



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciências Sociais

Instituto de Filosofia e Ciências Humanas

Felipe Tovar Falciano

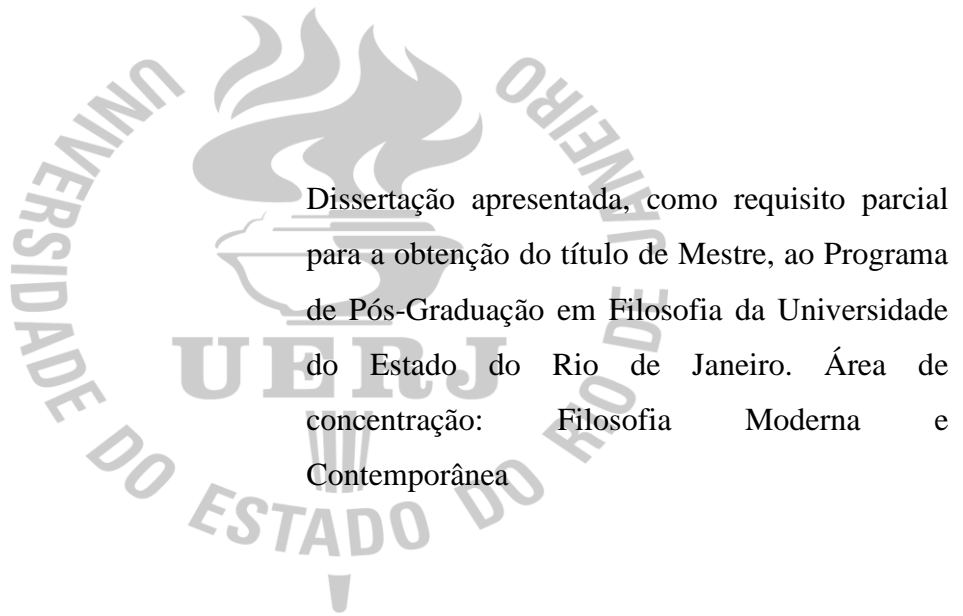
**Cosmologia:
perspectiva filosófica de uma ciência histórica**

Rio de Janeiro

2017

Felipe Tovar Falciano

**Cosmologia:
perspectiva filosófica de uma ciência histórica**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Filosofia Moderna e Contemporânea

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto Passos Videira

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CCS/A

F178	<p>Falciano, Felipe Tovar Cosmologia: perspectiva filosófica de uma ciência histórica / Felipe Tovar Falciano. – 2017. 124f.</p> <p>Orientadora: Antonio Augusto Passos Videira. Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas. Bibliografia.</p> <p>1. Cosmologia - Teses. 2. Epistemologia – Teses. 3. Ciência – Filosofia – Teses. I. Videira, Antonio Augusto Passos. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas. III. Título.</p> <p>CDU 524.8</p>
------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Felipe Tovar Falciano

**Cosmologia:
perspectiva filosófica de uma ciência histórica**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Filosofia Moderna e Contemporânea

Aprovado em 19 de Dezembro de 2017.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Augusto Passos Videira (Orientador)
Instituto de Filosofia e Ciências Humanas – UERJ

Prof. Dr. Marcelo Byrro Ribeiro
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Rodolfo Petrônio da Costa Araújo
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2017

DEDICATÓRIA

À minha família que agora inclui Marie e Luca.

AGRADECIMENTOS

Todo trabalho acadêmico é composto pelo acúmulo de conhecimento e estudo desenvolvido ao longo de toda nossa vida. Por isso, não há como não prestar homenagem a todos os meus antigos professores. Porém, hoje desfruto de outras fontes como meus colegas de pesquisa e meus alunos além do grupo de pesquisa de Estudos Sociais e Conceituais de Ciência, Tecnologia e Sociedade.

Gostaria de agradecer em especial ao Prof. Dr. Antonio Augusto Passos Videira que aceitou o risco em me orientar e sempre esteve totalmente acessível para longas discussões. Além de orientador, considero o Guto um amigo por quem prezo enormemente nossa amizade.

Tenho ainda o privilégio de ser casado com uma pessoa inteligente e maravilhosa com quem compartilho não apenas minha vida sentimental como todos os nossos questionamentos e desafios intelectuais. Estimo esta afinidade e amor como o bem mais precioso que possuo.

RESUMO

FALCIANO, Felipe Tovar. *Cosmologia: perspectiva filosófica de uma ciência histórica*. 2017. 124f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

A cosmologia distingue-se de todas as outras ciências naturais por seus objetivos e seu objeto de estudo. No início do século 20, a cosmologia sofria com a desconfiança dos físicos quanto à sua cientificidade. Em contraste, hoje em dia, a cosmologia enquanto estudo sistemático do universo goza de respeito da comunidade científica. Nosso objetivo é analisar como e quais foram os motivos que levaram a aceitação da cosmologia na qualidade de ciência natural. Para tanto, faremos uma análise epistemológica e metafísica dos objetivos e do objeto de estudo da cosmologia. Em particular, examinaremos a evolução da prática da cosmologia ao longo do século 20 e a transformação dos conceitos básicos associados a esta área de pesquisa científica.

Palavras-chave: Cosmologia. Epistemologia. Filosofia da ciência.

ABSTRACT

FALCIANO, Felipe Tovar. *Cosmology: philosophical perspective of a historical science*. 2017. 124f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Cosmology departs from all other natural sciences by its goals and object of study. In the beginning of the 20th century, physicists mistrusted the scientific attributes of cosmology. In contrast, now a day, the scientific community respects cosmology as a systematic study of the universe. In the present work, we shall examine how and which grounds have allowed the endorsement of cosmology as a natural science. For that, we shall carry an epistemological and metaphysical analysis of the goals and object of study of cosmology. In particular, we shall follow the evolution of the work on cosmology throughout the 20th century and the transformation of the basic concepts associated with this particular area of scientific research.

Keywords: Cosmology. Epistemology. Philosophy of science.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	8
1 FUNDAMENTOS CONCEITUAIS DA COSMOLOGIA	14
1.1 Cosmologia, uma ciência histórica	14
1.2 Natureza do Espaço e do Tempo	22
1.3 Causalidade	30
1.4 Noções de Tempo e Espaço	35
2 TEORIAS, REALISMO CIENTÍFICO E OBSERVAÇÃO EM COSMOLOGIA ...	42
2.1 Base empírica do conhecimento científico	44
2.2 Verificacionismo versus falseacionismo	52
2.3 Realismo científico	59
2.4 Antirrealismo astrofísico	66
3 CONSTRUÇÃO DO MODELO PADRÃO DA COSMOLOGIA	74
3.1 História recente da cosmologia científica	77
3.2 Mudanças na comunidade científica	81
3.3 História dos satélites modernos	83
3.4 Fundamentação observacional do modelo padrão da cosmologia	88
4 REFLEXÕES SOBRE O PROJETO DA COSMOLOGIA CIENTÍFICA	96
4.1 O fim da cosmologia	97
4.2 O objeto da cosmologia	100
4.3 Relação entre o Macro- e Microcosmo	104
4.4 Estatuto ontológico dos entes astrofísicos	109
CONCLUSÃO	117
REFERÊNCIAS	119

INTRODUÇÃO

No final do século 19, a física gozava de uma posição de prestígio com o entendimento do triunfo da visão mecanicista do mundo. Porém, já neste mesmo período, avanços na descrição dos fenômenos eletromagnéticos, a introdução de leis estatísticas na explicação dos fenômenos, a teoria cinética dos gases e a termodinâmica apontavam para a necessidade de reestruturação dos fundamentos de nossa descrição da natureza. Esses desdobramentos resultaram na formulação da mecânica quântica e da teoria da relatividade.

Ambas as teorias modificaram profundamente nossa visão de natureza. Em particular, a relatividade geral alterou significativamente nossa concepção de espaço e de tempo. Albert Einstein teve um papel central no desenvolvimento desta revolução conceitual. A relatividade restrita rompeu com a noção newtoniana de tempo a partir do reconhecimento da necessidade dos conceitos científicos serem definidos através de procedimentos operacionais. O tempo não deve ser definido a priori e externo ao mundo material, mas precisa ser estabelecido a partir de um procedimento de medida. Por sua vez, a relatividade geral destronou a noção newtoniana de espaço. Ao identificar o campo gravitacional com a estrutura do espaço-tempo, as propriedades geométricas do espaço-tempo passaram a depender da distribuição dos corpos. O efeito imediato foi abandonar a geometria euclidiana e permitir que as propriedades geométricas tornassem-se dinâmicas.

O desenvolvimento da teoria da relatividade geral apresenta uma característica peculiar se comparada com a formulação de outras teorias científicas. Em geral, a busca por uma nova teoria é substanciada por resultados experimentais que mostram a ineficácia das teorias em voga. No caso da relatividade geral, não havia nenhum resultado experimental que questionasse seriamente nem a gravitação newtoniana nem a recém-proposta teoria da relatividade restrita. A motivação de Einstein foi de cunho conceitual dentre os quais podemos citar a incompatibilidade entre a relatividade restrita e a gravitação newtoniana. Na busca por uma teoria relativística de gravitação, a origem da inércia dos corpos materiais assumiu um papel central na formulação da relatividade geral. Segundo o próprio Einstein, as ideias de Ernst Mach marcaram profundamente o seu pensamento. De maneira simplificada, Mach considerava como bem definido apenas movimentos relativos e por isso a inércia dos corpos só poderia advir de sua posição relativa a outros corpos do universo. A interpretação de Einstein sobre as ideias de Mach foi consolidada no que Einstein denominou de princípio

de Mach, o qual basicamente propõe que a inércia dos corpos deve de fato depender da distribuição de matéria no universo.

Após ter levado 10 anos para formular a sua teoria da relatividade geral, um dos primeiros desafios concebidos por Einstein foi elaborar um modelo de universo que respeitasse e implementasse o princípio de Mach. Em 1917, Einstein publica o artigo (EINSTEIN, 1917) intitulado “Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie” onde é construído um modelo de universo finito, porém sem bordas, de forma a evitar a imposição de condições de contorno.

O modelo de universo esférico proposto por Einstein mostrou-se em desacordo com os dados observacionais e por isso não é considerado como um modelo descritivo de nosso universo. Não obstante, este trabalho é considerado como marco fundador da cosmologia relativística. Esta denominação advém não apenas do fato de ser o primeiro modelo a ser construído dentro do arcabouço da teoria da relatividade geral, mas, sobretudo, por indicar a possibilidade de estudo do universo conforme as ciências em vigor à época. Apesar disso, no início do século 20, a cosmologia ainda não possuía características para que a comunidade científica a considerasse como ciência.

Durante a década de 1930, o astrofísico Herbert Dingle travou um intenso debate com outros cientistas da mesma área profissional acerca da natureza dos últimos desenvolvimentos em cosmologia. Algumas das propostas amplamente atacadas por Dingle foram os trabalhos de Edward A. Milne, Arthur S. Eddington e Paul A. M. Dirac. Em seu artigo intitulado “Modern Aristotelianism”, Dingle acusa esses três pesquisadores de traírem os preceitos fundadores da ciência moderna. O título do artigo faz menção a acusação proferida por Dingle. Para ele, a ciência moderna lutou e venceu a batalha contra o aristotelismo, o qual ele entende por ser¹ “[...] the doctrine that Nature is the visible working-out of general principles known to the human mind apart from sense perception.” (DINGLE, 1937, p. 784).

A postura aqui chamada de aristotélica parte do pressuposto de que as leis da natureza podem ser conhecidas por uso exclusivo da razão humana. Em oposição, Dingle define a postura galileana como sendo a qual² “[...] the first step in the study of Nature should be sense observation, no general principles being admitted which are not derived by induction

¹ “[...] a doutrina onde a Natureza é manifestação visível de princípios gerais conhecidos pela mente humana salvo à percepção dos sentidos.” Para uma tradução em português do artigo de H. Dingle ver *Scientiae Studia* 3 (2005) p. 249. Uma discussão interessante como este debate se insere em um contexto maior das relações entre ciência e filosofia está em (VIDEIRA, 2005).

² “[...] o primeiro passo no estudo da Natureza deve ser o critério da observação, nenhum princípio geral deve ser aceito o qual não seja derivado desta fonte por indução.”

therefrom.” (DINGLE, 1937, p. 784). Segundo Dingle, a questão que se apresenta é³ “[...] whether the foundation of science shall be observation or invention.” (DINGLE, 1937, p. 786).

Esta disputa é interessante por mostrar o lugar ocupado pela cosmologia na primeira metade do século 20. Os trabalhos de Milne, Eddington e Dirac não são representativos de toda prática em cosmologia deste período, mas configuram o que ficou conhecido como cosmologia dedutivista. Poder-se-ia perguntar se algo similar a esta postura metafísica ocorreu no mesmo período na física ou em outra ciência natural.

O desenvolvimento da mecânica quântica aflorou questões fundamentais sobre a natureza das quais ainda hoje não temos respostas satisfatórias. A ontologia da matéria⁴ e a realidade de certas propriedades quânticas⁵, por exemplo, são questões ainda de intensa pesquisa e controvérsias. Todavia, por mais estranho que os conceitos desta teoria sejam ao senso comum, o desenvolvimento da mecânica quântica sempre fundamentou-se na experimentação. De modo à parte, a cosmologia difere das ciências naturais por características que serão discutidas ao longo desta dissertação.

Hoje em dia, o cenário é completamente diferente. Como afirma Antonio Augusto P. Videira

“Depois de ter passado décadas sofrendo das terríveis desconfiças dos físicos, a cosmologia desfruta atualmente de situação de unanimidade no que diz respeito à sua cientificidade. Creio que não existe quase mais nenhum físico que, ao menos em público, afirme que a cosmologia não é uma ciência.” (VIDEIRA, 2006, p. 8)

Um dos objetivos desta dissertação é examinar como se deu a inserção da cosmologia no âmbito das ciências naturais. Quais foram as mudanças na cosmologia relativística que a tornaram mais apta a ser aceita como ciência? Como essas mudanças se relacionam com a própria definição do que é cosmologia e as questões epistemológicas e metafísicas específicas desta área de conhecimento? Seria correto afirmar que a aceitação da cosmologia tenha advindo de avanços em sua capacidade para responder questões centrais de sua área de

³ “[...] se a base da ciência deve ser observação ou invenção.”.

⁴ A dualidade onda-partícula reflete justamente a incapacidade da física em definir a ontologia de seus objetos. Esta dualidade afirma que um constituinte fundamental como o elétron ora se comporta como onda ora como partícula. Isto significa que o elétron não é nem onda nem partícula. A interpretação de Copenhague é inclusive um exemplo de mecânica quântica puramente epistemológica por abdicar de propor uma ontologia para os entes microfísicos.

⁵ O problema da medida em mecânica quântica na forma enunciada no paradoxo do EPR (menção ao artigo de Einstein, Podolski e Rose no qual eles propõe que a formulação da mecânica quântica da época deveria ser entendida como incompleta) é um exemplo da impossibilidade de atribuir realidade a certas propriedades do sistema antes da efetiva medida da quantidade a ela associada.

pesquisa? Quais características possibilitam a cosmologia afirmar possuir um modelo de universo com estatuto de modelo padrão? Houve algum tipo de mudança no objeto de estudo da cosmologia e suas questões principais?

Uma análise adequada destas questões demanda um cuidado minucioso e uma abrangência ampla de temas. Invariavelmente, fez-se necessário uma escolha metodológica que trouxesse viabilidade a este projeto. Assim, optamos por privilegiar a abrangência em sacrifício do detalhamento dos tópicos de modo a valorizar uma análise mais ampla da cosmologia como área do conhecimento. Reconhecemos que há inúmeros temas relevantes que não foram abordados neste trabalho, mas esperamos que nossa escolha tenha sido adequada para estruturar as questões centrais desta dissertação. De modo similar, alguns tópicos não foram explorados em todas as suas possibilidades os quais esperamos, em outro momento, sermos capazes de estendê-los e aprofundá-los. A título de exemplo, não desenvolvemos o papel central que princípios e hipóteses desempenham em cosmologia⁶ por termos de um modo alternativo abordado este tema através de uma discussão das bases conceituais e práticas desenvolvidas na cosmologia ao longo do século 20.

Outros temas foram evitados por ramificarem demasiadamente nossa discussão. Um estudo de cosmologia não é completo sem uma análise sobre as possibilidades da ciência em propor uma formulação consistente de cosmogonia. Vale lembrar a primeira antinomia de Immanuel Kant com a qual ele argumenta que tanto a tese quanto a antítese sobre a finitude do mundo acarretam inconsistências lógicas. De modo similar, uma discussão sobre a natureza do tempo na física relativística não é satisfatória sem abordarmos a existência de soluções exatas da relatividade geral com a presença de curvas do tipo temporal fechadas. A solução de Gödel exhibe um exemplo onde corpos materiais podem seguir curvas que retornam a seu passado. Soluções desse tipo são, embora não forçosamente, fortes candidatos para violação da causalidade dos fenômenos naturais. Por fim, gostaríamos de ressaltar nosso déficit em uma descrição detalhada do desenvolvimento da pesquisa observacional relacionada à formação dos elementos químicos no universo. A nucleossíntese primordial compõe junto da radiação cósmica de fundo os pilares observacionais da cosmologia atual e por tal merece uma reconstrução adequada a qual não fomos capazes de incluir neste trabalho.

Apesar da ausência de temas como os citados acima, acreditamos que a estrutura e escolha dos tópicos abordados seja coerente e capaz de proporcionar ao menos uma adequada formulação das questões cruciais associadas à cosmologia atual.

Esta dissertação está estruturada em 6 capítulos incluindo a introdução e a conclusão.

⁶ Para uma discussão detalhada veja: (VIDERIRA, 2006; MERLEAU-PONTY, 1997).

O segundo e o terceiro capítulos compõem a base conceitual onde revisamos os conceitos básicos necessários para o desenvolvimento de nosso estudo. O quarto capítulo trata da evolução história da cosmologia ao longo do século 20 enquanto o quinto capítulo é destinado a uma reflexão crítica sobre questões epistemológicas e metafísicas da cosmologia.

O segundo capítulo apresenta os conceitos básicos de física relacionados à cosmologia e às teorias espaço-temporais, como é o caso da teoria da relatividade geral. Em sua primeira seção, caracterizamos qual o tipo de ciência associada à cosmologia e suas diferenças com relação às ciências naturais. Em seguida, fazemos uma discussão sobre a natureza do espaço e do tempo a partir dos conceitos de espaço e tempo absolutos de Newton até sua reformulação de acordo com a teoria da relatividade geral. Em seguida analisamos a estrutura causal dos fenômenos naturais e a sua formulação conceitual nas teorias relativísticas. A última seção do capítulo dois destina-se a apresentar como é possível definir noções como espaço e tempo dentro de um contexto relativístico no qual a natureza manifesta-se apenas a partir da noção quadridimensional de espaço-tempo.

No capítulo três desenvolvemos alguns conceitos essenciais de epistemologia e realismo. Este capítulo pretende estabelecer uma linguagem comum sobre conceitos filosóficos fundamentais associados à filosofia da ciência. Nosso foco principal é analisar a relação entre dados empíricos e conhecimento científico. Em particular, desenvolvemos os argumentos dos empiristas lógicos sobre a possibilidade de verificação das teorias científicas e a oposição de Popper com sua proposta falseacionista. Na seção três deste capítulo, discutimos questões sobre realismo científico à luz das contribuições de Ian Hacking sobre este assunto. Por fim, analisamos a solidez dos argumentos antirrealistas de Hacking para entes astrofísicos.

No capítulo quatro fazemos uma breve reconstrução histórica do desenvolvimento da cosmologia ao longo do século 20. Seguindo a prática em história da cosmologia, tomamos o artigo de Albert Einstein em 1917 como o marco fundador da cosmologia relativística. A primeira seção narra a evolução dos conceitos e os debates em cosmologia ao longo deste período. A segunda seção descreve a mudança brusca dos participantes desta área científica com a migração de físicos de altas energias para a cosmologia em torno da década de 1980. Em seguida descrevemos a evolução técnica e a melhora na aquisição de dados observacionais associadas ao investimento em satélites para pesquisas espaciais. Por fim, descrevemos a fundamentação observacional do modelo padrão da cosmologia a partir dos últimos resultados da colaboração Planck.

O quinto capítulo desta dissertação é reservado para uma reflexão crítica sobre alguns

pontos que consideramos cruciais sobre cosmologia. Uma questão que consideramos central é a condição para a aceitação da cosmologia como ciência ao final do século 20 e sua relação com as transformações epistemológicas sofridas por esta área do conhecimento. A primeira seção deste último capítulo analisa as transformações do conceito de cosmologia e a relação que a cosmologia científica possuiu com as questões filosóficas tradicionalmente associadas à cosmologia. Em seguida examinamos o objeto de estudo da cosmologia e sua redefinição a partir da prática atual desta área científica. Na terceira seção investigamos as possíveis relações entre as propriedades da natureza na escala macrocós mica com as da escala microcós mica. Nosso intuito é averiguar se há alguma relação entre as leis da natureza estabelecidas nos laboratórios terrestres com as propriedades e a evolução do universo. Por fim comentamos sobre o estatuto ontológico dos entes astrofísicos e sobre a possibilidade de defendermos um realismo de entidades em astronomia.

1 FUNDAMENTOS CONCEITUAIS DA COSMOLOGIA

1.1 Cosmologia, uma ciência histórica

Ao longo do século 20, a cosmologia adquiriu um significado preciso enquanto área de investigação científica⁷. É razoável supor que o motivo para a possibilidade da delimitação da cosmologia enquanto área de conhecimento tenha sido justamente a transição para o interior da ciência experimental. A astronomia, juntamente com a geometria da antiguidade, é uma das ciências empíricas mais antigas da história. A observação, catalogação e mapeamento do céu já era uma prática recorrente a milhares de anos atrás. Na antiguidade tanto a astronomia quanto a geometria eram áreas de observação e medição cuidadosas. Contudo, apenas recentemente (cerca de trinta anos) a cosmologia foi indubitavelmente reconhecida como ciência natural⁸. A desqualificação da astronomia enquanto ciência deu-se não pelo empobrecimento da observação do céu, mas pela revolução científica moderna que estipulou uma nova visão de ciência natural. Enquanto Galileu Galilei salientava a importância da matematização e quantificação da natureza, Francis Bacon explicitava claramente a ciência como sendo composta por duas faculdades: uma racional e outra experimental. Com o avanço do estudo laboratorial, as ciências dos fenômenos naturais locais como a física e a química tornaram, de maneira comparativa, os dados astronômicos demasiadamente escassos. Apesar disso, a rejeição da cosmologia como ciência natural não se baseou apenas na ausência de dados observacionais. A visão mecanicista do mundo, a qual podemos considerar como dominante durante grande parte do desenvolvimento da ciência moderna, em conjunção com a teoria da gravidade de Newton são incapazes de estruturar um conceito coerente de cosmo. Apenas com o advento da teoria da relatividade geral de Einstein foi possível propor uma

⁷ É importante lembrar que o termo cosmologia é utilizado de diversas formas não equivalentes por diferentes áreas de pesquisa. Em antropologia, por exemplo, cosmologia pode ser entendido como o conjunto de conhecimentos, credos, e explicações para a origem do mundo, sua constituição, o significado de sua existência assim como o papel do homem neste cenário. Podemos encontrar estudos sobre a cosmologia dos índios brasileiros ou sobre a cosmologia ecológica. Nestes casos, o termo cosmologia significa visão de mundo e não está necessariamente relacionado a nenhum estudo científico da natureza.

⁸ As ciências podem ser divididas em diversos subconjuntos. Existe por exemplo as ciências lógicas como a própria lógica e a matemática; as ciências sociais como a economia e a antropologia; as ciências da vida como a biologia e a medicina; as ciências naturais como a física e a química e as ciências históricas como a geologia e a cosmologia. As ciências naturais caracterizam-se por seu objeto de estudo ser inanimado e assume-se existentes na natureza. Além disso há uma forte ênfase com a prática experimental laboratorial. As ciências históricas que inclui a cosmologia, foco central deste trabalho, será detalhada mais adiante no corpo do texto.

visão de cosmo consoante com a ciência natural⁹. Neste trabalho iremos nos ater apenas à cosmologia que se desenvolveu a partir da física contemporânea (século 20) e sempre se manteve em diálogo e condicionada aos desenvolvimentos da ciência moderna.

Embora a cosmologia recente seja entendida como ciência experimental, ela não deve ser identificada com a astronomia. A astronomia é convencionalmente dividida¹⁰ em galáctica, extragaláctica, astrofísica relativística e cosmologia. A astronomia galáctica lida com todos os fenômenos de nossa galáxia¹¹, a Via-Láctea, enquanto que a astronomia extragaláctica estuda sistemas para além de nossa galáxia como é o caso da dinâmica de agrupamento de galáxias e o meio extragaláctico. Já a astrofísica relativística ocupa-se de sistemas compactos como estrelas anãs-brancas, buracos negros, sistemas binários, emissão de jatos (“jets”), etc. Por sua vez, a cosmologia caracteriza-se como a ciência que estuda a natureza em sua totalidade.

Tanto na literatura técnica/científica quanto na filosofia não encontramos uma única definição de cosmologia. De maneira imprecisa, a cosmologia é entendida como uma tentativa científica do estudo sistemático do universo. É evidente que esta definição não nos avança de nenhuma maneira satisfatória sobre o objeto de estudo da cosmologia, sobre sua prática nem muito menos sobre as idiossincrasias desta área de conhecimento. É interessante notar que há claramente uma distinção entre as definições científicas em oposição às definições filosóficas. Na realidade, é mais correto pontuar que as definições variam de acordo com o cuidado utilizado em estabelecer do que se trata a cosmologia.

Jayant V. Narlikar inicia o seu livro de cosmologia com a afirmação¹²

“No branch of science can claim to have a bigger area of interest than cosmology, for cosmology is the study of the universe; and the universe by definition contains *everything*.” (NARLIKAR, 2002, p.1)

Embora na página seguinte haja um aprimoramento¹³

⁹ A impossibilidade de uma cosmologia newtoniana e o ressurgimento da cosmologia dentro do escopo da física relativística são temas extremamente ricos e interessantes porém escapam de nossas possibilidades neste trabalho. Para uma análise cuidadosa destes pontos sugere-se as referências (MERLEAU-PONTY, 1965, 2000).

¹⁰ Hoje em dia, a astronomia possuiu um enorme número de subáreas de atuação, as quais podem ser divididas a partir dos seus objetos de estudo ou por suas técnicas observacionais. Poderíamos ter incluído em nossa lista de subdivisões da astronomia, a astrobiologia, a astroquímica, a astrofísica de plasma, a astronomia de raios cósmico, etc. A divisão feita no texto é imprecisa e arbitrária no sentido de privilegiar apenas a escala de comprimento dos objetos estudados. Esta divisão é motivada por sua simplicidade e eficiência em contextualizar a cosmologia como parte do estudo do universo sem multiplicar desnecessariamente as subáreas da astronomia.

¹¹ O estudo de formação de galáxias e sua evolução não é incluído na definição de astronomia galáctica. Esta área conecta-se fortemente com a evolução do universo e, por isso, consideramos como parte da astronomia extragaláctica.

¹² “Nenhuma área da ciência pode alegar possuir uma área de interesse maior que a cosmologia, pois cosmologia é o estudo do universo; e o universo, por definição, contém tudo.”

“[...]we will take the large-scale structure of the universe as a physical system, subject to the known laws of physics, and follow the usual procedure of science...” (NARLIKAR, 2002, p.2)

ainda assim continuamos sem uma formulação adequada do que é cosmologia. Ao introduzir o tema, John A. Peacock ostenta ao afirmar¹⁴

“This is a textbook on cosmology – a subject that has the modest aim of understanding the entire universe and all its contents. While it can hardly be claimed that this task is complete, it is a fact that recent years have seen astonishing progress towards answering many of the fundamental questions about the constitution of the universe”. (PEACOCK, 1999, p.IX)

Em outros casos, os livros sequer apresentam uma definição sobre o que é cosmologia. Embora o livro de Viatcheslav Mukhanov denomine-se *Physical Foundations of Cosmology* (Fundamentos Físicos da Cosmologia), o texto já começa com afirmações sobre as propriedades de homogeneidade e isotropia do universo (MUKHANOV, 2005, p.3). Nesta mesma postura, Scott Dodelson escreve¹⁵

“There are two aspects of cosmology today that make it more alluring than ever. First, there is an enormous amount of data... The other aspect of modern cosmology which distinguishes it from previous efforts to understand the universe is that we have developed a consistent theoretical framework which agrees quantitatively with the data” (DODELSON, 2003, p.X)

Estes são apenas alguns exemplos típicos de livros técnicos em cosmologia. Em particular, é justo considerá-los dentre os melhores livros técnicos em cosmologia da atualidade. O que contrasta com estas citações é que embora não haja cuidado em formular o que é e sobre o que estuda a cosmologia esses autores obviamente respeitam e presam a cosmologia enquanto ciência natural. Mais do que isto, esses autores são cientistas atuantes desta área de pesquisa. Podemos extrair informação de uma área do conhecimento a partir de uma análise crítica do comportamento de seus participantes. O que nos parece emergir neste caso é a existência de um consenso por parte dos participantes da pesquisa em cosmologia sobre sua finalidade e seu objeto de estudo. Algo tão corriqueiro que não carece de determinações cuidadosas.

Em outras reflexões sobre este mesmo tema evidenciamos uma cautela maior. Jacques

¹³ “[...]tomaremos a estrutura em larga escala do universo como um sistema físico, sujeito às conhecidas leis da física, e seguindo os procedimentos usuais da ciência ...”

¹⁴ “Este é um livro sobre cosmologia – um assunto que tem o modesto objetivo de entender o universo inteiro e todo o seu conteúdo. Enquanto dificilmente pode-se afirmar que esta tarefa esteja completa, é notório que os últimos anos presenciaram um progresso extraordinário em vias de responder muitas das questões mais fundamentais sobre a constituição do universo”.

¹⁵ “Há dois aspectos da cosmologia hoje em dia que a faz mais fascinante do que nunca. Primeiramente, há uma quantidade enorme de dados... O outro aspecto da cosmologia moderna que a distingue de esforços prévios para entender o universo é que nós conseguimos desenvolver um arcabouço teórico consistente o qual concorda *quantitativamente* com os dados.” (destaque em itálico do original).

Merleau-Ponty nos lembra que¹⁶

“[...]le mot ‘cosmologie’ a pris, à l’époque contemporaine, un sens plus précis et plus restreints que dans le vocabulaire traditionnel de la philosophie; on peut maintenant caractériser la cosmologie, sans équivoque ni excessive restriction, comme la science des phénomènes naturels pris dans leur totalité; science de la totalité ne veut pas dire science de tout ce qui existe (ce qui serait une entreprise à la fois chimérique et insignifiante), mais science de ce qui, dans les phénomènes naturels, les rassemble et les ordonne en une totalité;” (MERLEAU-PONTY, 1984, p.9)

De modo complementar, George C. McVittie declara¹⁷

“Man has always believed that the universe in which he lives could be encompassed by his understanding. His attempts to achieve this goal constitute cosmology, a discipline that has been given many definitions. One of these states that cosmology is that branch of metaphysics which treats of the character of the universe as an orderly system, of the processes of nature and of the relation of its parts[...] However, there is a more limited meaning of the term that has come into prominence during the present century. In this restricted sense cosmology is concerned with the large-scale structure of the astronomical universe and therefore with the interpretation of the information accumulated by astronomers[...] Indeed the ‘facts’ with which we shall be concerned are obtained from astronomical observation and from experiments in the physics and electrical engineering laboratory.” (MCVITTIE, 1961, p.11)

Há nestes dois últimos autores uma preocupação em identificar o que é particular da cosmologia, o que necessariamente envolve delimitar seus contornos. Este cuidado nos parece ser ao reconhecimento das especificidades desta área do conhecimento humano. Da mesma forma que a ciência moderna lida com uma noção restrita de natureza, a cosmologia física constrói uma visão de cosmo delimitada por esta mesma concepção de natureza. Reconhecer este fato engrandece a cosmologia ao contextualizá-la em uma concepção mais ampla de natureza além de possibilitar formular questões que se encontram na fronteira da ciência. Encontramos uma visão semelhante em Ellis e colaboradores¹⁸

¹⁶ “[...]a palavra ‘cosmologia’ tomou, no período contemporâneo, um sentido mais preciso e mais restrito que no vocabulário tradicional da filosofia; pode-se agora caracterizar a cosmologia, sem ambiguidade nem reservas excessivas, como a ciência dos fenômenos naturais tomados na sua totalidade; ciência da totalidade não quer dizer ciência de tudo que existe (a qual seria uma empreitada por sua vez quimérica e insignificante), mas ciência do que, dentro dos fenômenos naturais, os agrupa e os organiza em sua totalidade;”

¹⁷ “O Homem sempre acreditou que o universo no qual vive pode ser abarcado por seu entendimento. Suas tentativas de alcançar este objetivo constitui a cosmologia, uma disciplina que possui muitas definições. Uma delas afirma que a cosmologia é o ramo da metafísica que lida com a caráter do universo enquanto um sistema ordenado, com os processos da natureza e com a relação de suas partes[...] Entretanto, há um significado mais restrito do termo o qual ganhou notoriedade durante o século atual. Neste sentido limitado cosmologia preocupa-se com a estrutura em larga escala do universo astronômico e conseqüentemente com as interpretações das informações acumuladas por astrônomos[...] Com efeito os ‘fatos’ com os quais nós estaremos preocupados são obtidos por observações astronômicas e por experimentos no laboratório de física ou de engenharia elétrica.”

¹⁸ “A teoria científica da cosmologia preocupa-se com o estudo da estrutura em larga escala da região observável do universo, e com sua relação com a física local por um lado e com o resto do universo por outro... Assim, ao mesmo tempo em que fornece uma análise baseada em observação do que podemos ver nas regiões distantes e como chegou a ser como o é, a cosmologia fornece informações importantes sobre o ambiente no qual a vida - incluindo nós mesmos - pode chegar a existir no universo, e então estabelece o pano de fundo sobre o qual

“The scientific theory of cosmology is concerned with the study of the large-scale structure of the observable region of the universe, and its relation to local physics on the one hand and to the rest of the universe on the other... Hence, as well as providing an observationally based analysis of what we can see in distant regions and how it got to be as it is, cosmology provides important information on the environment in which life - including ourselves - could come to exist in the universe, and so sets the background against which any philosophy of life in the universe must be set... Thus, when understood in the widest sense, cosmology has both narrow and broad aims. It has aspects similar to normal physics, at least in its role as an explanatory theory for astrophysical objects (even if laboratory experiments are impossible in this context); aspects peculiar to scientific theories dealing with unique observable objects (and in particular the universe itself, regarded as a physical object); and one can use it as a starting point when considering aspects that stretch beyond science to metaphysics and philosophy.” (ELLIS, 2012, p. 4)

A cosmologia é por excelência uma área do conhecimento humano incapaz de distanciar-se ou abdicar de suas relações com a visão de natureza. Ainda é possível implementar o projeto reducionista da ciência moderna e decompor analiticamente o cosmo, porém ao custo de delimitarmos sempre o alcance do nosso conhecimento. A divisão entre objetivo restrito e objetivo amplo mencionada no fragmento acima refere-se à escolha deliberada do recorte necessário a moldar à cosmologia a medida da ciência moderna. Não obstante, há características intrínsecas à cosmologia que não são compartilhadas pelas ciências naturais. A cosmologia é um caso exemplar de ciência histórica. As ciências históricas distinguem-se em alguns aspectos cruciais das ciências naturais.

Enquanto as ciências naturais desenvolvem-se de acordo com experimentos laboratoriais controlados, as ciências históricas são forçadas apenas a um processo de reconstrução racional sem a possibilidade de intervenção ou controle laboratorial de seu objeto de estudo. Em particular, as ciências naturais preocupam-se com as regularidades de eventos representativos ao passo que as ciências históricas dedicam-se a estudar uma sucessão de eventos singulares. George Ellis (ELLIS, 2014) expressa esta idiossincrasia das ciências históricas como a tensão inevitável entre as leis gerais e suas aplicações específicas, ou seja, a dificuldade em relacionar a influência de aspectos universais (necessidade) com eventos contingentes (casualidade).

Evidentemente, a cosmologia não é a única ciência histórica. A geologia e a biologia evolucionária são outros exemplos de ciências históricas. A biologia, ao estudar a evolução das espécies, ou a geologia, ao estudar a história do planeta Terra, recai em dificuldades

qualquer filosofia da vida no universo deve estabelecer-se... Deste modo, quando entendido em seu sentido mais amplo, a cosmologia possui duplamente um objetivo restrito e um objetivo amplo. Ela tem aspectos similares a física normal, pelo menos no seu papel enquanto teoria explicativa para os objetos astrofísicos (mesmo se experimentos laboratoriais sejam impossíveis neste contexto); aspectos peculiares a teorias científicas lidando com um único objeto observável (e em particular o universo propriamente, visto como um objeto físico), e pode ser usada como ponto de partida quando considerado aspectos que avançam para além da ciência para a metafísica e a filosofia.”

similares à cosmologia. Os processos envolvidos nestas áreas do conhecimento ocorrem em escalas e condições impossíveis de reprodução laboratorial. Ademais, seus objetos de estudo são únicos.

Poder-se-ia argumentar que a geologia estuda um planeta típico (a Terra) orbitante a uma estrela comum (o Sol), sistema este que pode ser encontrado em abundância na Via-Láctea ou em outras galáxias. Contudo, o objeto de estudo da geologia não é a formação de sistemas solares e planetas, assunto que diz respeito à astronomia, mas sim a história específica de nosso planeta, a Terra. Note, porém, que este exemplo salienta uma particularidade da cosmologia.

Apesar de toda ciência histórica ter como objeto de estudo algo particular, em geral, há outros objetos que podem ser mais ou menos similares ao objeto de estudo em questão. As ciências naturais valem-se da rica abundância e da possibilidade de agrupar objetos suficientemente similares para definir conceitos universais como árvore, mesa ou elétron. No caso das ciências históricas, por definição, essa classificação em tipos não é possível. E especificamente a esta característica, a cosmologia destaca-se como o caso extremo pois seu objeto de estudo é de fato único, a saber o universo, e assim não é possível compará-lo com nada outro.

Como mencionado, as ciências históricas possuem por excelência objetos particulares de estudo e, por conseguinte, não há a possibilidade de estabelecer uma lei natural associada a estas ciências. Esta peculiaridade exige da comunidade científica uma reformulação da metodologia utilizada.

Cientistas experimentais buscam manipular repetidamente um determinado experimento com o intuito de “testar”¹⁹ uma hipótese e associar o fenômeno identificado a uma lei geral (válida para todos os tipos representativos). Por outro lado, cientistas envolvidos com uma determinada ciência histórica interessam-se por uma sequência particular de eventos singulares. Sua prática necessita da criação de hipóteses sobre acontecimentos passados e da análise da razoabilidade do cenário construído. Como consequência, as ciências históricas se utilizam frequentemente de narrativas para explicitar seus resultados científicos.

Uma questão crucial para as ciências históricas é a possibilidade de qualificar suas hipóteses. Tanto quanto um cientista experimental, os praticantes das ciências históricas buscam “testar” suas hipóteses comparando-as com evidências na natureza. E para conseguir explicar/remontar uma sucessão de fenômenos naturais, é preciso que as evidências deixadas ao longo do tempo sejam suficientes para que haja uma forte predileção comparativa entre

¹⁹ A possibilidade de se testar um hipótese científica será discutida com mais cuidado no próximo capítulo.

hipóteses concorrentes. Para abordar esta questão Carol Cleland (CLELAND, 2002) utiliza-se do termo arma fumegante ('smoking gun'), o qual esta autora define como sendo um traço inequívoco capaz de discriminar uma hipótese em comparação a outras hipóteses disponíveis tornando-a a melhor explicação possível dos traços observados.

Uma característica importante no processo de escolha da melhor explicação é o grau de unificação de cada hipótese. A ideia do conceito de explicação estar conectado com o de unificação pode ser encontrada em outros textos como, por exemplo, na tradição empirista lógica (HEMPEL, 1965; FEIGL, 1970). Utilizando-se dessa vertente, Philip Kitcher (KITCHER, 1989) propõe que uma explicação é bem sucedida quando faz parte do que ele chama de armazém de explicações ('explanatory store') o qual contém derivações que coletivamente fornecem a melhor sistematização dos nossos conhecimentos. Para Kitcher²⁰

“Science advances our understanding of nature by showing us how to derive descriptions of many phenomena, using the same patterns of derivation again and again, and, in demonstrating this, it teaches us how to reduce the number of types of facts we have to accept as ultimate (or brute).” (KITCHER, 1989, p. 432)

Notoriamente, a eficácia de uma ciência história depende da existência e acessibilidade aos vestígios dos fenômenos passados. A possibilidade de tal condição pode ser argumentada a partir do conceito de assimetria da superdeterminação dos fenômenos introduzido por David Lewis (LEWIS, 1979). Um evento qualquer pode ser determinado a partir tanto do passado (predeterminação) quanto do futuro (pós-determinação) e a qualquer instante existe pelo menos um tipo de determinação. Um fato que possui mais de um determinante é chamado por Lewis de superdeterminado. É importante notar que esta noção distingue-se da multiplicidade de causas para um mesmo efeito. Enquanto esta última implica em dizer que um determinado fato possui múltiplas causas, a superdeterminação afirma que, embora todas as causas atuem simultaneamente, é suficiente apenas uma e qualquer uma das causas apontadas para explicar o fenômeno. Lewis argumenta que a assimetria temporal dos fenômenos naturais produz uma assimetria na dependência contra factual²¹ ('counterfactual dependence'). O resultado é um excesso de superdeterminação dos fenômenos passados a partir dos fatos presentes que o caso inverso. Dito de outra forma, há uma escassa frequência de superdeterminação de fenômenos futuros por fatos presentes.

A proposta de Lewis parece indicar outro desdobramento epistemológico associado à

²⁰ “A ciência avança nosso conhecimento da natureza ao nos mostrar como derivar descrições de vários fenômenos, usando o mesmo padrão de derivação recursivamente, e, ao demonstrá-lo, ela nos ensina como reduzir o número de tipos de fatos que nós temos que aceitar como últimos (brutos).”

²¹ A noção de relação contra-factual é a base das teorias contra-factuais de causação com a qual propõe-se que o condicional contra-factual é estabelecido caso aconteça que “se A não tivesse ocorrido, então B não ocorreria”.

assimetria temporal. Enquanto a relação causal do presente para o futuro estabelece-se com uma exigência positiva - a predeterminação é estabelecida se um fato produz (necessariamente) o efeito, a relação causal para o passado é uma exigência condicional – a pós-determinação exige que um fato do passado seja causa possível de um fato presente. Para garantir a determinação para o futuro é necessário controlar as contingências enquanto que na determinação para o passado as contingências são irrelevantes.

O ferramental utilizado pelas ciências naturais não é suficiente para o desenvolvimento das ciências históricas, as quais necessitam de uma metodologia particular para estudar a natureza. Contudo, é correto afirmar que sua sistematização é tão rigorosa quanto nas ciências naturais. Na verdade, as ciências históricas trabalham com uma combinação de metodologias. Como será discutido mais detalhadamente ao longo deste trabalho, em especial para o caso da cosmologia, as ciências históricas valem-se recursivamente da metodologia das ciências naturais e estão em permanente diálogo com as práticas laboratoriais. Em particular, é um equívoco desassociar ciência histórica de previsibilidade. Embora seja necessário contextualizar adequadamente o conceito de previsibilidade, as ciências históricas são capazes de antecipar fenômenos e dados empíricos. De maneira complementar, as ciências históricas são capazes de produzir novidades genuínas. Um exemplo advindo da cosmologia é o da observação²² do universo estar atualmente em expansão acelerada. Dado o caráter atrativo da interação gravitacional, era esperado que, apesar do universo poder estar se expandindo, esta evolução fosse uma expansão desacelerada. A atual aceleração não configurava nem mesmo como hipótese por não condizer com a física laboratorial e local.

Somado a estas questões, a cosmologia possui ainda características próprias que são fundamentais para o entendimento desta área de conhecimento. Com relação à determinação causal dos fenômenos, por exemplo, a cosmologia apresenta uma forma particular de subdeterminação de suas hipóteses teóricas. É bem verdade que, frequentemente, uma teoria científica é subdeterminada pelos dados observacionais. Na análise de subdeterminação das teorias científicas o que é avaliado é o grau de confiança que podemos ter com relação aos entes postulados e sobre a própria teoria em questão. Entretanto, na cosmologia a subdeterminação, em geral, não questiona as teorias científicas de fundo, mas sim a nossa capacidade de reconstrução a partir da nossa limitada condição de observação. Devido à nossa

²² Como mencionado, o conceito de previsibilidade deve ser adequadamente incorporado nas ciências históricas. Em particular, a observação das supernovas do tipo Ia fornecem a informação de que o universo está atualmente se acelerando apenas se considerarmos o modelo padrão da cosmologia (seções espaciais homogêneas e isotrópicas).

condição humana, nossas observações cosmológicas são forçosamente feitas a partir de um único ponto de observação do universo – a Terra. Ademais, há ainda uma condição causal associada à finitude da velocidade da luz. Nas seções que se seguem deste capítulo, iremos analisar brevemente algumas dessas idiossincrasias da cosmologia e desenvolver os conceitos fundamentais para o entendimento da cosmologia científica atual.

1.2 Natureza do Espaço e do Tempo

Uma das questões típicas da cosmologia é a constituição do universo. Quais tipos de entes encontramos no universo? Evidentemente, esta lista deve incluir no mínimo todos os elementos presentes na Terra, mas pode, eventualmente, ser mais abrangente. Como mencionamos anteriormente, ao estudar o comportamento em larga escala do universo, a cosmologia científica define-se a partir de um conceito específico de natureza. Na lista de constituintes poderíamos incluir, por exemplo, o ser humano como constituinte distinto da matéria inanimada. Porém, no nível da cosmologia científica o ser humano não se distingue de uma árvore ou de um iceberg. Por outro lado, quando nos referimos ao termo matéria o usamos em sentido amplo. Assim, deve-se incluir neste conceito todos os tipos de campos físicos como os campos eletromagnéticos e os campos quânticos associados às partículas elementares. Além da matéria, um elemento particularmente importante para a cosmologia é a noção de espaço e de tempo.

A relação entre espaço e matéria pode ser mais ou menos independente de acordo com o arcabouço conceitual no qual eles se inserem. Para Descartes, por exemplo, o espaço não se distingue da matéria. A matéria é por definição a substância que possui a propriedade de extensão de modo que não pode haver extensão sem que seja matéria. A matéria acabar por ser identificada com o próprio espaço o qual não possui existência independente. Assim, a conclusão inevitável de Descartes é a impossibilidade da existência de vácuo na natureza.

A ciência moderna consolidou-se e desenvolveu a sua visão de natureza baseando-se nas noções de espaço e de tempo absolutos. A primeira formalização destes conceitos foi feita por Isaac Newton no *Scholium* das definições preliminares do seu livro Principia (NEWTON, 1726). Por sua vez, a cosmologia relativística insere-se no contexto da visão da relatividade geral onde o espaço-tempo é dinâmico. Embora as noções de espaço e de tempo absolutos

possam ser estranhas às nossas noções cotidianas, o conceito de espaço-tempo da relatividade geral não guarda nenhuma relação com nossa experiência diária. Por isso, é costume desenvolver a concepção relativística a partir da revisão e dos questionamentos dirigidos ao espaço e tempo absolutos de Newton.

Ao longo dos séculos, as concepções newtonianas de espaço e de tempo acabaram inexoravelmente ligadas ao debate absoluto versus relacional. Entretanto, há argumentos para sustentar que Newton não pretendia responder se o espaço, o tempo e o movimento são absolutos ou relativos. Stein e DiSalle (STEIN, 1967; DISALLE, 2006; 2002) argumentam que o problema central de Newton era prover noções de espaço e de tempo que estivessem em sintonia com o desenvolvimento das leis mecânicas de sua época²³

“For application of the laws of dynamics – as understood not only by Newton, but by his foremost philosophical critics as well – was based on the analysis of particle trajectories, and so required a spatio-temporal framework that would suffice for the analysis of trajectories. The crux of Newton's argument for absolute space, then, was that this requirement could never be fulfilled by the Cartesian and relativistic views of space and time favored by his contemporaries... In both texts [Scholium e De Gravitatione et aequipondio fluidorum], Newton's problem is never to justify metaphysical claims about space, time and motion, but to define the concepts in a way that connects them with the laws of physics, and with the empirical practice of measurement.” (DISALLE, 2006, p.16)

De toda forma, o ponto basal desta discussão é o papel central que o espaço absoluto e o tempo absoluto têm no arcabouço conceitual de Newton. Em especial, neste contexto, é a partir do espaço absoluto que os corpos materiais adquirem inércia. A lei da Inércia, primeira lei de Newton, estipula haver na natureza um estado natural de movimento. Os corpos livres de interação permanecem em repouso ou em movimento retilíneo uniforme. Estes movimentos são naturais no sentido de não necessitarem de explicação. Os outros tipos de movimentos necessitam de causas eficientes que os produzam. De maneira similar, observadores em repouso ou em movimento retilíneo uniforme compõem uma classe privilegiada denominada de observadores inerciais os quais estão em repouso ou movendo-se com velocidade constante com relação ao espaço absoluto.

Há neste raciocínio uma séria dificuldade pela impossibilidade de estabelecer o estado de movimento dos corpos com relação ao espaço absoluto. Se, como proposto, os observadores inerciais formam uma classe de equivalência, torna-se então, em princípio,

²³ “Para a aplicação das leis da dinâmica – como entendido não apenas por Newton, mas também por seus mais notáveis críticos filosóficos – era baseada na análise das trajetórias das partículas, e assim exigia uma contextualização espaço-temporal a qual fosse suficiente para a análise de trajetórias. O ponto crucial do argumento de Newton para o espaço absoluto, então, era que esta demanda nunca poderia ser satisfeita pelas visões Cartesianas e relativísticas de espaço e de tempo preferidas por seus contemporâneos... Em ambos os textos [Scholium e De Gravitatione et aequipondio fluidorum], o problema de Newton nunca é de justificar afirmações metafísicas sobre o espaço, o tempo e movimento, mas de definir conceitos de uma maneira que os conecte com as leis da física, e com a prática empírica da medição.”

impossível estabelecer se um dado observador está em repouso ou em movimento retilíneo com relação ao espaço absoluto.

Para circunscrever este tipo de dificuldade, Newton difere movimentos relativos a movimentos absolutos. A tradição de críticos, dos quais podemos citar Leibniz, Huygens, Berkeley e Mach, argumentam contra a noção de espaço absoluto sustentando-se no argumento que apenas o movimento relativo tem significado empírico.

Newton reconhece a impossibilidade de determinação do estado de movimento de um observador inercial, mas pretende demonstrar a existência do espaço absoluto com o seu famoso experimento do balde. Ao propor este experimento de pensamento, Newton tem pelo menos dois objetivos: criticar a noção cartesiana de movimento²⁴ e argumentar a possibilidade de determinar movimentos com relação ao espaço absoluto a partir de movimentos acelerados. Newton argumenta que um balde preenchido por água, ao girar, transfere movimento para a água e esta última modifica a curvatura de sua superfície. Enquanto o balde gira, mas a água permanece imóvel, sua superfície mantém-se plana. Newton observa que apenas quando a água gira com relação ao espaço absoluto sua superfície torna-se côncava.

Em um segundo experimento de pensamento Newton imagina um mundo onde só existam dois globos ligados por uma corda. Ele argumenta que através da medida da tensão da corda somos capazes de determinar se estes globos giram um com relação ao outro ou ambos estão parados. Note que se assim for o caso, então a inércia dos corpos caracteriza-se pela resistência à mudança de estado de movimento com relação ao espaço absoluto.

No início do século 20, esta visão de espaço e de tempo é radicalmente alterada com o advento da relatividade restrita. A necessidade de compatibilizar as leis da mecânica com a então recém-desenvolvida teoria eletromagnética produz uma reformulação da primeira em prol da segunda. A relatividade restrita pode ser entendida como uma reformulação da cinemática²⁵ da mecânica newtoniana.

Da mesma maneira que há uma classe de observadores privilegiados na mecânica newtoniana, na relatividade restrita, o princípio da relatividade ainda pleiteia a existência dessa classe de observadores. Contudo, o espaço absoluto e o tempo absoluto de Newton são

²⁴ A mecânica cartesiana pressupõe que o entendimento das causas do movimento devem passar pela interação por contato. Ademais a noção de movimento estabelece-se pelo movimento relativo dos corpos contíguos uns aos outros. Para uma discussão mais detalhada veja as referências (JAMMER, 1993; DISALLE, 2006; BARBOUR, 2001).

²⁵ Toda dinâmica é definida dentro do contexto de uma determinada cinemática e assim ao alterarmos a cinemática estamos automaticamente redefinindo também a dinâmica. Porém à parte da modificação induzida pela troca de cinemática, a relatividade restrita não altera em nada a dinâmica newtoniana. É neste sentido que dizemos que a relatividade restrita é apenas uma modificação na cinemática da mecânica newtoniana.

substituídos pela noção de espaço-tempo absoluto²⁶. Esta modificação se dá através do reconhecimento de que as noções de distância espacial e temporal devem ser definidas por procedimentos mensuráveis. Há aqui um ponto de contato entre a atitude de Einstein ao propor a relatividade restrita e a leitura de Stein e DiSalle sobre a postura de Newton. Ambos os cientistas atribuem propriedades ao espaço e ao tempo de forma a tornar coerente a dinâmica observada. No caso da relatividade restrita, parte da dinâmica é determinada pela nova teoria eletromagnética consolidada por Maxwell na qual a velocidade da luz no vácuo é constante. Devido à sua equivalência mútua, todo e qualquer observador inercial deve medir a mesma velocidade da luz mesmo que haja velocidade relativa entre eles. Esta situação só pode ser coerente com a reformulação do conceito de simultaneidade.

O tempo absoluto de Newton caracteriza-se pelo estabelecimento de um instante único global que define o agora simultaneamente em todos os pontos do universo. Logo, dois eventos são simultâneos se fazem parte do mesmo agora. Por outro lado, a cinemática relativística propõe que as noções de espaço e de tempo dependam do estado de movimento do observador.

Ao contrário da mecânica newtoniana, a noção de simultaneidade não é mais absoluta mas relativa e dependente do observador. Relógios em movimento uns com relação aos outros não mais registram a mesma passagem de tempo, mas há um efeito de dilatação temporal – relógios em movimento medem um segundo mais longo do que relógios parados de forma que o passar do tempo é mais lento quando em movimento. De maneira complementar, as distâncias espaciais também dependem do estado de movimento das réguas que as medem. Este efeito é conhecido como contração de Lorentz – o tamanho de um objeto é menor quando em movimento.

A relatividade da simultaneidade, no entanto, não modifica o caráter absoluto do espaço-tempo. Apesar do espaço e do tempo, ao serem tomados separadamente, dependerem do estado de movimento do observador, a noção quadridimensional de espaço-tempo ainda é um objeto absoluto nos moldes da mecânica newtoniana. Em particular, a inércia dos corpos ainda é associada ao movimento relativo ao espaço-tempo absoluto.

Logo após a publicação do seu artigo sobre a relatividade restrita, Einstein deu-se conta de que a força gravitacional newtoniana é incompatível com esta nova visão de natureza. A gravitação newtoniana é uma força-à-distância, o que significa dizer que é uma força não-local e instantânea. Um corpo age à distância e instantaneamente em outro e esta

²⁶ O primeiro cientista a colocar a questão em termos de um espaço-tempo absoluto foi Hermann Minkowski (MINKOWSKI, 1908).

ação é mútua. Como veremos na seção seguinte, um dos maiores problemas com a força gravitacional newtoniana é a sua incompatibilidade com a causalidade da teoria da relatividade.

A solução proposta por Einstein foi desenvolver uma teoria relativística de gravitação que se denominou teoria da relatividade geral. Como o próprio nome já indica, a relatividade geral amplia o conceito de relatividade presente na relatividade restrita. Na elaboração da teoria da relatividade geral, Einstein formulou três princípios fundadores, a saber, o princípio de equivalência, o princípio de Mach e o princípio de variância²⁷.

O princípio de equivalência baseia-se em um fato experimental conhecido pelo menos desde o final do século 16. O experimento de queda livre de Galileo Galilei, que talvez não tenha ocorrido (não há registros históricos que comprovem sua realização) no final do século 16 na torre de Pisa, configura o início de uma série de experimentos que demonstram que a massa inercial de um corpo é equivalente a sua massa gravitacional com uma precisão de várias casas decimais²⁸. Isto significa que corpos de constituição e massas distintas caem da mesma maneira no campo gravitacional da Terra. A massa inercial fornece uma medida da inércia do corpo – resistência à mudança de movimento. Enquanto que a massa gravitacional funciona como a carga gravitacional do corpo e assim está associada a intensidade da interação gravitacional da qual este corpo participa. A princípio, não há nenhum motivo para que estes dois conceitos distintos sejam identificados. Seria equivalente a afirmar que a carga do elétron devesse ter o mesmo valor numérico de sua massa²⁹.

O princípio de equivalência afirma que a massa inercial de um corpo é idêntica à sua massa gravitacional. Estas duas quantidades não são apenas aproximadamente iguais, mas são na realidade a mesma quantidade. Há então uma identificação entre estes dois conceitos o que gera dois desdobramentos cruciais para a relatividade geral. O primeiro é o caráter universal da gravitação enquanto que o segundo é o fato da interação gravitacional ser

²⁷ Na literatura o termo usual é princípio de covariância, como o próprio Einstein o denominou. Porém como argumentaremos, consideramos mais adequado designarmos de princípio de variância para associá-lo a ausência de objetos absolutos e não a forma covariante das leis dinâmicas.

²⁸ Após Galileu, Newton realizou experimentos com pêndulos para testar a igualdade entre a massa inercial e gravitacional o qual foi depois melhorado por Friedrich Wilhelm Bessel em 1830. No final do século 19 Loránd Eötvös (1891) aprimorou as medidas ao modificar o arranjo experimental usando balanças de torção alcançando uma precisão de 1 parte em 20 milhões. Em seguida com a ajuda de Dezső Pekár e Jenő Fekete, Eötvös melhorou a precisão para 1 parte em 10⁸. Em 1964 a precisão alcançou 1 parte em 10¹¹ com a colaboração entre Robert H. Dicke, P. G. Roll e R. Krotkov.

²⁹ O valor da razão carga massa do elétron no CODATA (Committee on Data for Science and Technology) de 2014 é de $e/m \sim 1.76 \times 10^{11}$ Coulomb/kg.

indiscriminadamente igual para todos os corpos.

Para ilustrar as consequências do princípio de equivalência, Einstein elaborou um experimento de pensamento no qual uma pessoa encontra-se fechada em um elevador sem abertura de forma que não seja possível observar nada do que acontece no seu exterior. Einstein argumenta que em um elevador em queda livre, como todos os objetos caem da mesma forma no campo gravitacional, tudo irá se passar como se não houvesse o campo gravitacional da Terra. Não havendo efeito gravitacional nem de nenhuma outra força, Einstein argumenta que observadores em queda livre devem ter estatuto epistemológico equivalente aos observadores inerciais. Uma das consequências desta proposta é o abandono da geometria euclidiana. Vejamos o motivo.

Como mencionamos acima, um dos efeitos cinemáticos da relatividade restrita é a contração de Lorentz. Valendo-se de outro experimento de pensamento, Einstein analisa qual geometria um observador em rotação descreveria. Se o observador estiver com velocidade angular constante, a aceleração centrípeta é dirigida radialmente para o centro e assim sua velocidade tangencial é constante. É um efeito cinemático que a contração de Lorentz ocorre apenas ao longo do movimento enquanto que as direções perpendiculares permanecem intactas. Assim, este observador em rotação concordará com o valor de raio que um observador externo e parado atribui a seu movimento, mas discordará do valor do perímetro da circunferência de sua trajetória. Logo, o observador acelerado atribuirá um valor à razão entre comprimento e diâmetro menor que o valor euclidiano de π . A conclusão de Einstein é que observadores acelerados devem descrever o mundo por uma geometria não-euclidiana. Ademais, como observadores em queda livre são tomados como equivalentes aos inerciais, a geometria do mundo deve ser riemanniana³⁰.

O segundo princípio formulado por Einstein é o princípio de Mach. Ernst Mach foi um físico e filósofo da segunda metade do século 19 que influenciou significativamente o pensamento de Einstein com respeito à origem da inércia dos corpos. Na mecânica clássica não-relativística, a inércia dos corpos está intimamente ligada ao espaço absoluto. Um dos pontos cruciais no argumento de Newton é a manifestação do espaço absoluto em movimentos acelerados como, por exemplo, a água no balde em rotação. Newton argumenta que a curvatura na superfície da água dá-se pelo movimento com relação ao espaço absoluto e

³⁰ Geometria Riemanniana é um tipo de geometria não-euclidiana onde as propriedades afim são integralmente determinadas pela métrica a qual é o tensor que codifica as propriedades geométricas do espaço-tempo. A consequência é que localmente sempre é possível construir um sistema de coordenadas que faça a estrutura geométrica identificar-se com a geometria da relatividade restrita.

não com relação aos corpos em seu entorno.

Apesar do peso do sucesso experimental da mecânica clássica, o viés empirista de Mach o leva a se opor às conclusões de Newton. Seguindo a tradição relacional, para Mach apenas o movimento relativo contém significado empírico e por isso a inércia de um corpo só pode ser atribuída aos outros corpos. Mach salienta que a curvatura na superfície da água no experimento do balde deve-se a seu movimento com relação aos outros corpos e não com relação ao espaço absoluto. Para Newton há uma profícua coincidência entre o espaço absoluto e o referencial no qual as estrelas fixas estão em repouso. Para Mach este fato é mais que uma mera coincidência³¹

“Newton's experiment with the rotating vessel of water simply informs us, that the relative rotation of the water with respect to the sides of the vessel produces no noticeable centrifugal forces, but that such forces are produced by its relative rotation with respect to the mass of the Earth and the other celestial bodies.” (MACH, 1989, p. 284)

Com efeito, para Mach a lei da inércia deve ser formulada com relação aos outros corpos materiais existentes na natureza³²

“When, accordingly, we say that a body preserves unchanged its direction and velocity in space, our assertion is nothing more or less than an abbreviated reference to the entire universe.” (MACH, 1989, p. 286)

Influenciado pelo trabalho de Mach, Einstein também entende que os únicos movimentos com significado físico são os movimentos relativos. Ademais, a inércia dos corpos deve ser determinada pela distribuição de matéria no universo.

Finalmente temos o terceiro princípio lançado mão por Einstein, o princípio de covariância. De maneira abreviada este princípio afirma que as leis da natureza devem ser covariantes, o que significa dizer que sua forma é invariante por uma transformação arbitrária do sistema de coordenadas. Um sistema de coordenadas é uma escolha arbitrária útil para descrição de um fenômeno, escolha esta que não pode carregar em si nenhum significado físico. Contudo como salientado por Erich J. Kretschmann (KRETSCHMANN, 1917), qualquer teoria espaço-temporal pode ser reformulada de maneira covariante, inclusive a mecânica newtoniana. Com relação a este debate, concordamos com James L. Anderson (ANDERSON, 1967) ao argumentar que a intenção de Einstein ao formular seu princípio de covariância foi de abolir objetos absolutos da teoria. Para reforçar esta interpretação o designamos de princípio de variância que afirma a exclusão de todo e qualquer objeto

³¹ “O experimento de Newton com o balde de água girante simplesmente nos informa que a rotação relativa da água com respeito a lateral do balde não produz nenhuma força centrífuga observável, mas que tais forças são produzidas por sua rotação relativa com respeito a massa da Terra e os outros corpos celestes.”

³² “Quando, conseqüentemente, nós dizemos que um corpo mantém inalterado sua direção e velocidade no espaço, nossa afirmação é nada mais nem menos que uma abreviada referência ao universo inteiro.”

absoluto³³. O princípio de variância exige que o grupo de simetria da teoria seja o grupo formado por todas as transformações arbitrárias de coordenadas³⁴. Este princípio implica que a métrica do espaço-tempo deve necessariamente ser um objeto dinâmico.

A articulação de todas essas ideias faz com que Einstein associe os efeitos gravitacionais à estrutura do espaço-tempo. A métrica do espaço-tempo torna-se um campo físico dinâmico e a força gravitacional passa a ser interpretada como um epifenômeno. O movimento que observamos dos corpos, por exemplo, as trajetórias dos planetas do sistema solar, são oriundas da curvatura do espaço-tempo. Neste contexto, as partículas livres (ausência de força) seguem geodésicas as quais são a generalização natural das linhas retas. A reta pode ser definida como a curva na geometria euclidiana cujo vetor tangente é sempre paralelo à curva. De maneira similar, as geodésicas são definidas em geometrias riemannianas como as curvas cujos vetores tangentes são transportados paralelamente à própria curva. Esta propriedade as distingue de outras curvas possíveis. Em particular, as geodésicas do espaço plano são justamente as linhas retas, de maneira que este postulado generaliza a lei de inércia da mecânica newtoniana.

A teoria da relatividade geral é uma teoria dinâmica para a métrica do espaço-tempo. Da mesma forma que a matéria (ou densidade de matéria se nos referirmos à equação de Poisson da gravitação) é a fonte para a gravitação newtoniana, na relatividade geral, a fonte para a métrica do espaço-tempo é o tensor energia-momento o qual descreve a densidade, a pressão, o fluxo de energia e o tensor de cisalhamento associado a componente de pressão anisotrópica. É a distribuição de matéria e energia codificada no tensor de energia-momento que modifica a estrutura do espaço-tempo o qual por sua vez vincula a dinâmica da matéria.

³³ Um objeto é dito absoluto quando for invariante pela ação de qualquer elemento do grupo de simetria da teoria. O objeto absoluto associado ao espaço absoluto de Newton é a métrica do espaço euclidiano. O grupo de simetria da mecânica newtoniana é o grupo de galileu composto por rotações e translações espaciais e translações temporal. A métrica do espaço euclidiano que no sistema de coordenadas cartesiano é representada pela matriz $\text{diag}(1,1,1)$ é invariante pela ação de qualquer uma destas transformações. De maneira similar, a métrica de Minkowski da teoria da relatividade restrita é o objeto absoluto associado ao grupo de Poincaré.

³⁴ O grupo de simetrias da relatividade geral é o chamado MMG (manifold mapping group) que corresponde ao grupo de todas as possíveis difeomorfismos da variedade nela mesma. Porém como há uma correspondência um-para-um com as transformações de coordenadas não estamos fazendo aqui esta distinção.

1.3 Causalidade

A riqueza dos fenômenos naturais possibilita que nós seres humanos sejamos capazes de identificar regularidades no mundo e um dos principais objetivos das ciências naturais é tentar explicar os fenômenos que observamos. A ciência moderna desenvolveu-se inserida em uma metafísica que valoriza a universalidade dos conceitos e a objetividade das explicações científicas. Na realidade, talvez seja mais adequado afirmar que a visão atual considera que a intersubjetividade da ciência possibilita o acordo da comunidade científica sobre a veracidade dos fatos.

Tradicionalmente há pelo menos quatro tipos de fatos científicos. O fato lógico que decorre da estrutura lógica da sentença e não necessita de comprovação empírica. No extremo oposto temos o acidente que é um fato cuja realização se dá puramente pelo efeito de contingências. E há dois tipos de fatos causais associados às leis naturais que se distinguem pelo tipo de lei causal a eles associada – as leis universais e as leis estatísticas. As leis universais são regras necessárias cuja validade se impõe em todas as realizações dadas suas condições de aplicabilidade. Já as leis estatísticas são regras gerais cuja ocorrência se dá apenas em certo número de realizações, mas com frequência de ocorrência bem determinada.

A estrutura explicativa da ciência moderna utiliza exclusivamente a relação de causa eficiente onde há uma relação entre causa e efeito através das propriedades e interações da matéria. Na maioria dos casos esta relação é um nexo de várias causas para um efeito, mas há também exemplos mais simples onde a relação causa efeito pode ser do tipo um para um. De toda forma, o estabelecimento da relação causal pressupõe a caracterização de quais fenômenos são meramente contingentes para a explicação de um determinado efeito. Determinar as causas de um efeito sempre é simultaneamente um ato de determinação de suas contingências. Ademais, esta caracterização é contextual e não pode ser estabelecida a priori.

A física clássica não-relativística baseia-se fortemente na noção de interação para explicar os fenômenos naturais. O programa cartesiano, por exemplo, circunscreve o seu conceito de explicação valendo-se apenas da interação por contato. A mudança no estado de movimento de um corpo só pode ocorrer pelo impacto de um corpo em outro. Evidentemente, este tipo de proposta exclui forçosamente a noção de interação gravitacional como definida por Newton onde a força gravitacional é um tipo de ação-à-distância. Contudo as interações não abarcam todos os tipos possíveis de explicação. Como vimos anteriormente, na mecânica newtoniana a inércia dos corpos materiais tem origem no espaço absoluto e assim não pode

ser atribuída a uma interação, pois, por definição, o espaço absoluto não sofre nenhum efeito de nenhum ente existente na natureza.

A estrutura causal da mecânica newtoniana está intimamente ligada à natureza do espaço e do tempo absolutos. O tempo absoluto possibilita o estabelecimento de um agora global e único em todo o universo. A princípio, quaisquer dois pontos do universo podem influenciar-se mutuamente e de fato a lei da gravitação através de uma força do tipo ação-à-distância conecta instantaneamente todos os corpos do universo. Além disso, não há um limite de velocidade para a propagação dos corpos materiais. Assim, o tempo necessário para conectar quaisquer dois pontos do universo pode ser tomado o quão pequeno se queira desde que haja energia suficiente disponível para o processo.

A estrutura causal de uma teoria científica determina o conjunto de eventos que estão causalmente conectados, ou seja, delimita os eventos que podem ser, mas não são necessariamente, conectados por algum tipo de interação. Na mecânica clássica não-relativística a estrutura causal constitui todo o espaço euclidiano, pois todo e qualquer ponto, em um dado instante, pode influenciar qualquer outro, não importando o quão distante um esteja do outro.

Em contrapartida, as modificações cinemáticas advindas da relatividade restrita alteram significativamente nossa visão sobre a estrutura causal da natureza. A relatividade da simultaneidade pode alterar a ordem temporal dos acontecimentos observados, uma vez que a passagem do tempo e as medidas de comprimento dependem do estado de movimento do observador³⁵. Mas mais importante ainda, a cinemática relativística impõe um limite superior para a propagação de qualquer interação.

Nesta cinemática, os corpos materiais sempre viajam com velocidade menor do que a velocidade da luz não importando o quanto de energia seja fornecida para o seu movimento. A velocidade máxima possível para qualquer interação é dada pela velocidade da luz. Assim, a informação contida em um dado evento leva no mínimo o tempo de viagem da luz para se propagar e influenciar outras regiões do espaço. Na relatividade restrita, um sinal luminoso pode atingir qualquer ponto do espaço, não importando o quão distante ele esteja da fonte que o produziu. Se não houver nenhum obstáculo material, a condição suficiente é que esperemos o tempo necessário para a propagação da luz.

Porém, ao contrário da mecânica newtoniana, a estrutura causal da relatividade restrita

³⁵ Note porém que a relação causal dos fenômenos não depende do observador. Se um observador identificar que A é causa do fenômeno e, por conseguinte, A deve ser anterior a B, todo e qualquer outro observador irá concordar que A é anterior no tempo a B.

não corresponde a todo o espaço euclidiano, mas caracteriza-se pelo que é chamado de estrutura em cone-de-luz. Esta estrutura pode ser visualizada em um diagrama espaço-temporal o qual por simplicidade é feito com apenas uma dimensão espacial no eixo da abscissa e a dimensão temporal no eixo da coordenada. Se reescalarmos a dimensão temporal multiplicando-a pela velocidade da luz, a qual é constante no vácuo, neste diagrama, as trajetórias da luz oriundas da origem no ponto $(0,0)$ serão duas retas que formam 45 graus com o eixo da abscissa.

Trajетórias com velocidade menor do que a da luz serão necessariamente curvas contidas entre estas duas retas a 45 graus. Logo, quaisquer pontos contidos no interior ou na borda do cone formado pelas duas retas a 45 graus podem receber sinais físicos advindo da origem e conseqüentemente estão causalmente conectados com o ponto $(0,0)$. De maneira complementar, pontos fora desta região estão causalmente desconectados da origem.

A generalização para o espaço-tempo todo é imediata. Definimos o que chamamos de cone-de-luz de um ponto P como sendo a superfície expandida por todas as trajetórias possíveis de um sinal luminoso com origem no ponto P . O cone-de-luz futuro de um ponto P é o conjunto de pontos que podem ser atingido por um sinal luminoso emanante do ponto P . Similarmente, o cone-de-luz passado do ponto P é o conjunto de pontos que podem emitir um sinal luminoso que incida no ponto P . Vemos assim que a estrutura causal em cones-de-luz estabelece um passado e um futuro causal para cada ponto P do espaço-tempo como sendo respectivamente, os pontos que podem influenciar causalmente P e os pontos que podem ser influenciados causalmente por P .

Com o advento da teoria da relatividade geral a estrutura causal da natureza é novamente modificada. Nesta teoria, o espaço-tempo é descrito por uma variedade riemanniana o que nos garante que localmente a estrutura da relatividade restrita ainda é válida. Podemos, assim, definir localmente a mesma estrutura em cones-de-luz como descrita acima. Em particular, ainda é verdade que o conjunto de todas as trajetórias da luz forma uma superfície delimitadora das trajetórias possíveis. Porém, as trajetórias da luz não formam mais retas a 45 graus, pois, em geral, o espaço-tempo é curvo. As geodésicas que determinam as trajetórias da luz dependem das propriedades geométricas do espaço-tempo.

Devido à particularidade da estrutura causal da relatividade geral, surge a noção de horizonte. Há diversos tipos não equivalentes de horizonte, mas todos guardam a noção de desconexão causal de pontos do espaço-tempo. O horizonte de partículas de um determinado ponto P define a região do passado deste ponto passível de influenciá-lo causalmente, i.e. o seu passado causal. Há outras noções de horizonte que determinam a desconexão causal para

o futuro. Um exemplo é o horizonte de eventos o qual é comumente associado a buracos negros. Apesar de sua importância, a definição de horizonte de eventos requer noções topológicas e em muitos casos o conceito similar de horizonte aparente mostra-se mais útil.

O horizonte aparente baseia-se no conceito de superfície de aprisionamento, a qual pode ser definida como uma superfície bidimensional compacta tal que, para todas as trajetórias luminosas dirigidas para o futuro (incidentes e emergentes) e ortogonais à superfície, o fator de expansão³⁶ é negativo em todos os seus pontos. Esta propriedade faz com que pontos fora da região de aprisionamento estejam causalmente desconectados com o interior desta superfície. O horizonte aparente é simplesmente identificado com a borda da união de todas as regiões de aprisionamento.

A existência de horizontes em um determinado espaço-tempo indica a existência de regiões causalmente desconectadas e que podem assim permanecer indefinidamente, por exemplo, caso seja um horizonte aparente ou de eventos. Estas regiões são por definição regiões das quais não podemos extrair nenhuma informação. Este tipo de configuração acontece, por exemplo, em espaços-tempos que contém buracos negros. Os buracos negros são objetos compactos remanescentes de um longo processo de colapso gravitacional³⁷ cuja massa é grande o suficiente para que a gravitação acabe por dominar o estágio final e produza um colapso incessante. O resultado final, segundo a teoria da relatividade geral, é a formação de uma singularidade na origem do sistema astrofísico.

A noção de singularidade não é completamente bem definida em relatividade geral. A sua dificuldade está intimamente ligada ao fato da relatividade geral ser uma teoria sobre a estrutura do espaço-tempo. Em outras teorias podemos definir singularidade como sendo o local e instante onde as quantidades físicas divergem. Porém, no caso da relatividade geral é a própria estrutura do espaço-tempo que se torna mal definida de forma que não podemos definir o quando e o onde há uma singularidade. Pela própria definição de espaço-tempo, a singularidade não pode fazer parte de sua estrutura. Devemos excluir estes pontos do espaço-tempo.

Uma solução parcial para este problema é procurar por vestígios da ausência (retirada) destes pontos o que nos leva a noção de espaços-tempos geodesicamente completos. Caso

³⁶ O fator de expansão é um conceito da geometria diferencial que descreve o comportamento de aproximação e de afastamento de curvas de uma mesma congruência (família de curvas contíguas que preenchem uma superfície bidimensional mas não se cruzam). O fator de expansão ser negativo (positivo) significa que as curvas se aproximam (afastam).

³⁷ De um ponto de vista astrofísico, os buracos negros são remanescentes de uma explosão de supernovas cuja massa remanescente excede o limite de massa das estrelas de nêutrons o qual estabelece o valor máximo para a estabilidade e retenção do colapso gravitacional.

haja uma única curva geodésica que seja incompleta, i.e. uma geodésica que apresente um término ou um início abrupto, então definimos que há uma singularidade. Esta descrição geométrica pretende modelar a criação ou aniquilação de matéria³⁸. Evidentemente, esta situação desestabiliza as relações de causa e efeito no universo. Uma singularidade é por definição algo que não respeita a relação de causa eficiente.

Poder-se-ia argumentar que a formação de uma singularidade é uma configuração puramente teórica e que não deveria ser realizada na natureza. Mas os teoremas de singularidade desenvolvidos por Roger Penrose, Stephen Hawking e colaboradores provam que a formação de singularidades é muitas vezes uma situação inevitável. Dada certas condições plausíveis sobre os campos de matéria, as quais denominamos de condições de energia sobre o tensor energia-momento, a validade das equações de Einstein conduzem à formação de singularidades³⁹. Um exemplo é a singularidade inicial do modelo do Big Bang⁴⁰.

Para remediar esta situação, Roger Penrose propôs o que hoje é conhecido como a conjectura da censura cósmica fraca⁴¹. Como a teoria da relatividade geral permite em condições fisicamente razoáveis a formação de singularidades, a ideia é evitar que estas soluções produzam descontrole causal. A conjectura da censura cósmica fraca propõe que uma eventual singularidade, caso seja formada, sempre venha acompanhada de uma estrutura de horizontes que a isole do resto do espaço-tempo. Singularidades que não são cobertas por horizontes são chamadas de singularidades nuas. Logo, a censura cósmica fraca afirma que não deve haver singularidades nuas na natureza.

³⁸ Um processo de aniquilação ou de criação *ex nihilo* de matéria deve ser formulado a partir de uma discussão metafísica que transcende a capacidade da ciência moderna. As geodésicas incompletas são curvas que descrevem o surgimento ou aparecimento de partículas sem lidar com o processo de criação ou aniquilação propriamente dito.

³⁹ Argumenta-se que uma teoria de gravitação quântica consistente pode possivelmente evitar a formação de singularidades mas ainda não há nenhuma formulação que proporcione consenso na comunidade científica.

⁴⁰ Vale notar que as singularidades são configurações mal definidas do ponto de vista científico. De fato, a existência de uma singularidade é adequadamente interpretada como uma limitação de nossa descrição da natureza. No limite de configuração de uma singularidade a ciência perde o seu poder preditivo.

⁴¹ A conjectura da censura cósmica forte destina-se a garantir que a teoria da relatividade geral seja uma teoria determinística o que pode ser matematicamente formulado como a exigência da existência de superfícies de Cauchy. Estas superfícies garantem que a propagação dos dados iniciais determinam toda a evolução futura.

1.4 Noções de Tempo e Espaço

Até o desenvolvimento da teoria da relatividade restrita a visão de espaço e tempo na ciência moderna sempre os considerou como entes independentes. Porém, embora tempo e espaço continuem sendo duas quantidades com propriedades completamente distintas, a visão relativística as conecta de uma forma inseparável. Com isso queremos dizer que os fenômenos da natureza apresentam-se em um único ente quadridimensional que denominamos de espaço-tempo e a separação entre espaço e tempo mostra-se como uma decomposição dependente de observador.

A relatividade geral é uma teoria cujo grupo de simetria é formado por todos os possíveis difeomorfismos da variedade nela mesma. Isso significa que podemos aplicar uma transformação arbitrária e escolher sem restrições o sistema de coordenadas a ser utilizado para descrever as propriedades geométricas do espaço-tempo. As coordenadas espaciais e a coordenada temporal são arbitrárias em consonância ao princípio de variância descrito anteriormente. Contudo, isso não significa que possamos associar qualquer sistema de coordenadas a sistemas de referência.

Um referencial é um conjunto de coordenada com propriedades específicas cujos vetores tangentes a suas linhas integrais expandem o espaço e o tempo de um dado observador. Com efeito, deve haver um vetor do tipo temporal cuja coordenada coincide com a marcação do relógio atrelado a este observador e os três vetores restantes devem expandir as três dimensões espaciais. Esta separação em espaço e tempo é denominada de separação 3+1 e corresponde à definição do que um observador designa por seu espaço de repouso e seu tempo próprio.

A linha de mundo de um observador arbitrário descreve uma trajetória no espaço-tempo. Um relógio atrelado a este observador segue a mesma trajetória que a linha de mundo do observador. Logo, a marcação do relógio pode ser usada como parâmetro desta linha de mundo, ou seja, o vetor tangente à linha de mundo do observador define a direção que o observador designa por tempo. De modo complementar, o que este observador designa por espaço, seu espaço de repouso, é as três direções ortogonais a esta direção temporal.

Note que esta construção é apenas local. Definimos o tempo e o espaço de repouso do observador apenas em uma vizinhança de sua linha de mundo. Esta é uma limitação necessária. Em geral, não somos capazes de definir globalmente esta separação em espaço e tempo. A extensão e validade desta construção dependem das propriedades geométricas da

região considerada e em particular das propriedades associadas ao tensor de curvatura⁴².

O espaço de repouso do observador é um subespaço tridimensional do espaço-tempo. A este espaço de repouso há uma métrica induzida pela própria separação 3+1. Logo, as propriedades do que o observador designa por espaço depende da sua linha de mundo. Em geral, a métrica do espaço-tempo depende de todas as coordenadas, ou seja, depende das três coordenadas espaciais e também do tempo. Consequentemente, a métrica do espaço de repouso de um determinado observador pode também depender de todas as coordenadas e inclusive do tempo.

Uma das heranças epistemológicas deixadas por Einstein é a obrigatoriedade de definir conceitos científicos a partir de procedimentos de mensuração. Esta é inclusive a base argumentativa de Einstein para propor a relatividade da simultaneidade. A noção de tempo em regiões distintas do espaço-tempo deve ser construída através do procedimento de sincronização de relógios, o que necessita da comunicação entre pontos distantes no espaço. Na relatividade restrita, a natureza plana do espaço-tempo é suficiente para garantir que este procedimento possa ser estendido para todo o espaço-tempo. Porém, no caso da relatividade geral, a possibilidade de sincronização de relógios distantes depende das propriedades do espaço-tempo. Em particular é necessário e suficiente que o espaço-tempo seja estático, o qual é um caso particular de espaços-tempos estacionários, para que esta sincronização seja possível.

Um espaço-tempo é dito estacionário se houver um sistema de coordenadas no qual as componentes da métrica não dependam do tempo. Se, além disso, neste mesmo sistema de coordenadas, a direção temporal for ortogonal às direções espaciais então dizemos que o espaço-tempo é estático. Em espaços-tempos estacionários, a métrica não depende do tempo, mas ela não é invariante por reversão temporal. Esta é uma característica típica de sistemas com rotação. Um exemplo conhecido é a solução de buraco negro de Kerr que descreve a situação astrofísica de um buraco negro girante. Nesta solução não é possível definirmos uma noção global de tempo, pois não é possível, por exemplo, sincronizar relógios ao redor do buraco negro. Nestes casos perdemos a possibilidade de definir um tempo global e a separação 3+1 não pode ser desenvolvida para todo o espaço-tempo.

De maneira similar, a possibilidade de definir distâncias puramente espaciais também depende de propriedades específicas do espaço-tempo. Quando a métrica induzida, a qual

⁴² O tensor de curvatura é definido pelo comutador de duas derivadas covariantes. Este objeto geométrico codifica as propriedades afim do espaço-tempo e caso o tensor de curvatura seja não-nulo o transporte de qualquer objeto ao longo do espaço-tempo depende do caminho utilizado para o levar do ponto inicial ao final.

define as propriedades do espaço de repouso, depende do tempo, não podemos definir a distância espacial entre dois pontos. A distância espacial entre dois pontos funciona como a projeção da trajetória do espaço-tempo quadridimensional no espaço de repouso tridimensional. Quando a métrica induzida depende do tempo, a distância espacial entre dois pontos do espaço-tempo depende do caminho usado para conectar estes dois pontos.

Um caso de interesse é a métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) a qual descreve as propriedades geométricas do universo no modelo padrão da cosmologia. Esta métrica tem duas propriedades particularmente importantes: existe um folheamento do espaço-tempo que nos permite definir um tempo global denominado de tempo cósmico e os espaços de repouso definidos como as seções tridimensionais a tempo cósmico constante são homogêneos e isotrópicos.

A propriedade de cada seção espacial, ou seja, folha a tempo cósmico constante, ser homogênea e isotrópica faz com que todos os seus pontos sejam equivalentes e todas as direções a partir de qualquer um de seus pontos sejam indistinguíveis. Esta equivalência dá sustentação para uma das extrapolações mais fundamentais da cosmologia, a saber, a hipótese de que as leis naturais que governam os fenômenos na vizinhança da Terra podem ser usadas para descrever os fenômenos em todas as regiões do universo.

Todavia, a homogeneidade e isotropia das seções espaciais não são suficientes para podermos definir uma noção unívoca de distância. Tomemos o exemplo da geometria de FLRW. Neste modelo a distância física entre dois pontos a tempo cósmico constante deveria ser uma curva contida em uma das seções espaciais, porém, a evolução global do universo faz com que esta distância varie com o tempo cósmico. Ademais, como mencionamos anteriormente, essa distância puramente espacial é apenas uma projeção da curva no espaço-tempo quadridimensional.

Uma dada observação, que por simplicidade pode ser a detecção da luz emitida por uma galáxia, nos fornece informação sobre a trajetória que a luz percorre da galáxia até a Terra. Durante o percurso da luz, o universo evoluiu e as distâncias físicas se alteram de forma que a distância total percorrida depende de como integramos todas as noções locais de comprimento. O ponto fundamental é que quando a métrica induzida das seções espaciais depende do tempo, não há uma maneira unívoca de definir esta distância integral do trajeto⁴³.

⁴³ Devido a esta impossibilidade teórica, existe pelo menos três noções úteis porém distintas de distância associadas ao modelo de FLRW. A distância luminosidade utiliza a variação do fluxo de radiação com a distância à fonte. No espaço plano o fluxo de uma radiação esfericamente simétrica pode ser definido pela razão da sua luminosidade pela área da casca esférica (4π vezes a distância ao quadrado). Definimos a distância luminosidade pela razão da luminosidade intrínseca do objeto por 4π vezes o fluxo de radiação medido na Terra.

Por outro lado, a existência de um tempo global no modelo de FLRW é de extremo valor para a cosmologia, pois nos permite construir uma história do universo. A partir deste tempo cósmico podemos definir uma separação em tempo e espaço na qual faz sentido em falar em um instante compartilhado por todos os lugares do universo. Podemos definir um agora que secciona o universo em passado e futuro.

Entretanto, poderíamos considerar o caso, consistente com todas as teorias físicas conhecidas, do universo não possuir as propriedades geométricas da métrica de FLRW. É uma característica particular do modelo de FLRW a possibilidade de definirmos uma história para o universo. Neste cenário, há uma noção global de passagem de tempo. Os vetores tangentes à coordenada do tempo cósmico definem a direção temporal para o futuro enquanto que a direção oposta aponta para o passado.

Vale ressaltar a diferença entre a possibilidade de folheamento global e a existência de um tempo global. Há certos modelos nos quais as propriedades geométricas de cada seção espacial se mantêm idênticas. Dois exemplos bem conhecidos são o universo de Einstein e o modelo de estado-estacionário.

O modelo de estado-estacionário descreve um universo em expansão constante com seções espaciais homogêneas e isotrópicas e neste sentido é similar ao modelo de FLRW. No entanto, ao contrário do modelo de FLRW, o modelo é construído de forma a conservar as seções espaciais idênticas uma as outras⁴⁴. Devido à expansão, surge então a necessidade de propor mecanismos de criação de matéria no universo. Neste modelo há uma dinâmica associada à expansão do universo, porém não há propriamente uma evolução. A expansão do universo permite estabelecer uma direção preferencial de tempo, mas o passado é idêntico ao futuro e por isso não há propriamente uma história do universo.

O outro exemplo é o universo de Einstein, primeiro modelo cosmológico proposto depois da formulação da relatividade geral (EINSTEIN, 1917). Este modelo formulado por Einstein em 1917 consiste em um modelo estático sem dinâmica. Não há uma evolução

A distância diâmetro angular baseia-se na medida do tamanho angular medido dos objetos astrofísicos. A distância angular é definida como a razão entre o tamanho do objeto astrofísico e a abertura angular medida em sua observação a partir da Terra. Finalmente temos a distância associada ao desvio para o vermelho que é uma medida fracional da expansão do universo, ou seja, é uma razão entre o fator de escala, função do tempo que codifica a evolução do universo FLRW, em dois momentos distintos, na emissão e na recepção da luz. Vale ressaltar que todas essas noções, além de não serem equivalentes, dependem da modelagem utilizada para descrever o universo.

⁴⁴ Uma das motivações essenciais da proposta do modelo de estado-estacionário é a generalização do princípio cosmológico o qual propõe que as seções espaciais sejam homogêneas e isotrópicas. Os proponentes do modelo de estado-estacionário generalizam esse princípio para o que ficou conhecido como o princípio cosmológico perfeito, alargando as simetrias do universo para que ele seja também homogêneo no tempo.

global, mas apenas variações locais de configuração do universo. Embora haja a possibilidade de separação global entre espaço e tempo não há uma noção própria de tempo global, pois não há evolução global neste modelo. O universo não tem dinâmica nem muito menos evolução global. Note que o modelo de Einstein não proíbe dinâmicas locais. De maneira similar a um gás em equilíbrio, é concebível haver mudanças locais sem que haja mudanças globais. Neste modelo a existência de uma flecha do tempo deve ser questionada a partir da física local.

Surge assim a questão de como relacionar essas diferentes noções de tempo globais e locais. Jacques Merleau-Ponty analisa esta questão a partir da hipótese da existência de um tempo cósmico (MERLEAU-PONTY, 1965, p.309-326). A primeira questão a ser endereçada por Merleau-Ponty é a existência de uma evolução global. A constatação imediata é que o mundo físico em nossa vizinhança não é estacionário de forma que pelo menos localmente é evidente que há uma evolução. Porém, poderia ser o caso da evolução local que observamos ser cancelada por uma evolução oposta em outra região do universo de modo que não houvesse uma evolução global do universo. No entanto, algumas observações cosmológicas dão suporte para de fato associarmos uma evolução global ao universo. Uma das observações a que nos referimos é o desvio para o vermelho dos objetos astrofísicos.

Nossa observação do universo tem sido quase integralmente⁴⁵ através da detecção de radiação eletromagnética. A luz emitida pelos objetos astrofísicos é analisada por sua decomposição espectral a qual nos permite identificar os elementos químicos presentes no sistema astrofísico e assim conseguimos informações físicas dos sistemas. Uma característica muito valiosa para a cosmologia é o deslocamento rígido dessas linhas espectrais.

Os espectros das observações apresentam linhas de absorção e emissão similares aos observados nos laboratórios terrestres com a diferença de um deslocamento rígido de suas posições. O espaçamento entre as linhas é idêntico aos medidos nos laboratórios da Terra, porém a posição de cada uma das linhas é deslocada de um mesmo valor. Este valor é denominado desvio para o vermelho, quando as linhas deslocam-se para frequências menores, ou desvio para o azul, quando as linhas deslocam-se para frequências maiores.

O fato das linhas espectrais serem deslocadas para o vermelho é interpretada pela comunidade científica como uma evidência da expansão do universo. O afastamento coerente dos objetos astrofísicos produz o desvio para o vermelho o qual, como mostra as observações, é maior quanto mais distante o objeto está da Terra.

⁴⁵ Recentemente as detecções das ondas gravitacionais realizadas pelos dois laboratórios do experimento americano LIGO constituem o início de uma nova forma de observar o cosmo. Porém, no momento, as ondas gravitacionais têm nos fornecido apenas informações astrofísicas.

Após analisar argumentos a favor, em particular de Dauvillier e de Zwicky (DAUVILLIER, 1955; ZWICKY, 1928; 1962), e contra, em particular de Tolman (TOLMAN, 1958), da possibilidade do universo estar em equilíbrio global Merleau-Ponty conclui⁴⁶

“Toutes ces remarques [pour l'équilibré global] ont certainement leur valeur, mais, en présence des données massives que sont le décalage spectral des galaxies, l'excès de matière, l'excès d'Hydrogène, la dispersion quasi universelle du rayonnement, elles ne semblent pas peser très lourd.” (MERLEAU-PONTY, 1965, p.315)

Hoje em dia, temos ainda, para citar dois outros argumentos, a observação da radiação cósmica de fundo, a ser detalhada no capítulo 4, e a teoria de formação de estruturas do universo a qual propicia uma comparação entre análise numérica e dados observacionais. Enfim, as observações acumuladas até hoje indicam a inviabilidade definitiva de modelos de universo em equilíbrio e sustentam fortemente um universo em evolução global.

A segunda questão formulada por Merleau-Ponty relaciona o sentido da evolução cósmica com nossa experiência local de tempo. A segunda lei da termodinâmica afirma que os processos termodinâmicos possíveis são aqueles que não diminuem a entropia. Há processos reversíveis que não alteram a entropia e existem os processos irreversíveis que sempre aumentam a entropia total do sistema. Logo a segunda lei da termodinâmica nos fornece uma noção clara de flecha do tempo⁴⁷.

Como argumentamos anteriormente, o desvio para o vermelho das galáxias nos oferece um sentido temporal para a evolução global do universo. Assim, nossa questão pode ser reformulada pela busca de uma possível conexão entre estas duas noções de direção temporal.

Merleau-Ponty nos recorda que a física do corpo negro⁴⁸ estabelece relações específicas entre a quantidade total de energia, a entropia e a temperatura associada a estes objetos. Em particular⁴⁹

⁴⁶ “Todas essas observações [a favor do equilíbrio global] são certamente importantes, mas, na presença da quantidade massiva de dados que são o desvio espectral das galáxias, o excesso de matéria, o excesso de hidrogênio, a dispersão quase universal da radiação, elas não parecem ter peso significativo.”

⁴⁷ A segunda lei da termodinâmica estabelece uma direção possível para os fenômenos e por isso entendemos que há uma noção clara de flecha do tempo. Contudo, não há um entendimento microscópico válido para todos os sistemas de como emerge essa irreversibilidade.

⁴⁸ Em física, um corpo negro é um objeto macroscópico capaz de absorver todos os comprimentos de onda. Quando em equilíbrio térmico, o corpo negro emite radiação eletromagnética em todas as faixas de frequência. Seu espectro de emissão respeita a leis de Planck a qual fornece o fluxo de radiação como função da frequência e da temperatura de equilíbrio do corpo negro .

⁴⁹ “[...]a energia da radiação negra enclausurada dentro de um volume dado é proporcional a quarta potência da temperatura, sua entropia a terceira potência: a relação energia-entropia é proporcional a temperatura; para uma quantidade dada de energia, a entropia é então uma função decrescente da temperatura; logo, o decréscimo da

“[...] l'énergie du rayonnement noir enfermée dans un volume donné est proportionnelle à la quatrième puissance de la température, son entropie à la troisième: le rapport énergie-entropie est proportionnel à la température; pour une quantité donnée d'énergie, l'entropie est donc une fonction décroissante de la température; or la décroissance de la température, donc la croissance de l'entropie, s'accompagne d'un décalage vers le rouge de l'ensemble du spectre; il y a ainsi une correspondance directe entre le sens temporel indiqué par la croissance de l'entropie – le sens thermodynamique – et le décalage spectral observé des galaxies.” (MERLEAU-PONTY, 1965, p.317)

Há outras propostas ainda mais incisivas de atrelar a noção de direção temporal local com a evolução do universo. Thomas Gold, por exemplo, alega que a única maneira de acomodar a flecha do tempo que observamos localmente é estarmos imersos em um universo em expansão (GOLD, 1962, 1967). Para Gold⁵⁰

“The asymmetry in all statistical processes is found to be related to the tendency for radiation to diverge and that in turn is related to the expansion of the universe. No asymmetry is contained in the laws of electrodynamics, and the choice of the retarded potentials is not a time unsymmetrical step.” (GOLD, 1962, p.403)

Fica claro que Gold pretende relacionar fortemente a irreversibilidade local dos fenômenos com as propriedades globais do universo. Porém há uma dificuldade fundamental em todos esses argumentos que sucumbe a ausência de uma descrição termodinâmica da gravitação.

Como bem observado por Gold, a orientação temporal de um sistema físico é sempre estabelecida em sua relação com um sistema maior. Em particular, a segunda lei da termodinâmica não proíbe o decréscimo da entropia de um sistema físico desde que haja um acréscimo compensatório de modo que a entropia total, considerando o sistema em conjunção com o ambiente no qual ele está imerso, não diminua.

Contudo, na cosmologia não há sistema externo ao qual possamos nos referir. Mais importante ainda, o comportamento termodinâmico da matéria depende das propriedades geométricas do espaço-tempo, mas não temos uma formulação consistente da termodinâmica da interação gravitacional. A segunda lei da termodinâmica estabelece uma regra para o sistema completo, mas os campos de matérias são apenas um subsistema do universo. Para garantirmos que a segunda lei da termodinâmica seja válida em cosmologia precisamos de uma noção consistente de entropia associada ao espaço-tempo.

temperatura, conseqüentemente o aumento da entropia, é acompanhado por um desvio para o vermelho do espectro como um todo; há assim uma correspondência direta entre o sentido temporal indicado pelo aumento da entropia – sentido termodinâmico – e o desvio para o vermelho observado das galáxias. ”

⁵⁰ “A assimetria em todos os processos estatísticos termina por ser associada a tendência da radiação divergir e isso por sua vez é associado a expansão do universo. Nenhuma assimetria está contida nas leis da eletrodinâmica, e a escolha do potencial retardado não é um passo de assimetria temporal.”

2 TEORIAS, REALISMO CIENTÍFICO E OBSERVAÇÃO EM COSMOLOGIA

Toda ciência natural almeja estudar o mundo a partir de fenômenos e dos entes que participam dessas relações. A biologia, por exemplo, estuda os seres vivos, os classifica, caracteriza as etapas evolutivas de cada indivíduo ao longo de sua vida, suas partes constitutivas, suas relações com outros seres vivos, com o ambiente onde vive e inclusive suas mutações ao longo da história. A física, tomada muitas vezes como modelo de ciência natural, preocupa-se com os fenômenos da matéria inanimada, com o comportamento dos objetos no espaço e no tempo, suas possíveis relações e mutações de acordo com regras gerais (leis naturais) e com a composição primária da matéria.

Cada ramo das ciências naturais possui suas especificidades e seu objeto de estudo. Os métodos de estudo e critérios de avaliação de cada uma dessas áreas podem ser diferentes. A determinação de uma espécie de ser vivo não segue os mesmos preceitos que a descoberta de uma nova partícula elementar.

O que nos permite designar tanto a biologia quanto a física de ciência natural é uma questão delicada a qual nos demanda uma especificação do que é ciência e dos limites entre ciência e não-ciência. Não é garantido, inclusive, que haja uma demarcação clara entre o que nós chamamos de ciências naturais e outras áreas do conhecimento. Seria possível tal demarcação caso a ciência pudesse ser definida através de sua prática, ou seja, caso houvesse um único método científico capaz de dar conta de todas as etapas do processo de produção de conhecimento científico. Se assim fosse, bastaria analisar se uma determinada prática segue ou não os preceitos deste método para qualificá-la como científica ou não-científica. No entanto, como discutiremos ao longo deste capítulo, a ciência não se submete a uma estrutura tão simples.

O estatuto científico da cosmologia é tema recorrente nos textos de meados do século 20. Mais do que isso, a aceitação pela comunidade científica da cosmologia como ciência natural só acontece nas últimas décadas do século passado. O comportamento da comunidade científica nos mostra que mesmo sem um critério ou definição clara do que é ou não ciência, os físicos efetivamente julgam e rotulam o que é ou não válido.

Hoje em dia, há uma ampla aceitação da influência de fatores sociológicos e históricos neste processo de escolha de teorias científicas. Existe uma série de fatores que atuam simultaneamente para o andamento e desfecho das discussões. Além de fatores internos a ciência, a parcela da sociedade que influencia o rumo da ciência é composta por cientistas e

não-cientistas, além de ser culturalmente e geopoliticamente heterogênea.

O objetivo deste capítulo é revisar alguns tópicos da filosofia da ciência que nos serão úteis no entendimento da evolução do caráter científico da cosmologia ao longo do século 20. Em particular, estamos interessados na relação dos dados empíricos com as proposições das teorias. Como será argumentado no capítulo seguinte, um dos pontos centrais na construção do atual modelo padrão da cosmologia foi a evolução da técnica e precisão das medidas dos satélites e telescópios. É inegável que o aumento de dados observacionais sobre o universo tenha contribuído para a aceitação da cosmologia como área das ciências naturais. Porém, o simples acúmulo de dados não é suficiente para o estabelecimento de um cenário consistente sobre o universo.

Por fim, abordaremos a questão do realismo científico para o caso particular da cosmologia. O modelo padrão da cosmologia descreve a existência de dois componentes escuros que são essenciais para a coerência dos dados observacionais. Entretanto, esses componentes escuros nunca foram observados em experimentos de laboratório. Como devemos entender o caráter ontológico destes componentes escuros? Seriam eles apenas entidades teóricas ou entes da natureza? A necessidade do modelo padrão em postular a existência destes entes arruína a sua coerência interna? Teria a cosmologia abandonado o princípio de falseabilidade popperiano como critério de cientificidade?

Abordaremos a base empírica das teorias científicas a partir de uma análise sobre o desenvolvimento e dificuldades do empirismo lógico. Esta antiga corrente de pensamento teve duas mudanças significativas. Durante os séculos 17 e 18, desenvolveu-se uma crítica aguçada culminando nas reflexões de Hume sobre a capacidade de acesso ao mundo externo. E, já na primeira metade do século 20, o grupo de pessoas relacionadas ao movimento denominado empirismo lógico, pretendeu retomar estas ideias visando o abandono da metafísica e uma profunda transformação da sociedade. Para nossa análise, o ponto de maior interesse é a sobrecarga nos dados empíricos como pilar de nosso conhecimento do mundo. Pelos motivos que serão expostos na próxima seção, este projeto ambicioso acabou por ser largamente abandonado⁵¹ devido a dificuldades epistemológicas e de implementação do projeto.

⁵¹ Vale ressaltar que mesmo com o declínio do interesse no positivismo lógico, há ainda hoje propostas interessantes que buscam fugir de suas dificuldades mas mantendo a tradição empirista como a de Bas van Fraassen.

2.1 Base empírica do conhecimento científico

Após a primeira guerra mundial, durante as décadas de 20 e 30 do século passado, um movimento que ficou conhecido como positivismo lógico colocou-se como uma das fortes linhas de pensamento filosófico deste período a qual influenciou significativamente nossa visão de ciência ao longo dos últimos cem anos. O termo positivismo surgiu com o filósofo francês Auguste Comte que o utilizou por considerar atrativo e remeter a valores que para ele eram importantes como as noções de utilidade e certeza. No entanto, o positivismo lógico não deve ser entendido como uma continuação das ideias de Comte. É mais apropriado conectarmos as ideias desse movimento com as ideias da tradição empirista advinda de John Locke, George Berkeley e David Hume. Também não é correto achar que não tenha havido contribuições importantes em consonância com ideias empiristas durante o século 19.

O físico e filósofo austríaco Ernst Mach, por exemplo, pode ser considerado um empirista no sentido de atribuir à experiência a origem do conhecimento. Em uma de suas contribuições mais importantes para ciência, e fundamental para física, Mach revisou a antiga discussão entre Newton e Leibniz sobre a natureza da inércia propondo que a única visão coerente do movimento se dá no escopo de uma mecânica relacional. Nesta concepção, só faz sentido definir o movimento dos corpos a partir de suas relações e o posicionamento relativo entre eles. O intuito de Mach era abdicar da necessidade do espaço absoluto Newtoniano em prol de uma visão puramente relacional. Para isso, Mach atribui a inércia dos corpos materiais à sua relação com todos os outros corpos existentes no universo. Essa discussão foi fundamental para a construção da teoria da relatividade geral. Um desdobramento histórico interessante é o fato dos positivistas lógicos terem sido fortemente influenciados por avanços na lógica e na física, em particular, pelos trabalhos de Einstein. De toda forma, como mencionamos acima, a veia empirista dos positivistas lógicos busca retomar a tradição ligada a Hume.

O trabalho de Hume sobre a origem do conhecimento humano apresenta-se como um desdobramento dos trabalhos de Locke e Berkeley. Por certa perspectiva, podemos entender o trabalho de Hume como um desdobramento do movimento iniciado originalmente por Locke.

O trabalho mais influente de Locke, *Essay Concerning Human Understanding*, foi publicado em 1687 no qual ele desenvolve, dentre outras ideias, sua visão de como o ser humano adquiriu conhecimento através da experiência. Sua descrição opõe-se à visão

racionalista de ideias inatas. Para Locke o ser humano nasce sem estrutura⁵², e ao interagir com o mundo sua mente ganha acúmulo de conhecimento. Embora aceite argumentos sobre a existência de Deus, Locke não valoriza discursos e considerações metafísicas. Sua filosofia é considerada por muitos como fundadora do empirismo por apresentar uma das ideias centrais desta linha de pensamento. O empirismo pode ser resumido como a doutrina na qual todo conhecimento humano advém da experiência. O argumento de Locke segue da proposição de que nossas ideias são derivadas de duas fontes: sensação e reflexão. Daí, como todo pensamento se vale de ideias, não haveria como termos conhecimento prévio a experiências. Ademais, haveria dois tipos de qualidades. As qualidades primárias seriam inerentes aos corpos como a extensão, o movimento, ou o repouso, enquanto que as qualidades secundárias seriam dadas a partir da relação e, por conseguinte, estariam apenas em quem as percebe como seria o caso das cores e dos cheiros.

George Berkeley irá se opor a esta descrição de qualidades. De fato, Berkeley opõe-se a teoria de conhecimento de Locke ao discordar de sua distinção entre qualidades primárias e secundárias. Seu raciocínio o leva a questionar a existência independente da matéria. Para Berkeley, os objetos só existem quando percebidos. Esta é uma afirmação radical a qual requer amplo suporte argumentativo. Porém, Berkeley inverte a situação ao afirmar que Deus percebe o mundo a todo instante garantindo assim a permanência dos objetos. Ao invés de fragilizar sua teoria do conhecimento, Berkeley entende que a necessidade de observação para a existência dos objetos afirma a existência de Deus. Com relação ao conhecimento humano, Berkeley pretende mostrar que toda realidade é apenas mental. Porém, talvez seja mais correto entender sua argumentação como mostrando que a percepção humana apreende apenas qualidades e estas sim são sempre ligadas a quem as percebe.

David Hume prolonga o movimento originado por Locke e continuado por Berkeley. Hume, com um ceticismo apurado, leva o questionamento da origem do conhecimento humano às últimas consequências. Enquanto Berkeley abandona a noção de objeto material, Hume leva o questionamento para o campo psicológico. Em sua investigação, Hume descreve tentar entrar em contato com o seu Eu sem sucesso. A cada passo, ao invés de encontrar vestígios do Eu, Hume afirma só identificar percepções. Há assim um abandono da crença na existência da mente. O que resta são apenas percepções as quais não servem para sustentar nenhuma existência nem mesmo a relação causal entre os fenômenos. Essa visão coloca as sensações sempre entre o eu e o mundo. Ela cria uma dificuldade por questionar a

⁵² No livro 2 do *Essay Concerning Human Understanding*, Capítulo 1, seção 2 J. Locke usa a expressão papel em branco: "...the mind to have no ideas in it, to be like white paper with nothing written on it..."

possibilidade, caso ela exista, de acesso direto ao mundo.

Outro questionamento advindo das críticas de Hume, e crucial para a epistemologia, é a validade das generalizações feitas através de argumentos indutivos⁵³. Na seção *Of Knowledge and Probability* do seu *Treatise of Human Nature*, Hume discute sobre quais as razões para confiarmos em argumentos que vão além de procedimentos dedutivos. Por exemplo, coloca-se em questão qual seria a confiabilidade em usar fenômenos do passado para fazer previsões para o futuro.

Com efeito, toda relação causal do tipo A causa B é esvaziada de sentido. Hume argumenta que não há nada em um objeto A capaz de produzir B, pois A restringe-se as ideias que nós formamos deste objeto. O que podemos afirmar é que há uma conjunção A-B, ou seja, sempre que observamos A também observamos B. Inclusive, esta conjunção surge exclusivamente da experiência. Não é possível seguir nenhum raciocínio dedutivo para concluir tal conjunção. Com este raciocínio, Hume identifica serem argumentos indutivos os sustentáculos das relações causais dos fenômenos naturais. E a dificuldade surge pela ineficiência da experiência em provar a validade de tais argumentos indutivos.

O ceticismo de Hume segue por uma estrada sem saída. Embora seja correto interpretar que Hume continuou o movimento de Locke e Berkeley, suas conclusões são efetivamente incapazes de oferecer condições de continuidade na mesma linha de pensamento. Todavia, o movimento que surge na primeira metade do século 20 pretende retomar as ideias centrais deste empirismo setecentista. O entusiasmo no sucesso de suas aspirações advém dos desdobramentos em lógica e ciência na virada deste mesmo século. Os empiristas lógicos acreditavam que a filosofia da linguagem seria capaz de fornecer as ferramentas necessárias para suplantarem os problemas do empirismo clássico ou no mínimo mostrar que as questões não resolvidas são na realidade falsos problemas e como tal não podem possuir solução, ou seja, elas devem ser abandonadas.

O positivismo lógico é identificado com um grupo de pessoas inicialmente liderado por Moritz Schlick e Otto Neurath com sede em Viena, Áustria. Este grupo de pessoas ficou conhecido como o círculo de Viena e suas aspirações transbordam as questões filosóficas. O projeto avançado pelo círculo de Viena almejava uma transformação profunda da sociedade. Entretanto, iremos nos ater apenas aos aspectos que dizem respeito à filosofia da ciência e ao funcionamento propriamente dito da ciência.

⁵³ Indução aqui distingue-se do tipo de prova usada na matemática. Uma prova por indução na matemática usa argumentos dedutivos enquanto que indução no contexto pontuado significa ir além do conteúdo das proposições iniciais.

Vale lembrar que o movimento optou, por sugestão de Rudolf Carnap, por mudar o nome de positivismo lógico para empirismo lógico. Essa transição ocorreu efetivamente depois da segunda guerra mundial embora já tenha sido proposta durante a década de 30. Além disso, ao longo das décadas, devido, sobretudo, a críticas profundas e ao novo contexto político em que o movimento veio a se inserir⁵⁴, sua formulação suavizou-se consideravelmente. Para não entrar em detalhes sobre os períodos específicos do movimento, iremos utilizar o termo empirismo lógico como referência a todo o movimento incluindo seu início mais rígido.

Após o impasse gerado pela conceituação de Hume, Immanuel Kant produziu uma filosofia intermediária a qual oferece uma via alternativa. Enquanto o racionalismo estruturava-se na possibilidade de conhecimento por pensamento, sem advir da experiência, o empirismo ancora-se no oposto. Kant digere ambas as concepções e formula uma proposta onde o pensamento requer estruturas inatas, porém também se desenvolve ancorado na experiência. Contudo, após a morte de Kant, o idealismo ganha força, sobretudo na figura de Georg Hegel. O empirismo lógico apresenta aspirações iluministas e opõe-se em geral a toda forma de pensamento místico ou romântico. O empirismo lógico opunha-se a todas as formas de idealismo e, em particular, Hegel e Heidegger são dois exemplos cujos trabalhos não são considerados e às vezes até mesmo depreciados por este movimento.

Uma das características marcantes do empirismo lógico é a sua valorização da linguagem lógica como ferramenta para a formalização do conhecimento. Dois pontos importantes do uso da linguagem feito por este movimento são de um lado a distinção entre sentenças analíticas e sentenças sintéticas e de outro sua teoria do conhecimento calcada na noção de verificacionismo. Ambos os pontos estão relacionados ao uso que fazemos de nossas experiências para produzir conhecimento e assim se relacionam com o problema da indução.

Bertrand Russel atualiza o problema da indução colocado por Hume em seu trabalho *On Induction* (RUSSEL, 1959). A questão que se coloca é a partir de uma sequência de fatos, dos quais somos capazes de extrair certa regularidade ou repetição, quais são os fundamentos que nos garantem que um determinado comportamento seja mantido no futuro. A anedota usada por Russell é a de um grupo de galinhas que são alimentadas por uma pessoa todos os dias. Dia após dia, as galinhas são alimentadas com a chegada desta pessoa até que em um belo dia, ao invés de alimentá-las, as galinhas são mortas pela mesma pessoa. Russell satiriza

⁵⁴ Uma das características do movimento era sua aspiração de internacionalização e em geral seus participantes comungavam com ideias democráticas e liberais. Dado o contexto da Áustria e Alemanha na década de 30 e durante a segunda guerra, seus participantes foram forçados a fugirem para outros países e muitos foram para os Estados Unidos da América onde o contexto sociopolítico era bem diferente.

dizendo que um refinamento adequado da uniformidade da natureza teria sido útil para as falecidas galinhas. A crença na uniformidade da natureza significa acreditar que tudo que já ocorreu ou que ocorrerá é uma manifestação de uma lei geral da qual não há exceções. Note que isto não implica que haja determinismo completo e irrestrito, tolhendo assim a liberdade. A afirmação é da validade incondicional da lei geral. Russel define o princípio da indução pelas proposições⁵⁵

(a) Quanto maior o número de casos nos quais uma coisa do tipo A foi encontrada associada com uma coisa do tipo B, mais provável será (se nenhum caso de fracasso de associação for conhecido) que A seja sempre associado com B;

(b) Sob as mesmas circunstâncias, um número suficiente de casos de associações de A com B fará quase certo que A seja sempre associado com B, e fará esta lei geral aproximar-se da certeza sem limites.

Duas ressalvas importantes feitas por Russell baseiam-se no uso da probabilidade no princípio de indução. A probabilidade, quando estabelecida, é sempre baseada e dependente dos dados a que ela se refere. No caso em questão, os dados são A e B. A inclusão de novos dados pode alterar significativamente a probabilidade associada ao princípio da indução. O outro ponto é a incapacidade tanto de provar quanto de refutar esta formulação do princípio de indução a partir da experiência. Uma ocorrência de B dado a ocorrência de A não é capaz de provar o princípio. De maneira contrária, a ausência de B dado A ou a presença de B sem que A tenha ocorrido não refuta o princípio de indução como enunciado.

Independente de haver ou não fundamentos racionais para embasar o princípio da indução, nós o utilizamos recorrentemente em nossa vida cotidiana. Ademais, como afirmado pelo próprio Russell, os princípios gerais da ciência e a crença de que todo evento possui uma causa dependem crucialmente do princípio de indução⁵⁶.

No caso dos empiristas lógicos o problema da indução produz sérias dificuldades em alguns de seus argumentos fundamentais, como na distinção entre sentenças analíticas e sintéticas e na teoria verificacionista do significado.

O uso da nomenclatura na separação entre sentenças analíticas e sentenças sintéticas

⁵⁵ Definições extraídas de (RUSSEL, 1959, p. 67).

⁵⁶ A lógica indutiva se distingue da lógica dedutiva ainda sobre outro ponto crucial. Nelson Goodman interpreta o argumento de Hume sobre o problema da lógica indutiva como sendo a impossibilidade de justificar nossa prática inferencial. Porém, para este autor, esta impossibilidade também ocorre para a lógica dedutiva na validação de suas regras lógicas de inferência. Goodman salienta um novo dilema ("new riddle of induction") associado à lógica indutiva (GOODMAN, 1983, c.3). Uma teoria puramente formal de indução não é capaz de dar conta do problema da validação de teorias a partir de inferências, pois a validade da construção de leis gerais a partir de sentenças verificadas (processo de generalização) não se encontra na estrutura analítica das sentenças, mas depende crucialmente da escolha adequada de seus predicados.

foi introduzido por Kant embora esta distinção seja mais antiga e remonte pelo menos a distinção feita por Leibniz entre verdades de razão e verdades de fato⁵⁷.

Uma sentença analítica é uma sentença cuja veracidade ou falsidade depende apenas do significado⁵⁸ de seus termos. O exemplo usual de uma sentença analítica é *todos os solteiros são não casados*. A veracidade ou falsidade de uma sentença analítica deve decorrer necessariamente. Já uma sentença sintética é uma sentença que necessita de confirmação de fatos. O valor de verdade de uma sentença sintética depende do significado de seus termos e das condições existentes no mundo. Como exemplo podemos dizer *todas as árvores têm fruto*. A veracidade desta afirmação tem que ser checada na natureza e em particular esta é falsa, pois as gimnospermas são árvores sem fruto como os pinheiros.

Seguindo esta visão, os empiristas lógicos propuseram que a matemática e a lógica fossem entendidas como um conjunto de sentenças analíticas. Embora os resultados da matemática, como por exemplo, os teoremas e lemas, não sejam evidentes, caso decompuséssemos em passos suficientemente pequenos, cada etapa do desenvolvimento da matemática seria evidente ao contrário de surpreendente. Esta interpretação possibilita aos empiristas lógicos afirmar que a matemática e a lógica são apenas uma linguagem útil na descrição do mundo, mas não trazem em si nenhuma informação nova ligada à experiência.

Com relação à ciência, e aceitando que haja tal distinção, o conhecimento adquirido através dos experimentos não pode ser simplesmente analítico. Sentenças analíticas são passíveis de provas dedutíveis as quais estabelecem a sua veracidade independente da experiência com o mundo. Se a ciência pudesse ser colocada apenas em sentenças analíticas então seríamos capazes de excluir a necessidade de experimentação para construção do nosso conhecimento científico. Logo, deve necessariamente haver sentenças sintéticas na descrição científica. Ademais, o método dedutivo não deve ser capaz de exaurir a prática da ciência. Precisamos necessariamente introduzir métodos indutivos⁵⁹.

O outro ponto fulcral para os empiristas lógicos é a teoria verificacionista do

⁵⁷ Leibniz argumenta que verdades de razão são aquelas que são verdade em todos os mundos possíveis e por conseguinte são proposições cuja negação é autocontraditória.

⁵⁸ Não deve-se confundir significado com nomeação. Como bem esclarecido pela filosofia analítica, é sempre possível usar termos com significados distintos para nomear uma mesma coisa. Um exemplo citado por Gottlob Frege é a referência ao planeta Vênus (FREGE, 1948). Vênus é denominado tanto de estrela matutina quanto de estrela vespertina por em certas épocas do ano surgir respectivamente logo antes do nascer do Sol ou logo após do pôr do Sol. Ambas expressões nomeiam Vênus porém possuem significados distintos.

⁵⁹ Métodos indutivos são entendidos em seu sentido mais amplo e em oposição a métodos dedutivos. Todo método que não é dedutivo inclui-se aqui na gama de métodos indutivos.

significado. Esta teoria pretende dar conta justamente das sentenças sintéticas. O princípio de verificabilidade foi formulado de diversas formas e cada formulação não foi amplamente aceita por todos empiristas lógicos. Porém, há uma ideia básica por detrás de todas as formulações que reside em atribuir significado apenas a sentenças que são passíveis de verificação. Esta verificação não pressupõe necessariamente uma confirmação, ao contrário, entende-se verificação aqui como um teste passível de ser realizado mesmo que apenas em princípio e não necessariamente de fato. Decorre desta formulação que as sentenças sintéticas que não podem ser testadas não carregam consigo significado algum.

Uma versão fortemente restritiva deste princípio propunha que todas as sentenças sintéticas contendo significado deveriam poder ser traduzidas em sentenças que se referem diretamente às observações por uso de nossos sentidos. Willard V. O. Quine alude a esta ideia em *Two Dogmas of Empiricism* (QUINE, 1951) como o dogma do reducionismo empirista, ou seja, a crença que toda sentença com significado é equivalente a algum construto lógico sobre termos os quais se referem a experiências imediatas. A argumentação de Quine desdobra o problema de analiticidade em um problema acerca dos significados e posteriormente em uma questão sobre a noção de sinônimo. A analiticidade sustenta-se sobre a noção de significado dos termos que por sua vez apoia-se na noção de sinônimos. Porém Quine pondera que⁶⁰

“Given this supposition, it next seems reasonable that in some statements the factual component should be null; and these are the analytic statements. But, for all its a priori reasonableness, a boundary between analytic and synthetic statements simply has not been drawn.” (QUINE, 1951, p.36)

e mais adiante continua⁶¹

“In the course of these somber reflections we have taken a dim view first of the notion of meaning, then of the notion of cognitive synonymy, and finally of the notion of analyticity. But what, it may be asked, of the verification theory of meaning? [...]The verification theory of meaning, which has been conspicuous in the literature from Peirce onward, is that the meaning of a statement is the method of empirically confirming or infirming it.” (QUINE, 1951, p.37)

Enquanto Hume analisa o significado de cada termo, os empiristas lógicos, através da teoria verificacionista do significado, pretendem atribuir valor de verdade (confirmação) ou falsidade (refutação) a sentenças sintéticas por uso de métodos empíricos.

⁶⁰ “Dada esta suposição, segue parecer razoável que em algumas sentenças o componente factual esteja ausente; e estas são as sentenças analíticas. Porém, por todas as suas razoabilidades a priori, a fronteira entre sentenças analíticas e sentenças sintéticas foi simplesmente impossível de ser delineada.”

⁶¹ “Ao longo destas reflexões sombrias, nós assumimos uma postura de desconfiança sobre a noção de significado, depois da noção de sinônimo cognitivo e finalmente da noção de analiticidade. Mas e quanto, pode-se perguntar, sobre a teoria verificacionista do significado? [...]A teoria verificacionista do significado, a qual é evidente na literatura desde Peirce em diante, é que o significado de uma sentença é o método empírico de sua confirmação ou fracasso.”

Os empiristas lógicos reconheceram que não funciona tentar atribuir valor de verdade para termos individualmente, mas é preciso analisar toda a estrutura de uma sentença. Contudo, em suas propostas ainda persiste um tipo de reducionismo radical no qual é assumido ser possível traduzir sentenças sintéticas à experiência imediata e assim atribuir a elas um valor de verdade ou falsidade⁶².

O trabalho de Quine amplia esta crítica da unidade constitutiva de significado da teoria verificacionista argumentando que nem mesmo sentenças são passíveis de análise isoladamente. O teste empírico de sentenças sintéticas só é bem formulado se referido a todo o arcabouço teórico no qual a sentença está inserida.

A experiência testa todas as sentenças científicas simultaneamente. Caso um experimento retorne um valor de falsidade, a coleção completa de todas as sentenças da teoria sendo testada é colocada em cheque. Evidentemente, um resultado negativo de um experimento não arruína simultaneamente todas as sentenças de uma teoria. Entretanto, o oposto também não é verdade. Não podemos a princípio atribuir necessariamente a falha a nenhuma sentença específica. Com o resultado negativo, o valor de verdade de cada uma das sentenças do arcabouço científico tem que ser reavaliado e pelo menos uma sentença deve absorver o valor de falsidade.

Porém, pode-se redistribuir a falha a mais de uma sentença ao invés de a uma única. Com efeito, a reavaliação dos valores de verdade de cada sentença deve ser feita de modo a acordar com os experimentos. Mas há uma escolha a ser tomada. O experimento não define qual sentença perderá o seu valor de verdade. O teste experimental em ciência tem caráter holístico no sentido de testar simultaneamente toda ciência e não individualmente cada uma de suas sentenças sintéticas.

Esta descrição do caráter holístico da relação entre proposições teóricas e experimento já havia sido formulada de outra forma por Pierre Duhem (DUHEM, 1993) e é reconhecida e citada pelo próprio Quine em seu trabalho. Por isso, esta formulação ficou conhecida como a tese Duhem-Quine sobre a impossibilidade de testar isoladamente qualquer sentença (hipótese) científica.

O trabalho de Quine gerou um efeito profundo no programa lógico empirista. A proposta do uso de teorias de linguagem para compreensão da ciência foi amplamente

⁶² Esta visão de reducionismo radical, embora presente nos primeiros trabalhos dos empiristas lógicos acabou sendo abandonada por ser muito extrema. Há inclusive menção direta a impossibilidade de empiricamente testar sentenças isoladas nos trabalhos, por exemplo, de Carnap, Feigl e Ayer. Mesmo assim, há entendimento na literatura de que os empiristas lógicos, apesar de aceitarem esta visão, não compreenderam todo seu alcance e relevância havendo sempre um resquício de possibilidade de testar sentenças nas novas formulações da teoria verificacionista de significado.

abandonada. Isto não significa que a tradição empirista tenha sucumbido ao desuso. Uma nova formulação mais branda foi desenvolvida por Bas Van Fraassen a qual se coloca como um empirismo construtivista (VANFRAASSEN, 1980). A formulação de Van Fraassen abdica de sustentar-se em teorias de linguagem ou psicológicas, mas desenvolve uma proposta antirrealista onde o objetivo da ciência reduz-se a meramente adequar-se aos experimentos. De toda forma, uma proposta alternativa aos empiristas lógicos, sugerida por Karl Popper, ganhou força ao mesmo tempo em que o empirismo enfraquecia-se, dentre outros motivos, por ter sido muito bem aceita pela comunidade científica. Popper opõe-se aos empiristas lógicos ao renunciar a proposta verificacionista por um critério de falseabilidade das hipóteses científicas.

Embora o falseacionismo de Popper sofra com dificuldades internas e externas, considero correto afirmar que parte deste programa foi completamente absorvida pela comunidade científica. É bem verdade que em geral os cientistas não conhecem profundamente o programa de Popper e acabam por fazer uma miscelânea epistemológica em suas visões de ciência - o que é típico na inconsistência filosófica dos cientistas. De toda forma, uma das ideias de ciência mais difundidas hoje em dia pela própria comunidade científica assemelha-se bastante a proposta falseacionista de Popper.

2.2 Verificacionismo versus falseacionismo

Karl Popper nasceu e viveu sua juventude em Viena e teve contato com o Círculo de Viena, embora não tenha feito parte desse grupo. Durante sua carreira, Popper fez inúmeras declarações de posicionamento contrário as ideias dos empiristas lógicos e, apesar de poder ser considerado um empirista devido ao seu ceticismo à lógica indutiva, talvez a maior contribuição de Popper à filosofia da ciência, a saber, a ideia de atrelar cientificidade com tomada de risco (ou exposição), deu-se em contraposição as ideias verificacionistas dos empiristas lógicos.

Como é de conhecimento, a questão seminal para Popper foi como seria possível separar ciência de pseudociência. Não é exagero considerar que toda filosofia da ciência de Popper seja de certa forma um desdobramento sobre, como o próprio autor denominou, a demarcação entre ciência e pseudociência. O intuito original de Popper não era construir uma

teoria sobre o conhecimento científico, mas entender o que há de tão especial na ciência⁶³. Popper buscou delinear quais são as características que fazem uma hipótese ou uma teoria ser ou não científica.

O senso comum acredita que o diferencial da ciência seja sua base sólida em dados observacionais. Contudo, Popper percebeu que não é a existência de dados empíricos que fornece o caráter singular das ciências. O fato de basear-se em dados observacionais é uma condição apenas necessária, mas não suficiente para tomarmos como critério de cientificidade. Para argumentar a ineficiência dos dados empíricos como critério de cientificidade Popper usou três teorias em voga na época. Para Popper, as teorias de Marx e Freud não devem ser consideradas científicas enquanto que a teoria da Relatividade de Einstein é um exemplo paradigmático de ciência⁶⁴.

Tanto o marxismo quanto a psicanálise freudiana são a princípio fortemente atrelados a dados empíricos. Ambas as teorias pretendem descrever o que observamos, porém, como argumenta Popper, elas o fazem de uma forma que é impossível que os dados empíricos as contradigam. Por sua vez, a formulação da teoria da relatividade geral apresenta propostas concretas de testes observacionais onde se almeja colocar a teoria a teste no sentido da observação ser capaz de binarizar de maneira excludente o seu valor de verdade em verdadeiro ou falso.

Para Popper, a relação que a relatividade geral constrói com seus dados observacionais é distinta da relação que o marxismo ou a psicanálise mantém com suas observações. Estas duas últimas funcionam como visões de mundo ao invés de teorias descritivas de modo que os dados observacionais sempre podem ser interpretados a partir de seus arcabouços teóricos. Entretanto, elas são mais do que simplesmente linguagens descritivas, pois são responsáveis por uma leitura causal dos acontecimentos.

Já a teoria da relatividade geral é uma teoria descritiva de fenômenos naturais. Sua força, segundo Popper, reside em sua disposição de risco perante os dados experimentais. Com sua teoria, Einstein foi capaz de explicar o efeito de avanço do periélio do planeta Mercúrio, mas também fez previsões sobre o desvio da trajetória da luz ao passar perto do

⁶³ Infelizmente não teremos a possibilidade de cobrir todos os desdobramentos da filosofia da ciência ao longo do século 20 e com isso não poderemos seguir as substanciadas críticas feitas por Kuhn, Feyerabend, Latour, dentre outros. A expressão usada no texto é uma menção ao mote de Paul Feyerabend “What’s so great about science?”.

⁶⁴ O uso por Popper da teoria da relatividade como exemplar de ciência é um dos pontos de contato entre este filósofo e os empiristas lógicos. Ian Hacking salienta com sobriedade que para haver uma forte discordância em pontos específicos, como acontece entre Popper e os empiristas lógicos, é necessário que haja um amplo substrato de concordância para sustentar a rivalidade e o engajamento do debate.

Sol. O avanço do periélio de Mercúrio não é uma previsão da teoria, mas fortalece a aceitação da relatividade, pois se apresenta como uma solução de um problema em aberto na dinâmica do sistema solar. Por sua vez, o efeito em si e o valor do desvio da luz pelo Sol configuram uma previsão teórica a qual se mostrou válida pelas observações do eclipse solar de 1919.

Segundo Popper, o grau de cientificidade de uma teoria pode ser medido através do quanto a teoria expõe-se aos resultados experimentais. Teorias associadas a dados observacionais, mas que sempre são capazes de acomodar qualquer gama de resultados, são na realidade pseudocientíficas. Esse tipo de teoria não pode ser colocado em cheque através de dados empíricos.

A solução oferecida por Popper para o problema de separar as teorias em científicas e pseudocientíficas baseia-se no que ele denominou de falseacionismo. Uma teoria ou hipótese é considerada científica caso ela possa ser falseada pelos dados empíricos. Assim, cientificidade está diretamente relacionado à capacidade do teste empírico em falsear a proposição. Este talvez seja o ponto mais forte de oposição entre Popper e os empiristas lógicos. Popper é um cético convicto da impossibilidade de uma formulação consistente da lógica indutiva. Embora ambos proponham um papel central na ciência para o teste com base nos dados empíricos, os empiristas lógicos buscavam mecanismos de confirmação enquanto para Popper o uso dos dados serve apenas para descartar teorias. Há um movimento inverso entre estas duas propostas. Os empiristas lógicos partem dos dados e com o uso da indução pretendem confirmar as teorias. De maneira oposta, Popper almeja criar uma lógica dedutiva na qual as teorias façam previsões e as quais possam ser testadas em experimentos.

O falseacionismo de Popper sustenta-se no uso da lógica dedutiva para descartar teorias que estejam em desacordo com os dados. Porém, é justamente a ineficiência da lógica dedutiva em descartar teorias ou hipóteses a causa do enfraquecimento do programa de Popper para o funcionamento da ciência. O falseacionismo surgiu com a tentativa de Popper em meramente descrever como a ciência funciona de fato, entretanto, outro lado do falseacionismo é seu caráter normativo ao estabelecer o que deve ou não ser considerado como ciência. O título do livro de Popper é autoexplicativo. Em *Conjectures and Refutations* estabelece-se o mecanismo de funcionamento da ciência em duas etapas. Primeiramente é oferecido um quadro descritivo sobre o mundo (em geral a descrição refere-se apenas a uma parte ou visão simplificada do mundo). A partir deste arcabouço conceitual desenvolve-se através da lógica dedutiva uma série de previsões experimentais. A segunda etapa do processo dá-se no teste das hipóteses conceituais. Os dados experimentais são usados para validar ou falsear as previsões feitas anteriormente. Caso seja falseada, a teoria ou hipótese é descartada

e faz-se necessário criar um novo quadro descritivo do mundo (retorna-se a etapa 1). Caso as previsões mostrem-se verdadeiras, então a visão de mundo permanece e cria-se um laço interno na etapa 2 onde novos experimentos são propostas para uma nova rodada de testes da teoria. A segunda etapa da prática da ciência centra-se na tentativa de refutar a teoria ou suas hipóteses. Popper nutre ainda mais esta ideia dizendo que qualquer teste realizado em ciência é sempre uma tentativa de refutação de alguma teoria ou hipótese.

Como já mencionamos acima, Popper era avesso ao indutivismo. Ele considerava a possibilidade de confirmação um mito e não acreditava que as teorias pudessem emergir dos dados empíricos. Com efeito, a ascensão do nível dos dados empíricos para o nível teórico ou generalização de casos particulares (experimentos) para afirmações universais (leis causais) são movimentos baseados na lógica indutiva. Com esta postura consistente perante os dados empíricos, Popper coloca-se em algumas dificuldades. Se não da experiência, de onde se originam as teorias e as hipóteses científicas?

Não há a princípio uma norma de proposição ou formulação de conjecturas. Em certo sentido, não interessa a origem de uma conjectura desde que ela seja passível de ser testada e exposta a falseabilidade. A racionalidade da ciência não advém da formulação da conjectura, mas do exame sistemático de seu valor de verdade pelo teste do falseacionismo.

Uma vez que uma teoria ou hipótese for falseada, em princípio, sua reformulação é livre e arbitrária. A única conduta que Popper renega à prática científica é a tentativa de acomodação dos dados empíricos através de reformulações construídas especificamente com este intuito. É vedado ao cientista criar hipóteses para remendar a teoria aos dados empíricos. Esta atitude é considerada anticientífica. Todo cientista deve buscar testar suas hipóteses de maneira franca e desapaixonada. Ademais, o cientista deve ser capaz de abandonar qualquer hipótese que tenha sido falseada. O comportamento do indivíduo torna-se quase que esquizofrênico. A primeira etapa requer do cientista a formulação sincera de uma descrição do mundo enquanto que ao entrar no laboratório, o mesmo cientista passe a duvidar e a buscar incessantemente mostrar a falsidade do que ele mesmo propôs anteriormente.

Evidentemente, como a ciência é uma prática comunitária, poder-se-ia dividir as tarefas de cada uma das etapas da conjectura e refutação. Qual seria a vantagem para a ciência se o teste de uma dada hipótese fosse feito por seu formulador ou por outro cientista qualquer? De fato, o que observamos na comunidade científica é mais próximo de grupos com ideias rivais buscando pela supremacia de suas propostas do que a atitude desapaixonada caricaturada por Popper.

Outra ressalva importante sobre o critério de demarcação entre ciência e pseudociência

diz respeito a quem se atribui o predicado científico. Popper pretendia classificar uma teoria ou uma hipótese, em suma, um quadro conceitual de científico a partir da possibilidade de falseamento através dos dados empíricos. Contudo, não podemos atribuir ao quadro conceitual a sua disposição de ser colocado a teste, pois é o manuseio e o uso dos quadros conceituais por parte das comunidades específicas da área de conhecimento que o torna passível ou imune a seu falseamento. O Marxismo, por exemplo, não é científico nem pseudocientífico. Há formulações das ideias de Marx que são passíveis de refutação enquanto que outras são imunes a dados empíricos. Este ponto não deve ser confundido com a tese de Duhem-Quine sobre a propriedade holística dos testes experimentais. Embora, o falseacionismo também seja abalado por esta tese, o denominativo científico não se conecta a teorias ou hipóteses, mas deve ser associado ao comportamento, a postura e uso do quadro conceitual. A cientificidade está na abordagem utilizada e não nas ideias formuladas.

O falseacionismo é amplamente aceito e reivindicado pela comunidade científica como critério de cientificidade. Todavia, a tese popperiana sobre a demarcação entre ciência e pseudociência através de um processo hipotético-dedutivo de conjecturas e refutações sofre de sérios problemas epistemológicos que acabam por degradar toda a estrutura filosófica. O escrutínio minucioso do processo de conjecturas e refutação proposto por Popper torna evidente a necessidade invariável de dois tipos distintos de tomada de decisão irracional. É importante ressaltar que a irracionalidade dessas etapas decisórias só é imperiosa a partir da lógica popperiana onde se pretende uso exclusivo da lógica dedutiva e fundamentação nos dados empíricos para sustentar a racionalidade da ciência.

Para Popper o objetivo supremo da ciência é a busca pela verdade sobre a natureza. No entanto, o seu ceticismo sobre a lógica indutiva o força negar a possibilidade de termos certeza sobre o quanto perto estamos deste fim. Nem mesmo se tivéssemos a teoria perfeita e verdadeira sobre a natureza não teríamos como saber, pois o fato de não falseá-la não implica em confirmá-la. Há uma assimetria lógica entre falseabilidade e verificabilidade. O verificacionismo pretende mostrar o valor de verdade de uma sentença. Os empiristas lógicos acreditam poder atribuir o valor de verdade ou falsidade. Por outro lado, o falseacionismo afirma ser impossível atribuir o valor de verdadeiro a qualquer sentença, teoria ou hipótese. A única possibilidade lógica é a falsificação. Podemos concluir que uma teoria é falsa, mas jamais que ela é verdadeira. No entanto, Popper concede a incapacidade da lógica impor forçosamente o abandono de uma teoria ou hipótese. A tese de Duhem-Quine demonstra ser impossível testar individualmente qualquer hipótese de modo que o peso da refutação não recaia impreterivelmente sobre qualquer hipótese particular. Falsear torna-se uma questão de

decisão.

Primeiramente é preciso aceitar o relatório observacional. O resultado experimental é construído e não temos como ter certeza absoluta de sua lisura⁶⁵. O próprio relatório observacional pode ser colocado à prova seguindo os preceitos de conjectura e refutação o que nos indica que o relatório em si é parte do arcabouço teórico e não puramente experimental. O compromisso em negar a possibilidade de conhecimento por indução leva Popper a reconhecer que em última análise aceitar o resultado do relatório observacional é uma decisão que não pode ser provada pela lógica.

O segundo ramo associado a esta decisão advém da escolha sobre a qual hipótese ou teoria devemos atribuir o erro preditivo. O resultado negativo do relatório observacional pode ser anexado a qualquer uma das hipóteses existentes. Evidentemente a escolha da anomalia gera uma perturbação que é propagada para outras hipóteses. Isto ocorre pois a modificação de parte da estrutura conceitual exige uma adequação em todo o seunexo causal e descritivo. Outro ponto importante sobre a escolha desta reestruturação conceitual são os compromissos envolvidos na prática científica. Embora seja verdade que um resultado experimental negativo não impinja a escolha da modificação teórica, é necessário que a reformulação seja compatível com os resultados experimentais, mas sobretudo que ela seja baseada nos dados empíricos. Ademais, como mencionamos acima, a própria reestruturação conceitual pode e deve ser passível de teste.

Até este ponto, a demarcação entre ciência e pseudociência ainda permanece válida, pois há uma distinção no processo decisório. Enquanto a ciência baseia-se em pareceres observacionais, a pseudociência nunca é passível de refutação pelos experimentos. A crítica à pseudociência percorre outros critérios que não os empíricos.

A consistência da postura filosófica de Popper produz duas outras dificuldades, a saber, o critério de escolha de uma teoria científica e a concepção de teorias científicas probabilísticas. Ambas as questões parecem ser obstáculos intransponíveis para a tese popperiana devido a rejeição à lógica indutiva e à ideia de confirmação.

O falseacionismo tem sérias dificuldades com teorias cujas previsões são probabilísticas. No sentido estrito do conceito de falseabilidade, teorias probabilísticas devem ser entendidas como pseudociências, pois não afirmam condições proibitivas. A capacidade de falsear uma teoria está diretamente relacionada com a exposição ao risco de suas previsões

⁶⁵ O embasamento deste ponto requer uma longa argumentação mas que não será tratada aqui para mantermos uma linha de raciocínio do texto. A construção do relatório observacional adentra questões tanto de cunho indutivo por demandar como dados podem gerar conhecimento teórico como também a possibilidade de produzirmos um experimento limpo de qualquer tipo de teoria ou conceituação teórica.

estarem erradas. As leis causais das teorias científicas podem ser entendidas como regras proibitivas do comportamento da natureza. Com esta leitura, a falseabilidade requer a existência de regras proibitivas nas teorias científicas e os testes experimentais, ao tentar falsear suas hipóteses, buscam mostrar a violação dessas proibições.

Teorias probabilísticas não são proibitivas⁶⁶. Suas afirmações são sempre válidas estatisticamente. Neste tipo de teoria, um resultado pode ser improvável, mas isto não implica que ele não possa ocorrer. A saída proposta por Popper é delegar aos cientistas decidirem quando a probabilidade é pequena o suficiente para a improbabilidade de um resultado ser entendido como uma impossibilidade. A falseabilidade de teorias probabilísticas necessita da decisão da comunidade científica em qualificar um resultado improvável em proibitivo.

Este é um tipo distinto de decisão ao caso do relatório observacional, mas ambos enfraquecem fortemente tanto o critério de demarcação quanto a ideia de falseabilidade ou teste de teorias científicas. A inclusão dessas duas etapas decisórias no processo de conjecturas e refutações torna a lógica dedutiva ineficiente como mecanismo de falseabilidade. Por fim iremos brevemente colocar o problema da escolha da teoria científica no contexto da tese popperiana.

As reflexões de Hume revelam a dificuldade em estabelecer uma relação causal entre fenômenos de uma mesma conjunção A-B. Esta argumentação coloca em xeque a validade das leis causais da ciência e em particular salienta a irracionalidade do uso de experiências passadas para prever fenômenos futuros. Seguindo este raciocínio, Popper nega-se a atribuir a dados observacionais a capacidade de fornecer qualquer tipo de evidência de confirmação de teorias ou hipóteses⁶⁷. Não importando o número de vezes que uma dada teoria tenha passado pelos testes observacionais não temos nenhuma garantia que ela vá funcionar novamente no futuro. Há uma diferença qualitativa entre teorias que passaram o teste observacional e teorias que foram falseadas, mas quaisquer duas teorias ainda não-falseadas são equivalentes e estão em pé de igualdade com teorias que não tenham nem mesmo sido testadas uma única vez.

Se diante do fato de ainda não ter sido falseada uma teoria ou hipótese não adquire nenhum predicado novo, como impõe o abandono da lógica indutiva ou do conceito de confirmação de teorias, então, em princípio, não há motivo algum para utilizarmos em nosso

⁶⁶ Teorias probabilísticas podem conter regras proibitivas as quais são falseáveis em princípio. Contudo, são as previsões probabilísticas que configuram estas teorias. Com relação a estas previsões, as teorias probabilísticas não são proibitivas.

⁶⁷ Na tentativa de lidar com este problema, Popper desenvolve um conceito de corroboração. Uma teoria é corroborada pelos dados experimentais quando não é falseada, mas em última análise esta ideia de corroboração de Popper ainda impossibilita qualquer tipo de validação ou confirmação da teoria. Desta forma, nos parece que esta tentativa de Popper não consegue modificar a sua dificuldade na escolha de teorias científicas.

dia a dia uma teoria cientificamente bem estabelecida⁶⁸ de uma que nunca tenha sido testada. Popper é um cético radical quanto à confiabilidade de uma teoria científica. Uma teoria ou hipótese é falsa ou apenas ainda não-falseada mas não há nenhum grau de verificação ou confiança dentre as teorias ainda não-falseadas. Esta postura gera um impasse na escolha da teoria científica a ser adotada para qualquer finalidade futura, seja ela prática, como na construção de um avião, ou na descrição fundamental da natureza.

A ideia mais profícua de Popper certamente é a associação do conceito de científico com a exposição ao risco dos testes experimentais. Contudo, sem algum tipo de mecanismo de indução a prática científica parece perder sua racionalidade.

2.3 Realismo científico

Há dois temas centrais relacionados às ciências naturais que por um lado diz respeito à sua racionalidade enquanto campo de conhecimento e, por outro, à sua capacidade em acessar e descrever adequadamente o mundo natural.

Uma questão crucial para a ciência é a relação entre teoria e dados experimentais e a possibilidade de fundamentação das proposições científicas a partir da experiência. Embora as teorias científicas devam acordar com os resultados experimentais, a construção das teorias tendo os dados como sua única fonte de conhecimento não se sustenta, pois faz-se necessário um passo indutivo para produzir conhecimento a partir dos dados empíricos brutos. Dito de outra forma, a ciência não é capaz de funcionar apenas a partir da lógica dedutiva. Este ponto é uma questão epistemológica do funcionamento da ciência. Por outro lado, podemos nos questionar sobre o estatuto ontológico das entidades teóricas, i.e., qual a relação entre os entes teóricos e as coisas do mundo. Nesta perspectiva buscamos entender como as teorias científicas conectam-se com o mundo e em que grau a ciência pode funcionar como argumento para a defesa de uma postura realista.

Nosso interesse principal é tentar entender como podemos interpretar os resultados científicos e controlar o grau de confiança que podemos ter em suas teorias. Em particular, a cosmologia utiliza-se de técnicas puramente observacionais devido a incontornável

⁶⁸ Os critérios para determinar qual teoria deve ser considerada como bem estabelecida estão intimamente ligados a própria questão de cientificidade como formulada por Popper. Contudo, nosso uso do termo não é circular, pois entendemos uma teoria bem estabelecida como sendo aquela elegida pela comunidade científica como a mais adequada para descrever os fenômenos naturais.

incapacidade de manipular o seu objeto de estudo. A rigor, não há experiências em cosmologia, mas apenas observação dos fenômenos cosmológicos. Coletamos dados observacionais sem a possibilidade de interagirmos ou manipularmos o sistema natural estudado. Nesta situação, torna-se inevitável o questionamento sobre o grau de confiança que podemos ter sobre nosso modelo descritivo do universo.

Vale lembrar que o atual modelo padrão da cosmologia propõe a existência de componentes nunca observados nos laboratórios terrestres. O chamado setor escuro, representado pela energia escura e pela matéria escura, possui propriedades específicas quanto à interação gravitacional, porém, ademais, suas características nos são, até o presente momento, inacessíveis. Isto significa que sua existência e necessidade se dão exclusivamente dentro do contexto do modelo padrão da cosmologia.

Ora, se o arcabouço teórico e a prática científica da cosmologia forem capazes de acessar o mundo natural, então a cosmologia parece nos impingir a existência da matéria escura e da energia escura. Entretanto, precisamos estabelecer qual o grau de confiança que podemos atribuir às proposições da cosmologia. Devemos tentar entender como uma teoria científica nos permite, caso seja possível, argumentar a favor de uma perspectiva realista sobre seus entes teóricos.

A visão disseminada em nossa sociedade atual é que a ciência tem como um de seus objetivos principais estudar, descrever e conhecer a natureza. Subentende-se nesta afirmação que há uma natureza externa e passível de ser conhecida por nós seres humanos. Pois o realismo científico está intimamente ligado a esta postura sobre a natureza.

Há mais de um tipo de realismo científico. O realismo de teorias, por exemplo, afirma que uma dada teoria é verdadeira ou falsa independentemente do nosso conhecimento do mundo. Por outro lado, o realismo de entidades afirma que os entes teóricos, como o fóton ou o elétron, existem independentes de termos a teoria correta para descrevê-los. Todavia, o elo comum a todos os tipos de realismo é a afirmação de que algo existe de fato e independente da nossa interferência ou nível de conhecimento sobre a natureza. Em oposição ao realismo encontramos a postura cética dos antirrealistas. Antirrealista de entidades, em particular, nega a existência dos entes das teorias científicas os quais considera apenas como ficção ou construto útil na descrição dos fenômenos naturais.

É importante ressaltar que a postura realista ou antirrealista se dá objeto a objeto e não precisa ser entendida como uma visão global sobre a ciência. Em geral, um ente teórico é definido dentro do arcabouço de uma determinada teoria. Com efeito, a noção de fóton é constituída apenas dentro da teoria científica que descreve os seus fenômenos. Entretanto, não

se deve tomar por isso que sua existência dependa da veracidade da teoria que o descreve. É consistente uma postura que seja antirrealista em relação às teorias, porém realista com relação aos entes teóricos. Uma teoria pode ser falha e com isso imperfeita na descrição dos entes da natureza, mas capaz de identificar e destacar corretamente algum ente natural. A aceitação da existência de um ente não pressupõe o conhecimento integral e perfeito de suas características e propriedades.

Outra observação válida diz respeito à descrença em algum ente particular. O questionamento da existência de um ente teórico não impossibilita o estabelecimento de uma postura realista de entidades. É possível questionar a existência de um ente particular, por exemplo, devido a não aceitação do procedimento usado em um determinado experimento ou da invalidação na interpretação dos dados experimentais. Neste caso, a pessoa aceita a existência de entes teóricos, porém não reconhece um caso particular da prática científica. Esta situação é distinta da afirmação de que nem todo ente teórico é real. Em geral, uma teoria funciona com entes reais que possuem existência ontológica e entidades úteis para a descrição dos fenômenos. Não somos forçados a atribuir caráter de existência a todas as entidades de uma dada teoria. Pode ser o caso de apenas uma subclasse existir enquanto que os restantes são incluídos para estruturar o arcabouço teórico. A título de exemplo, em algumas interpretações da mecânica quântica, como a interpretação de Copenhague, a função de onda não possui caráter ontológico, mas presta-se apenas a descrever o estado do sistema quântico e possibilitar o cálculo das probabilidades dos resultados experimentais.

Em contrapartida, uma postura realista carrega consigo requerimentos de consistência. A existência de entes teóricos implica na sua capacidade de causar efeitos uns sobre os outros. Desta maneira torna-se razoável que os entes teóricos sejam os responsáveis causais pelos fenômenos naturais. Evidentemente, os entes não precisam ser a única origem das causas dos fenômenos. A física Aristotélica constitui-se com quatro tipos distintos de causas, a saber, material, formal, eficiente e final. Na visão Aristotélica, os entes possuem poder causal, porém as causas dos fenômenos naturais não se esgotam neles. Não obstante, encontramos posturas filosóficas como a de Nancy Cartwright onde a existência de um ente teórico pode ser estabelecida justamente por seu poder causal, ou seja, podemos afirmar que uma partícula existe, pois ela é capaz de gerar efeitos específicos em outros objetos. Cartwright advoga pela realidade das causas e não pela realidade das leis científicas⁶⁹

⁶⁹ “Eu sou a favor de causas e contrária a leis. Eu acredito que, dada a maneira pela qual funcionam as teorias modernas da física matemática, faz sentido apenas acreditar em suas afirmações causais e não em suas leis explicativas.”

“I am in favour of causes and opposed to laws. I think that, given the way modern theories of mathematical physics work, it makes sense only to believe their causal claims and not their explanatory laws.” (CARTWRIGHT, 1983, p.74)

Nesta perspectiva, o poder causal dos entes teóricos é suficiente para estabelecer sua existência⁷⁰

“Their arguments [from Van Fraassen and Duhem] are persuasive. But I think that Van Fraassen and Duhem eliminate more than they should. It is apparent from earlier essays that I share their anti-realism about theoretical laws. On the other hand, I believe in theoretical entities, and that is my topic in this essay. Arguments against inference to the best explanation do not work against the explanations that theoretical entities provide. These are causal explanations, and inference from effect to cause is legitimate.” (CARTWRIGHT, 1983, p.89)

De toda forma, apesar da força deste tipo de argumento, a defesa da existência de entes teóricos através de seu poder causal necessita uma análise cuidadosa sobre o processo de aquisição de dados experimentais. Mas, antes de nos atermos a este ponto, gostaríamos de mencionar algumas dificuldades da postura realista de teorias.

O livro mais famoso de Thomas S. Kuhn é sem dúvida *A Estrutura das Revoluções Científicas* (KUHN, 1962). O título escolhido para esta obra refere-se ao modo de funcionamento da ciência. Apesar disto, este trabalho faz parte e tem um papel de destaque em uma revolução de fundo que ocorreu na filosofia da ciência. Embora a ideia não possa ser atribuída como original a Kuhn, há neste trabalho um argumento pela necessidade de historicizar o processo de análise do funcionamento da ciência. A revolução de fundo que nos referimos advém da inclusão de uma análise histórica como condição para o entendimento da ciência.

A contextualização histórica da dinâmica científica trouxe a reboque uma crise de sua racionalidade e também um aumento de filiados à postura antirrealista. Em particular, o realismo científico de teorias foi questionado a partir de uma análise do processo de abandono e substituição de teorias. Paul Feyerabend e Thomas Kuhn introduziram o conceito de incomensurabilidade para designar a descontinuidade inerente a toda substituição de uma teoria preterida por outra nova teoria científica. Apesar de o termo incomensurável poder assumir significados diferentes⁷¹, o ponto fulcral é que a inevitável mudança de visão de

⁷⁰ “Seus argumentos [os de Van Fraassen e Duhem] são persuasivos. Porém eu penso que Van Fraassen e Duhem eliminam mais do que deveriam. É evidente de meus trabalhos anteriores que eu compartilho seus antirrealismos sobre leis teóricas. Por outro lado, eu acredito em entidades teóricas e este é o meu assunto deste ensaio. Argumentos contra a inferência à melhor explicação não funcionam contra as explicações provenientes de entes teóricos. Estas são explicações causais e a inferência a partir dos efeitos às causais é legítimo.”

⁷¹ Ian Hacking aponta três significados de incomensurabilidade em *Representing and Intervening* (HACKING, 1983). Incomensurabilidade por dissociação o qual representa uma incapacidade de acesso e de entendimento de um arcabouço conceitual, devido ao longo período de tempo e/ou a uma larga distância cultural que nos separa da sociedade na qual tal teoria, prática ou conhecimento estava imerso. A incomensurabilidade de tópicos para designar o abandono e mudança de tópicos abordados por teorias distintas fazendo com que não possamos dizer

mundo atrelada à troca de teoria científica dá-se de maneira descontínua e com isso perde-se a noção tanto de avanço quanto de acúmulo de conhecimento na descrição da natureza.

A incomensurabilidade é um obstáculo árduo na defesa de um realismo de teorias, mas pouco eficaz contra o realismo de entidades. Isto ocorrer devido ao argumento oferecido anteriormente no qual o realismo de entidades não requer uma adequada teoria que descreva e contemple todas as propriedades do ente existente. Todavia, não avançaremos mais sobre realismo de teorias, pois desejamos explorar a possibilidade de usufruir de experimentos para argumentar a favor da existência de entes teóricos.

O realismo de entidades proposto por Ian Hacking fundamenta-se na prática laboratorial dos experimentos científicos. De modo similar a Cartwright, Hacking⁷² argumenta: “Reality has to do with causation and our notions of reality are formed from our abilities to change the world.” (HACKING, 1983, p.146).

A habilidade de mudar o mundo traduz-se em nossa capacidade de intervir na natureza alterando e moldando o mundo a nossa vontade. Mas a realidade pode vir também no sentido contrário. A realidade de algo pode advir justamente do seu poder de nos afetar e assim é o mundo constringendo nossa existência.

Uma visão particular de ciência entende que os fenômenos naturais são passivamente observados. Os cientistas seriam apenas habilidosos o suficiente para coletar adequadamente os dados dos fenômenos que ocorrem na natureza e uma extrapolação ordinária alega que as teorias científicas organizam e sistematizam esses dados experimentais. Esta visão sofre de pelo menos duas críticas além das questões sobre indução já discutidas anteriormente. A primeira é a subordinação do experimento à teoria como se o papel do experimento fosse apenas comprovar ou questionar as teorias científicas. Há nesta visão uma forte assimetria entre experimento e teoria sendo esta última privilegiada frente ao outro. O segundo ponto é a noção implícita da ausência do experimentador ao longo do processo. O experimento é visto como independente do cientista e entendido como apenas uma consulta à natureza.

O filósofo do século 16, Francis Bacon foi um forte defensor do papel crucial do experimento no desenvolvimento da ciência. Para Bacon a ciência constitui-se de uma aliança entre a faculdade racional (teoria) e a experimental (experimento). A potência da ciência

que uma teoria é mais bem sucedida do que a outra no que diz respeito a descrição e entendimento da natureza. E por último a incomensurabilidade por significado que refere-se a impossibilidade de compararmos termos científicos imersos em teorias distintas. Argumenta-se que o significado de cada termo científico dá-se dentro de sua teoria específica de forma que mesmo que usemos o mesmo significante o significado é necessariamente diferente.

⁷² “Realidade tem a ver com causação e nossas noções de realidade são formadas pela nossa habilidade de mudar o mundo.”

reside em conseguir combinar estas duas faculdades de maneira produtiva. Desta forma, subjugar o experimento em defesa de uma valorização da teoria significa fatalmente enfraquecer todo o funcionamento da ciência. Entretanto, o ponto mais importante da visão de Bacon reside no ato da observação. A experiência científica deve ser um ato incisivo para trazer à tona camadas veladas da natureza. A Bacon é atribuída a expressão ‘twist the lion’s tail’ como referência a atitude que o cientista deve ter ao projetar o seu experimento. Além de audacioso, o cientista deve extrair do experimento informações que não estavam previamente à disposição. A reação da natureza ao experimento é fundamental para produzir conhecimento.

No seu texto *Novum Organum Scientiarum* (novo instrumento da ciência) de 1620, Francis Bacon classifica o que ele chama de instâncias prerrogativas as quais servem para decodificar as causas eficientes da natureza. As instâncias não são meros fenômenos que podem ser experimentados pelo senso comum, mas representam inferências passíveis de fornecer conhecimento sobre a qualidade das coisas. Um exemplo de instância prerrogativa de Bacon são as *instantiae crucis* o qual posteriormente ficou conhecido como experimentum crucis (ou em português experimento crucial). As *instantiae crucis* correspondem a uma situação de encruzilhada onde um experimento é capaz de mudar o rumo da ciência⁷³. O ponto que nos é importante na listagem de Bacon é uma característica compartilhada por todas as *instantiae crucis*, a saber, estes são fenômenos especiais dignos de catalogação e observação detalhada. Nem todo experimento ou fenômeno é de importância para a ciência.

Hacking faz distinção entre experimentar e observar⁷⁴ os fenômenos naturais (HACKING, 1983, cap.10). Na realidade, Hacking está interessado em algo mais relevante do que uma simples observação. Ele denomina uma observação digna de nota (“Noteworthy observation”) um fenômeno que chame a atenção de um cientista ou estudioso por denotar um comportamento atípico da natureza. Nota-se aqui que uma observação ganha valor a partir de uma dada expectativa de comportamento da natureza. Esta expectativa poderia ser entendida

⁷³ A tese Quine-Duhem argumenta para uma visão holística da validade de um resultado experimental. Neste caso não faz sentido em propor experimentos capazes de definir univocamente o rumo da ciência. O que Bacon argumenta é que em alguns casos há experimentos decisivos porém esta não precisa ser uma regra geral. De toda forma, a história da ciência nos mostra que os cientistas acabam por escolher experimentos cruciais para contar sobre a evolução da ciência. Embora a real motivação de uma escolha específica de teoria não possa simplesmente fundamentar-se em dados experimentais, nos parece inevitável considerar que há de fato experimentos cujo poder persuasivo é forte o suficiente para mudar os rumos da ciência.

⁷⁴ Note que o termo observação está sendo usado nesta seção de maneira diferente do que empregamos em cosmologia. Em cosmologia designamos a prática de coleta de dados de observação pela incapacidade de manuseio do sistema natural sendo estudado. Esta oposição se dá com relação aos experimentos que são práticas laboratoriais onde o controle das condições de contorno dos experimentos é possível.

com uma conceituação prévia dos fenômenos naturais e por conseguinte seria uma forma de validar a ideia de que não há observação sem uso de teorias. Este último desdobramento do raciocínio é equivocado pois o que é exigido é que haja uma expectativa de comportamento e não uma conceituação formal abstrata. A expectativa pode ser constituída da vivência das regularidades dos fenômenos naturais sem que haja uma estrutura formal explicativa.

A noção de que a teoria é condição prévia para todo e qualquer experimento pode ser encapsulada na expressão dos experimentos serem *impregnados por teorias*⁷⁵ (“theory-laden”). Se tomada como fraseado no parágrafo acima, esta expressão é quase trivial, mas correta⁷⁶. Porém, na expressão *impregnado por teorias*, em geral, o termo teoria designa um arcabouço formal abstrato. Neste sentido, as observações dignas de nota não são carregadas de teorias, pois representam apenas regularidades atípicas e interessantes do ponto de vista do acúmulo de experiências do observador.

Um experimento, na nomenclatura do Hacking, ao contrário de uma observação, é um procedimento custoso e elaborado. As observações dignas de nota são importantes fontes para iniciar um estudo ou linha de pesquisa, contudo, a pesquisa experimental propriamente dita começa com a montagem de um experimento. Esta elaboração requer etapas de planejamento, montagem dos equipamentos, calibração e ajustes para garantir o controle necessário para a extração dos dados. É evidente que no processo de montagem de um experimento, o conhecimento do comportamento da natureza é essencial. Sem o adequado domínio do comportamento das partes de um experimento, o controle da coleta de dados torna-se ineficaz.

Não é incomum um cientista experimental conhecer profundamente as teorias que regem os fenômenos de seus experimentos. Mas isso não significa que seja necessário o domínio teórico como condição prévia da experimentação. É bem verdade que é necessário de antemão muita teoria para construir um experimento. E caso cada objeto só possuísse funcionalidade para a qual tenha sido construído, então seria razoável argumentarmos que todo experimento é carregado de teoria. Mas a criatividade combinada com a racionalidade humana é capaz de utilizar um objeto de maneiras não imaginadas por seus construtores. A aplicação de um instrumento em uma nova funcionalidade não está limitada a nenhum

⁷⁵ Nem toda escola filosófica admite que um experimento seja carregado de teoria. Ao contrário, os positivistas por exemplo argumentam em uma clara distinção entre teoria e experimento. A posição antirrealista de Van Fraassen depende da possibilidade da experiência estar desconectada da teoria pois este filósofo afirma que os fenômenos são os únicos sinais de realidade enquanto que as teorias não dizem respeito a nenhuma realidade.

⁷⁶ Feyerabend defende a impossibilidade de separação entre teoria e experimento baseado na análise dos relatórios experimentais. Porém esta crítica foca no discurso descritivo do experimento. Neste sentido, o próprio relatório já é em si uma teorização do experimento. O que o estudo de Feyerabend nos mostra é que a realidade de entidades baseada na experiência não pode sustentar-se sobre os relatórios mas sim focar integralmente no manuseio e interação do experimentador com o aparato experimental.

conhecimento prévio de teoria.

Um dos conceitos mais preciosos para Hacking é a noção de criação de fenômenos. Hacking argumenta que um determinado fenômeno, como o efeito Hall, possui a peculiaridade de ter sido inventado pelo estudo em laboratório (HACKING, 1983, p.224). A natureza permite que tal fenômeno ocorra, porém isto não garante a sua existência prévia ao desenvolvido laboratorial. A construção de um experimento é dentre outras coisas a montagem de uma situação artificial que raramente pode ser encontrada casuisticamente na natureza. Por isso, os resultados e efeitos gerados em tais condições não devem ser esperados ocorrer frequentemente na natureza⁷⁷.

Novamente surge um posicionamento a favor da importância da interferência do experimentador no laboratório. A existência dos entes dá-se em um ambiente de controle e condições atípicas. Esta construção de realidade advém do contato e manuseio extenso do cientista com o sistema. É justamente baseado nesta visão de realismo de entidades que Hacking argumenta por um antirrealismo de entidades astronômicas.

2.4 Antirrealismo astrofísico

Hacking se declara⁷⁸ um realista de entidades embora seja um antirrealista de teorias.

“I take a somewhat Duhemian view of theories, holding them to be possible representations that are not, and perhaps could not be, literally and exactly true. But I am realistic about certain unobservable entities.” (HACKING, 1989, p.560)

Embora toda a sua argumentação por um antirrealismo de teoria seja extremamente interessante, iremos nos ater a seu realismo de entidades o qual advém de uma leitura cuidadosa da prática experimental e do reconhecimento da independência dos experimentos com relação às teorias científicas. Para Hacking, o realismo científico deve ser fundamentado no fazer experimental e não na conceituação (falar teórico).

Um dos pontos centrais de sua argumentação é a possibilidade de utilizar entes

⁷⁷ A noção de criação dos fenômenos desloca-se em sentido contrário a visão na qual a natureza produz tudo que é potencialmente permitido. A concepção de situações atípicas nos laboratórios por definição limita a capacidade produtiva da natureza. Este ponto é importante quando houver uma aproximação do realismo de entidades com por exemplo a metafísica Darwinista na qual a produção de modificação dá-se espontaneamente e sem seleção a priori. As mutações são puramente aleatórias em essência.

⁷⁸ “Eu assumo uma visão sobre teorias próxima a de Duhem, considerando-as como possíveis representações que não são, e talvez não possam ser, literalmente e exatamente verdadeiras. Contudo eu sou um realista sobre certas entidades inobserváveis.”

teóricos, por exemplo, um elétron, como ferramenta de investigação da natureza. A nossa crença na realidade de um ente teórico deve fundamentar-se na nossa capacidade de construir aparatos experimentais com os quais podemos intervir e desvendar outros aspectos da natureza.

Richard Reiner e Robert Pierson identificam dois tipos distintos de argumentação usados por Hacking para defender o seu realismo de entidades (REINER, 1995). O primeiro baseia-se na observação de entes diminutos, porém observáveis com o uso adequado de instrumentos como o microscópio. Nesta situação, a realidade de um ente deve ser estabelecida em oposição a ser meramente um artifício do experimento. A reprodução de uma dada configuração visual obtida por meio de processos físicos completamente distintos é entendida como indicativa de sua realidade, pois caso contrário a reprodutibilidade em circunstâncias tão diversas manifestaria uma coincidência ininteligível⁷⁹.

O segundo argumento destina-se a entes que são inobserváveis em princípio (HACKING, 1983, p.262). Neste caso, a defesa da realidade desses entes advém da nossa capacidade de manipulá-los regularmente e produzir novos fenômenos na natureza. Hacking condensa sua ideia no slogan “If you can spray them then they are real” (HACKING, 1983, p.23). A base epistemológica do argumento de Hacking sustenta-se em associar realismo de entidades com nossa capacidade de controle e manipulação com a finalidade de uso posterior para intervir na natureza. O acesso a entidades inobserváveis através de sua manipulação laboratorial, caso não dependa da veracidade de nenhuma teoria, apresenta-se como um forte argumento para a realidade desses entes⁸⁰.

No final do seu livro *Representing and Intervening*, Hacking resume suas ideias com um argumento experimental em defesa de um realismo científico sobre entidades teóricas baseado no uso de seus poderes causais como parte integrante de aparatos científicos. Em particular, Hacking confessa certo ceticismo por objetos astrofísicos como os buracos negros por eles não serem observáveis. Para Hacking, estes objetos funcionam como poderes ocultos

⁷⁹ Hacking admite que seu argumento da coincidência possua uma estrutura de inferência, mas ele nega que este tipo de argumento compartilhe as características do realismo a partir da inferência da melhor explicação. Reiner e Pierson (REINER, 1995, p.64) concedem parcialmente esta posição a Hacking, pois consideram que seu argumento contém uma faceta explicativa para o estabelecimento da verdade, a qual está a mercê das mesmas críticas feitas aos argumentos baseados na inferência da melhor explicação.

⁸⁰ Reiner e Pierson argumentam que este acesso a entes inobserváveis só pode ocorrer através do funcionamento dos aparatos experimentais os quais dependem crucialmente da inferência da melhor explicação. Assim eles concluem: “If IBE [Inference to the Best Explanation] fails as a defense of realism, then Hacking's argument likewise fails; otherwise, his argument is largely unnecessary, since the other arguments for scientific realism suffice.”(REINER, 1995, p.68).

dos quais nossa representação do universo poderia eventualmente abdicar.

Em um artigo posterior intitulado *Extragalactic reality: the case of gravitational lensing* (HACKING, 1989), Hacking toma a oportunidade para desenvolver seu raciocínio sobre o caráter da astronomia enquanto ciência natural e pleiteia um antirrealismo modesto⁸¹ sobre esta área de investigação. Seu objetivo neste trabalho é analisar em detalhes o desenvolvimento da área de pesquisa que trata do fenômeno de lenteamento gravitacional.

O lenteamento gravitacional é um fenômeno astrofísico no qual a trajetória da luz é alterada pela presença de um objeto massivo. Em particular, o experimento que serviu como ponto de inflexão na aceitação da teoria da relatividade geral como boa descrição dos fenômenos gravitacionais, a saber, o desvio da trajetória da luz ao passar próximo do Sol, nada mais é do que um exemplo rudimentar de lenteamento gravitacional.

A escolha do lenteamento gravitacional como fenômeno de análise para o argumento antirrealista de Hacking advém, segundo o próprio autor, dos fundamentos físicos envolvidos neste fenômeno serem muito simples do ponto de vista teórico e, ao contrário de buracos negros, as localidades⁸² das lentes gravitacionais são em geral consideradas bem conhecidas pela comunidade científica⁸³. Ademais, para este autor, o lenteamento gravitacional parece ser um simples corolário de mais de uma teoria de gravitação. O objetivo de Hacking é então considerar uma situação na qual sua alegação antirrealista seja colocada a prova, ou seja, o lenteamento gravitacional seria uma situação na qual o objeto astrofísico é mais facilmente aceito como real do que outros objetos astrofísicos como buracos negros ou cordas cósmicas.

O raciocínio de Hacking segue um desenvolvimento histórico pontuando as opiniões de cientistas, como Einstein, Zwicky, Refstal e Wash, centrais na discussão da possibilidade de detecção de lentes gravitacionais⁸⁴. Em particular, Hacking enfatiza a evolução de tomada de confiança na detecção e determinação das lentes gravitacionais.

Sua narrativa começa com previsões teóricas e oscilações de entusiasmo entre cientistas sobre a possibilidade de detecção ou não do fenômeno de lenteamento gravitacional.

⁸¹ O termo antirrealismo modesto foi retirado do próprio artigo do Hacking embora ele não defina o que quer dizer com este adjetivo. Nossa interpretação é que Hacking não considera seu argumento forte o suficiente para proibir um realismo astrofísico embora acredite ser o caso da atual situação desta prática de investigação.

⁸² Em cosmologia a localização de um objeto astrofísico depende do modelo cosmológico considerado. O conhecimento da localização que mencionamos é a determinação das coordenadas na abóbada celeste que especifica uma direção no espaço e seu desvio para o vermelho que caracteriza o quanto distante o objeto deve estar da Terra.

⁸³ Vale ressaltar que posteriormente Hacking salienta que a identificação do objeto astrofísico que serve de lente gravitacional, em geral, não é imediato e em certos casos há apenas uma margem relativa de confiança.

⁸⁴ Lente gravitacional é o termo usado para o objeto astrofísico que produz o desvio na trajetória da luz.

Em seguida, Hacking reconstrói as primeiras detecções e a discussão da comunidade científica sobre a validação da observação e na determinação da lente gravitacional.

Hacking nos chama a atenção para a quantidade de hipóteses e o uso recursivo de modelos. Pessoalmente, ele acredita que a resolução das discussões entre astrônomos baseou-se na inferência da melhor explicação dos fenômenos. Isto significa que os astrônomos debatem sobre qual das hipóteses é a melhor, mas não se detêm sobre a relação entre a descrição e o sistema sendo representado. A inferência da melhor explicação pode ser útil na escolha de um modelo descritivo, mas não pode contribuir para uma defesa de realismo de entidades.

Por fim, Hacking lança dúvida na descrição científica das lentes gravitacionais pontuando três questões: o problema do número de imagens, a raridade de detecções das lentes gravitacionais e a possibilidade do efeito de micro-lenteamento ser capaz de camuflar e distorcer qualitativamente nossas observações astronômicas.

É previsto teoricamente que o fenômeno de lenteamento gravitacional pode gerar imagens múltiplas e este número deve ser um número ímpar de imagens de um mesmo objeto fonte (PETTERS, 2001). O argumento é de caráter topológico associado à geometria do fenômeno e, caso seja válido o regime linear dos efeitos gravitacionais, este resultado não deve depender da teoria de gravitação utilizada. Contudo, em geral, as observações detectam apenas números pares de imagens. Além disso, a raridade de lentes gravitacionais detectadas em experimentos é contrastada por Hacking com as estimativas otimistas de astrônomos. Somado a isto temos o uso regular de procedimentos estatísticos o qual sugere uma inadequação na modelagem astrofísica. Por último, a possibilidade de existir mini-lentes as quais por definição são pequenas demais para serem detectadas individualmente, leva Hacking a questionar se podemos confiar no que observamos⁸⁵

“More perturbing, in both senses of the word, is the possibility that minilenses are thoroughly distorting our view of distant objects[...] The chasm of uncertainty is yawning before us. In general there is no way that we are going to see the stars that are doing the conjectured lensing[...] But suppose most of this evolution [of quasars] is the consequence of passages of undetected stars, with consequent amplification changes without discernible splitting of images?[...] Suddenly we are battling seething mass of undetected and perhaps undetectable minilenses.” (HACKING, 1989, p.572).

⁸⁵ “Mais perturbador, nos dois sentidos da palavra, é a possibilidade que as minilentes estejam distorcendo completamente nossa visão dos objetos distantes[...] O abismo de incertezas está se abrindo diante de nós. Em geral, não há nenhuma possibilidade de vermos as estrelas que estão fazendo o lenteamento conjecturado[...] Porém suponha que grande parte desta evolução [dos quasares] seja a consequência da passagem de estrelas não-detectadas com as consequentes mudanças de amplificação sem a separação discernível de imagens?[...] De repente, estamos lutando contra uma efervescência de massas não-detectáveis e talvez indetectáveis de minilentes.”

Diante deste quadro, Hacking conclui invariavelmente pela impossibilidade de um realismo de entidades para a astronomia. Sem a possibilidade de intervenção sobre o sistema estudado, resta apenas o ancestral expediente de salvar os fenômenos⁸⁶

“There is one, and perhaps only one, branch of science where the tag ‘save the phenomena’ has a central place: astronomy and astrophysics[...] The technology of astronomy and astrophysics has changed radically since ancient times, but its method remains exactly the same. Observe the heavenly bodies. Construct models of the (macro)cosmos. Try to bring observations and models into line. In contrast: the methods of the natural sciences have undergone a profound transformation, chiefly in the seventeenth century. Or one might say: the natural sciences came into being then and thereafter, while astronomy is not a natural science at all. (The organization of many university faculties and departments reflects this.) The transition to the natural sciences was precisely the transition to the experimental method, to interference in nature, to the creation of new phenomena.” (HACKING, 1989, p.577).

Como ele mesmo expõe, o caso das lentes gravitacionais representa os objetos astrofísicos mais “palpáveis”⁸⁷ da astronomia. Assim, se não formos capazes de defender a existência desses objetos, não haverá esperança para sustentação da existência de nenhum outro ente astrofísico. Talvez mais preocupante ainda seja a exclusão da astronomia do grupo das ciências naturais. Embora haja um peso político em tal afirmação, não parece ser a questão de Hacking. Para melhor entender a proposta de Hacking faz-se, momentaneamente, expediente excluir as consequências sociopolíticas de tal postura com relação à astronomia. O ponto crucial é a capacidade da astronomia em fornecer uma visão de natureza, sobretudo sendo a área por excelência preocupada com a descrição da natureza em suas maiores escalas.

Nas últimas duas décadas, a astronomia, e em especial a cosmologia, produziu dentre os maiores desafios teóricos da ciência deste início de milênio. A aparente aceleração do universo e a insuficiência de matéria no modelo padrão da cosmologia demanda a inclusão de novos entes nunca observados nos laboratórios terrestres. Fica claro por sua narrativa que para Hacking estes são pseudoproblemas, pois não sendo ciência natural, a astronomia não é capaz de expor novas entidades ontológicas.

Entretanto, as conclusões sobre a astronomia e a realidade dos entes astrofísicos

⁸⁶ “Há um, e talvez apenas um, ramo da ciência onde a etiqueta ‘salvar os fenômenos’ tenha um papel central: na astronomia e na astrofísica[...] A tecnologia da astronomia e da astrofísica mudou radicalmente desde os tempos antigos, mas o seu método permaneceu exatamente o mesmo. Observar os corpos celestes. Construir modelos do (macro)cosmos. Tentar acordar observações e modelos. Em contraste: os métodos das ciências naturais sofreu uma transformação profunda, particularmente no século 17. Ou pode-se dizer: as ciências naturais surgiram neste momento e a partir de então, enquanto a astronomia não é de modo algum uma ciência natural. (A organização de muitas faculdades e departamentos de universidades reflete este ponto.) A transição para as ciências naturais foi precisamente a transição para o método experimental, para a intervenção na natureza, para a criação de novos fenômenos.”

⁸⁷ Evidentemente, os objetos astrofísicos não são palpáveis no sentido de podermos tocá-los com as nossas mãos. Usamos este termo para remeter a noção de que algo que podemos segurar, empurrar ou nos apoiar costuma ser aceito como real. Vale ressaltar que esta não é uma noção formal de existência, pois nossos sentidos sensoriais não podem ser usados como critério de existência (vide Berkeley, Hume, e outros positivistas).

pretendidas por Hacking nos parecem precipitadas demais. O primeiro ponto a ser salientado é que Hacking articula apenas um possível argumento para defender o realismo de entidades, a saber, a possibilidade de manipulação e intervenção na natureza com uso deste determinado ente a ser estabelecido como existente. Não há em nenhum momento de seu raciocínio a exposição da necessidade desta condição, ou seja, a manipulação e intervenção são condições suficientes, mas, em princípio, não necessárias para estabelecermos o realismo de entidades. É bem verdade que se esse for o único caminho para estabelecermos o realismo de entidades então os entes astrofísicos teriam que ser entendidos apenas como entes teóricos úteis para descrevermos os fenômenos. Mas há outras formas de avançar o realismo de entidades.

A identificação do poder causal de um ente teórico é outro caminho promissor como aponta Nancy Cartwright. Ao contrário do que Hacking parece sugerir, se nos ativermos apenas ao poder causal de um ente teórico podemos defender sua existência independentemente de nossa intervenção ou manuseio deste ente. Na astronomia, nos é vedada a possibilidade de intervenção e manuseio do sistema estudado, porém isto em si não exclui a possibilidade de fazermos uso dos entes teóricos para estudarmos outros sistemas da natureza. Desta forma, embora na astronomia parte das exigências que Hacking faz em sua defesa de um realismo de entidades nos seja negado, ainda subsiste a possibilidade de uso destes entes como ferramenta de investigação da natureza.

De maneira notória, a astronomia apresenta fortes limitadores quanto ao uso destes entes teóricos se compararmos a situação com os laboratórios terrestres. Todavia, nas últimas décadas a astronomia, mesmo com todas as suas limitações, apresentou à comunidade científica questões fundamentais sobre a natureza. Além desta colocação epistemológica, uma análise detalhada nos mostra que a argumentação de Hacking contra o realismo das lentes gravitacionais é débil do ponto de vista científico.

Todos os pontos relacionados à prática da astronomia contra o realismo das lentes gravitacionais levantados por Hacking em *Extragalactic Reality: the case of gravitational lenses* podem ser refutados. Alguns deles são desqualificados por uma simples análise da prática atual da astronomia. A suspeita colocada sobre o baixo número de detecção de lentes gravitacionais individuais (macro-lentes), que à época da publicação do artigo de Hacking correspondia à situação de desenvolvimento da área, mostrou-se ser apenas uma questão de desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de detecção. Hoje em dia, há um enorme número de lenteamentos gravitacionais detectados para baixos desvios para o vermelho⁸⁸ e

⁸⁸ O desvio para o vermelho é o parâmetro usado para ordenar os objetos astrofísicos em termos de distância da Terra. A faixa de maior número de lentes gravitacionais medidas encontra-se entre os valores de $0,1 < z < 0,4$ o

muitos deles com a especificação do objeto astrofísico que produz o fenômeno (a lente gravitacional). Além disso, as propriedades intrínsecas dos objetos astrofísicos (SHAPER, 1993; GOTT, 1981) e o efeito de lenteamento gravitacional podem em princípio ser distinguidos.

Em contrapartida, com relação às microlentes, cuja existência faz Hacking duvidar de nossa capacidade de entendimento dos dados observacionais, uma análise cuidadosa (PEACOCK, 1981) nos mostra que as possíveis distorções das características intrínsecas dos objetos astrofísicos devido às microlentes não detectadas devem ser pequenas o suficiente para não afetar as conclusões extraídas do nosso modelo cosmológico atual, a saber, o modelo Λ CDM cujo acrônimo significa um modelo com a inclusão do setor escuro dado pela constante cosmológica Λ e pela matéria escura fria. Ademais, o microlenteamento deixou o estatuto de fenômeno limitador e passou a ser entendido como oportunidade de análise da estrutura de galáxias (PACZYNSKI, 1991) e na busca de exoplanetas (MAO, 1991).

Em 1993 foi anunciada a primeira detecção de microlenteamento (ALCOCK, 1993; UDALSKI, 1993) trazendo definitivamente este fenômeno para o contexto de pesquisa e estudo do universo. Jutta Rockmann nos lembra de o próprio Hacking, ao discutir a questão de ver “com” o microscópio, ter argumentado que o critério de coincidência pode ser usado para defender a existência de um ente teórico (ROCKMANN, 1998). Da mesma forma que o lenteamento gravitacional pode produzir falsas imagens, nossos próprios sentidos, nos fenômenos cotidianos na Terra, também estão a mercê destas ilusões de ótica. O que nos permite afirmar a existência de um ente e negar que ele seja apenas um artifício do experimento é a permanência de suas características em processos físicos completamente distintos. Pois a diversidade de configurações e sistemas astrofísicos espalhados pelo universo é justamente o laboratório necessário para analisarmos se uma determinada classe de objetos astrofísicos se comporta da mesma maneira e pode assim ser identificado com um ente real.

O último ponto levantado por Hacking diz respeito ao número de imagens produzidas pelas lentes gravitacionais. É certo que a previsão teórica afirma que deveria haver sempre um número ímpar de imagens lenteadas. Porém a teoria de lentes gravitacionais também afirma que a intensidade de cada imagem varia de acordo com sua posição no plano da lente⁸⁹. Com efeito, é esperado que a intensidade de cada imagem varie e, ademais, imagens localizadas nas

que no modelo padrão da cosmologia equivale a distâncias entre 1,3 e 4,3 bilhões de anos-luz.

⁸⁹ Em escalas astronômicas, o caso de uma deflexão por apenas uma lente, o sistema que gera a deflexão pode ser aproximado por uma distribuição contida em um plano perpendicular a nossa linha de visada. Este plano é chamado de plano da lente.

regiões centrais do plano da lente podem sofrer com atenuações devido a absorção pela presença de matéria nesta região. Por isso, modelos mais completos das lentes gravitacionais preveem naturalmente a ausência de certas imagens resultando em um número par de imagens detectadas. Certos estudos propõem inclusive utilizar a posição teórica das imagens ausentes como dado de entrada para ajustar outros parâmetros do sistema (CAMINHA, 2013). Como no caso de microlenteamento, o que se entendia como limitação é transformado em ferramenta de investigação.

Embora as observações realizadas em astronomia sejam limitadas sobretudo pela impossibilidade de manuseio e intervenção no sistema sendo estudado, a identificação do poder causal dos agentes envolvidos nos fenômenos astronômicos fornecem a articulação adequada para reconhecermos os entes teóricos capazes de eventualmente atingir o estatuto de entidade ontológica. É inegável que, devido às suas peculiaridades, a astronomia necessita de atenção específica na análise dos sistemas estudados. Em particular, além de sua dependência com avanços da tecnologia apropriada para seus desenvolvimentos, algo que atualmente é demanda de qualquer área da ciência natural, a astronomia requer um estudo minucioso dos possíveis efeitos físicos que geram vieses nos dados observacionais. Os vieses na análise e interpretação dos dados podem advir de erros na calibração dos aparatos experimentais, mas também de um entendimento deficiente dos processos físicos envolvidos nos fenômenos naturais.

3 CONSTRUÇÃO DO MODELO PADRÃO DA COSMOLOGIA

O artigo publicado em 1917 por Albert Einstein (EINSTEIN, 1917) é comumente considerado como marco inicial da cosmologia moderna, porém demarcações abruptas e singulares são arbitrárias para caracterizar uma transição histórica. Um empreendimento das proporções da construção de um campo de pesquisa, neste caso a cosmologia, não se desenvolve a partir de uma única pessoa nem tão pouco com a publicação de um único artigo científico. O conhecimento humano se constrói socialmente e de maneira continuada. Porém, marcos delineadores, embora artificiais, são úteis para realçar modificações de diversas naturezas. Com efeito, a proposta de Einstein foi de fato inovadora e audaciosa. Por isso, seguiremos a tradição em aceitar a publicação do “Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie” como a primeira proposta moderna de programa científico voltada ao desenvolvimento de uma cosmologia.

Antes do advento da teoria da relatividade geral, a ciência baseada na física clássica não era capaz de oferecer uma visão coerente de universo. Esta limitação deve-se em parte às propriedades da teoria da gravitação newtoniana, mas também à sua aplicação e a conciliação entre teoria e observação na descrição do universo. O chamado paradoxo de Olbers, o qual se refere a então inexplicável escuridão do céu noturno, é um exemplo das dificuldades apresentadas pela visão clássica de universo.

Até o início do século 20, a teoria da gravitação newtoniana era considerada a melhor descrição da dinâmica dos corpos celestes. De fato, salvo um pequeno número de observações pontuais, a teoria da gravitação newtoniana era capaz de descrever e prever com sucesso impressionante o comportamento do céu observável. Evidentemente, isto não contradiz nossa afirmação anterior. A gravitação newtoniana era muito eficaz no cenário astronômico, mas insuficiente para uma descrição cosmológica do universo.

Como é de conhecimento, o desenvolvimento da relatividade restrita coloca, de um ponto de vista conceitual, a gravitação newtoniana em uma situação desconfortável por não adaptar-se facilmente à nova estrutura causal proposta pelo formalismo relativístico. Como narrado pelo próprio Einstein, esta incompatibilidade entre gravitação newtoniana e estrutura causal relativística junto a reflexões sobre a equivalência entre massa inercial e massa gravitacional o fizeram buscar uma nova teoria de gravitação.

A escolha do artigo de 1917 como marco da cosmologia moderna assume, mesmo que de maneira implícita, a necessidade da visão moderna de universo ser ancorada na teoria de

gravitação vigente. Esta afirmação não é imediata e merece alguns argumentos a seu favor.

Desde o estabelecimento das leis da mecânica clássica, acredita-se que o comportamento da matéria em escala astronômica deva ser regido pela lei da gravitação que descreve como corpos materiais se atraem mutuamente. Hoje em dia, conhecemos quatro interações fundamentais da natureza, a saber, gravitação, eletromagnética, força fraca e força forte. Destas quatro forças apenas duas delas são interações de longo alcance. As forças fraca e forte manifestam-se apenas em fenômenos nucleares e podem ser negligenciadas para descrever o comportamento em escalas macroscópicas⁹⁰.

Por outro lado, sendo a gravitação e o eletromagnetismo ambas interações de longo alcance, tanto a interação gravitacional quanto a interação eletromagnética poderiam, em princípio, influenciar a dinâmica celeste. Outro ponto importante é que a intensidade da força eletromagnética é muitas ordens de grandeza maior do que a força gravitacional. Desta forma, em geral, se ambas as interações estiverem atuando é a interação eletromagnética que costuma reger o comportamento da matéria. Assim é, por exemplo, com todos os fenômenos envolvendo partículas carregadas na superfície da Terra.

Contudo, a interação eletromagnética possui uma característica peculiar que a diferencia fundamentalmente da gravitacional. Enquanto esta última é sempre atrativa, a interação eletromagnética apresenta atração e repulsão tal que partículas com cargas opostas se atraem. Este fato vulgarmente disseminado é fundamental para a cosmologia. Com efeito, o amplo ganho em intensidade do eletromagnetismo frente a gravitação composto com a atração de cargas opostas faz com que os corpos celestes sejam globalmente neutros. Ironicamente, é justamente devido ao fato da interação eletromagnética ser mais eficaz que a interação gravitacional que faz desta última a interação dominante e determinante da evolução em larga escala do universo.

A partir destes argumentos pode-se chegar aos motivos pelos quais o desenvolvimento da teoria da relatividade geral possibilitou uma nova cosmovisão científica. A teoria relativística da gravitação transformou de maneira fundamental nossa descrição de espaço e de tempo, e levando em conta a necessidade da cosmologia científica fundar-se em uma teoria de gravitação, a relatividade geral forneceu um novo território a ser explorado.

Embora haja um forte compromisso da cosmologia com a gravitação, não é suficiente identificar um modelo cosmológico com uma solução de uma teoria de gravitação. É bem

⁹⁰ O fato das forças forte e fraca não influenciarem a dinâmica em larga escala, não significa que elas sejam desprezíveis para a cosmologia. Essas forças são fundamentais, por exemplo, na descrição da nucleossíntese primordial.

verdade que o artigo de 1917 do Einstein descreve uma solução particular de sua recém-publicada teoria da gravitação, a relatividade geral. Porém, devemos nos perguntar quais outros elementos encontramos neste artigo que possibilitam ao autor apresentar suas ideias como um modelo de universo.

Os modelos científicos têm como uma de suas funções o papel de conectar as teorias com os dados experimentais. Os modelos formam, ao lado da teoria e do experimento, um dos alicerces da prática científica. Não é possível encaixarmos os modelos sob o arcabouço das teorias científicas nem tão pouco entendê-los como uma simples síntese dos dados experimentais. Um modelo científico possuiu características singulares que não são compartilhadas pelas teorias utilizadas em sua construção nem codificadas na sequência objetiva de números dos dados experimentais.

Por isso, nenhum modelo cosmológico pode ser reduzido a uma simples solução particular da teoria da relatividade. Deve haver dentro da noção de modelo cosmológico características que o permitam atingir a sua finalidade. Invariavelmente, a noção de modelo cosmológico é um conceito cujo significado varia de acordo com o momento histórico e emerge tanto da visão de ciência quanto dos objetivos atribuídos à cosmologia.

Uma abordagem crítica sobre o estatuto e o significado dos modelos em cosmologia beneficia-se fortemente se for considerada a evolução histórica da prática dessa área científica. Contudo, quiçá mais importante seja uma análise sobre a adequação dos projetos científicos implementados em relação às pretensões da cosmologia. Embora o questionamento sobre a cientificidade da cosmologia tenha “saído de moda”, há questões fundamentais associadas a esta área de conhecimento.

O intuito deste capítulo limita-se a salientar o processo e as características que permitiram a construção de um modelo padrão para a cosmologia. O que é exigido para que um determinado modelo ganhe o estatuto de modelo padrão? Esta adjetivação estaria ligada ao entendimento dos constituintes ou do funcionamento da Natureza? É interessante lembrar que duas das questões mais fundamentais atualmente na ciência são a existência e a natureza da energia e matéria escuras. Ingredientes jamais detectados nos laboratórios na Terra, mas principais responsáveis pela atual dinâmica em larga escala do universo.

3.1 História recente da cosmologia científica

Em meados do século 19, nosso conhecimento sobre a estrutura do universo limitava-se ao sistema solar. Os modelos de universo existentes possuíam fundamentação conceitual, mas uma decisão, por exemplo, sobre a validade da hipótese sobre a estrutura de “universo-ilhas”, na qual o universo desdobrar-se-ia em estruturas hierárquicas (estrelas, galáxias, aglomerados, etc.) só obteve respaldo observacional nas primeiras décadas do século 20.

A área da cosmologia sempre recebeu forte influência de especulações conceituais, mas também é certo afirmar que a observação do céu é uma das primeiras práticas humanas de medição precisa. Na antiguidade a astronomia já era uma prática envolvendo mensuração detalhada e constante busca por melhoria de instrumentos.

Por sua vez, a revolução copernicana, ao deslocar o centro do sistema solar da Terra para o Sol, traz consigo a impossibilidade de acesso ao universo. O heliocentrismo empurra as estrelas mais próximas para distâncias, à época, inalcançáveis. Isto ocorre, pois não havia até então nenhuma medida de paralaxe das estrelas fixas o que indicava que suas distâncias deveriam ser muitas ordens de grandeza maior do que a distância da Terra ao Sol.

Na primeira metade do século 20, os dados astronômicos associados ao universo eram ainda escassos demais para sustentar qualquer modelo cosmológico. A cosmologia neste período desenvolveu-se equilibrada em discussões e desenvolvimentos teóricos. Como mencionamos acima, o trabalho do Einstein de 1917 inaugura um novo programa científico de estudo sobre o universo.

Poucos anos mais tarde, em 1922, Alexander Friedmann, físico e matemático russo, constrói um modelo de universo dinâmico. Em sua formulação, Einstein havia proposto uma configuração estática para o universo. O modelo de Einstein considera um universo eternamente idêntico enquanto que o modelo de Friedmann descreve um universo em evolução. Neste cenário de Friedmann o passado do universo distingue-se de seu futuro.

Seguindo uma linha similar a de Friedmann, o astrônomo e padre belga Georges Lemaître concebe um modelo de universo em expansão. Apesar de certas similitudes entre os modelos de Friedmann e Lemaître, o astrônomo belga acrescenta a ideia de uma evolução no sentido de aumento de complexidade, em consonância à segunda lei da termodinâmica. Seu modelo designado “átomo primordial” é um exemplo concreto da tentativa de construir uma visão de mundo a partir do conhecimento científico amplo. Este modelo teórico não se limita a estudar a dinâmica gravitacional. Há, de maneira evidente, a inclusão de conceitos advindos

de outras áreas da ciência como, por exemplo, da mecânica quântica (decaimento radioativo do universo).

Ainda nesta mesma década de 1920, uma observação crucial para a cosmologia aconteceu no observatório de Mount Wilson na Califórnia, Estados Unidos. O astrônomo americano Edwin Hubble, usando o telescópio Hooker de 100 polegadas, observou uma relação linear entre a distância do objeto astrofísico e o desvio de suas raias espectrais de emissão. Este deslocamento das raias espectrais foi interpretado como um efeito Doppler, ou seja, esta medida fornece um valor para a velocidade do objeto relativa à Terra. Contudo, esta observação através do telescópio Hooker permitiu acessar, em termos cosmológicos, apenas as regiões vizinhas à Terra.

Uma propriedade importante do mapa de velocidades criado por Hubble foi o fato de todas as estrelas vizinhas à Terra estarem se afastando de nós. Lemaître foi um dos primeiros cosmólogos a compreender o significado desta observação. Ele interpretou este resultado como uma evidência da expansão do universo. Segundo o astrônomo belga, o desvio das raias espectrais não é devido ao movimento individual das estrelas, mas uma manifestação da própria estrutura do espaço-tempo estar em expansão. O efeito sistemático dessa expansão é um deslocamento das raias de emissão para frequências menores - motivo pelo qual se cunhou chamar este efeito de desvio para o vermelho. Além do mais, a relação entre distância e o valor do desvio⁹¹ permite que o desvio para o vermelho seja usado como uma escala de distância espacial ou temporal de acordo com a utilidade desejada⁹².

Na década de 1930 o modelo dinâmico de universo já assumia lugar de destaque como proposta para explicar as observações astronômicas. A partir desta perspectiva surgiram dois cenários dominantes os quais costumam ser associados a dois de seus defensores: Gamow e Hoyle.

George Gamow foi um cosmólogo e físico teórico russo com contribuições fundamentais na descrição da formação dos elementos químicos do universo. Sua visão era de um universo em expansão, homogêneo (todos os pontos são iguais) e isotrópico (todas as direções são equivalentes), com um passado remoto extremamente quente e denso. Este cenário ficou conhecido como o modelo do Big Bang.

⁹¹ Em um espaço-tempo dinâmico não há uma noção unívoca de distância espacial. Noções distintas podem ser não-equivalentes entre si. Ademais a relação precisa entre uma certa noção de distância e o valor do desvio para o vermelho depende do modelo dinâmico de universo.

⁹² Devido a estrutura causal relativística, qualquer informação deve se propagar com velocidade finita. Assim, a luz emitida pela estrela leva um tempo até chegar à Terra que naturalmente depende de sua distância. Mais longe no espaço também significa mais longe no passado.

De sua parte, o astrônomo inglês Fred Hoyle também promovia uma visão dinâmica de universo, porém imutável. De acordo com o modelo do estado estacionário, como era conhecida a proposta defendida por Hoyle e seus colaboradores, o universo expande-se constantemente, mas suas propriedades locais permanecem sempre iguais. O universo se expande, mas não altera suas propriedades geométricas. O seu passado é idêntico a seu presente e a seu futuro.

De certo ponto de vista, o modelo do Big Bang possa talvez ser considerado como mais audacioso do que seu concorrente. Este modelo introduz questões conceituais epistemologicamente complicadas. Em um universo eternamente similar a si mesmo a questão crucial é a sua existência e suas características imutáveis. Porém, em um universo em constante mutação torna-se necessária uma análise cuidadosa do significado de suas transformações. Em particular, se as leis que regem as modificações do universo em larga escala forem compatíveis ou similares com nossa experiência local, pode conjecturar-se, por exemplo, que há indícios de uma relação causal entre as escalas microscópicas e macroscópicas da Natureza.

Por outro lado, a possibilidade de construção de uma história do universo, como acontece no modelo do Big Bang, poderia ser vista como um mecanismo de lidar com estas questões. Contudo, ao invés de simplificar, a história que emana deste modelo só pode ser estendida até um momento finito no passado. Dito de outra forma, a história do universo apresenta o problema de ser limitada no passado.

Seguindo o modelo do Big Bang, no sentido contrário à direção temporal, encontramos uma singularidade física em um tempo finito no passado. Uma singularidade física é uma configuração intratável do ponto de vista científico. Nesta situação, perde-se por completo qualquer poder preditivo sobre o sistema.

É bem verdade que certos grupos de cientistas e outros setores da sociedade interpretaram este impasse teórico como uma evidência de um momento de criação do universo. Contudo esta conclusão é inadequada pois para se chegar a ela precisaríamos usar justamente as teorias e os modelos os quais não são mais válidos na região de interesse. A maneira apropriada de se entender a singularidade física é tomá-la como uma limitação do nosso conhecimento científico e não como um resultado de uma análise científica.

Distintamente, o modelo do estado estacionário baseia-se em uma configuração de máxima simetria. Em certo sentido, configurações homogêneas e isotrópicas são similares a figura geométrica do círculo. O círculo é composto por pontos equivalentes e equidistantes ao centro. Não há direção nem posição privilegiada no círculo. A diferença é que neste modelo

cosmológico não há um centro do universo.

O modelo do estado estacionário assume que o universo apresenta o número máximo de simetrias possível. No modelo do Big Bang, as seções espaciais são homogêneas e isotrópicas. O estado estacionário amplia estas simetrias propondo que o universo seja homogêneo também no tempo. A dificuldade principal deste modelo é sua incompatibilidade com as leis da física. Para manter o universo homogêneo no tempo, seus proponentes se viram forçados a romper com a lei de conservação de matéria e energia. Uma característica central deste cenário é a constante criação de matéria, porém, seu mecanismo e as possíveis regiões de maior criação podem variar em diferentes construções do modelo.

Há inúmeras diferenças entre estes dois modelos cosmológicos mas, em uma leitura retrospectiva, talvez a característica mais marcante seja o processo de formação dos elementos químicos⁹³. Através da medição das linhas de emissão e absorção registradas na radiação eletromagnética que nos chega à Terra, astrônomos são capazes de mapear a proporção relativa dos elementos químicos existentes no universo.

De acordo com a formulação do estado estacionário, os elementos químicos deveriam ter sido formados no interior das estrelas. Nestas regiões haveria energia térmica suficiente para propiciar as reações nucleares necessárias. Já no modelo do Big Bang, a formação dos elementos químicos acontece em todos os pontos do espaço e no passado remoto quando o universo era quente o suficiente para ocasionar as reações de fusão.

Outra questão que se tornou essencial para a querela entre estes modelos cosmológicos foi a previsão por parte do modelo do Big Bang da existência de uma radiação eletromagnética remanescente do passado remoto do universo. Com a expansão do universo, e consequentemente com seu esfriamento, ocorreu uma série de processos físicos com a matéria e a radiação eletromagnética. Em particular, o livre caminho médio dos fótons (partículas da radiação eletromagnética) tornou-se, em certo momento, grande o suficiente para que a radiação se desacoplasse da matéria e passasse a propagar-se livremente pelo espaço. Esta radiação cósmica de fundo (RCF) é interpretada como um genuíno fóssil do passado remoto do universo. A existência da RCF não é incompatível com o cenário do estado estacionário, porém, a sua detecção em 1965 por Arno A. Penzias e Robert W. Wilson, dois astrônomos americanos, foi tomada como um forte indício a favor do modelo do Big Bang.

⁹³ Para uma revisão detalhada sobre a evolução observacional e o desenvolvimento teórico do estudo dos elementos químicos do universo, veja as referências (WALKER, 1991; SCHRAMM, 1998; CYBURT, 2016; KOLB, 1990).

Penzias e Wilson eram funcionários do laboratório Bell e trabalhavam em um experimento com uma antena de micro-ondas de 6 metros em formato de corneta (“horn antenna”). No processo de aprimoramento do dispositivo, os dois astrônomos depararam-se com um ruído constante de igual intensidade em todas as direções. Incapazes de remover tal sinal de fundo, nem de dar significado à sua origem, Penzias e Wilson encontravam-se em um impasse. O avanço científico surgiu apenas quando, em conversa com astrofísicos da universidade de Princeton, eles tomaram conhecimento da possibilidade de detecção de uma radiação cósmica remanescente do passado remoto do universo.

A RCF possui a característica de ser uma radiação térmica de corpo negro. Isto significa que o sinal detectado respeita uma relação bem definida entre intensidade e frequência. A radiação de corpo negro pode ser parametrizada por apenas uma quantidade física que comumente é escolhida como sendo a temperatura associada à radiação. As medidas de Penzias e Wilson indicaram um valor de aproximadamente 3 graus Kelvin, valor este bem abaixo das previsões teóricas que estimavam algo em torno de 40 a 50 graus Kelvin. De toda sorte, do ponto de vista do modelo do Big Bang, a temperatura da RCF é um parâmetro livre que pode ser ajustado. Embora a existência da RCF seja uma previsão concreta do modelo, o valor preciso de sua temperatura é uma quantidade facilmente ajustável. Os resultados observacionais da detecção da RCF não são em si suficientes para validar o modelo do Big Bang frente a outros modelos como o modelo do estado estacionário. Contudo, o Big Bang começou a ganhar pouco a pouco um número cada vez maior de simpatizantes.

3.2 Mudanças na comunidade científica

Em tempos mais recentes, encontramos dois acontecimentos chave que influenciaram definitivamente a prática da pesquisa científica em cosmologia. No início da década de 1980, um grande número de físicos teóricos com formação em altas energias desenvolveu interesse particular pelo cenário do modelo do Big Bang. A atenção desta parcela da comunidade científica está intimamente ligada aos problemas conceituais agudos presentes no modelo do Big Bang como, por exemplo, o problema do horizonte e o problema da planeza.

O problema do horizonte está relacionado com a dinâmica da evolução do universo primordial ser limitada pela existência da singularidade física. Como mencionamos acima, o

modelo do Big Bang só pode ser estendido até um tempo finito para o passado. Assim, temos um intervalo finito de tempo entre a singularidade e o momento de desacoplamento entre matéria e radiação eletromagnética. A dificuldade surge quando estudamos as propriedades da radiação cósmica de fundo, pois esta radiação que medimos hoje nos fornece informações justamente sobre esse momento do desacoplamento no passado remoto do universo. O fato de esta radiação ser homogênea e isotrópica até quatro casas decimais, por um lado, reforça as hipóteses do modelo do Big Bang, mas por outro o torna incompreensível, pois, devido à estrutura causal da relatividade, o tempo finito disponível entre a singularidade e o desacoplamento não é suficiente para que haja mecanismos físicos de explicar esta homogeneidade e isotropia da radiação cósmica de fundo.

O problema da planeza manifesta-se na segunda fase evolutiva entre o momento do desacoplamento e hoje. Outra característica dessa radiação é indicar que as seções espaciais são planas com precisão de alguns por cento. A evolução dinâmica no modelo do Big Bang amplifica a curvatura das seções espaciais de modo que se elas são próximas de plano hoje significa que no passado remoto elas deveriam ser próximas de plano com uma precisão em cinquenta casas decimais. Este é um exemplo do que é chamado na literatura de ajuste fino (“fine tuning”). Ajustes finos são configurações atípicas e sem explicação, mas imprescindíveis para conciliar modelo e dados observacionais.

A migração de físicos de altas energias para a cosmologia foi em parte motivada pela possibilidade de resolver os problemas conceituais do modelo do Big Bang como o problema da planeza e do horizonte. Da contribuição desta comunidade científica surgiram os modelos inflacionários os quais se acomodam apropriadamente em uma fase entre a singularidade física e o momento do desacoplamento. Contudo, além da motivação teórica, existem também motivos técnicos para a recolocação profissional desses físicos. Há o impasse tecnológico entre as teorias de altas energias e o patamar de energia dos aceleradores de partículas existentes, ou potencialmente viáveis de serem construídos em um futuro próximo.

No modelo do Big Bang, quanto mais distante para o passado analisamos, maiores são as energias das reações que descrevem os fenômenos típicos do universo primordial. Alguns pesquisadores vislumbraram a possibilidade que, com o acesso a essa fase primordial do universo, a comunidade científica fosse capaz de testar hipóteses e teorias cujas principais manifestações se dão em escalas de energias inatingíveis em laboratórios da Terra. Com esta mudança abrupta da comunidade científica, os paradigmas, critérios científicos, práticas de pesquisa e visão da cosmologia enquanto área de conhecimento foram rapidamente alterados.

Outro elemento crucial para o entendimento da prática da cosmologia hoje em dia são

os modernos satélites desenvolvidos especialmente para o estudo do universo remoto. Iremos descrever brevemente três desses satélites em ordem cronológica, a saber, o satélite COBE, WMAP e o mais recente satélite Planck. Estes satélites além de inundarem a pesquisa em cosmologia com uma quantidade enorme de dados observacionais podem ser entendidos como um programa sistemático de aprimoramento técnico.

3.3 História dos satélites modernos

O estudo do mundo extraterrestre sempre foi marcado pela limitação da condição humana. Nós podemos apenas observar o céu sem interagir com os objetos celestes. Apesar das diferenças substanciais entre os métodos e instrumentos de observação desenvolvidos ao longo da história da humanidade, até meados do século 20 todos compartilhavam a limitação de serem baseados na superfície da Terra. Mesmo nas melhores regiões de observação da Terra, como por exemplo, o deserto do Atacama, a atmosfera da Terra gera ruídos limitadores no sinal observado. Um passo importante na busca de uma cosmologia de precisão⁹⁴ foi a utilização de satélites em órbita da Terra funcionando como laboratórios observacionais.

Todo experimento é projetado e adaptado para otimizar a sua função. Uma vez colocada, de antemão, a questão científica a ser analisada, o equipamento é construído com o intuito de maximizar as possibilidades de seu sucesso e obtenção de resultados relevantes para a questão originalmente formulada. Com relação à cosmologia, destacamos quatro experimentos em satélites desenhados para observações cosmológicas, a saber, os Relikt-1, COBE, WAMP e o mais recente Planck.

A descoberta da radiação cósmica de fundo com o experimento de Penzias e Wilson pautou a construção da futura geração de satélites como o Relikt-1 e o COBE. A antena de Penzias e Wilson⁹⁵ foi originalmente construída para funcionar como coletor e amplificador de sinais de rádio de um sistema de satélite chamado Echo. Porém, no início da década de 1960 o Echo tornou-se obsoleto liberando a antena, localizada em Holmdel, de suas funções comerciais. Com o caminho livre, Penzias e Wilson decidiram utilizar a antena como um

⁹⁴ Cosmologia de precisão é um termo usado para designar uma prática observacional onde a determinação dos parâmetros do modelo analisado é capaz de uma redução drástica no espaço paramétrico inicial.

⁹⁵ Fonte das informações sobre a antena de Penzias e Wilson:
<https://www.aps.org/programs/outreach/history/historicsites/penziaswilson.cfm>

radiotelescópio para analisar a emissão de ondas de rádio em regiões entre galáxias. No processo de preparação, os dois pesquisadores do laboratório Bell precisaram rastrear e eliminar todas as fontes de interferência que pudessem encontrar. O resultado foi um ruído permanente na faixa do comprimento de microondas (em torno de 7,35 centímetros) vindo de todas as direções e sem alteração entre o dia e a noite. A análise de seus dados, com ajuda do grupo de físicos teóricos da Universidade de Princeton ligados a Robert Dicke, indicou que a radiação cósmica era isotrópica e a ela associada uma temperatura de corpo negro em torno de 3 graus Kelvin.

A iniciativa seguinte⁹⁶ foi o artefato denominado Relikt-1. Este experimento, lançado a bordo do satélite russo Prognoz 9 em meados de 1983, foi projetado para medir as anisotropias da radiação cósmica de fundo que Penzias e Wilson haviam medido em 1965. Este experimento russo capturou mais de 15 milhões de medições na faixa de 37 giga Hertz cobrindo todo o céu em um período de seis meses. A resolução angular do aparelho era de cinco graus e meio e com uma resolução de temperatura da ordem de seis décimo de miliKelvin. Como consequência, pôde-se medir o dipolo da radiação cósmica de fundo e obteve-se evidência da existência do quadrupolo com intervalo de confiança de noventa por cento. Os resultados desse experimento foram oficialmente publicados no início de 1992 no *All-Moscow Astronomy Seminar* sediado no Instituto Astronômico de Sternberg. Dado o sucesso inicial do experimento, ainda na década de 1980, foi decidido incluir um estudo mais detalhado das anisotropias da radiação cósmica de fundo no projeto do Relikt-2, mas devido ao desmantelamento da antiga União Soviética o projeto nunca chegou a ser executado.

Nesta mesma década, a agência espacial americana NASA desenvolveu o satélite COBE (acrônimo em inglês para a expressão *explorador do fundo cósmico*) o qual foi lançado no final de 1989. Os primeiros dados relativos ao primeiro ano de medição do COBE foram divulgados em 1992, mas o instrumento continuou operando até 1993. Os dados finais com a análise completa dos quatro anos de coleta de dados foram finalizados e publicados em 1996.

Ao contrário do Relikt-1 cujo radiômetro não era capaz de realizar observações multi-bandas, o COBE mediu o espectro de três Kelvins da radiação cósmica de fundo na faixa de cem micrômetros até um centímetro e analisou as suas anisotropias entre três e dez milímetros. Similarmente ao Relikt-1, COBE seguia uma órbita que o possibilitava cobrir todo o céu a cada seis meses. O experimento incluía três instrumentos a bordo cujos acrônimos são DMR, FIRAS e DIRBE que designam respectivamente *radiômetro diferencial*

⁹⁶ Fonte das informações sobre o satélite Relikt-1: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/relikt/>; https://en.wikipedia.org/wiki/Prognoz_9; <https://en.wikipedia.org/wiki/RELIKT-1>

de micro-ondas, espectrofotômetro absoluto do infravermelho profundo e experimento de difusão do fundo infravermelho.

O FIRAS foi desenhado para medir o espectro da radiação cósmica enquanto que o DMR ateve-se ao levantamento das anisotropias e o DIRBE o mapeamento da emissão de radiação infravermelha vinda de poeira intergaláctica. A sensibilidade do FIRAS é cem vezes maior do que dos detectores anteriores carregados em balões atmosféricos comprovando com precisão o perfil de corpo negro da radiação cósmica de fundo. Já o mapa do céu completo produzido pelo DMR mostrou que a radiação cósmica de fundo era isotrópica em uma parte em cem mil. Estes resultados tiveram um forte impacto na comunidade científica.

Em 2006, o prêmio Nobel de física foi oferecido a John Mather e George Smoot, ambos foram líderes científicos do experimento COBE. Mather era o principal responsável pelo FIRAS enquanto que Smoot era responsável pelo DMR. No discurso de entrega dos prêmios, o físico sueco Per Carlson fez menção⁹⁷ à importância dos novos dados observados pelo COBE

“Dr Mather, Professor Smoot: Cosmology has become a precision science and your ground-breaking research laid the foundation for that. With your carefully calibrated instruments you have shown the cosmic microwave background radiation to follow very precisely a blackbody form. The in-depth analysis of the radiometer data has shown the presence of the long sought small temperature anisotropies, the seed of the structures in the Universe that we observe today.” (Per Carlson – discurso de entrega Nobel de física 2006)

Quase uma década depois do término de funcionamento do COBE, a agência espacial americana lançou o seu segundo satélite, a sonda Wilkinson de anisotropia em micro-ondas (WMAP). Este projeto foi vislumbrado como uma continuação do COBE com o intuito de melhorar a precisão na medida das anisotropias da radiação cósmica de fundo. A importância dessas anisotropias reside no conjunto de informações sobre as características físicas do universo e os elementos que o constitui. O WMAP aprimorou a sensibilidade dos detectores atingindo quarenta e cinco vezes o valor do COBE e operou com uma resolução angular de treze minutos de arco o que representa uma resolução 33 vezes maior do que o seu antecessor. A missão WMAP foi selecionada pela NASA em 1996, dentro de uma chamada aberta de projetos, e o lançamento do satélite ocorreu em meados de 2001. Os primeiros resultados foram publicados em 2003 e sucessivamente de dois em dois anos até 2011.

O resultado final da análise dos dados de nove anos de detecção se expressa na

⁹⁷ “Dr Mather, Professor Smoot: A cosmologia tornou-se uma ciência de precisão e suas pesquisas desbravadoras criaram os alicerces para isto. Com seus instrumentos cuidadosamente calibrados vocês mostraram que a radiação cósmica de fundo segue muito precisamente a forma de um corpo negro. A análise a fundo dos dados de radiometria mostraram a presença das já a muito procuradas pequenas anisotropias de temperatura, as sementes das estruturas no Universo a qual nós observamos hoje.”

determinação de seis parâmetros os quais são necessários para descrever o modelo Λ CDM. Este modelo de concordância é composto pela descrição da geometria do universo nos moldes do modelo do Big Bang com acréscimo de dois componentes extras - a matéria escura e a constante cosmológica⁹⁸. Três dos seis parâmetros do Λ CDM especificam as densidades de bárions, de matéria escura, e a densidade associada a constante cosmológica. Dois outros parâmetros fornecem a amplitude das perturbações primordiais e o índice espectral⁹⁹. O parâmetro restante determina a espessura ótica da superfície de reionização, ou seja, está associada ao quão rápido ocorreu o desacoplamento entre matéria e radiação. Os dados do WMAP conseguiram reduzir o volume do espaço paramétrico hexa-dimensional por um fator de sessenta e oito mil com relação aos limites conhecidos. No primeiro parágrafo da introdução do artigo científico *Nine-Year WMAP Observations: Cosmological Parameter Results* lemos¹⁰⁰

“Measurements of temperature and polarization anisotropy in the cosmic microwave background (CMB) have played a major role in establishing and sharpening the standard “ Λ CDM” model of cosmology: a six-parameter model based on a flat universe, dominated by a cosmological constant, Λ , and cold dark matter (CDM), with initial Gaussian, adiabatic fluctuations seeded by inflation.” (WMAP COLLABORATION, 2013)

Na página oficial da missão WMAP, listado como primeiro item das conquistas do projeto, lê-se¹⁰¹

“The WMAP science team has [...] put the ‘precision’ in ‘precision cosmology’ by reducing the allowed volume of cosmological parameters by a factor in excess of 68.000.”

Notoriamente, há uma mudança na postura da comunidade científica com relação à descrição do nosso universo. Identificamos dois pontos importantes. Após o WMAP, a cosmologia é apresentada como uma prática científica de precisão tanto para outras áreas científicas quanto para o público leigo. Além disso, surge o conceito de modelo padrão da cosmologia. A inclusão do adjetivo padrão acusa, por um lado, a existência de um cenário usado como referência para todo e qualquer questionamento, mas, por outro lado, também

⁹⁸ O acrônimo Λ CDM remete a expressão em inglês lambda cold dark matter que designa a presença da constante cosmológica (representada pela letra grega lambda) e da componente de matéria escura com comportamento de baixas velocidades (por isso o termo fria).

⁹⁹ O índice espectral determina a dependência do espectro de potência da radiação cósmica de fundo, ou seja, esta relacionada a como as perturbações dependem da escala de comprimento.

¹⁰⁰ “Medições da temperatura e da polarização na radiação cósmica de fundo foram fundamentais em estabelecer e aprimorar o modelo padrão Λ CDM da cosmologia: um modelo de seis parâmetros baseado em um universo plano, dominado por uma constante cosmológica, Λ , e matéria escura (CDM), com flutuações iniciais gaussianas, adiabáticas semeadas pela inflação.”

¹⁰¹ “O time científico do WMAP [...] colocou a ‘precisão’ em cosmologia de precisão por reduzir o volume permitido de parâmetros cosmológicos por um fator de excesso de 68.000.”

sinaliza um jogo de forças entre diferentes grupos de pesquisadores. Dito de outra forma, como se estabelece o modelo a ser tomado como padrão?

Inicialmente, no início dos anos 2000, o modelo padrão da cosmologia era chamado de modelo de concordância. Dada as hipóteses do modelo do Big Bang, os dados observacionais só podem ser acomodados junto a inclusão ad hoc de dois componentes desconhecidos – a matéria escura e a energia escura. Estes componentes escuros são desconhecidos e até o momento não foram detectados nos laboratórios da Terra.

A necessidade da energia escura surgiu antes dos resultados do WMAP. No final dos anos 1990, dois projetos independentes, a saber, o *High-Z Supernova Search Team* e o *Supernova Cosmology Project* buscavam medir a distância de luminosidade¹⁰² de supernovas¹⁰³ do tipo Ia com o uso de telescópios baseados na Terra. Ambos os experimentos determinaram, a partir do uso das supernovas como velas padrão e da hipótese da validade do modelo do Big Bang, a propriedade inesperada da expansão atual do universo ser acelerada. Neste contexto, o único componente capaz de gerar tal tipo de expansão é a energia escura. Posteriormente, os resultados do WMAP vieram corroborar com esta necessidade fazendo uso de técnicas e medições de observáveis independentes dos analisados pelos dois grupos trabalhando com supernovas.

Confirmações de experimentos independentes e análise de configurações de sistemas físicos distintos certamente são ingredientes importantes para validar uma interpretação teórica dos dados observacionais. Contudo, o modelo padrão da cosmologia fornece um cenário onde a maior parte dos constituintes do universo são quantidades que nunca detectamos diretamente nem conhecemos do que são feitas. O modelo é de concordância no sentido dos dados observacionais encaixarem-se de maneira coesa, porém ao custo de remendarmos temporariamente a ontologia da Natureza.

Recentemente, um novo projeto direcionado a cosmologia produziu uma nova série de dados. O satélite Planck foi desenhado para dar continuidade à linha de investigação dos satélites anteriores. A agência espacial europeia ESA lançou o satélite Planck em 2009 e seus primeiros resultados científicos foram publicados no início de 2011 e sua coleta de dados terminou em 2013. Os resultados do Planck sustentaram o mesmo cenário construído pelos satélites anteriores. Embora haja avanços significativos no conhecimento dos parâmetros

¹⁰² A distância luminosidade é uma definição de distância útil no cenário do modelo do Big Bang a qual relaciona uma distância espacial ao objeto astrofísico a partir das propriedades da sua curva de luminosidade.

¹⁰³ Supernova é um evento astrofísico que marca o fim de estrelas altamente massivas liberando uma quantidade muito grande de energia em forma de radiação em um período muito curto. A intensidade da emissão é tão grande que permite sua observação a longa distâncias cosmológicas.

associados ao modelo de universo primordial, os resultados até o momento não indicam nenhuma violação abrupta do modelo padrão da cosmologia¹⁰⁴.

Talvez o resultado científico mais importante da colaboração Planck tenha sido a confirmação da solidez do modelo Λ CDM. De fato, a melhor denominação para este cenário é modelo de concordância, pois enquanto todos os dados cosmológicos que dispomos harmonizam-se suavemente, nosso modelo padrão ainda funciona como um modelo fenomenológico. Há um enorme esforço por parte da comunidade científica em propor soluções teóricas para o impasse conceitual que se encontra atualmente a cosmologia, mas até o momento é inegável que as conquistas observacionais se sobressaem aos avanços teóricos.

3.4 Fundamentação observacional do modelo padrão da cosmologia

Um dos resultados do desenvolvimento da cosmologia ao longo do século 20 foi o estabelecimento de um modelo padrão da cosmologia. O adjetivo padrão é um indicativo do reconhecimento, por parte da comunidade científica, de um modelo capaz de acomodar a maioria dos dados observacionais em um mesmo cenário teórico. Além disso, está implícito que este modelo realiza esta tarefa de maneira mais eficiente que qualquer outro modelo concorrente.

Há duas outras formas utilizadas na literatura especializada para se referir ao modelo padrão da cosmologia. É recorrente encontrarmos referência ao modelo de concordância da cosmologia ou ainda o chamado modelo Λ CDM. A última forma é um acrônimo para designar a presença da constante cosmológica, com o uso do símbolo Λ , e da matéria escura fria¹⁰⁵, com a expressão em inglês cold dark matter. As três denominações, a saber, modelo

¹⁰⁴ Existe um conjunto de anomalias associadas aos dados observacionais da radiação cósmica de fundo. Estas anomalias foram primeiramente medidas pelo satélite WMAP e posteriormente confirmadas pelo Planck. Estes resultados são incoerentes com as previsões teóricas do modelo Λ CDM e podem estar associados com efeitos sistemáticos nas medições ou com efeitos de nossa modelagem do meio cósmico (efeitos de ‘foreground’). A confirmação das anomalias pelo Planck sugere que estes efeitos não são devido a erros na coleta dos dados. É possível que a revisão do modelo a partir destas anomalias possa modificar significativamente o modelo padrão da cosmologia, embora até o momento nenhum modelo alternativo proposto seja capaz de ajustar os dados observacionais como o modelo Λ CDM. Para uma discussão mais detalhada veja (PLANCK COLLABORATION, 2014).

¹⁰⁵ A matéria escura fria é um componente não-bariônico que interage apenas gravitacionalmente. O adjetivo escuro salienta a ausência de interação eletromagneticamente e conseqüentemente da impossibilidade de detecção por emissão de ondas eletromagnéticas. O adjetivo frio designa a hipótese do movimento relativo de suas partículas ser com baixas velocidades se comparado com a velocidade da luz no vácuo, o que configura um fluido sem pressão. Hoje em dia, há na literatura uma discussão sobre uma possível necessidade de modelar a

padrão, modelo de concordância ou modelo Λ CDM, referem-se ao mesmo modelo cosmológico, o qual possui características que serão descritas nesta seção.

Vale notar a escolha do termo concordância para designar o melhor modelo cosmológico. É evidente que este termo alega um ótimo acordo do modelo com os dados observacionais. Entretanto, o modelo padrão possui características de difícil interpretação. Inclusive, nos parece adequado entender o termo concordância como uma afirmação da completa adequação descritiva do modelo padrão, mas ineficaz em explicar o nosso universo observável.

O modelo padrão da cosmologia inclui uma descrição das propriedades geométricas e dos constituintes do universo. A teoria da relatividade geral conecta as propriedades do espaço-tempo com o conteúdo material o qual serve de fonte para a dinâmica do espaço-tempo. O estabelecimento de um modelo cosmológico implica na determinação simultânea das propriedades geométricas e das propriedades materiais dos constituintes do universo.

A descrição geométrica do universo é feita pela família de soluções denominadas de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW). Estas soluções descrevem espaços-tempos com seções espaciais homogêneas e isotrópicas cuja evolução é codificada em uma função chamada de fator de escala. A cada instante de tempo¹⁰⁶, o espaço é homogêneo e isotrópico porém a distância física entre dois pontos espaciais pode variar entre dois momentos distintos. A variação com o tempo é expressa pela função fator de escala $a(t)$.

A família de soluções de FLRW é caracterizada pelo fator de escala $a(t)$ e pelo tipo de curvatura de cada seção espacial. A partir de uma escolha adequada do sistema de coordenadas, a curvatura das seções espaciais pode ser caracterizada por uma constante k que pode assumir os valores -1 , 0 ou $+1$. O valor $k=0$ estipula que as seções espaciais são planas e assim satisfazem as regras da geometria euclidiana. O caso $k=\pm 1$ representa seções espaciais curvas onde o sinal positivo indica geometrias esféricas e o caso negativo geometrias hiperbólicas. A determinação do fator de escala $a(t)$ e do valor da constante k especificam completamente as propriedades geométricas de uma solução particular da família FLRW.

Em cosmologia, o uso da família de FLRW para descrever as propriedades geométricas do universo pode ser entendido como a expressão matemática do princípio

matéria escura com velocidades suficientemente altas para manifestar um comportamento de fluido com pressão não-nula. Neste caso a designamos por matéria escura morna.

¹⁰⁶ As soluções de FLRW possuem a propriedade particular da existência de um tempo global. Este tempo cósmico define globalmente a simultaneidade dos eventos. Ele permite estabelecer um momento presente, um agora, o qual secciona o espaço-tempo entre passado, presente e futuro. Esta propriedade é fundamental para possibilitar a construção de uma história de evolução do universo.

cosmológico. Este princípio é uma adaptação moderna do princípio copernicano o qual afirma que a Terra não ocupa um lugar privilegiado no universo. Assim, o princípio cosmológico afirma que as propriedades locais não devem ser atípicas se comparadas com outras regiões do universo. É importante salientar que este princípio não exige que o universo seja similar em todos os pontos, mas que a diferença entre suas regiões sejam estatisticamente contrabalanceadas.

O uso da família FLRW é a implementação radical do princípio cosmológico ao descrever um universo igual em todos os pontos, i.e. propriedade de homogeneidade, e similitude em todas as direções, i.e. propriedade de isotropia. Como já mencionado, o modelo padrão consegue ajustar os dados observacionais com muita precisão. Este fato nos garante que este modelo cosmológico é minimamente um ótimo modelo fenomenológico. Todavia, a confiança no modelo padrão como descrição do universo pressupõe a validação do princípio cosmológico¹⁰⁷ através da determinação das propriedades de homogeneidade e isotropia das seções espaciais.

Hoje em dia, a isotropia das seções espaciais é uma propriedade bem estabelecida experimentalmente. Através de levantamentos espectroscópicos, é possível mapear a localização de centenas de milhares de galáxias. Em pequenas escalas, a dinâmica gravitacional faz com que os corpos aglutinem-se formando estruturas coesas cercadas de vazios. Porém em escalas maiores, a partir de dezenas de mega parsec¹⁰⁸, não há nenhuma evidência de estruturas cósmicas. Os resultados da colaboração SDSS-III/BOSS mostra¹⁰⁹ que na fatia que compreende desvios para vermelho entre $0,5 < z < 0,6$ a distribuição de galáxias é muito próxima de isotrópica¹¹⁰. Além disso, em escalas maiores, da ordem de giga parsec, a radiação cósmica de fundo é uma observação contundente da isotropia do universo primordial

¹⁰⁷ Note que há aqui um abuso do termo princípio cosmológico. Um princípio não pode ser testado empiricamente o que nos lembra da inadequação de identificar o princípio cosmológico com as propriedades de homogeneidade e isotropia das seções espaciais do universo. Este uso advém de um legado histórico da evolução da cosmologia ao longo do século XX. Na primeira metade do século XX o uso da família de FLRW era de fato uma hipótese de trabalho a qual era justificada pelo princípio cosmológico. Contudo com o advento da cosmologia observacional, a homogeneidade e isotropia do universo passaram a ser uma questão testável.

¹⁰⁸ Parsec é uma unidade de medida espacial definida como a distância de um objeto cuja paralaxe equivale a um arcosegundo. Um parsec equivale aproximadamente a 3,3 anos-luz ou ainda a $3,1 \times 10^{13}$ quilômetros.

¹⁰⁹ O Sloan Digital Sky Survey é um telescópio localizado no novo México, Estados Unidos. O BOSS é um levantamento do Sloan aprimorado, designado SDSS-III, projetado para espectroscopia da oscilação acústica de bárions (BAO).

¹¹⁰ A distribuição de galáxias não é contínua, mas segue uma estrutura granular. Por isso, nas escalas observadas pela colaboração SDSS-III/BOSS só faz sentido em confirmar a isotropia estatística da distribuição de galáxias.

(na última superfície de espalhamento¹¹¹).

A propriedade de homogeneidade não é tão bem estabelecida observacionalmente quanto a de isotropia. Contudo, assumindo a isotropia do universo com relação a nossa posição surgem apenas duas possibilidades. As seções espaciais podem ser homogêneas ou inhomogêneas. A distinção entre estas duas possibilidades pode ser obtida com uma análise da evolução recente do universo. Mais precisamente, a taxa de variação do desvio para vermelho (redshift drift em inglês) é um promissor teste para modelos inhomogêneos. Estima-se que os próximos levantamentos cosmológicos terão sensibilidade suficiente para discriminar entre estas duas situações (UZAN, 2008).

Todavia, a possibilidade de um universo inhomogêneo e isotrópico recoloca a nossa posição literalmente muito próxima do centro geométrico do universo. Tanto a homogeneidade quanto a inhomogeneidade parecem clamar por explicação. Por um lado, o grau de simetria da solução homogênea e isotrópica mostra-se ininteligível se considerarmos a propriedade atrativa da gravitação. Com efeito, a evolução do universo produz fortes inhomogeneidades manifestadas nas estruturas que observamos como galáxias, aglomerados de galáxias, filamentos, etc. Logo, a homogeneidade do universo primordial necessita de uma explicação. Por outro lado, caso as observações nos mostrem que nossa posição é de fato extremamente particular, reconhecer que estamos no centro geométrico do universo, no escopo da ciência moderna, também necessita de explicações.

Cronologicamente, a primeira observação que contribuiu para a construção do modelo padrão da cosmologia foi a medida da taxa de expansão local do universo realizada por Edwin Hubble na década de 1920 (HUBBLE, 1929). Valores atuais da taxa de expansão estipulam um fator de Hubble $H_0 = 72 \pm 8$ (Km/Mpc).s⁻¹ (FREEDMAN, 2001). Além de evidenciar a expansão do universo local, esta medida é valiosa para a cosmologia por quebrar a degenerescência de outros dados observacionais. Por exemplo, a medida das anisotropias da radiação cósmica de fundo combinada com o valor de H_0 é suficiente para impor a necessidade da matéria e energia escuras para ajustar corretamente os dados observacionais.

A abundância dos elementos leves do universo é outro forte indicativo da adequação do modelo padrão. Neste cenário, no passado remoto, o universo apresentava seu conteúdo material no estado de um plasma de partículas elementares. Com a expansão do universo, e conseqüentemente seu esfriamento, as reações nucleares e eletromagnéticas forjaram os

¹¹¹ A última superfície de espalhamento é uma casca esférica centrada na Terra cuja distância equivale ao tempo que a luz leva para viajar do instante do desacoplamento entre matéria e radiação até nós. Este momento de desacoplamento caracteriza o instante quando o universo tornou-se neutro (íons capturaram elétrons e tornaram-se neutros) e transparente para os fótons.

primeiros elementos químicos¹¹². Este mecanismo é eficaz para produzir os elementos leves da tabela periódica até o lítio⁷. Todos os outros elementos químicos mais pesados são produzidos no interior das estrelas e nas explosões de supernova que configuram o término da evolução estelar. O ponto crucial para a cosmologia é que a nucleossíntese primordial estabelece com precisão a fração de prótons por fótons existentes no universo, $\eta = (\text{n}^\circ \text{ de prótons}) / (\text{n}^\circ \text{ de fótons})$. Esta fração limita a quantidade de matéria bariônica existente no universo. De maneira similar ao fator de hubble H_0 , a fração η combinada com as medidas das anisotropias da radiação cósmica de fundo estipulam a existência de matéria não-bariônica a qual denominamos de matéria escura por se comportar gravitacionalmente como matéria não-relativística e não emitir ondas eletromagnéticas.

A dinâmica da nucleossíntese primordial é regulada pela eficácia das possíveis reações entre as partículas do plasma primordial. Esta eficácia, por sua vez, varia com a expansão do universo, pois com o esfriamento e a diminuição da densidade de partículas, os parâmetros das reações variam com o tempo, por exemplo, as seções de choque das reações. Eventualmente, certas reações são congeladas no sentido de tornarem-se tão ineficientes que praticamente não ocorrem mais. Após a formação dos primeiros íons como deutério ($^2\text{H}^+$), trítio ($^3\text{H}^+$) e hélio ($^4\text{He}^{2+}$), os átomos são formados por captura de elétrons. Contudo, o plasma possui uma quantidade enorme de fótons que reionizam esses átomos. Esta dinâmica contínua até que a densidade e a temperatura do universo sejam baixas o suficiente para que os fótons disponíveis não sejam mais eficientes em ionizar os átomos já constituídos. Neste momento, o livre caminho médio dos fótons torna-se da ordem da escala cosmológica. Esta transição é abrupta e denominada de desacoplamento. A partir deste instante, os fótons passam a viajar praticamente livres pelo universo.

A radiação cósmica de fundo é uma medida desses fótons primordiais originários do momento do desacoplamento. Por isso, às vezes, a radiação cósmica de fundo é comparada a um fóssil cósmico por codificar as propriedades do universo em um instante a bilhões de anos no passado. Esta radiação é um dos observáveis cruciais no estabelecimento do modelo padrão da cosmologia. Suas propriedades são um forte argumento para a isotropia do universo primordial além de fornecer uma série de informações sobre seus constituintes. Além disso, os picos acústicos das anisotropias da radiação cósmica de fundo nos fornece informação sobre a curvatura das seções espaciais, da quantidade percentual dos constituintes do universo e do espectro primordial de flutuações da densidade de energia. Essas informações advêm da posição e amplitude dos picos acústicos, pois uma variação das proporções dos constituintes

¹¹² Para uma revisão detalhada veja (CYBURT, 2016; WALKER, 1991).

do universo e da curvatura das seções espaciais altera a posição assim como a altura relativa dos picos.

Como mencionado anteriormente, em 1965, Penzias e Wilson detectaram a radiação cósmica de fundo comprovando a previsão teórica dos proponentes do modelo de Big Bang. Este experimento foi crucial por identificar a radiação cósmica de fundo, mas não tinha precisão suficiente para determinar suas propriedades. No ano de 1992, o satélite COBE confirmou a natureza de corpo negro da radiação e realizou as primeiras medidas de suas anisotropias. O espectro da radiação cósmica de fundo tem um ajuste perfeito com o espectro de corpo negro. Isto significa que seu espectro é ajustável por um único parâmetro que geralmente representa a temperatura do sistema. As medidas mais recentes determinam uma temperatura de $T=2,7255$ kelvins (FIXSEN, 2009).

As pequenas anisotropias da temperatura no espectro de potência angular da radiação cósmica de fundo são da ordem da milionésima parte da temperatura ($\Delta T/T \sim 10^{-6}$) o que indica que o universo era muito próximo de isotrópico em seu passado remoto. O satélite WMAP obteve medidas muito precisas das anisotropias. A razão entre a altura do primeiro e do segundo picos fornece uma medida do conteúdo bariônico, o qual concorda com as previsões da nucleossíntese primordial da abundância observada dos elementos leves. A determinação da escala angular acústica¹¹³ no instante da recombinação proporciona uma forte indicação da planeza das seções espaciais. As medições do segundo pico sustentam perturbações adiabáticas com índice espectral próximo de hum o que caracteriza um espectro de potência invariante de escala. Estes resultados concordam com os modelos inflacionários mais populares. A altura do terceiro pico nos informa a razão entre a quantidade total de matéria pela quantidade total de fótons. Sabendo a quantidade de matéria bariônica através dos outros picos, a diferença encontrada no terceiro pico nos fornece a quantidade de matéria não-bariônica. Finalmente, como os dados indicam que as seções espaciais são muito próximas de planas, a soma de todos os parâmetros de densidade deve igualar a unidade. Porém, a soma da matéria bariônica com a não bariônica alcança apenas menos de 0,30. A conclusão que chegamos com esses dados é que aproximadamente 70% do conteúdo material é composto por algo que não gravita como matéria a qual denominamos de energia escura. O candidato à energia escura que melhor se ajusta aos dados é a constante cosmológica Λ .

¹¹³ A física da recombinação descreve o conteúdo material como um plasma de bárions e radiação. Este fluido sofre oscilações acústicas pelo jogo de força entre a atração gravitacional e a repulsão devido a pressão termodinâmica deste fluido. Associada a esta oscilação existe uma escala característica de comprimento a qual relaciona-se com a velocidade do som deste meio. A escala acústica angular é a projeção desta escala de comprimento na abóbada celeste.

Os dados mais recentes da radiação cósmica de fundo advêm dos últimos resultados da colaboração Planck que foram publicados em 2015 (PLANCK COLLABORATION, 2015a ; 2015b). Na sua forma atual, o modelo Λ CDM possui seis parâmetros livres¹¹⁴ que são determinados pelas observações. Os dados observacionais indicam novamente que as seções espaciais são muito próximas de planas ($\Omega_k < 0,005$), a matéria bariônica compõe atualmente menos de 5% do universo, a matéria escura contribui com 26% enquanto a constante cosmológica representa em torno de 70% da densidade atual do universo. O satélite Planck estendeu suas medidas para além do oitavo pico acústico o que equivale na decomposição multipolar¹¹⁵ a alcançar multipólos da ordem de $l \sim 2500$. Outro resultado valioso foi a medida da polarização da radiação cósmica de fundo. A polarização consegue distinguir contribuições de perturbações tensoriais. Essas perturbações tensoriais são interpretadas como sinais de ondas gravitacionais primordiais. Os dados obtidos concordam com a ausência de ondas gravitacionais o que possibilita descartar todos os modelos primordiais que produzam ondas gravitacionais acima de um determinado valor. Esta análise costuma ser feita a partir do índice r o qual representa a razão entre a amplitude das perturbações tensoriais pelas perturbações escalares. Os dados restringem um limite superior de $r < 0,09$. Este valor indica que caso tenha ocorrido a produção de ondas gravitacionais primordiais a sua intensidade deve ser no mínimo dez por cento menor que das perturbações escalares. A supressão relativa das ondas gravitacionais primordiais é um forte vínculo para modelos de universo primordial.

Este cenário é corroborado por vários outros levantamentos e observáveis astronômicos. O potencial de lenteamento da radiação cósmica de fundo medido pelo Planck está de acordo com os resultados dos telescópios SPT (South Pole Telescope) e ACT (Atacama Cosmology Telescope). Além disso, os valores dos parâmetros cosmológicos também concordam com medidas de distância luminosidade de supernovas do tipo Ia, como por exemplo, com o banco de dados JLA (Joint Light-curve Analysis) que atualmente é o maior conjunto de dados de supernovas.

¹¹⁴ A escolha dos parâmetros livres do modelo leva em conta vários fatores incluindo os observáveis menos sensíveis a erros sistemáticos associados ao experimento. No caso da colaboração Planck, os parâmetros escolhidos foram o tamanho angular do horizonte acústico na recombinação (θ_*), a densidade de bárions (Ω_b), a densidade de matéria escura (Ω_c), a profundidade ótica do espalhamento Thomson da reionização (τ), a amplitude das perturbações de curvatura primordiais (A_S) e o índice espectral escalar (n_s). Os outros parâmetros são derivados da evolução dinâmica do modelo.

¹¹⁵ A decomposição multipolar é um método de análise funcional para representar uma função que dependa de dois ângulos a partir de uma série infinita de funções especiais. Estas funções especiais formam uma base completa ortogonal capaz de expandir qualquer função definida sobre a superfície de uma esfera. A expansão multipolar é feita de modo que os termos de maior ordem na série forneçam progressivamente propriedades angulares mais detalhadas. As funções especiais mais utilizadas na física para a decomposição multipolar são os harmônicos esféricos.

O cenário do modelo Λ CDM também é corroborado por observações em escalas galácticas e extragalácticas. A necessidade de matéria e energia escuras manifesta-se em observações baseadas em processos físicos completamente distintos e em sistemas com escalas de tamanhos diversos. Como exemplo, podemos mencionar a necessidade de inclusão da matéria escura na descrição da radiação cósmica de fundo, na oscilação acústica de bárions, na evolução e formação das estruturas observadas, nas curvas de rotação de galáxias e no lenteamento gravitacional. A radiação cósmica de fundo envolve uma dinâmica em escalas cosmológicas enquanto que as curvas de rotação de galáxias são de escalas ordens de grandeza menor. Ademais os processos físicos subjacentes a descrição de cada um desses fenômenos são completamente distintos¹¹⁶.

Hoje em dia, a cosmologia possui muitos dados observacionais tanto de satélites quanto de telescópios astronômicos. Há um alto grau de confiança nos dados observacionais cuja quantidade e qualidade já são suficientes para possibilitar descartar modelos competitivos. A dinâmica da comunidade científica transformou-se radicalmente nos últimos trinta anos. Há um forte compromisso em respeitar os dados observacionais. A base observacional do modelo padrão é seguramente sólida embora sua aceitação coloque questões profundas sobre nosso entendimento do universo.

¹¹⁶ Para uma discussão mais detalhada da necessidade de inclusão do setor escuro veja (HAMILTON, 2014).

4 REFLEXÕES SOBRE O PROJETO DA COSMOLOGIA CIENTÍFICA

A história da filosofia nos relata que a humanidade, depois de alguns milênios de vida em sociedade, já formulou, conviveu e utilizou diversos conceitos de natureza. Não apenas nossa reflexão e estudo sistemático modificou significativamente nossa visão sobre o mundo natural, como a própria definição do que denominamos natureza sofreu inúmeras metamorfoses.

Pierre Hadot nos lembra (HADOT, 2004, p. X) do quão distante estamos hoje em dia, do mundo espiritual que alguns estudiosos, artistas e poetas viviam no início do século 19. O seu comentário destina-se a uma imagem de Apolo desvelando uma estátua da deusa Isis/Ártemis a qual simboliza a natureza. Qual cientista atual consegue operacionalizar sua pesquisa ou minimamente entender e dialogar com este conceito de natureza?

De maneira complementar, Hans-Dieter Mutschler pontua que os estoicos consideravam a natureza tanto aquilo que nos engloba, os objetos da natureza, quanto àquilo que nos fornece os valores dos objetos (MUTSCHLER, 2002). Esta visão pode ser contraposta ao projeto da ciência moderna que faz claramente uma divisão entre o mundo natural e o mundo espiritual.

Quando Galileu propõe que o livro da natureza está escrito em linguagem matemática há uma clara oposição entre o natural e o sobrenatural. Contudo, esta proposta não restringe necessariamente o estudo do mundo natural, mas diz respeito à ciência. Galileu não pretende desespiritualizar o mundo, mas estabelecer que certos fenômenos devam ser entendidos apenas a partir da ciência. A ciência moderna, cuja eficiência torna-a poderosa produtora de conhecimento, constrói apenas um recorte do mundo natural. A cosmologia faz parte do projeto de estudo da natureza, mas, ao contrário da ciência moderna, não é capaz de acomodar-se facilmente a essa dicotomia.

Neste início de século, a cosmologia configura-se como um dos ramos científicos com alto grau de investimento financeiro e de recursos humanos. Dentre as áreas da “física fundamental”¹¹⁷, a cosmologia tem se destacado por um aumento significativo de projetos científicos, uma explosão de dados observacionais e demonstra-se capaz de produzir novidades conceituais e observacionais. Não há mais, no momento, um questionamento sobre o grau de cientificidade da cosmologia.

¹¹⁷ O termo física fundamental não pressupõe uma hierarquia entre as diversas áreas da física ou das ciências, mas apenas, por falta de termo adequado, é usado para indicar linhas de pesquisa que visam o entendimento dos fenômenos naturais sem preocupar-se com possíveis aplicabilidades ou produção de tecnologias.

Entretanto, dada a sua inserção, é salutar nos perguntarmos, afinal, o que há de novo para a cosmologia relativística ser aceita como ciência natural? Como essas mudanças relacionam-se com a própria definição de cosmologia, houve uma mudança na definição de seu objeto de estudo? Teria a cosmologia adquirido um modelo padrão por apresentar respostas contundentes às nossas indagações sobre o universo?

4.1 O fim da cosmologia

Toda ciência natural necessita e desenvolve-se a partir de uma noção prévia de natureza a qual dá sentido tanto para a formulação dos problemas como para o estabelecimento das respostas válidas às suas questões formuladas. Dito de outra forma, a coerência das ciências naturais sustenta-se fortemente na escolha da metafísica utilizada nestas áreas de conhecimento. O grau e tipo de relação entre ciência e metafísica variam de acordo com o quadro conceitual construído. A ciência moderna estrutura-se a partir do paradigma reducionista e sua possibilidade de análise e reconstrução dos fenômenos naturais. Com isso, embora a metafísica seja fundamental para a ciência, há uma maleabilidade na relação entre a ciência moderna e a sua metafísica no sentido do conceito de natureza poder ser apenas parcialmente definido, isto é, há mais de uma definição de natureza compatível com a ciência moderna. Não é condição necessária, por exemplo, que haja uma unidade na natureza.

A cosmologia, por sua vez, também só solidifica-se a partir da escolha de uma metafísica adequada capaz de dar coerência e sentido para suas formulações. Entretanto, as características particulares da cosmologia tornam-na fortemente ligada à metafísica e em especial à nossa definição de natureza. Para definirmos o que é cosmologia, precisamos simultaneamente especificar o conceito de natureza e a metafísica inerente a sua formulação.

A definição de cosmologia física, entendida como prática científica, parte do programa da ciência moderna, é bem definida enquanto estudo sistemático do universo. Uma possível formulação, similar à definição oferecida por Ellis et al. a qual citamos no primeiro capítulo, assume a forma

A teoria científica da cosmologia preocupa-se com o estudo da estrutura em larga escala da região observável do universo e com todos os seus constituintes entendidos como a ontologia da física moderna.

Note que esta definição adquire consistência ao subordinarmos a cosmologia à física. Contudo, as idiossincrasias associadas ao estudo do universo fazem com que a coerência da física não seja suficiente para garantir a coerência da cosmologia física enquanto ciência natural. Todavia, supondo que as particularidades da cosmologia física sejam superáveis, a subordinação é apenas uma solução parcial por excluir por definição as questões mais fundamentais associadas à cosmologia.

A cosmologia tem por finalidade o entendimento do encadeamento de todos os fenômenos, a relação entre suas partes e o estudo de tudo que existe. A cosmologia pressupõe o entendimento do todo e não apenas da estrutura em larga escala do universo. Ao contrário do que vemos na ciência moderna, a unidade da natureza é condição de possibilidade da cosmologia. Ademais, o universo é único e singular de modo que a cosmologia tem por objeto de estudo um ente sem similares.

A cosmologia física obteve avanços impressionantes na descrição do universo os quais possibilitaram a formulação de um modelo padrão no qual somos capazes de narrar uma história consistente da evolução do universo. Porém, há uma diferença importante entre descrição e explicação.

É inquestionável que a cosmologia física tenha nos fornecido condições inéditas de descrição do universo, mas não é evidente o quanto avançamos em entendimento. Isto não significa que não tenha havido avanço algum. Com efeito, o sucesso da cosmologia física também é significativo em termos explicativos. Nosso conhecimento atual em cosmologia nos possibilita afirmar certas propriedades do universo e relacioná-las a outras áreas da ciência.

Aparentemente, o universo admite uma noção global de tempo a qual pode ser usada para estabelecer um passado bem definido para o universo. Como discutimos anteriormente, a teoria da relatividade geral modifica as noções de espaço e de tempo de tal forma que a possibilidade de um tempo global definindo um passado e um futuro não é garantida, ao contrário, deve-se entender esta propriedade do universo como particular dentre todas as possibilidades. Ademais, a flecha do tempo cósmico, associada ao folheamento da história do universo é consistente com a flecha do tempo local associada aos processos físicos nos laboratórios terrestres.

Outro ponto a ser salientado é a validade da extrapolação das leis físicas locais. Não há argumentos racionais que nos imponham a necessidade das leis físicas determinadas nos laboratórios terrestres serem válidas em todas as regiões e em todos os instantes da história do universo. O fato de podermos construir um modelo padrão da cosmologia coerente com as observações reforça a plausibilidade desta extrapolação conceitual.

Todavia, a ideia de entendimento do todo associada à cosmologia pressupõe a capacidade de propor soluções para as seguintes questões:

1. Dado o fato da existência das coisas, do que é feito o universo?
2. Se existem, quais são a estrutura e o significado da ordem manifestada no universo?
3. Na relação entre as partes do universo, qual é o lugar ocupado pelos seres humanos?
4. Qual é a origem do universo? Houve uma criação do universo?
5. Qual o papel, no contexto da ordem cósmica, das leis físicas dos fenômenos naturais?

A cosmologia distingue-se da cosmogonia por esta última preocupar-se com a maneira pela qual o mundo foi formado. A rigor, poder-se-ia argumentar que a questão quatro acima diz respeito à cosmogonia e não a cosmologia. Contudo, a cosmogonia é imprescindível para o nexo da cosmologia uma vez que seu objeto de estudo é singular. Sem a cosmogonia somos limitados à descrição e assim restritos à cosmologia física.

É evidente que não só a cosmologia física, mas qualquer ciência natural moderna é incapaz de lidar com os tipos de questões formuladas acima. A incapacidade não é meramente técnica, mas constituinte da própria definição de ciência moderna.

Isto não significa que questões existenciais não possam ser elaboradas e examinadas pela ciência e com isso devam ser relegadas à metafísica, teologia ou outra área do conhecimento humano. Contudo, nos parece correto afirmar que a noção atual de ciência é insuficiente para lidar com estas questões.

É admissível que a ciência possa ser modificada a incluir de modo consistente as formulações acima dentro de seu espectro de questionamento. Entretanto, nos parece mais plausível que os avanços futuros com relação a estes temas em cosmologia sejam oriundos de um maior desenvolvimento filosófico fundamentado por observações e dados empíricos. Ignorar o fim da cosmologia é abdicar das questões mais existenciais dos seres humanos. É trocar finalidade por término.

A cosmologia física, por sua vez, constituiu-se subordinada à ciência moderna e com isso compartilha de suas finalidades. Apesar disto, ela distingue-se das outras ciências naturais de várias formas: o seu objeto de estudo é único, há limitação intrínsecas às observações cosmológicas, etc. Nestas seções finais iremos analisar questões particulares da cosmologia e como elas são reelaboradas em termos da cosmologia física.

4.2 O objeto da cosmologia

O estabelecimento de uma determinada ciência pressupõe a especificação de seu objeto de estudo. A caracterização e determinação do que constitui o seu objeto é parte do programa de cada ciência. A física moderna estuda a matéria inanimada, suas propriedades e suas possíveis formas de interação. Cabe a esta disciplina definir quais são os constituintes fundamentais da matéria inanimada assim como os distintos estados físicos da matéria como sólido, líquido, gasoso e plasma. De maneira similar, a biologia deve ser capaz de classificar e distinguir as espécies animais e vegetais, de delimitar e caracterizar um ecossistema, etc.

O objeto de estudo da cosmologia é o universo. Um dos pontos fundamentais que a distingue das outras áreas de conhecimento é que o universo, por definição, é único. A unicidade do universo é atributo suficiente para a inviabilidade da cosmologia enquanto ciência moderna. Por um lado temos a impossibilidade de estabelecimento de leis para o universo enquanto que de outro as condições de contorno e condições iniciais assumem um atributo epistemológico distinto do que participado na ciência moderna.

Com efeito, as ciências naturais estudam as regularidades que observamos na natureza. A partir dessas regularidades surge um movimento de generalização e abstração na constituição dos tipos de entes existentes. Um tipo é especificado a partir da identificação de certas propriedades e o agrupamento de indivíduos em uma mesma classe universal. Há uma escolha das características relevantes com desvalia das contingentes, as quais são tomadas como acidentais. O caráter individual de um ente é suprimido para possibilitar o agrupamento em tipos. Cada tipo é uma referência única para uma classe de similares que não são iguais, mas destoam entre si apenas por propriedades acidentais.

A escolha das propriedades relevantes para esta classificação não é arbitrária, mas é estabelecida em conjunção à formulação das leis gerais de comportamento dos entes. As leis naturais visam descrever as regularidades dos fenômenos naturais e sua validade é sempre estipulada de acordo com os tipos existentes.

Toda a lógica da ciência moderna baseia-se na possibilidade de identificação de tipos existentes na natureza. Porém, a cosmologia interessa-se por um ente singular do qual não existe similar. O universo não constitui um tipo, pois é único. Por consequência, não somos capazes de estabelecer leis naturais para o universo. Uma lei do universo deve ser aplicável para a classe de objetos dos quais existe apenas um indivíduo. Logo, o máximo que podemos afirmar é que as características do universo são compatíveis com determinada regra, mas não

podemos testar esta lei em outros universos, o que torna esta lei do universo uma pura tautologia ou vazia de significado científico.

De maneira similar, o conceito de probabilidade também é mal definido em cosmologia. Evidentemente, podemos realizar estudos probabilísticos teóricos e observacionais com sistemas astrofísicos ou em regiões distintas do espaço-tempo. Exemplos elementares são as análises de formação de estrutura no universo e as propriedades estatísticas da radiação cósmica de fundo. Contudo não podemos fazer estudos estatísticos com o universo, pois seria necessário imaginar a existência de outros universos possíveis distintos do nosso e conjecturar as propriedades desses outros universos. Como podemos estabelecer outras formas possíveis de existência e as valorarmos estatisticamente com relação a existência de fato sem respondermos primeiramente, ou ao menos em conjunção, o por que algo existe e o modo pelo o qual ele existe?

Tome a afirmação de uma determinada propriedade do universo ser um ajuste fino (tradução do termo em inglês “fine tuning”). Acredita-se que a ciência deva eliminar esse tipo de situação por representar uma configuração artificial e irrealizável. Um ajuste fino indicaria um defeito do modelo descritivo. Porém, por detrás deste raciocínio há a hipótese de que as coisas poderiam ser diferentes. Ademais, a probabilidade de ser como descrito pelo ajuste fino é diminuta se comparada com as outras eventuais possibilidades. Para nós, é evidente que sem uma classe de fenômenos e tipos para os quais possamos determinar leis naturais, qualquer afirmação de ajuste fino é integralmente uma declaração de valor e por isso deve ser debatida no contexto da metafísica e não da experiência laboratorial.

Vale ressaltar que esta limitação não está associada às dimensões do universo. Não é pela incapacidade experimental da observação cosmológica, mas pela unicidade do objeto de estudo. Não podemos repetir experimentos com um indivíduo singular, pois em princípio não há propriedades contingentes em um indivíduo singular¹¹⁸. Repetir exatamente uma determinada interação, por mais idêntica que seja nossa ação sobre o indivíduo, não pode ser considerado como uma repetição de um experimento, pois o indivíduo singular irá encontrar-se cada vez em um estado distinto. Logo não é uma repetição experimental, mas uma nova experiência com o mesmo indivíduo.

¹¹⁸ A separação das propriedades de um indivíduo em fundamentais e contingentes pressupõe a possibilidade de identificarmos este indivíduo com pelo menos algum tipo. Cada indivíduo pode ser associado a mais de um tipo desde que a tipologia não seja excludente. Uma partícula não pode ser ao mesmo tempo fermiônica e bosônica, mas pode ser simultaneamente um férmion e um lépton. As propriedades fundamentais são aquelas que o classifica de acordo com a tipologia, enquanto que as contingentes são as propriedades que o distingue de seus similares. Com um único indivíduo não há similares que compartilhem de suas propriedades fundamentais e assim todas as propriedades de um indivíduo singular são essenciais para sua caracterização.

Outro aspecto particular da cosmologia diz respeito às condições iniciais do universo. Nas ciências naturais, as condições iniciais de um determinado sistema não são necessariamente arbitrárias, mas há, em geral, uma ampla gama de possibilidades. Pode ser o caso do sistema ser vinculado e com isso haver relações de restrição conectando alguns dos graus de liberdade do sistema. Isso reduz a dimensionalidade dos graus de liberdade do sistema. De qualquer forma, a cinemática do sistema estipula o espaço amostral potencialmente acessível pelo sistema. As condições iniciais são então quaisquer das configurações deste espaço amostral permitido pela cinemática do sistema.

A hipótese determinística da ciência moderna assume que a evolução do sistema pode ser estabelecida caso conheçamos as leis que governam o sistema e suas condições iniciais em um determinado instante. Supondo o conhecimento das leis, há uma relação unívoca entre condições iniciais e evolução do sistema. Apesar desta relação de unicidade, as condições iniciais costumam ser consideradas como contingentes na ciência moderna, pois somos capazes de manipulá-las arbitrariamente. De fato, é parte do estudo sistemático de um sistema tentar operar experimentos em todo o seu espectro qualitativamente distinto de condições iniciais.

Na cosmologia a situação é novamente distinta por seu objeto de estudo ser singular e não sermos capazes de realizar experimentos com o universo, mas apenas observá-lo. Em cosmologia as condições iniciais não são contingências arbitrárias, mas assumem relevância ontológica por determinarem como o mundo é. A cosmologia exige uma formulação teórica de condições iniciais. Em cosmologia, conhecer como o mundo é hoje pressupõe conhecimento de suas condições iniciais. A teoria de condições iniciais, caso seja possível construir uma formulação científica consistente de tal teoria, seria parte da cosmogonia.

A cosmologia física evita toda a problemática mencionada acima através de uma reformulação do seu objeto de estudo. Ela não estuda o universo, mas apenas a estrutura em larga escala do universo observável¹¹⁹. O universo observacional é por definição o volume cuja borda é a superfície mais distante da qual temos acesso observacional. Não temos nenhuma informação para além do universo observável.

¹¹⁹ O universo observável corresponde ao volume compreendido a uma superfície bidimensional compacta definida como a superfície mais distante da qual temos acesso observacional. Isto significa que a informação emitida por esta superfície nos chega na Terra, por definição, pela primeira vez agora. Esta definição é distinta da região causalmente conectada a nós pois visa definir apenas o volume observável. Pode acontecer, como é o caso do modelo padrão da cosmologia, do universo observável ser limitado por questões físicas e não apenas pela estrutura causal do universo. Isso ocorre, pois, no passado da história do universo, há uma superfície a partir da qual o universo torna-se opaco para radiação eletromagnética impossibilitando nosso acesso observacional. Se conseguirmos detectar neutrinos primordiais ou ondas gravitacionais primordiais, nosso universo observacional será expandido para a superfície limite de observação destes remanescentes.

Portanto, o objeto de estudo da cosmologia física é uma parte do objeto da cosmologia, parte esta que não sabemos qual a sua relação com o todo. Não há na ciência moderna nenhuma formulação capaz de estudar a totalidade. A totalidade escapa à ciência como a conhecemos. Ademais, ainda que evite esta questão, a cosmologia física é distinta das ciências naturais.

Apesar de a cosmologia física comprometer-se apenas com o universo observável, surgem dificuldades observacionais particulares desta área de atuação. O universo observável é imenso tanto no espaço quanto no tempo. É verdade que esta imensidão solicita desenvolvimento tecnológico compatível com os objetivos observacionais desejados, mas, de fato, a necessidade tecnológica, ao invés de destoar, é uma das características que a cosmologia física compartilha com as ciências naturais. O ponto que a distingue é nossa limitação observacional.

A primeira limitação é evidente e caracteriza-se por nossa incapacidade de experimentar com o universo. Podemos apenas observar passivamente os fenômenos astronômicos, mas não podemos interagir com os sistemas nem muito menos manipulá-los.

Outro ponto relevante é que nós somos capazes de observar o universo apenas de um único ponto, o ponto de vista da Terra. Toda informação que temos a respeito do universo observável limita-se ao nosso cone de luz passado¹²⁰. Temos acesso apenas a um subespaço tridimensional do espaço-tempo correspondente a uma folha com apenas duas dimensões espaciais. Um dos desafios da cosmologia é a reconstrução das propriedades do universo a partir dos dados observacionais restritos ao nosso cone de luz passado. George Ellis e colaboradores mostraram que, se considerarmos condições perfeitas de observação, os dados observacionais contidos no nosso cone de luz passado são necessários e suficientes para determinar as propriedades geométricas e a distribuição de matéria do cone de luz passado (ELLIS, 1985). Porém, não podemos extrapolar esta reconstrução para todo o espaço-tempo.

John B. Manchak mostrou¹²¹ que os dados no cone de luz passado de um observador ideal não são suficientes para determinar as propriedades globais do espaço-tempo. Espaços-tempos distintos podem possuir o mesmo subespaço associado ao nosso cone de luz passado. Isto implica em uma subdeterminação intrínseca à cosmologia.

¹²⁰ Nosso cone de luz passado corresponde a superfície expandida por todas as trajetórias nulas emanante de nós e dirigidas para o passado. Dito de outra forma, o cone de luz passado corresponde a todos os pontos que podem ser conectados a nós por uma trajetória da luz.

¹²¹ Os resultados de John Byron Manchak foram publicados em (MANCHACK, 2009; 2011). Estes resultados foram baseados nos trabalhos (GLYMOUR, 1977; MALEMENT, 1977).

Nossa condição observacional nos impossibilita determinar as propriedades do universo¹²². O único procedimento possível para a cosmologia é testar a consistência dos modelos propostos. Ademais, a escolha do modelo descritivo requer argumentos e princípios filosóficos os quais são intestáveis por princípio. A plausibilidade desses argumentos filosóficos deve, novamente, ser estabelecida a partir de valores epistemológicos e metafísicos.

4.3 Relação entre o Macro- e Microcosmo

Com o desenvolvimento da ciência moderna e sua progressiva institucionalização, nossa descrição da natureza passou a ser compartimentada em distintos setores. Os objetos de estudo de cada disciplina são complementares. Assim, enquanto a física estuda as partículas elementares e a dinâmica dos corpos materiais, a química analisa as reações entre elementos químicos e a síntese de compostos moleculares, e por sua vez a biologia estuda os organismos vivos. Cada um desses setores representa uma manifestação diferente da natureza. Contudo, estas divisões são arbitrárias no sentido de não serem características da natureza mas recortes que fazemos para facilitar nossa descrição do mundo.

O reducionismo assume a possibilidade de análise e reconstrução da complexidade existente na natureza. O sucesso e a eficácia da ciência moderna nos mostra que de fato a natureza permite este tipo de decomposição em subsistemas. Neste contexto, uma explicação de um fenômeno pode ser entendida como a capacidade de reconstruí-lo a partir da identificação de suas causas fundamentais. Na visão reducionista, a natureza estrutura-se em níveis hierárquicos com as estruturas da física ocupando os níveis mais fundamentais. Um exemplo deste tipo de estrutura hierárquica seria começar pela física de partículas elementares e continuar em escala ascendente pela física nuclear, física atômica, química molecular, bioquímica, biologia celular e seres vivos. Assume-se que os níveis inferiores são mais fundamentais no sentido de apresentarem as relações causais básicas da natureza enquanto os níveis superiores devem ser reduzidos¹²³ aos inferiores.

¹²² Para uma discussão mais detalhada sobre as limitações específicas sobre a subdeterminação da geometria do espaço-tempo pelos dados observacionais veja (ELLIS, 2007).

¹²³ A noção de redução entre níveis não é unívoca e muda de acordo com a proposta defendida. Tipos possíveis de redução são as reduções de teorias, nas quais os conceitos e leis de uma determinada teoria são reescritas em

Cada nível hierárquico possui sua estrutura interna causal. Porém, pode existir uma estrutura causal entre níveis. A explicação a partir dos níveis mais fundamentais é conhecida como explicação de baixo para cima (“bottom-up” em inglês) enquanto que a explicação de cima para baixo (“top-down” em inglês) representa uma influência causal dos níveis superiores nos inferiores. O reducionismo assume que o único tipo de estrutura causal entre níveis existente na natureza é do tipo de baixo para cima. Ademais, a hierarquização do reducionismo não permite independência dos níveis superiores. Não pode haver novidades genuínas nos níveis superiores, caso contrário o processo de redução seria por definição inviável.

A estrutura em níveis não pressupõe nenhuma relação de escala dimensional, mas subentende-se um aumento de complexidade. Por isso, não é evidente a posição da cosmologia neste quadro hierárquico. Se considerarmos a descrição dos objetos astrofísicos que caracterizam a composição do universo somos induzidos a posicionar a cosmologia física junto da física na base da hierarquia. Contudo, o universo estabelece o ambiente que engloba todos os outros possíveis níveis e pode, em princípio, afetar os fenômenos locais.

Suponha que haja um efeito de causação do tipo de cima para baixo atuando em um determinado nível N . Os efeitos deste tipo de causação não podem ser descritos a partir da interação das partes constituintes deste nível N . Caso fosse possível, seria uma causa interna deste nível e não do tipo de cima para baixo. Logo, a descrição do comportamento das partes de N é influenciada por uma ação externa estranha às partes de N . Um observador externo é capaz de identificar tal tipo de causa de cima para baixo ao analisar cuidadosamente a influência dos níveis superiores sobre o nível N . Contudo, poderíamos nos perguntar se uma das partes de N seria capaz, estando restrita ao interior de N e sem possibilidade de deslocar-se para fora e identificar os níveis superiores, determinar a existência de tal tipo de causação. Esta questão é particularmente importante para a cosmologia e pode eventualmente estar relacionada ao problema da energia escura.

O modelo padrão da cosmologia necessita da inclusão de dois fluidos que se manifestam apenas através das propriedades geométricas do espaço-tempo. Um desses elementos é a energia escura que representa um fluido homogêneo e isotrópico de densidade de energia positiva e pressão negativa. Apesar da expansão do universo, a energia escura mantém a sua pressão e densidade de energia constantes. Não há elementos conhecidos nos laboratórios terrestres que compartilhem dessas características. A inclusão da energia escura

termos de uma outra, e as reduções ontológicas que identificam as propriedades dos níveis superiores com propriedades dos níveis inferiores.

na descrição dinâmica do universo é colocada ad hoc para compor o quadro conceitual do modelo padrão da cosmologia, mas não guarda nenhuma relação com qualquer das outras partes do modelo.

Se for mostrado que a causação do tipo de cima para baixo possa ser incluída na descrição dinâmica de um sistema físico, então a energia escura talvez possa ser associada a este tipo de causa. Neste caso, a energia escura não seria um ente mais apenas um modo de incluir um novo tipo de causa no sistema descritivo da cosmologia física.

Outra maneira possível de o universo influenciar a dinâmica local é através da dependência das leis físicas locais com as propriedades do universo. George Ellis argumenta que o universo estabelece o ambiente no qual se manifestam todas as leis naturais. Neste sentido, o universo funciona como condição de existência e determina as condições de contorno e possibilidades das leis físicas.

Um dos princípios fundadores da teoria da relatividade geral é o chamado princípio de Mach. A ideia básica deste princípio, a saber, que a origem da inércia local dos corpos advém da distribuição de toda a matéria no universo, é um exemplo de como a configuração do universo pode influenciar a física local.

Outra possibilidade é considerar que as constantes da natureza variam com as propriedades do espaço-tempo. Neste caso, as leis da física mudam de acordo com as regiões do espaço-tempo. Se entendermos que o universo configura o pano de fundo no qual ocorre toda a descrição física então é razoável pensarmos que as próprias leis físicas dependam do contexto do universo no qual estão inseridas. Porém, até o momento, os testes observacionais não detectaram nenhuma variação significativa das constantes fundamentais da natureza (UZAN, 2011; BARROW, 2003; COWIE, 1995; WILL, 1979).

Por fim, gostaríamos de comentar brevemente a possibilidade inversa. Ao invés de considerarmos a influência do universo sobre a física local, podemos investigar a possibilidade das propriedades do universo serem de acordo com nossa observação local.

Quando discutimos a relação entre a flecha do tempo local, determinada pelos processos termodinâmicos, e a flecha do tempo global do modelo padrão da cosmologia, mencionamos os argumentos de Thomas Gold de associar a irreversibilidade dos processos termodinâmicos com a expansão do universo.

Similarmente, a proposta do princípio antrópico declara uma conexão entre as propriedades globais do universo e a existência de seres humanos. Mais precisamente, este princípio é uma tentativa de incluir o fato inquestionável de nossa existência como informação na descrição do universo. Ele não é contrário ao princípio copernicano, o qual

afirma que nós não ocupamos um lugar privilegiado no universo, mas é proposto como um adendo ao reconhecer que o surgimento de vida necessita de condições favoráveis para o seu desenvolvimento. Não devemos assumir um lugar privilegiado para os seres humanos, mas também não podemos considerar que este lugar seja qualquer.

O princípio antrópico visa conciliar as propriedades do universo com a nossa existência. Argumenta-se que as observações cosmológicas só são corretamente interpretadas se incluirmos a necessária condição destas propriedades serem compatíveis com a existência de seres humanos. Assim, condições que poderiam parecer extremamente improváveis adquirem altos graus de probabilidade. Nesta lógica, certas propriedades podem inclusive adquirir estatuto de necessidade observacional.

Há três formulações do princípio antrópico. Seguiremos as definições formuladas por John D. Barrow e Frank J. Tipler¹²⁴ em *The Anthropic Cosmological Principle*. A formulação menos propositiva é denominada de princípio antrópico fraco a qual afirma

“Weak Anthropic Principle (WAP): The observed values of all physical and cosmological quantities are not equally probable but they take on values restricted by the requirement that there exist sites where carbon-based life can evolve and by the requirement that the Universe be old enough for it to have already done so.”
(BARROW, 1986, p.16)

Há duas possíveis leituras para este princípio. Uma possibilidade é reconhecermos a compatibilidade entre os dados cosmológicos com nosso conhecimento local da natureza. A presença de elementos químicos pesados na Terra nos indica que o sistema solar e em particular o Sol não pode ser uma estrela de primeira geração. Além disso, a geologia nos fornece uma idade mínima para a existência da Terra. Estas informações só podemos ser minimamente compatíveis com os dados cosmológicos caso o universo exista há pelo menos uns 10 bilhões de anos.

Uma leitura mais interessada utiliza o princípio antrópico fraco como mecanismo de ponderação da análise dos dados astronômicos. Ele pode ser entendido como uma tentativa de incluir um viés nos dados cosmológicos a partir de um efeito de seleção que é nossa existência. Neste sentido, propriedades e configurações que não produzam as condições adequadas para a existência de seres humanos são descartadas enquanto que as favoráveis são tomadas como necessárias.

Porém, mesmo impondo certas condições necessárias ao universo, a interpretação usual da teoria de evolução de Darwin, a qual evita qualquer caráter teleológico, não garante a

¹²⁴ “Princípio Antrópico Fraco: os valores observados de todas as quantidades físicas e cosmológicas não são igualmente prováveis, mas assumem valores condicionados pela exigência de existir lugares aonde vida baseada em carbono possa evoluir e pela exigência do universo ser velho o suficiente para que isto já tenha ocorrido.”

existência de seres humanos. Com efeito, de certo ponto de vista, pode-se argumentar que o conjunto de mundos capazes de gerar observadores é estatisticamente pequeno. O raciocínio baseia-se na correlação entre as constantes fundamentais da natureza e a possibilidade de surgimento de seres humanos. Brandon Carter argumenta que a razão entre constantes adimensionais da natureza assume valores atípicos, o que necessitaria de explicação (CARTER, 1974). Por esse motivo, introduz-se a formulação do princípio antrópico forte¹²⁵

“Strong Anthropic Principle (SAP): The Universe must have those properties which allow life to develop within it at some stage in its history.” (BARROW, 1986, p.21)

Esta formulação tem uma conotação fortemente metafísica e teleológica. Além de ser intrinsecamente intestável, o princípio antrópico forte coloca os seres humanos como condição de existência do universo. Os esforços argumentativos na mesma direção do princípio antrópico forte desdobrou-se no princípio antrópico final. Este último argumenta a necessidade de manutenção do registro da existência do surgimento de vida no universo. Ele pode ser formulado como¹²⁶

“Final Anthropic Principle (FAP): Intelligent information-processing must come into existence in the Universe, and, once it comes into existence, it will never die out.” (BARROW, 1986, p.23)

O princípio antrópico, independente de sua formulação, produziu um longo debate na comunidade científica, porém não há consenso se este é um princípio válido do ponto de vista científico. A ciência moderna excluiu toda forma de causa que não seja eficiente e, em particular, argumentos teleológicos são vistos pela comunidade científica como violação da prática científica. Todavia, o princípio antrópico é passível de críticas relacionadas ao viés conceitual de sua formulação. Em que grau somos capazes de identificar as condições mais gerais possíveis necessárias para a existência de vida inteligente? Independente do seu valor epistêmico, a inclusão do princípio antrópico requer uma reformulação do nosso conceito de ciência a qual pode vir a ser prolífera dada a riqueza criativa da natureza.

¹²⁵ “Princípio Antrópico Forte: O universo deve ter aquelas propriedades as quais permitem a vida desenvolver-se no seu interior em algum estágio de sua história.”

¹²⁶ “Princípio Antrópico Final: Procedimento de informação inteligente tem que ter surgido no universo, e, uma vez que tenha surgido, nunca mais será extinto.”

4.4 Estatuto ontológico dos entes astrofísicos

Toda formulação de uma teoria científica requer por consistência a definição de sua ontologia. A classificação dos entes teóricos baseia-se em suas propriedades, as quais são determinadas e mensuradas à exaustão. Na física moderna, a classificação das partículas em férmions e bósons identifica dois tipos de entes com comportamentos completamente distintos. Os férmions possuem spin semi-inteiro enquanto que os bósons têm spin inteiro¹²⁷. O elétron tem spin $\frac{1}{2}$ e por isso respeita a estatística fermiônica.

A física moderna entende que o valor de spin $\frac{1}{2}$ é uma propriedade do elétron, pois qualquer experimento para medir seu spin sempre retorna este mesmo valor¹²⁸. Pode-se argumentar que o raciocínio mais apropriado seria o inverso, na verdade, elétron é apenas um nome dado para o caso quando o resultado da medida fornece valor de spin $\frac{1}{2}$.

Entretanto, esse argumento só se sustenta se ampliado, pois existem outras partículas na natureza com spin $\frac{1}{2}$ que não são elétrons. O elétron distingue-se de um próton pelos valores de sua massa e de sua carga. Apenas os elétrons possuem valores específicos de certas propriedades¹²⁹.

O que é surpreendente é a insistência na resposta experimental do elétron em sempre retornar os mesmos valores para estas quantidades. Apesar disto, há filósofos antirrealistas¹³⁰ que afirmam não haver nenhum raciocínio epistemológico capaz de nos garantir que essas propriedades sejam de fato do elétron ao invés de ser apenas um modo conveniente de descrevermos os fenômenos naturais. Mais do que isso, argumentam os antirrealistas, não podemos nem ao menos garantir a existência de tal ente.

O debate sobre o realismo tanto de teorias quanto dos entes teóricos é sutil e foge a

¹²⁷ O spin e a massa de uma partícula elementar são associados aos autovalores dos operadores de Casimir do grupo de Poincaré. Este grupo de simetria está associado às simetrias do espaço-tempo plano da relatividade restrita. Ser autovalor do operador de Casimir deste grupo implica na invariância pela ação deste grupo. Isto significa que todos os observadores inerciais da relatividade restrita medirão o mesmo valor de spin e de massa para cada uma das partículas elementares. Esta é uma condição necessária para a classificação das partículas elementares respeitar o princípio da relatividade, que afirma a equivalência dos observadores inerciais.

¹²⁸ O valor do spin de uma partícula é sempre o mesmo embora a projeção do spin possa mudar a cada medida.

¹²⁹ As partículas elementares são classificadas por cinco números quânticos: massa, spin, carga, sabor e cor. As duas primeiras são associadas às simetrias do espaço-tempo, enquanto que as três últimas são autovalores dos operadores associados a simetrias internas das interações fundamentais.

¹³⁰ Um exemplo paradigmático de antirrealista nos tempos atuais é o filósofo Bas C. Van Fraassen (VANFRAASSEN, 1980).

perspectiva de nossa discussão atual. O ponto relevante que pretendemos abordar é se as idiosincrasias da cosmologia tornam os entes astrofísicos mais frágeis às críticas antirrealistas ou se podemos considerar a existência de uma galáxia espiral equivalente a existência de um elétron. Mais precisamente, há duas questões distintas. Existe uma taxonomia própria da astronomia que consiga agrupar os objetos astrofísicos em tipos naturais? A cosmologia é capaz de identificar entes genuinamente novos nunca antes observados nos laboratórios da Terra?

A classificação dos objetos astronômicos é baseada nas propriedades estruturais dos objetos astrofísicos. O agrupamento em tipos distintos é constituído de modo a separar as propriedades estruturais necessárias para explicar o comportamento desses objetos. Como observa Stéphanie Ruphy¹³¹

“[...]stellar classifications are representative of what many taxonomic enterprises are about in science today, that is, coming up with kind-membership conditions that define epistemically fruitful groupings of entities whose diversity is revealed (or even created) by scientific investigation, rather than trying to discover the hidden essence of antecedently recognized kinds.” (RUPHY, 2010, p.1110)

A taxonomia astronômica segue os mesmos preceitos das ciências naturais, nas quais o objetivo principal é identificar as propriedades e os parâmetros mais relevantes¹³² para a adequada classificação dos tipos de objetos.

Durante um longo período, a taxonomia astronômica baseou-se apenas nas características observadas na faixa visível do espectro eletromagnético. Contudo, com o desenvolvimento tecnológico e o acesso a outras faixas do espectro eletromagnético surgiram novas formas de classificação. As propriedades dos objetos astrofísicos são díspares em diferentes faixas do espectro. Com isso, os novos sistemas de taxonomia criados dependem significativamente da faixa de frequência observada. Ademais, Ruphy observa que os parâmetros estruturais das estrelas variam continuamente, o que produz vagueza e uma classificação dependente de resolução. Ruphy argumenta ser impossível definir tipos infimicos de estrelas (“infimic types”) em analogia ao conceito de espécies infimicas¹³³, as quais não possuem subespécies e com isso são especificadas em definitivo. E, por último, a

¹³¹ “[...]as classificações estelares são representativas do que constitui muitas iniciativas taxonômicas na ciência de hoje, ou seja, criar condições de classes de tipos que definem agrupamentos de entes epistemologicamente fecundos cuja diversidade é revelada (ou mesmo criada) pela investigação científica, ao invés de tentar descobrir a essência escondida dos tipos reconhecidos no passado.”

¹³² A relevância de uma propriedade ou de um parâmetro não é um conceito univocamente bem definido. A escolha do significado de relevância de uma propriedade relaciona-se inclusive com o conceito de essência e ao debate monismo versus pluralismo. A única exigência que fazemos é atrelar relevância à utilidade descritiva dos fenômenos naturais.

¹³³ O conceito de espécie infimica é extraído da definição advinda de Brian Ellis (ELLIS, 2002, p.57).

taxonomia estelar apresenta mais uma dificuldade por ser baseada em propriedades transitórias e, por isso, muda de categoria ao longo de sua evolução.

A taxonomia estelar constitui-se fortemente associada ao interesse epistêmico dos fenômenos estelares. Uma mesma estrela participa de várias classificações de acordo com a faixa do espectro eletromagnético usado para definir a taxonomia. Além disso, ao longo da evolução estelar, uma mesma estrela também muda de classe. Esta situação é oposta ao caso da química na qual a carga nuclear é a propriedade estrutural determinante para os processos químicos.

Devido às características citadas, Ruphy conclui que os tipos de estrelas utilizados pela comunidade científica não podem ser entendidos como tipos naturais no sentido essencialista, pois eles não obedecem a pelo menos duas premissas, a saber, os tipos estelares não possuem demarcações bem definidas e as estrelas pertencem a mais de um tipo estelar, além de mudarem de tipo com sua evolução. A classificação não é objetiva, mas dependente das questões científicas de fundo que em última análise são a motivação original da criação da classificação.

Uma generalização da análise desenvolvida por Ruphy para incluir as outras estruturas astronômicas parece seguir a mesma linha de raciocínio. A classificação das galáxias, aglomerados de galáxias e filamentos também é baseada em propriedades estruturais e manifesta as mesmas características observadas para o caso estelar. Apesar de ser ainda necessário um estudo minucioso de cada um desses tipos astronômicos, os argumentos de Ruphy indicam que nenhum dos tipos utilizados em astronomia foge à demarcação interessada de cada comunidade científica.

Objetos compactos como anãs brancas e estrelas de nêutrons escapam das críticas citadas. Em contrapartida, poder-se-ia argumentar que os objetos compactos também não constituem tipos naturais, pois são indivíduos ao invés de tipos. Este tipo de argumento é análogo à crítica que considera as espécies biológicas como indivíduos ao invés de tipos naturais. Joseph LaPorte sustenta uma posição contrária na qual a identificação das propriedades das espécies é suficiente para definirmos os tipos a elas associadas (LAPORTE, 2004, p.14). Se for possível entender os tipos da classificação astronômica como tipos naturais, nos parece evidente que por hora os candidatos mais promissores são os objetos compactos.

Outro ponto relevante para a ontologia da astronomia diz respeito ao grau de confiança que podemos ter na descrição do conteúdo material do universo. A teoria da relatividade geral relaciona as propriedades da estrutura geométrica com as propriedades do conteúdo material

que permeia o espaço-tempo. Uma vez que o conteúdo material é fonte das equações dinâmicas da gravitação, há vínculos entre as propriedades geométricas e as propriedades da matéria. Todavia, a não-linearidade das equações da relatividade geral torna esta relação subdeterminada possibilitando inclusive que a matéria não compartilhe das mesmas simetrias da geometria.

O modelo padrão da cosmologia pode ser entendido como o cenário teórico que atualmente está em melhor acordo com os dados observacionais. O sucesso observacional do modelo padrão exige a inclusão do setor escuro composto pela energia escura e a matéria escura. E ao contrário do que se poderia pensar, os componentes escuros são predominantes na dinâmica e nas características do universo. Atualmente, toda a matéria conhecida catalogada nos laboratórios terrestres corresponde a apenas 4% da densidade total do universo. Torna-se, assim, urgente estabelecermos ou refutarmos a possibilidade de um modelo cosmológico identificar novos constituintes da matéria.

Em cosmologia, como em astrofísica, não somos capazes de manipular os sistemas físicos. Nossos dados são adquiridos apenas pela observação passiva com uso de telescópios e satélites. Por conseguinte, não podemos seguir uma linha argumentativa baseada na proposta de Hacking em estabelecer a realidade dos entes a partir do manuseio experimental e da intervenção na natureza. Entretanto, talvez haja um caminho possível para o realismo de entes astrofísicos através da composição dos argumentos de Nancy Cartwright e de Dudley Shapere.

Cartwright alinha-se com Hacking ao considerar que teorias científicas não representam verdades sobre a natureza, mas defende a realidade dos entes teóricos. Porém, enquanto Hacking argumenta pelo manuseio e interferência, Cartwright sustenta sua argumentação pela relação causal das explicações científicas.

Uma explicação teórica é em geral redundante no sentido de existir, em princípio, mais de uma teoria capaz de explicar de maneira igualmente satisfatória os fenômenos observados. Contudo, Cartwright defende que uma descrição causal só é aceita como explicação de um fenômeno quando não há explicações alternativas. Uma descrição causal não sofre de redundâncias como apresentam as explicações teóricas. Ademais, o estabelecimento da causa de um efeito pressupõe características internas à própria explicação¹³⁴

“Our belief in theoretical entities is generally founded on inferences from concrete

¹³⁴ “Nossa crença em entes teóricos é geralmente fundamentada em inferências a partir de efeitos concretos para causas concretas[...] O que é especial com relação à explicação por entes teóricos é ser uma explicação causal, e a existência é uma característica interna das afirmações causais.”

effects to concrete causes[...] What is special about explanation by theoretical entity is that it is causal explanation, and existence is an internal characteristic of causal claims.” (CARTWRIGHT, 1993, p.93)

A explicação de um efeito a partir de sua causa pressupõe um componente existencial que garante a existência da causa. Se uma explicação causal baseia-se na ação de um determinado ente teórico, aceitar o desencadeamento causal pressupõe aceitar a existência do ente teórico.

A dificuldade inerente à aplicação deste princípio em cosmologia é justamente a condição em estabelecer sem redundância a explicação causal de um determinado fenômeno. Um processo exaustivo de manipulação e controle laboratorial é regularmente eficiente em eliminar este tipo de redundância, o qual nos falta em cosmologia.

Uma alternativa à manipulação para a cosmologia é procurar por sistemas astrofísicos regidos por processos físicos distintos. Caso um determinado ente teórico participe em diversos processos físicos sistematicamente com uso de um mesmo poder causal, torna-se possível argumentarmos que esse poder causal é de fato do ente e não um artifício do modelo descritivo. Note que este raciocínio pressupõe a identificação dos processos físicos relevantes e sua adequada descrição, ou seja, pressupõe um alto grau de confiança em nossas observações astronômicas.

Podemos identificar mais de um significado para o termo observação os quais sugerem um desacordo entre seu significado na filosofia e o seu uso corrente nas ciências e em particular na astronomia. Dudley Shapere aborda essa questão a partir de um estudo detalhado sobre o caso dos neutrinos solares. Seu ponto de partida é notar a diferença nas afirmações de filósofos e astrofísicos (SHAPER, 1982). Enquanto os primeiros afirmam a impossibilidade de observarmos o interior do Sol, o que é um argumento minimamente plausível, os astrofísicos afirmam que os neutrinos são a única forma de observarmos diretamente o interior das estrelas. Shapere analisa se esta discrepância advém de um uso distinto do mesmo termo ou se há de fato um desacordo epistemológico sobre o procedimento de observação científica.

Para este autor, o uso feito por filósofos do termo observação tem tradicionalmente dois aspectos distintos. Por um lado, a observação está intimamente ligada à percepção enquanto que, por outro, há um aspecto epistêmico associado à aquisição de conhecimento, ou no reforço à confiança previamente adquirida. A tradição empirista argumenta que nosso conhecimento advém de nossa experiência e por isso ela identifica estes dois aspectos. Ao contrário, a ciência moderna distingue claramente percepção de obtenção de conhecimento e em geral advoga pela eliminação do uso da percepção por não ser um método confiável de aquisição de conhecimento.

A análise de Shapere avança com a divisão da situação observacional em três etapas, as quais ele designa por *teoria da fonte*, *teoria da transmissão* e *teoria do receptor*¹³⁵. Como o próprio autor admite, esta separação é feita por conveniência, pois esses três componentes regularmente misturam-se sem possibilitar uma separação que não seja arbitrária. Shapere desenvolve em cada uma dessas três etapas uma análise cuidadosa do conhecimento científico, respectivamente do objeto emissor, no caso a astrofísica do Sol, do conhecimento dos fenômenos possíveis ao longo do trajeto de propagação da informação da fonte até nós, e finalmente dos processos físicos e químicos envolvidos no aparato experimental que funciona como receptor da informação.

Há dois pontos particularmente importantes na proposta de Shapere que gostaríamos de destacar. Um diz respeito ao conceito de observação, enquanto que o outro é mais abrangente e propõe uma releitura da prática científica.

O olho humano consegue enxergar apenas uma faixa diminuta de todo o espectro eletromagnético. Essa característica perceptiva está associada à nossa adaptação como mamíferos diurnos habitantes da Terra. Não obstante, aparatos experimentais são receptores tanto do espectro visível como de outras frequências que o olho humano não apreende. Assim, o olho humano é um órgão capaz de capturar um tipo específico de informação, ondas eletromagnéticas, a qual não se restringe à faixa do visível. Do ponto de vista da ciência, o olho humano pode ser entendido como um receptor que trabalha apenas na faixa do visível, enquanto que os outros receptores eletromagnéticos são uma generalização da noção de receptor de luz.

Shapere argumenta por uma generalização ainda mais ampla do conceito de receptor. A generalização é baseada na existência de outros tipos de interação fundamental da natureza, a saber, a força gravitacional¹³⁶, a força fraca e a força forte¹³⁷

“[...] an ‘appropriate receptor’ can now be understood in terms of the instrument which is able to detect the presence of such an interaction, and therefore of the entities interacting according to the precise rules or laws of current physics.”

¹³⁵ O termo receptor deve ser entendido neste contexto como sinônimo de detector. A predileção do autor por receptor ao invés de detector advém da origem etimológica dos termos. Detector carrega consigo o significado de que algo está sendo descoberto ou revelado, enquanto que receptor indica que algo está sendo capturado ou interceptado.

¹³⁶ A rigor, a relatividade geral argumenta pela inexistência da força gravitacional, mas mantém a noção de interação entre a matéria e a estrutura geométrica do espaço-tempo. Optamos por manter a menção do autor por achar que o desmembramento da gravitação das outras forças fundamentais não trará nenhum ganho epistemológico ao argumento de Shapere.

¹³⁷ “[...]um ‘receptor adequado’ pode agora ser entendido como o instrumento o qual é capaz de detectar a presença de tal interação e assim das entidades interagindo de acordo com as regras precisas e leis correntes da física.”

(SHAPERRE, 1982, p.506)

As leis da física estabelecem o que pode ser considerado como receptor, mas também estipula qual é o tipo de dado que deve ser considerado como informação¹³⁸

“And the laws of current physics (the laws of the relevant type of interaction) also govern the sense in which that ‘information’ counts as information: that is, how, and the extent to which, and the circumstances under which, the receptor-information can be used by us to draw conclusions about the source.” (SHAPERRE, 1982, p.506)

Esta noção de observação científica depende fortemente de nosso conhecimento teórico sobre as interações da natureza. Neste sentido, esta proposta é uma afirmação positiva da relação entre teoria e experimento. Porém, o fato da observação ser impregnada de teoria (‘theory-laden’) é usualmente entendido em filosofia como um alerta para desconfiar das conclusões tiradas dos experimentos.

Shapere propõe uma releitura da presença de teoria nas observações fazendo uma distinção do tipo de conhecimento teórico introduzido nas observações. Para ele, o importante é que a observação seja isenta de inferências. As inferências são entendidas como argumentos adicionados ou sobrepostos às observações. Elas são conectadas com raciocínios e conclusões das quais o conhecimento atual da ciência atribui razão particular para serem questionadas. Há necessariamente incertezas atreladas às inferências em oposição ao grau de confiança que temos nas observações. A possível consistência desta reformulação está intimamente ligada à visão de ciência do autor. A ciência é vista a partir de uma perspectiva dinâmica onde, em cada etapa, as definições de observação, informação e conhecimento são atualizadas de acordo com o estatuto momentâneo de conhecimento¹³⁹

“The employment of background information, far from being a barrier to the acquisition of knowledge about nature, is the means by which such further information comes to be attained.” (SHAPERRE, 1982, p.516)

de maneira similar¹⁴⁰

“The fact is that scientists do build on what they have learned to make inferences even in cases where they cannot lay hands on the entities about which the inferences are made; they use what they have already found out – whether by interfering actively or passively observing – to probe further. Surely this is a most important aspect of the scientific enterprise.” (SHAPERRE, 1993, p.148, *itálico do original*)

A ciência constrói o seu conhecimento a partir do uso do conhecimento já adquirido.

¹³⁸ “E as leis atuais da física (as leis dos tipos relevantes de interação) também governam o sentido no qual a ‘informação’ conta como informação: ou seja, como, e na extensão da qual, e nas circunstâncias nas quais, a informação do receptor pode ser usada por nós para tirar conclusões sobre a fonte.”

¹³⁹ “O emprego da informação que temos como base, longe de ser uma barreira para a aquisição de conhecimento sobre a natureza, é o meio pelo qual tais informações adicionais são obtidas.”

¹⁴⁰ “O fato é que os cientistas constroem efetivamente sobre o que eles aprenderam para inferir mesmo nos casos onde eles não debruçaram suas mãos nos entes os quais as inferências são feitas; eles usam o que eles já descobriram – seja pela intervenção de observar ativamente ou passivamente – para examinar adiante. Certamente este é o aspecto mais importante do cometimento científico.”

Porém, esta noção de uso não corresponde à leitura feita por Hacking. Para Shapere, a ciência não deve limitar-se ao manuseio e intervenção para conhecer a natureza, mas, a cada etapa, o conhecimento já obtido é capaz de determinar o que conta como informação e observação dos fenômenos.

Neste contexto, embora não seja possível manuseá-los nem controlá-los, os sistemas astrofísicos podem ser usados para adquirir novos conhecimentos sobre a natureza. Para isto é necessário que a modelagem dos fenômenos astrofísicos seja feita com uso exclusivo de teorias bem fundamentadas e testadas à exaustão.

Em particular, a interação gravitacional é uma possível fonte de informação por representar uma interação bem estabelecida pela ciência atual. Ademais, fenômenos astrofísicos podem funcionar como ferramentas para investigar a natureza como é o caso das lentes gravitacionais (SHAPERRE, 1993).

A partir dos argumentos de Cartwright e Shapere torna-se possível emergir da cosmologia a identificação de um ente genuinamente novo. Por um lado, Cartwright nos fornece um argumento em defesa a uma postura realista de entidades através do poder causal dos entes teóricos. Por outro, Shapere propõe um conceito de observação que nos permite, em princípio, identificar esta relação de causa e efeito baseado no conhecimento científico estabelecido até o momento.

Com estas duas premissas, a realidade de um ente teórico em astrofísica ou em cosmologia torna-se uma questão epistemológica que depende do avanço científico da área. Não há garantias que as observações astronômicas venham a refinar-se o suficiente a ponto de determinar a realidade, por exemplo, da matéria escura. Entretanto, em princípio, é possível alcançarmos uma situação onde a redundância da história causal, no sentido usado por Cartwright, de um fenômeno astrofísico seja eliminada e a identificação do poder causal da matéria escura seja estabelecida indubitavelmente.

CONCLUSÃO

A cosmologia, tanto quanto a geologia e a paleontologia são áreas peculiares das ciências naturais. Elas são ciências históricas limitadas à reconstrução racional da evolução de seus objetos de estudo. Dentre as ciências históricas, a cosmologia se destaca por possuir um objeto único e singular carente de qualquer tipo semelhante a ele, a saber, o universo. Esta característica faz da cosmologia uma ciência única.

Ao longo desta dissertação, corroboramos com a ideia disseminada da aceitação da cosmologia enquanto investigação científica do universo. Contudo, nossa análise sustenta que esta cosmologia científica não corresponde ao conceito tradicional de cosmologia. A cosmologia física, como designamos a prática científica da cosmologia, não compartilha dos mesmos objetivos nem do mesmo objeto de estudo da cosmologia tradicional. Com efeito, argumentamos que é justamente a reformulação epistemológica e metafísica da cosmologia que a possibilitou ser reconhecida como ciência natural. De fato, defendemos a tese mais rigorosa da impossibilidade da cosmologia tradicional corresponder aos preceitos da ciência moderna. Esta impossibilidade se dá pela própria definição de ciência a partir da tradição fundamentada no estudo sistemático da natureza em termos de tipos similares e o desenvolvimento de leis gerais que descrevem os seus comportamentos.

Contudo é importante ressaltar os avanços extraordinários da cosmologia física. A construção de um modelo padrão capaz de narrar uma história consistente dos últimos 13,7 bilhões de anos do universo é o resultado de um esforço conjunto da comunidade científica com o auxílio de equipamentos sofisticados na aquisição de dados observacionais. Ademais, os desafios teóricos produzidos ao longo deste processo demonstram a capacidade da cosmologia em trazer novidades genuínas para nosso entendimento da natureza.

As idiossincrasias da investigação científica em astronomia levaram Ian Hacking a defender um antirrealismo “modesto” de entidades astrofísicas. Sua argumentação baseia-se fundamentalmente em nossa incapacidade de manusear e intervir nos sistemas astrofísicos. Com efeito, esta característica da astronomia parece ser intransponível. Contudo, apenas esta incapacidade não é suficiente para impossibilitar um realismo de entidades astrofísicas, pois, aceitar o realismo de entidades de Hacking pressupõe tomar o manuseio e a intervenção como condições suficientes e não necessárias.

No intuito de adaptar o realismo de entidades proposto por Hacking para a astronomia,

apresentamos um argumento baseado nos trabalhos de Nancy Cartwright e Dudley Shapere no qual o poder causal das entidades astrofísicas pode, em princípio, ser identificado através de uma noção específica de conhecimento científico baseado no conceito de observação de Shapere. Além disso, apesar de nos ser vedada a possibilidade de manuseio e intervenção, os sistemas astrofísicos podem ser usados como ferramenta para investigação da própria natureza. Assim, os sistemas astrofísicos tornam-se ferramentas de uso da investigação científica de maneira rudimentar, porém qualitativamente próxima, aos aparatos experimentais dos laboratórios terrestres. A viabilidade efetiva desta linha argumentativa para um realismo de entidades astronômicas ainda requer uma análise mais minuciosa, a qual pretendemos desenvolver em projetos futuros.

REFERÊNCIAS

- ALCOCK C., et al., Possible gravitational microlensing of a star in the Large Magellanic Cloud. *Nature* 365, 1993. p. 621-623.
- ANDERSON, J. L. *Principles of Relativity Physics*. Academic Press, 1967.
- BACON, F. *Novum Organum Scientiarum* (novo instrumento da ciência) de 1620.
- BARBOUR, J. B. *The Discovery of Dynamics*. Oxford University Press, 2001.
- BARROW, J. D. *The Constants of Nature*. Vintage, 2003.
- BARROW, J. D., TIPLER, Frank J. *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford University Press, 1986.
- CAMINHA, G. B. *Um Prelúdio para o Lenteamento Gravitacional Forte em Levantamentos de Grandes Áreas*. 2013. Tese (Doutorado em Física) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio Janeiro, 2013.
- CARTER, B. Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology. In: *Confrontation of cosmological theories with observational data*, Longair, M. S. (Ed.), Springer, 1974. p. 291.
- CARTWRIGHT, N. *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press, 1983.
- CLELAND, C. E. Methodological and Epistemic Differences between Historical Science and Experimental Science, *Philosophy of Science* 69, 2002. p. 447-451.
- COWIE, L., S. A. Astrophysical limits on the evolution of dimensionless physical constants over cosmological time. *Astrophysical Journal* 453, 1995. p. 569.
- CYBURT, R. H.; FIELDS, B. D.; OLIVE, K. A.; YEH, T.-H. Big Bang nucleosynthesis: present status. *Review of Modern Physics* 88, 2016. p. 015004.
- DAUVILLIER, A. *Cosmologie et Chimie: l'origine des éléments chimiques et l'évolution de l'univers*. Paris, Presses Universitaires de France, 1955.
- DINGLE, H. Modern Aristotelianism. *Nature* 139, 1937. p. 784. Traduzido em português: *Scientiae Studia* 3, 2005. p. 249.
- DISALLE, R. Newton's philosophical analysis of space and time. In: *The Cambridge Companion to Newton*. Cohen, I. B., Smith, G. E. (Ed.), Cambridge University Press, 2002.
- _____. *Understanding Space-Time: the philosophical development of Physics from Newton to Einstein*. Cambridge University Press, 2006.

DODELSON, S. *Modern Cosmology*. Academic Press, 2003. p.x.

DUHEM, P. *La Théorie Physique: son objet - sa structure*. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin, 1993.

EINSTEIN, A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1917. p. 142-152. Traduzido para o inglês por Perrett, W., Jeffery G. B. In: *The Principle of Relativity*. Lorentz, H. A. et al. (Ed.), Dover 1952.

ELLIS, B. *The Philosophy of Nature: a guide to the new essentialism*. Acumen, 2002. p. 57.

ELLIS, G. F. R. Issues in the Philosophy of Cosmology. In: *Handbook of the Philosophy of Physics*. Butterfield, J.; Earman, J. (Eds.), Elsevier, 2007. p. 1183.

_____. On the philosophy of cosmology. *Stud. Hist. and Phil. of Mod. Phys.* 46, 2014. p. 5-23.

ELLIS, G. F. R.; MAARTENS, R.; MACCALLUM, M. A. H. *Relativistic Cosmology*. Cambridge University Press, 2012. p. 4.

ELLIS, G. F. R.; NEL, S. D.; STOEGER, W.; MAARTENS, R.; WHITMAN, A. P. Ideal Observational Cosmology. *Physics Reports* 124, 1985. p. 315.

FEIGL, H. The 'Orthodox' View of Theories: remarks in defense as well as critique. In: *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, v. IV, Radner, M. ; Winokur, S. (Eds.). University of Minnesota Press, 1970. p. 12.

FIXSEN, D. J. The Temperature of the Cosmic Microwave Background. *The Astrophysics Journal* 707, 2009. p. 916.

FREEDMAN, W. L., et al. Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant. *Astrophysical Journal* 553, 2001. p.47.

FREGE, G. *The Philosophical Review*, v. 57, n. 3, 1948.

GLYMOUR, C. Indistinguishable space-times and the fundamental group. In: *Foundations of space-time theories, Minnesota studies in the philosophy of science VIII*, Earman, J.; Glymour, C.; Stachel, J. (Eds.). University of Minnesota Press, 1977. p.50.

GOLD, T. The Arrow of Time. *American Journal of Physics* 30, 1962. p. 403-410.

_____. *The Nature of Time*. Cornell University Press, 1967.

GOODMAN, N. *Fact, Fiction and Forecast*. Harvard University Press, 1983. ed. 4.

GOTT, J. R. Are Heavy Halos Made of Low Mass Stars? a gravitational lens test. *Astrophysical Journal* 243, 1981. p. 140-146.

HADOT, P. *Le Voile d'Isis: essai sur l'histoire de l'idée de Nature*. Éditions Gallimard, 2004. p. x

HACKING, I. *Representing and Intervening*. Cambridge University Press, 1983.

_____. Extragalactic Reality: the case of gravitational lensing. *Philosophy of Science* 56, 1989. p. 555-581.

HAMILTON, J.-C. What have we learned from observational cosmology? *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 46, 2014. p.70.

HEMPEL, C. G. *Aspects of Scientific Explanation*. Free Press. 1965. p. 345, 444.

HUBBLE, E. A Relation Between Distance and Radial Velocity Among Extra-Galactic Nebulae. *Proc. Nat. Acad. Scie. USA* 15, 1929. p. 168.

HUME, David. *A Treatise of Human Nature*. Dover Publications, 2003.

JAMMER, M. *Concepts of Space: the history of theories of space in physics*. Dover Publications, 1993.

KITCHER, P. Explanatory Unification and Causal Structure. In: *Scientific Explanation*. Kitcher, P.; Salmon, N. University of Minnesota Press, 1989. p. 430-432.

KOLB, E., TURNER, M. *The Early Universe*. Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

KRETSCHMANN, E. J. Über den physikalischen Sinn der Relativitätspostulate: A. Einsteins neue und seine ursprüngliche relativitätstheorie. *Annalen der Physik* 53, 1917. p. 575-614.

KUHN, T. S. *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press, 1962.

LAPORTE, J. *Natural Kinds and Conceptual Change*. Cambridge University Press, 2004. p. 15.

LEWIS, D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Noûs* 13, 1979. p. 455-476.

LOCKE, J. *Essay Concerning Human Understanding*. WLC Books, 2009.

MACH, E. *The Science of Mechanics*. Open Court Publishing Company, 1989. p. 284. Tradução para o inglês de Thomas J. McCormack.

MALEMENT, D. Observationally indistinguishable space-times. In: *Foundations of space-time theories, Minnesota studies in the philosophy of science VIII*, Earman, J. Glymour, C.; Stachel, J. (Eds.) University of Minnesota Press, 1977. p.61.

MANCHAK, J. B. Can we know the global structure of spacetime? *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* 40, 2009. p. 53.

_____. What Is a Physically Reasonable Space-Time? *Philosophy of Science* 78, 2011. p. 410.

MAO S., PACZYNSKI, B. Gravitational microlensing by double stars and planetary systems. *Astrophysical Journal* 374, 1991. p. L37-40.

MCVITTIE, G. C. *Fact & Theory in Cosmology*. Eyre & Spottiswoode, 1961.

MERLEAU-PONTY, J. *Cosmologie du XX^e siècle*. Éditions Gallimard, 1965.

_____. La Cosmologie : le point de vue du philosophe. In : *La cosmologie moderne*, Andriolat, H. et al. (Ed.), Paris, Masson, 1984. 2 ed. p. 9-34. Reimpresso em *Sur La Science Cosmologique*. Paty, M.; Szczeciniarz, J.-J, EDP, 2003. p. 189-211.

_____. Les Hypothèses en Cosmologie. *Revue Internationale de Philosophie*, v. 25, 1997. p. 32-43. Reimpresso em *Sur La Science Cosmologique*. Paty, M.; Szczeciniarz, J.-J, EDP, 2003. p. 137-148.

_____. *Les Sciences de l'univers à l'âge du positivisme*. Librairie Philosophique Vrin, 2000.

MINKOWSKI, H. Raum und Zeit. *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909. p. 104-115. Tradução Perrett, W., Jeffery G. B. In: *The Principle of Relativity*. Lorentz, H. A. et al. (Ed.), Dover 1952.

MUKHANOV, V. *Physical Foundations of Cosmology*. Cambridge University Press, 2005. p. 3.

MUTSCHLER, H. D. *Introdução à Filosofia da Natureza*. Tradução Enio Paulo Giachini, Edições Loyola, 2002. p. 7. Original: *Natur-philosophie*. Verlag GmbH, 2002.

NARLIKAR, J. V. *An Introduction to Cosmology*. Cambridge University Press, 2002.

NEWTON, I. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. 1726. 3 ed.

PACZYNSKI, B. Gravitational microlensing of the Galactic bulge stars. *Astrophysical Journal* 371, 1991. p. L63-67.

PEACOCK, J. A. Gravitational Lenses and Cosmological Evolution. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 199, 1981. p. 987-1006.

_____. *Cosmological Physics*. Cambridge University Press, 1999. p. IX.

PETTERS, A. O., LEVINE, H. e WAMBSGANSS, J. *Singularity Theory and Gravitational Lensing*. Birkhäuser, 2001.

PLANCK COLLABORATION. (2014) Planck 2013 results- XXIII. Isotropy and statistics of the CMB, *Astronomy & Astrophysics* 571 (2014) A23.

_____. (2015a) Planck 2015 Results- I. Overview of products and scientific results, *Astronomy & Astrophysics* 594 (2015) A1.

_____. (2015b) Planck 2015 Results- XIII. Cosmological parameters, *Astronomy & Astrophysics* 594 (2015) A13.

POPPER, K. *Conjectures and Refutations*. Routledge, 2002. 2 ed.

QUINE, W. V. O. Two Dogmas of Empiricism. *The Philosophical Review* 60, 1951. p. 20–43

REINER, R.; PIERSON, R. Hacking's Experimental Realism: an untenable middle ground. *Philosophy of Science* 62, 1995. p. 60-69.

ROCKMANN, J. Gravitational lensing and Hacking's extragalactic irreality. *Int. Stud. Phil. Sci.* 12, 1998. p. 151-164.

RUPHY, S. Are Stellar Kinds Natural Kinds? a challenging newcomer in the monism/pluralism and realism/antirealism debates. *Philosophy of Science* 77, 2010. p. 1110.

RUSSELL, B. *The Problems of Philosophy*. Oxford University Press, 1959. c. 6.

SCHRAMM, D. N.; TURNER M. S. Big-Bang nucleosynthesis enters the precision era. *Review of Modern Physics* 70, 1998. p. 303.

SHAPER, D. The Concept of Observation in Science and Philosophy. *Philosophy of Science* 19, 1982.

_____. Discussion: astronomy and antirealism. *Philosophy of Science* 60, 1993. p. 134-150.

STEIN, H. Newtonian Space-time. *Texas Quartely* 10, 1967. p. 174-200;

_____. Newton's metaphysics. In: *The Cambridge Companion to Newton*, Cohen, I. B.; Smith, G. E. (Ed.), Cambridge University Press, 2002.

TOLMAN, R. C. *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*. Oxford, 1958.

UDALSKI et al., The optical gravitational lensing experiment: discovery of the first candidate microlensing event in the direction of the Galactic Bulge. *Acta Astronomica*, vol. 43, 1993. p. 289-294.

UZAN, J.-P. Varying Constants, Gravitation and Cosmology. *Living Review Relativity* 14, 2011. p. 2.

UZAN, J.-P.; CLARKSON, C.; ELLIS, G.F.R. Time Drift of Cosmological Redshifts as a Test of the Copernican Principle. *Physical Review Letters* 100, 2008. p. 191303.

VAN FRAASSEN, B. C. *The Scientific Image*. Clarendon Press, 1980.

VIDEIRA, A. A. P. Herbert Dingle e as relações entre ciência e filosofia no alvorecer da cosmologia moderna, *Scientiae Studia* 3, 2005. p. 243.

_____. Princípios em cosmologia, *Filosofia e História da Ciência no Cone Sul* 1, 2006. p.8.

WALKER, T. P.; STEIGMAN, G.; SCHRAMM, D. N.; OLIVE, K. A.; KANG, H.-S. Primordial Nucleosynthesis Redux. *Astrophysical Journal* 376, 1991. p. 51.

WILL, C. M. Confrontation between gravitational theory and experiment, In *General Relativity: an Einstein Centenary Survey*, Hawking S. W. e Israel, W. (Ed), Cambridge University Press, 1979. p. 24.

MAP COLLABORATION: Nine-Year WMAP Observations: Cosmological Parameter Results. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 208, 2013. p. 19.

ZWICKY, F. On the thermodynamics of the Universe, *Proceedings of National Academy of Science* 14, 1928. p. 592-597.

_____. *L'Astronomie et la marche dans l'Univers*, *L'Astronomie* 76 année, 1962. p. 55-56.