


Constante cosmológica e matéria escura: sobre as hipóteses ad hoc no desenvolvimento da cosmologia científica

Cosmological constant and dark matter: on the ad hoc hypotheses in the development of scientific cosmology

 10.21680/1983-2109.2024v31n65ID31036

Jose Raymundo Novaes Chiappin

(FFLCH – USP)

e-mail: chiappin@usp.br

Jojomar Lucena da Silva

(FFLCH – USP)

Danilo Rodrigues

(FFLCH-USP)

danilo.rodrigues@usp.br

Resumo: O presente ensaio tem por objetivo mostrar o papel desempenhado pelas hipóteses ad hoc em dois importantes episódios da cosmologia científica: a adoção da constante cosmológica por Einstein e a descoberta da matéria escura por Zwicky. Há importantes semelhanças entre ambos, uma vez que foram hipóteses adotadas com base em possíveis interações cosmológicas gravitacionais. Comumente encontramos juízos distintos em relação aos dois casos, apenas por um ter sido lembrado

como um “sucesso preditivo” e o outro como um “fracasso” de Einstein. Procuramos mostrar ao longo do texto como, não apenas essa avaliação não é justa, como também que a adoção de hipóteses ad hoc é um recurso largamente utilizado na ciência e necessário ao seu desenvolvimento. Até mesmo nos principais referenciais em filosofia da ciência, como Lakatos, Kuhn, Popper e Laudan, encontramos avaliações sobre a utilização destas hipóteses muito mais positivas do que popularmente se dissemina, classificando-as como “estratagemas convencionalistas” utilizadas apenas para mascarar dificuldades teóricas e conceituais. Todos estes referenciais citados se mostram unânimes sobre a importância das hipóteses ad hoc para o progresso da ciência, apesar de suas divergências sobre concepções de ciência e de progresso.

Palavra chave: cosmologia, Einstein, matéria escura, Zwicky

Abstract: This essay aims to show the role played by ad hoc hypotheses in two important episodes of scientific cosmology: the adoption of the cosmological constant by Einstein and the discovery of dark matter by Zwicky. There are important similarities between both, since hypotheses were adopted based on possible gravitational cosmological interactions. We commonly find different judgments regarding the two cases, simply because one was remembered as a “predictive success” and the other as a “failure” of Einstein. We seek to show throughout the text how, not only is this assessment not fair, but also that the adoption of ad hoc hypotheses is a resource widely used in science and necessary for its development. Even in the main references in philosophy of science, such as Lakatos, Kuhn, Popper and Laudan, we find evaluations of the use of these hypotheses that are much more positive than is popularly disseminated, classifying them as “conventionalist stratagems”. All these references cited are unanimous about the importance of ad hoc hypotheses for the progress of science, despite their divergences regarding conceptions of science and progress.

Keywords: cosmology, Einstein, dark matter, Zwicky

O lugar das hipóteses AD HOC no desenvolvimento da ciência

A filosofia da ciência, enquanto objeto de investigação acadêmica, evoluiu enormemente ao longo do último século e, de forma ainda mais intensa, ao que nos parece, durante os últimos sessenta anos. Podemos citar os positivistas, em especial aqueles membros do chamado “Círculo de Viena”, ou até mesmo Karl Popper (que chegou a participar de alguns encontros do grupo antes de se afastar da corrente positivista), como dentro de um período em que a filosofia da ciência se voltava para a lógica por trás da pesquisa científica. A ênfase estava na busca por uma demarcação, pelo entendimento acerca do papel da indução e uso de teorias de probabilidades, em que predominava um forte viés normativo, ou seja, a busca por normas que estabeleceriam, de forma tão clara quanto possível, o que seria ciência “de verdade”.

A partir dos anos 60, toda uma geração de pesquisadores, influentes até hoje, realizou um importante trabalho de, no mínimo, amenizar essa busca normativa porque, aparentemente, ao olhar para o passado da ciência, ao longo da evolução das tecnologias que mediaram a relação do homem com a natureza, muito daquilo que foi considerado científico em certos períodos não foi em outros. Consequentemente, as formas de demarcação entre o que seja ou não ciência elaboradas no início do século passado, simplesmente não resistem ao exame da história: imaginemos chegar à conclusão de que a teoria da relatividade de Einstein ou a descoberta da gravitação universal de Newton não possam ser chamados de científico por não passarem no critério de demarcação de Popper ou de Carnap? Parte deste movimento envolve a contribuição de Thomas Kuhn (que também foi um historiador da ciência), Paul Feyerabend, Imre

Lakatos, Larry Laudan e outros. Podemos dizer que a filosofia da ciência praticada por eles se constitui em um esforço de olhar para o passado e, somente a partir daí, propor olhares mais sofisticados para formas de descrever a atividade científica. Trata-se, portanto, de uma filosofia da ciência muito mais descritiva. Kuhn faz um relato deste movimento, de olhar para a história, em seu contexto original, que veio à tona após a publicação de seu clássico “A estrutura das revoluções científicas”, em 1962.

Em primeiro lugar, os supostamente sólidos fatos da observação acabaram mostrando-se fluídos. Os resultados alcançados por pessoas diferentes, aparentemente observando os mesmos fenômenos, diferiam uns dos outros, embora nunca diferissem muito. E essa diferença – apesar de contidas no mesmo âmbito aproximado eram, com frequência, suficientes para afetar pontos cruciais de interpretação. Além disso, os chamados fatos demonstraram jamais ser meros fatos, independentes das crenças e teorias existentes. Produzi-los exigia uma aparelhagem, ela própria, dependente da teoria que os experimentos iriam, supostamente, testar. (KUHN, 2006, p. 136)

Nessa dicotomia existente entre o caráter normativo e descritivo da filosofia, destacamos o lugar ocupado pelas chamadas “hipóteses ad hoc”. Há na literatura de divulgação científica e nos materiais de ensino de ciências em geral, uma reconstrução um tanto pejorativa deste tipo de hipótese, especialmente na forma como são geralmente inseridas ao longo do trabalho dos “grandes gênios” da ciência. Um exemplo de tal reconstrução na literatura de divulgação científica será mostrado na próxima seção.

Uma das formulações mais famosas narra a construção dos epiciclos, deferentes e equantes por Ptolomeu para explicar as posições observadas dos planetas na esfera celeste como recursos teóricos inventados por ele com o intuito de “salvar as aparências”, no sentido de preservar a concepção

geocêntrica de mundo ao eliminar uma contradição entre teoria e observação.

O objetivo do presente ensaio é desmistificar e, em alguma medida, problematizar o significado pejorativo usualmente associado às hipóteses ad hoc. Elas não diminuem o valor heurístico ou o modelo preditivo de uma teoria, podendo, inclusive, aumentá-los, se empregadas de forma adequada. Um exemplo de tal adequação foi a hipótese da matéria escura nas periferias de galáxias, como ilustraremos ao longo deste ensaio.

Uma hipótese é chamada ad hoc quando é elaborada com a finalidade de adequar a teoria a uma aparente contradição com fatos empíricos bem estabelecidos. Há uma sutil variedade de definições diferentes para o termo que serão apresentadas ao longo deste texto. Acreditamos, todavia, que não se afastam muito do sentido que adotaremos.

Nas páginas a seguir pretendemos organizar nosso argumento e expor a questão na seguinte sequência:

1. Considerações sobre as hipóteses ad hoc na filosofia da ciência;
2. A adhocidade da constante cosmológica;
3. A adhocidade da hipótese da matéria escura;
4. Entre anomalias e crises;
5. Considerações finais.

Considerações sobre as hipóteses ad hoc na filosofia da ciência.

Hipóteses elaboradas apenas para dar conta de certas anomalias empíricas não estão fortemente vinculadas a uma crença de que sejam verdadeiras; estão muito mais associadas a “estratagemas”, “improvisos” por parte do cientista que as elaborou, geralmente sem grandes convicções das razões para

fazê-lo. Um conto bastante famoso, escrito pelo célebre astrônomo e divulgador de ciência, Carl Sagan, resume de forma bastante apropriada, o caráter usualmente atribuído às hipóteses ad hoc:

“– Um dragão que cospe fogo pelas ventas vive na minha garagem.

Suponhamos que eu lhe faça seriamente essa afirmação. Com certeza você iria querer verificá-la, ver por si mesmo. São inumeráveis as histórias de dragões no decorrer dos séculos, mas não há evidências reais. Que oportunidade!

– Mostre-me — você diz.

Eu o levo até a minha garagem. Você olha para dentro e vê uma escada de mão, latas de tinta vazias, um velho triciclo, mas nada de dragão.

– Onde está o dragão? — você pergunta

– Oh, está ali — respondo, acenando vagamente.

– Esqueci de lhe dizer que é um dragão invisível.

Você propõe espalhar farinha no chão da garagem para tornar visíveis as pegadas do dragão

– Boa ideia — digo eu –, mas esse dragão flutua no ar.

Então, você quer usar um sensor infravermelho para detectar o fogo invisível.

– Boa ideia, mas o fogo invisível é também desprovido de calor.

Você quer borrifar o dragão com tinta para torná-lo visível.

– Boa ideia, só que é um dragão incorpóreo e a tinta não vai aderir.” (SAGAN; 1996; p. 163)

Neste conto, o autor narra uma caricaturada situação onde um dos interlocutores utiliza, repetidas vezes, a invocação de hipóteses ad hoc, no sentido de preservar sua tosca tese, de que exista um dragão em sua garagem,

buscando diferentes maneiras de se livrar do modus tollens. Observemos a conclusão por meio de suas próprias palavras:

Eu me oponho a todo teste físico que você propõe com uma explicação especial de por que não vai funcionar. Qual a diferença entre um dragão invisível, incorpóreo, flutuante, que cospe fogo atômico, e um dragão inexistente? Se não há como refutar a minha afirmação, se nenhum experimento concebível vale contra ela, o que significa dizer que o meu dragão existe? A sua incapacidade de invalidar a minha hipótese não é absolutamente a mesma coisa que provar a veracidade dela. Alegações que não podem ser testadas, afirmações imunes a refutações não possuem caráter verídico, seja qual for o valor que possam ter por nos inspirar ou estimular nosso sentimento de admiração. O que eu estou pedindo a você é tão somente que, em face da ausência de evidências, acredite na minha palavra. (SAGAN; 1996; p.164)

Não negamos que hipóteses elaboradas unicamente para solucionar certas anomalias podem ser concebidas como artifícios de imunização de teorias contra o que, por vezes, é um claro e evidente falseamento, como ocorre na ilustração acima. Todavia, e esse é o ponto mais importante que queremos salientar neste ensaio, grande parte dos desenvolvimentos científicos passam pela adoção de hipóteses ad hoc, que podem ou não ser objeto de investigações independentes posteriores. Se considerarmos até mesmo a concepção Popperiana de falseamento, bastante acusada de simplista por seus contemporâneos, não há um tratamento tão simplista e duro para a prática da adoção de hipóteses de trabalho elaboradas para solucionar problemas pontuais entre teoria e observação, apesar de ter chamado a atenção para um risco de se “fazer ciência” da forma caricaturizada pelo conto de Sagan.

As hipóteses ad hoc – isto é, as hipóteses auxiliares que não são testáveis em determinado momento – podem salvar quase todas as teorias de uma refutação específica. Mas isso não significa que podemos sustentar uma hipótese ad hoc pelo tempo que quisermos. Ela pode tornar-se testável, e um teste negativo pode nos forçar a abandoná-la, ou a introduzir uma nova hipótese secundária, e assim sucessivamente, ad infinitum. Na verdade, isso é algo que quase sempre evitamos (digo “quase” porque as regras metodológicas não são inflexíveis) (POPPER; 2010; p. 128)

Textos como o de Sagan associam, em geral, as hipóteses ad hoc a formas de “salvar as teorias” do falseamento. De forma bastante simplista, passam a sensação de que são hipóteses que mais atrapalham do que ajudam ao desenvolvimento científico. Negamos veementemente tal ponto de vista e observamos que, também os principais referenciais em filosofia da ciência percebem aspectos positivos da adoção de tais hipóteses, importantes para o desenvolvimento da ciência em suas diversas áreas.

Além de admitir a flexibilidade das regras metodológicas, Popper reforça que hipóteses ad hoc, com o desenvolvimento da ciência, podem tornar-se testáveis e, de forma complementar ao exemplo da citação acima em que testes posteriores falseiam tais hipóteses, não deixa também de considerar que existam casos em que tais testes a confirmem! Ainda que, segundo Popper, toda confirmação empírica de qualquer teoria científica seja, necessariamente, um édito temporário: “temos uma advertência para que não se profiram éditos severos demais contra as hipóteses ad hoc, afinal, elas podem tornar-se testáveis” (POPPER, 2010, p.128).

Em Popper, portanto, temos a afirmação de que tais hipóteses podem, no futuro, passar no teste das verificações independentes e, portanto, fazer parte do corpo da ciência, seja lá em qual de suas áreas. A concepção de Larry Laudan é ainda mais radical em suas conclusões: mesmo que não se

observem tais verificações independentes, por que excluir hipóteses que tenham resolvido anomalias e problemas pontuais? Seria objetivo da ciência prover algo mais do que isso?

Se uma teoria T2 resolveu mais problemas empíricos que sua predecessora – mesmo que tenha sido só um a mais- T2 é claramente preferível a T1 e, *ceteris paribus*, representa um progresso cognitivo em relação a T1. Podemos, porém, ir além e afirmar que o recurso a estratégias ad hoc, como definidos nas linhas anteriores, é perfeitamente coerente com o objetivo geral de aumentar a capacidade de resolver problemas. As modificações ad hoc, por sua própria definição, são empiricamente progressivas (LAUDAN, 2011, p. 163)

A avaliação que faz Imre Lakatos se mostra um pouco mais severa no que diz respeito a esse artifício

Por outro lado, de acordo com esses padrões sofisticados, a teoria de Galileu, segundo a qual os movimento naturais dos objetos terrestres era circular, não introduziu melhorias, pois não proibiu nada que não tivesse sido proibido pelas teorias relevantes que ele pretendia aprimorar (ou seja, pela física aristotélica e pela cinemática celeste copernicana). Essa teoria era, portanto, *ad hoc* e, portanto - do ponto de vista heurístico - sem valor (LAKATOS, 1976, p. 52)

O que Lakatos chama, nesta citação, de teoria ad hoc engloba teorias que não possuem excesso de conteúdo empírico se comparadas às predecessoras que pretende substituir. A ausência desse conteúdo empírico adicional esvazia seu poder heurístico. Para especificar melhor o que o termo representa para Lakatos devemos ter em mente que o autor trabalha com três modalidades distintas do que sejam tais hipóteses.

Eu faço distinção entre três tipos de hipóteses auxiliares ad hoc: aquelas que não apresentam excesso de conteúdo

empírico sobre suas antecessoras (ad hoc1), aquelas que possuem tal excesso de conteúdo, mas que não é corroborado, nem mesmo parcialmente (ad hoc2) e, finalmente, aquelas que não são ad hoc em nenhum desses dois sentidos, mas que não formam parte integral da heurística positivo (ad hoc3). (LAKATOS, 1976, p. 52- nota de rodapé)

Aquilo que Popper e Laudan discutem se aproxima mais do que Lakatos chama de ad hoc2 e, sobre a questão do aproveitamento ou não deste recurso heurístico (adoção delas por parte do cientista), sua normativa é muito similar à de ambos, isto é, tendo em vista a possibilidade de desenvolvimentos futuros do programa de pesquisa que corroborarem afirmações que foram, num primeiro momento, feitas apenas para resolver anomalias pontuais.

Por outro lado, isso não significa que a descoberta de uma inconsistência - ou de uma anomalia - deva interromper imediatamente o desenvolvimento de um programa: pode ser racional colocar a inconsistência em alguma quarentena temporária, ad hoc, e continuar com a heurística positiva do programa. Isso foi feito até mesmo na matemática, como mostram os exemplos do cálculo infinitesimal inicial e da teoria dos conjuntos ingênua. (LAKATOS, 1976, p. 176- nota de rodapé)

Lakatos não critica seu uso, mas relata que os sinais de degenerescência de um programa envolvem a adoção, cada vez maior, de hipóteses ad hoc para preservar o núcleo de um programa, sem que tal adoção gere incrementos em seu conteúdo empírico.

A adhocidade da constante cosmológica

A história recente da cosmologia apresenta um episódio bastante famoso acerca da suposta adoção de uma hipótese ad

hoc que gostaríamos de apresentar para ilustrar o ponto principal deste ensaio. No ano de 1917, Albert Einstein, que havia introduzido sua Teoria Geral da Relatividade dois anos antes, apresenta um artigo em que faz considerações de natureza cosmológica tomando por base sua recente teoria. Em suas linhas finais ele apresenta seu modelo de universo: finito, fechado sobre si mesmo e, o ponto que envolve o tema do presente ensaio, estático. O universo “de Einstein” é, portanto, parado! Mas o que manteria as estrelas em equilíbrio se a bem conhecida interação gravitacional é uma força de atração?

Um universo finito em que atua apenas uma força atrativa entre as estrelas fatalmente colapsaria sobre um único ponto em algum instante de tempo. Ciente desta dificuldade, Einstein teria inserido em suas equações uma espécie de “anti-gravidade”, uma até então desconhecida interação repulsiva entre a matéria que, mesmo que se comporte de maneira distinta, em larga escala contrabalancearia a força gravitacional. Esse seria o clássico exemplo em que o cientista insere uma hipótese adicional em sua teoria apenas com o intuito de “satisfazer” sua opinião/impressão prévia, neste caso, de como deve se comportar o universo como um todo. Nas primeiras páginas do texto, Einstein procura mostrar que a mecânica clássica de Newton apresenta dificuldades em descrever o potencial gravitacional do universo sem entrar em contradição com a mecânica estatística de Boltzmann.

É bem sabido que não basta associar a equação diferencial de Poisson¹ à equação do movimento do ponto

¹ Optamos por deixar em notas de rodapé as considerações matemáticas mais aprofundadas que possam, de alguma maneira, trazer mais respostas aos leitores interessados nos pormenores: a equação (1) é a famosa equação de Poisson, que relaciona a distribuição do potencial gravitacional (ϕ), gerado por uma massa (de densidade ρ), ao longo do espaço. Ela é introduzida por Einstein em seu artigo sem maiores

material para se obter um substituto completo para a teoria de ação a distância de Newton: é ainda necessário fazer intervir a condição de o potencial tender para um valor limite fixo no infinito espacial... Mal se entrevê maneira de resolver tais dificuldades sobre as bases da teoria de Newton. Poderá então perguntar-se se não haverá maneira de as remover modificando a teoria de Newton Vamos começar por indicar para isso um caminho que, não pretendendo ser um verdadeiro método, servirá, no entanto, de introdução ao que se vai seguir. (EINSTEIN, 1917, p. 225)

$$\Delta \varphi = 4 \pi K \rho$$

(equação 1, EINSTEIN, 1917, p. 225)

São muitos os caminhos que podem levar um cientista, como Einstein, a elaborar uma hipótese ad hoc: uma coerência interna de sua teoria, a necessidade de ajustá-la a dados empíricos, sua coerência com estruturas conceituais mais amplas e uma série de outros possíveis motivos. Na sequência de seu texto, o autor nos traz um relato bastante interessante que evidencia suas razões: remover as dificuldades matemáticas da teoria newtoniana em descrever o universo como um todo

Nos parágrafos seguintes vou levar o leitor pelo caminho um tanto indireto e tortuoso que eu próprio percorri, pois só assim poderei esperar interesse da sua parte para o resultado final. Trouxe-me esse caminho à opinião de que as equações de campo que até agora tenho proposto para a gravitação carecem ainda de uma pequena modificação, destinada a remover, na base da teoria da relatividade geral,

justificativas por já ser, em 1919, amplamente conhecida pelos físicos. Sua demonstração é obtida na mecânica Newtoniana e pode ser encontrada em (THORNTON; MARION, 1988, p.210).

as dificuldades de princípio que, no parágrafo anterior, apontamos para a teoria de Newton. (EINSTEIN, 1917, p. 225)

Dando prosseguimento em seu artigo, Einstein argumenta que, para que a descrição do potencial gravitacional em um ponto infinito fosse compatível com a distribuição de Boltzmann, considerando cada estrela como uma molécula desse “gás”, ele precisou inserir um segundo termo no potencial gravitacional. Esse termo adicional produz uma ação de repulsão, atuando como sua “anti-gravidade”, permitindo a manutenção do equilíbrio em seu universo estático (conferir RYDEN, 2016; CARROL, 1996). Trabalhos posteriores mostraram matematicamente a instabilidade de seu modelo de universo, o que, num primeiro momento, nos parece ter sido desconhecido e ignorado por Einstein (SOARES, 2012). A equação de Poisson assume, após sua modificação, a forma abaixo: (EINSTEIN, 1917, p.228)

$$\Delta \varphi - \lambda \varphi = 4 \pi K \rho$$

(equação 2, EINSTEIN, 1917, p.228)

A modificação, no texto de Einstein, da equação (1) para a equação (2) ocorre, segundo o autor, para explicar o comportamento do potencial gravitacional gerado pela distribuição de matéria astronômica². Deixaremos para que ele

² O lado esquerdo da equação representa o potencial, que está associado a uma força gravitacional (utilizando uma linguagem Newtoniana). Einstein percebe que sua concepção de universo estático não se compatibiliza com apenas um termo do lado esquerdo da equação. A inserção do segundo termo visa, segundo citação apresentada, permitir uma força resultante nula, mantendo a matéria do universo em equilíbrio. As muitas releituras de seu artigo, feitas pelos físicos (RYDEN, 2016;

mesmo exponha as vantagens de sua nova formulação da equação de Poisson:

Esta concepção tem, pelo menos, a vantagem de ser logicamente irrepreensível, e de ser aquela que melhor se cinge ao ponto de vista da teoria da relatividade geral; se ela é ou não compatível com os conhecimentos astronômicos atuais é questão que não discutiremos aqui. É certo que, para conseguir que esta concepção ficasse livre de contradições, tivemos de proceder a uma nova modificação ampliativa das equações de campo da gravitação. Deve, porém, acentuar-se que, mesmo que não se introduza o termo adicional nas equações de campo, se chega ainda à conclusão de um espaço com curvatura positiva: aquele termo apenas nos é necessário para tornar possível uma distribuição quase estática da matéria, tal como deve corresponder ao fato de serem pequenas as velocidades das estrelas. (EINSTEIN, 1917, p. 4)

Com os desenvolvimentos posteriores da cosmologia: contribuições de Friedman, Lemaitre, Hubble, e tantos outros, foi se estabelecendo na nascente comunidade de cosmólogos profissionais a crença de que, em um instante no passado, toda a matéria do universo encontrava-se confinada em uma região menor que uma cabeça de alfinete e, por razões ainda não plenamente conhecidas até hoje, passou por uma violenta explosão, evento conhecido como o Big-Bang. Se o universo se expande ainda atualmente, como acreditam os astrônomos, por conta de uma explosão inicial, a constante cosmológica perde sua razão de existir por dois motivos: (i) não existe equilíbrio com a gravidade, afinal o universo não se encontra em equilíbrio e, (ii) a explosão inicial deu o “impulso” (em uma linguagem excessivamente clássica) necessário para a velocidade de recessão das galáxias, o que esvazia a

CARROL, 1996), interpreta o segundo termo como uma tentativa de inserir uma “força de repulsão gravitacional”.

necessidade da presença de uma força repulsiva atuando ao longo do tempo.

Existe um relato muito difundido entre livros didáticos de astronomia e de divulgação científica sobre esse assunto: Einstein teria, supostamente, se arrependido de ter incluído essa hipótese ad hoc em seu artigo de 1917 e teria admitido ser essa atitude o “maior erro de sua vida”. Apenas a título de ilustração deste relato, apresentamos um trecho de um famoso livro didático de Astronomia, bastante utilizado nos principais cursos de graduação e pós-graduação no Brasil e nas principais universidades do mundo, que, ao que nos parece, propaga essa história que carece de veracidade.

Isso permitiu que Einstein alcançasse seu objetivo de equilibrar seu universo estático e fechado, contra um colapso gravitacional. Mais tarde, após a descoberta da expansão do universo, Einstein expressou seu arrependimento por incluir o termo Λ em suas equações de campo e foi citado como se referindo a ele como “o maior erro da minha vida. (CARROL e OSTLIE, 1996)

Essa “historinha” apresenta uma série de problemas. Os trabalhos de outros eminentes astrônomos fazem correções nos resultados de Einstein, o mais célebre deles talvez seja a sequência de publicações de Alexander Friedman, que envia um emissário chamado Krutkov pessoalmente para se encontrar com Einstein. O objetivo do encontro foi convencer o fundador da teoria da relatividade de que suas equações apresentam um erro fundamental e que, de acordo com a própria teoria da relatividade, não deveríamos descartar as soluções matemáticas que descrevem um universo em expansão e, até mesmo, em contração (KRAGH, 1996, p. 26).

O curioso é que Friedman não faz nenhuma objeção à presença da constante cosmológica, inclusive a insere em seus

artigos. O mesmo ocorre com os artigos de Georges Lemaître (BAGDONAS et al, 2018). Uma hipótese ad hoc não é, necessariamente, a inserção aleatória de um termo adicional em equações matemáticas, fruto de uma atitude arbitrária e irracional. Além disso, há trabalhos sérios em história da ciência que já questionaram esse famoso relato de “admissão de culpa” por parte de Einstein, que supostamente teria sido dita a George Gamow em uma visita ao observatório de Monte Wilson, apesar de tal narrativa continuar se perpetuando³.

Em sua autobiografia, Gamow (1904-1968) afirmou que durante seus encontros com Einstein, nos EUA, enquanto ambos trabalhavam com pesquisas militares durante a Segunda Guerra Mundial, o alemão teria dito que a constante cosmológica teria sido “o maior erro de sua carreira”. Porém, Gamow pode ter sido enfático demais na escolha das palavras. Não há documentação comprovando que Einstein realmente se arrependeu do uso desta constante, que continuou sendo empregada tanto por ele e por outros cosmólogos durante muito tempo (BAGDONAS et al, 2018, p. 6).

Esse tipo de anedota, bastante presente nos livros didáticos e desmentido por trabalhos em história da ciência, também contribui para dar um caráter negativo e injusto para a recorrente prática de inserção de hipóteses ad hoc. Assim como a hipótese introduzida por Einstein, um episódio também relacionado à cosmologia é outro exemplo da ocorrência de explicações ad hoc na ciência. Trata-se das primeiras investigações sobre a matéria escura no universo, tema da seção a seguir.

³ Enquanto escrevemos esse ensaio, um dos autores assistiu um seminário de cosmologia, em que a mencionada “frase dita por Einstein” foi relatada, acompanhada de risos da plateia, sem que se levantasse a menor suspeita sobre a veracidade do episódio.

A adhocidade da hipótese da matéria escura

A virada do século XIX para o século XX foi particularmente revolucionária para a astronomia observacional, com advento dos grandes telescópios, o que permitiu um estudo mais sistemático sobre a natureza e a cinemática da Via-Láctea, bem como desvendar o mistério em volta das nebulosas, revelando a existência de grandes aglomerados estelares à distâncias imensamente maiores do que as dimensões da nossa galáxia. Desde pelo menos Vestu Slipher, em 1919, passando pelo famoso artigo de Hubble e Humason de 1931, foram publicados importantes trabalhos relacionando as velocidades de afastamento das nebulosas, obtido por medidas de efeito Doppler, e as distâncias destes aglomerados, obtidas através da observação de estrelas variáveis cefeidas. Em 1933 Fritz Zwicky publica um trabalho com ambas as determinações para uma amostragem de nove galáxias, com destaque para o aglomerado Coma. A massa total do aglomerado, obtida por meio de sua luminosidade resultante se revelou muito menor do que seu valor calculado por meio da distribuição de velocidades medidas por efeito Doppler, ocasionando uma das primeiras especulações sobre a existência de matéria escura no universo.

Para obter, conforme observado, um efeito Doppler de tamanho médio de 1000 km/s ou mais, a densidade média no sistema Coma teria que ser pelo menos 400 vezes maior do que o valor obtido com base em observações de matéria luminosa [...]. Se isso fosse verificado, levaria ao resultado surpreendente de que a matéria escura existe em densidade muito maior do que a matéria luminosa. (ZWICKY, 1933, p.12 tradução livre-original em nota de rodapé)

A depender do critério de adhocidade adotado, a hipótese de Zwicky também foi feita especificamente tendo em vista a solução de um problema: uma incompatibilidade entre a massa luminosa e a massa gravitacional de Coma. É certo que o termo “matéria escura” não vem sendo empregado, desde então, para representar exatamente as mesmas grandezas, ele foi sendo melhor assimilado por outros pesquisadores, demarcado e aumentando a precisão de seu significado. Uma reconstrução dos primeiros usos desse termo pode ser consultada em (RODRIGUES; ARBOLEDA, 2021), de onde extraímos uma breve ilustração das modificações pelas quais o termo foi passando em trabalhos posteriores.

Entretanto, essa matéria escura que ele se referia era qualquer matéria não luminosa, e inclusive considerou possíveis efeitos de absorção devido a essa, e uma possível origem como estrelas de baixo brilho; enquanto atualmente os esforços referentes a matéria escura estão concentrados numa matéria que não é feita da matéria usual que conhecemos, a matéria escura que tratamos aqui não pode absorver ou emitir luz, simplesmente não interage com as ondas eletromagnéticas, ela é invisível. No sentido usado por Zwicky, de uma matéria usual que não podemos ver, o termo já era usado muito antes. O que Zwicky trouxe de novo foi mostrar uma grande discrepância entre a massa dinâmica e a luminosa de um aglomerado, e essa discrepância tem relação com o que hoje entendemos por matéria escura (RODRIGUES, ARBOLEDA, 2021, p. 14).

A hipótese da matéria escura, que evidentemente não pode ser reduzida a um episódio ou evento isolado, mas que remete aos trabalhos de Zwicky e Oort, se deu para resolver um problema bem concreto: compreender a causa das distribuições de velocidades estelares nas galáxias e, portanto, foi ad hoc. Na ausência de causas conhecidas, a distribuição destas velocidades deveria seguir o padrão “kepleriano”, fornecido pela aplicação da terceira lei de Kepler. À medida

em que cada estrela se afasta mais do núcleo galáctico, sua velocidade deveria ser reduzida, de acordo com o padrão fornecido pela mecânica clássica (de onde extraímos as leis de Kepler).

O breve desenvolvimento matemático que iremos apresentar tem por intuito justificar, de forma mais pormenorizada, o comportamento esperado para a distribuição de velocidades em galáxias, chamado de “Kepleriano”, que envolveria uma redução de velocidades para estrelas mais distantes do centro gravitacional da distribuição de matéria, o que não correspondeu aos valores medidos, abrindo caminho para explicações ad hoc dos resultados encontrados.

A mecânica newtoniana lançou luzes sobre uma série de problemas, até então, superficialmente conhecidos e ainda não completamente explicados. Dentre seus inumeráveis feitos podemos incluir a famosa demonstração da terceira lei de Kepler, válida enquanto descrição do movimento de diferentes planetas ao redor de uma estrela, mas também enquanto descrição de diferentes estrelas ao redor do centro galáctico, ou até mesmo enquanto descrição dos movimentos de diferentes satélites ao redor de um mesmo planeta, um domínio de validade além daquele imaginado por Kepler ao enunciar suas leis dos movimentos planetários. A chamada lei harmônica pode ser obtida se igualarmos a força gravitacional entre uma estrela individual e a massa resultante da galáxia, aproximada por uma massa pontual localizada no centro da distribuição de matéria. Faremos a aproximação para movimentos circulares.

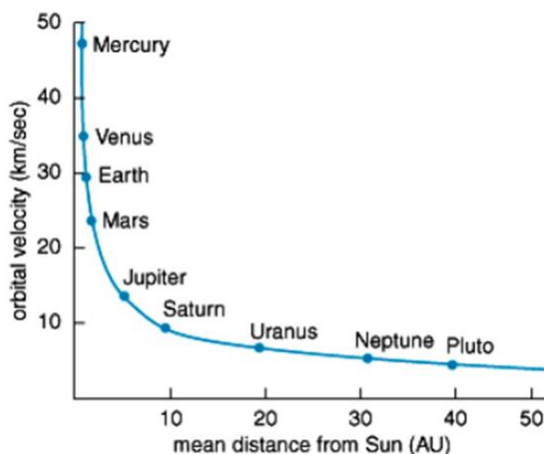
$$\frac{GMm}{R^2} = \frac{mv^2}{R}$$

$$\frac{GM}{R} = v^2$$

$$v = \sqrt{(GM/R)} \quad (\text{equação 3})$$

Observamos, pela equação 3 que, em uma distribuição de estrelas em revolução ao redor do centro galáctico, suas velocidades deveriam diminuir na proporção inversa à raiz quadrada de suas distâncias até o centro de massa. A título de ilustração do comportamento esperado, inserimos abaixo, como comparação, a distribuição de velocidades dos planetas ao redor do nosso Sol.

Figura



1: planetas do Sistema Solar como exemplo de distribuição kepleriana de velocidades (obtida de Maria de Fátima Oliveira Saraiva (<http://astro.if.ufgrs.br/galax/index.htm>))

A equação 3 justifica o comportamento gráfico obtido na figura 1, uma vez que as velocidades de revolução dos planetas ao redor do Sol é, no modelo Kepleriano,

proporcional à raiz quadrada da distância entre ambos. A mesma curva da figura 1 descreveria a distribuição de velocidades de estrelas ao redor dos núcleos de cada galáxia, o que não foi observado empiricamente! Essa incompatibilidade está na origem da hipótese sobre a existência de matéria escura no universo.

Entre anomalias e crise

Descrevendo o cenário em uma linguagem Kuhniana, a inclusão de hipóteses ad hoc é sinal de fé, por parte da comunidade científica, na capacidade e no potencial do paradigma em resolver quebra-cabeças. Zwicky não questiona a validade da gravitação de Newton diante da enorme diferença entre as velocidades observadas e as previstas teoricamente, da mesma forma que Einstein acreditava na estabilidade do universo ao postular a existência de sua constante cosmológica. A instabilidade do universo proposto por Einstein foi demonstrada por trabalhos matemáticos posteriores (SOARES, 2012/), o que, por si só, lança dúvidas seríssimas sobre a constante cosmológica, ao menos na forma como foi concebida inicialmente.

Todavia, a mesma foi mantida em diversos trabalhos em cosmologia nos anos imediatamente seguintes à publicação do artigo de Einstein, sendo, portanto, um elemento importante na caracterização da nascente cosmologia científica. Esse exemplo ilustra uma importante característica da atividade científica: a adoção de hipóteses, mesmo que posteriormente se revelam equivocadas, pode contribuir para a resolução de problemas, para a construção de conceitos mais robustos e, de forma mais geral, para o desenvolvimento científico⁴.

⁴ Muitas hipóteses foram importantes para o progresso da ciência, mesmo que se revelem ontologicamente incorretas à luz de uma análise contemporânea: podemos citar a hipótese dos 4 elementos de Empédocles, ou os

Medidas observacionais das velocidades de rotação estelares ao longo de galáxias mostram que há “algo estranho” com seus valores. A figura 2 ilustra bem a distinção entre o comportamento esperado e o observado, que se mostra mais acentuada na medida em que analisamos as estrelas na periferia do disco galáctico. Diferentemente da previsão kepleriana, as velocidades observadas não diminuem consideravelmente quando observamos as estrelas mais distantes do centro.

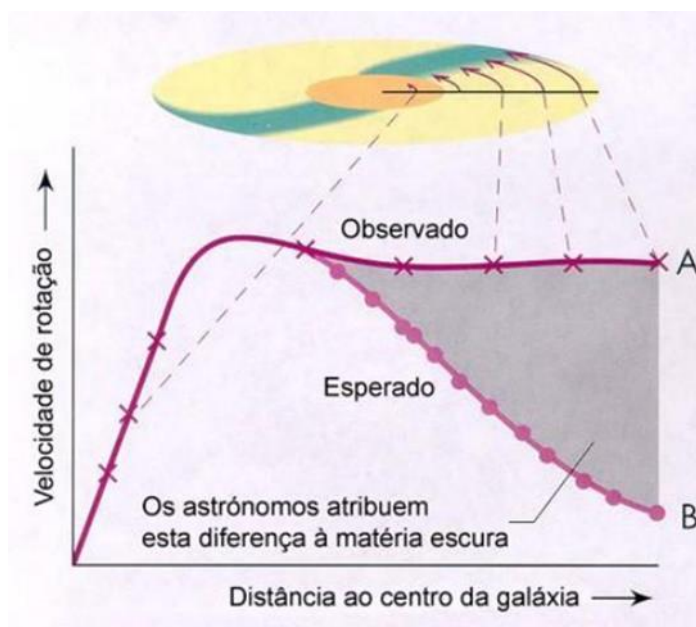


Figura 2: esquema da distinção entre velocidades esperadas e velocidades medidas para estrelas nas periferias das galáxias, obtida de Maria de Fátima Oliveira Saraiva (<http://astro.if.ufgrs.br/galax/index.htm>)

epíclis de Ptolomeu. Acreditamos que seja consenso que tais hipóteses contribuam para uma melhor compreensão da natureza e que, negar tal contribuição seja uma atitude, no mínimo, anacrônica.

Diante de tal anomalia empírica, poderíamos considerar três cenários possíveis:

i) Há algo errado com os dados observacionais das velocidades orbitais, o que levaria à tentativa de refinamento das medidas ou revisão das próprias técnicas empregadas para tal medição.

ii) Há algo de errado com a teoria, o que levaria à suspeita acerca dos instrumentos teóricos utilizados, a saber, a gravitação newtoniana, que ainda é uma imensa fonte de modelos teóricos se utilizada num domínio adequado, mesmo com o advento da mecânica quântica e da teoria da relatividade de Einstein.

iii) Existem fatores desconhecidos que levam a um aparente conflito entre teoria e dados observados. Essa foi a conclusão deste episódio, uma vez que a presença de matéria escura nas bordas das galáxias se revelou como causa das anomalias gravitacionais. Da mesma forma que o planeta Netuno foi descoberto após a verificação de anomalias gravitacionais na órbita de Urano, a suspeita de interações gravitacionais ainda desconhecidas na periferia das galáxias poderia explicar as causas que geram os regimes de velocidades observados.

A opção (iii) leva, muitas vezes, à adoção de hipóteses ad hoc, elaboradas com o intuito específico de eliminar as contradições observadas entre teoria e observação. Observamos com bastante abundância de episódios históricos (GUEDES; KOEHLER, 2015) a multiplicação de tais hipóteses, especialmente durante o período da prática de resolução de quebra-cabeças, característico da chamada “ciência normal” de Kuhn, ou do desenvolvimento da heurística positiva de Lakatos, alterando a extensão do chamado “cinturão de proteção”, protegendo o núcleo do ataque de tais anomalias.

Independentemente da linguagem teórica expressa, a elaboração de hipóteses para resolver anomalias é uma forte expressão de credibilidade no paradigma, ou no programa de pesquisa. Alguns elementos contribuem para explicar as distribuições de velocidades ao longo da direção radial em muitas galáxias: além da interação gravitacional com outras galáxias, da contribuição de gases atômicos, existe a contribuição da, hoje conhecida, presença de matéria escura na periferia galáctica. Sua influência gravitacional contribui ativamente para aumentar as velocidades de estrelas contidas nas regiões exteriores do halo. No artigo de Oort (OORT, 1940) é possível perceber a suspeita do autor de que devam haver contribuições distintas, além da massa luminosa, para explicar as curvas de rotação observadas nas galáxias

Uma característica notável é o caráter não gaussiano pronunciado da distribuição das velocidades Z , o que sugere que estamos olhando para uma mistura de tipos muito diferentes de estrelas, ou de estrelas e material interestelar. Embora as distribuições de velocidade particulares encontradas dependam consideravelmente das suposições relativas à distribuição de massa, vimos que o caráter não gaussiano permanece, mesmo que se suponha que a distribuição de massa seja a mesma que a distribuição de luz. (OORT, 1940, p.12)

Uma vez que não se observa uma distribuição gaussiana de velocidades, um amontoado de matéria não luminosa (halo escuro) deve contribuir para explicar as distribuições empíricas de velocidades. Na figura 3, podemos comparar as velocidades keplerianas com os valores observados, com as possíveis contribuições adicionais. Além de um halo de matéria escura, que envolve a galáxia, também existem efeitos devidos à presença de gás atômico distribuído ao longo da galáxia.

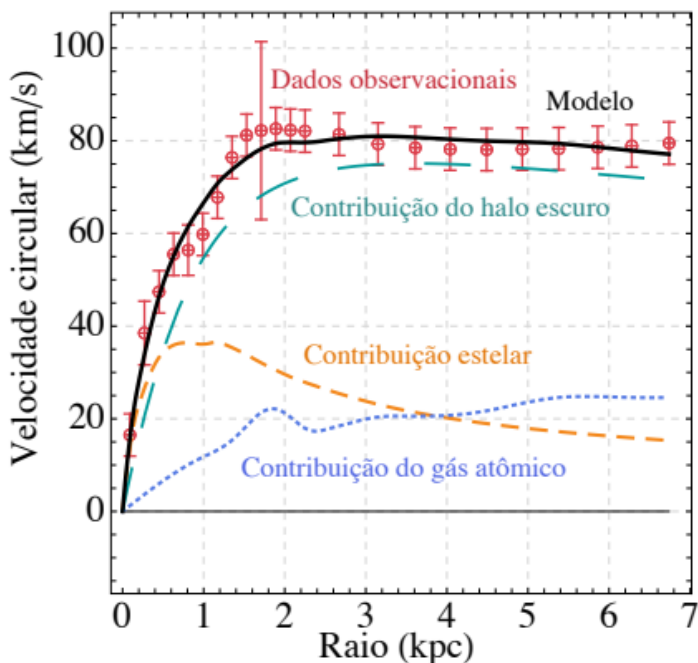


Figura 3: as diferentes contribuições para as velocidades estelares: a linha amarela tracejada descreve o comportamento esperado para uma distribuição kepleriana. Tal queda, na análise dos dados observacionais, simplesmente não ocorre, motivando a articulação da hipótese acerca da existência de matéria escura no universo. Interferências nos dados observacionais também são causadas por gases atômicos (que podem ser ignoradas em uma discussão introdutória por serem efeitos de menor impacto na distribuição observada de velocidades). Figura obtida de (RODRIGUES; ARBOLEDA, 2021).

Muitos autores já alertaram sobre a ingenuidade positivista da verificabilidade enquanto simples comparação entre teorias e dados empíricos. A esse respeito, podemos citar Kuhn, Lakatos, Popper e Duhem (CHIAPPIN; LEISTER, 2015), bem como para uma avaliação igualmente superficial sobre o critério de falseabilidade direta. Tal modalidade de falsificacionismo foi, de forma injusta, atribuída a Popper.

Essa injustiça é denunciada por Lakatos, que faz uma distinção muito didática entre o falseacionismo ingênuo e o falseacionismo verdadeiramente Popperiano, chamado por ele de sofisticado.

Para o falseacionista ingênuo uma teoria é falseada por um enunciado “observacional” que conflita com ela (ou que ele decida interpretar como conflitando com ela). Para o sofisticado uma teoria T só será falseada se outra teoria T' tiver sido proposta com as seguintes características: (1) T' tem um excesso de conteúdo empírico em relação a T; isto é, prediz fatos novos, a saber, fatos improváveis à luz de T, ou mesmo proibidos por ela; (2) T' explica o êxito anterior de T, isto é, todo o conteúdo não-refutado de T está incluído no conteúdo de T'; e (3) parte do conteúdo excessivo de T' é corroborado (LAKATOS, 1979, página 142).

A necessidade da existência de hipóteses refutadoras é condição para a mudança científica, sem a qual a presença de anomalias não é suficiente para levar os cientistas a abandonar uma teoria aceita. Em maior ou menor medida encontramos a defesa dessa tese nos textos de Popper, Kuhn e Lakatos. No artigo dos professores Chiappin e Ana Carolina Leister (CHIAPPIN; LEISTER, 2015, p11) são apresentadas citações nas obras dos três autores a esse respeito, além da importante observação de que tal crença é mais antiga e encontra-se presente nos textos de Pierre Duhem.

Ainda que esses autores, Lakatos ou Popper e Kuhn, tenham percebido, por meio, como eles alegam, da história do desenvolvimento científico, que o processo de escolha de teorias pelos cientistas e comunidade é muito mais complexo do que a análise puramente lógica, pois deve envolver uma dimensão metodológica, regras extralógicas, portanto, mais ajustada para descrever o comportamento dos cientistas, revelados pela história, no processo de escolha da teoria científica, a tese defendida neste artigo é de que esse mesmo entendimento – e com os mesmos

argumentos – de uma metodologia mais complexa do processo de escolha de teorias já tinha sido observado por Duhem e, também, sob a argumentação de que a história da ciência aponta para uma escolha racional de teorias pressupondo teorias rivais e a natureza (CHIAPPIN; LEISTER, 2015, p11)

Se podemos afirmar, portanto, que simples anomalias não possuem “força metodológica” para levar a uma refutação (pelo menos isoladamente), torna-se possível situar a invocação de hipóteses ad hoc dentro do contexto do desenvolvimento de teorias como “instâncias de corroboração”, enquanto parte do esforço do cientista para preservar o núcleo de seu programa de pesquisa. A adoção de hipóteses dessa natureza é um procedimento que atua no cinturão de proteção, moldando-o, ajustando-o diante do ataque causado por aparentes anomalias que surgem.

A heurística negativa especifica o “núcleo” do programa que é “irrefutável” por decisão metodológica dos seus protagonistas; a heurística positiva consiste num conjunto parcialmente articulado de sugestões ou palpites sobre como mudar e desenvolver as “variantes refutáveis” do programa de pesquisa, e sobre como modificar e sofisticar o cinto de proteção “refutável” (LAKATOS, 1979, p.165)

Em outras palavras, elaborar hipóteses desta natureza, que não acrescentem conteúdo empírico, formuladas diante de um evidente problema, não solucionado pelo paradigma até então, é parte da atividade ordinária da ciência normal. A fé no paradigma leva à elaboração de hipóteses com a única finalidade de explicar uma anomalia pontual. Muitas das críticas a Kuhn reiteram a sua dificuldade em estabelecer o quanto a ciência normal é “disposta” a aceitar um número crescente de anomalias sem perder a esperança de ver uma solução satisfatória formulada pelos adeptos do paradigma.

A descoberta começa quando se toma consciência de uma anomalia, isto é, quando se reconhece que a natureza violou, de algum modo, as expectativas paradigmáticas que governam a ciência normal. Prossegue com uma exploração mais ou menos ampla da área onde ocorreu a anomalia. E termina apenas quando a teoria do paradigma for ajustada para que o que é anômalo passe a ser esperado. A assimilação de um novo tipo de fato requer mais do que um ajustamento aditivo da teoria e até esse ajustamento se concretizar – até o cientista ter aprendido a ver a natureza de modo diferente – o novo fato não é de modo algum um fato científico. (KUHN, 1975, p.78)

A epistemologia de Kuhn é uma interessante forma de descrever as explicações dadas por Oort e Zwicky: a fé no paradigma os leva a especular sobre causas ocultas e agentes adicionais que passaram despercebidos na análise do problema (curvas de rotação galácticas) ao invés de discutir a validade das leis de Kepler ou da lei do inverso do quadrado da distância, por exemplo.

Considerações finais

Algumas discussões são bastante recorrentes e se mostram presentes nas tentativas de olhar para a história da ciência à luz das mais conhecidas e consagradas concepções epistemológicas. O status “aberto” de tais discussões deve ser um estímulo a mais estudos de casos e discussões posteriores. Um interessante exemplo é o conflito entre o caráter normativo e o caráter descritivo das diferentes formas de olhar para o passado da ciência, citado no início deste artigo. Uma concepção normativa apresenta a pretensão de estabelecer normas e critérios de demarcação entre o que é ou não uma história do desenvolvimento verdadeiramente científico, ou racional. Por outro lado, um olhar descritivo busca desenvolver metodologias científicas e, até mesmo, uma concepção de racionalidade científica que seja capaz de

contemplar a verdadeira história da ciência que, para não cairmos em uma circularidade hermenêutica, deve ser conhecida de antemão, seja por motivos psicológicos, razões sociológicas ou simples consenso entre cientistas. Evidentemente a citada circularidade não será completamente resolvida com as tentativas de conciliar aspectos normativos e descritivos do desenvolvimento científico. Autores como Kuhn, Lakatos e Laudan se debruçaram sobre essa questão e suas críticas alimentaram um riquíssimo debate ao longo dos últimos 50 anos.

Embora sua terminologia seja diferente, seu aparato analítico está tão próximo ao meu quanto necessário: núcleo estrutural, trabalho no cinturão protetor e fase degenerativa são paralelos bem próximos a meus paradigmas, ciência normal e crise. No entanto, significativamente, Lakatos não vê como funcionam essas noções compartilhadas, nem mesmo quando as aplica ao que é, para mim, um caso ideal. Permitam-me ilustrar uma das coisas que ele poderia ter visto e dito. Minha versão, como a dele, ou como qualquer outro trecho de narrativa histórica, será uma reconstrução racional. Mas não pedirei a meus leitores que utilizem “toneladas de sal”, nem acrescentarei notas de rodapé assinalando que o que está em meu texto é falso (KUHN, 2006, p.187).

Colocada a questão principal deste ensaio nesse contexto, devemos ter um duplo olhar: para os episódios históricos à luz das principais descrições do progresso da ciência e, ao mesmo tempo, para as descrições do progresso da ciência à luz dos episódios históricos. A utilização de hipóteses ad hoc, por parte de Einstein e Zwicky foram estratégias inseridas apenas para “salvar a teoria”? Elas trouxeram nenhuma contribuição para o poder preditivo de suas teorias cosmológicas? Uma filosofia da ciência excessivamente normativa pode incorrer no risco de emitir éditos excessivamente duros sobre a importância das

hipóteses ad hoc, classificá-las como “atitude anticientífica”, uma maneira de “tapar o Sol com a peneira” e, de forma geral, ocultar dificuldades existentes em teorias que se propõem a explicar o funcionamento da natureza.

Tais descrições sobre estas hipóteses nos parecem um pouco exageradas quando analisadas nestes e, possivelmente, em muitos outros episódios da história da ciência. A hipótese de Einstein, longe de ser o maior erro de sua vida, foi importante para a gênese de novas concepções cosmológicas e modelos de universo. Foi mantida nos trabalhos de Friedman, Lemaitre e muitos outros (conferir BAGDONAS et al, 2018). A hipótese da existência de matéria escura nas periferias da galáxia foi desenvolvida, aperfeiçoada e detalhada por Oort e outros contemporâneos; e se torna atualmente uma unanimidade entre manuais de astronomia e artigos científicos.

Apesar de ter sido concebida para explicar o comportamento de um gráfico obtido empiricamente, não deixa de ter sido uma hipótese fundamental para a compreensão de aglomerados estelares, da astronomia extragaláctica. Hipóteses ad hoc não estão apenas abundantemente presentes na história da ciência, como são fundamentais para seu desenvolvimento. Tais rótulos pejorativos, que as classificam como formas de mascarar anomalias e incoerências conceituais não nos parece, sequer, ser a forma como as consagradas filosofias da ciência olham para tais artifícios, como buscamos demonstrar ao longo deste ensaio. A hipótese de Einstein abriu caminhos também para a descoberta da matéria escura, uma vez que enfatizou o quanto a atração gravitacional, considerada em sua expressão clássica, não é suficiente para “modelar” o universo como um todo. A relação entre a sua hipótese e a de Zwicky é um exemplo, dentre muitos na história da ciência, do papel heurístico das soluções ad hoc.

Referências

- BAGDONAS, A.; ZANETIC, J; GURGEL, I. 2018. *O maior erro de Einstein?* Debatendo o papel dos erros na ciência através de um jogo didático sobre cosmologia. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 35, n. 1, p. 97-117.
- CARROL, B.; OSTLIE, D. 1996. *An introduction to modern astrophysics*. Addison-Wesley.
- CHIAPPIN, J. R. N, LEISTER, C. Duhem como precursor de Popper, Kuhn e Lakatos sobre a metodologia da escolha racional de teorias: da dualidade à trilateralidade metodológica. Veritas: revista de Filosofia da PUCRS, v.60, n.2, maio-agosto. 2015.
- EINSTEIN, A. (1917). *Considerações cosmológicas sobre a teoria da relatividade geral*. Extraído de “TEXTOS FUNDAMENTAIS DE FÍSICA MODERNA”. FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN. 6ª EDIÇÃO.
- GUEDES, Leandro Lage dos Santos., Carlos Benevenuto Guisard KOEHLER, e Universidade Federal do Rio de Janeiro. *O Papel Das Hipóteses Ad Hoc Na Construção De Teorias Científicas*. UFRJ, 2015.
- HUBBLE, E; HUMASON, M. 1931. *The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae*. Astrophysical Journal.
- KRAGH, H. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press, 1996.
- KUHN, T. *Estrutura das Revoluções Científicas*. São Paulo: Perspectiva. 1975.
- _____. *O Caminho Desde a Estrutura*. Trad. C. Mortari. São Paulo: Unesp, 2006.
- LAKATOS, I. “*O Falseamento e a Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica*”. LAKATOS, I; MUSGRAVE, A. (Org.). *A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*. São Paulo: Editora Cultrix/Editora da Universidade de São Paulo, 1979, p. 109-243.
- LAUDAN, Larry. *O progresso e seus problemas: Rumo a uma teoria do crescimento científico*. Trad. por Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora Unesp, 2011.
- OORT, J. H. *Some Problems Concerning the Structure and Dynamics of the Galactic System and the Elliptical Nebulae NGC 3115 and 4494*, Astrophys. J. 91 273 (1940).

POPPER, Karl. “O problema da demarcação” in Textos Escolhidos. Org. David Miller. Rio de Janeiro: Contraponto: Ed. PUC-Rio, 2010.

RODRIGUES, D, C. E HERNÁNDEZ-ARBOLEDA, A. “Rotação de galáxias e matéria escura”, Cad. Astro., vol. 2, nº 1, p. 6, fev. 2021.

RYDEN, B. *Introduction to Cosmology*, Cambridge University Press, 2016.

SAGAN, C. *O mundo assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1996.

SLIPHER, V. Nebulae. *NASA Astrophysics Data System*, 1917.

SOARES, D. *O universo estático de Einstein*. Rev. Bras. Ensino Fís. 2012, vol.34, n.1.

THORNTON, S. T; MARION, J. B. *Classical dynamics of particles and systems*. Harcourt Brace Jovanovich, 1988.

ZWICKY, F. *Die Rotverschiebung von extra-galaktischen Nebeln*, *Helvetica Physica Acta* 6 110 (1933)

(Submissão: 01/05/23. Aceite: 14/03/24.)