos afirmar a partir da Figura A7. Este modelo epistemológico, em que os dados empíricos deixam de ser juízes das teorias (pois podem estar errados) e, conseqüentemente, uma inconsistência entre previsão e empiria não conduz a uma refutação direta e compulsória, foi proposto por Lakatos [16] e está representado na Figura A9.

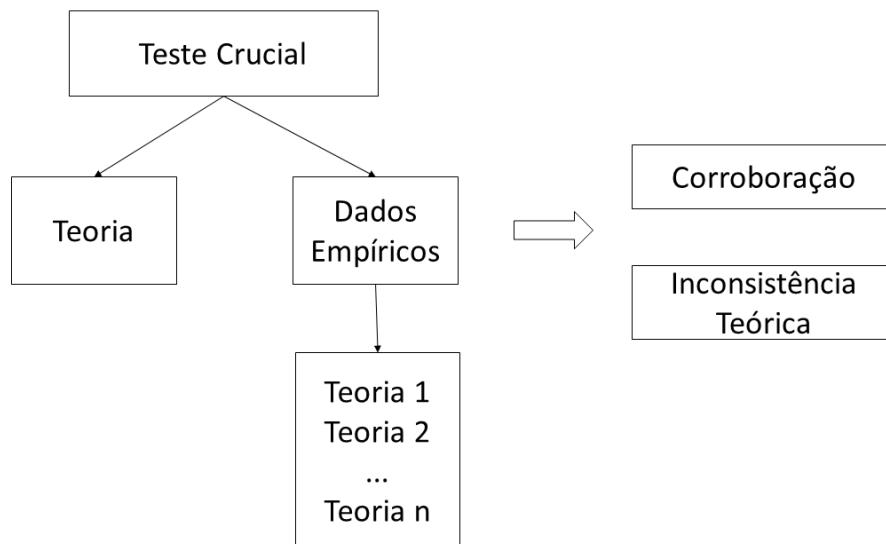


Figura A9: Proposta de Lakatos para o confronto entre experimento e teoria. Se o experimento concorda com a predição teórica, a teoria é corroborada. Se o experimento discorda com a predição teórica, reconhecemos que há uma inconsistência entre teorias.

A4. Terceira Discussão: Matéria Escura *versus* MOND e a competição entre Programas de Pesquisa

De acordo com a proposta de Lakatos [14], não se deve rotular uma teoria como científica ou não científica como propusera Popper, visto que um experimento crucial nunca pode refutar sumariamente uma teoria. Devemos, outrossim, classificar os programas de pesquisa como progressivos ou regressivos. Em primeiro lugar, todo programa de Pesquisa, segundo Lakatos, possui dois conjuntos de proposições: o núcleo duro e o cinturão protetor. O núcleo duro se refere ao conjunto de afirmações que jamais são falseadas dentro de um programa de pesquisa, enquanto, no cinturão protetor, admite-se a inserção de novas hipóteses e a refutação de algumas afirmações. Assim, os programas de pesquisa progressivos são aqueles que não precisam acrescentar novas hipótese *ad hoc*, e que têm suas previsões teóricas corroboradas – assim, as previsões estão, em geral, antecipando os resultados experimentais. Um programa regressivo, por outro lado, precisa do uso de hipóteses *ad hoc* para explicar resultados experimentais que não havia previsto ou havia previsto incorretamente. Assim, um programa regressivo está atrasado em relação aos dados experimentais.

No caso do problema que estamos avaliando (a inconsistência entre a curva de rotação da galáxia e a previsão da Lei de Newton) podemos imaginar que dois programas podem ser estabelecidos dependendo das afirmações que são salvas no núcleo duro. O primeiro e provavelmente mais popular Programa de Pesquisa estabelecido após o “problema da curva de rotação” foi a Hipótese da Matéria Escura - que considerou as Leis de Newton universalmente válidas e escolheu o modelo que relaciona luminosidade e massa como a suposição a ser considerada errada, afirmando que há massa não observada na galáxia causando velocidades maiores do que era esperado. Na década de 1980, no entanto, outro Programa de Pesquisa considerou a matéria luminosa como um elemento do núcleo duro e propôs uma correção das Leis de Newton, sugerindo o nome MOND (Modified Newton’s Dynamics). Temos, assim, o

confronto de dois programas que reivindicam diferentes proposições sobre a realidade para resolver o problema da curva de velocidade das galáxias.

i. A Hipótese da Matéria Escura

A ideia de que existe algum corpo massivo que não pode ser observado e que produz perturbação em alguns dados empíricos não é nova. Em 1884, Friedrich Wilhelm Bessel, analisando dados de posição das estrelas brilhantes Sirius e Procyon, percebeu que cada um deveria compor um sistema binário [17]. Além disso, no século XIX, a observação de Netuno foi prevista pela análise matemática das variações da órbita de Urano, considerando a Lei de Kepler e Newton [18]. Em ambos os casos, a discrepância de dados observacionais e o esperado da Lei de Newton ou Kepler não implicava a refutação da teoria, mas a busca de um corpo massivo que tornasse a teoria válida: em ambos os casos, novas observações confirmaram a hipótese de uma existência corpórea massiva.

No entanto, é importante enfatizar que a ideia da matéria escura, como percebemos hoje em dia, foi inicialmente proposta nos anos 1930, quando o astrônomo suíço Fritz Zwicky mostrou que aglomerados de galáxias continham uma grande quantidade de matéria não luminosa. De fato, Zwicky foi um dos primeiros cientistas a interpretar os aglomerados de galáxias como os objetos mais massivos do Universo, isto é, como enormes enxames de galáxias unidos pela gravidade. Usando espectroscopia, Zwicky determinou o desvio para o vermelho de galáxias individuais em um determinado aglomerado e obteve suas velocidades radiais, o que lhe permitiu obter a velocidade de recessão do cluster como um todo. Uma vez que ele obtivesse a velocidade orbital média das galáxias, ele poderia facilmente usar a Lei Universal da Gravitação de Newton para estimar a massa do aglomerado e, comparando-a com sua luminosidade, ele concluiu que aglomerados de galáxias tinham muito mais massa do que sua luminosidade sugeria. Do ponto de vista histórico, este evento apenas confirma que, muitas vezes, a comunidade científica não está preparada para aceitar novas ideias. Cerca de 80 anos mais tarde, pesquisas sofisticadas e maiores, focadas no aglomerado de galáxias confirmam as ideias originais de Zwicky⁵.

Na década de 1960, Vera Rubin, uma cientista americana, estudando os arredores da galáxia de Andrômeda, percebeu que os corpos se moviam a velocidades muito altas, o que sugeria uma forte atração gravitacional que ela não conseguia explicar facilmente com base apenas na massa das estrelas da galáxia. No caso de discrepâncias entre a previsão de massa luminosa e velocidades estelares em nossa galáxia, Trimble [19] destaca os trabalhos de Oort, segundo os quais a densidade total da matéria próxima ao sol (considerando a validade da lei de Newton) é igual a 0,092 massas solares por parsec⁶ cúbico, enquanto a massa total observada de estrelas é de cerca de 0,038 massas solares por parsec cúbico. Segundo o autor, no entanto, o “início da era moderna da pesquisa em matéria escura” é geralmente associado aos trabalhos de Ostriker, Peebles e Yahil [20] e Einasto, Kraasik e Saar [21], que apontaram que as massas galácticas aumentam linearmente com o seu raio (tendo também em conta a validade da lei de Newton) apesar da diminuição considerável da sua luminosidade.

⁵ É importante ressaltar que, embora as ideias de Zwicky tenham sido confirmadas, os valores por ele obtidos de quanta massa a mais deveria existir não o foram.

⁶ 1 parsec é a distância necessária para que a distância Terra-Sol, chamada de unidade astronômica (UA), seja visualizada como 1 segundo arco. 1 parsec = 206265 UA.

Diferentemente do caso dos sistemas binários Sírius e Procyon e da descoberta de Netuno, para os quais a observação da luz confirmou a hipótese do corpo massivo, no caso das curvas de rotação galáctica, as estrelas têm uma velocidade maior do que a prevista, o que indica a presença de massa, mas nenhuma observação direta de tal massa foi encontrada até o momento (2018). Assim, se alguém toma as leis de Newton como algo que não deve ser retirado, a curva de velocidade da galáxia deve ser explicada pela hipótese *ad hoc* da existência da matéria escura. Entretanto, o fato de não haver observação direta da matéria escura após décadas de pesquisa pode indicar que o programa da matéria escura poderia ser entendido como um programa regressivo – como defende Lakatos.

Em termos gerais, podemos pensar que esta matéria escura é composta pelo mesmo tipo de matéria a que estamos acostumados (matéria bariônica) ou um tipo diferente de matéria (matéria não bariônica). Os candidatos da matéria bariônica envolvem estrelas de baixa massa, como anãs marrons, estrelas degeneradas como anãs brancas e buracos negros, para os quais o campo gravitacional não permite nenhuma emissão de luz [19].

O problema de considerar a matéria escura bariônica, entretanto, está relacionado à consistência com os cálculos padrão de nucleossíntese primordial. A concordância entre suas previsões e as abundâncias observadas dos núclídeos de luz foi extremamente bem sucedida. O aumento da matéria bariônica desequilibraria essa distribuição, criando um novo problema teórico [22]. Além disso, há relatórios de MACHOs (Massive Compact Halo Objects) indicando que não haveria matéria bariônica o suficiente para explicar a discrepância [23].

A outra opção a ser considerada, portanto, seria a questão não-bariônica. Um candidato forte é chamado WIMP, partículas massivas de interação fraca. Esse tipo de partícula pode ser criado em temperaturas muito altas, como no início do universo e, se estável, deve ter aproximadamente a mesma abundância de matéria escura, tornando-se um forte candidato. Além disso, a hipótese do WIMP é consistente não apenas com a curva de rotação da galáxia e a abundância de elementos, mas também com as lentes gravitacionais, o fundo de microondas cósmico e a estrutura em larga escala [24]. Nesse sentido, usando a terminologia de Lakatos, podemos dizer que a Hipótese da Matéria Escura parece ser um programa progressivo.

Apesar disso, o Programa de Pesquisa para Matérias Escuras ainda enfrenta sérias dificuldades, como não ter apresentado nenhuma detecção direta de matéria escura; e uma discrepância de previsão teórica de sua distribuição e observações indiretas de sua distribuição [15, 25, 26]. Recentemente, Kroupa [27] chegou a afirmar que as observações falsificam (referindo-se à epistemologia de Popper) a Hipótese da Matéria Escura e que a matéria escura fria ou quente não existe.

ii. MOND

Em 1983, Milgrom [28, 29] propôs um programa de pesquisa alternativo, de acordo com o qual não deveríamos considerar a existência de uma massa não-luminosa misteriosa, mas reconsiderar a validade universal das Leis de Newton, sugerindo a Dinâmica de Newton Modificada (MOND). Da mesma forma que a Hipótese da Matéria Escura precisa de uma consideração *ad hoc* (a existência da massa não-

luminosa), MOND corrige a segunda Lei de Newton introduzindo uma expressão *ad hoc* $\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$:

$$\vec{F} = m \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \vec{a} \quad (12)$$

Onde $\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$ é uma função matemática inserida *ad hoc* para corrigir o comportamento gravitacional na escala galáctica. $\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$ depende de a , o módulo da aceleração e a_0 , um parâmetro livre usado para ajustar a curva de rotação. Devemos examinar, então, que condições $\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$ deve satisfazer para que possamos inferir sua estrutura. Como pode ser visto da Figura A7, as Leis de Newton enfrentam dificuldade para ajustar os dados empírico quando r é grande. Como, nessa região, v é aproximadamente constante, a aceleração centrípeta tende a zero e a velocidade é independente da distância:

$$\text{Condição 1: } a_c \approx 0 \rightarrow v \text{ não depende de } r \quad (13)$$

Por outro lado, quando a não é pequeno, as leis de Newton devem ser válidas e, então, $\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$ deve ser igual a 1:

$$\text{Condição 2: } a \gg a_0 \rightarrow \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = 1 \quad (14)$$

Como a força gravitacional é centrípeta, temos que

$$F_g = F_c \quad (15)$$

É possível perceber que a condição 1 é atingida se para $a_c \approx 0$, $\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = \frac{a}{a_0}$. Usando a Equação 6 (Lei da Gravitação de Newton) e a Equação 12 (MOND):

$$\frac{GMm}{r^2} = m \cdot \frac{a_c}{a_0} a_c \quad (16)$$

Usando a expressão da aceleração centrípeta ($a_c = v^2/r$):

$$\frac{GMm}{r^2} = m \frac{v^4}{r^2 a_0} \quad (17)$$

O que leva a uma expressão de velocidade que é independente da distância ao centro da galáxia:

$$v = \sqrt[4]{GMa_0} \quad (18)$$

Então, encontramos os atributos que gostaríamos que $\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$ tenha para ajustar as curvas de rotação de galáxia de forma correta:

$$\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = \begin{cases} \frac{a}{a_0}, & \text{quando } a \approx 0 \\ 1, & \text{quando } a \gg a_0 \end{cases} \quad (19)$$

Existem muitas funções que podem satisfazer essas condições. Nós vamos introduzir uma função possível, a qual foi usada por Milgron [29]:

$$\mu(a/a_0) = \frac{a/a_0}{\sqrt{1 + (a/a_0)^2}} \quad (20)$$

É muito fácil perceber que quando a/a_0 é grande, $\mu(a/a_0) \rightarrow 1$, pois $\sqrt{1 + (a/a_0)^2} \rightarrow \sqrt{(a/a_0)^2} = a/a_0$. É mais difícil, entretanto, demonstrar que $\mu(a/a_0) \rightarrow a/a_0$ quando $a/a_0 \rightarrow 0$. A estratégia formal para se demonstrar isso é expandindo a função em series de Taylor. Entretanto, é possível se convencer de que ambas condições são satisfeitas para pequenos e grandes números, computando seu valor, como apresentamos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de a/a_0 e $\mu(a/a_0)$.

a/a_0	$\mu(a/a_0)$	a/a_0	$\mu(a/a_0)$
0.001	0.001	0.1	0.100
0.002	0.002	1	0.707
0.003	0.003	2	0.894
0.004	0.004	3	0.949
0.005	0.005	4	0.970
0.006	0.006	5	0.981
0.007	0.007	6	0.986
0.008	0.008	7	0.990
0.009	0.009	8	0.992
0.01	0.01	9	0.994

A Segunda Lei de Newton Modificada pode, então, ser escrita como

$$\vec{F} = m \cdot \frac{\frac{a}{a_0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{a_0}\right)^2}} \vec{a} \quad (20)$$

Onde o valor de a_0 fica em torno de 10^{-8} cm/s² [15] para ajustar as curvas de rotação das galáxias. Isso concorda com o que é esperado: somente para acelerações muito pequenas (da ordem de grandeza de a_0), a modificação se torna relevante. Para as acelerações às quais estamos acostumados diariamente, o MOND não varia da segunda lei clássica de Newton.

Aceleração do MOND foi capaz de explicar curvas de galáxias anãs esferoidais a superaglomerados [15, 26, 27]. Há, entretanto, sérios problemas a serem enfrentados pelo programa do MOND. Por exemplo, há estudos com lentes gravitacionais que indicam uma distribuição de massa que não pode ser explicada por uma alteração na lei de gravitação [30]. Ademais, em 2018, Rodrigues et al [25] (grupo liderado por um pesquisador brasileiro) publicou fortes evidências em um dos mais importantes periódicos científicos, baseado em um estudo de 193 galáxias de disco de alta qualidade, que a probabilidade de existência de uma aceleração fundamental (a_0) é essencialmente zero.

A5. Quarta Discussão: O avanço dos programas em redes de pesquisa.

Resumindo o que já mostramos, a hipótese da Matéria Escura conseguiu explicar o problema da curva de rotação. Além disso, a hipótese da matéria escura não-bariônica é consistente com a abundância do elemento de luz prevista pelo modelo cosmológico hegemônico e a hipótese do WIMP. Por outro lado, a distribuição de matéria escura nas galáxias (de acordo com a detecção indireta) não concorda com as previsões teóricas. Nesse cenário, o MOND, proposto nos anos 80, parece ser uma alternativa interessante. Rodrigues et al [25], no entanto, afirmaram que a proposição da MOND é improvável. Esta competição estabelece uma controvérsia não concluída a longo prazo na Ciência. Ambos os programas (MOND e Dark Matter) têm pontos fortes e fracos a serem considerados. Apesar disso, a hipótese da Matéria Escura é muito mais difundida que a MOND, e é até ensinada nos cursos de graduação em Física como um fato científico.

A Sociologia da Ciência, no entanto, já apontou que qualquer fato científico, passa por um período que pode ser chamado de estabilização ontológica [31], ou seja, para existir, um actante⁷ deve ser articulado em uma complexa rede heterogênea composta por cientistas, equipamentos, teorias. Ao longo desse processo, novas performances são atribuídas ao actante e sua existência torna-se cada vez mais real. A

⁷ Actante é um termo genérico para designar qualquer coisa que exista. Diferentemente de ser, que é algo tido como previamente existente, o actante é articulado por outros actantes.

qualquer momento, entretanto, sua rede pode ser desarticulada e sua existência pode desaparecer. Nesse sentido, um actante nunca é completamente ontologicamente estável. Éter, por exemplo, foi considerado "uma coisa real" por séculos até desaparecer completamente. Apesar disso, quanto mais extensa e complexa for uma rede, mais difícil é o actante desaparecer.

A matéria escura e a aceleração natural (α_0 em MOND) são dois actantes cujas existências, em um primeiro momento, são mutuamente excludentes. Se a matéria escura existe, nenhuma aceleração natural é necessária e vice-versa. Ambos os actantes competem pela realidade e ambos são articulados numa rede complexa que sustenta a sua realidade. No entanto, existem argumentos apontando contra suas existências também. Isso significa que, neste ponto, não podemos afirmar completamente qual actante está estabilizado como um fato científico. Somente quando a comunidade científica resolver a maioria ou todas as controvérsias, poderemos escolher uma alternativa.

Então, por que a matéria escura é a única alternativa comumente ensinada? As duas alternativas não devem ser consideradas? De acordo com a visão ontológica desenvolvida pela Sociologia Simétrica [31], a realidade não é algo binário (existe ou não existe), mas é contínuo. Algo pode existir mais ou menos de acordo com a rede que mobiliza [31]. Se a matéria escura é o programa que é mais amplamente ensinado, isso significa que provavelmente, hoje, sustenta a rede mais ampla, i. e., mobiliza mais centros de cálculo, articula mais teorias e experimentos, o que, na proposta de Latour, significaria que é mais real.

Podemos investigar a quantidade de trabalhos que o MOND e o DMH articularam, aos quais outros conceitos físicos estão ligados e aos quais os actantes (humanos e não humanos) estão associados. Quando procuramos por isso na base de dados da internet, não estamos olhando para a rede real, mas estamos observando um reflexo dela na produção científica, numa espécie de observação indireta.

Para oferecer um exemplo simples, procuramos por “MOND” e “Dark Matter” no resumo de todos os artigos (de 1962 a 2018) no Astrophysics Data System em 24 de outubro de 2018. Primeiro, procuramos o número de artigos publicados, o número de citações e o número de leituras nos últimos 90 dias. Os resultados estão listados na Tabela 3.

Tabela 3: Características de ambos programas na rede da internet.

Características	Matéria Escura	MOND
Número de artigos	51,730	1,095
Citações (1,281 mais citados)	1,526,664	23,103
Lidos (últimos 90 dias)	746,606	20,687

É possível observar que a produção em Dark Matter é bem mais expressiva que a produção em MOND: há mais pessoas escrevendo, citando e lendo sobre DMH que MOND. É equivalente dizer que o DMH, agora, é mais autônomo [31], já é algo que permeia a comunidade científica, e isso explica, como supúnhamos, por que é ensinado com mais frequência do que o MOND. Ou seja, hoje, se tivermos que escolher qual é o programa mais aceito na comunidade científica, os dados da Tabela 4 indicam que esse programa é o da Matéria Escura.

No entanto, o fato de haver menos pessoas trabalhando com o MOND não significa que já seja algo a ser abandonado. Como Feyerabend [32] apontou, se sempre seguirmos a teoria predominante, nunca seremos revolucionários. A visão hegemônica, por definição, estará sempre mais presente na comunidade científica.

Se a comunidade da Educação Científica apenas adotar a visão hegemônica, ela sustentará e promoverá essa hierarquia entre a visão hegemônica e as teorias alternativas, pois estará reforçando a primeira e apagando a última. Ele compõe um sistema cíclico: mais pessoas escreveram sobre o DMH, por causa disso, mais pessoas ensinam DMH e, como consequência, mais pessoas escreverão apenas sobre o DMH. Adotando a concepção de ciência de Feyerabend [32], percebemos que o que faz a ciência progredir é a competição entre diferentes programas. Talvez a Educação Científica devesse enfatizar essa competição como um motor da ciência, em vez de tentar apagá-la. Ao fazê-lo, ao invés de promover a pesquisa já hegemônica, trabalhará para o aumento da competição interna - o que é desejável para a própria ciência e para a sociedade em geral. Assim, o que propomos é que os alunos aprendam que a Matéria Escura é hoje a teoria mais amplamente aceita na comunidade científica, mas que, também, tenham contato com outras opções como o MOND, a fim de desenvolver a pluralidade de ideias.

É importante notar que dizer que a Educação Científica deveria deixar de ser comprometida apenas com a teoria hegemônica não significa que ela teria que explorar qualquer outra teoria ou visão. O MOND é uma teoria científica legítima, no sentido de que é reconhecida pela comunidade científica como uma proposta razoável. Apesar de ser muito menos expressiva que o DMH, a MOND ainda tem um papel importante no debate científico.

Para discutir esse ponto, analisamos os cinco artigos mais citados de cada programa e listamos os periódicos (e seus fatores de impacto) e o número de citações (Tabela 4). É possível observar que as pesquisas da MOND são publicadas em periódicos de grande prestígio, ou seja, o MOND não é uma teoria alternativa não-científica ou pseudocientífica, é uma tentativa legítima de explicar os fenômenos naturais.

Tabela 4: Os cinco artigos mais citados sobre MOND e HME, os jornais em que foram publicados e o número de citações.

Matéria Escura			MOND		
Título	Journal (Impact Factor)	Citations	Title	Journal (Impact Factor)	Citations
First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters	The Astrophysical Journal (8.561)	8,790	Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm [34]	Physics Review D (4.394)	958

[33] Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation [35]	The Astrophysical Journal (8.561)	6,500	Modified Newtonian Dynamics as an Alternative to Dark Matter [15]	Living Reviews in Relativity (23.333)	555
Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Cosmology [36]	The Astrophysical Journal (8.561)	6,476	Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes and modified dynamics [37]	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (5.194)	537
A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering [38]	The Astrophysical Journal (8.561)	6,388	Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions [26]	Annual Review in Astronomy and Astrophysics (24.912)	422
Planck 2013 results. XVI. [39] Cosmological parameters	Astronomy and Astrophysics (5.565)	5,915	The cored distribution of dark matter in spiral galaxies [40]	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (5.194)	392

Como visto na Tabela 4, o assunto Matéria Escura é cientificamente "quente" e tem sido muito debatido na literatura, o que é fácil de ser entendido. Primeiro, a matéria escura está diretamente relacionada ao modelo Lambda CDM, que é uma versão atualizada do modelo do Big Bang, incluindo a presença da Energia Escura, tanto com o MDL quanto com a Energia Escura com base apenas em observações. Em segundo lugar, a matéria escura também é interessante porque as simulações numéricas sugerem que é essencial reproduzir a estrutura em grande escala que observamos até agora. Terceiro, a questão da Matéria Escura é baseada na nova física especulativa, com seu candidato favorito sendo uma partícula massiva não-bariônica que tem pouca (se alguma) interação com a matéria comum (bariônica = prótons e nêutrons): WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) ou Axions [41]. A aniquilação da matéria escura, por exemplo, é uma previsão universal do paradigma WIMP. Observacionalmente, a Radiação Cósmica de Fundo (a radiação que começou a fluir através do Universo no final da era dos núcleos) também colocou restrições valiosas sobre a ideia da aniquilação da matéria escura; no entanto, muitos experimentos que estão atualmente operando para encontrar evidências da presença de axions / WIMPs

falharam - o que, novamente, reforça o debate da NdC que estamos propondo - a existência da Matéria Escura não pode ser garantida diretamente, mas apenas pela rede que ela mobiliza [31].

Alguns cientistas também propuseram que a matéria escura pode ser mais "imprecisa" do que "fria", com a última implicando que a matéria escura se move a velocidades muito menores que a velocidade da luz. Galáxias anãs contendo grandes quantidades de matéria escura também foram procuradas, mas o Problema do Satélite Faltante, por exemplo, refere-se à superabundância de sub-halos MDL previstos numericamente em comparação com galáxias satélites conhecidas no halo e Grupo Local da Via Láctea e continua a ser resolvido. Previsto primeiramente por Albert Einstein em sua muito conhecida Teoria Geral da Relatividade, primeiro verificada em 1919, a lente gravitacional, ou seja, a massa que distorce o espaço-tempo, é uma das evidências mais convincentes para a matéria escura [42, 43].

Por outro lado, como já foi apontado, embora o interesse pela matéria escura tenha aumentado desde as observações das curvas de rotação das galáxias espirais realizadas por Vera Rubin na década de 1970, a MOND foi discutida e apresentada como uma alternativa interessante, modificando a gravitação. Essa modificação da interação gravitacional foi estudada usando abordagens diferentes. Mas, mais uma vez, a ideia da MOND encontra dificuldades quando se trata das observações: enquanto a MOND funciona muito bem nas escalas galácticas, ela mal consegue explicar a dinâmica nos aglomerados de galáxias (escalas maiores). Neste contexto, a gravidade modificada tem enfrentado diferentes problemas para explicar toda a grande quantidade de observações astrofísicas. Como mencionamos anteriormente, medidas com lentes gravitacionais indicam apresentam resultados que não podem ser explicados pelo MOND.

O fato é que, além de seus efeitos gravitacionais, a Matéria Escura permanece indetectável por qualquer tipo de experimento projetado até hoje. Por outro lado, a Lei do movimento e a gravidade de Newton estão entre as ideias mais confiáveis da ciência. Nesse texto discutimos, em linhas gerais, o embate entre dois programas de pesquisa (a matéria escura e o MOND), entretanto, outras evidências ainda podem ser encontradas na literatura como, por exemplo, a dinâmica dos aglomerados de galáxias, a curva de rotação de galáxias espirais, o gás quente em aglomerados de galáxias, lentes gravitacionais, a física relacionada à formação de estrutura no Universo, as oscilações acústicas bariônicas no espectro de potência bem como o próprio padrão de abundâncias oriundo da nucleossíntese primordial [44]. Assim, a rede de alta demanda está apenas confirmando os esforços de muitos cientistas para encontrar uma solução, orientada tanto para a observação quanto para a teoria.

Referências

- [1] S. Shapin e S. Schaffer, *Leviathan and the Air-Pump* (Princeton University Press, Princeton, 1985).
- [2] L. Daston e P. Galison, *Objectivity* (Zone Books, New York, 2007).
- [3] P. Américo, *A Ciência e os Sistemas - Questões de História e Filosofia Natural* (Editora Universitária, João Pessoa, 2001).
- [4] N.W. Lima, *A Física na Esc.* **18**, 67 (2020).

- [5] O. Pessoa Jr., *Cogn. Rev. Eletrônica Filos.* **6**, 54 (2009).
- [6] A. Chalmers, *O que é ciência afinal* (Brasiliense, São Paulo, 1993).
- [7] M.M. Nieto, *The Titius-Bohde Law of Planetary Distances: its history and theory* (Pergamon, New York, 1972).
- [8] F.L. da Silveira, *Cad. Catarinense Ensino Física* **5**, 33 (2002).
- [9] F.L. da Silveira, *Cad. Catarinense Ensino Física* **6**, 148 (1989).
- [10] F.L. da Silveira e F. Ostermann, *Cad. Catarinense Ensino Física* **19**, 7 (2002).
- [11] F.L. da Silveira, *Cad. Bras. Ensino Física* **19**, 407 (2002).
- [12] K. Popper, *Conjecturas e Refutações* (Editora Universidade de Brasília, Brasília, 2008).
- [13] D. Merritt, *Stud. Hist. Philos. Sci. Part B Stud. Hist. Philos. Mod. Phys.* **57**, 41 (2017).
- [14] W.S. Dias e J. Lépine, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 155 (2006).
- [15] R.H. Sanders e S.S. McGaugh, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40**, 263 (2002).
- [16] I. Lakatos, *The Methodology of Scientific Research programmes* (Cambridge University Press, Cambridge, 1978).
- [17] Z. Kopal, *Astrophys. Space Sci.* **110**, 3 (1985).
- [18] R.W. Smith, *Isis* **80**, 395 (1989).
- [19] V. Trimble, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **25**, 425 (1987).
- [20] J.P. Ostriker, P.J.E. Peebles e A. Yahil, *Astrophys. J.* **193**, 1 (1974).
- [21] E. Jaan, A. Kaasik e E. Saar, *Nature* **250**, 309 (1974).
- [22] J. Primack, D. Seckel e B. Sadoulet, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **38**, 751 (1988).
- [23] C. Alcock, R.A. Allsman, D.R. Alves, T.S. Axelrod, A.C. Becker, D.P. Bennett, K.H. Cook, N. Dalal, A.J. Drake, K.C. Freeman, *Astrophys. J.* **542**, 281 (2000).
- [24] D. Hooper e E.A. Baltz, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **28**, 293 (2008).
- [25] D.C. Rodrigues, V. Marra, A. Popolo e Z. Davari, *Nat. Astron.* **2**, 668 (2018).
- [26] B. Famaey e S.S. Mcgaugh, *Living Rev. Relativ.* **15**, 1 (2012).
- [27] P. Kroupa, *Publ. Astron. Soc. Aust.* **29**, 395 (2012).
- [28] M. Milgrom, *Astrophys. J.* **270**, 365 (1983).
- [29] M. Milgrom, *Astrophys. J.* **270**, 384 (1983).
- [30] D. Clowe, M. Bradač, A.H. Gonzalez, M. Markevitch, S.W. Randall, C. Jones e D. Zaritsky, *Astrophys. J.* **648**, L109 (2006).
- [31] B. Latour, *Jamais Fomos Modernos* (Editora 34, São Paulo, 2013).
- [32] P. Feyerabend, *Against the Method* (Verso, London, 1995).
- [33] D.N. Spergel, L. Verde, H.V. Peiris, E. Komatsu, M.R. Nolta, C.L. Bennett, M.

- Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, A. Kogut et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **148**, 175 (2003).
- [34] J.D. Bekenstein, *Phys. Rev. D* **70**, 83509 (2004).
- [35] E. Komatsu, K.M. Smith, J. Dunkley, C.L. Bennett, B. Gold, G. Hinshaw, N. Jarosik, D. Larson, M.R. Nolta, L. Page et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **192**, 18 (2011).
- [36] D.N. Spergel, R. Bean, O. Doré, M.R. Nolta, C.L. Bennett, J. Dunkley, G. Hinshaw, N. Jarosik, E. Komatsu, L. Page et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170**, 377 (007).
- [37] K.G. Begeman, A.H. Broeils e R.H. Sanders, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **249**, 523, (1991).
- [38] J.F. Navarro, C.S. Frenk e S.D.M. White, *Astrophys. J.* **490**, 493 (1997).
- [39] P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, F. Atrio-Barandela, J. Aumont, C. Baccigalupi, A.J. Banday, R.B. Barreiro et al., *Astron. Astrophys.* **571**, A16 (2014).
- [40] G. Gentile, P. Salucci, U. Klein, D. Vergani e P. Kalberla, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **351**, 903 (2004).
- [41] D. Parkinson, S. Riemer-Sørensen, C. Blake, G.B. Poole, T.M. Davis, S. Brough, M. Colless, C. Contreras, W. Couch, S. Croom et al., *Phys Rev. D.* **86**, 103518 (2012).
- [42] V. Springel, S.D.M. White, A. Jenkins, C.S. Frenk, N. Yoshida, L. Gao, J. Navarro, R. Thacker, D. Croton, J. Helly et al., *Nature* **435**, 629 (2005).
- [43] A.V. Kravtsov, O.Y. Gnedin e A.A. Klypin, *Astrophys. J.* **609**, 482 (2004).
- [44] H. Mo, F.C. van den Bosch e S. White, *Galaxy formation and evolution* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).