

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

Danilo Miranda Rodrigues

Uma Reconstrução Racional da Cosmologia Científica

São Paulo
2023

Danilo Miranda Rodrigues

Uma Reconstrução Racional da Cosmologia Científica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia do Departamento de Filosofia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Filosofia sob a orientação do Prof. Dr. Jose Raymundo Novaes Chiappin

São Paulo
2023

**ENTREGA DO EXEMPLAR CORRIGIDO DA
DISSERTAÇÃO/TESE**

Termo de Anuência do (a) orientador (a)

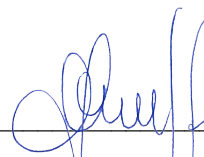
Nome do aluno: Danilo Miranda Rodrigues

Data da defesa: 01/11/2023

Nome do Prof. orientador: Jose Raymundo Novaes Chiappin

Nos termos da legislação vigente, declaro **ESTAR CIENTE** do conteúdo deste **EXEMPLAR CORRIGIDO** elaborado em atenção às sugestões dos membros da comissão Julgadora na sessão de defesa do trabalho, manifestando-me **plenamente favorável** ao seu encaminhamento ao Sistema Janus e publicação no **Portal Digital de Teses da USP**.

São Paulo, 21/12/2023



(Assinatura do (a) orientador (a))

Folha de Aprovação

Rodrigues, D. Uma Reconstrução Racional Da Cosmologia Científica. 2023. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedicatória

Dedico este trabalho a meu filho Lucas, que nasceu para trazer luz e alegria para nossa família. A experiência de ser pai ressignifica a experiência de ser filho. Sei que, através de seus olhos, sou acompanhado por meu finado pai, José, quem sempre apoiou meus estudos e se emocionou ao me ver chegar onde a vida não lhe permitiu: o ensino superior.

Agradecimentos

Não foi uma tarefa fácil concluir essa dissertação, já não seria nas “condições normais de temperatura e pressão”, mas àqueles que lerem o texto daqui alguns anos, será difícil explicar o que foi fazer um mestrado durante o desastroso combate à pandemia do COVID-19. Além de ter sido contaminado antes do advento das vacinas (por imposição das escolas ao retorno presencial de seus docentes enquanto grande parcela da sociedade trabalhava remotamente), fomos obrigados a pesquisar com bibliotecas e universidades fechadas, lidar com a sobrecarga de lecionar para alunos que assistem às aulas remotamente, enquanto alguns optam por assisti-las presencialmente, além da tortura psicológica de acompanhar nos noticiários a morte de mais de 700 mil pessoas, mais de 3 mil por dia em alguns momentos da pandemia, além da atuação de um governo negacionista.

Agradeço primeiramente pelo incondicional apoio de minha esposa Denise, companheira de todas as horas e demandas, quem muitas vezes sustentou o peso de trabalhos domésticos para que eu possa trabalhar nesse mestrado, nas viagens a ele relacionadas e nos momentos de maior pressão. Muitas vezes ficou cuidando de nosso filho para que eu embarcasse na cansativa reta final deste trabalho, ambos somos igualmente merecedores dessa conquista. Seu amor e companheirismo serão sempre objeto de minha mais profunda gratidão e reciprocidade.

Também agradeço pelo apoio, seja intelectual ou pela amizade, expressos pelos professores Ramachrisna Teixeira e Jojomar Lucena. Tê-los na banca de avaliação deste trabalho é motivo de grande orgulho e honra, muito contribuíram para a melhoria deste trabalho que agora se encerra. Também sou grato ao colégio onde leciono: a escola ALEF PERETZ, onde recebi a missão de ministrar o curso de “Revoluções Científicas” e levar para as aulas muito do que pesquisei durante esse mestrado, onde foi possível amadurecer as discussões sobre alguns de seus conceitos fundamentais.

Por fim, agradeço imensamente ao Prof. Dr. Jose Raymundo Novaes Chiappin pela orientação deste trabalho. Seu entusiasmo e paciente orientação contribuíram muito para a condução da pesquisa. Guardarei na memória as inúmeras conversas sobre o desenvolvimento desse tema em nossos cafés, espero que lhe seja motivo de orgulho ter embarcado nessa missão. Minha admiração, tanto pessoal como profissional, se tornou ainda maior durante esse itinerário juntos.

Então, eis que Deus respondeu a Jó do meio de um tufão e indagou:

“Quem é este que busca turvar os meus desígnios com palavras sem conhecimento?”

Agora, pois, prepara-te como homem; porquanto Eu te questionarei, e tu me responderás!

Onde estavas tu, quando Eu lançava os alicerces da terra? Conta-me, se é que tens verdadeiro entendimento?

Quem determinou os limites das dimensões da terra? Talvez tenhas essa resposta! Ou quem estendeu sobre a face da terra o cordel, a linha de medir?

E quanto aos seus fundamentos, sobre o que foram assentados? E quem colocou a angular, a pedra fundamental.

E tu, Jó, já deste ordens à manhã ou determinaste à alvorada o seu lugar, a fim de que ela apanhasse a terra pelas pontas e sacudisse dela os perversos?

Jó, já foste até as nascentes do mar, ou já passeaste pelas obscuras profundezas do oceano?

As portas do Sheol, do mundo dos mortos, já lhe foram mostradas? Observaste os portais das densas trevas da morte?

Tens alguma ideia do quanto são imensas as áreas de toda a terra? Dizes-me, se de fato sabes algo sobre tudo isso?

E mais, como se vai ao lugar onde habita a luz? E onde se localiza a residência das trevas? Conseguiria tu conduzi-las cada qual ao devido lugar a que pertencem? Conheces o caminho para a moradia delas? Ora, por certo tu o sabes bem, afinal já eras nascido e os teus dias são numerosos!

Porventura a chuva tem pai? Quem é o genitor das gotas de orvalho?

Podes amarrar as maravilhosas constelações estelares; atar a Plêiade ou soltar os laços de Órion?

Podes fazer surgir no tempo certo a Alva, a estrela da manhã, ou guiar a Ursa e suas estrelas filhas?

Conheces as leis do Universo ou podes estabelecer o seu domínio sobre a terra?

Porventura és tu que envias os relâmpagos, e eles te respondem: ‘Eis que aqui estamos?’”

(Trechos do livro de Jó- capítulo 38)

RESUMO

RODRIGUES, D. M. Uma Reconstrução Racional da Cosmologia Científica. 2023. Dissertação - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Este trabalho busca realizar uma reconstrução racional da cosmologia científica, tal qual este conceito foi concebido por Imre Lakatos, inserindo-se em uma tradição de estudos de caso dos instrumentos conceituais formulados pelo filósofo húngaro. O modelo de universo formulado pelo eminente físico, Albert Einstein, em 1917 exerce importante protagonismo na nascente cosmologia. Seu universo estático, entretanto, não pode ser classificado como um programa de pesquisa no sentido Lakatosiano do termo. O primeiro programa cosmológico surge, efetivamente, com as contribuições do soviético Friedman e do belga Lemaitre. Ambos produzem, de forma independente, modelos de universo em expansão, recuperando parte do núcleo proposto por Einstein. Os modelos de universo em expansão são, efetivamente, testados em seus conteúdos empíricos ao longo das décadas seguintes. Com o auxílio de hipóteses adicionais distintas, diferentes concepções de universo. Apesar de tais diferenças, são notáveis os pontos em comum entre elas, configurando um fenômeno descrito nos trabalhos de Lakatos: uma série empiricamente progressiva de teorias que compartilham de um núcleo em comum. O núcleo do "Programa de Friedman-Lemaitre" é, portanto, composto por algumas teses de Einstein e pelo afastamento entre as galáxias (lei de Hubble), enquanto a série de teorias deste programa é formada pela teoria de Lemaitre, pela teoria do Estado Estacionário (formulada por Hoyle, Bondi e Gold) e pela teoria do Big-Bang (formulada por Gamow, Alpher e Herman). Na parte final desta dissertação discutimos a atualidade deste programa e o motivo de o considerarmos, apesar das notórias dificuldades envolvendo os conceitos de matéria e energia escura, ainda atualmente um programa progressivo e extremamente fértil empiricamente. A descoberta de uma série de partículas fundamentais e de difícil detecção, tal como o "Bóson de Higgs" deve ser interpretada como instancia corroborativa de tal progressividade. O universo de Einstein, afinal, é a primeira proposta de um programa, proposta que não se concretiza pela ausência de falseabilidade, testabilidade ou, na concepção de Lakatos, conteúdo empírico

Palavras-chave: Cosmologia, Lakatos, expansão, Einstein, Big-Bang.

ABSTRACT

RODRIGUES, D. M. A Rational Reconstruction of the Scientific Cosmology. Master Degree – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

The aim of this work is carrying out a rational reconstruction of scientific cosmology, as this concept was conceived by Imre Lakatos, inserting itself in a tradition of “case studies” of conceptual instruments formulated by the hungarian philosopher. The model of universe formulated by the eminent physicist, Albert Einstein, in 1917 plays an important role in the nascent cosmology. Its static universe, however, cannot be classified as a research program in the Lakatosian sense of the term. The first cosmological program effectively emerged with the contributions of the Soviet Friedman and the Belgian Lemaitre. Both independently achieved models of the expanding universe, recovering part of the Einstein’s standard core. The expanding universe models are effectively tested in their empirical content over the following decades. With the help of different additional hypotheses, different conceptions of the universe were formulated. Despite such differences, the points in common among them are notable, configuring a phenomenon described in Lakatos' works: an empirically progressive series of theories that defended a common core. The nucleus of the “Friedman-Lemaitre Program” is therefore composed of some of Einstein's theses and the deviation between galaxies (Hubble's law), while the series of theories in this program is formed by Lemaitre's theory, by the Steady State theory (formulated by Hoyle, Bondi and Gold) and by the Big-Bang theory (formulated by Gamow, Alpher and Herman). In the final part of this dissertation, we discuss the relevance of this program nowadays and the reason for considering it, despite the notorious difficulties involving the concepts of matter and dark energy, still currently a progressive and extremely fertile program empirically. The discovery of some fundamental and difficult-to-detect particles, such as the “Higgs Boson” must be interpreted as a corroborative instance of such progressiveness. Einstein's universe, after all, is the first proposal for a program, a proposal that does not materialize due to the absence of falsifiability, testability or, in Lakatos' conception, empirical content

Key Words: Cosmology, Lakatos, expansion, Einstein, Big-Bang.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: representação dos elementos da epistemologia de Lakatos

Figura 2: velocidades de galáxias por meio do efeito Doppler, extraída de (SLIPHER; 1917)

Figura 3: esquemas sobre o modelo de universo de Einstein, relação espaço-tempo (esquerda) e geometria espacial (direita)

Figura 4: teste empírico entre as previsões de Newton e de Einstein sobre a curvatura da luz, obtidos no "experimento de Sobral".

Figura 5: foto rara dos colegas Einstein e DeSitter, em Caltech no ano de 1932.

Figura 6: Os três possíveis destinos do universo, de acordo com as equações de Friedman: contínua expansão, estável ou em contração, assumindo nulo o valor da constante cosmológica de Einstein. A cada solução está associada uma curvatura espacial, que será descrita em mais detalhes no apêndice deste capítulo. (extraída de LIMA, 2017)

Figura 7: retrato do emissário Yuri Krutkov e rascunho original da resposta de Einstein em que se retrata de suas objeções anteriores ao trabalho de Friedman, a parte rabiscada se refere a dificuldades em encontrar o significado físico de tais modelos, mesmo que corretos matematicamente. (obtidos de: <http://web.mit.edu/8.286/www/slides07/Einstein-and-Friedmann.pdf>)

Figura 8: exemplo de desvios espectrais causados pelo efeito Doppler, o espectro de absorção é deslocado para a região do vermelho quando há afastamento entre fonte e observador e deslocado para a região do azul quando há aproximação entre ambos.

Figura 9: resumo esquemático da proposta apresentada neste capítulo, segundo a qual podemos chamar de “proposta de programa de pesquisa” o trabalho cosmológico de Einstein. Por outro lado, os trabalhos de Friedman e Lemaitre, somados, inauguram de fato um programa de pesquisa, no sentido Lakatosiano do termo. Na figura ilustramos os conceitos de Einstein que são preservados por ambos e fazem parte do núcleo do programa. (créditos ao autor pela imagem)

Figura 10: modelo de Lemaitre para a evolução do Universo (extraída de Harisson, 1981)

Figura 11: resultado de Gamow, utilizando a hipótese do Big-Bang para explicar a abundância de elementos químicos no universo (GAMOW, 1948)

Figura 12: logaritmo da abundância relativa em função dos pesos atômicos

Figura 13: teoria do estado estacionário (<https://hypescience.com/big-bang-universo>)

Figura 14: evolução das densidades de matéria e de radiação no universo, segundo a teoria do Big-Bang

Figura 15: Distribuição da radiação cósmica de fundo no universo, sua homogeneidade foi interpretada como confirmação da teoria do Big-Bang (Extraída de Souza, 2004)

Figura 16: comparação entre as medições da R.C.F obtidas pelo COBE e pelo WMAP

Figura 17: homogeneidade da R.C.F (SOUZA, 2004)

Figura 18: resumo do programa de pesquisa de Friedman-Lemaitre (créditos ao autor)

Figura 19: distribuição de quasares pelo universo, os mais antigos se encontram a maiores distâncias, informação que serviu de corroboração independente para a teoria do Big-Bang (SCIAMA; REES, 1966)

Figura 20: resumo das partículas fundamentais previstas pelo modelo-padrão da cosmologia.

Figura 21: solução da lagrangeana sem o mecanismo de Higgs (a) e com o mecanismo de Higgs (b)

Figura 22: vista aérea do LHC e seus experimentos (créditos: CERN)

Figura 23: anúncio da possível detecção do bóson de Higgs obtida por experimentos no detector CMS

Figura 24: anúncio da possível detecção independente do bóson de Higgs pelo detector ATLAS

Figura 25: curva de velocidades em galáxias e aglomerados estelares, obtida de Maria de Fátima Oliveira Saraiva (<http://astro.if.ufgrs.br/galax/index.htm>)

Figura 26: cenários possíveis para o Universo antes do Big-Bang

Sumário

Resumo.....	9
Introdução.....	17
1. RECONSTRUÇÕES RACIONAIS SEGUNDO IMRE LAKATOS.....	19
1.1 - Introdução: História da ciência ou reconstrução racional.....	19
1.2 - Os elementos da epistemologia de Lakatos.....	21
1.3 - O problema da demarcação segundo a epistemologia de Lakatos.....	23
1.4 - O progresso da ciência segundo Lakatos.....	27
1.5 - LIMITAÇÕES E DESAFIOS DA ABORDAGEM LAKATOSIANA.....	30
1.5.1 - Estrutura excessivamente rígida dos programas de pesquisa, quando comparada aos casos históricos.....	31
1.5.2 - A avaliação unicamente empírica da progressividade das teorias.....	31
1.6 - A metodologia da teoria da ciência.....	32
2 MODELO DE EINSTEIN: PRIMEIRA PROPOSTA DE PROGRAMA DE PESQUISA EM COSMOLOGIA.....	37
2.1- Demarcações Possíveis Sobre As Origens Da Cosmologia Científica.....	37
2.1.1 - A cosmologia praticada pelos gregos pode ser considerada científica?.....	39
2.1.2 - A cosmologia se torna científica com a detecção da radiação cósmica de fundo.....	40
2.1.3- Teria a cosmologia científica renascido no século XX?.....	41
2.1.4 - Teria a cosmologia científica nascido na época moderna?.....	41
2.1.5 - A COSMOLOGIA NA VIRADA DO SÉCULO XIX PARA O XX.....	42
2.2- Do universo de Newton ao universo de Einstein.....	45
2.3 O modelo de Einstein: proposta de um programa de pesquisa cosmológico.....	48
2.4 - O modelo de universo de DeSitter.....	56
3. O PROGRAMA DE PESQUISA DE FRIEDMAN-LEMAITRE.....	62
3.1 - A DEMARCAÇÃO DO NÚCLEO DE UM PROGRAMA DE PESQUISA.....	62
3.2 - UMA ANÁLISE DO “UNIVERSO DE FRIEDMAN”.....	66
3.3 - AS CORRESPONDÊNCIAS ENTRE EINSTEIN E FRIEDMAN.....	72
3.4 - AFASTAMENTO ENTRE AS GALAXIAS: AS CONSIDERAÇÕES DE LEMAITRE.....	75

3.5 - A LEI DE HUBBLE-LEMAITRE E SEU LUGAR NO NÚCLEO DO PROGRAMA...	78
3.6 - TEORIAS DISTINTAS, MAS COM UM NÚCLEO EM COMUM.....	83
3.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
4. O ESTABELECIMENTO DA HEURÍSTICA POSITIVA 92	
4.1 - As Hipóteses Auxiliares E A Formação De Uma Série De Teorias.....	92
4.2 - A TEORIA DE LEMAITRE.....	94
4.3 - A TEORIA DO BIG-BANG.....	95
4.4 O MODELO DO ESTADO ESTACIONÁRIO.....	102
4.5 - A inserção de Fred Hoyle.....	104
4.6 - A repercussão da teoria do Estado Estacionário na comunidade internacional.....	106
4.7 - A primeira detecção da radiação cósmica de fundo.....	108
4.8 - Considerações Finais.....	115
5. O CENÁRIO ATUAL DO PROGRAMA DE PESQUISA.....	119
5.1 - A TEORIA QUE SE CONVERTE EM “MODELO-PADRÃO” DA COSMOLOGIA.....	119
5.2 - O MODELO PADRÃO DA COSMOLOGIA.....	122
5.3 -PARTÍCULAS MEDIADORAS.....	124
5.4 - O UNIVERSO EM SEUS PRIMÓRDIOS: A UNIFICAÇÃO ENTRE A FÍSICA DE PARTÍCULAS E A COSMOLOGIA.....	126
5.5 -A DETECÇÃO DO BÓSON DE HIGGS NO L.H.C.....	128
5.6 - O MECANISMO DE HIGGS.....	129
5.7 - A DETECÇÃO DO BÓSON DE HIGGS PELO ATLAS E PELO CMS.....	132
5.8 - LIMITACOES, DIFICULDADES E DESAFIOS DO MODELO-PADRÃO.....	135
5.9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	138
Considerações Finais.....	143
Apêndice 1.....	151
Apêndice 2.....	155

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

Rr Rodrigues, Danilo
 Uma reconstrução racional da cosmologia científica
 / Danilo Rodrigues; orientador Jose Chiappin - São
 Paulo, 2023.
 155 f.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia,
Letras e Ciências Humanas da Universidade de São
Paulo. Departamento de Filosofia. Área de
concentração: Filosofia.

1. Cosmologia. 2. Lakatos. 3. Reconstrução
Racional. 4. Einstein. 5. Friedman. I. Chiappin,
Jose, orient. II. Título.

Introdução

Este trabalho de pesquisa se propõe a utilizar largamente a história da ciência para uma pesquisa em filosofia da ciência, atividade bastante incentivada pelos pioneiros da chamada « virada historicista » como Lakatos, Kuhn, Feyerabend e outros. Utilizamos a cosmologia como estudo de caso. Assunto que, além de fascinante, sofreu profundas alterações ao longo do século XX, passando de um objeto do campo místico ou religiosos (como é ainda hoje em muitas culturas) para um importante tópico da mais dura ciência praticada pelos departamentos de Astronomia nas principais Universidades do Brasil e do mundo inteiro.

No primeiro capítulo elaboramos uma discussão sobre filosofia da ciência e, em particular, sobre o referencial teórico adotado. Imre Lakatos descreve os instrumentos de sua reconstrução racional e de que forma ela pode ser utilizada no estudo do passado da ciência, tendo em vista as possibilidades de compreendermos em alguma medida seu presente e seu futuro.

No capítulo 2 descrevemos o modelo conhecido como “Universo de Einstein” e mostramos a delicada justificativa pela qual o universo concebido pelo pai da relatividade não pode ser classificado como um programa de pesquisa. Einstein é, de fato, pioneiro na moderna cosmologia científica, justificando a fama de ser o “fundador” da cosmologia relativística. Seu modelo, todavia, sofre importantes críticas antes de produzir qualquer “fruto empírico”. As críticas feitas por Alexander Friedman, que acabaram aceitas por Einstein após certa relutância, afetam o núcleo de seu modelo: um universo estático não é a única solução possível para o universo em que vivemos, de acordo com as equações da relatividade (curiosamente concebida pelo próprio Einstein).

Os principais trabalhos posteriores em cosmologia serão confirmações teóricas e empíricas de um universo descrito por Friedman. Fazemos justiça, ainda no capítulo 3 ao belga Georges Lemaitre, que obtém resultados muito similares aos de Friedman (com interpretações físicas superiores em alguns pontos) após um intervalo curto de tempo. Ambos se utilizam de conceitos fundamentais presentes no modelo de Einstein, reformulando alguns outros (a estaticidade do Universo. Portanto, o primeiro programa de pesquisa na cosmologia é o “Programa de Friedman-Lemaitre” que se vale de muitos conceitos da “Proposta de Programa de Pesquisa” de Einstein. Proposta importante, mas que não se concretiza, de fato, enquanto um programa.

No capítulo 4 desenvolvemos em mais detalhes a heurística positiva desse programa, que se resume em uma série de teorias que, apesar de suas diferenças, partilham do mesmo núcleo, das mesmas teses fundamentais concebidas nos trabalhos de Einstein, Friedman e Lemaitre. A primeira teoria é a concebida pelo próprio Lemaitre, de um Universo em expansão a partir de um “átomo primordial”, o que não pode ser confundido com explosão inicial, o que não foi defendido por ele. Lemaitre apenas sugere que esse Universo tenha passado por um estágio em que seu volume foi comparável ao de um átomo, deixando aberta a discussão sobre possíveis estágios anteriores. As duas grandes teorias desse período são a teoria do Estado Estacionário e a teoria do Big-Bang. Ambas assumem um núcleo em comum de hipóteses, como a validade da relatividade geral e o constante movimento de fuga entre as galáxias. Divergem, todavia, se essa fuga ocorre em um universo infinito, onde o surgimento espontâneo de matéria explicaria a constância de sua densidade em

larga escala, ou se o próprio universo surgiu de uma explosão inicial e cuja expansão explica essa fuga entre as galáxias em larga escala.

Por fim, no capítulo 5, mostramos a atualidade dessa discussão, a teoria do Big-Bang foi, em larga medida, vitoriosa nessa disputa, se transformando em “modelo padrão” da cosmologia e fazendo parte da explicação sobre as origens das partículas fundamentais que observamos na natureza. O modelo padrão explica as interações fundamentais existentes e os mecanismos que levaram à formação da matéria, sem deixar de considerar a explosão inicial e contínua expansão e resfriamento desse “fluido” que é o Universo em que habitamos. Esperamos que os instrumentos filosóficos utilizados nos permitam “organizar” e melhor conhecer a fascinante dinâmica da atividade científica.

Capítulo 1

RECONSTRUÇÕES RACIONAIS SEGUNDO IMRE LAKATOS

1.1 - Introdução: História da ciência ou reconstrução racional

Uma das motivações iniciais para esta dissertação é uma proposição bastante difundida, segundo a qual Albert Einstein “funda” ou “inaugura” a cosmologia científica com a publicação de seu artigo “COSMOLOGICAL CONSIDERATIONS ON THE GENERAL RELATIVITY” no ano de 1917. Evidentemente reconhecemos a suma importância do texto de Einstein. Todavia, um olhar um pouco mais aprofundado em filosofia da ciência nos mostra o quão problemáticas podem ser afirmações dessa natureza. Primeiramente porque o trabalho de Einstein está inserido dentro de um contexto, que envolve contribuições anteriores que não podem ser ignoradas. Em segundo lugar, observamos que um dos temas mais polêmicos ao longo do último século de pesquisas em filosofia da ciência é o assim chamado “problema da demarcação”. A tentativa de estabelecer uma demarcação entre ciência e pseudociência elaborada por Karl Popper foi, possivelmente, uma das mais debatidas ao longo do século XX e possui algumas objeções já bastante conhecidas (POPPER, 1989).

Portanto, tais afirmações sobre nascimento da cosmologia necessitam de uma justificativa um pouco mais forte do que aquilo que usualmente as acompanha. Por esse motivo, introduzimos o vasto arsenal de instrumentos teóricos desenvolvido por Imre Lakatos para descrever este século de desenvolvimentos na cosmologia desde a publicação do artigo de Einstein. Lakatos elabora uma importante proposta de abordagem da história, conhecida como “reconstrução racional”.

O conceito de “reconstrução racional” não se refere simplesmente a contar uma história ou narrar fatos e acontecimentos. Há um componente metodológico bastante particular nas reconstruções racionais e, inclusive, que diferencia as diversas propostas possíveis de reconstrução da história. Utilizaremos a proposta elaborada por Imre Lakatos, explicitada principalmente em seu texto “History of science and its rational reconstruction” (LAKATOS, 1983). Sua proposta de reconstrução do conhecimento científico é bastante distinta, para darmos um exemplo, daquela apresentada por Rudolf Carnap em seu “Aufbau” (CARNAP, 2003).

A proposta de reconstrução elaborada por Carnap pode ser classificada como lógico-racional, na qual busca reconstruir todos os campos do conhecimento em função de uma base empírica. Por meio de instrumentos da lógica moderna busca descrever objetos mais complexos em termos de outros mais simples, chegando

finalmente a uma fase fundamental. Esse fundacionismo é um norteador de seu olhar para a história da ciência.

O olhar Lakatosiano para a história da ciência, por outro lado, buscará descrever as diversas contribuições do passado em termos de programas de pesquisas e seus elementos característicos. O desenvolvimento da ciência é descrito por ele enquanto competição entre programas de pesquisa: “o autor que aceita essa metodologia (dos programas de pesquisa) como um guia, vai olhar para a história e procurar por programas de pesquisa rivais” (Lakatos, 1983, pág. 102).

De fato, em nossa pesquisa olhamos para a história da cosmologia com estes “óculos Lakatosianos”. Evidentemente que outros pesquisadores olharão para a mesma história e poderão enquadrá-la de forma diferente. Enquanto compreendemos que determinada contribuição teórica seja parte de uma série de teorias contidas no desenrolar da heurística de um programa, outros pesquisadores podem compreendê-la como o nascimento de um programa de pesquisa alternativo. Tal multiplicidade de formas é inerente ao fato de que o próprio conceito de racionalidade guarda certa dose de subjetividade naquilo que diferentes historiadores e filósofos podem entender como a racionalidade empregada em diferentes etapas ao longo do desenvolvimento histórico de determinada área da ciência. Entendemos que tal diversidade de possíveis reconstruções tenha sido admitida pelo próprio Lakatos.

A reconstrução racional da ciência (no sentido em que uso o termo) não pode ser abrangente, pois os seres humanos não são animais completamente racionais; e mesmo quando agem racionalmente, podem ter uma falsa teoria de sua própria ação racional (Lakatos, 1983, p.102)

Em linhas gerais, podemos dizer que a elaboração de uma reconstrução racional lakatosiana equivale a um esforço de reconstruir a história internalista da ciência, com a conexão lógica entre as descobertas científicas deixando de lado seus aspectos externalistas, que englobam aspectos sociais, políticos psicológicos entre outros que apresentem características irracionais, à luz de sua teoria de racionalidade. Evidentemente que esta reconstrução se mostre incompleta do ponto de vista histórico, mas ela delimita as questões relevantes que serão complementadas por uma eventual reconstrução histórica externalista.

A história da ciência é sempre mais rica do que sua reconstrução racional. Mas a reconstrução racional ou história interna é primária, a história externa apenas secundária, uma vez que os problemas mais importantes da história externa são definidos pela história interna. A história externa fornece explicações não racionais sobre a velocidade, localidade, seletividade, etc. de eventos históricos interpretados em termos de história interna; ou, quando a história difere de sua reconstrução racional, fornece uma explicação empírica de por que difere. Mas o aspecto racional do crescimento científico é totalmente explicado pela lógica da descoberta científica. (Lakatos, 1983, p.105)

O objetivo deste trabalho é, portanto, elaborar uma reconstrução racional da cosmologia científica, descrevendo em termos da metodologia dos programas de pesquisa de Lakatos seu desenvolvimento e seus desdobramentos desde o artigo publicado por Einstein em 1917. Possivelmente faltem elementos para justificar adequadamente a escolha deste ponto de partida, o que pode ser elaborado em um possível trabalho futuro, onde as concepções cosmológicas anteriores podem ser avaliadas em termos de um particular critério de demarcação.

Também destacamos que a aplicação dos instrumentos Lakatosianos aqui empregada busca inserir-se em continuidade com uma vasta publicação de reconstruções racionais realizadas por J.R.N. Chiappin, cuja “Metodologia da Teoria da Ciência” é descrita de forma mais detalhada em (CHIAPPIN, 1989) e pode ser aplicada a diversas áreas do desenvolvimento histórico da ciência. O presente trabalho é um esforço em aplicá-la à cosmologia, de forma similar à sua aplicação à história da Termodinâmica por Jojomar Lucena da Silva (SILVA, 2015) e Cássio Costa Laranjeiras (LARANJEIRAS, 2002). Utilizações da Metodologia da Teoria da Ciência de Chiappin em outras áreas do direito, economia e filosofia também são encontradas na literatura.

1.2 - Os elementos da epistemologia de Lakatos

Uma vez que tal reconstrução racional visa descrever o desenrolar da ciência em termos de programas de pesquisa, vamos retomar seus elementos constituintes, tal como definidos por Lakatos em seu texto “O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa”. (LAKATOS, 1979)

A primeira definição que iremos retomar diz respeito aos chamados programas de pesquisas. Um programa de pesquisa pode ser explicado como uma estrutura que fornece orientações para a pesquisa futura. Como analogia, é comparável à definição Kuhniana de “paradigma” e corresponde a modelos que são criados para esclarecer determinados aspectos e relacionar diferentes leis sobre a natureza. Os programas de pesquisa correspondem às teorias físicas, como o eletromagnetismo ou a teoria da relatividade. Nas palavras de Lakatos:

O programa consiste em regras metodológicas; algumas nos dizem quais são os caminhos da pesquisa a serem evitados (heurística negativa), outros nos dizem quais são os caminhos que devem ser palmilhados (heurística positiva) (Lakatos, 1979, p. 162).

Essa estrutura é composta pelos seguintes elementos: o chamado núcleo duro, seu cinturão de proteção, heurística positiva e heurística negativa do programa. O núcleo duro engloba os fundamentos de um programa de pesquisa e corresponde àquelas afirmações que não podem ser negadas por um cientista sem que, necessariamente, ele os abandone. O núcleo de um programa é, portanto, irrefutável por uma decisão metodológica.

O cinturão de proteção é composto pelo conjunto de afirmações que envolvem e “protegem” o núcleo irrefutável de um programa de pesquisa. Nesta esfera um programa de pesquisa está sujeito a revisões, adaptações, renúncias e outras mudanças em geral. As anomalias existentes em um determinado programa devem ser resolvidas adaptando-se seu cinturão de proteção, sem alterar seu núcleo irrefutável.

“É esse cinto de proteção de hipóteses auxiliares que tem que suportar o impacto dos testes e ir se ajustando e reajustando, ou mesmo ser completamente substituído, para defender o núcleo assim fortalecido. O programa de pesquisa será bem-sucedido se tudo isso conduzir a uma transferência progressiva de problemas, porém, malsucedido se conduzir a uma transferência degenerativa de problemas” (Lakatos, 1979, p.163).

A prática da heurística se desenvolve simultaneamente por duas vias. A chamada positiva, alimentada pelos avanços na pesquisa teórica ou observacional, engloba as sugestões de como melhorar, modificar, atualizar o cinturão protetor do programa de pesquisa. Ela é caracterizada por uma série progressiva de teorias, formuladas ao longo do amadurecimento do programa, no sentido de ampliar seu conteúdo empírico. Em um de seus trabalhos de aplicação da epistemologia de Lakatos, observamos que Chiappin classifica esta série como a unidade básica da heurística positiva.

A heurística positiva, por outro lado, que também chamo de sistema operacional do núcleo teórico, compõe-se dos recursos por meios dos quais resolvemos problemas pela aplicação do núcleo. Esses recursos compõem-se de métodos, modelos, hipóteses, técnicas de cálculos, regras etc. Para esta concepção da atividade científica, a unidade básica do programa de pesquisa não é a teoria, mas uma série de teorias. A série de teorias é construída ao longo das tentativas de resolver problemas dentro do programa de pesquisa (Chiappin, p.25).

A heurística negativa, por outro lado, demarca o que o cientista não deve fazer para permanecer vinculado a um programa de pesquisa. Em outras palavras, a prática da heurística negativa estabelece os limites entre os elementos que fazem parte do cinturão de proteção e aquilo que já faz parte do núcleo irrefutável.

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

O sucesso de um determinado programa de pesquisa está associado à sua capacidade de produzir previsões testáveis. Sob este viés, os programas de pesquisa são classificados como progressivos ou degenerescentes. Outro aspecto da metodologia Lakatosiana importante para a reconstrução dos primeiros programas de pesquisa cosmológicos é o papel desempenhado pelas anomalias: em uma primeira

fase, um mesmo programa de pesquisa engloba diferentes teorias, onde cada mais ampla pressupõe empiricamente sua antecessora. Para tal fim, o autor defende que: “Pode ser racional colocar a inconsistência em quarentena temporária, ad hoc, e prosseguir com a heurística positiva do programa” (LAKATOS, 1979, p.176).

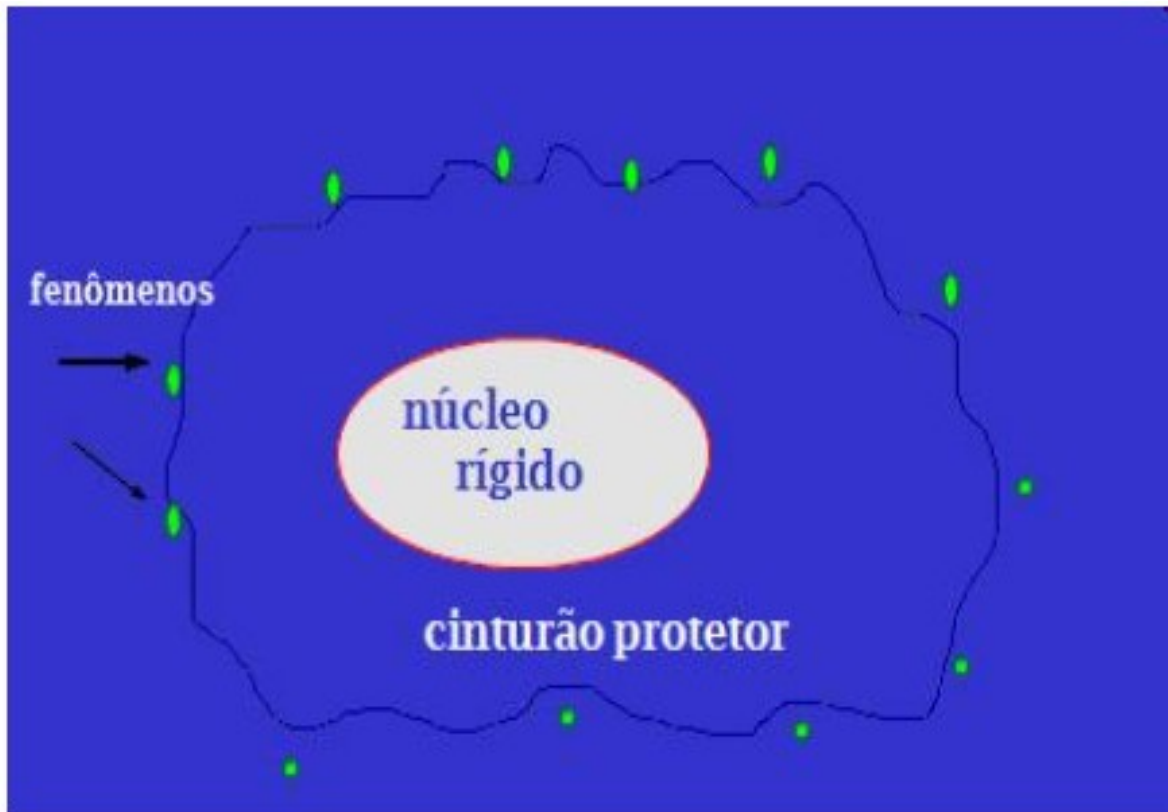


Figura 2: representação dos elementos da epistemologia de Lakatos

1.3 - O problema da demarcação segundo a epistemologia de Lakatos

Ao longo desta dissertação, em que abordaremos questões relacionadas ao nascimento da cosmologia científica, temos que descrever brevemente como este referencial aborda essa demarcação em linhas mais gerais, para então, entrarmos no campo da cosmologia. Um dos primeiros e mais conhecidos critérios de demarcação foi o falseacionismo elaborado por Karl Popper. De fato, a possibilidade de ser falseada pela observação é, na visão de Popper, uma forma de demarcação, uma distinção entre ciência e a pseudociência ou a metafísica. O autor nega o caráter científico de certas tradições intelectuais como a psicanálise e o marxismo¹, por exemplo. No primeiro exemplo ele alega que qualquer comportamento que um indivíduo venha a

¹ Popper considera que tais atividades possuem “estratagemas” que as protege de verificação empírica direta de veracidade, o que justificaria seus status de não científicos.

apresentar possa ser utilizado por um psicanalista como corroboração da teoria psicanalítica da neurose e, no segundo exemplo, um marxista tem a possibilidade de utilizar qualquer acontecimento ocorrido no interior de uma sociedade como uma confirmação do princípio universal da luta de classes. Em ambos os casos não existe a possibilidade de um experimento crucial e, muito menos, da elaboração de hipóteses refutadoras.

Dizemos que uma teoria foi refutada somente quando aceitamos enunciados básicos que a contradizem. Essa condição é necessária, mas não suficiente, pois as ocorrências singulares não reproduzíveis não possuem significação para a ciência. Por isso, uns poucos enunciados básicos dispersos que contradigam uma teoria dificilmente nos induzirão a rejeitá-la como refutada. Só a consideraremos refutada se descobirmos um efeito reprodutível que refute a teoria. (POPPER, 2010, P.148)

A demarcação proposta por Popper possui seus inúmeros críticos, mas não pode ser confundida ou caricaturada como uma forma de falseacionismo ingênuo, segundo o qual uma mera observação empírica seja suficiente para refutar uma estrutura teórica inteira. Lakatos, quem não consideramos um Popperiano procura incrementar sua argumentação para responder algumas críticas dirigidas à proposta de Popper, para então apresentar sua concepção historicista de falseamento. Ele faz uma separação entre duas formas de falseacionismo: o dogmático e o metodológico, aquele que considera ser o verdadeiramente defendido por Popper:

A marca distintiva do falseacionismo dogmático é, pois, o reconhecimento de que todas as teorias são igualmente conjecturais. A ciência não pode provar teoria alguma. Mas se bem que não possa provar, pode refutar: ela pode executar com certeza lógica completa o ato de repúdio do que é falso, isto é, há uma base empírica de fatos absolutamente firme que se pode usar para refutar teorias (LAKATOS, 1979, PAG. 116).

No mesmo trecho ele ainda afirma que: “de acordo com a lógica do falseacionismo dogmático, a ciência cresce mediante o repetido derrubamento de teorias com a ajuda de fatos concretos”. Para negar a validade desta forma de falsificação ele descreve também que.

a ciência avança através de especulações ousadas, que nunca são demonstradas nem mesmo problematizadas, mas algumas das quais, mais tarde, são eliminadas por refutações concretas e conclusivas e logo substituídas por novas especulações ainda mais ousadas. (LAKATOS, 1979, PAG. 117)

Lakatos considera que essa forma de falseacionismo seja excessivamente ingênua e não se sustente, principalmente por afirmar duas suposições falsas: que exista uma fronteira psicológica entre suposições teóricas ou especulativas e as proposições observacionais e que a suposição segundo a qual uma proposição que eventualmente satisfaça ao critério psicológico de ser observacional seja necessariamente verdadeira. Também critica Popper por estabelecer um critério demasiadamente rigoroso para esta separação entre aquilo que é científico e o não científico.

Sua crítica à primeira suposição procura demonstrar que a maioria das observações feitas na ciência não seja captada unicamente pelos sentidos, o que problematiza um pouco o conceito de “fato concreto”. Cita Galileu, que realizou sua coletânea de revolucionárias descobertas astronômicas, como a afirmação de que a lua não é uma esfera ideal, mas uma superfície bombardeada por uma série de colisões com asteroides. Suas observações não utilizaram apenas os sentidos, mas também um instrumento, até então, pouco conhecido ou confiável:

‘Mas suas “observações” não eram realizadas unicamente pelos sentidos, a credibilidade delas dependia da credibilidade do telescópio do observador e da teoria óptica do telescópio, muito criticada na época. Não foram as observações puras, não teóricas de Galileu, que se defrontaram com a teoria de Aristóteles, senão as “observações” de Galileu à luz de sua teoria ótica que se defrontaram com as observações de Aristóteles à luz da teoria aristotélica dos céus’ (LAKATOS, 1979. P. 119).

Uma vez que as observações, para Lakatos, não são puras e as observações fatuais são falíveis, os choques entre teoria e observações não são falseamentos, mas apenas discrepâncias: “Todas as proposições da ciência são teóricas e falíveis” (LAKATOS, 1979, página 121). Para avançar nesta discussão sobre o papel da experiência nas refutações, ele retoma o pensamento Popperiano que inaugurou uma nova etapa do falseacionismo: o falseacionismo metodológico, que culminará no falseacionismo metodológico sofisticado.

Lakatos ressalta que o falseacionista metodológico tem “plena consciência da falibilidade de suas decisões e dos riscos que está assumindo” (conferir p.129), pois se vale de hipóteses e teorias absolutamente falíveis, simplesmente por uma decisão metodológica. Separa o conteúdo falseável daquele conhecimento não problemático de fundo, também passível de ser refutado futuramente, mas aceito em determinado momento.

“O falseacionista metodológico separa a rejeição da refutação, que o falseacionista dogmático havia confundido. É um falibilista, mas o falibilismo não lhe enfraquece a posição crítica; converte proposições falíveis numa base para uma política de linha dura. Com esse pretexto propõe um novo critério de demarcação: somente são científicas as teorias – isto é, proposições não observacionais – que proíbem certos estados de coisas “observáveis” e, portanto, podem ser “falseadas” e rejeitadas; ou, em poucas palavras, uma teoria é científica (“ou aceitável”) se tiver uma base empírica” (LAKATOS, 1979, pág. 132)

A principal diferença entre a classe de falseacionismo dogmático e do sofisticado é que, segundo o primeiro, uma teoria é eliminada quando entra em conflito com resultados experimentais bem estabelecidos. Para a segunda classe, uma teoria só será abandonada quando houver outra com maior conteúdo empírico. Isto é: uma nova teoria que explique o sucesso de sua predecessora, que explique o fracasso da mesma frente aos resultados experimentais conflitantes com a anterior e, além disso, seja capaz de predizer fatos novos. Como justificativa histórica, Lakatos cita a descoberta do anômalo movimento de Mercúrio: foram necessários cerca de 85 anos entre a descoberta desta anomalia e sua aceitação como refutação da teoria de Newton, quando emergiu uma nova teoria, a relatividade, com maior base empírica.

Popper já havia admitido que teorias podem ser sempre ajustadas à observação por meio de hipóteses e ajustes ad hoc e que o verdadeiro problema consiste em demarcar quais hipóteses adicionais são legítimas para o progresso da ciência e quais são pseudocientíficas ou meros “estratagemas convencionalistas” (ibid: página 143). Para responder a este problema, Lakatos afirma que uma sequência de teorias, cada uma mais complexa que a anterior, será uma série progressiva se cada nova apresentar um “excesso de conteúdo empírico que sua predecessora, ou seja, se ele predisser algum fato novo, até então inesperado”.

Aqui chegamos finalmente no ponto em que Lakatos apresenta uma metodologia que nos permitirá demarcar o nascimento da cosmologia como ciência. ‘Só de uma série de teorias se pode dizer que é científica ou não-científica, nunca de uma teoria isolada; aplicar o termo “científico” a uma única teoria é incorrer num erro de categoria’. Portanto ‘o falseamento’ não será simplesmente uma relação entre a teoria e a base empírica, mas uma relação múltipla entre as teorias concorrentes, a “base empírica” original e o crescimento empírico resultante da competição. Nenhum resultado experimental, isoladamente, é uma evidência direta e imediata contra uma teoria e, neste aspecto, as distinções entre o falseacionismo ingênuo e o sofisticado levam a concepções distintas do que seja ciência e seu progresso. O progresso, na formulação refinada de falseamento, se dará quando uma nova teoria oferece informações adicionais, quando comparada à sua predecessora e se ao menos parte deste conteúdo adicional for confirmado pela observação.

Enquanto, para o falseacionista ingênuo, “evidências contrárias” e “anomalias” são praticamente sinônimos, para o metodológico a presença de anomalias não se configura **necessariamente** em evidências contrárias à teoria. Também há diferenças quanto à substituição das hipóteses:

‘Ao passo que o falseacionista ingênuo sublinha a “urgência de substituir uma hipótese falseada por outra melhor”, o falseacionista sofisticado sublinha a urgência de substituir qualquer hipótese por outra melhor. O falseamento não pode “compelir o teórico a procurar uma teoria melhor”, simplesmente porque o falseamento não pode preceder a teoria melhor’ (LAKATOS, 1979, página 149).

Descrindo objetivamente o problema da cosmologia, Lakatos compara as descrições de Einstein e Newton para mostrar o papel das anomalias em seus programas de pesquisa e que a presença nas mesmas não leva, necessariamente, um programa a degenerar, como descrito por Popper.

‘A teoria de Einstein não é melhor que a de Newton porque a teoria de Newton foi “refutada” e a de Einstein não o foi; existem muitas anomalias conhecidas na teoria einsteiniana. A teoria de Einstein é melhor do que – isto é – representa progresso quando comparada com a teoria de Newton porque explicava tudo que a teoria de Newton explicava com êxito, e explicava também, até certo ponto, algumas anomalias conhecidas e, além disso, proibia acontecimentos como a transmissão de luz ao longo de linhas retas perto de grandes massas, a cujo respeito a teoria de Newton nada dissera, mas que haviam sido permitidos por outras teorias científicas bem corroboradas do tempo; ademais, pelo menos parte do inesperado excedente de conteúdo einsteiniano era de fato corroborada’ (pág. 152).

Podemos, por fim, compreender a demarcação Lakatosiana com base no que descrevemos ao longo deste capítulo, combinando sua concepção de reconstrução racional e de falseamento. Neste breve resumo de sua metodologia observamos que, segundo sua proposta de demarcação, o historiador deva olhar para a história e reconhecer uma competição entre programas de pesquisa (em um olhar internalista) e que somente uma série de teorias pode ser classificada em científica ou não, sob o risco de incorrerem em um erro de categoria. Portanto, como descreveremos no próximo capítulo, consideraremos que a cosmologia seja genuinamente científica a partir do momento em que seja possível reconhecer a existência de um programa de pesquisa, como todos os seus elementos característicos, neste campo de investigação.

Procuraremos nos próximos capítulos descrever a história internalista da cosmologia a partir da publicação do artigo de Einstein em 1917, identificando os possíveis programas de pesquisa que tenham se formado desde então, por mais que essa concepção lakatosiana de internalismo não seja, exatamente, isenta de certo relativismo. A distinção entre quais descobertas teóricas devam ser inseridas no núcleo ou no cinturão de proteção de um programa é, certamente, um dos maiores desafios dessa reconstrução. Sobre tal dificuldade falaremos mais no próximo capítulo, quando estaremos diante de uma situação concreta em que há uma proposta de programa de pesquisa que não se concretiza como tal, por não haver uma série progressiva de teorias, para caracterizar sua heurística positiva.

Para concluir este capítulo introdutório sobre as ferramentas epistemológicas que serão utilizadas daqui em diante, descreveremos brevemente outro problema que também se fará presente na cosmologia: o problema do progresso da ciência. Possui uma interface grande com o problema da demarcação, mas procuraremos deixar a concepção lakatosiana o mais explícita possível.

1.4 - O progresso da ciência segundo Lakatos.

Outra questão que merece nossa atenção e será investigada ao longo deste trabalho, especificamente no caso da cosmologia diz respeito ao progresso, ou evolução, do conhecimento considerado científico. Tal como fez Lakatos, partiremos da concepção proposta por Popper para o problema, tanto sobre o ponto de partida quanto acerca da racionalidade presente na transição entre teorias. Popper faz uma crítica contundente à concepção empirista clássica, segundo a qual o conhecimento parta da observação ou, em outras palavras, que teorias científicas sejam construídas tendo como ponto de partida a observação da natureza. Considera, por um lado, que sequer seja relevante a questão sobre o ponto de partida da construção deste conhecimento e, por outro, que esse ponto de partida possa se dar ou não por meio da observação, mas também por algum insight, uma inspiração ou um acaso, negando a tradicional concepção positivista.

Não há dúvidas de que a intuição desempenha um grande papel na vida do cientista, assim como na do poeta. Ela o conduz a descobertas. Mas também pode levá-lo a fracassos. Permanece um assunto particular dele, por assim dizer. A ciência não pergunta como ele teve uma ideia. Interessa-se apenas por teses que possam ser testadas por todos. (Popper, 2010, p.93).

Popper, por um lado, nega a posição essencialista e sua defesa da existência de uma verdadeira e definitiva teoria estrutural do mundo. Por outro, acredita que existam teorias com maior grau de universalidade do que outras, que penetram em “camadas mais profundas da natureza” e, conseqüentemente, melhores. Sua posição é de que teorias, apesar de serem construídas por nós, são afirmações autênticas sobre o mundo.

Não confio na doutrina essencialista da explicação última. Antigamente, os críticos dessa doutrina eram, em geral, instrumentalistas: interpretavam as teorias científicas somente como instrumentos de previsão, sem poder explicativo. Também não concordo com eles. Mas há uma terceira possibilidade, um “terceiro ponto de vista”, como chamei, e que foi bem descrito como “essencialismo modificado” – com ênfase na palavra “modificado”. (Popper, 2010, p.162).

Portanto, a concepção popperiana de “progresso” é definida por ele mesmo como uma versão modificada do conceito tradicional de essencialismo, que nega a simplista concepção da possibilidade de existência de uma teoria completa sobre a natureza e, por outro lado, acredita que teorias sejam comparáveis não apenas com relação aos seus poderes preditivos, mas também com relação aos seus graus de universalidade e penetração na natureza.

Popper é, sem dúvida, um importante pioneiro no processo de amadurecimento da filosofia da ciência no século XX. Todavia, criticar aspectos fundamentais de sua demarcação será lugar comum de importantes propostas epistemológicas², dentre as quais se insere Lakatos e suas reconstruções racionais, que utilizamos ao longo deste trabalho.

Houve uma forte tendência nos trabalhos em filosofia da ciência, a partir do início dos anos 60, de um olhar mais aprofundado para a história, no sentido de utilizá-la para a construção de modelos sobre a racionalidade e progresso científico. Destacamos deste período a publicação da primeira edição de “A estrutura das revoluções científicas” por Thomas Kuhn em 1962, a publicação da primeira edição de “Contra o Método” por Paul Feyerabend em 1975³, a conferência organizada por Lakatos no Bedford College de Londres em 1965, em que participaram Popper, Kuhn, Feyerabend, entre outros e a subsequente publicação do mais influente trabalho de Lakatos “A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento”⁴, editado em parceria com Allan Musgrave. Esse movimento ficou conhecido como “virada historicista” e, em linhas gerais, reuniu diversos autores dispostos a utilizar episódios da história da ciência para refutar e criticar as narrativas do positivismo lógico e do falseacionismo Popperiano sobre o funcionamento da ciência.

² O próprio Lakatos é considerado um “Popperiano” no início de sua carreira acadêmica e, mesmo posteriormente, preserva alguns pontos importantes de sua demarcação.

³ Vale a ressalva de que, apesar da publicação do livro ser apenas de 1975, ele é fruto de longo período de hibernação e de acaloradas discussões com Lakatos, como narrado pelo autor em seu prefácio à primeira edição.

⁴ Neste trabalho encontram-se os textos “A metodologia dos programas de investigação científica” e “História da Ciência e suas Reconstruções Racionais”, ambos de Lakatos.

A situação muda radicalmente a partir dos anos 60 com o que se costuma chamar “virada historicista”: a vontade de dar conta da história real da ciência, ou seja, de construir modelos de mudança científica adequados às ciências tal e como elas se desenvolvem efetivamente no curso de sua história, passa a primeiro plano. A perspectiva diacrônica converte-se em tema central entre os filósofos da ciência (MOULINES, 2020, p.128).

Outro autor da virada historicista com importante destaque foi Larry Laudan. Dentre sua grande quantidade de publicações destacamos “O progresso e seus problemas” de 1977. Nele, Laudan aponta com bastante propriedade a dicotomia entre o caráter normativo e o explicativo das propostas epistemológicas: “A pesquisa real do cientista viola quase todas as regras metodológicas a que ele adere da boca pra fora” (LAUDAN, 2011, p. 82). O caráter normativo aponta para a necessidade de estabelecer normas e métodos para o progresso racional da ciência. O segundo, por outro lado está relacionado com a necessidade de narrar a evolução real da ciência. Dificuldades surgem com a análise de episódios históricos, pois nem sempre a descoberta de leis, a formulação de teorias, ou as suas refutações se deu de maneira completamente racional.

Por outro lado, o próprio conceito de racionalidade científica guarda seus aspectos obscuros e subjetivos. Por vezes, ao analisarmos episódios da história da ciência podemos classificar aspectos metafísicos, místicos, políticos ou religiosos como influencias “externas” ao desenvolvimento científico e, portanto, irracionais. Laudan, porém, defende que um exame histórico mais apurado nos levaria a considerar tais influencias como racionais, se consideradas em seu ambiente original.

O fato de um cientista do século XX não reconhecer a força de uma objeção feita a uma teoria com bases filosóficas ou religiosas não significa que se obtenha uma compreensão da racionalidade da ciência mais antiga ignorando-se tais fatores. Se uma cultura de certa época tem um conjunto arraigado de doutrinas religiosas ou filosóficas para o entendimento da natureza, é perfeitamente racional avaliar as novas teorias ou tradições de pesquisa científicas à luz de sua capacidade de se acomodar dentro desse sistema anterior de crenças e pressupostos. (Laudan, p.180).

Lakatos também aponta em seu “History of science and its rational reconstruction” que o conceito de racionalidade guarde certa subjetividade, uma vez que o próprio ser humano não é um animal completamente racional: “O que faz parte da história interna da ciência, portanto, depende de sua filosofia, esteja ele ciente disso ou não” (LAKATO, 1983 pág. 106). Na sequência da citação acima ele cita que o historiador da ciência, seguidor de sua metodologia dos programas de pesquisa, dará pouca atenção à história externalista da ciência, possivelmente passando brevemente por ela em uma nota de rodapé. A sua noção de história interna, todavia, ignora o contexto da descoberta na atividade científica.

O problema do progresso da ciência em Lakatos está inserido em sua discussão sobre as diferentes formas de falseacionismos, na qual ele insere a posição Popperiana e, posteriormente, seu falseacionismo metodológico. Reforça particularmente que um

programa de pesquisa não é abandonado simplesmente por tornar-se incompatível com observações da natureza, mas apenas após a emergência de outro programa com maior conteúdo empírico, que represente nesse aspecto, um ganho. Lakatos defende que o progresso ocorre quando uma sucessão de teorias possa ser considerada progressiva, isto é, quando cada nova teoria apresenta maior conteúdo empírico de que sua anterior e isso inclui explicar satisfatoriamente os resultados observacionais explicados pela anterior e também predizer algo novo.

O progresso mede-se pelo grau em que uma transferência de problemas é progressiva, pelo grau em que a série de teorias nos conduz à descoberta de fatos novos. Consideramos falseada uma teoria da série quando ela é suplantada por uma teoria com um conteúdo corroborado mais elevado. (Lakatos, 145).

Que a sucessão de teorias não ocorra após um simples confronto entre uma teoria e observação do comportamento da natureza (relação bipartite), mas necessita de uma nova teoria que, quando comparada à da anterior, apresente maior conteúdo empírico, é uma tese defendida e bastante elaborada por Pierre Duhem. Chiappin apresenta, em um de seus artigos, a figura do pensador francês do século XIX como precursor de Popper, Lakatos e Kuhn acerca dessa questão. Todos são consensuais ao apontar que a mudança científica não se explica apenas pelo acúmulo de anomalias refutadoras, mas apenas com a competição entre hipóteses explicadoras distintas.

O debate entre as concepções de ciências de Duhem e Poincaré é bastante semelhante e antecede o debate entre as concepções de ciência de Popper, com o aperfeiçoamento de Kuhn e Lakatos, e dos positivistas lógicos, com sua abordagem limitada à análise da lógica e ao método experimental como instrumentos de escolha de teorias. (Chiappin, 2015, p. 3)

Essa relação tripartite entre teorias concorrentes e dados empíricos se mostrará bastante presente no desenvolvimento cosmológico ao longo do século XX, sobre o qual discorreremos em mais detalhes nos próximos dois capítulos.

1.5 - LIMITAÇÕES E DESAFIOS DA ABORDAGEM LAKATOSIANA.

Em nossa proposta de reconstrução racional da cosmologia científica não deixamos de observar as importantes críticas limitações desta abordagem, feitas por seus comentadores e consagrados filósofos da ciência contemporâneos. Tais observações podem iluminar não apenas nossa avaliação ao final desta dissertação como também contribuir para outros estudos de caso de importantes episódios da história da ciência abordados em “chave Lakatosiana”. Podemos destacar as robustas avaliações elaboradas por Clark⁵sobre o Copernicanismo, a Termodinâmica e a teoria da Relatividade, bem como o estudo de caso da Mecânica Quântica produzido pelo professor Valter Alnis Bezerra. Muitas outras aplicações da epistemologia Lakatosiana merecem destaque, mas citamos estas obras pelas particulares críticas, que se mostraram bastante relevantes e, principalmente, reais, durante a elaboração desta

⁵ Esse estudo de caso sobre o Copernicanismo é elaborado em conjunto com o próprio Lakatos.

pesquisa. Lakatos morreu jovem e certamente deixou muitas objeções sem resposta⁶, citaremos três importantes dificuldades que se mostraram particularmente relevantes ao longo desta reconstrução.

1.5.1 - Estrutura excessivamente rígida dos programas de pesquisa, quando comparada aos casos históricos

Existe uma certa dificuldade em enquadrar a “história real” da ciência na estrutura proposta por Lakatos: seja por um possível desmembramento do núcleo em dois ou mais programas independentes ou pela impossibilidade metodológica de reconhecer o próprio núcleo. Um exemplo concreto de certa “rigidez estrutural” é destacado pelo professor Bezerra em sua avaliação da reconstrução que o próprio Lakatos fez dos primórdios da Mecânica Quântica, período conhecido como “Antiga Teoria Atômica” (ATA).

O modelo lakatosiano não prevê a possibilidade de processos mais sutis e menos óbvios dentro da dinâmica do conhecimento científico. Por exemplo, não se prevê a possibilidade de uma teoria ser *refutada* e ainda assim ser *conceitualmente fecunda* e influenciar outras teorias; não se leva em conta a possibilidade que uma teoria possa *inspirar* poderosamente os teóricos mesmo depois de ter sido refutada. E, como vimos, foi exatamente algo desse tipo que se deu com a teoria bks: a sua influência se fez sentir em mais de um aspecto da MQ moderna. É principalmente por essa razão que parece difícil, senão impossível, interpretar o caso da teoria bks dentro de uma perspectiva lakatosiana. (Bezerra, 2004, pág. 18)

Tal rigidez se mostrou presente em nosso trabalho, embora não tenha se configurado um impeditivo, ao caracterizarmos o núcleo do programa de pesquisa cosmológico (faremos isso no capítulo 2). Somos levados a classificar a formação de uma proposta de programa por Einstein. Apenas uma proposta, mas que será parcialmente resgatada por Friedman e Lemaitre. Evidentemente tal conceito não provém de Lakatos e nem é por ele mencionado em seus trabalhos, mas mostra certa dificuldade em “enquadrar” a história da ciência em sua estrutura.

1.5.2 - A avaliação unicamente empírica da progressividade das teorias

Outra questão importante é verificar o papel dos problemas empíricos e dos problemas conceituais. Observamos que, ao longo da história da ciência, certas contribuições empíricas contribuem para a formulação de sistemas teóricos (e não apenas contribuem no âmbito de verificar tais sistemas). Além disso, em sua caracterização da série de teorias que Lakatos insere na heurística positiva do programa, as teorias são sequencialmente mais progressivas. Todavia, tal progressividade é avaliada apenas em relação ao excesso de conteúdo empírico.

Laudan, outro eminente filósofo do período conhecido como “virada historicista”, ao longo de seu conhecido livro “O progresso e seus problemas” coloca em relevo sua crítica a Lakatos nesse ponto, especialmente por ele ignorar a importância dos chamados “problemas conceituais” e reforça que a avaliação de

⁶ Apesar de tratar-se de uma opinião pessoal, tal impressão é corroborada por Feyerabend em seu prefácio de “Contra o método”.

teorias apenas pelos problemas empíricos que resolve não é a mais apropriada, tanto pela possível subdeterminação empírica, quando teorias rivais possuem o mesmo conteúdo empírico, quanto pela importância dos aspectos conceituais que podem colocar teorias concorrentes em patamares distintos.

Tais teorias são exemplificações específicas do programa geral de pesquisa, que pode ser progressivo ou regressivo – o progresso, muito mais para Lakatos que para Kuhn, é função exclusiva do crescimento empírico de uma tradição. É a posse de maior “conteúdo empírico” ou de um mais alto “grau de corroboração empírica” que torna uma teoria superior e mais progressiva que outra. (LAUDAN, 2011, pág. 108)

Laudan se afasta de Kuhn e Lakatos ao dar um peso significativo aos problemas conceituais em uma disputa entre teorias. Aparentemente os dois atribuem peso muito maior às anomalias e verificações empíricas como fator determinante em uma sucessão de paradigmas ou competição entre programas de pesquisa. O episódio do eclipse de Sobral é um importante caso onde problemas conceituais levaram a um desgaste de uma teoria, até então, abundantemente consagrada e à ascensão de um novo e complexo sistema teórico, atrelado a uma nova visão de mundo, inicialmente sem comprovação empírica. Esta nova teoria revelou-se, rapidamente, promissora ao resolver anomalias, até então, de pouca importância.

É fundamental ressaltar, desde o começo, que um problema conceitual, em geral, será mais sério que uma anomalia empírica... Essa diferença de peso acontece não porque a ciência é mais racionalista que empírica, mas porque costuma ser mais explicar um resultado experimental anômalo do que rejeitar de saída um problema conceitual. (Laudan, 2011, página. 91)

Podemos complementar a crítica de Laudan, feita com bastante propriedade, com um aspecto peculiar da cosmologia científica: a relevância dos dados empíricos para a construção do próprio núcleo. Referimos-nos especificamente à lei de Hubble (também será assunto dos próximos capítulos) que faz parte do núcleo, mas, num primeiro momento, se apresentou como uma relação apenas empírica. Uma defesa da abordagem lakatosiana pode argumentar que uma lei empírica não pode localizar-se no núcleo do programa, mas que sua interpretação sim. Porém persiste o problema apontado por Laudan: uma teoria pode superar a anterior em racionalidade pelos problemas conceituais que resolve. Na cosmologia houve uma escassa fonte de problemas empíricos até o final da década de 60, o que evidencia que a disputa entre as diferentes teorias cosmológicas se deu majoritariamente no campo dos problemas e interpretações conceituais possíveis.

1.6 - A metodologia da teoria da ciência

Com o intuito de contornar os conhecidos obstáculos que surgem diante das tentativas de elaborar reconstruções racionais de parte da história da ciência, que foram apontados nas seções anteriores deste trabalho, utilizaremos as ferramentas contidas na Metodologia da Teoria da Ciência (MTC), organizada e desenvolvida pelo professor Jose Raymundo Novaes Chiappin. A metodologia da Teoria da Ciência nos

permite organizar a forma de vínculo que se estabelece entre cada teoria contida no cinturão de proteção e seu núcleo duro. Em outras palavras, a heurística positiva descreve a existência de uma série progressiva de teorias. Em estudos de caso da história da ciência, muitas vezes, não é muito direta e unívoca a determinação do núcleo e de sua extensão. Podemos identificar diferentes formas de vínculo entre as teorias elaboradas e seu núcleo, não apenas de natureza ontológica. Dessa forma, a MTC nos fornece critérios para classificar a natureza dessa relação e assim tornar mais clara, no decorrer do estudo da evolução histórica da cosmologia científica, em que momentos ocorrem a elaboração de elementos de seu núcleo ou da série de teorias.

A utilização da MTC já está presente em uma extensa quantidade de trabalhos do professor Chiappin. Um exemplo bastante ilustrativo é sua reconstrução racional do programa de pesquisa do racionalismo clássico (CHIAPPIN, 1996) em que o autor nos mostra a importância de tal metodologia no intuito de separar e classificar os componentes do núcleo do programa de pesquisa: “introduzir uma estrutura mais fina no núcleo teórico do programa racionalista, por meio da qual podem-se perceber os detalhes e nuances de cada uma das propostas racionalistas, tornando a compreensão do debate mais rigorosa e iluminando mais cuidadosamente os principais problemas envolvidos com a evolução do programa”

Em seu desenvolvimento original, a MTC foi utilizada para avaliar candidatas a concepções científica e identificar as suas características. A utilizaremos para um fim um pouco diferente de suas aplicações anteriores, mas com as quais ele se articula e dialoga: buscaremos identificar a forma pela qual as diferentes teorias que compõem um programa se prendem ao seu núcleo duro. Tal como organizada por Chiappin, essa metodologia permite reconstruir concepções de ciência a partir de um olhar para trás em seu desenvolvimento histórico e racional

A metodologia da Teoria da Ciência proporciona uma estrutura articulada que ajuda a conduzir a construção e a avaliação de candidatos à concepção da ciência no que diz respeito a como esses candidatos abordam esses cinco problemas básicos. A fim de realizar este propósito, a metodologia assume que uma Teoria da Ciência (TC) é um sistema de fins, valores, teses, princípios, métodos, critérios e técnicas. (CHIAPPIN, 1996, pág 198)

A MTC organiza as teorias segundo três grandes níveis, que serão utilizados com o propósito de identificar as diferentes teorias cosmológicas:

- metafísico;
- lógica da ciência;
- história da ciência.

O nível da metafísica, por sua vez, pode ser decomposto nos subníveis:

- Ontologia; discute não apenas a realidade de teorias, mas também de entidades, e engloba o domínio sobre a natureza e sua relação com a área de investigação
- Epistemologia; discute a natureza e o alcance do conhecimento, bem como seus limites.
- Axiologia; discute a natureza dos valores e dos juízos de valor que devem ser almejados pelo conhecimento científico. A axiologia pode, até mesmo, ser dividida entre uma axiologia de fins ou de valores.

O nível da lógica da ciência pode ser decomposto em

- metodologia; onde se aplica a unidade epistêmica para a resolução de problemas
- metametodologia; onde se discute os métodos empregados pela ciência para resolução de problemas, aqui se discute as metodologias e suas relações com a ciência em que são utilizadas.

O nível da história da ciência avalia o papel desempenhado pela história da ciência na concepção de teorias. Descrevemos anteriormente a importância de estudos históricos para os autores da chamada “virada historicista”, enquanto que para outros, o desenvolvimento científico passa mais por argumentos lógicos e de outras naturezas, neste nível se avalia a importância dos estudos de caso na concepção de candidatos a teorias científicas. Maiores detalhamentos e refinamentos desta estrutura podem ser consultados nos trabalhos de Chiappin.

O refinamento apresentado acima servirá para olharmos para os desdobramentos da cosmologia que serão apresentados nos capítulos seguintes como uma possibilidade de utilizarmos alguns recursos que não foram apresentados por Lakatos, mas que nos permitem uma avaliação um pouco mais pormenorizada do programa cosmológico. A dificuldade de se demarcar os componentes do núcleo nos levam a contextos que, aparentemente, não foram diretamente detalhados em sua metodologia dos programas de pesquisa. Uma curiosa dificuldade ocorre quando um núcleo se decompõe em dois caminhos distintos, formando o que chamaremos de subprogramas. Observamos no estudo da cosmologia que as contribuições de Einstein não formam propriamente um programa de pesquisa, uma vez que seu modelo cosmológico sofrerá profundas correções por meio dos trabalhos de Friedman e Lemaitre, que inevitavelmente alteram seu núcleo antes de se verificar a construção de uma série de teorias, ou de qualquer verificação empírica. Dificuldades similares a essa foram encontradas pelo professor Chiappin em sua reconstrução racional do programa racionalista clássico. Quando diferentes desdobramentos de um programa estão comprometidos com partes distintas das teses que compõem seu núcleo, ocorre o que ele classifica como a formação de subprogramas.

Poincaré desenvolve uma concepção de teoria física com o objetivo de demarcá-la da concepção metafísica da ciência segundo o racionalismo clássico. Essa concepção é compartilhada por Duhem em sua oposição à concepção metafísica. Pressupomos aqui que ambos desenvolvem um programa de pesquisa neoclássico sobre a natureza, a estrutura e o objeto da teoria física que tem em comum sua oposição à concepção metafísica da ciência. No entanto, devido às profundas peculiaridades e diferenças entre eles, podemos considerar que eles constroem dois subprogramas do programa de pesquisa neoclássico: o subprograma neoclássico convencionalista/pragmatista de Poincaré e o subprograma do realismo estrutural de Duhem. (CHIAPPIN; LEISTER, 2011p.11)

Algo muito similar ocorre em nosso estudo e reconstrução da cosmologia científica, como parte do núcleo do programa proposto por Einstein é preservada nos trabalhos de Friedman e Lemaitre, temos algo similar a um subprograma. Todavia, sem que a proposta de Einstein apresente o mínimo de conteúdo empírico, somos levados a afirmar que sua proposta sequer se concretiza enquanto um programa. O único programa de pesquisa concebido na história da cosmologia é o de Friedman-Lemaitre, em que se recupera a maior parte das teses propostas por Einstein.

Referências

BEZERRA, Valter Alnis. Schola quantorum: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica Parte II: crítica à leitura lakatosiana. *Scientiae Studia* [online]. 2004, v. 2, n. 2

CARNAP, RUDOLF. The Logical Structure of the World. IN: The Logical Structure of the World and "Pseudoproblems in Philosophy". Tradução de Rolf A. George. Chicago e La Salle: Open Court. 2003.

CHIAPPIN, J.R.N. Duhem's theory of science: the interplay between Philosophy and his-tory of science. 1989. 388f. Thesis (Ph.D) - University of Pittsburgh, U.S.A., 1989

CHIAPPIN, J. R. N. Racionalidade, decisão, solução de problemas e o programa racionalista. *Ciência e Filosofia*, (5):155-219. 1996.

CHIAPPIN, J. R. N, LEISTER, C. Duhem como precursor de Popper, Kuhn e Lakatos sobre a metodologia da escolha racional de teorias: da dualidade à triplidade metodológica. *Veritas: revista de Filosofia da PUCRS*, v.60, n.2, maio-agosto. 2015.

Chiappin, J. R. N., & Leister, A. C. (2011). UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL DO PROGRAMA DE PESQUISA DO RACIONALISMO NEOCLÁSSICO: OS SUBPROGRAMAS DO CONVENCIONALISMO/ PRAGMATISMO (POINCARÉ) E DO REALISMO ESTRUTURAL CONVERGENTE (DUHEM). *TRANS/FORM/AÇÃO: Revista De Filosofia*, 34(2), 103–134. <https://doi.org/10.1590/S0101-31732011000200007>

EINSTEIN, A. (1917). Considerações cosmológicas sobre a teoria da relatividade geral. *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzungsberichte der Königlich preussischen Akademie der Wissenschaften*, 142-152.

FEYERABEND, P. *Contra o método* São Paulo: Unesp. 2007.

KUHN, T. *Estrutura das Revoluções Científicas*. São Paulo: Perspectiva. 1975.

LAKATOS, I. "O Falseamento e a Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica".

LAKATOS, I; MUSGRAVE, A. (Org.). *A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*. São Paulo: Editora Cultrix/Editora da Universidade de São Paulo, 1979, p. 109-243.

_____. *History of science and its rational reconstructions*. In: HACKING, I. (org.) *Scientific revolutions*. Hong-Kong: Oxford University, 1983.

LARANJEIRAS, Cassio Costa. *O programa de pesquisa de Ludwig Boltzmann para a Mecânica Estatística: uma reconstrução racional*. São Paulo (tese de doutorado). 2002.

LAUDAN, Larry. *O progresso e seus problemas: Rumo a uma teoria do crescimento científico*. Trad. por Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora Unesp, 2011.

MARTINS, Roberto de Andrade. *Como não escrever sobre história da física—um manifesto historiográfico*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 2001. Edição 23 (1), 113-129.

MOULINES, Carlos *Ulises*. *O desenvolvimento moderno da filosofia da ciência (1890–2000)*. *Associação Filosófica Scientiæ Studia*, 2020.

POPPER, Karl. *A lógica da pesquisa científica*. 4. ed. São Paulo: Cultrix, 1989. (Tradução da 3ª edição, revista e com apêndices, de *The logic of scientific discovery*, 1972).

_____. *Textos Escolhidos*. Org. David Miller. Rio de Janeiro: Contraponto: Ed. PUC-Rio, 2010.

SILVA, Jojomar Lucena da. *Abordagens comparativas de ciclos e de potenciais da termodinâmica: escolha racional ou pragmática?* São Paulo, 2015.

ZAHAR, E. *Why did Einstein's programme supersede Lorentz's?* *The British Journal for the Philosophy of Science*, 1973.

CAPÍTULO 2

MODELO DE EINSTEIN: PRIMEIRA PROPOSTA DE PROGRAMA DE PESQUISA EM COSMOLOGIA

2.1 - Demarcações Possíveis Sobre As Origens Da Cosmologia Científica

A tentativa de empreender uma reconstrução racional da atividade científica, em qualquer de seus domínios, envolve o difícil esforço historiográfico de demarcar suas origens: seja da termodinâmica, do eletromagnetismo, ou até mesmo de áreas mais recentes como a mecânica quântica, envolve uma série de divergências sobre suas etapas iniciais. A escolha de particulares episódios históricos como “nascimento” de uma área complexa e abrangente de investigação científica pode ser objeto de controvérsias e críticas por parte de historiadores com fundamentações e argumentos distintos. Apenas a título de ilustração, observamos trabalhos que demarcam o nascimento da mecânica quântica com o trabalho de Max Planck, de 1900 (CHIBENI), mas também há renomados historiadores, como o professor Olival Freire Jr, que interpretam que tal origem seja melhor descrita pelo ano de 1925, com o desenvolvimento da mecânica ondulatória de Schroedinger. (FREIRE JÚNIOR, 2021) Não nos surpreenderia, por exemplo, que outros pesquisadores considerem a data da publicação dos trabalhos de De Broglie (1913) ou algum outro episódio em específico. O que afirmamos é que, de fato, nosso trabalho não se exime de possíveis interpretações distintas sobre o nascimento da cosmologia, apesar de nossos esforços e nossa argumentação.

No capítulo anterior descrevemos como Popper e Lakatos trouxeram, em alguma medida, contribuições para estabelecer uma possível demarcação para a ciência e que tal demarcação pode ser utilizada em uma tentativa de determinar historicamente quando a cosmologia se torna científica. Esses autores, dentro de uma vasta tradição, fazem contundentes críticas à uma visão popular de progresso da ciência, muito presente ou sugerida nas comumente pobres abordagens de tópicos de história contidos nos poucos parágrafos disponíveis nos livros didáticos de ciências. Afirmações como “Tales de Mileto foi o primeiro filósofo”, ou “Galileu funda a ciência moderna” são muito presentes nos manuais didáticos e, às vezes, não são mais do que reproduções de descuidos ou deslizes que vão se perpetuando ao longo das décadas.

Uma afirmação forte, e geralmente não tanto justificada, é encontrada com frequência em livros de Astronomia, artigos de divulgação científica e cursos de graduação em Astronomia e Física: que a cosmologia científica é fundada por Einstein com a publicação de seu artigo “Considerações Cosmológicas sobre a Relatividade Geral”, no ano de 1917. Tal afirmação pode ser encontrada de forma mais direta ou indireta em muitos textos, como a citação apresentada a seguir: “Os fundadores da cosmologia. O quarteto fantástico (Einstein, de Sitter, Friedmann e Lemaître) resolveu

os principais desafios teóricos da época, enquanto Hubble fundou a astronomia extragaláctica e descobriu a expansão do Universo” (LIMA, 2017).

Se nós desejamos investigar o nascimento da cosmologia científica, devemos realizar uma demarcação apropriada entre ciência e pseudociência para, então, determinarmos quando a cosmologia se torna científica. Determinar datas de nascimento das diversas áreas da ciência é algo, em geral, problemático, pois uma soma de importantes contribuições individuais é o que leva uma determinada área a consolidar-se como objeto de interesse por parte dos cientistas. Atribuir a contribuições individuais características como “ter fundado” a cosmologia científica é, na grande maioria dos casos, incorrer em reducionismos e anacronismos.

Alguns concebem a ciência como “a verdade”, “aquilo que foi provado” – algo imutável, eterno, descoberto por gênios que não podem errar. É uma visão falsa, já que a ciência muda ao longo do tempo, às vezes de um modo radical, sendo na verdade um conhecimento provisório, construído por seres humanos falíveis e que, por seu esforço comum (social), tendem a aperfeiçoar esse conhecimento, sem nunca possuir a garantia de poder chegar a algo definitivo. Como se pode saber que uma dessas visões sobre a ciência é inadequada e que a outra descreve a realidade? Apenas pela análise de sua história. (MARTINS, 2001, p.2)

Antes de avançarmos, devemos destacar os diferentes usos da palavra “cosmologia”, pois em um de seus sentidos possíveis, a prática e o estudo da cosmologia estão ligados a questões místicas e religiosas e, neste contexto, sua prática existe há muitos séculos e remonta às origens da humanidade e, conseqüentemente, do pensamento racional (KRAGH, 1996, prefácio). Por outro lado, existe a “cosmologia científica” que atualmente é ministrada em cursos de Física e Astronomia e é exatamente sobre sua “cientificidade” que pretendemos nos ater em maiores detalhes. Observemos como o nascimento da cosmologia é abordado em textos de ensino e divulgação da Astronomia para uma breve justificativa e ilustração do termo acima citado: no texto de Lima, encontramos a menção a Einstein, De Sitter, Friedman e Lemaitre como os “fundadores” da cosmologia, enquanto Edwin Hubble é batizado de “fundador” da Astronomia extragaláctica. Semelhante concepção é apresentada no texto de Fleming, voltado para a divulgação de Astronomia, onde lemos que Einstein, com sua teoria de gravitação transforma a cosmologia em uma ciência quantitativa (FLEMING, 2001, p.4).

Podemos observar uma interessante divergência entre historiadores, filósofos da ciência e pesquisadores, sobre o momento a partir do qual a cosmologia deixa de ser uma atividade meramente contemplativa, especulativa, religiosa, e passa a ser objeto de estudos científicos. Faremos nas próximas linhas uma breve recuperação do “estado da arte” sobre o assunto. Pesquisamos nos trabalhos de alguns importantes filósofos e historiadores da cosmologia: Helge Kragh, Stephan Brush, Alexandre Koyré e Jacques Merleau-Ponty. Um interessante resultado pôde ser obtido, os quatro autores aparentam divergir sobre o nascimento da cosmologia científica. Em alguns é

bastante explícita a opinião sobre a questão, em outros acreditamos que a resposta é dada de forma indireta. Vejamos abaixo o que é descrito por cada um deles.

2.1.1 - A cosmologia praticada pelos gregos pode ser considerada científica?

Tal ponto de vista encontra respaldo no grande historiador da ciência Helge Kragh. Esse autor dinamarquês possui mais de uma centena de artigos e livros sobre cosmologia, dentre eles destacamos “Cosmology and Controversy” e acreditamos ser a sua fonte mais detalhada sobre as origens da cosmologia científica. Dentre outras questões ele também discute o status da cosmologia no século XX, fornecendo um panorama geral do problema. Apesar de não se propor a resolver especificamente o problema que estamos discutindo neste texto, o autor ressalta que o status científico ou não da cosmologia é uma questão que divide opiniões. Recorda que, enquanto alguns celebram o “nascimento” da cosmologia científica em 1917 com o artigo de Einstein, outros preferem tratar da primeira detecção da radiação cósmica de fundo, por Penzias e Wilson como o marco inicial da cosmologia moderna (científica). Alguns, segundo Kragh, preferem tomar o artigo de Hubble e Humason de 1929 como marco inicial, por proverem as primeiras medidas cosmológicas quantitativas.

Alguns dirão que a suposta mudança de cosmologia 'filosófica' para verdadeiramente científica ocorreu apenas com a descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas em 1965, enquanto outros datam a virada para as contribuições de Edwin Hubble no final da década de 1920 sobre o significado cosmológico dos redshifts galácticos. Outros, todavia, sugerem que o ponto de virada deve ser encontrado no modelo cosmológico de Einstein de 1917, baseado em sua teoria geral da relatividade. (KRAGH, 1996. p.2)

Com algumas ressalvas ele considera que a antiga cosmologia dos gregos, como o modelo dos epiciclos de Ptolomeu, pode ser considerada científica por fazer previsões sobre os movimentos planetários que podiam ser testadas. Uma dificuldade apontada por ele é a enorme distinção entre a concepção de Universo dos gregos e a atual. Consideravam um universo imensamente menor, basicamente restrito ao que hoje entendemos ser as dimensões do Sistema Solar.

Embora a cosmologia moderna data, em muitos aspectos, do início do século XX, isso não significa que as teorias anteriores sobre o universo não fossem científicas. O cosmos dos gregos antigos era muito diferente do nosso, mas a cosmologia de Ptolomeu era basicamente científica na medida em que era um modelo matemático que se baseava em observações e tinha consequências testáveis. (KRAGH, 1996. p.2)

Parte da dificuldade, segundo Kragh, em responder quando a cosmologia se torna científica está no próprio nome. Cosmologia para os povos antigos se tratava muito mais de especulações sobre estrutura, criação e sentido do universo, esta “protociência” estava entre as discussões filosóficas de Platão, Aristóteles e outros filósofos do período clássico, mas, com o tempo, passa a ser incorporada à nascente Astronomia, graças ao sucesso das contribuições de Hipparco, Eudoxo e Ptolomeu.

Uma vez que a ciência astronômica lida com a parte “visível” do Universo, o limite tecnológico dos telescópios afastará a cosmologia das discussões astronômicas até a segunda metade do século XIX. Havia um claro afastamento entre a cosmologia e a astronomia, muito mais ligada a cálculos matemáticos acerca das posições dos planetas nas esferas celestes.

O autor, em um livro sobre a história da cosmologia, deixa ainda mais claro seu ponto de vista. Reforça como o termo já foi utilizado de diferentes formas. De certa forma a cosmologia é a mais antiga das investigações humanas, porém, até o início do século XX havia um distanciamento entre a cosmologia e a astronomia, mais focada em determinar as posições planetárias durante o ano. Já a cosmologia encontrava-se imersa em um contexto mais místico e mágico.

Até o século XX, a palavra “cosmologia” raramente era usada em um contexto científico. Os primeiros livros que traziam a palavra em seus títulos datam da década de 1730. Como ficará claro, a cosmologia não teve uma identidade profissional até depois da Segunda Guerra Mundial. Estritamente falando, não havia ‘cosmólogos’ antes dessa época, apenas cientistas que ocasionalmente lidavam com questões de natureza cosmológica. Embora seja um pouco anacrônico referir-se a esses cientistas como “cosmólogos”, é um rótulo conveniente e não fiz nenhum esforço especial para evitá-lo. (KRAGH, 2017, p.1)

Parece-nos que o autor demarca com bastante propriedade o problema, a cosmologia científica, segundo Kragh, ganhará destaque especialmente após a segunda guerra mundial, com o desenvolvimento da Física Nuclear e de partículas elementares. Kragh demonstra consciência de como pode ser problemática a eleição de um episódio em particular, tal preocupação não parece ser compartilhada na mesma intensidade pelas outras fontes consultadas

2.1.2 - A cosmologia se torna científica com a detecção da radiação cósmica de fundo?

Outro referencial consultado foi o historiador estadunidense Stephen G. Brush, que em 1992 escreve o artigo “How cosmology became science”, publicado pela Scientific American. Apesar do nome bastante sugestivo, não encontramos explicitamente em seu texto uma resposta a essa questão. O artigo descreve o episódio da primeira detecção experimental da radiação cósmica de fundo, pelos cientistas Penzias e Wilson, dos institutos BELL, em 1966. Não podemos dizer que o autor defenda explicitamente que este seja o nascimento da cosmologia científica por uma pequena sutileza em suas palavras de conclusão.

O universo realmente começou no big bang, ou houve uma fase de contração anterior - um "big crunch" - que levou à alta temperatura e densidade? O universo continuará a se expandir para sempre, ou eventualmente entrará em colapso em um buraco negro? A criação do universo envolve a teoria quântica de forma fundamental? Essas idéias agora

dominam o físico. O fato de os cientistas considerarem tais questões dignas de investigação séria é em grande parte uma consequência da descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, que transformou a cosmologia em uma ciência empírica. (BRUSH, 1992, pág. 70)

Portanto, o autor defende que, com o episódio da primeira detecção da R.C.F a cosmologia se eleva ao status de “ciência empírica”, mas é possível que exista uma ciência, como a Física ou até mesmo a Cosmologia, que não seja empírica? Pela leitura do texto de Brush, seu ponto de vista parecer ser, ainda que sutilmente, que a cosmologia se torna científica quando tornar-se empírica. Este caráter empírico é condição necessária, porém, não suficiente. Já em 1929, com a formulação da lei de Hubble, os redshifts galácticos são dados empíricos. Porém o autor observa, em uma leitura Popperiana do problema, que a cosmologia ainda não era falseável, no sentido de que tais dados empíricos não permitiam ainda falsear a teoria, mas apenas contribuíram para a elaboração de um modelo teórico. Um modelo teórico construído com base nos únicos dados observacionais disponíveis, até então, não é falseável.

2.1.3 - Teria a cosmologia científica renascido no século XX?

Outro historiador da ciência consultado, com diversas publicações na área da cosmologia, foi Jacques Merleau-Ponty, quem descreve que esta ciência tenha passado por duas grandes revoluções: a primeira com Copérnico (PONTY, 1976, pag.63) e a segunda no início do século XX: “entre 1900 e 1924 uma segunda revolução cosmológica ocorreu e ninguém sabe quando será seu final” (PONTY, 1976. p. 159). Dando prosseguimento, o autor inicia sua discussão mais pormenorizada pela teoria geral da relatividade, que lançará as bases da cosmologia moderna com o artigo de Einstein de 1917. Observamos ainda que Ponty defende que a cosmologia deixa de ser ciência no século XVIII para reconquistar este status no século XX e, portanto, não se trata de nascimento, mas sim de seu renascimento.

Na concepção de conhecimento racional que prevaleceu na Europa até o final do século XVII, a cosmologia (naquela época imperfeitamente distinta da física), embora não fosse a ciência mais elevada, era pelo menos um elemento essencial daquele supremo sistema de pensamento chamado filosofia. (p.13)

Nas páginas seguintes ele afirma que o nascimento da “filosofia natural” em Newton contribuiu para alterar o status da cosmologia a tal nível em que ela parecia destinada gradualmente desaparecer. O autor lembra como, em meados do século XVIII, Kant escreve na “Crítica Da Razão Pura” que questões como: se o Universo é infinito espacialmente ou se teve uma origem no tempo são insolúveis, sem significado, e qualquer um que tente respondê-las cairia em contradição.

2.1.4 - Teria a cosmologia científica nascido na época moderna?

Por fim, citaremos também o trabalho do historiador da ciência Alexandre Koyré, com extensa bibliografia sobre cosmologia, especialmente no período da Idade

Média. Ele dedica um de seus textos a esta questão acerca do nascimento da cosmologia científica, também sem oferecer uma justificativa direta a essa questão, mas deixa algumas questões bastante claras de acordo com sua visão de ciência. No texto “As etapas da cosmologia científica” o autor faz uma análise da cosmologia praticada pelos gregos no período clássico e a compara com a Copernicana e de seus contemporâneos, sem entrar nas cosmologias do século XX, por exemplo.

Se eu tivesse tomado inteiramente ao pé da letra o título de minha comunicação: as cosmologias científicas, isto é, aquelas que levaram às últimas consequências a separação e, portanto, a desumanização do cosmo, não teria, verdadeiramente, grande coisa a dizer e teria tido de começar imediatamente com a época moderna, provavelmente com Laplace. (KOYRÉ, 1982, p. 80)

Por um lado, o autor defende que, mesmo cosmologias modernas de Copérnico, Kepler e até Newton, as teorias cosmológicas encontravam-se vinculadas a noções mágicas e religiosas o que, em sua demarcação, faz com que tais cosmologias não possam ser consideradas científicas. Por outro lado, ele destaca as cosmologias gregas neste “caminhar” para a ciência por ser onde tenha surgido, pela primeira vez, uma clara oposição entre o homem e o cosmo, resultando na desumanização do último. Argumenta que, se a ciência fosse caracterizada apenas pela capacidade de fazer previsões, a cosmologia babilônica seria científica. Os babilônios, segundo Koyré, observaram cuidadosamente o céu, fixaram as posições das estrelas e organizaram catálogos, anotando diariamente posições dos planetas. Porém, ele defende que não há ciência onde não há teoria (p. 82) e, assim, defende que a cosmologia dá seus primeiros passos na ciência por meio dos gregos.

Koyré deixa um palpite ao citar “provavelmente com Laplace” e, de fato, Laplace faz uma das primeiras estimativas do diâmetro da Via Láctea, num período em que não acreditávamos na existência de outras galáxias. Isso ainda seria objeto de discussão entre astrônomos em 1920. Laplace estima o que imaginava serem as dimensões do Universo como um todo. No modelo de Laplace há uma física bem elaborada, há também a chamada desumanização do cosmo. Falta, porém, a capacidade de fazer previsões testáveis e de ser falseável. As razões de tal escolha não são apresentadas ou defendidas pelo autor.

2.2 - A COSMOLOGIA NA VIRADA DO SÉCULO XIX PARA O XX

Como descrito nas páginas anteriores, existem diversas interpretações possíveis sobre a origem da cosmologia, desde puras especulações sobre o universo que podem ser encontradas em textos de antigos pensadores até a contemporânea prática científica, com seus métodos e instrumentos. No início do século XX há uma grande ruptura, que pode ser considerada como nascimento ou renascimento da cosmologia científica. Faremos uma breve menção ao contexto do século XIX para melhor apresentar tal ruptura. É importante termos em consideração que a gravitação

de Newton foi um programa de pesquisa muito forte e com grande sucesso preditivo ao longo dos séculos XVIII e XIX onde, se utilizarmos uma linguagem kuhniana, a pesquisa em astronomia se assemelhava mais a uma ciência normal do que a uma ciência revolucionária.

Uma relação importante entre ciência e tecnologia pode ser inferida dessa discussão: os limites tecnológicos demarcam os limites do alcance científico. Ao longo dos séculos o ser humano foi, gradativamente, estabelecendo métodos e coletando dados que lhe permitam medir distâncias maiores. Conseqüentemente, os modelos cosmológicos passaram a se tornar mais complexos e a envolver maiores e mais distantes estruturas em larga escala. Uma questão diretamente relacionada à cosmologia envolvia a possível existência de outras galáxias, caso contrário o universo material seria restrito à Via Láctea, cercada ou não por um imenso vazio. A hipótese dos “universos-ilhas” se remete, pelo menos, ao grande filósofo Immanuel Kant. Importante suporte empírico sobre a estrutura da nossa galáxia é fornecido por William Herschel, seja por obtenção de medidas de paralaxe anual ou por estudos da cinemática estelar.

Herschel observa movimentos estelares preferencialmente no plano da galáxia, e nos deixa questionamentos sobre a natureza das nebulosas, que são, em sua maioria, outras galáxias. Na virada do século XIX para o XX essa questão estava longe de ser resolvida, encontramos artigos deste período favoráveis e contrários à hipótese de o universo estar encerrado apenas em nossa galáxia. De certa forma podemos dizer que tal controvérsia foi uma controvérsia cosmológica, pois continha uma discussão que envolvia a real extensão do cosmos. No artigo de Richard A. Proctor, publicado pela sociedade real astronômica, encontramos uma leitura não muito favorável à existência de múltiplas galáxias espalhadas pelo universo, apesar da ausência de uma afirmação direta e categórica. O autor defende que os movimentos próprios são indicativos de distâncias estelares mais confiáveis do que seus respectivos brilhos aparentes. Como consequência, considera superestimadas algumas medidas de distâncias obtidas previamente. Seria necessário, portanto, considerar menores não apenas as dimensões conhecidas da Via-Láctea, como também suas distâncias às estrelas de suas vizinhanças conhecidas até então.

Acredito que pesquisas futuras provarão não apenas que a Via Láctea como um todo está muito mais próxima do que temos imaginado, mas que partes dela estão absolutamente mais próximas de nós do que a mais brilhante das estrelas isoladas. Que partes da Via Láctea, por exemplo, na vizinhança de alfa-centauro, estejam mais próximas de nós do que aquela estrela, acho que todo o aspecto da galáxia naquela vizinhança é suficiente para sugerir, se não para demonstrar. (PROCTOR, 1876)

Encontramos em outro texto do mesmo período, também extraído dos anais da sociedade real britânica, uma leitura bastante divergente sobre a Via-Láctea e outros corpos no universo. O artigo de Cleveland Abbe, do ano de 1876 se aproxima bastante da compreensão moderna sobre a natureza das galáxias. Sem pretender incorrer em uma leitura excessivamente anacrônica, observamos em seu texto um forte indicativo de que o cosmos seja povoado por imensos aglomerados de estrelas, tais como a consagrada expressão “universos-ilhas” descreve as galáxias. Tomando como

referência o grande catálogo elaborado pelo célebre astrônomo John Herschel, de 1864, o autor expõe o que considera ser a possível natureza das nebulosas mais conhecidas e próximas de nós.

o universo visível é composto por sistemas, dos quais a Via Láctea, a grande e a pequena nuvem de Magalhães⁷, e a Nebulosa, são os indivíduos, e que são eles próprios compostos de estrelas (simples, múltiplas ou em aglomerados) e de corpos gasosos, com contornos regulares e irregulares (ABBE, 1876, pág. 262)

No mesmo artigo o autor cita que: “um exame cuidadoso foi suficiente para mostrar que as Grandes e Pequenas Nuvens de Magalhães são agrupamentos distintos, independentes entre si e isolados da Via Láctea” (ABBE, 1876, p. 258) reforçando novamente a interpretação da existência de agrupamentos estelares independentes de nossa galáxia e quão vivo esse debate se encontrava na virada do século XIX para o século XX. Uma importante contribuição para o debate sobre as nebulosas é oferecida por Vesto Slipher, mais especificamente, por seu catálogo de nebulosas publicado em 1917. O autor apresenta resultados espectroscópicos de suas medidas realizados desde 1912 no observatório Lowell. Seu trabalho apresenta a velocidade radial de 25 nebulosas, algumas com sinal negativo, o que indica movimento de aproximação do Sistema Solar, e a grande maioria com velocidades de afastamento. Diferentemente de outros contemporâneos, que foram mais cautelosos e não associaram imediatamente suas medidas espectroscópicas e seus desvios para a região do vermelho a movimentos de recessão de suas fontes, tal atitude é assumida por Slipher, que cita categoricamente as “velocidades radiais” de suas nebulosas observadas.

RADIAL VELOCITIES OF TWENTY-FIVE SPIRAL NEBULÆ.

Nebula.	Vel.	Nebula.	Vel.
N.G.C. 221	- 300 km.	N.G.C. 4526	+ 580 km.
224	- 300	4565	+ 1100
598	- 260	4594	+ 1100
1023	+ 300	4649	+ 1090
1068	+ 1100	4736	+ 290
2683	+ 400	4826	+ 150
3031	- 30	5005	+ 900
3115	+ 600	5055	+ 450
3379	+ 780	5194	+ 270
3521	+ 730	5236	+ 500
3623	+ 800	5866	+ 650
3627	+ 650	7331	+ 500
4258	+ 500		

Figura 2: velocidades de galáxias por meio do efeito Doppler, extraída de (SLIPHER; 1917)

⁷ O autor se refere às nuvens de Magalhães com os termos “NUBECULAE”. Sobre o termo “NEBULOSA” o autor muito provavelmente se refere à nebulosa de Andrômeda, de grandes proporções e cuja posição angular está entre a Via-Láctea e as duas nuvens de Magalhães, apesar de ser uma galáxia que se encontra muito mais distante do que ambas.

O trabalho de Slipher é importante para situarmos a cosmologia no início do século XX. Uma importante controvérsia entre H. Curtis e H. Shapley em 1920 sobre a natureza das nebulosas ficou conhecido como “O grande debate” cuja solução teria que esperar até a publicação de Edwin Hubble em 1923, quando apresentará importantes resultados sobre as distâncias das mesmas nebulosas, além da importante relação entre distâncias e velocidades radiais. Hubble reconhece o valor desses resultados obtidos por Slipher. Tais publicações nos permitem sentir o “clima acadêmico” sobre a natureza de tão estranhos objetos no ano da publicação do artigo cosmológico de Einstein, também em 1917.

2.3 - Do universo de Newton ao universo de Einstein

Descrevemos no início do capítulo que o artigo de Einstein de 1917 é considerado, a depender do que se entende por ciência, um dos pontapés iniciais da cosmologia científica. Dois anos após publicar a teoria geral da Relatividade, o autor busca aplicar suas concepções de espaço-tempo e matéria para o universo como um todo, sobre os efeitos gravitacionais da matéria sobre a geometria e curvatura do espaço-tempo. Sua importância é bastante reconhecida pelos principais historiadores da cosmologia.

Albert Einstein não inventou a cosmologia, mas colocou uma base inteiramente nova e, como se viu, extremamente frutífera. É geralmente aceito que as sementes de uma revolução na cosmologia teórica foram plantadas quando Einstein completou sua teoria geral da relatividade no outono de 1915. (KRAGH, 1996, p.6)

Observamos, ao longo das páginas iniciais do artigo de Einstein, que o “cenário cosmológico” no início do século passado ainda remetia ao modelo imaginado por Newton. Einstein inicia seu texto resumindo a concepção Newtoniana de universo. Nesta concepção ele é infinito espacialmente e povoado por estrelas homogeneamente distribuídas. Há uma conhecida troca de cartas entre Newton e um religioso britânico, conhecido como reverendo Benthon. Nela podemos observar o modelo de universo, lembrado e analisado por Einstein no início de seu texto.

Quanto à sua primeira pergunta, parece-me que, se a questão do nosso Sol e seus planetas, e toda a matéria do Universo, eram uniformemente espalhados pelos céus, e cada partícula tinha uma gravidade inata em relação a todo o resto, e todo o espaço, em que tudo isso é importante estava disperso, não era finito; o assunto [localizado] do lado de fora deste espaço tenderia pela sua gravidade para toda a matéria do interior, e conseqüentemente se concentraria no meio do espaço, formando ali um grande massa esférica. Mas se o assunto fosse distribuído uniformemente (dispostos) em um espaço infinito, nunca poderia se encontrar em uma massa, mas qual parte dele se encontraria em mais um e parte dele em outro, formando então um número infinito de grandes massas, espalhadas a grandes distâncias um do outro através de todo esse espaço infinito. E assim! poderia ser formado o sol e as estrelas fixas. (Cohen e Westfall, 2002, p. 400)

Ao longo deste intervalo de mais de 200 anos entre estes dois notáveis cientistas não temos registros de observações empíricas utilizadas para sustentar alguma outra hipótese de natureza cosmológica. Até mesmo, na segunda metade do século XIX, boa parte dos círculos acadêmicos, procurou distanciar-se da cosmologia por seu caráter ser supostamente especulativo sem possibilidade de verificação empírica. Não nos surpreende, portanto, que nas primeiras páginas de seu artigo, Einstein analisa o universo Newtoniano à luz dos recentes avanços na mecânica dos fluidos e na mecânica estatística.

Como uma aproximação, substitui a segunda lei de Newton pela bem conhecida equação de Poisson, somada às equações de movimento e às condições de fronteira do sistema em questão: o próprio universo.

Faremos abaixo uma brevíssima demonstração desta equação, que será utilizada para verificar as inconsistências do modelo cosmológico de Newton. Na gravitação newtoniana clássica podemos afirmar que um corpo de massa m gera um campo gravitacional radial g , associado à sua massa que, integrado em toda sua superfície, pode ser descrito em termos de um potencial gravitacional ϕ segundo a relação abaixo:

$$\phi = \int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{g} \, da \quad (\text{eq. 1})$$

Todavia, vamos escrever esse campo gravitacional em função da constante universal gravitacional e de sua massa m .

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{g} = -G \frac{m}{r^2} \cos\theta^8$$

$$\phi = \int_S G \frac{m}{r^2} \cos\theta \, da = G \cdot m \int_S \frac{1}{r^2} \cos\theta \, da = -4\pi G m \quad (\text{eq. 2})$$

Onde \mathbf{n} representa o versor da direção normal e θ representa o ângulo entre as direções de \mathbf{n} e de \mathbf{g} .

Essa última integral pôde ser resolvida simplificada, pois observarmos que ela corresponde, por definição, ao ângulo sólido total, integrado esfericamente (o campo gravitacional de uma massa se propaga radialmente).

Feito isso, podemos generalizar esse resultado para várias massas m_i no interior da superfície. Mais detalhes podem ser conferidos em THORNTON (THORNTON, 1988).

$$\int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{g} \, da = -4\pi G \sum_i m_i = -4\pi G \int_V \rho \, dV \quad (\text{estendendo para uma distribuição contínua})$$

Por fim, podemos lançar mão do conhecido teorema da divergência de Gauss:

⁸ Estamos usando a conhecida notação de representar vetores por letras em negrito.

$$\int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{g} \, da = \int_V \nabla \cdot \mathbf{g} \, dV$$

$$\int_V (-4\pi G\rho) dV = \int_V \nabla \cdot \mathbf{g} \, dV$$

Como temos duas integrais de volume contínuas, limitadas pela mesma superfície, podemos igualar seus integrandos.

$$\nabla \cdot \mathbf{g} = -4\pi G\rho \text{ (eq. 3)}$$

Além disso, a aceleração gravitacional pode ser escrita como o gradiente de um potencial gravitacional, operação inversa à feita no início desta dedução.

$$\mathbf{g} = -\nabla \phi \text{ (eq. 4)}$$

Substituindo a equação 4 na equação 3, chegamos finalmente na expressão da equação de Poisson, utilizada por Einstein em sua análise da cosmologia newtoniana:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G\rho \text{ (eq. 5)}$$

Para o caso de uma distribuição sem matéria (solução de DeSitter, será descrita na parte final deste capítulo) esta equação se reduz à também bem conhecida equação de Laplace. Com o formalismo da equação de Poisson, ele dá início a uma verificação acerca das condições de fronteira deste grande fluido no modelo Newtoniano de Universo. Pela equação 5, na qual tomamos um ponto central cujo potencial gravitacional não é nulo, é possível afirmar que, no infinito, seu campo gravitacional deverá valer zero enquanto o potencial deverá tornar-se constante. Para isso ocorrer, a densidade de matéria deverá cair à zero no infinito.

Segue-se então da equação de Poisson que, para que ϕ possa tender a um valor limitado no infinito, a densidade média ρ deve tender a zero mais rapidamente do que na proporção inversa do quadrado da distância, conforme a distância r do centro aumenta. Nesse sentido, portanto, o universo segundo Newton é finito, embora possa possuir uma massa total infinitamente grande. (Einstein, 1917, p. 2).

A conclusão, neste início de discussão, é que, de acordo com a equação de Poisson, toda a massa do universo deve, necessariamente, ocupar uma porção finita do espaço (para que o potencial gravitacional não se torne infinito em nenhum ponto). Mas seria essa hipótese sustentável? Qual agente físico prenderia os corpos celestes a uma região limitada do espaço? Einstein então utiliza a mecânica estatística para descartar esta solução onde a massa do universo está limitada espacialmente a uma região, pois seria necessário um potencial gravitacional muito intenso na fronteira deste “sistema Newtoniano” e tal potencial não é compatível com as velocidades estelares observadas: “Se aplicarmos a Lei de distribuição de moléculas de gás de Boltzmann às estrelas, comparando o sistema estelar com um gás em equilíbrio térmico, descobrimos que o sistema estelar newtoniano não pode existir” (EINSTEIN,

1917, p. 2). Portanto, antes de apresentar seu modelo, ele investiga e descarta as duas possíveis soluções cosmológicas fornecidas pela mecânica clássica.

2.4 - O modelo de Einstein: proposta de um programa de pesquisa cosmológico.

Para eliminar as duas contradições observadas e descritas anteriormente, Einstein lança mão de um modelo de universo com densidade constante e sem bordas ou infinitos.

Pois se fosse possível considerar o universo como um continuum que é finito (fechado) em relação às suas dimensões espaciais, não precisaríamos de nenhuma dessas condições de contorno. Prosseguiremos mostrando que tanto o postulado geral da relatividade quanto o fato das pequenas velocidades estelares são compatíveis com a hipótese de um universo espacialmente finito . (Einstein, 2017, p. 3)

Este modelo de Einstein, livre das contradições nas condições de fronteira, é conhecido na literatura como “Universo cilíndrico de Einstein” onde o raio de um hipotético cilindro representaria o raio do universo e seu eixo a coordenada temporal. Em seu modelo a gravitação é responsável por causar a curvatura do espaço-tempo, em concordância com seus trabalhos prévios em relatividade. Consequentemente, globalmente, obtém um universo fechado.

Einstein também lança mão de uma hipótese adicional, uma interação de repulsão em larga escala, representada em seus cálculos pela famosa constante gravitacional. Esse recurso seria responsável por impedir que toda a estrutura colapse gravitacionalmente, mantendo o universo em repouso. Em um pequeno livro, voltado à divulgação e popularização de suas ideias, Einstein explica o motivo de lançar mão de tal hipótese, que se tornará bastante polêmica posteriormente. “A segunda hipótese (o tamanho do universo independe do tempo) se me afigurava então indispensável, pois me parecia que, se ela fosse rejeitada, iríamos cair em especulações sem fim” (EINSTEIN, 2007. p. 111).

Os artifícios utilizados pelo físico alemão nos mostram, por um lado, algum compromisso ontológico, por verificar a compatibilidade de seu modelo com velocidades estelares e tentar descrever a estabilidade do universo além de soluções matematicamente possíveis. Por outro lado, não nos parece que se convenceu de ter encontrado uma solução definitiva, não parecem suficientemente convincentes seus argumentos sobre a inserção da constante cosmológica na equação de Poisson, para além ajustá-la a fim de eliminar as “especulações sem fim”. No fim de seu artigo deixa ainda mais clara sua posição, tomando a análise lógica e a compatibilidade com a relatividade como os verdadeiros pontos fortes de seu modelo estático de universo (EINSTEIN 1917, p.266)

O autor considerou, portanto, que naquele momento seria mais apropriado manter a estrutura espaço-temporal estática, pelo menos em escala cosmológica, a fim de evitar considerações ainda mais vagas e especulativa, envolvendo condições de fronteiras, infinitos e instabilidades. Seu modelo cosmológico, homogêneo e de curvatura positiva (fechado), pode ser representado esfericamente em uma representação espacial ou cilíndrico, se representado em um diagrama espaço-temporal. (representação do modelo extraída de HARRISON, 1981, página 355).

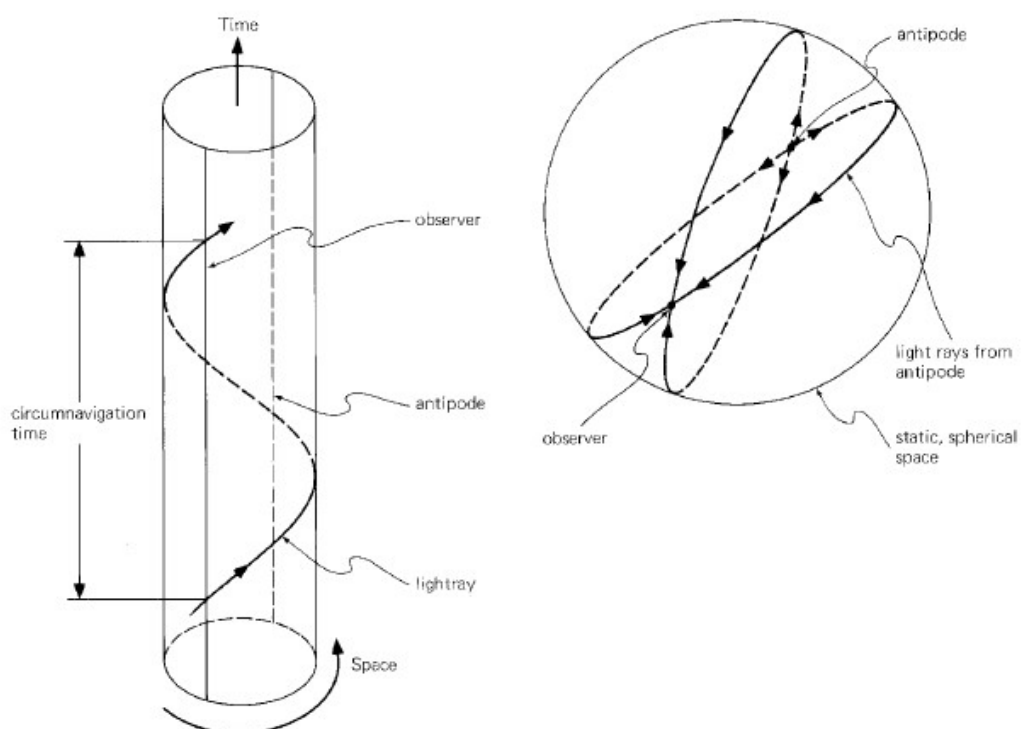


Figura 3: esquemas sobre o modelo de universo de Einstein, relação espaço-tempo (esquerda) e geometria espacial (direita)

Tal representação de universo em um diagrama espaço-temporal tornou-se bastante utilizada por historiadores para representar o modelo de Einstein.

Às vezes se expressa essa particularidade do Universo einsteiniano dizendo que o espaço-tempo é “cilíndrico”, expressão que não se encontra nas *Considerações Cosmológicas* de Einstein. O espaço é curvo e fechado, como o círculo da base de um cilindro. O tempo, porém, é “reto” e aberto, como o eixo deste cilindro. (PONTY, 1971. pág. 51).

Podemos concluir após esta breve exposição de alguns pontos do artigo de Einstein e, principalmente, do contexto intelectual em que o mesmo foi escrito, que se tratava de um ponto de ruptura com a cosmologia, até então, tradicional e ortodoxa. Ele não apenas começa por mostrar que a cosmologia Newtoniana carecia de substituição, como utiliza a relação entre massa, energia e a curvatura do espaço-tempo, contidos em alguma medida em seus trabalhos de 1905, mas, principalmente, na sua exposição da Relatividade Geral em 1915, para construir uma hipótese sobre a geometria do universo em larga escala.

Se por um lado a teoria geral da Relatividade se mostrou muito bem sucedida ao ser confrontada com testes e capaz de fazer previsões observáveis, mensuráveis e distintas das previsões newtonianas, o mesmo não podemos falar de seu modelo cosmológico. Não houve, nem da parte de Einstein, a consideração sobre testes empíricos que possam confirmar seu modelo de universo. Outras particularidades da

teoria da relatividade geral foram confrontadas empiricamente com as previsões Newtonianas. Um dos que podem ser considerados dentre os mais famosos experimentos "cruciais"⁹ da nova física que nasceu com sua teoria é o experimento sobre os desvios sofridos por raios de luz ao atravessar as proximidades do Sol (RODRIGUES, 2021). A realização do experimento envolveu medições de um mesmo grupo de estrelas, visíveis durante um eclipse do Sol e tornou possível comparar o valor dos ângulos de desvio previstos pela teoria de Newton, previstos pela relatividade geral e aqueles obtidos experimentalmente, confirmando que a nascente teoria de ajustava de forma mais satisfatória aos dados coletados.

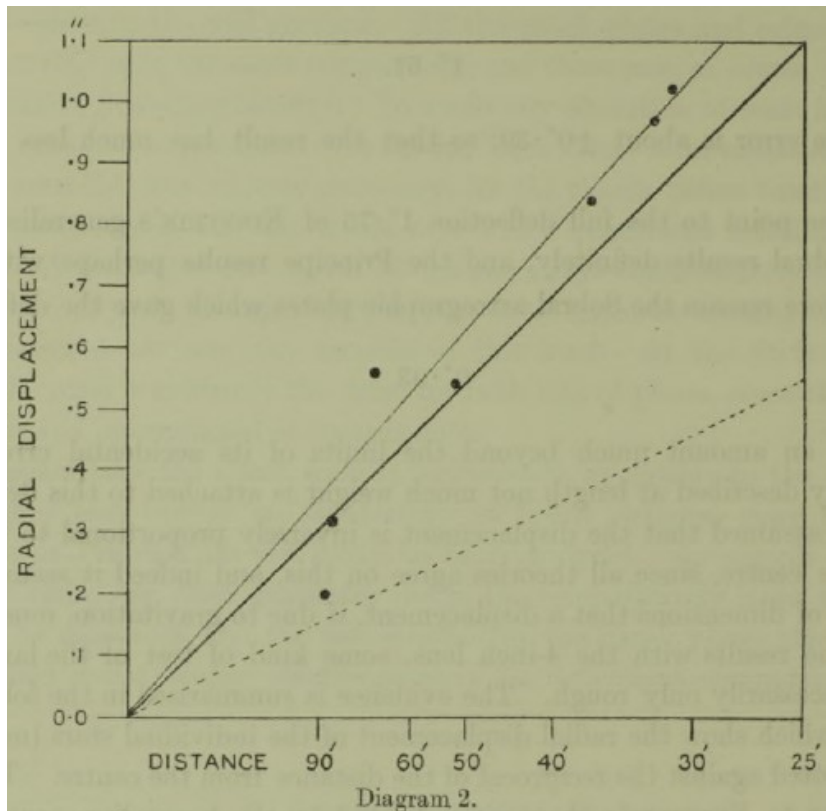


Figura 4: teste empírico entre as previsões de Newton e de Einstein sobre a curvatura da luz, obtidos no "experimento de Sobral"

O modelo cosmológico de Einstein, por outro lado, não pôde ser confrontado com a concepção Newtoniana de universo neste momento. Antes mesmo de ser testado, seu modelo será contestado por outros cientistas e refutado, especialmente pelas contribuições de Friedman e Lemaitre, que serão apresentadas a seguir.

Portanto, nossa tese é de que Einstein tenha apresentado uma proposta de programa de pesquisa. Proposta que não se concretizará, mas que, apesar disso, nos

⁹ Inserimos a expressão entre aspas por compreender as críticas feitas à suposta existência de experimentos realmente cruciais. Geralmente são assim classificados apenas em retrospecto, e não em seu contexto original (conferir Hacking). Também é problemática a descrição de que na ciência se faça o confronto entre uma teoria e a observação da natureza. A crítica usualmente feita é que o papel dos experimentos está mais associado a comparar duas teorias e não apenas validar/negar uma única (conferir Chiappin), daí resulta que não existam experimentos verdadeiramente cruciais ou definitivos na prática científica.

apresenta um interessante núcleo que será, em partes, recuperado e enriquecido por seus contemporâneos. Apresentamos abaixo nossa tentativa de demarcar o núcleo da sua proposta de programa cosmológico. Se algum de seus contemporâneos tivesse concebido e realizado algum experimento de ordem cosmológica, que pudesse verificar o falsear alguma hipótese sobre o comportamento da natureza predita por seu modelo, afirmaríamos que Einstein inaugura, de fato, um primeiro programa de pesquisa para a cosmologia científica. No núcleo localizamos as considerações fundamentais de qualquer candidato a programa de pesquisa, irrefutáveis por decisão metodológica de seu proponente. A cada uma delas chamaremos de N_E (núcleo da proposta de programa de Einstein). São os seus fundamentos mais básicos e fundamentais, que podem ser identificados pelos instrumentos teóricos e heurísticos utilizados no artigo de Einstein de 1917 para desenvolver sua concepção de universo.

A primeira tese do núcleo é seu instrumento de trabalho mais poderosa: a utilização da teoria da relatividade geral. A própria relatividade pode ser considerada um grande programa de pesquisa, com extensão bem maior do que apenas cosmológica. A relatividade geral se estende a muitos outros campos de pesquisa na física contemporânea e podemos ter neste ponto a curiosa ocasião em que um programa de pesquisa engloba outro, classificado por vezes como um “subprograma”, onde parte do núcleo de um programa compõe o núcleo de outro, de abrangência mais restrita. A teoria da Relatividade geral já foi, em outros estudos de caso, classificada como um programa (ZAHAR). Na cosmologia, entretanto, há mais teses que precisam compor o núcleo, uma vez que o campo de pesquisa estuda apenas o universo em larga escala. A relatividade pode ser utilizada em outros domínios da Física, como o eletromagnetismo ou a mecânica de altas velocidades. Coloquemos então a validade das equações da relatividade, aplicada ao universo como um todo como uma das teses centrais do núcleo da proposta de programa de pesquisa de Einstein

N_{E1} . A teoria geral da relatividade descreve a gravitação e a geometria do Universo.

Como o próprio nome do artigo indica, suas considerações cosmológicas assumem, como ponto de partida, a validade da teoria geral da Relatividade. Tal fundamentação encontra-se em diversas partes de seu artigo, tal como: “de acordo com a teoria geral da relatividade, o caráter métrico do continuum espaço-tempo quadridimensional é definido em cada ponto pela matéria naquele ponto e o estado dessa matéria”. De acordo com a teoria geral da relatividade, o caráter métrico do continuum espaço-tempo quadridimensional é definido em cada ponto pela matéria naquele ponto e o estado dessa matéria. A própria cosmologia de Einstein é uma aplicação em larga escala dos princípios da relatividade geral. A validade da teoria da relatividade é o fundamento mais sólido de sua proposta cosmológica.

Observamos, sutilmente nas linhas do texto, como Einstein utiliza as importantes contribuições da mecânica estatística e da mecânica dos fluidos. Em citação apresentada no início deste capítulo (EINSTEIN, 1917, p. 2) ele fundamenta sua argumentação na distribuição de Boltzmann. Nestas citações o autor compara o universo a um gás em equilíbrio térmico. A descrição do universo enquanto fluido (formado pelas estrelas) em expansão não é um passo trivial e tornou possível grande parte de suas considerações. A descrição do universo como um fluido se tornou um importante instrumento heurístico onde os possíveis comportamentos do universo são modelados por fluidos em expansão, em equilíbrio, ou em compressão, a depender das condições às quais esteja submetido. Essa hipótese é, portanto, a segunda tese que guardamos no núcleo da proposta de programa de Einstein:

NE2. A estrutura do espaço-tempo pode ser descrita como um fluido perfeito.

A terceira e última tese do seu núcleo é resultado de sua solução matemática das equações de campo. Einstein comete erros de cálculo, além de uma justificativa que nos parece insatisfatória. Deriva das equações um modelo de universo estático, com a matéria em equilíbrio. Não são os argumentos matemáticos que o guiam. Aparentemente sua crença no universo estático guia sua interpretação matemática das equações, sobre a qual nos deteremos mais detalhadamente a seguir.

NE3. O Universo em larga escala é fechado em si mesmo, estático e eterno.

Grande parte do esforço de Einstein em suas primeiras páginas foi explicar essa hipótese. O questionamento apresentado por Friedman será em torno desta hipótese, que não deriva diretamente da relatividade geral, mas, como explicado por Einstein em citação anterior, deriva de uma decisão por maior simplicidade. Para não “cairmos em especulações sem fim” ela lhe pareceu uma decisão natural, mas se revelará precipitada. Esta hipótese, terceira componente de seu núcleo, será objeto de grande debate e revisão ao longo da década posterior à publicação do artigo de Einstein.

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

É bem sabido que não basta associar a equação diferencial de Poisson à equação do movimento do ponto material para se obter um substituto completo para a teoria de ação a distância de Newton: é ainda necessário fazer intervir a condição de o potencial tender para um valor limite fixo no infinito espacial... Mal se entrevê maneira de resolver tais dificuldades sobre as bases da teoria de Newton. Poderá então perguntar-se se não haverá maneira de as remover modificando a teoria de Newton. Vamos começar por indicar para isso um caminho que, não pretendendo ser um verdadeiro método, servirá, no entanto, de introdução ao que se vai seguir. (EINSTEIN, 1917, p.1)

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

(equação 6)

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

Nos parágrafos seguintes vou levar o leitor pelo caminho um tanto indireto e tortuoso que eu próprio percorri, pois só assim poderei esperar interesse da sua parte para o resultado final. Trouxe-me esse caminho à opinião de que as equações de campo que até agora tenho proposto para a gravitação carecem ainda de uma pequena modificação, destinada a remover, na base da teoria da relatividade geral, as dificuldades de princípio que, no parágrafo anterior, apontamos para a teoria de Newton. (EINSTEIN, 1917, p.2)

Para que a descrição do potencial gravitacional em um ponto infinito fosse compatível com a distribuição de Boltzmann, considerando cada estrela como uma molécula desse “gás”, ele insere um segundo termo no potencial gravitacional. O que, em uma descrição de forças no lugar do potencial, gera um termo repulsivo, interpretado como uma forma de “anti-gravidade”, embora Einstein em nenhum momento tenha utilizado tal expressão, atuando como uma força de repulsão, permitindo a continuidade do equilíbrio em seu universo estático (conferir RYDEN, 2016; CARROL, 1996). Trabalhos posteriores mostraram matematicamente a instabilidade de seu modelo de universo, o que, num primeiro momento, nos parece ter sido desconhecido e ignorado por Einstein. A equação de Poisson assume, após sua modificação, a forma abaixo.

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

(equação 7)

Como citação final ao trabalho de Einstein, o mesmo se parece convencido da validade de sua inserção ad hoc. Deixaremos para que ele mesmo exponha as vantagens de sua nova formulação da equação de Poisson:

Esta concepção tem, pelo menos, a vantagem de ser logicamente irrepreensível, e de ser aquela que melhor se cinge ao ponto de vista da teoria da relatividade geral; se ela é ou não

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

A versão popularmente difundida deste episódio conta que, com os desenvolvimentos posteriores da cosmologia: contribuições de Friedman, Lemaitre, Hubble, e tantos outros, foi se estabelecendo na nascente comunidade de cosmólogos profissionais a crença de que, em um instante no passado, toda a matéria do universo encontrava-se confinada em uma região menor que uma cabeça de alfinete¹⁰ e, por razões ainda não plenamente conhecidas até hoje, passou por uma violenta explosão, evento conhecido como o Big-Bang. Se o universo se expande ainda atualmente, como acreditam os astrônomos, por conta de uma explosão inicial, a constante cosmológica perde sua razão de existir por dois motivos: (i) não existe equilíbrio com a gravidade, afinal o universo não se encontra em equilíbrio e, (ii) a explosão inicial deu o “impulso” (em uma linguagem excessivamente clássica) necessário para a velocidade de recessão das galáxias, o que esvazia a necessidade da presença de uma força repulsiva atuando ao longo do tempo.

Segundo conta a versão popular, Einstein teria se arrependido de ter incluído essa hipótese ad hoc em seu artigo de 1917 e teria confessado ser essa atitude o “maior erro de sua vida”. Apenas a título de ilustração deste relato, apresentamos um trecho de um respeitado livro didático de Astronomia, bastante utilizado nos principais cursos de graduação e pós-graduação no Brasil e nas principais universidades do mundo.

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

O chamado “termo Λ ” se refere à constante cosmológica, que inicialmente serviria para compensar a atração gravitacional entre as estrelas. Essa “historinha” apresenta uma série de problemas. Os trabalhos de outros eminentes astrônomos fazem correções nos resultados de Einstein, o mais célebre deles talvez seja a sequência de publicações de Alexander Friedman, que envia um emissário chamado Krutkov pessoalmente para se encontrar com Einstein e convencê-lo de que suas equações apresentam um erro fundamental e que, de acordo com a própria teoria da relatividade, não deveríamos descartar as soluções matemáticas que descrevem um universo em expansão e, até mesmo, em contração.

¹⁰ Para não fugirmos de nosso tema central, não entraremos na polêmica se o Big-Bang foi uma explosão inicial e, portanto, o universo era uma singularidade, ou se foi apenas a expansão de um universo muito pequeno preexistente, o que é bem diferente de uma singularidade, tal polêmica existiu e merece um tratamento mais adequado, que estamos desenvolvendo para ser apresentado em um trabalho futuro.

O curioso é que Friedman não faz nenhuma objeção à presença da constante cosmológica, inclusive a insere em seus artigos. O mesmo ocorre com os artigos de Georges Lemaitre. Uma hipótese ad hoc não é, necessariamente, a inserção aleatória de um termo adicional em equações matemáticas, fruto de uma atitude arbitrária e irracional. Além disso, há trabalhos sérios em história da ciência que já desconstruíram esse famoso relato de “admissão de culpa” por parte de Einstein, que supostamente teria sido dita a George Gamow em uma visita ao observatório de Monte Wilson, apesar de tal narrativa continuar se perpetuando¹¹.

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

A adição deste segundo termo ao potencial gravitacional lhe permite manter um termo de força à grandes distâncias (tendendo ao infinito) onde o primeiro termo tende a uma constante (e sua derivada à segunda tende a zero).

Um universo constituído desta maneira não teria um centro relativamente ao campo gravitacional. Deixaria de ter cabimento a hipótese de uma densidade a decrescer para o infinito espacial: pelo contrário, manter-se-iam constantes até ao infinito tanto o potencial médio como à densidade média. O conflito que verificamos existir entre a teoria de Newton e a mecânica estatística não existe aqui. (EINSTEIN, 1917, p.5)

Há uma larga divulgação entre manuais didáticos e livros de Astronomia de uma suposta frase dita por Einstein a George Gamow sobre a adição de esta constante cosmológica ter sido o “maior erro” de sua vida. Todavia, observamos na literatura mais específica sobre História da Ciência, nacionais e internacionais, que analisam este episódio em maior riqueza de detalhes, chegando à uma conclusão diferente. Consideram improvável que Einstein tenha dito tal frase, uma vez que o encontro entre ambos seja muito bem datado e o termo tenha permanecido nos principais textos de cosmologia nos anos seguintes. O termo, originalmente empregado para justificar a crença, por parte de Einstein, que o Universo permaneça em equilíbrio, apesar da força gravitacional atrativa, começou a cair em desuso após a publicação do artigo de Hubble de 1931, mas não foi um processo repentino e não envolveu apenas argumentação empírica.

Mesmo sem levarmos em consideração a ausência de argumentos empíricos, o modelo de universo de Einstein também se mostrou frágil matematicamente. Sua solução para a distribuição de massa e matéria, mesmo com a inclusão da constante cosmológica, não representa um universo estável. Sua rigidez estática não resistiria à menor variação, mesmo local, das interações gravitacionais (SOARES, 2012). Essa

¹¹ Enquanto escrevemos esse ensaio, um dos autores assistiu um seminário de cosmologia, em que a “frase dita por Einstein” foi relatada pelo palestrante, para risos da plateia, sem que se levante a menor suspeita sobre a veracidade do episódio.

percepção pode ter, também, diminuído qualquer ímpeto por buscas mais diretas de verificação empírica. O modelo de Einstein nos parece ter sido, tanto para seu proponente quanto para seus contemporâneos, um ponto de partida para pesquisas adicionais e para a busca de melhores modelos para explicar a geometria do universo em termos da relatividade geral.

A refutação de qualquer uma das afirmações que compõem o núcleo de um programa de pesquisa inevitavelmente o leva, de acordo com Lakatos, a degenerar e, eventualmente, a ser substituído por um alternativo. Surgirão novas propostas cosmológicas que tentarão dar conta das dificuldades de sua proposta. Ressaltamos, porém o pioneirismo do trabalho de Einstein: um modelo sustentado pela teoria da relatividade colocou novamente a cosmologia no caminho dos cientistas, levando-a a um novo status. Nas décadas seguintes a cosmologia estará cada vez mais no interesse de físicos, químicos e diferentes áreas da pesquisa científica.

2.5 - O modelo de universo de DeSitter

Faremos uma breve menção a outro modelo de universo obtido como solução das equações da relatividade geral, formulado pelo astrônomo holandês Willen DeSitter, bastante reconhecido por sua atividade em astronomia observacional e análise matemática. Em certa medida, foi um personagem bastante próximo de Einstein, com publicações em comum na década seguinte. O modelo de DeSitter não será apresentado em maiores detalhes por sua ausência de compromisso ontológico com o modelo de universo apresentado. Apesar de citado por muitos trabalhos posteriores, com o qual consideraram estabelecer algum diálogo com sua proposta, não pode ser representado como algo além de uma solução meramente matemática das equações de Einstein. Diferentemente de Einstein, a solução de DeSitter assume como um universo com densidade nula e, se inserirmos $\rho = 0$ na expressão para a constante cosmológica obtemos o valor $\Lambda = 3/R^2$. A interpretação associada a esses valores é de um universo em expansão, sem matéria. O modelo nos parece se resumir a uma interessante solução matemática, sem vínculo direto com a natureza. Um espaço claramente povoado por estrelas e planetas evidentemente não possui densidade nula, o que poderia ser assumido, no máximo, enquanto uma aproximação grosseira da realidade.

Ambos os universos surgiram como primeiras soluções matemáticas obtidas da relatividade geral aplicada ao universo como um todo, à completa distribuição de matéria e energia. O universo de Einstein se mostrava instável (FONTE) enquanto o universo de DeSitter não se mostrava fisicamente compatível com o universo real, essa dificuldade é manifesta por Einstein em uma correspondência a DeSitter no ano de 1917 em que alega que seu universo “não corresponde a nenhuma possibilidade

física”, violando inclusive o princípio de Mach (KRAGH, 1996, p.12). Outro sério questionamento que pode ser levantado contra ambos é a ausência de conteúdo empírico.

As soluções de Einstein e DeSitter foram pioneiras enquanto tentativas de descrever o universo por meio de soluções matemáticas, grande parte dos modelos formulados posteriormente fazem as devidas citações a ambos e buscam com eles dialogar. Todavia apresentavam problemas conceituais além de não sugerir uma forma direta de verificação/ corroboração de suas hipóteses fundamentais. Uma vez que tais correções foram feitas antes de qualquer verificação empírica, não podemos afirmar que constituem o início de um programa de pesquisa.

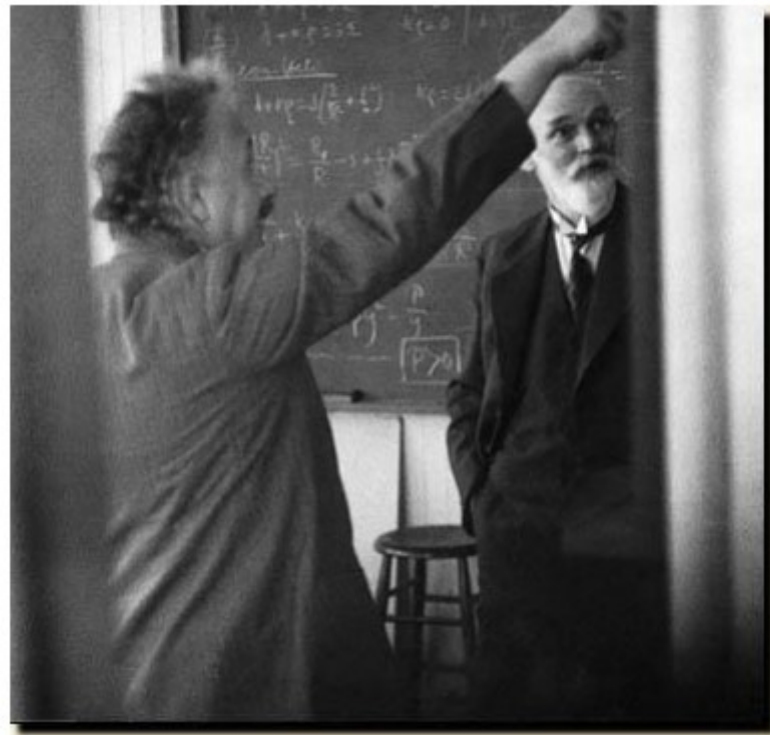


Figura 5: foto rara dos colegas Einstein e DeSitter, em Caltech no ano de 1932.

Há um trabalho muito pouco conhecido, escrito por Einstein no ano de 1933, que inicialmente acabou não sendo publicado. Neste ensaio podemos observar atualizações em relação aos modelos propostos por ambos nos 15 anos anteriores. Do mesmo ano temos um trabalho publicado por ambos, que também é revisitado por Einstein à luz das cosmologias expansionistas, assim como da lei de Hubble.

Uma segunda motivação para o modelo de Einstein-de Sitter pode ser discernida na revisão de 1933, ou seja, evitar complicações desnecessárias na cosmologia relativística. O documento deixa clara a progressão do pensamento de Einstein de um universo

estático para um universo dinâmico; de um universo dinâmico de curvatura constante e constante cosmológica para um universo dinâmico sem λ ; e finalmente a um universo dinâmico sem λ e sem curvatura. Essa abordagem indica que, longe de ter um interesse superficial pela cosmologia, Einstein está engajado em uma busca sistemática pelo modelo mais simples possível do cosmos que possa explicar a observação.

Observamos, neste pouco conhecido ensaio, que não insistem na importância da constante cosmológica, que aceitam as hipóteses de universo dinâmico, proposta inicialmente pelas soluções de Friedman e, acima de tudo, que consideram as atualizações e o amadurecimento da cosmologia desde suas propostas e modelos de 1917. Einstein e DeSitter não se apegam rigidamente aos modelos propostos originalmente, nem mesmo parece ser a dinâmica da evolução do universo o problema central na cosmologia do Einstein.

O que ele chama de “problema cosmológico” envolve a relação da matéria com a geometria do Universo. Não considera ser compatível a ideia de um universo infinito com uma densidade de matéria finita. Em seu artigo procura mostrar que uma possível curvatura do espaço não é consequência necessária da existência de uma densidade finita de matéria ρ .

Segue-se dessas considerações que, à luz do nosso conhecimento atual, o fato de uma densidade diferente de zero da matéria não precisa ser reconciliado com uma curvatura do espaço, mas em vez disso, com uma expansão do espaço. Claro, isso não significa que tal curvatura (positivo ou negativo) não existe. No entanto, não há atualmente nenhuma indicação de sua existência. (EINSTEIN, 1933, pág. 48)

Também podemos perceber que o autor da relatividade, definitivamente, não insiste na constante cosmológica ao aceitar as soluções dinâmicas para o raio do universo.

Inicialmente, encontrei a seguinte maneira de sair dessa dificuldade. Os requisitos da relatividade permitem e sugerem a adição de um termo da forma $\lambda g_{\mu\nu}$ ao lado esquerdo de (1), onde λ denota uma constante universal (constante cosmológica), que deve ser pequena o suficiente para que o termo adicional não precisa ser considerado na prática ao calcular a gravidade do sol campo e o movimento dos planetas... No entanto, mais tarde surgiu como resultado da pesquisa de Lemaitre e Friedmann que esta resolução da dificuldade é insatisfatória. (EINSTEIN, 1933, pág. 45)

Essa citação acima se configura uma importante síntese do que propomos enquanto análise da evolução da cosmologia descrita em termos de programas de pesquisa: a ausência de dados empíricos e a emergência dos modelos dinâmicos nos impedem de chamar o “universo de Einstein” de programa de pesquisa, mas é, inegavelmente, um ponto de partida para uma nascente área de pesquisa científica. As alterações propostas pelos trabalhos de Friedman e Lemaitre contribuem para a

formação de um núcleo com o qual as teorias futuras buscarão trabalhar, melhorar e encontrar suporte observacional.

Todavia, apesar de tal descrição não estar diretamente contida nos textos de Lakatos, boa parte do trabalho de Einstein será preservada por Friedman e Lemaitre, apenas com a inclusão e exclusão de soluções para as mesmas equações de campos. Por isso classificamos a cosmologia de Einstein como a primeira proposta de um programa de pesquisa que pode ser reconstruída, apesar de não ter se concretizado por ausência de conteúdo empírico que pudesse constituir sua heurística positiva.

É inegável que ela possui grande parte do núcleo que estará no centro da pesquisa em cosmologia ainda atual, cuja concepção de universo enquanto fluido ainda preserva grande poder heurístico. Também a relatividade geral se encontra em lugar privilegiado em qualquer cosmologia que se esboce atualmente. Renunciar à essa teoria e a esse modelo de universo significa renunciar à toda cosmologia praticada nos últimos cem anos. Não podemos tirar seu universo do núcleo, mas precisamos complementar o núcleo um pouco mais, com conceitos que se enraizarão antes de qualquer teste empírico viável, o que pretendemos mostrar no próximo capítulo.

REFERÊNCIAS

ABBE, C. On the distribution of the nebulae in space. Monthly notices of the Royal Astronomical Society. 1876.

ARTHURY, Luiz H. M. A Cosmologia Moderna à Luz dos Elementos da Epistemologia e Lakatos. 133f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Educação Científica e Tecnológica, UFSC, Florianópolis, 2010.

ARTHURY, Luiz Henrique Martins; PEDUZZI, Luiz O.Q. A cosmologia moderna à luz dos elementos da epistemologia de Lakatos: recepção de um texto para graduandos em física. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 1-14, jun. 2013.

BAGDONAS, A. Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da história da cosmologia. 2011. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Programa Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BELENKIY, A. 2012. Alexander Friedmann and the origins of modern cosmology, *Physics Today*.

BRUSH, Stephen G. How cosmology became a science, *Scientific American*, 267, 62-70, 1992.

CARMELI, M. *Cosmological General Relativity*. World Scientific Publishing NY Company. 2008.

CARROL, B.; OSTLIE, D. 1996. An introduction to modern astrophysics. Addison-Wesley.

CHIBENI, S. O surgimento da mecânica quântica. Notas de aula, que podem ser acessadas em: <https://www.unicamp.br/~chibeni/textosdidaticos/fisquantica.pdf>. Ano de publicação não é identificado no manuscrito.

COHEN, B; WESTFALL, R. Newton: Textos, antecedentes e comentários. Contraponto. 2002.

EINSTEIN, A. (1917). Considerações cosmológicas sobre a teoria da relatividade geral. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzungsberichte der Königlich preussischen Akademie der Wissenschaften, 142-152.

_____. Teoria Da Relatividade Geral e Especial. Editora Contraponto. Rio de Janeiro. 2007.

FLEMING, H. Rumor à Cosmologia. Revista USP. 2004.

FREIRE JUNIOR, O. O centenário debate sobre a interpretação e os fundamentos da Física Quântica. Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática, v. 4, n. 3, 2 set. 2021.

HACKING, I. Representar e Intervir: tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural. EDUERJ. 2012.

HARRISON, E. R. Cosmology: the Science of the Universe. Cambridge University Press. Cambridge. 1981.

HUBBLE, E; HUMASON, M. 1931. The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae. Astrophysical Journal.

KOYRÉ, Alexandre. Estudos de História do Pensamento Científico. Rio de Janeiro, Forense Universitária; Brasília: Ed. UnB, 1982.

KRAGH, H. Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe. Princeton: Princeton University Press, 1996.

KRAGH, H. Cosmology and the Origin of the Universe: Historical and Conceptual Perspectives. Cornell University Library. 2017.

LAKATOS, I; MUSGRAVE, A. A crítica e o desenvolvimento do conhecimento. 1965, Cambridge University Press. Traduzido por Cajado, O. M e Mariconda, P.R; Universidade de São Paulo e editora Cultrix, 1979.

LIMA, J. A. S, R. C. SANTOS. R. C. 100 Anos da Cosmologia Relativística (1917-2017). Parte I: Das Origens à Descoberta da Expansão Universal (1929). Revista Brasileira de Ensino de Física. 2017.

MARTINS, R. A. Como não escrever sobre História da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 2001.

MERRITT, D. Cosmology and Convention. *Studies in History and Philosophy of Science Part B, Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 57, February 2017, p. 41-52. 2017

OLIVEIRA, K. S. F.; SARAIVA, M. F. 2010. *Astronomia e Astrofísica*. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade.

O’Raifeartaigh, C., O’Keeffe, M., Nahm, W. et al. Einstein’s cosmology review of 1933: a new perspective on the Einstein-de Sitter model of the cosmos. *EPJ H* **40**, 301–335 (2015). <https://doi.org/10.1140/epjh/e2015-50061-y>

PONTY, J. M. *Cosmologia del Siglo XX*. Gredos. 1971.

PONTY, J. M; MORANDO, B. *The rebirth of Cosmology*. Editora Knopf. New York. 1976.

PROCTOR, R. Note on the Sun’s motion in Space and on the relative distances of the fixed stars of various magnitudes. 1876.

RODRIGUES, D. M. (2021). O ECLIPSE DE SOBRAL EM 1919: Breve análise sobre a proposta epistemológica de Larry Laudan. *Revista Paranaense De Filosofia*, 1(2), 111–128.

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

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

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

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

ZAHAR, E. (1973). Why Did Einstein’s Programme Supersede Lorentz’s? (I). *The British Journal for the Philosophy of Science*, 24(2), 95–123. <http://www.jstor.org/stable/686604>

CAPÍTULO 3

O PROGRAMA DE PESQUISA DE FRIEDMAN-LEMAITRE

3.1 - A DEMARCAÇÃO DO NÚCLEO DE UM PROGRAMA DE PESQUISA

Uma das primeiras e mais conhecidas reações ao modelo de Einstein se deu no âmbito da Física teórica, antes mesmo de sua concepção de Universo estático poder ser colocada empiricamente à prova pelos astrônomos experimentais. A suposta unicidade de suas soluções matemáticas foi a causa das primeiras controvérsias. Nos anos de 1922 e 1924 o físico russo Alexander Friedman publica dois artigos na prestigiada revista alemã *Zeitschrift für Physik*, com suas soluções para as equações de campos relativísticos e, diferentemente de Einstein, encontra soluções não estáticas para a dinâmica do Universo.

Em uma reconstrução racional nos deparamos com o importante problema de identificar o núcleo de um programa de pesquisa (ibid: capítulo 1) e, para isso, analisamos a série de teorias que se forma em seguida. Essa análise deve identificar quais são as hipóteses assumidas, direta ou indiretamente, por todas as teorias que fazem parte do mesmo programa. Não podemos incluir o modelo de Einstein nesse núcleo, apesar de identificar nele parte de seus componentes. Os modelos e teorias cosmológicas que serão formulados nas décadas seguintes tomam como parte de seus pressupostos a realidade do afastamento entre as galáxias, o que não nos permite conecta-las diretamente ao modelo de Einstein, estático e instável.

Um exemplo da identificação do núcleo em uma aplicação da metodologia de Lakatos em outras áreas da ciência é oferecido em um estudo sobre o programa de pesquisa de Lorentz, sobre o éter, cujo núcleo inclui as equações de Maxwell do eletromagnetismo, as leis de Newton para o movimento e a transformada de Galileu para referências, somada com a equação de Lorentz para a força eletromagnética (ZAHAR, P.100). O autor, em sua reconstrução racional, argumenta que cada teoria de um programa é composta pelo núcleo, somado às hipóteses auxiliares, para quem o *modus tollens* é direcionado quando surgem anomalias. Outro exemplo de demarcação de um núcleo é feito por Chiappin (CHIAPPIN, 1996) na reconstrução racional do programa racionalista. Atribui a Locke e a Hume teorias distintas sobre a natureza do conhecimento e suas possibilidades de obtenção. Todavia, ambos acreditam que o conhecimento que podemos alcançar da natureza é composto por certezas. Há, portanto, um núcleo em comum a ambas concepções de conhecimento.

tanto Locke quanto Hume estão, também, comprometidos com o programa racionalista clássico descrito acima e, portanto, com a pressuposição fundamental de que o conhecimento é conhecimento certo. Além disso, a tese afirma também que eles estão comprometidos com o mesmo método, muito particularmente Locke. Isto significa, nesta interpretação, que eles se enquadram, na história da filosofia, no programa do racionalismo clássico (CHIAPPIN; 1996, p.170)

Para melhor identificar o núcleo e os componentes da heurística de um programa de pesquisa, utilizamos uma estrutura conceitual para organizar os elementos do conhecimento, chamada de “modelo simplificado de conhecimento” concebido por Chiappin (CHIAPPIN, 1996). Não faremos uma descrição pormenorizada de seus componentes, que pode ser encontrada na citação acima, mas mostraremos onde os mesmos se identificam no nosso estudo de caso: a cosmologia científica do século XX, afim de melhor elucidar a aplicação destes conceitos que estamos trabalhando nesta dissertação, uma vez que os mesmos podem se aplicar a outras áreas da atividade científica.

Para compreendermos a dinâmica do “modelo simplificado de conhecimento” devemos levar em consideração o modelo da dinâmica da atividade científica e ele vinculada. O modelo por traz dessa descrição é o da atividade científica como resolução de problemas, de forma análoga às concepções de “problema” introduzidas por Popper (POPPER, 2010) e Laudan (LAUDAN, 2011). O modelo simplificado de conhecimento apresenta os seguintes componentes:

- Base do conhecimento: na base do conhecimento estão os dados, que podem não ser apenas dados empíricos, extraídos diretamente da experiência, mas também dados instrumentais ou teóricos. Na nascente cosmologia do século XX os dados são as medidas espectrais de efeito Doppler, interpretadas a partir da década de 30 como verificação do constante movimento de afastamento entre as galáxias no universo. São dados empíricos no sentido de terem sido frutos de coletas de dados feitas por radiotelescópios e, em outra medida, são dados teóricos uma vez que há uma teoria responsável por converter medidas espectrais em valores de velocidades galácticas.
- Representação: a representação pode ser descrita, em linhas gerais, como a linguagem conceitual em que o conhecimento se expressará e se articulará, por meio da qual encontraremos os desdobramentos em problemas menores e articularemos as formas de solucioná-lo.

Como exemplos de representações, podemos citar a linguagem natural, a lógica, a matemática, a álgebra, a geometria, a teoria dos conjuntos e outras representações específicas com suas diferentes linguagens. No entanto, as representações não são apenas sistemas simbólicos que servem para expressar os elementos do conhecimento, mas trazem consigo importantes técnicas que contribuem tanto para operacionalizar o sistema de inferência da estrutura do conhecimento em questão quanto trazem também embutida uma heurística ou sistema operacional que serve para ampliar os recursos de resolver problemas do sistema de conhecimento (CHIAPPIN, 1996, p.185)

A linguagem básica na qual a cosmologia será articulada a outros problemas e onde serão construídas as possíveis soluções e, sem dúvidas, a teoria geral da

relatividade de Einstein. No capítulo anterior descrevemos como Einstein inicia seu artigo de 1917 mostrando a incapacidade da teoria de Newton abordar satisfatoriamente as conhecidas questões cosmológicas para, posteriormente iniciar o tratamento da cosmologia em uma nova linguagem, escrita inicialmente em 1915 com a publicação de sua teoria geral da Relatividade. Certos conceitos fundamentais como inércia, força ou massa são interpretados de forma distinta em sua nova teoria, gerando também uma nova linguagem para abordar os problemas cosmológicos preexistentes no início do século XX.

- Sistema de Inferência: engloba as analogias, modelos, metáforas, dedução, indução e outras formas de inferir resultados a partir de uma base conhecida e das condições de contorno de um determinado problema em análise. O sistema de inferências ideal é o modelo axiomático (CHIAPPIN, 1996, p.186) em que algumas proposições são assumidas com características análogas ao estatuto epistemológico dos axiomas na geometria: proposições básicas assumidas como ponto de partida para a resolução de problemas.

As proposições que tomaremos como dotadas de características axiomáticas compõem o núcleo do programa de pesquisa, que serão utilizadas para resolver o seguinte problema cosmológico: “como explicar o movimento de afastamento entre as galáxias?” Apresentamos abaixo três teses, de natureza epistemológica, ontológica e axiológica, respectivamente. Tomadas em caráter de postulados/axiomas em um modelo de resolução de problemas, correspondem ao que Lakatos descreve como os componentes fundamentais do núcleo de qualquer programa

- Tese epistemológica: a teoria da relatividade geral descreve a interação entre massa e energia em escala cosmológica.

Nos referimos a questões epistemológicas como aquelas relacionadas aos fundamentos, a validade e a consistência do conhecimento sob investigação. O pressuposto fundamental em todos os modelos cosmológicos do início do século XX é a relatividade geral. Observamos no artigo de Einstein um trecho já apresentado no capítulo anterior. Dessa vez, entretanto, o foco da citação é mostrar como o fundamento de seu trabalho está na relatividade geral, em substituição à gravitação de Newton

vou levar o leitor pelo caminho um tanto indireto e tortuoso que eu próprio percorri, pois só assim poderei esperar interesse da sua parte para o resultado final. Trouxe-me esse caminho à opinião de que as equações de campo que até agora tenho proposto para a gravitação carecem ainda de uma pequena modificação, destinada a remover, na base da teoria da relatividade geral, as dificuldades de princípio que, no parágrafo anterior, apontamos para a teoria de Newton (EINSTEIN, 1917, p.229)

Também Friedman fundamenta seu trabalho na mesma relatividade, chegando a resultados diferentes do seu próprio fundador. A teoria, enquanto fundamento epistemológico do modelo de universo em expansão é uma afirmação que podemos extrair indiretamente de seu artigo de 1922. A distinção de seu modelo para os de

Einstein e De Sitter está contida em hipóteses adicionais e, portanto, ainda é um desdobramento da relatividade, assim como os dois modelos preexistentes.

As suposições nas quais baseamos nossas considerações se dividem em duas classes. À primeira pertencem as suposições que coincidem com as suposições de Einstein e de Sitter; elas se relacionam com as equações que os potenciais gravitacionais obedecem, e com o estado e o movimento da matéria. À segunda classe pertencem as suposições sobre o caráter geral, por assim dizer geométrico do mundo; de nossa hipótese segue como um caso especial o “mundo cilíndrico” de Einstein e também o “mundo esférico” de De Sitter (FRIEDMAN, 1922, p. 1992)

A relatividade geral será o fundamento sobre o qual se construirão os diferentes modelos de universo (Einstein, Friedman, DeSitter, Lemaitre, etc) e, enquanto componente do núcleo do programa de pesquisa, classificamos a validade epistêmica da relatividade geral como “tese epistemológica” fundamental de seu núcleo.

- Tese ontológica: o universo como um fluido em expansão.

Uma proposição de natureza ontológica, em linhas gerais, diz respeito ao que possui existência, englobando nesta categoria as entidades dotadas de realidade na natureza. Einstein e Friedman tratam o universo como um fluido sem pressão. A crítica de Einstein ao modelo de universo de Friedman ocorre no nível ontológico, ao alegar que sua solução “dificilmente corresponde à realidade física” apesar de estar matematicamente correta (o relato de Einstein pode ser lido em: <http://web.mit.edu/8.286/www/slides07/Einstein-and-Friedmann.pdf>).

Suas ressalvas se direcionam para a hipótese de as soluções expansionistas obtidas pelo soviético realmente corresponderem ou não à realidade, são preocupações na ordem da ontologia dos resultados de Friedman. Os dois modelos são ontologicamente distintos (universo em expansão ou em repouso) mesmo que, matematicamente, o modelo de Einstein esteja contido em uma das soluções de Friedman.

- Tese axiológica: as galáxias se afastam continuamente entre si.

A classificação de tal tese como uma forma de valor cognitivo, ou de valores (uma vez que engloba adequação empírica, poder explicativo e até outros valores cognitivos) se justifica por não ser uma observação direta da natureza. Os astrônomos, e podemos citar Vesto Slipher (capítulo 2), mediram desvios espectrais oriundos das nebulosas. A interpretação dessa verificação empírica enquanto fruto de um pressuposto movimento entre as galáxias é inevitavelmente carregada de valores. Hubble, para tomarmos um exemplo, em seu arrigo de 1931 se recusou a interpretar o significado cosmológico dos desvios espectrais medidos, a interpretação não envolve apenas uma questão de análise empírica, mas carrega valores. No caso, o valor da adequação empírica. (LACEY, 2008, p.84)

- Heurística: a heurística é composta pelo conjunto de procedimentos, técnicas, métodos que possam ser utilizados para, dentro de um sistema, resolver os problemas que surgem a partir da base existente, tendo em vista a explicação de um resultado muitas vezes conhecido ou até assumido.

A heurística utilizada por Einstein, Friedman e que, posteriormente, se tornou um pressuposto básico em diversos modelos teóricos é a descrição no universo enquanto um fluido que não está sujeito à pressão. No modelo de Einstein o modelo de fluido se revela como particularmente útil para a imposição da distribuição de Boltzmann enquanto uma condição de contorno para verificar a possibilidade do universo ser infinito espacialmente e materialmente. Faremos uma breve descrição no restante deste capítulo da análise que nos levou à formulação das 3 teses apresentadas de do que justificou essa demarcação do núcleo, uma vez que elas se revelaram como “elementos em comum” às teorias cosmológicas formuladas na segunda metade do século XX

3.2 - UMA ANÁLISE DO “UNIVERSO DE FRIEDMAN”

Na concepção de ciência enquanto resolução de problemas, apresentamos a base, que são os dados conhecidos de afastamento entre as galáxias, e o ponto de partida, onde apresentamos os axiomas, que compõem o núcleo do programa. As três teses apresentadas no início deste capítulo, de naturezas distintas (ontológica, epistemológica e axiológica) começaram a ser concebidas, de forma independente, pelo russo Alexander Friedman e pelo belga Georges Lemaitre. As teses de natureza epistemológica e ontológica também se encontram no modelo de Einstein. A terceira, todavia, sobre o contínuo movimento de afastamento entre as galáxias, marca uma ruptura dos 2 modelos com aquele apresentado pelo fundador da relatividade geral. Mostraremos como tal afastamento, expresso como expansão do universo, emerge do trabalho de cada um dos dois.

Muitos autores consideram que o trabalho de Friedman seja de natureza puramente matemática, sem conexão com a astronomia observacional. Os artigos de 1922 e 1924 não dialogam diretamente com aspectos da astronomia observacional, como as medidas de efeito Doppler para obtenção de velocidades ou as estimativas de distâncias, tampouco dialoga com as crescentes discussões sobre os “universos-ilhas” e a possibilidade da existência de aglomerados estelares além da Via-Láctea. Avaliações mais pormenorizadas sobre a vida e obra de Friedman questionam tal leitura, pelo menos quando estendida a sua produção acadêmica como um todo, defendendo que Friedman, ao longo de todos os seus trabalhos, usualmente buscou interpretações físicas e verificações empíricas para seus trabalhos (BAGDONAS, SILVA NETO; 2023).

Todavia, verificar experimentalmente a hipótese da expansão do Universo não nos parece ter sido uma possibilidade levantada por ele, uma vez que não encontramos qualquer menção a testes empíricos em seu par de artigos em cosmologia de 1922 e 1924. Também não observamos em seu manuscrito que

houvesse uma preferência explícita por um modelo de universo estático ou dinâmico. Seu trabalho expõe, todavia, que a relatividade geral permite outras soluções para o “problema cosmológico”, como foi chamado por Einstein. Também é notável no trabalho de 1922 a estimativa para a idade do universo, como será revisitado nas páginas a seguir.

Seus resultados matemáticos buscaram elucidar que os modelos de universo dinâmicos não são incompatíveis com uma densidade finita de matéria e um universo espacialmente fechado. Os chamamos de “resultados matemáticos” pela natureza de seu trabalho, ausente de considerações ontológicas mais profundas ou de uma atitude categoricamente realista diante dos possíveis modelos de evolução do universo, tal característica é notada por historiadores que também estudaram suas contribuições cosmológicas:

A brilhante investigação de Friedman foi principalmente um exercício matemático e ele não expressou nenhuma preferência por um modelo em detrimento de outro. Ele não argumentou que nosso universo está de fato se expandindo ou que realmente teve origem em uma singularidade” (KRAGH, 2017, p.14)

O primeiro de seus artigos, publicado com o título “On the curvature of space”, buscou deduzir, por meio de algumas hipóteses, a estrutura geométrica do Universo e provar a possibilidade de um espaço cósmico de curvatura constante, mas que poderia variar com o tempo. Suas hipóteses são em partes físicas e em partes geométricas. Fisicamente, considera as mesmas hipóteses de Einstein e DeSitter e, geometricamente, considera que o Universo possui curvatura constante. Como resultado de sua matemática, ele obtém que as soluções de Einstein e DeSitter são casos particulares: “o Universo poderia estar em expansão, contração ou estático e que “não possuímos conhecimento atualmente para distinguir” suas soluções” (FRIEDMAN, 1922).

O artigo de Friedman publicado em 1922, descreve os modelos de Einstein e de De Sitter como casos particulares das soluções para as equações de campo da relatividade. Friedman interpreta que a solução das equações da relatividade geral não implica, unicamente, em um universo estático. Ele encontrou, além da solução estática de Einstein e da solução vazia de De Sitter, respostas dinâmicas para a evolução do cosmos com densidade de matéria não-nula. No mesmo artigo de 1922 Friedman efetua a primeira estimativa moderna para a idade do Universo.

Suas soluções adicionais se corroboram com os resultados da astronomia observacional, especialmente após o artigo de Hubble de 1929, conforme admitido por Einstein em 1932. O artigo de Friedman faz considerações essencialmente matemáticas, ele percebe que as ideias de um universo em expansão acelerada ou até mesmo oscilante também são compatíveis com as equações da teoria da relatividade geral.

As suposições nas quais baseamos nossas considerações se dividem em duas classes. À primeira classe pertencem as suposições que coincidem com as adotadas por Einstein e De Sitter; elas se relacionam com as equações que os potenciais gravitacionais obedecem, e ao estado e ao movimento da matéria. segunda classe pertencem as suposições sobre o caráter geral, por assim dizer geométrico do mundo; de nossa

hipótese segue como um caso especial o “mundo cilíndrico” de Einstein e também o “mundo esférico” de De Sitter (p.2)

O soviético procura, portanto, incluir as soluções de Einstein e de DeSitter como uma classe, um caso particular, de soluções matemáticas mais abrangentes. Em seu desenvolvimento, parte da equação obtida por Einstein, que relaciona a gravidade com a curvatura do espaço, introduzida da seguinte forma:

$$R_{ik} - 1/2 g_{ik} \overline{R} + \lambda g_{ik} = - \kappa T_{ik} \quad (i, k = 1, 2, 3, 4),$$

Equação 8

O potencial gravitacional, portanto, obedece ao sistema de equações de Einstein e, conseqüentemente, os pressupostos metodológicos e ontológicos contidos na teoria geral da relatividade. A equação 8 relaciona, de um lado o tensor de matéria T_{ik} (que representa a distribuição de matéria no universo) e do outro o potencial gravitacional g_{ik} produzido pela distribuição de matéria.

Posteriormente, Friedman obtém para $i = k = 1, 2, 3$ a seguinte solução:

$$\frac{R'^2}{R^2} + \frac{2 R R''}{R^2} + \frac{c^2}{R^2} - \lambda = 0$$

Esta equação, uma vez integrada, resultaria na expressão abaixo.

$$\frac{1}{c^2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{A - R + \frac{\lambda}{3c^2} R^3}{R},$$

Nessa expressão, a constante A é dada por $A = \kappa r^3/3$, e, após integração sobre o raio R, temos a seguinte solução para o tempo:

$$t = \frac{1}{c} \int_a^R \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2} x^3}} dx + B,$$

Eq. 9

Friedman obtém, portanto, uma expressão que representa a evolução do raio do universo r em função do tempo t . Considerando o imperativo matemático de não dividir nenhum termo por zero, seu artigo analisa as interpretações possíveis para o

resultado que aparece no denominador da equação 9, que pode contemplar três casos distintos. Definamos o termo $F(x)$ da seguinte maneira:

$$F(x) = A - x + \frac{\lambda x^3}{3c^2} > 0$$

1ª solução: $F(x) > 0$ para todo x

Isso ocorre para $\lambda > 4c^2/9A^2$ e corresponde ao caso em que a equação 9 não possui raízes positivas. Friedman chama essa solução de “mundo monotônico de primeira ordem”. Neste caso, a grandeza R é uma função crescente no tempo, seu valor $R = 0$ é obtido no instante $t = 0$. O instante t' é aquele em que o raio do universo alcança o valor R_0 e pode ser expresso pela equação 10, abaixo:

$$t' = \frac{1}{c} \int_0^{R_0} \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3}} dx.$$

Eq. 10

Algumas propriedades desse universo são apontadas por ele:

- i. O valor da idade do universo cresce para crescentes valores de R_0 , o que se torna mais claro se invertermos a relação de proporção: o tamanho do universo cresce com o passar do tempo.
- ii. Diminui se aumentarmos os valores da constante A , que é proporcional à massa total do Universo ($A = kM/6\pi^2$).
- iii. Diminui quando aumentamos, arbitrariamente, o valor da constante λ .

A discussão sobre universo possuir idade finita ou infinita é apresentada nos possíveis valores para a constante A . Se $A > 2R_0/3$, então o tempo desde a criação do universo é, para valores arbitrários de λ , finito. Caso contrário, os valores do tempo $t(R_0)$, medido desde a criação do universo, crescem arbitrariamente. Friedman utiliza livremente o termo “criação” sem adentrar em interpretações metafísicas ou teológica, aparentemente está apenas descrevendo o limite para um universo de tamanho nulo.

As outras duas soluções são obtidas para $0 < \lambda < 4c^2/9A^2$, pois, para esse intervalo de valores, a função $F(x)$ apresenta duas raízes, r_1 e r_2 , e é negativa no intervalo entre elas. Levando em consideração o imperativo matemático da não

divisão por zero e a dificuldade decorrente de interpretar soluções complexas¹² enquanto descrições do tempo de existência do universo, o autor se limita a considerar as soluções positivas para $F(x)$, o que implica nos intervalos $0 < F(x) < r_1$ e $F(x) > r_2$, que dividiremos, como ele faz em seu artigo, em duas soluções.

2ª solução: $0 < x < r_1$

Nesse caso, o universo se inicia com uma singularidade e se expande de forma desacelerada até seu raio máximo $x = r_1$, em que o efeito gravitacional contém a expansão e se principia o processo de contração. O tempo de duração do universo é finito, terminando no colapso em uma nova singularidade. Essa solução é chamada por ele de “mundo periódico” e a função que relaciona o período do universo com seu raio é obtida pela expressão:

$$t_\pi = \frac{2}{c} \int_0^{x_0} \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3}} dx.$$

Eq. 11

O autor acrescenta que, no que diz respeito à periodicidade do universo, duas interpretações são possíveis: se considerarmos que a variável tempo que aparece nas equações seja integrada entre $t_1 = -\infty$ e $t_2 = +\infty$ a resposta obtida como t_π realmente fornece o período de oscilação desse universo. Por outro lado, podemos interpretar um universo finito temporalmente com uma fase de expansão e outra de contração sucessivamente. Alguns detalhes são percebidos por ele nos parâmetros envolvidos na equação 11. O valor do período de oscilação do universo aumenta se aumentarmos o valor da constante λ . Seu valor tende a infinito se o valor de λ tender a $\lambda_0 = 4c^2/9A^2$. Para valores pequenos de λ , o período do universo é aproximadamente dado pela expressão:

$$t_\pi = \pi A/c$$

3ª solução: $x > r_2$

Esse cenário, conhecido por Friedman como “mundo monotônico de segunda ordem”, descreve a última solução real, matematicamente possível e que pôde ser interpretada por ele. O universo, neste cenário, se inicia com raio $r = r_2$ e se expande eternamente, de forma acelerada. Essa solução descreve o caso em que a atração gravitacional não impede expansão e conseqüente separação entre os aglomerados estelares. Algebricamente, sua solução é apresentada com a seguinte expressão:

¹² Friedmann descreve que é impossível haver espaço com essa curvatura inicial (página 8)

$$t - t_0 = \frac{1}{c} \int_{R_0}^R \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3}} dx,$$

Eq. 12

Essa solução não se distingue da obtida pela equação 11. O valor da constante R_0 é tomado por Friedman como “sem restrições”.

O trabalho de Friedman nos parece uma forma de discussão da “cinemática cosmológica”, uma vez que o autor se mostra preocupado em contemplar as possíveis soluções matemáticas que relacionam o raio do universo ao tempo. São diferentes condições de existência, condições iniciais e condições de contorno que restringiram as soluções possíveis. Diferentemente de Einstein e de De Sitter, não parece que o autor esteja disposto a escolher apenas um dentre os possíveis modelos dinâmicos de universo. A ausência de informações empíricas também dificulta que sejam feitas considerações adicionais.

A constante cosmológica, inserida por Einstein, permanece nos artigos de Friedman, chamada por ele apenas de “constante”, sem o mesmo esforço de interpretá-la dentro da dinâmica da expansão do universo. O que nos parece ser seu principal esforço é inserir as soluções obtidas pelos 2 dentro de um quadro algébrico mais abrangente, com um número maior de soluções matematicamente plausíveis

Nosso conhecimento é completamente insuficiente para realizar cálculos numéricos e decidir qual é o mundo do nosso universo; é possível que o problema da causalidade e o problema da força centrífuga iluminem esta questão. Resta observar que a “quantidade” cosmológica λ permanece indeterminado em nossas fórmulas, pois é uma constante adicional no problema. (FRIEDMAN, 1922, p. 10)

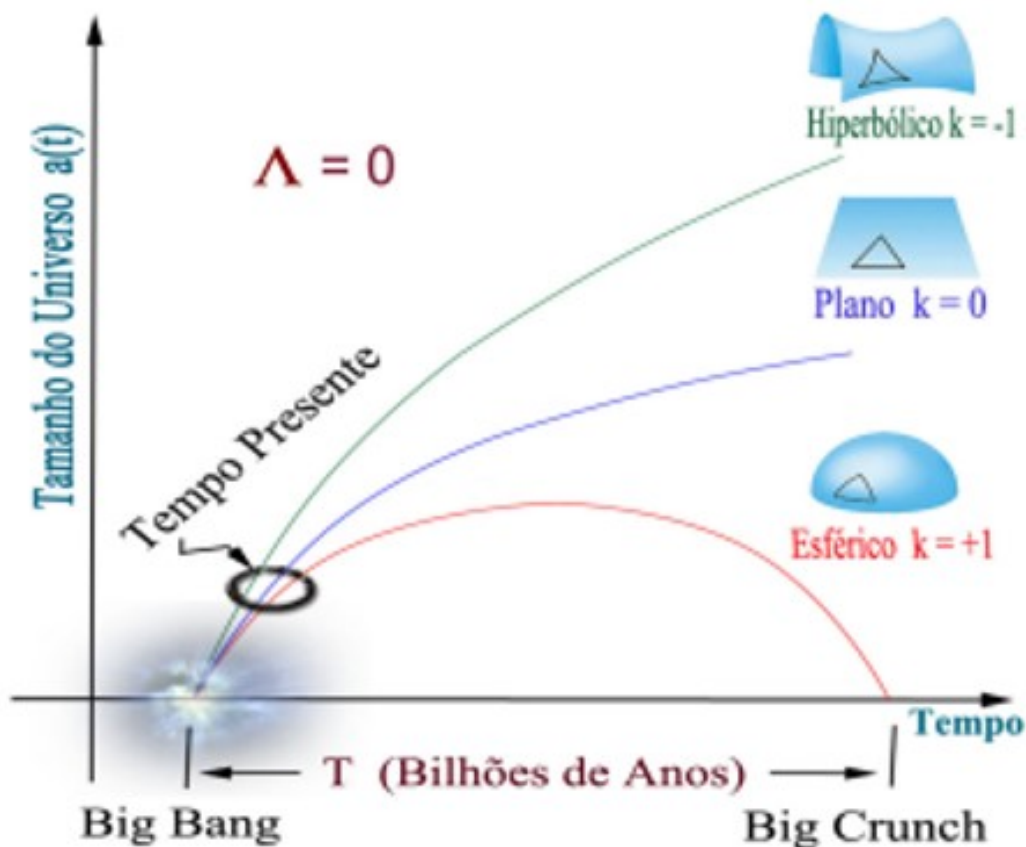


Figura 6: Os três possíveis destinos do universo, de acordo com as equações de Friedman: contínua expansão, estável ou em contração, assumindo nulo o valor da constante cosmológica de Einstein. A cada solução está associada uma curvatura espacial, que será descrita em mais detalhes no apêndice deste capítulo. (extraída de LIMA, 2017)

Portanto, descrevemos sucintamente as possíveis soluções cosmológicas de Friedman para a formação do núcleo cosmológico. Suas observações acerca das hipóteses de Einstein podem ser consideradas como um dos passos iniciais da nova cosmologia, da concepção expansionista de Universo. Sua percepção de que as equações de campos eram compatíveis também com um universo em crescimento abriu caminho para a possibilidade de posteriores investigações cosmológicas, tanto teóricas quanto empíricas.

Friedman foi o primeiro que propôs a solução geral do problema cosmológico dentro do marco da Relatividade Geral e se deve a ele o descobrimento fundamental de que, com as hipóteses lançadas nas “Considerações Cosmológicas” de Einstein, as equações de campos relativísticos se reduzem a um sistema de duas equações diferenciais que admitem uma infinidade de soluções, especialmente fechadas ou abertas, onde a métrica do espaço é função do tempo cósmico. (Ponty, pág. 74)

3.3 - AS CORRESPONDÊNCIAS ENTRE EINSTEIN E FRIEDMAN

Após a submissão de seu trabalho para publicação na Zeitschrift fur Physik, recebida em 29 de junho de 1922, Friedman se incomoda com a demora em receber um parecer. O corpo editorial do periódico enviou seu manuscrito para avaliação do

próprio Einstein, curiosamente autor de um dos modelos criticados no texto, por ser apenas um caso particular de uma solução mais abrangente. Finalmente Einstein, em 18 de setembro de 1922, envia seu parecer sobre o texto, com sua reprovação e com uma breve equação visando justificar que o texto não respeita a conservação da energia. É no mínimo curioso que Einstein tenha cometido um erro primário ao se equivocar na equação da continuidade. Temos abaixo a tradução de sua nota de parecer:

O trabalho citado contém um resultado referente a um mundo não estacionário que me parece suspeito. De fato, essas soluções não parecem compatíveis com as equações de campo (A). Das equações de campo segue-se necessariamente que a divergência do tensor de matéria T_{ik} desaparece. Isso junto com os anatzes (C) e (D) leva à condição:

$$\partial \rho / \partial x_4 = 0$$

que junto com (8) implica que o raio mundial R é constante no tempo. O significado da obra, portanto, é demonstrar essa constância. (REFERENCES: Friedmann, A. 1922, Zs. f. Phys., 10, 377).

Insatisfeito com essa negativa, Friedman, que sabia da importância em convencer Einstein da validade de suas soluções, escreve então uma carta endereçada pessoalmente ao físico alemão, oferecendo maiores detalhes de seus cálculos e solicitando que, caso seu trabalho se mostre convincente, Einstein se retrate de sua nota anterior:

Friedman: Considerando que a possível existência de um mundo não estacionário tem um certo interesse, me permitirei apresentar aqui os cálculos que fiz ... para verificação e avaliação crítica. [Os cálculos são fornecidos] Se você achar que os cálculos apresentados em minha carta estão corretos, por favor, faça a gentileza de informar os editores do Zeitschrift für Physik sobre isso; talvez, neste caso, você publique uma correção à sua declaração ou forneça uma oportunidade para que uma parte desta carta seja publicada. (6/12/1922)

Aparentemente, Einstein não teve contato com a esta carta, pois não se encontrava em Berlim. Em uma visita a Leiden, na Holanda, ele conheceu Krutkov, colega e emissário de Friedman, que lhe explicou em maiores detalhes suas soluções e como são compatíveis com os pressupostos da relatividade geral. Ele se convence finalmente e, por fim, emite uma nova nota, retratando-se, admitindo seu erro de cálculo e reconhecendo o valor das três soluções de Friedman. Os "louros" da discussão entre ambos são comemorados por Krutkov em uma carta endereçada à sua irmã: "Na segunda-feira, 7 de maio de 1923, eu estava lendo, junto com Einstein, o artigo de Friedmann no Zeitschrift für Physik. Eu derrotei Einstein na discussão sobre Friedmann. A honra de Petrogrado está salva!"

Convencido dos argumentos que lhe foram apresentados, e cobrado na nota de Friedman para se retratar publicamente no mesmo periódico, Einstein envia a nota abaixo à revista, em 31 de maio de 1923.

Einstein: Em minha nota anterior, critiquei [o trabalho de Friedman Sobre a curvatura do espaço]. No entanto, a minha crítica, como fiquei convencido pela carta de Friedman que me foi comunicada pelo Sr. Krutkov, assentava num erro de cálculo. Considero que os resultados do senhor Friedman estão corretos e lançam uma nova luz à questão.

Essa foi sua retratação oficial, mas, curiosamente, um trecho de seu rascunho foi riscado à caneta e pôde ser recuperado, nele há um comentário sobre as soluções de Friedman: “um significado físico dificilmente pode ser atribuído a elas”

Notiz zu der Arbeit von A. Friedmann
 „Über die Krümmung des Raumes“

Ich habe in einer früheren Notiz^x an
 die genannten Arbeit Kritik geübt.
 Mein Einwand betraf aber - wie
 ich mich auf Nachfrage von Herrn
 Krutkov^{xx} überzeugen konnte - auf einen
 Rechenfehler. Ich halte Herrn Krutkows
 Resultate für richtig und interessant. Es
 zeigt sich, dass die Feldgleichungen
 dynamisch neben dem statischen dynamisch
 (d. h. mit der Zeit koordinaten veränderliche)
 Lösungen (mit der Zeit veränderliche)
 Bedeutung haben geschrieben sein
 dürften.

A. Einstein.

^x Zentrbl. für Physik 1922 11.B. § 326
^{xx} Zentrbl. für Physik 1922 10.B. § 322.



Yuri A. Krutkov.

Figura 7: retrato do emissário Yuri Krutkov e rascunho original da resposta de Einstein em que se retrata de suas objeções anteriores ao trabalho de Friedman, a parte rabiscada se refere a dificuldades em encontrar o significado físico de tais modelos, mesmo que corretos matematicamente. (obtidos de: <http://web.mit.edu/8.286/www/slides07/Einstein-and-Friedmann.pdf>)

Muitas podem ser as motivações de seu comentário excluído, nos parece haver uma resistência natural em Einstein, neste momento de sua vida, em aceitar a interpretação de um universo dinâmico em expansão, no capítulo anterior mostramos que em seus trabalhos de 1933 há natural aceitação da solução de Friedman. Também nos parece que “atribuir um significado físico” às soluções sequer é objetivo do próprio Friedman. Possivelmente ele tenha refletido melhor sobre os verdadeiros objetivos do artigo do soviético, ou se convenceu da possibilidade de haver sim significado físico, ou simplesmente buscou evitar controvérsias adicionais.

O que nos parece absolutamente claro é a importância que Einstein atribui à necessidade de significado físico a qualquer modelo, para além da validade matemática das equações. Esse “compromisso ontológico” é parte do seu esforço contínuo de explicar e interpretar as consequências e aplicações da relatividade geral, o mesmo realismo é nítido também em suas discussões com Niels Bohr sobre a

nascente mecânica quântica, seu determinismo faz com que não aceite soluções sem um significado concreto enquanto comportamento da natureza.

Já Friedman atua como um matemático, as implicações físicas de um universo em expansão estão mais presentes nos trabalhos de Lemaitre, quem será melhor descrito na próxima seção, em seu trabalho encontramos as consequências de uma possível adoção das soluções encontradas também pelo soviético, também vemos em Lemaitre a escolha categórica de um único modelo de universo que, possivelmente, seja o que descreve a evolução do cosmos onde habitamos.

3.4 - AFASTAMENTO ENTRE AS GALAXIAS: AS CONSIDERAÇÕES DE LEMAITRE

No principal aspecto a ser considerado na reconstrução no núcleo do programa, os trabalhos de Friedman e de Lemaitre são equivalentes, apesar de terem sido concebidos de forma independente e apresentarem algumas importantes distinções, por isso inserimos ambos no núcleo e batizamos o programa de pesquisa de “Programa De Friedman-Lemaitre”. Se o trabalho de Friedman possui um viés maior na abordagem matemática das soluções das equações de campos relativísticos, as contribuições do belga Georges Lemaitre colocaram maior ênfase na Física envolvida em tais equações. A diferença entre os trabalhos de ambos se apresentava mais na abordagem e no “espírito” do que no conteúdo formal.

Lemaitre não apresenta o modelo de universo expansionista como apenas uma solução matemática, mas como um modelo evolucionário para o universo real. Seu artigo de 1927 apresenta importantes contribuições cosmológicas, porém, por motivos diferentes de Friedman, seu trabalho também não recebeu grande reconhecimento de imediato. Uma parcela desta explicação está no periódico escolhido por ele: os *Annales Scientifique Bruxelles*.

Apesar de já ter, a esta data, discutido suas ideias com cientistas de renome, como Einstein, Shapley e Eddington, seu professor em Cambridge entre 1923 e 1924, Lemaitre publicou em um periódico de baixo impacto acadêmico. O reconhecimento a suas hipóteses começa a aumentar a partir de 1930, quando “se reconhecia que algum tipo de universo dinâmico teria que substituir as soluções estáticas de Einstein e DeSitter existentes” (Kragh, 1996, p. 31 - tradução livre). A existência destas possíveis soluções foi amplamente debatida na reunião da sociedade real britânica, no dia 10 de janeiro daquele ano. Por ter seu trabalho ignorado, Lemaitre resolve enviar uma correspondência a Eddington, juntamente com uma cópia de seu artigo de 1927, lembrando-o que já ofereceu uma solução para o dilema entre os modelos de Einstein e DeSitter. O entusiasmado e imediato reconhecimento por parte de Eddington da primazia de seu trabalho incluiu uma tradução de seu artigo para o inglês, uma nota de reconhecimento para a revista Nature e uma cópia para DeSitter que residia em Leiden.

Quando Lemaitre introduz o conceito de “átomo primordial” ele não se refere a uma singularidade, muito menos ao estado que será conhecido como Big-Bang,

demonstrará inclusive certo desinteresse por essa teoria. O salto entre defender que o Universo em expansão tenha ocupado um volume microscópico no passado e alegar que tenha se iniciado em uma singularidade simplesmente não foi dado por ele.

Uma singularidade cósmica é uma noção não física na medida em que nem o espaço nem o tempo existem, e a densidade não é apenas enorme, mas infinita. Lemaitre sempre enfatizou que a cosmologia poderia e deveria ser entendida em termos físicos e, portanto, negou que o começo do mundo pudesse ser representado por uma verdadeira singularidade ou “aniquilação do espaço”, como ele a chamava (Kragh, 1996, p. 54)

Podemos observar no texto de Lemaitre uma antecipação da expressão matemática que será consagrada como a equação de Hubble¹³. Também introduz equações diferenciais do mesmo tipo que Friedman, mas incluindo um termo devido à pressão exercida pela radiação, inserindo assim a termodinâmica à cosmologia relativística. Muitas são as semelhanças entre as propostas de Friedman e Lemaitre. Neste sentido os historiadores costumam apresentar esta proposta como “modelo de Friedman-Lemaitre” apesar de ambos, ao que parece, jamais tenham trabalhado em colaboração.

Para mostrar mais detalhadamente o trabalho de Lemaitre, utilizaremos a tradução para o inglês de seu texto originalmente publicado nos anais da academia de Bruxelas. O texto inicia com uma breve exposição das teorias de DeSitter e de Einstein, com seus pontos fortes e fracos. A primeira tem a vantagem de estar de acordo com a aparente velocidade de recessão das nebulosas, já sugerida por Slipher¹⁴ em 1917. Já a cosmologia de Einstein prevê a existência de matéria e fornece uma explicação satisfatória para relação entre a massa e o raio do universo.

Duas soluções foram propostas. A de de Sitter ignora a existência da matéria e supõe sua densidade igual a zero. Isso leva a dificuldades especiais de interpretação que serão mencionadas mais tarde, mas é de extremo interesse para explicar naturalmente as velocidades de afastamento observadas de nebulosas extragalácticas, como uma simples consequência das propriedades do campo gravitacional sem ter que supor que estamos em um ponto do universo diferenciado por propriedades especiais. A outra solução é a de Einstein. Atende ao fato evidente de que a densidade da matéria não é zero, e leva a uma relação entre essa densidade e o raio do universo. Essa relação previu a existência de massas enormemente maiores do que qualquer outra conhecida na época. Estas já foram descobertas, tendo-se tornado conhecidas as distâncias e dimensões das nebulosas extragalácticas. Pelas fórmulas de Einstein e dados observacionais recentes, o raio do universo é cerca de cem vezes maior do que os objetos mais distantes que podem ser fotografados por nossos telescópios. (pág. 483)

Sua proposta emerge como uma tentativa de preservar os pontos positivos e melhorar os pontos negativos de ambas as propostas. Lemaitre busca encontrar um

¹³ Mesmo que tardiamente, muitos manuais de astronomia e a própria União Astronômica Internacional passaram a substituir a popular “lei de Hubble” por “lei de Hubble-Lemaitre”.

¹⁴ O trabalho de Slipher, ou qualquer outra citação, acerca da “conhecida” velocidade de recessão das nebulosas não é citada por Lemaitre.

modelo para a dinâmica do universo que incluía as soluções de ambos como casos particulares, uma vez que se mostram, por diferentes motivos, insatisfatórios. Mais do que encontrar um sistema mais geral, seu trabalho apresenta fortes traços de realismo científico.

Cada teoria tem suas próprias vantagens. Uma está de acordo com as velocidades radiais observadas das nebulosas, a outra com a existência da matéria, dando uma relação satisfatória entre o raio e a massa do universo. Parece desejável encontrar uma solução intermediária que possa combinar as vantagens de ambos. (pág. 484)

Lemaitre descreve as equações de campos da relatividade, assim como Einstein, pelo par:

$$3\frac{R'^2}{R^2} + \frac{3}{R^2} = \lambda + \kappa\rho$$

$$2\frac{R''}{R} + \frac{R'^2}{R^2} + \frac{1}{R^2} = \lambda - \kappa\rho$$

O sistema de equações acima, combinado com a primeira lei da termodinâmica e com a hipótese de que a massa no universo não varie com o tempo, o levaram à seguinte expressão:

$$\frac{R'^2}{R^2} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\kappa\rho}{3} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\alpha}{3R^3} + \frac{\beta}{R^4}$$

Eq. 13

E conseqüentemente obtém, após integração, uma estimativa para a idade do universo.

$$t = \int \frac{dR}{\sqrt{\frac{\lambda R^2}{3} - 1 + \frac{\alpha}{3R} + \frac{\beta}{R^2}}}$$

Eq. 14

A solução de DeSitter é reconhecida se inserirmos $\alpha = 0$ e $\beta = 0$, a solução de Einstein, por outro lado, é obtida por ele inserindo apenas $\beta = 0$, mas com a hipótese adicional $R' = 0$ (raio do universo constante com o passar do tempo), cumprindo a promessa contida no início de seu texto, de obter ambas as soluções como casos particulares de uma solução mais abrangente. Na parte final de seu pequeno artigo (apenas oito páginas), Lemaitre fornece uma explicação teórica para a aparente velocidade de afastamento entre as nebulosas, assumida como consequência da expansão do universo. (ibid Lemaitre, pág. 489)

$$\frac{v}{c} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{dR}{R} = \frac{R'}{R} dt = \frac{R'}{R} r$$

Com auxílio da relação conhecida empiricamente:

$$\frac{R'}{R} = 0.68 \times 10^{-27} \text{ cm.}^{-1}$$

Com essa relação, Lemaitre finalmente obtém o que podemos considerar o equivalente da famosa equação de Hubble.

$$R_0 = \frac{rc}{v\sqrt{3}}$$

Eq. 15

Como descreveremos na próxima secção, Hubble apresentará no ano de 1929 sua famosa relação empírica entre velocidade de afastamento e a distância para diversas galáxias. Essa relação é equivalente à semi-teórica obtida pelo belga, dois anos antes (semi-teórica, pois, como descrevemos, ele se vale de algumas relações conhecidas empiricamente).

$$V = H_0.r$$

(lei de Hubble, obtida empiricamente)

Já a relação obtida por Lemaitre, descrita na equação 15, pode ser resumida na expressão abaixo:

$$V = (c/\sqrt{3}R_0).r$$

(relação de Lemaitre equivalente à lei de Hubble)

Se considerarmos que $H_0 = c/\sqrt{3}R_0$, temos a demonstração semi-teórica feita por Lemaitre equivalente à famosa lei apresentada empiricamente por Hubble. Após votação realizada em sua XXX assembleia geral, realizada no dia 26 de outubro de 2018¹⁵ em Viena, a União Astronômica Internacional passou a sugerir a alteração do termo “Lei de Hubble” para “Lei de Hubble-Lemaitre”, em reconhecimento ao papel pioneiro do trabalho apresentado acima no desenvolvimento da moderna cosmologia.

3.5 - A LEI DE HUBBLE-LEMAITRE E SEU LUGAR NO NÚCLEO DO PROGRAMA

¹⁵ A resolução pode ser visualizada no site oficial da União Astronômica Internacional: <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau1812/> (acessado em 01/04/2023)

Se somarmos os passos dados por ambos, chamando a atenção para a existência de soluções expansionistas e, particularmente, Lemaitre, que descreve a solução expansionista como única a verdadeiramente corresponder ao Universo físico e deriva uma expressão equivalente à lei de Hubble, entendemos que, muito mais do que um modelo, temos um verdadeiro programa de pesquisa, uma vez que testes empíricos passam a ser concebidos com o intuito de verificar a possível expansão do universo. O que caracteriza seu núcleo irrefutável? Certamente precisamos nele incluir a teoria geral da Relatividade, assumida verdadeira, desde a primeira página, nos artigos de ambos. Também observamos que as diferentes propostas cosmológicas assumem que o Universo se comporta como um fluido sem pressão, sujeito às leis da termodinâmica e da mecânica estatística.

Por que os trabalhos de Friedman e Lemaitre não são incluídos no mesmo programa de pesquisa proposto por Einstein? Para responder a esta questão precisamos ter um olhar à frente na história da cosmologia relativística e procurar o que Lakatos classifica como “série empiricamente progressiva de teorias” relacionadas a um mesmo núcleo. A partir da década de 30 a visão de um universo em expansão se tornará, sempre com algumas exceções, majoritária na pesquisa em cosmologia. Haverá uma interessante disputa entre a teoria do Big-Bang e a teoria do estado estacionário, mas ambas assumem a validade da relatividade geral, da descrição do universo como fluido e, principalmente, que as galáxias estão se afastando entre si.

A partir da segunda metade da década de 30, aqueles pesquisadores que não consideravam este núcleo irrefutável foram se tornando cada vez mais dissidentes e se afastando da linha de pesquisa dominante, o que caracteriza a consolidação do programa de pesquisa da cosmologia relativística ou, o que defendemos nesta dissertação: “Programa de pesquisa de Friedman-Lemaitre”.

A interpretação dos redshifts observados em termos de velocidades radiais foi aceita pela maioria dos cientistas, mas também houve quem a negasse e defendesse interpretações alternativas que não envolviam um universo em expansão. Durante a década de 1930, sugestões de alternativas sem velocidade eram comuns; no entanto, embora muitos astrônomos estivessem dispostos a considerar o universo em expansão não mais do que uma hipótese, os esquemas alternativos falharam em obter apoio geral. (KRAGH, 1996, p.33)

O movimento de afastamento entre as galáxias é, nas principais teorias cosmológicas posteriores, um elemento consensual, o que o coloca no núcleo do programa, como afirmamos acima. A medida deste movimento é resultado de observação de desvios espectrais para o vermelho (redshift), encontrados na radiação provinda da maior parte das nebulosas. A interpretação dos redshifts como consequência do chamado efeito Doppler-Fizeau leva a medidas desta velocidade de afastamento. Veremos no capítulo cinco que houve, e ainda há, alguns poucos astrônomos que discordam de tal interpretação e buscam outras explicações para os redshifts, algumas que negam pressupostos fundamentais da relatividade geral, como a constância da velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo.

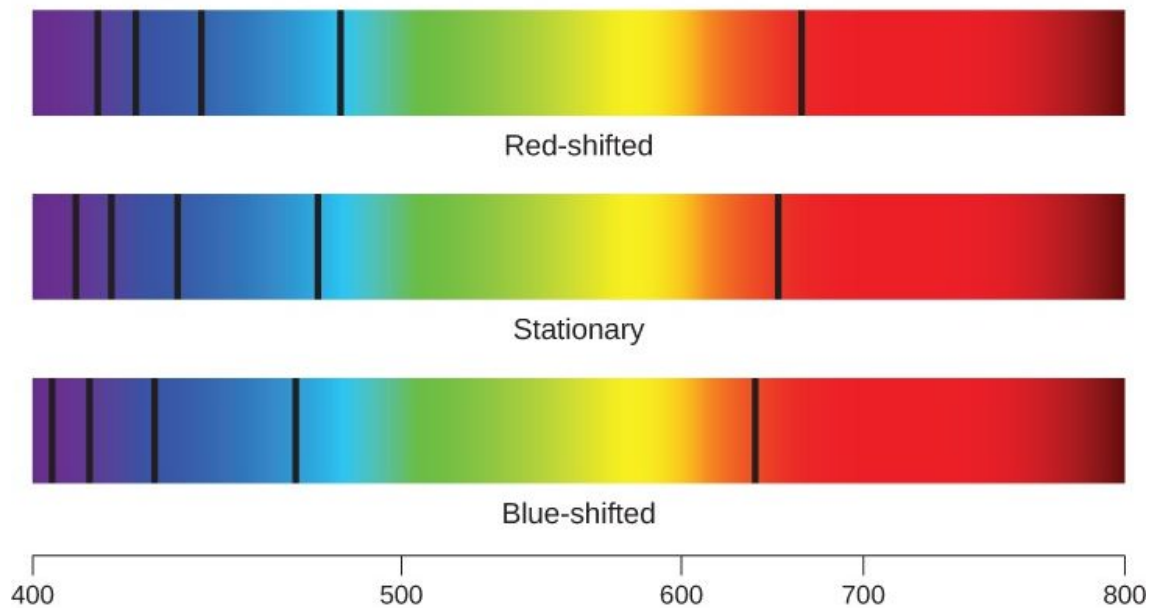


Figura 8: exemplo de desvios espectrais causados pelo efeito Doppler, o espectro de absorção é deslocado para a região do vermelho quando há afastamento entre fonte e observador e deslocado para a região do azul quando há aproximação entre ambos.

Sabemos que o efeito Doppler, já descoberto e largamente conhecido no século XIX, origina-se do fato de que há uma mudança na frequência de um sinal recebido por um objeto em relação à frequência de um sinal emitido por outro objeto, quando os mesmos possuem velocidade relativa entre si. Vamos considerar o caso em que uma fonte S se afasta com velocidade v de um sistema de coordenadas fixo, onde há um observador estacionário.

A fonte emite sinais luminosos em intervalos fixos de tempo (seu período), que definem a frequência de emissão no seu referencial, definida como f_s , o movimento relativo entre observador e fonte leva a uma frequência distinta f_o , com que os sucessivos sinais sejam medidos por um observador O que se afasta de S com velocidade constante V . Substituiremos a expressão clássica do efeito Doppler pela sua versão relativística, aplicável quando a velocidade relativa entre os corpos se aproxima da velocidade da luz. (demonstração completa pode ser consultada em Moysés, volume 4)

$$f_o = f_s \cdot \sqrt{(1 - \beta)/(1 + \beta)}$$

Definindo $\beta \equiv v/c$:

Essa é a expressão do efeito Doppler relativístico, onde a variação entre a frequência emitida por um astro e sua frequência detectada nos radiotelescópios de solo é calculada a partir da diferença entre os comprimentos de onda ou, de forma equivalente, entre as frequências da radiação emitida e da radiação detectada. Um dos primeiros trabalhos que contribuíram para a determinação das velocidades de

afastamento entre as galáxias pode ser atribuído ao estadunidense Vesto Slipher em 1917. Slipher mediu redshift para vinte e cinco galáxias diferentes e, então, calculou a velocidade de afastamento das mesmas. (SLIPHER, 1917). O também norte-americano Edwin Hubble apresenta no ano de 1929, com a colaboração de Milton Humason, uma ampliação do trabalho de Slipher. Obteve, por métodos independentes¹⁶, os valores, respectivamente, das velocidades de afastamento e das distâncias em que se encontram 45 diferentes nebulosas. Seu trabalho, publicado definitivamente em 1931 (após uma versão inicial em 1929) apresenta tal correlação entre as medidas no gráfico abaixo.

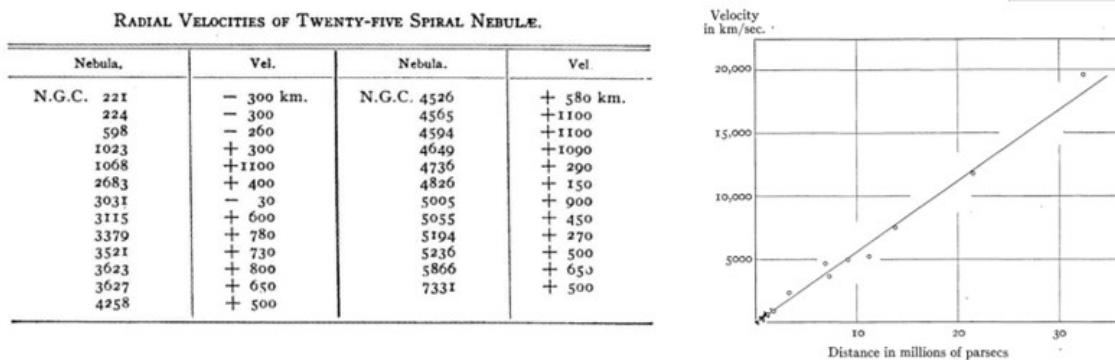


Figura 4: Na direita temos a relação obtida empiricamente entre velocidades e distâncias galácticas, apresentada por Hubble e Humason no artigo de 1931 (extraída de HUBBLE E HUMASON, 1931). Essa linearidade já havia sido prevista teoricamente por Lemaitre em 1927 (equação 15) e, pela pouca repercussão de seu trabalho, acabou sendo consagrada na literatura apenas como “Lei de Hubble”. Temos à esquerda a tabela apresentada por Slipher em 1917, com velocidades de recessão extraídas por meio do efeito Doppler (apresentada no capítulo 2 isoladamente).

Na Figura 4 (direita), extraída do artigo de Hubble, as galáxias mais distantes apresentam as maiores velocidades de afastamento, um dos aspectos mais importantes deste trabalho é a relação linear entre essas distâncias e velocidades nebulares. A expressão matemática dessa relação entre as duas grandezas ficou conhecida como a já introduzida “Lei de Hubble” e pode ser enunciada na forma:

$$V = H_0 \cdot d$$

(Eq. 17)

Na equação 17 o termo H_0 é o coeficiente angular da reta, conhecido como “constante de Hubble”, grandeza fundamental para a estimativa da idade do Universo. As primeiras estimativas para a idade do universo foram em torno de 4 bilhões de anos, entretanto, nas décadas seguintes alguns erros foram corrigidos, novas nebulosas foram inseridas, o valor da constante de Hubble foi refinado, e o estimado atualmente é próximo de 14 bilhões de anos. Diferentemente de Lemaitre, a relação obtida por Hubble foi unicamente empírica, ajustando uma reta aos dados coletados sobre distâncias e velocidades das diversas nebulosas em relação à Terra. A lei de Hubble também se converterá em um importante instrumento de medida de distancias para novas nebulosas a partir da medida de suas velocidades de recessão.

¹⁶ As distâncias foram determinadas tomando como base a presença de estrelas de brilho intrínseco variável, conhecidas como Cefeidas, o método de determinação foi elaborado Henrietta Leavitt em 1908, suas velocidades medidas com base no efeito Doppler.

Apesar de Hubble e Humason não se posicionarem oficial e favoravelmente ao modelo do *Big Bang* ou do Universo estacionário, esse resultado é atualmente considerado como uma das primeiras evidências empíricas a favor da expansão do Universo. Historiadores da ciência alertam que a importância usualmente dada a este trabalho de Hubble enquanto “comprovação” da hipótese do Big Bang é um pouco exagerada. A velocidade de afastamento das galáxias se constitui parte do núcleo do programa de Friedman- Lemaitre, já a hipótese da origem do Universo a partir de uma explosão inicial, não! Não devemos associar o trabalho de Hubble tão diretamente com a expansão do universo, como constantemente alertado por historiadores e seus comentadores:

É surpreendente que Hubble ainda seja considerado o descobridor da expansão do universo, apesar de ter publicamente se pronunciado cético em relação a ela. Muitos autores de divulgação científica que conviveram com ele sabiam disso, mas continuaram propagando esta visão historicamente errada. Até o ano de sua morte, em 1953 ele permaneceu cauteloso em relação à interpretação cosmológica dos desvios espectrais. Isso levou o historiador Stephen Brush a compará-lo com Planck e Maxwell, pois todos teriam sido “revolucionários cautelosos”, que lidaram com transições abruptas na ciência, contribuindo para a emergência de novas teorias no campo da mecânica quântica e atomismo, mas mantendo-se cautelosos quanto a sua aceitação. Da mesma maneira, Hubble sem dúvida contribuiu muito para a aceitação da teoria da expansão do universo, apesar de jamais ter se manifestado publicamente em sua defesa. (HENRIQUE, 2011, página 3)

Hubble e Humason se limitaram a citar os desvios espectrais para o vermelho na radiação das nebulosas, sem especular sobre a causa desse fenômeno. Não pretendemos corroborar a visão consensual e, até certo ponto ingênua, de rotular ambos como “pais” do modelo padrão. Podemos inferir em uma leitura atenta do artigo de 1931 que os autores são cuidadosos em expor a lei empírica que relaciona a aparente velocidade de recessão galáctica sem afirmar categoricamente que os redshifts medidos devam ser interpretados como verdadeiro movimento de afastamentos galácticos e, muito menos, fruto de uma expansão do Universo. A lei é empírica e seus proponentes evitam adentrar ao debate cosmológico de cunho teórico, como podemos verificar no texto original

A presente contribuição diz respeito a uma correlação de dados empíricos de observação. Os escritores são obrigados a descrever os “aparentes deslocamentos de velocidade” sem se aventurar na interpretação e seu significado cosmológico. Observações adicionais são desejáveis e serão realizadas, embora pareça provável que as características gerais da relação já estão descritas quase no limite dos equipamentos existentes. (HUBBLE, 1931, pág. 38)

Nos parece, portanto, que os autores não se posicionam no contexto do crescente debate em cosmologia. O reconhecimento da importância desta lei, mesmo que obtida empiricamente neste trabalho, se deu de forma imediata e irá permear o debate entre a teoria do Big-Bang e do Estado Estacionário, como descreveremos no próximo capítulo.

Uma questão importante, para a qual pretendemos dar uma resposta neste ensaio envolve a possibilidade de leis empíricas fazerem parte da constituição do núcleo de um programa. Tal questão não parece ter sido explicitamente abordada por Lakatos, apesar de algumas passagens aparentemente reforçarem tal credo. Dentre elas podemos separar uma, onde o autor descreve a constituição do núcleo newtoniano da Física clássica.

Newton elaborou primeiro seu programa para um sistema planetário com um ponto fixo como o Sol e um único ponto como planeta. Desse modelo derivou sua lei do inverso do quadrado para a elipse de Kepler. Mas esse modelo foi proibido pela sua própria terceira lei da dinâmica e, portanto, precisou ser substituído por outro em que tanto o Sol quanto o planeta giravam em torno do seu centro comum de gravidade. A mudança não foi motivada por nenhuma observação, mas por dificuldade teórica no programa (LAKATOS, 1979, pág. 166)

O estudo de caso da história da ciência é uma interessante oportunidade de verificar em que sentido a afirmação parece ser correta. Em que sentido podemos encontrar programas de pesquisa, em diferentes áreas da ciência onde supostamente leis empíricas foram tomadas como verdadeiras por diferentes teorias? Da maneira como Lakatos descreve o lugar ocupado pelas teses do núcleo, o exame da história da ciência pode nos revelar episódios em que leis empíricas tenha tido força de núcleo, ou seja, de ocupar um lugar central nos fundamentos de trabalhos posteriores ao longo de uma tradição de pesquisa ou de uma série de teorias correlatas. Faremos em seguida um breve “olhar para trás” na história da ciência, um esforço de reconstrução de parte do núcleo a partir de sua presença nas diferentes teorias, que apresentam pontos em comum.

3.6 - TEORIAS DISTINTAS, MAS COM UM NÚCLEO EM COMUM

O caso da cosmologia, especificamente sobre a lei de Hubble ser parte do núcleo do programa de Friedman-Lemaitre, nos parece se configurar uma particularidade bastante importante. Os trabalhos, seja do trio liderado por Gamow, ou daquele liderado por Hoyle, fazem citação direta à lei de Hubble. Não demonstram, nos seus artigos originais que verificamos, qualquer reticência em relação à lei ter sido obtida empiricamente. Hubble gozava da justa fama de ser um astrônomo particularmente cuidadoso e competente com relação às suas observações feitas no observatório de Monte Wilson. Por outro lado, a mesma lei foi derivada teoricamente por Lemaitre, em seu trabalho, inicialmente, de baixíssimo impacto e repercussão. A lei, portanto, apesar de ter sido concebida e reconhecida empiricamente, por meio de medições independentes de velocidades e distâncias galácticas, possui sua demonstração parcialmente teórica. Posteriormente, a União Astronômica Internacional a reconheceu como “Lei de Hubble-Lemaitre”.

Ao observarmos detalhadamente alguns trabalhos originais, esperamos justificar nossa tese de que a lei de Hubble é parte do núcleo de um programa compartilhado por duas teorias rivais: tanto os artigos publicados pelos defensores da teoria do estado estacionário (Hoyle, Bondi e Gold), quanto aqueles publicados pelos proponentes da teoria do Big-Bang (Gamow, Alpher e Hermann) assumem a validade

da lei de Hubble como um dos pontos de partida para seus desenvolvimentos teóricos e empíricos. Primeiramente mostraremos como ela se mostra como parte do núcleo segundo os defensores do modelo do estado estacionário. Vejamos a referência a ela feita em um artigo publicado por Fred Hoyle, como instancia de corroboração de sua estimativa

Finalmente, notamos que um número adimensional é obtido dividindo-se o comprimento $a/3$ que aparece em (19) pelo “alcance” k das forças nucleares. Usando dados de laboratório para A , juntamente com a determinação dada acima para $a/3$ (com base em uma comparação com a relação velocidade-distância de Hubble-Humason), obtemos cerca de 4×10^{39} para esse número. (Hoyle, 1948, p.1)

O ensaio acima se soma ao argumento de seus dois principais colaboradores, onde podemos observar também uma importante citação à mesma lei e, mais uma vez, a concordância de sua nova teoria com a lei de Hubble é uma tentativa de validar a teoria do estado estacionário junto à comunidade de astrônomos.

Vemos, portanto, que nossa teoria concorda com a observação, pelo menos tão bem quanto os modelos relativísticos, quando seus numerosos parâmetros livres são ajustados. A dedução original de Hubble que seus dados sugeriram, em uma interpretação relativística, um universo improvavelmente pequeno está quantitativamente de acordo com nossa teoria (Bondi, Gold, 1948, p.2)

Ambos os trabalhos expressam a satisfação da concordância de seus modelos com os dados obtidos por Hubble. No artigo de Hoyle há um parâmetro obtido por comparação, termo a termo, de seu desenvolvimento, com a lei de Hubble. Já o artigo de Bondi e Gold expressam como sua teoria se mostra em boa concordância com a dedução original contida nesta lei. Olhando para o outro lado desta disputa, a análise dos originais de Alpher e Herman, dois dos 3 proponentes da teoria do Big-Bang, também citam a contribuição de Hubble, de onde partem para justificar seu modelo.

Embora não seja particularmente pertinente ao estudo relatado neste artigo, é interessante notar que se pode encontrar a dependência da taxa de expansão universal no tempo neste tipo de modelo. Esta taxa é a variação percentual na distância adequada por unidade de tempo, determinada por Hubble a partir do desvio para o vermelho nos espectros das nebulosas, e é dada em $V=Hd$, onde V é a velocidade de recessão de uma nebulosa a uma distância d . (ALPHER, HERMAN, R, 1948, p.2)

Nas páginas iniciais do artigo consideram a taxa de expansão do universo em função do tempo como premissa para o posterior desenvolvimento de suas ideias, apresentadas subsequentemente. A consideram parte das premissas iniciais para o desenvolvimento de sua teoria. Uma satisfação ainda maior à lei de Hubble é prestada no artigo publicado de forma independente pelo líder do grupo, o soviético George Gamow:

outro método extremamente importante de comparar as consequências da cosmologia relativística com as propriedades observadas do nosso universo é apresentado pelos estudos de Hubble sobre o desvio para o vermelho e a densidade do espaço no caso de galáxias muito perturbadas”. (GAMOW, 1946)

Esperamos, como encerramento desta secção, ter justificado em que medida a disputa entre as duas teorias não se configura uma disputa entre programas de pesquisa, mas o desenvolvimento de uma série progressiva de teorias, descrita pela heurística positiva de Lakatos. Mais do que isso, foi nosso intuito completar a identificação do núcleo deste programa, formado por todas as teses e hipóteses compartilhadas por ambas, apesar da rivalidade existente e da necessidade de apresentar em que medida os modelos buscam se diferenciar um do outro.

3.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta reconstrução da cosmologia do século XX, defendemos que até 1931 consolida-se o núcleo deste programa de pesquisa. As medidas observacionais de Slipher e, posteriormente, Hubble e Humason trarão os primeiros suportes empíricos ao modelo de Universo em expansão, formulado por Friedman e Lemaitre. Ressaltamos, todavia que a aceitação da associação entre os redshifts galácticos e velocidades de afastamento era uma questão que dividia opiniões entre os teóricos da década de 30, e tal associação se tornará opinião majoritária na década seguinte. Trataremos especificamente desse desenvolvimento em mais detalhes no próximo capítulo.

Por fim, podemos descrever as sentenças que configuram o núcleo do programa de pesquisa iniciado por Friedman e Lemaitre (N_{FL}). Estas afirmações serão tomadas como fundamento das duas principais teorias cosmológicas que ganharam forma a partir da década de 30 e irão competir, pelo menos até a detecção da radiação cósmica de fundo por Penzias e Wilson em 1964.

NÚCLEO DO PROGRAMA DE PESQUISA DE FRIEDMAN-LEMAITRE

- **N_{FL1} . A LEI DE HUBBLE-LEMAITRE DESCREVE O MOVIMENTO DE AFASTAMENTO ENTRE AS GALÁXIAS**
- **N_{FL2} . A TEORIA GERAL DA RELATIVIDADE DESCREVE A GRAVITAÇÃO E A GEOMETRIA DO UNIVERSO.**
- **N_{FL3} . A ESTRUTURA DO ESPAÇO-TEMPO PODE SER DESCRITA COMO UM FLUIDO PERFEITO.**

Uma vez que esperamos ter justificado quais afirmações se inserem no núcleo do programa de Friedman-Lemaitre e o que nos levou a não afirmar que a proposta de Einstein tenha se concretizado enquanto um programa de pesquisa, acreditamos que seja importante mencionar outros recortes já realizados e presentes na literatura que trata da cosmologia sob o viés de Lakatos. São conclusões diferentes da que chegamos nesta dissertação, com justificativas bastante distintas.

Em uma delas encontramos a defesa de que a teoria do Big-Bang, que nós inserimos dentro da heurística positiva, seja um programa de pesquisa. Essa é, por exemplo, a leitura de (ARTHURY; PEDUZZI, 2013). Nosso intuito não é o de criticar a proposta já existente, mas reforçar que o recorte adotado, as justificativas e conclusões são bem distintas das aqui apresentadas.

É importante mencionar que a estratégia adotada, no referido texto, de se caracterizar a teoria do big bang como um programa de pesquisa, foi posteriormente repensada, com o objetivo de compatibilizar a noção de programas de pesquisa, de Lakatos com a constatação de que, o que se conhece como “teoria do big bang”, ser um modelo que se utiliza de teorias mais gerais que lhe sustenta. Ou seja, o que se poderia identificar diretamente como teoria, na “teoria do big bang”, seria a relatividade geral, que produz como consequência um universo em expansão, como discutido no texto, e a Mecânica Quântica, ao direcionar as modernas pesquisas em relação às características basais da teoria do big bang (como os momentos iniciais do universo, que produziram o ruído cósmico de fundo). Porém, segundo Bunge, “(...) um modelo teórico é uma teoria especial que cobre uma espécie limitada em vez de um gênero extenso de sistemas físicos” [33, p. 53]. Logo, pode-se justificar a caracterização da teoria do big bang como um programa de pesquisa, como proposto por Lakatos. (ARTHURY; PEDUZZI, 2013)

Outros autores defendem que, nem mesmo há alguma cosmologia que verdadeiramente se caracterize como um programa de pesquisa lakatosiano, por falhar em corresponder a seus critérios de progressividade. (MERRITT, 2017). Esperamos, todavia, ter deixado claros nossos argumentos tê-los diferenciado de outros trabalhos similares já realizados. Acreditamos que diferentes recortes e reconstruções possam ser realizadas sobre um mesmo período da história da ciência, uma vez que definir a exata extensão de um núcleo e a relação que se estabelece entre o mesmo e as teorias que se sucedem na heurística de um programa, seja ela de compromisso ontológico, seja metodológico, axiológico ou de outra natureza, possa ser reconhecida de formas distintas por diferentes historiadores e filósofos da ciência.

Elaboramos abaixo um pequeno diagrama que resume nossa proposta: a cosmologia elaborada por Einstein falha nas tentativas de classificá-la como um Programa de Pesquisa por não apresentar nenhum conteúdo empírico direto ou, tampouco, a produzir uma série progressiva de teorias. Todavia, boa parte do núcleo desta proposta é resgatado por Friedman e Lemaitre que, concretamente, inauguram um programa de pesquisa do qual observamos a produção de uma série de teorias, que constituem o seu cinturão de proteção, de acordo com a descrição de Lakatos.

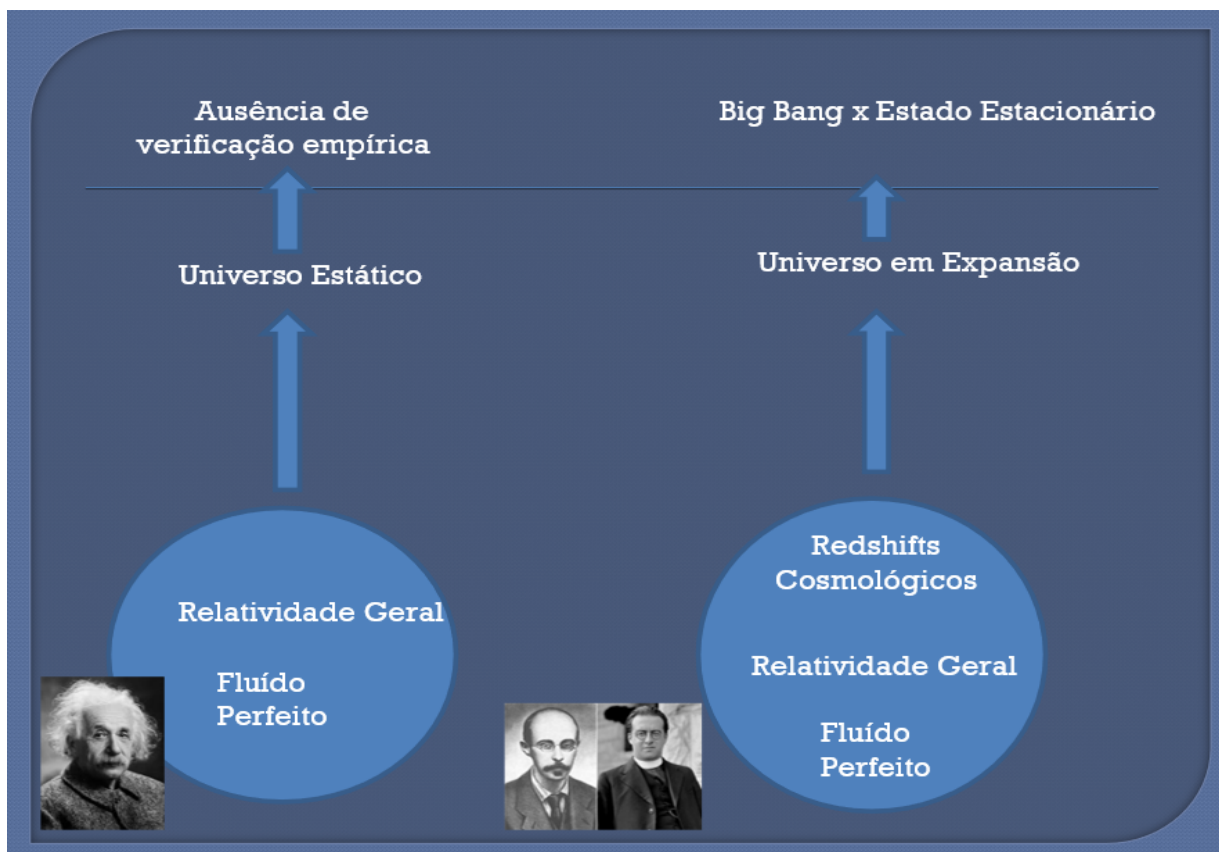


Figura 9: resumo esquemático da proposta apresentada neste capítulo, segundo a qual podemos chamar de “proposta de programa de pesquisa” o trabalho cosmológico de Einstein. Por outro lado, os trabalhos de Friedman e Lemaitre, somados, inauguram de fato um programa de pesquisa, no sentido Lakatosiano do termo. Na figura ilustramos os conceitos de Einstein que são preservados por ambos e fazem parte do núcleo do programa. (créditos ao autor pela imagem)¹⁷

Este episódio exemplifica um importante problema relacionado ao progresso da ciência que já foi abordado por Lakatos, Popper, Duhem e muitos outros. O primeiro afirma que: “Popper concorda com os convencionalistas em que as teorias e proposições factuais podem sempre harmonizar-se com a ajuda de hipóteses auxiliares” (LAKATOS, 1979, p.143) e que a grande questão consiste em demarcar quais destas hipóteses são ou não científicas. Temos, portanto, uma última questão que merece ser discutida: “seria a constante cosmológica, inserida por Einstein, uma hipótese científica?”

Tomemos uma série de teorias, T_1 , T_2 , T_3 , em que cada subsequente resulta da adição de cláusulas auxiliares à teoria anterior a fim de acomodar alguma anomalia, tendo cada uma pelo menos tanto conteúdo quanto o conteúdo não-refutado de sua predecessora. “Digamos que uma série de teorias nessas condições será teoricamente progressiva se cada nova teoria tiver algum excesso de conteúdo empírico em relação à sua predecessora, isto é, se ela predisser algum fato novo, até então inesperado” (LAKATOS, 1979, p.144).

¹⁷ Na figura 9, o termo « redshifts cosmológicos » se refere às medidas de redshifts de galáxias que apresentam movimentos de afastamento radial em relação ao nosso referencial na Terra.

Por este argumento, apesar da utilização de hipóteses adicionais ser uma ação genericamente legítima na ciência, a inserção da constante cosmológica não trouxe nenhum aumento no conteúdo empírico para o modelo de Einstein, não gerou nenhuma previsão nova. Apenas corroborou a visão de mundo de seu autor, que se mostrou incorreta a partir dos primeiros testes experimentais que surgiram na década seguinte. Por outro lado, tal hipótese assume que, em primeira aproximação, as estrelas se encontrem em repouso. Esta era uma visão consensual entre astrônomos e físicos nas primeiras décadas do século passado. Até mesmo as medições de efeito Doppler em galáxias feitas por Slipher e Hubble sofreram resistência de muitos contemporâneos até o início dos anos 30. Um universo estático lhe pareceu ser a hipótese mais simples e mais natural. A utilização temporária de artifícios desta natureza é, até mesmo para Popper, um recurso legítimo, racional e, portanto, parte da história internalista da ciência:

Temos aí um exemplo de hipótese ad hoc que, com a ampliação do conhecimento perde seu caráter ad hoc. Também temos uma advertência para que não se profiram éditos severos demais contra as hipóteses ad hoc, afinal, elas podem tornar-se testáveis. (Popper, 2010, p. 128)

Também Laudan apresenta comentários importantes sobre a utilização de hipóteses desta natureza como recurso metodológico na investigação da natureza. Sua avaliação é, inclusive, mais branda do que a de Lakatos acerca da inclusão de hipóteses dessa natureza.

A modificação arbitrária de uma teoria para eliminar um caso refutante só está exposta à crítica se levar a uma perda de eficiência na solução de problemas. Só se pode mostrar que isso acontece se o caso for resolvido por alguma teoria na área. Assim, um caso refutante só é tido como uma anomalia quando tiver sido resolvido por uma ou outra teoria (LAUDAN, 2011, p. 168).

Em uma leitura Laudaniana, Einstein se deparou com o problema do colapso do Universo devido à ação da gravidade, um caso refutante de sua visão de Universo e, portanto, utilizou o recurso da adição ad hoc do “termo lambda” em suas equações. Por outro lado, a escolha dele por um Universo estático, nos parece que se lhe apresentou como a interpretação mais natural naquele momento (EINSTEIN, 2007), a fim de evitar problemas conceituais maiores. Dado seu contexto original, a hipótese de Einstein não foi uma grande loucura, serviu para explicar temporariamente uma contradição importante, artifício utilizado vastamente ao longo do desenvolvimento da ciência, apesar de levá-lo a brincar com essa possibilidade “fiz uma coisa no que se refere a gravitação que de algum modo me expõe ao perigo de ser internado num hospital de malucos”. (PAIS, 1982)

REFERÊNCIAS

ALPHER, R. HERMAN, R. Remarks on the Evolution of the Expanding Universe. 1948.

ARTHURY, Luiz H. M. A Cosmologia Moderna à Luz dos Elementos da Epistemologia e Lakatos. 133f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Educação Científica e Tecnológica, UFSC, Florianópolis, 2010.

ARTHURY, Luiz Henrique Martins; PEDUZZI, Luiz O.Q. A cosmologia moderna à luz dos elementos da epistemologia de Lakatos: recepção de um texto para graduandos em física. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo, v. 35, n. 2, p. 1-14, jun. 2013.

BAGDONAS, A. Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da história da cosmologia. 2011. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Programa Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BAGDONAS, A.; ZANETIC, J; GURGEL, I. 2018. O maior erro de Einstein? Debatendo o papel dos erros na ciência através de um jogo didático sobre cosmologia. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 35, n. 1, p. 97-117.

BAGDONAS, A.; ZANETIC, J; GURGEL, I. Quem descobriu a expansão do universo? Disputas de prioridade como forma de ensinar cosmologia com uso da história e filosofia da ciência. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 39. 2017.

Bagdonas, A; Silva Neto. C.P. O papel epistêmico da diversidade e as origens metafísicas da teoria do Big Bang: reflexões para a educação científica. Ciência & Educação, 2023 (no prelo).

BELENKIY, A. 2012. Alexander Friedmann and the origins of modern cosmology, Physics Today.

BONDI. H, GOLD, T. The steady-state theory of the expanding universe. Royal astronomical society (Provided by the NASA Astrophysics Data System). 1948.

CARMELI, M. Cosmological General Relativity. World Scientific Publishing NY Company. 2008

CARROL, B.; OSTLIE. D. 1996. An introduction to modern astrophysics. Addison-Wesley.

COHEN, B; WESTFALL, R. Newton: Textos, antecedentes e comentários. Contraponto. 2002.

DUHEM, P. A Teoria Física. Seu Objeto e Sua Estrutura. EDUERJ. 2014

Einstein, A. (1917). Considerações cosmológicas sobre a teoria da relatividade geral. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzungsberichte der Königlich preussischen Akademie der Wissenschaften, 142-152.

_____. Teoria Da Relatividade Geral e Especial. Editora Contraponto. Rio de Janeiro. 2007.

FRIEDMAN, A. On the Curvature of Space. General Relativity and Gravitation, Vol. 31, No. 12, 1999. (Originally published in Zeitschrift fur Physik 10, 377-386 (1922), with the title *Über die Krümmung des Raumes*). Both papers are printed with the kind permission of Springer-Verlag GmbH & Co. KG, the current copyright owner, and

translated by G. F. R. Ellis and H. van Elst, Department of Mathematics and Applied Mathematics, University of Cape Town, Rondebosch 7701, South Africa. Some obvious typos have been corrected in this translation.

GAMOW, G. Expanding Universe and the origin of elements. *Physical Review*. 1946.

HACKING, I. Representar e Intervir: tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural. EDUERJ. 2012.

HARRISON, E. R. *Cosmology: The Science of the Universe*. Cambridge University Press. Cambridge. 1981.

HUBBLE, E; HUMASON, M. 1931. The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae. *Astrophysical Journal*.

HOYLE, F. A new model for the expanding universe. Royal astronomical society (Provided by the NASA Astrophysics Data System). 1948.

KRAGH, H. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press, 1996.

KRAGH, H. *Cosmology and the Origin of the Universe: Historical and Conceptual Perspectives*. Cornell University Library. 2017. This paper is an English version of a chapter to be published later in 2017 in a book in Spanish, titled *Orígenes* and edited by Ángel Díaz de Rada at the Open University in Spain (UNED).

LACEY, Hugh. *Valores e atividade científica 1*, Editora 34/Associação Filosófica Scientiæ Studia/Parque CienTec, 2008.

LAKATOS, I; MUSGRAVE, A. *A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*. 1965, Cambridge University Press. Traduzido por Cajado, O. M e Mariconda, P.R; Universidade de São Paulo e editora Cultrix, 1979.

LAUDAN, Larry. *O progresso e seus problemas: Rumo a uma teoria do crescimento científico*. Trad. por Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora Unesp, 2011.

LIMA, J. A. S, R. C. SANTOS. R. C. 100 Anos da Cosmologia Relativística (1917-2017). Parte I: Das Origens à Descoberta da Expansão Universal (1929). *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 2017.

LEMAÎTRE, G. A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulæ, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 91, Issue 5, March 1931, Pages 483–490, <https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>

MERRITT, D. *Cosmology and Convention*. *Studies in History and Philosophy of Science Part B, Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 57, February 2017, p. 41-52. 2017

NUSSENZVEIG. H. *Moisés*, Curso de Física Básica – Ótica, Relatividade, Física Quântica, Vol. 4, Ed. Edgard Blücher, 2a ed. 2002.

- OLIVEIRA, K. S. F.; SARAIVA, M. F. 2010. *Astronomia e Astrofísica*. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade.
- PAIS, A. *Sútil é o Senhor - Vida e Pensamento de Albert Einstein*, trad. de F. Parente e V. Esteves (Gradiva, Lisboa). 1982.
- PONTY, J. M. *Cosmologia del Siglo XX*. Gredos. 1971.
- PONTY, J. M; MORANDO, B. *The rebirth of Cosmology*. Editora Knopf. New York. 1976.
- POPPER, K. *Textos escolhidos*. Contraponto. 2010.
- RYDEN, B. *Introduction to Cosmology*, Cambridge University Press, 2016.
- SLIPHER, V. *Nebulae*. NASA Astrophysics Data System, 1917.
- SOARES, D. O universo estático de Einstein. *Rev. Bras. Ensino Fís.* 2012, vol.34, n.1.
- THORNTON, S. T; MARION, J, B. *Classical dynamics of particles and systems*. Harcourt Brace Jovanovich, 1988.

CAPÍTULO 4: O ESTABELECIMENTO DA HEURÍSTICA POSITIVA

4.1 - As Hipóteses Auxiliares E A Formação De Uma Série De Teorias

Nos dois capítulos anteriores nos concentramos em identificar e justificar a formação do núcleo do programa de pesquisa de Friedman-Lemaitre. Tal reconhecimento não pode ser feito analisando apenas os trabalhos de seus proponentes, mas também a inserção de suas hipóteses fundamentais nos desenvolvimentos posteriores da atividade científica, neste caso, a cosmologia. Nos voltaremos, ao longo do presente capítulo, para a reconstrução da heurística positiva deste programa, composta principalmente pela disputa entre a teoria do Big-Bang e a teoria do Estado Estacionário. Em uma estruturação filosófica desta descrição podemos afirmar que a distinção entre os trabalhos de Friedman, de Lemaitre e as teorias citadas acima está na inclusão de hipóteses adicionais. As hipóteses adicionais partem do núcleo e levam à concepção da série de teorias contida na heurística positiva. As distinções existentes entre tais teorias também se dá pela adoção ou não de hipóteses da mesma natureza, que servirão de base para a análise do conteúdo empírico de cada uma dentre tais teorias descritas na epistemologia Lakatosiana.

O progresso mede-se pelo grau em que uma transferência de problemas é progressiva, pelo grau em que a série de teorias nos conduz à descoberta de fatos novos. Consideramos falseada uma teoria da série quando ela é suplantada por uma teoria com um conteúdo corroborado mais elevado. (LAKATOS, 1979, p. 145)

Uma vez estabelecido e reconhecido o núcleo de um programa, obtemos também a primeira teoria desta série descrita por Lakatos, que se configura, portanto, pela teoria de Lemaitre, que descreve um universo em expansão a partir do termo cunhado como “átomo primordial”: um estágio que não pode ser confundido com singularidade ou explosão inicial. Lemaitre descreve, apenas, um estágio em que o universo esteve extremamente reduzido em volume, análogo a um volume atômico, deixando em aberto a discussão sobre estágios anteriores em suas dimensões e sobre sua suposta eternidade temporal. Diferentes hipóteses auxiliares distinguem a teoria de Lemaitre das duas sucessoras, mostraremos abaixo a principal de cada uma delas, que serão identificadas por H_{BB} (hipótese auxiliar contida na teoria do Big-Bang) e H_{EE} (hipótese auxiliar contida na teoria do Estado Estacionário). Na teoria do Big-Bang podemos enunciar:

H_{BB} : o universo possui um início e está em evolução temporal.

A teoria do Estado Estacionário também apresenta suas hipóteses auxiliares, sem entrar em contradição com os pressupostos do núcleo do programa, mas que ele se somam, diferenciando-a dos outros modelos, anteriores e posteriores. Suas principais hipóteses auxiliares podem ser assim expressas.

H_{EE}: o universo é infinito, espacialmente e temporalmente, sua densidade em larga escala permanece constante

Um olhar superficial para a dinâmica da atividade científica podem não perceber a dificuldade, ou até mesmo impossibilidade, da realização de testes e verificações empíricas das hipóteses auxiliares isoladamente. A realização de testes empíricos pressupõe a imutabilidade de uma série de variáveis, teóricas e experimentais, o que nem sempre se verifica na prática. Esse pressuposto é alertado nos trabalhos do filósofo alemão Carl Hempel.

Quando a maneira particular de testar uma hipótese H pressupõe uma série de enunciados auxiliares A_1, A_2, \dots, A_N – i.e., quando estes são usados como premissas adicionais ao se derivar de H a implicação relevante I – então, como se viu antes, um resultado negativo, mostrando que I é falsa, diz apenas que H ou uma das hipóteses auxiliares deve ser falsa e que algo deve ser mudado nesse conjunto de sentenças para que ele se ajuste ao resultado de verificação, quer modificando ou abandonando completamente H, quer abandonando o sistema de hipóteses auxiliares (HEMPEL, 1981, p.43)

A descrição de Hempel ilustra com bastante propriedade o desenvolvimento da cosmologia na segunda metade do século XX, em que hipóteses auxiliares foram, em maior ou menor intensidade, inseridas e abandonadas nas diferentes versões das duas principais teorias cosmológicas, tornando possível identificar o que permaneceu comum a ambas, caracterizando o núcleo. O autor também pode ser inserido em uma vasta tradição de filósofos que rechaçam a forma decisiva dos chamados “experimentos cruciais”. São muitas as críticas à narrativa de que na ciência existam testes experimentais decisivos (Rodrigues, 2021; Chiappin & LEISTER, 2015; Hacking, 2012) mas damos destaque à crítica de Hempel pois, em particular, ela denuncia a forma como os testes empíricos são, por vezes, superestimados. Experimentos que, supostamente, foram capazes de falsear uma teoria, apenas colocam em relevo a falsidade de um conjunto, composto pela teoria e por uma série de hipóteses auxiliares, que podem versar sobre comportamentos da natureza ou de equipamentos utilizados durante a realização do experimento.

O resultado do experimento de Foulcault só nos habilita a inferir que nem todas as suposições básicas ou princípios da teoria corpuscular podem ser verdadeiros – que pelo menos um deles deve ser falso. Mas não sabemos qual deles deve ser rejeitado. O que sabemos é que a concepção corpuscular da luz não pode ser mantida sem uma modificação da sua forma, sem introdução de um outro conjunto de leis básicas. (HEMPEL, 1981, p.41)

4.2 - A TEORIA DE LEMAITRE

Ao longo do capítulo anterior destacamos como o trabalho de Friedman apresenta maior ênfase em soluções matemáticas possíveis, com base na relatividade geral de Einstein, para a evolução do universo: expansionista, oscilante, estático ou em

contração. Hubble obtém uma importante relação empírica, sem apresentar uma proposta ou modelo teórico que a incorpore, ressalta em seu trabalho que não pretende discutir as possíveis implicações cosmológicas de sua lei. Lemaitre, por outro lado, apresenta um modelo para a evolução do universo a partir do estado que foi por ele classificado de “átomo primordial”, essa metáfora serviria para descrever um instante no passado em que todo o universo ocuparia um volume extremamente reduzido.

Portanto, o trabalho de Lemaitre é inserido tanto no núcleo como na heurística positiva, pois se configura como uma importante teoria que será sucedida por, pelo menos, duas outras, ainda dentro do mesmo programa. O diagrama apresentado abaixo ilustra uma importante distinção entre os modelos de Einstein, estático e instável, e de Lemaitre, em expansão a partir de um “átomo primordial”, como é descrito em seus artigos. Não encontramos em seus artigos uma abordagem ou, sequer, hipóteses sobre explosão inicial ou singularidade. No modelo de Lemaitre é possível especular que o universo tenha permanecido indefinidamente no passado em dimensões extremamente reduzidas espacialmente.

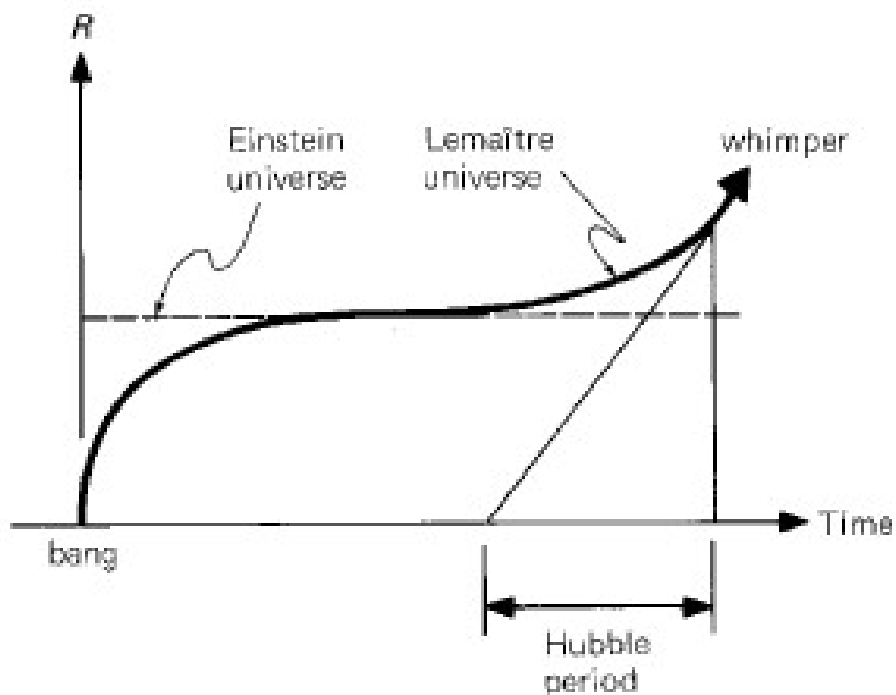


Figura 30: modelo de Lemaitre para a evolução do Universo

Muitos modelos cosmológicos serão, a partir da década de 30, formulados como resposta à proposta de Lemaitre. A história deste período é marcada por algumas importantes colaborações e um verdadeiro esforço de convencimento da comunidade científica internacional. Não se caracteriza no que Lakatos classifica como uma disputa entre programas de pesquisa rivais, por ser nítido o compromisso de tais modelos com um núcleo em comum, mas uma série de teorias.

4.3 - A TEORIA DO BIG-BANG

Na década de 30 havia duas importantes questões que norteavam a pesquisa em astrofísica e em Física nuclear: a fonte das energias estelares e a formação dos elementos químicos na natureza. Neste contexto destacamos inicialmente o físico ucraniano naturalizado norte-americano George Gamow e sua participação no crescimento da cosmologia enquanto área de pesquisa para físicos e astrônomos, o que quase não existia nesta década. A conferência intitulada “The physics of the Universe and the nature of Primordial particles” ocorrida na Universidade de Notre Dame em Washington, no ano de 1938, foi um dos primeiros congressos científicos onde cosmologia foi um dos seus temas principais. Contou com cerca de 100 participantes, dentre eles Gamow, que formulou uma explicação alternativa à captura de neutros para explicar a formação dos elementos químicos.

Algumas contribuições, como a pesquisa desenvolvida por Weizsacker, sugeriam que os elementos mais pesados não se formaram no interior das estrelas, mas no universo primordial. Em 1939 Gamow escreve um livro popular descrevendo a hipótese de Weizsacker. Isso certamente contribuiu para aumentar o interesse de astrofísicos pela emergente cosmologia, sobre o modelo do Big Bang, não há um momento específico em que esta hipótese surge, mas parte dos primeiros modelos que visaram explicar a formação dos elementos químicos no Universo primordial.

Pelo menos entre os físicos nucleares, a hipótese do Big Bang ganha força após o encontro de Washington por abrir caminho para uma possível explicação para a formação dos elementos mais pesados. Em 1946 Gamow publica um artigo na *Physical Review* intitulado “Expanding Universe and the origin of elements” que, para os mais entusiasmados, é considerado como a “fundação” da moderna cosmologia. Neste breve artigo de apenas três páginas o autor faz uma importante conexão entre a embrionária cosmologia e o já bastante fértil campo de pesquisa em Física Nuclear, efervescente neste período imediatamente posterior à segunda guerra mundial.

As teorias nucleares propostas até aquele momento não se adequavam de forma satisfatória à curva empírica entre a energia de ligação nuclear e os pesos atômicos dos diferentes elementos químicos. A resolução desta dificuldade envolveria, segundo ele, origens cosmológicas para os elementos químicos e não apenas as origens estelares. Esta hipótese de trabalho contribuiu para aumentar o interesse de diversos físicos e químicos pela questão da origem do universo.

Em todas as tentativas publicadas até agora nesta direção, a curva de abundância observada supostamente representa algum estado de equilíbrio determinado por energias de ligação nuclear em algumas temperaturas e densidades muito altas. Este ponto de vista encontra, no entanto, sérias dificuldades na comparação com fatos empíricos. De fato, uma vez que a energia de ligação é, em uma primeira aproximação, uma função linear do peso atômico, qualquer teoria de equilíbrio levaria necessariamente a uma rápida diminuição exponencial da abundância em toda a sequência natural de elementos.

Sabe-se, no entanto, que enquanto uma diminuição tão rápida realmente ocorre para a primeira metade dos elementos químicos, a abundância de núcleos mais pesados permanece quase constante. (GAMOW, 1946, p.1)

Neste trabalho ele busca combinar as equações de Friedman-Lemaitre com física nuclear (mais uma confirmação de que o núcleo do programa envolve os modelos de Friedman e Lemaitre, e não envolve a hipótese de uma explosão primordial) para tentar explicar a formação dos elementos no universo primordial. Uma explicação para a curva de abundância poderia ser fornecida por meio de um processo “desequilibrado” no universo primordial. Em outras palavras, um breve período de rápida expansão explicaria a relação entre os pesos atômicos e a energia de ligação nuclear.

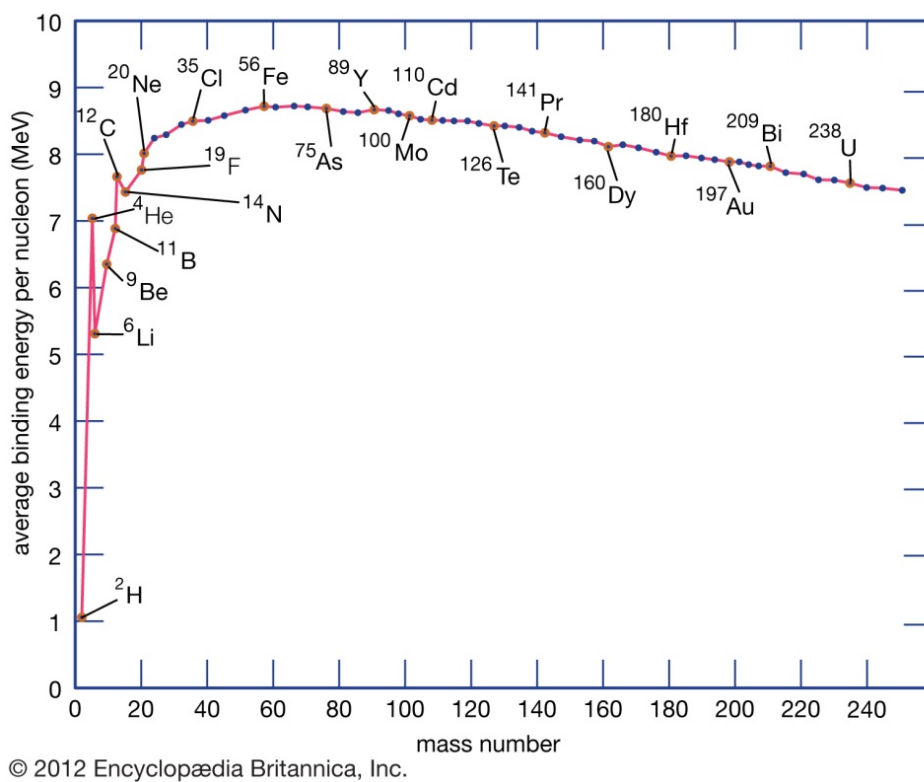


Figura 11: resultado de Gamow, utilizando a hipótese do Big-Bang para explicar a abundância de elementos químicos no universo (GAMOW, 1948)

Gamow mostra que tal processo de expansão inicial é compatível com a relatividade geral. Também percebemos, em seu tratamento, o modelo de um fluido para descrever a expansão do universo. Por esse motivo caracterizamos seu trabalho no interior da heurística positiva do programa de Friedman e Lemaitre. Gamow obtém a partir da literatura existente nos desenvolvimentos da relatividade, uma expressão análoga à equação clássica da velocidade de uma esfera de poeira em rotação.

$$v = \left(2 \cdot \frac{4\pi l^2}{3} \rho \cdot \frac{G}{l} - 2E \right)^{1/2}$$

O análogo relativístico desta expressão é interpretado por Gamow como a descrição matemática do universo em expansão, dada pela expressão abaixo.

$$\frac{dl}{dt} = \left(\frac{8\pi G}{3} \rho l^2 - \frac{G^2}{R^2} \right)^{1/2}$$

Essa é a descrição relativística para a dependência temporal de qualquer grandeza linear (TOLMAN, 1934). Podemos observar que a velocidade de expansão da esfera (universo) é regida por dois termos. No universo primitivo, com altíssima densidade e baixa velocidade o primeiro termo assumiria um papel de maior influência, determinando uma fase de desaceleração. A inversão de movimento, do retardado ao acelerado, ocorreria no instante em que os termos se tornaram iguais, seguido posteriormente pela aceleração, iniciada após o domínio do segundo termo da expressão. (Gamow, 1946).

A conclusão deste trabalho consiste na existência de um breve intervalo de tempo (menos de uma hora) em que a densidade material do universo atingiu o valor de 10^5 g/cm^3 , condição necessária para a formação de elementos químicos. Longe de resolver o problema da curva de abundância, como reforçado pelo autor no final do texto, este resultado abre caminho para futuros trabalhos que possam explicar a formação dos diferentes átomos no universo.

Neste mesmo ano ele começa a orientar o estudante de PhD Ralph Alpher. A dissertação de Alpher, concluída em 1948, gera um inusitado interesse da mídia e do público em geral por um trabalho acadêmico. Grande parte desta cobertura midiática se deu pelo tema da formação dos elementos químicos abrir a possibilidade de discussões religiosas e metafísicas sobre as origens do Universo (KRAGH, 1996, p. 111) mesmo não sendo em nenhum momento o interesse do autor. Um artigo com os principais resultados da pesquisa de Alpher orientada por Gamow foi enviado em 1948 à *Physical Review* gerando um episódio que se tornou bastante folclórico, pois Gamow, que é considerado uma personalidade bastante excêntrica e irreverente pelos historiadores da ciência, inseriu o nome de Hans Bethe como coautor do trabalho apesar do mesmo não ter realizado nenhuma contribuição para o texto, para que as iniciais dos autores, em grego fossem α , β e γ . Por conta desta inusitada declaração de Gamow, o texto ficou conhecido por apresentar a teoria $\alpha\beta\gamma$.

Neste também breve ensaio, o trio de autores se concentra em descrever um possível cenário cosmológico para a formação dos elementos químicos mais pesados. O gás primordial é assumido, dessa vez, como um gás de neutros que, com a expansão e resfriamento do universo, decaí em prótons e elétrons. Este decaimento seria seguido pela captura de neutros, dando origem, primeiramente, ao deutério e posteriormente aos núcleos atômicos mais pesados.

De acordo com esta imagem, devemos imaginar o estágio inicial da matéria como um gás de nêutrons altamente comprimido (fluido nuclear neutro superaquecido) que

começou a decair em prótons e elétrons quando a pressão do gás caiu como resultado da expansão universal. A captura radiativa dos nêutrons ainda remanescentes pelos prótons recém-formados deve ter levado primeiro à formação de núcleos de deutério, e as capturas subsequentes de nêutrons resultaram na construção de núcleos cada vez mais pesados. (ALPHER, 1948, p.1)

O modelo desenvolvido pelo trio apresenta uma curva teórica relativamente similar àquela conhecida empiricamente que descreve a abundância das várias espécies nucleares, que decresce rapidamente para os elementos mais leves (menor número atômicos) e permanece praticamente constante para elementos mais pesados do que a prata.

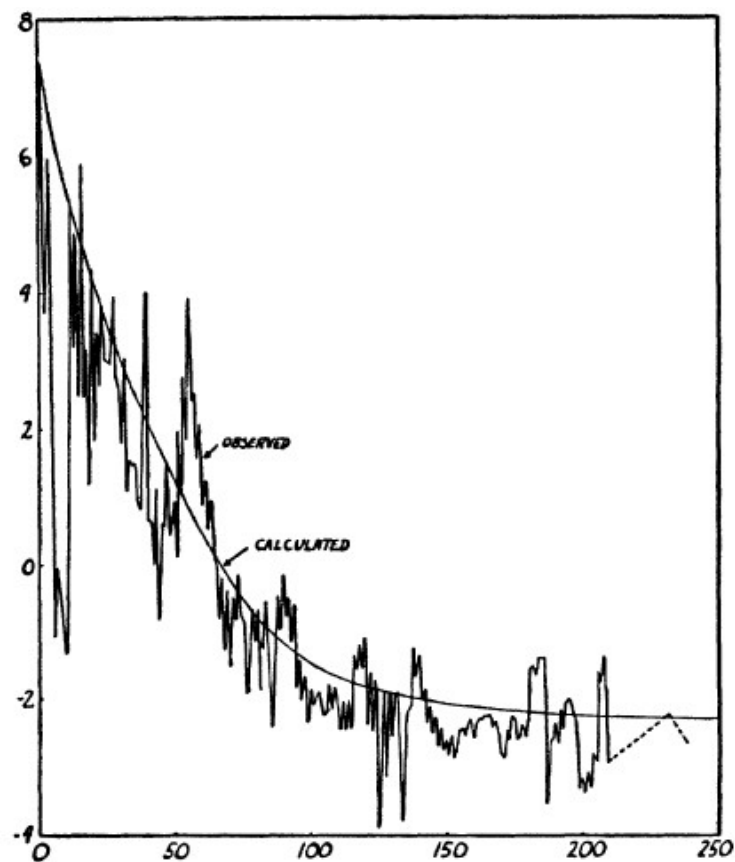


Figura 12: logaritmo da abundância relativa em função dos pesos atômicos

A origem deste gás era uma pergunta além daquilo que o grupo imaginava poder responder. Assumiram que o gás iniciou sua expansão a partir de um colapso, tomado como ponto de partida para seu modelo. Um dos possíveis resultados discutidos obtidos é que a formação dos elementos se iniciou em $t_0 = 20$ segundos após a explosão inicial, instante em que a densidade de matéria cosmológica e sua temperatura encontravam-se no intervalo de valores propícios para a síntese dos primeiros elementos químicos primordiais.

Gamow admite em 1954 que o universo em expansão poderia ser o resultado de uma fase anterior de contração, mas assume o que podemos classificar em filosofia

da ciência como uma decisão metodológica, que devemos deixar de lado essa discussão e tentar explicar toda a física subsequente em termos de um universo que se origina na explosão, ignorando o que possa ter ocorrido anteriormente. (KRAGH, 1996, p. 114)

Alpher foi quem primeiramente passou a chamar este gás primordial de ylem, o que corresponderia a um protouniverso, formado apenas por nêutrons no início e, posteriormente, radiação. Sua densidade tenderia para infinito naquele que seria considerado o instante $t = 0$ s. Em 1948, porém, Gamow e Alpher apresentaram trabalhos defendendo que o universo primordial deveria ser dominado por radiação, e não matéria. Com a evolução do universo como uma esfera quente em expansão, a densidade de radiação diminuiria, enquanto a densidade de matéria aumentaria com o passar do tempo.

Como observou Gamow, segue-se que o domínio da radiação sobre a matéria diminuirá com o tempo e, em certo período, as duas densidades serão iguais. Ele estimou que isso teria ocorrido por volta de $t = 10^9$ anos, quando o universo havia esfriado para cerca de 1000k, e sugeriu que nessas condições as galáxias começariam a se formar. Embora as estimativas numéricas de Gamow estivessem erradas, foi a primeira vez que o significado do tempo de cruzamento ou desacoplamento foi percebido (KRAGH, 1996, p. 116)

Neste período, o modelo de Universo proposto pelo grupo de Gamow recebeu muitos comentários elogiosos, desde cientistas renomados como Einstein que recebeu de Gamow cópias de seus artigos e considerou convincente, especialmente a relação entre abundância dos elementos químicos no Universo e seus pesos atômicos até celebridades cuja atuação não tinha relação direta com a ciência, como o Papa Pio XII, cujos comentários elogiosos sobre o livro de Gamow poderiam gerar mais confusão do que comprovação para o modelo do Big-Bang.

Em artigo enviado à revista Nature em 1948¹⁸, Herman e Alpher fizeram uma série de correções nas estimativas de Gamow: o período de condensação (instante no qual as densidades de matéria e radiação se tornam iguais) foi corrigido para 10^7 anos após o início da expansão e a temperatura do universo neste instante foi calculada em 600 K. Também fizeram a previsão, certamente sem perceberem a importância que isto terá futuramente, de que a temperatura atual do Universo seja em torno de 5 K. Para chegar a este valor, consideraram que durante a expansão, o produto entre as densidades de matéria e radiação permanece constante.

$$\rho_r, 0 \rho_m, 0^{-4/3} = \rho_r \rho_m^{-4/3} \quad (\text{III})$$

¹⁸ O artigo, intitulado “Remarks on the Evolution of the Expanding Universe” aparentemente tinha por objetivo corrigir uma série de erros cometidos por Gamow ao enviar, prematuramente, seu artigo para publicação no mesmo ano.

A densidade de matéria do universo atual já era conhecida, estimada na época em aproximadamente $10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$ enquanto os valores para $\rho_{r,0}$ e $\rho_{m,0}$ podiam ser estimados para atender as condições para ocorrer a nucleossíntese. Obtiveram $10^{-6} \text{ g cm}^{-1}$ e $10^{-30} \text{ g cm}^{-1}$ para, respectivamente, os valores da densidade de matéria e de radiação no início da expansão.

Tudo isso para obter o valor atual para a densidade de radiação, em torno de $10^{-32} \text{ g cm}^{-1}$ e aplicar a lei de Stefan-Boltzmann para determinar a temperatura atual do Universo, da ordem de 5 K. Uma das ressalvas feitas pela equipe é que esta temperatura é devida apenas à expansão, mas este valor poderia ser aumentado pela energia nuclear liberada pelas estrelas. Optaram também por ignorar a geometria do espaço, bem como sua possível singularidade inicial e focar em sua expansão evolutiva térmica. Ao extrair a citação original, podemos verificar que a previsão obtida se trata, de fato, de uma radiação oriunda do chamado “período de desacoplamento” quando, alguns minutos após a explosão original, a expansão do espaço resfriou o gás primordial o suficiente para a radiação não sofrer mais processos de absorção e reemissão pela matéria.

que corresponde a uma temperatura agora da ordem de 5K. Esta temperatura média para o universo deve ser interpretada como a temperatura de fundo que resultaria apenas da expansão universal. No entanto, a energia térmica resultante da produção de energia nuclear nas estrelas aumentaria esse valor. (ALPHER E HERMAN, 1948, pág. 5)

Algumas aproximações importantes são tomadas neste modelo: o gás é tratado como adiabático durante a expansão além de ser assumido como um fluido perfeito condicionado ao princípio da conservação da matéria (ao contrário do modelo de Hoyle e seus colaboradores). Com isso assumem que a radiação resultante de tal expansão seja característica de um corpo negro ideal.

Em um artigo de 1953, Alpher e Herman, em colaboração com James Follin, incorporam novas possíveis reações no ylem inicial, chegando ao clímax do modelo $\alpha\beta\gamma$, considerando que no gás primordial ocorreram outras reações além do decaimento de nêutrons (conferir ALPHER, 1953). Nesta versão do modelo, o gás primordial era composto também por prótons, neutrinos, elétrons e múons. O modelo do grupo de Gamow explicava de forma bem sucedida a proporção observada dos elementos mais leves no universo: hidrogênio e hélio, mas falhava em fornecer um mecanismo de explicação para a formação de elementos com 5 núcleons (o hélio possui 4 núcleons) devido à sua alta instabilidade. Este problema permaneceu temporariamente sem solução. Alpher, Herman, Follin e Gamow acreditavam que esta dificuldade não estava além do poder preditivo do programa de pesquisa, mas que, por meio de cálculos mais detalhados, poderia ser resolvido no futuro.

Existem estimativas da temperatura do “espaço” muito anteriores às realizadas por Gamow e seus colaboradores. Poderíamos citar o trabalho de Guillaume de 1896 ou a estimativa de Eddington, de 1926. Certamente a concepção cosmológica destes autores era bem distinta da atual, pois são anteriores ao amadurecimento da astronomia extragaláctica e não associaram o termo “temperatura do espaço” a uma radiação residual de uma explosão inicial.

Eddington e Guillaume estavam discutindo a temperatura do espaço interestelar devida as estrelas pertencentes a nossa própria galáxia, eles não estavam se referindo ao espaço intergaláctico. Devemos nos lembrar que Hubble somente estabeleceu com certeza a existência de galáxias externas a Via Láctea em 1924 (ASSIS, p.5)

Os autores também citam as previsões de Regener, Nernst, Herzberg, Finlay-Freundlich e Max Born. O grupo de Gamow que, ao contrário destas previsões, buscou encontrar uma confirmação da hipótese do Big Bang, realizou entre os anos de 1948 e 1956 sete estimativas da temperatura desta radiação resultante da explosão inicial. (KRAGH, 1996, p. 133) Por diversos motivos as previsões sobre tal radiação geraram inicialmente pouquíssimo interesse nos astrônomos para tentar detectá-la. Seja pela distorção entre seus resultados (uma variação de quase 50 k entre a mínima e a máxima estimativa feita pelo grupo de Gamow) ou por aparentemente ter se tratado um assunto de física nuclear, ao invés de astronomia e, até mesmo, pelo tema ter aparentado ser de interesse apenas teórico, uma vez que, além das limitações da astronomia observacional, nenhum destes autores sugeriu métodos para uma eventual detecção.

O que se observou por uma década foi uma grande falta de interesse por continuar as pesquisas em cosmologia. Os físicos nucleares, em sua maioria, não estavam preocupados diretamente com o problema da origem da possível expansão cósmica, mas com a formação dos elementos químicos e os processos estelares se mostravam mais promissores do que os cosmológicos. Havia o problema do “buraco” na explicação da origem dos elementos com 5 nucleóons, aliado às previsões divergentes sobre a radiação cósmica de fundo e à falta de perspectiva em medi-la diretamente estão entre as causas deste esvaziamento. Gamow, após se transferir para a Universidade do Colorado em 1956, não ofereceu maior contribuição nesta área. Alpher e Herman trocaram a carreira de pesquisadores por empregos na indústria privada e, inevitavelmente, reduziram seus trabalhos em cosmologia.

4.4 - O MODELO DO ESTADO ESTACIONÁRIO

A principal alternativa ao modelo do Big-Bang foi sendo formulada e desenvolvida a partir da década de 40. Podemos afirmar que sua elaboração foi consequência de pesquisadores que aceitavam, do ponto de vista teórico, um universo

em expansão, mas não estavam dispostos a aceitar seu início em um determinado instante no passado. As diferentes formulações deste modelo assumem como premissa básica que o Universo, em larga escala, permanece constante ao longo do tempo e em todas as direções. Mas como conciliar esta homogeneidade com o contínuo afastamento entre as galáxias previsto pela lei de Hubble?

Uma das principais hipóteses do modelo que ficou conhecido como Estado Estacionário consiste em assumir que matéria é constantemente criada, a fim de manter constante a sua densidade no Universo em larga escala. Seus antecedentes podem ser resgatados desde o início do século XX, onde Macmillan, já em 1918 defendia a homogeneidade e isotropia do Universo e o famoso químico Arrhenius negava qualquer início ou fim do Universo. Neste período também temos as contribuições de Nernst, quem formula o princípio da condição estacionária do cosmos, segundo o qual o consumo da matéria estelar por meio dos processos radioativos poderia ser equilibrado pela contínua formação de nova matéria. A grande dificuldade desse modelo cosmológico que começava a emergir estava no fato de que a contínua formação de matéria violaria uma das mais bem estabelecidas leis da Física clássica: a segunda lei da Termodinâmica.

O modelo do estado estacionário será formulado, em duas versões, por um trio de cientistas de Cambridge, a partir de 1947. Os três cientistas se conheceram durante a segunda guerra mundial, enquanto trabalhavam na marinha britânica com o desenvolvimento de novos sistemas de radares. Fred Hoyle já possuía vários trabalhos em astronomia publicados, que iam desde formação dos discos de acreção estelares a formação de elementos químicos pesados no interior das estrelas. Em cosmologia, porém, os três eram considerados “intrusos”, pois não possuíam até 1947 qualquer trabalho nesta área (conferir Kragh, 1996, p.170).

Um dos principais pressupostos conceituais da teoria é o Princípio Cosmológico Perfeito, desenvolvido por Hermann Bondi e Thomas Gold, os outros membros do trio citado no parágrafo acima. Todavia, suas raízes são mais antigas. Podemos regredir ao chamado “Princípio da localidade” ou princípio de Copérnico. Trata-se da crença, muito bem fundamentada, de que não ocupamos algum lugar privilegiado no Universo. A primeira versão deste princípio é atribuída a Milne em um trabalho de 1933. O princípio cosmológico formulado por Milne enuncia que o universo contém a mesma densidade de estrelas, não importa para qual direção olhemos e está associado à necessidade da reprodutibilidade das leis físicas, encontramos em sua argumentação elementos teológicos e religiosos. Rejeita a hipótese de um universo finito, formulada por Einstein, dada “a onipotência e majestade de seu criador” (HARRISON, 1981, p. 217).

A diferença entre o Princípio Cosmológico e o Princípio Cosmológico Perfeito, formulado por Bondi e Gold em 1948 é o acréscimo de que o universo não seja apenas

homogêneo e isotrópico, mas também permaneça o mesmo com o passar do tempo. A exposição do tema, feita pela dupla neste ano, foi apresentada num artigo intitulado “The steady-state theory of the expanding universe”, sobre o qual nos deteremos brevemente, pois consideramos ponto de partida da teoria, ainda sem alguns de seus importantes componentes.

Logo nas páginas iniciais do texto, a dupla utiliza a necessidade da repetibilidade dos experimentos científicos como legitimação da formulação do Princípio Cosmológico Perfeito. Os autores não ambicionam demonstrar tal princípio, o que não seria possível, mas corroborá-lo, tanto por argumentos metodológicos quanto por observações empíricas.

Essa combinação do princípio cosmológico usual e do postulado estacionário chamaremos de princípio cosmológico perfeito, e todos os nossos argumentos serão baseados nele. Postula-se que o universo seja homogêneo e estacionário em sua aparência em grande escala, bem como em suas leis físicas. Não afirmamos que esse princípio deva ser verdadeiro, mas dizemos que, se não for válido, a escolha da variabilidade das leis físicas torna-se tão ampla que a cosmologia não é mais uma ciência. (Bondi & Gold, 1948, p. 2)

Posteriormente, Bondi e Gold fazem o que acreditamos ser a defesa de uma das afirmações mais categóricas deste trabalho: algumas hipóteses adicionais são feitas no sentido de não colocar seu trabalho em conflito com a lei de Hubble. Curioso é, como mostramos no capítulo precedente, que Hubble não defende explicitamente que tenha medido velocidades de recessão das nebulosas, mas isso é assumido pela dupla, conforme a citação apresentada abaixo.

Para que o princípio cosmológico perfeito se aplique, pode-se esperar à primeira vista que o universo tenha que ser estático, i. e. não possuir nenhum movimento consistente em grande escala. Isso, no entanto, entraria em conflito com as observações de galáxias distantes e também com o estado termodinâmico que observamos. (BONDI, GOLD, pág. 10).

Nesta citação acima os dois autores não se mostram interessados a entrar em conflito com as “observações das galáxias distantes”. Mais à frente o artigo deixa ainda mais claro que tais observações são aquelas obtidas pelo artigo de Hubble e Humason em 1931: “um novo cálculo foi realizado, dando resultados em boa concordância com (embora um pouco abaixo) os resultados de Hubble” (BONDI, GOLD, 1948, pág. 10).

Dada a citação acima, podemos observar elementos de um núcleo irrefutável com o qual os construtores da teoria buscam harmonizar-se. Nesta formulação, ainda incompleta, da teoria do estado estacionário, a teoria geral da relatividade ainda não faz parte de seu núcleo, mas já antecipamos que o fará após a intervenção de Fred Hoyle. Neste artigo a dupla deixa claro que a teoria não pode conciliar-se com o princípio da conservação da massa, assumido pela relatividade em sua formulação de 1915. Buscam concordância apenas com a cinemática relativística, formulada por Einstein em 1905. Evidentemente que um modelo de universo infinito, em que o constante movimento das nebulosas é compensado pela criação espontânea de matéria, não há lugar para um princípio de conservação de massa.

O aparato matemático que podemos usar é estritamente limitado, uma vez que as equações de campo da teoria geral da relatividade, com sua insistência na conservação da massa, claramente não são aceitáveis para nós. De fato, devemos confiar amplamente em argumentos cinemáticos e nos resultados geralmente aceitos da física de laboratório que lida com a propagação da luz (teoria especial da relatividade). (BONDI, GOLD 1948, p.8)

Adiantamos que este será um dos pontos de menor aceitação por parte da comunidade científica internacional, os autores ainda reforçam que tal princípio não pode ser verificado empiricamente no universo em larga escala e apresentam a taxa de criação de matéria “*ex nihilo*” necessária para manter o Princípio Cosmológico Perfeito.

É claro que um universo em expansão só pode ser estacionário se a matéria for continuamente criada dentro dele. A taxa necessária de criação, que decorre simplesmente da densidade média e da taxa de expansão, pode ser estimada como no máximo uma partícula de massa de próton por litro a cada 10^9 anos. Ao interpretar o universo como estacionário, temos de assumir que tal processo de criação é operacional; temos que infringir o princípio da continuidade hidrodinâmica. Mas este princípio não é passível de verificação experimental com tal precisão, e esta violação não constitui uma contradição com a evidência observacional. ((BONDI, GOLD 1948, p.5)

Não podemos deixar de ressaltar que já nesta formulação embrionária, a proposta de Bondi e Gold apresenta alguns elementos bastante promissores. Dentre os quais, a questão da escala de tempo era um problema com o qual qualquer teoria cosmológica tinha que dialogar neste período (conferir apêndice). As primeiras medidas da idade do Universo foram problemáticas, pois a idade da Terra estava bem estabelecida, graças a trabalhos geológicos e estudos sobre decaimentos radioativos. Evidentemente não fazia sentido um Universo com idade menor que a do nosso planeta, mas foi o que apontaram os primeiros resultados advindos de modelos expansionistas. A proposta da dupla, por outro lado, não entrava em conflito com os resultados da idade da Terra, pois assumia que o universo seja infinito espacialmente, apesar das galáxias possuírem componentes radiais de velocidade, tal como interpretaram os resultados de Hubble somados à métrica de DeSitter. No modelo do Estado Estacionário, as galáxias possuem idades variadas, dispersas em um universo eterno.

4.5 - A inserção de Fred Hoyle

A primeira versão do estado estacionário aparece em um artigo publicado apenas por Hoyle, mas repleto de agradecimento aos outros dois proponentes. Os três possuíam certo ceticismo com relação à cosmologia relativística e isto será uma diferenciação entre as versões de Hoyle e dos outros dois autores. Neste artigo ele defende que a contínua criação cósmica de matéria mantém constante a densidade do Universo. Esta criação de matéria, porém, violaria o princípio da conservação de energia. Seria necessário, portanto, rever a definição deste princípio. O artigo de Hoyle

não possuía tampouco qualquer argumento de natureza empírica. Na versão de Gold e Bondi este princípio seria simplesmente violado em escala cósmica, sem maiores dificuldades. (HOYLE, 1948)

A heurística apresentada no artigo de Hoyle retoma o tratamento do universo enquanto um fluido clássico perfeito e, em suas páginas iniciais, utiliza-se do análogo Newtoniano, desenvolvido por Milne e McCrea, reconhecidos por ele.

$$\begin{aligned}\partial\rho/\partial t + \operatorname{div}(\rho\mathbf{v}) &= 0, \\ \partial\mathbf{v}/\partial t + \frac{1}{2}\operatorname{grad}v^2 &= \mathbf{G}.\end{aligned}$$

Ao contrário de Gold e Bondi, a proposta de Hoyle se mostra mais claramente inserida em uma tradição de trabalhos que parte de Einstein, DeSitter, passa por Friedman e Lemaitre, todos são citados e discutidos no início de seu artigo. Sua proposta é oferecer uma contribuição às dificuldades ainda encontradas em seus respectivos trabalhos e obter uma formulação que as elimine, ou pelo menos minimize¹⁹.

O objetivo do presente trabalho é superar as dificuldades descritas acima. Usando a criação contínua da matéria, tentaremos obter, dentro da estrutura da teoria geral da relatividade, mas sem introduzir uma constante cósmica, um universo que satisfaça o princípio cosmológico, que mostra as propriedades de expansão necessárias e no qual as condensações localizadas estão continuamente sendo formado. (HOYLE, 1948, p. 3)

O Princípio Cosmológico Perfeito, como descrito anteriormente, é tomado por hipótese pela dupla como condição para a validade da repetibilidade dos experimentos físicos, que abre mão da validade da relatividade geral para o universo em larga escala. Já Hoyle o obtém como resultado das equações da hidrodinâmica combinadas com a lei de Hubble para a velocidade de afastamento das nebulosas.

Outra diferença importante é que Hoyle, em sua formulação, busca adaptar as equações e tensores da relatividade geral para acomodar o processo de criação de matéria. Ele diverge das equações de Einstein no ponto em que insere um tensor particularmente responsável pela criação de matéria.

$$C_{\mu} = 3c/a(\mathbf{1}, 0, 0, 0).$$

$$C_{\mu\nu} = \partial C_{\mu}/\partial x^{\nu} - \{\mu\nu, \alpha\}C_{\alpha}.$$

$$C_{ij} = -3RR'\delta_{ij}/ac; \quad i, j = 1, 2, 3.$$

¹⁹ Esse é o texto que mais claramente nomeia o núcleo do programa de pesquisa e insere o trabalho de seu autor em uma série de trabalhos oriundos o mesmo núcleo. Evidentemente essa nomenclatura pertence a Lakatos e não é citada por Hoyle.

Introduzindo o tensor $C_{\mu\nu}$ na equação de campo de Einstein, ela assume a seguinte forma:

$$G_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}G + C_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu},$$

Onde $\kappa = 8\pi G/c^4$ e $T_{\mu\nu}$ é o tensor energia material. Tomando como nulas a energia cinética e a pressão hidrostática, seu único termo não nulo é T_{00} .

$$T_{00} = \rho c^4$$

Com esse termo na equação ele obtém um modelo de universo análogo ao de DeSitter (expansão), mas com uma densidade de matéria ρ não nula. “O modelo atual tem um futuro infinito e um passado infinito, e na aproximação em que os efeitos das condensações locais são negligenciados, o princípio cosmológico perfeito é satisfeito”. Classificamos a teoria elaborada por Hoyle dentro do mesmo programa de pesquisa de Friedman-Lemaitre, com uma única adaptação das equações da Relatividade Geral, um termo adicional, que não as descaracteriza. Já Gold e Bondi, apesar de não serem contrários à relatividade geral, eram contrários ao seu uso irrestrito para tratar do Universo em larga escala. Defenderam que somente em um Universo imutável as leis da Física permanecem constantes com o passar do tempo. Gold e Bondi utilizaram o princípio de Mach para defender que, se as leis da Física permanecem constantes com o passar do tempo, o universo é necessariamente imutável. Combinando este postulado com o princípio cosmológico restrito, ambos chegaram no “princípio cosmológico perfeito”, apesar de Bondi achar, num primeiro momento, este nome demasiadamente presunçoso.

Eles concluíram, portanto, que o princípio cosmológico perfeito produz um universo estacionário e em expansão. Tal solução só é possível se a matéria for continuamente criada. A criação da matéria foi assim introduzida por Bondi e Gold como consequência do princípio cosmológico perfeito (Kragh, 1996, p. 183).

4.6 - A repercussão da teoria do Estado Estacionário na comunidade internacional

Por mais estranho que possa parecer esta hipótese de contínua criação de matéria, a quantidade necessária para estabilizar a densidade de matéria cosmológica, apesar da lei de Hubble, seria de apenas três novos átomos de hidrogênio por metro cúbico a cada milhão de anos. Porém, nenhuma das duas versões buscou explicar a natureza desta nova matéria. A grande semelhança e a crescente oposição a ambas as formulações levaram os três autores a unificar as duas versões do modelo.

Já em 1948 Hoyle resumirá a principal distinção entre as duas formulações: enquanto na sua versão o princípio cosmológico perfeito é introduzido como uma consequência de sua matemática, na versão de Gold e Bondi este princípio é imposto

por uma questão de estética. Na primavera de 1949 Hoyle teve a oportunidade de divulgar seu modelo para grande parte da comunidade astronômica internacional. Foi convidado para uma série de participações no programa de rádio British Broadcasting Corporation²⁰ e a exposição de seu modelo cosmológico acabou se transformando em um livrinho intitulado “The Nature of the Universe”. A reação ao livro de Hoyle foi, de forma geral, bastante crítica. Muitos acusaram seu modelo de ser dogmático, tanto quanto o modelo de Gamow. Herbert Ding faz uma das mais contundentes críticas a Hoyle, seguida por muitos outros astrônomos, como Thomson e Edmondson.

Para Dingle, a teoria do estado estacionário era questionável porque se baseava em um princípio universal, mas o mesmo acontecia com a cosmologia do Big-Bang e também com o sistema cosmológico de Milne. Dingle não achou as últimas teorias mais científicas do que sua nova rival. Se o processo de criação cosmológica foi concebido para ocorrer continuamente ou em um momento no passado, ainda era um deus “*ex machina*” estranho à ciência (Kragh, 1996, p.193).

Claramente a crítica ao modelo do estado estacionário por parte da comunidade astronômica decepcionou seus proponentes. Durante a década de 50 a cosmologia ainda era considerada uma ciência imatura e, durante esta década, as duas teorias sofreram poucas modificações. Na teoria do estado estacionário o processo de contínua criação de matéria se mostrou um mecanismo muito obscuro e, aparentemente, irreconciliável com a relatividade geral. Para responder esta dificuldade, Bondi desenvolve a hipótese de que o universo inicial não seja exatamente neutro eletricamente.

Em seu trabalho de 1959, com a colaboração de Lyttleton, reescreve as equações de Maxwell para acomodar pequenas violações na lei da conservação da carga elétrica. Conseguiram, até mesmo, explicar a lei de Hubble em termos meramente eletromagnéticos. Por fim, determinaram a expressão da densidade média do Universo e da taxa de criação de matéria cosmológica. Esse “Universo elétrico”, porém, ainda não justificava um modelo cosmológico em particular, o que era objetivo principal dos autores. Essa hipótese do “universo elétrico” não sobreviveu a testes experimentais, como o realizado pelos britânicos Anthony Hillas e Thomas Cranshaw em que mediram a carga do átomo de argônio em 12×10^{-20} e $(1,6 \times 10^{-19})$ coulombs, valor muito baixo, confirmando o fim de tais especulações.

Para todos os propósitos práticos, a cosmologia elétrica foi morta por experimentos de laboratório de alta precisão e depois de 1960 a hipótese não foi revivida. Embora Bondi, Lyttleton e Hoyle aparentemente tenham aceitado o veredito experimental, eles não retrataram publicamente sua teoria... a hipótese elétrica. Por outro lado, o fracasso

²⁰ Seguiremos, com certa dose de irreverência, uma “determinação” de Lakatos em seu célebre texto “*history of science and its rational reconstruction*” quando o autor descreve que todos os episódios históricos da ciência que não se mostrar apropriadamente racionais devam ser relegados às notas de rodapé. Estamos, portanto, seguindo sua determinação ao narrar o surgimento do nome “Big Bang” para descrever a teoria de Gamow e seus colaboradores. O termo foi cunhado por Hoyle para descrever pejorativamente a hipótese rival. A “grande explosão” foi uma forma de enfatizar o brusco, e inexplicável, início do universo defendido por seus opositores. Será necessário, todavia, que se passe cerca de vinte anos desta série de cinco entrevistas no rádio para que o termo ganhe popularidade entre os periódicos e círculos acadêmicos. (Kragh, 2013).

provavelmente contribuiu para o sentimento geral entre muitos cientistas de que a teoria do estado estacionário estava em declínio. (Kragh, 1996, p.218)

Também podemos citar a crítica ao modelo do estado estacionário feita pelo filósofo argentino Mario Bunge em 1959 ou pelo estadunidense Milton Munitz em 1954, ambos atacam suas bases “anticientíficas” e sua proposta de violação do princípio da conservação da energia. De forma geral, não foram críticas direcionadas apenas ao modelo em si, mas à cosmologia como um todo e seu pretense caráter científico naquele momento.

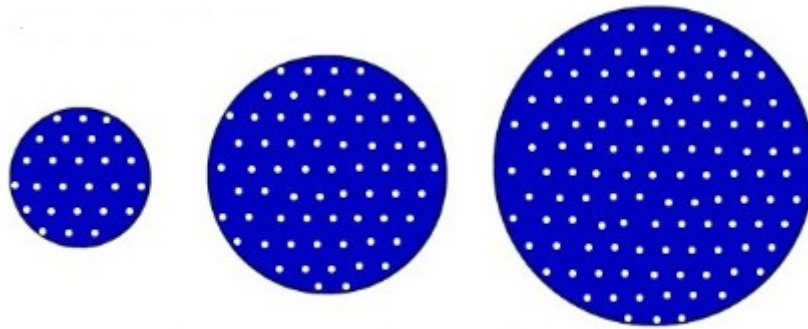


Figura 13: teoria do estado estacionário (<https://hypescience.com/big-bang-universo>)

4.7 - A primeira detecção da radiação cósmica de fundo.

Por fim, nesta reconstrução racional, vamos descrever brevemente o papel desempenhado pela descoberta da radiação cósmica de fundo, por Arno Penzias e Robert Wilson, quem trabalhavam para os laboratórios Bell em 1965. Na década de 60, como descrevemos anteriormente neste ensaio, ambas as teorias, que consideramos parte de um mesmo programa de pesquisa, encontravam dificuldades de aceitação por parte da comunidade astronômica internacional e, particularmente, dificuldade em estabelecer-se como científicas.

Se a teoria do estado estacionário aparentemente violava o bem consolidado princípio da conservação da energia, seus defensores alegavam que o Big-Bang também o fazia, a teoria de Hoyle, Bondi e Gold levava a vantagem de aparentemente explicar o problema da idade do Universo. Neste modelo o cosmos seria infinito enquanto que no modelo de Gamow, Alpher e Hermann, os cálculos da idade do Universo chegavam a um valor inferior à idade da Terra, conhecida através de técnicas e instrumentos geológicos. A descoberta de Penzias e Wilson veio mudar este cenário, fornecendo um importante argumento empírico à disputa.

Raramente as teorias se sustentam ou caem com base no resultado de um único teste. Desta vez, porém, a opinião mudou quase da noite para o dia. Em poucos anos, a maioria dos cosmólogos havia adotado a teoria do big bang ou parado de publicar no campo. Penzias e Wilson ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1978 por sua conquista. (BRUSH, 1992, p. 62)

Se, de modo geral, o progresso da ciência vai muito além de um mero confronto entre modelos teóricos e resultado experimental, como descrito pelo próprio Lakatos (LAKATOS, 1979) e por diversos trabalhos na área, neste caso especificamente, a medição da radiação cósmica de fundo gerou rápida conversão de muitos dos adeptos do modelo do estado estacionário. Tanto as questões da idade do Universo e da formação dos elementos de massa superiora à massa do Hélio permitiram o confronto entre os modelos, mas, neste caso, a teoria de Hoyle, Bondi e Gold não previa a existência desta radiação de fundo e, menos de 5 anos após a sua detecção, a disputa passou por grande reviravolta.

No final da década de 1970, quase todos os defensores originais do modelo de estado estacionário o abandonaram explicitamente ou simplesmente pararam de publicar sobre o assunto. Uma pesquisa com astrônomos americanos realizada na época por Carol M. Copp, da Universidade do Estado da Califórnia, descobriu que a grande maioria apoiava o big bang em vez do estado estacionário. (KRAGH, 1996)

Mais complexo, porém, é descrever as causas de tão imediata aceitação. A medição da dupla americana corroborou a existência de uma radiação residual de origem cosmológica. O curioso é que Gamow e seus colaboradores definitivamente não foram os primeiros a prever a existência de tal radiação. Poderíamos citar a estimativa da temperatura do espaço, realizada por Guillaume em 1896, ou a famosa tentativa empreendida por Eddington em 1926, no seu livro “The Internal Constitution of the Stars”. Também poderíamos citar as estimativas de Freundlich, Max Born ou Herberg.

Como mencionamos neste artigo, Gamow e colaboradores obtiveram temperaturas desde $T \approx 5 \text{ K}$ até $T = 50 \text{ K}$, em ordem crescente (5 K, $\geq 5 \text{ K}$, 7 K e 50 K) ... Estas previsões são muito ruins quando comparadas com aquelas obtidas por Guillaume, Eddington, Regener e Nernst, McKellar e Herzberg, Finlay-Freundlich e Max Born, que previram os seguintes valores, respectivamente: $5 \text{ K} < T < 6 \text{ K}$, $T = 3,1 \text{ K}$, $T = 2,8 \text{ K}$, $T = 2,3 \text{ K}$ e $1,9 \text{ K} < T < 6,0 \text{ K}$! Todos estes autores obtiveram estes valores a partir de medidas e/ou cálculos teóricos, mas nenhum deles utilizou o estrondão (Big-Bang). Isto significa que a descoberta de Penzias e Wilson não pode ser considerada uma evidência conclusiva a favor do estrondão. (Assis e Neves, 1995, p. 86)

Para respondermos brevemente por que o resultado de Penzias e Wilson acabou “consagrando” o modelo de Gamow e seus colaboradores, lembramos que os autores citados acima, que de fato realizaram estimativas mais próximas do valor conhecido pela literatura moderna para a radiação cósmica de fundo, estavam imersos

em outro programa de pesquisa, que não considerou os *redshifts* cosmológicos obtidos por Hubble como uma velocidade de recessão.

Tal hipótese, nós consideramos como parte do núcleo do programa de Friedman-Lemaitre e, por uma série de outros argumentos, este modelo do “Universo em equilíbrio” não recebeu grande reconhecimento por parte dos principais astrônomos da época. Havia uma disputa muito consolidada na década de 60 entre as hipóteses do grupo de Gamow e aquelas do grupo liderado por Hoyle, sem a participação, com força empírica e poder preditivo, deste programa de pesquisa alternativo.

Faremos menção a uma última publicação de Gamow, Herman e Alpher, de 1967. Aparentemente o trio busca refinar seu modelo e suas previsões à luz de novos dados experimentais. O artigo apresenta uma estimativa da densidade de matéria cosmológica nos instantes primordiais, apresenta os efeitos da expansão do universo. Uma inevitável percepção é de que o trio reforça a associação entre a radiação recém-descoberta por Penzias e Wilson e suas previsões apresentadas nos artigos citados anteriormente, à revelia de outros teóricos que buscam dissociar as duas coisas.

A situação agora é invertida. Observações recentes demonstram uma radiação cósmica térmica altamente isotrópica correspondente a um corpo negro a 3 K. Parece haver pouca dúvida de que isso representa a radiação térmica desviada para o vermelho associada a um modelo cosmológico da forma discutida aqui; pelo menos nenhuma explicação alternativa satisfatória foi apresentada. (ALPHER, 1967, pág. 3)

O grupo de Gamow, em uma descrição resumida, apresenta um modelo para a evolução da densidade de matéria, densidade de radiação e da temperatura desta radiação de fundo. Tal radiação seria originada aproximadamente no instante $t = 300$ mil anos após a explosão inicial. Fruto da expansão e, conseqüentemente, resfriamento do fluido, que cessaria sua absorção pela matéria primordial²¹. Nenhuma radiação anterior a este momento poderia ser, conseqüentemente, detectável.

²¹ Anteriormente a este momento de desacoplamento, a radiação seria continuamente absorvida e reemitida pela matéria, percorrendo pequenos livres caminhos entre absorções sucessivas.

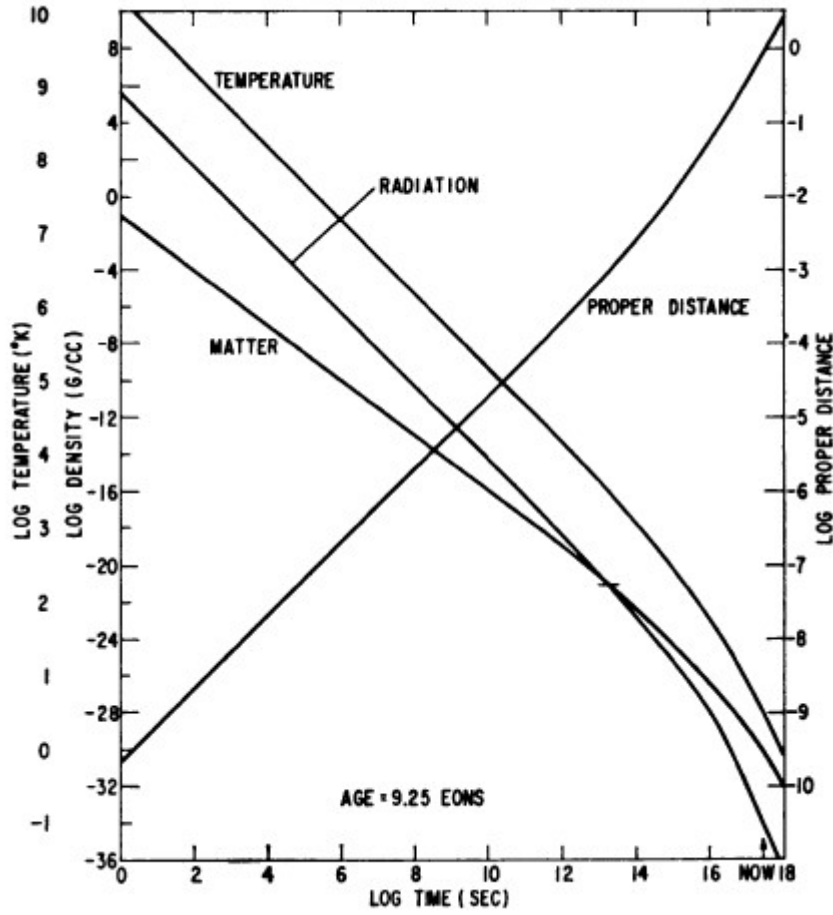


Figura 14: evolução das densidades de matéria e de radiação no universo, segundo a teoria do Big-Bang

A distribuição da radiação cósmica de fundo pelo espaço apresenta alto grau de homogeneidade. Após algumas tentativas de medições por meio de balões meteorológicos na década anterior, o satélite COBE (Cosmic Background Explorer, 1989) finalmente detecta a incidência desta radiação em função das diferentes direções e diferentes comprimentos de onda. O pico desta emissão encontra-se em comprimentos de onda com alguns poucos centímetros, razão para a necessidade de detecção fora da atmosfera terrestre.

Essa distribuição de radiação obedece, com ótima aproximação, a distribuição da radiação de corpo negro em função dos comprimentos de onda. A radiação de corpo negro, descoberta por Max Planck em 1900, sugere que um corpo em equilíbrio termodinâmico emite uma determinada quantidade de energia por unidade de área, em função do tempo, por unidade de ângulo sólido, como descrito na expressão abaixo:

$$dE = R_{\lambda}(T) dt d\lambda dA \cos\theta d\Omega \quad (21)$$

Onde

$$R(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (22)$$

O ângulo Θ é definido entre a normal ao elemento de área e a direção do elemento de ângulo sólido. A curva característica da radiação de corpo negro obedece a essa expressão, o que indica que a mesma tenha sido gerada em uma condição de equilíbrio termodinâmico. No início do universo, sua densidade e sua temperatura eram muito maiores e, em consequência, o livre caminho médio da radiação era muito menor. A temperatura do gás de fótons era exatamente a mesma da matéria.

Com a repentina expansão do espaço o gás se resfriou, a densidade de energia diminuiu e prótons se combinaram com elétrons. Consequentemente o gás de fótons se desacoplou da matéria, passando a propagar-se livremente. Se aplicarmos a derivada de B_λ em relação aos diferentes comprimentos de onda (λ) por meio da “regra do produto” e igualarmos a zero para encontrar seu valor máximo, iremos obter uma relação constante, conhecida como “Lei de Wien”.

$$\lambda_{\text{máx}}.T = 0,2898 \text{ k.cm} \quad (23)$$

A lei de Wien nos permite determinar a temperatura em que ocorre o máximo de emissão que, para a radiação cósmica de fundo, vale atualmente $2,726 \pm 0,02 \text{ K}$.

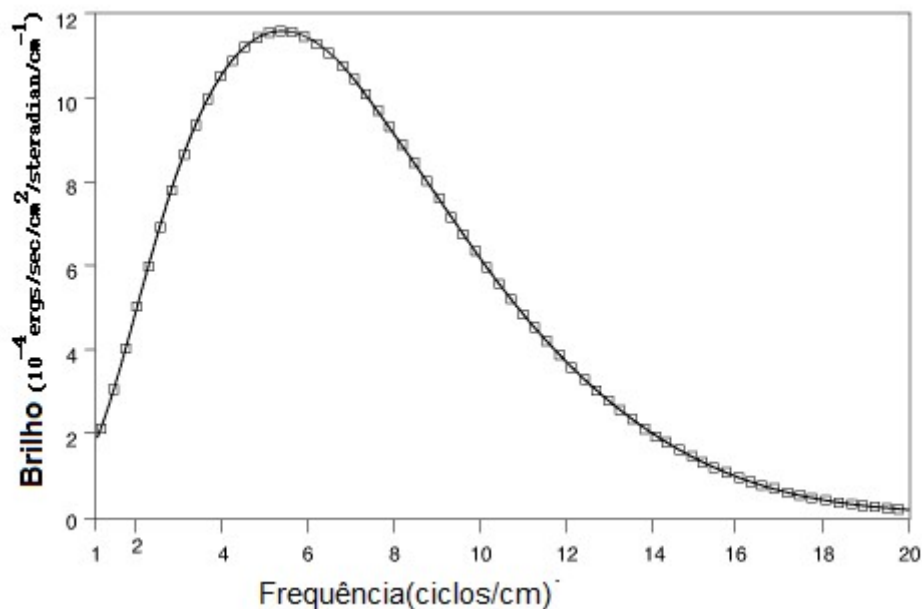


Figura 15: Distribuição da radiação cósmica de fundo no universo, sua homogeneidade foi interpretada como confirmação da teoria do Big-Bang (Extraída de Souza, 2004)

O efeito da expansão do universo sobre seu próprio raio (R) é o mesmo observado sobre o comprimento de onda da radiação de fundo, uma vez que se trata

da expansão do próprio espaço, não se trata de um evento explosivo no espaço. Sua expansão é a causa do gradual aumento do λ da R.C.F. Esta relação pode ser expressa matematicamente de forma bastante simples, como o faremos a seguir:

$$\frac{R_{atual}}{R_{passado}} = \frac{\lambda_{atual}}{\lambda_{passado}}$$

Que pode ser combinada com a expressão clássica para o efeito Doppler (SOUZA, 2004):

$$z = \frac{\lambda_{observador} - \lambda_{fonte}}{\lambda_{fonte}} = \frac{R_{observador} - R_{fonte}}{R_{fonte}}$$

$$z = v/c$$

Assumindo que a expressão referente ao observador se remete ao instante atual e aquele referente à fonte de radiação equivale a um instante no passado. Pela lei de Wien observamos que uma razão entre os comprimentos de onda da R.C.F atual e no passado pode ser substituída pela razão inversa entre suas temperaturas nos mesmos instantes, e a combinação destas informações nos leva à seguinte expressão:

$$z + 1 = \frac{R_{atual}}{R_{passado}} = \frac{T_{passado}}{T_{atual}} \quad (24)$$

Esta expressão configura aquilo que os astrônomos chamam de “história térmica do universo”, pois expõe de uma maneira direta a sua temperatura no passado, quando seu diâmetro médio era menor, em função de seu valor atual e de sua conhecida temperatura atual.

Este é mais um exemplo do poder preditivo da teoria do Big Bang, não sabemos ainda se as temperaturas do universo no passado serão medidas por métodos alternativos e se seus resultados se confirmarão, mas, com este modelo, podemos explicar a formação de estruturas mais complexas, assim como a abundância atual dos elementos químicos, especialmente os dois mais abundantes (H e He) e outras previsões do modelo padrão da cosmologia.

Uma das principais características observada na radiação de fundo é, além de sua origem cosmológica, sua grande uniformidade. Tal característica é apontada pelo modelo de Gamow e seus colaboradores uma vez que, segundo o mesmo, sua origem seja nos primeiros 300 mil anos após a grande explosão quando a temperatura caiu o suficiente para que essa radiação deixasse de ser absorvida pela matéria até então produzida. O lançamento do satélite COBE em 1989 confirmou tal homogeneidade e isotropia desta fria radiação cosmológica, fornecendo a sustentação empírica fundamental na disputa entre o Big-Bang e o Estado Estacionário.

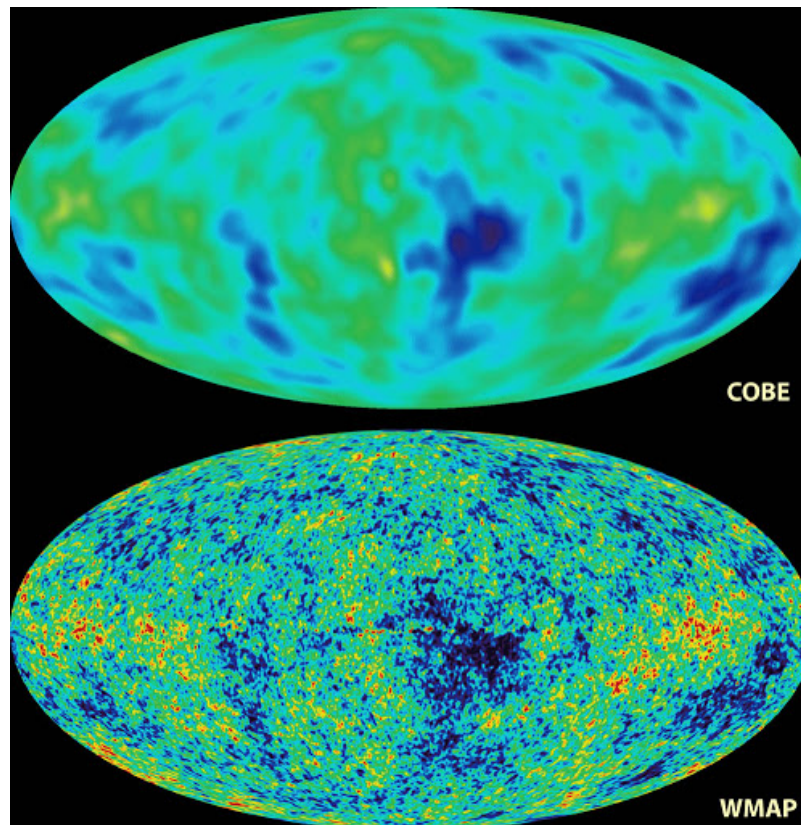


Figura 16: comparação entre as medições da R.C.F obtidas pelo COBE e pelo WMAP

Em 1993 a NASA envia a sonda Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) com o intuito de verificar e aperfeiçoar as medições feitas pelo COBE, ratificando sua detecção da radiação cósmica de fundo, isotrópica e de baixa temperatura. Observações ainda mais precisas foram realizadas pelo satélite Planck em 2013, trazendo mais detalhes sobre o espalhamento da radiação pelas diversas direções. Seus resultados foram interpretados como a comprovação da presença da radiação cósmica de fundo, com pequenas variações de temperatura, como previsto por Gamow, Alpher e Herman. George Smoot e John Mather.

Um dos principais aspectos de compatibilidade entre a radiação medida nos laboratórios Bell e as previsões do grupo de Gamow é a sua enorme homogeneidade, além de sua temperatura, que também foi prevista por modelos alternativos. O modelo do estado estacionário, todavia, nada previa acerca da existência, característica ou temperatura de tal ruído.

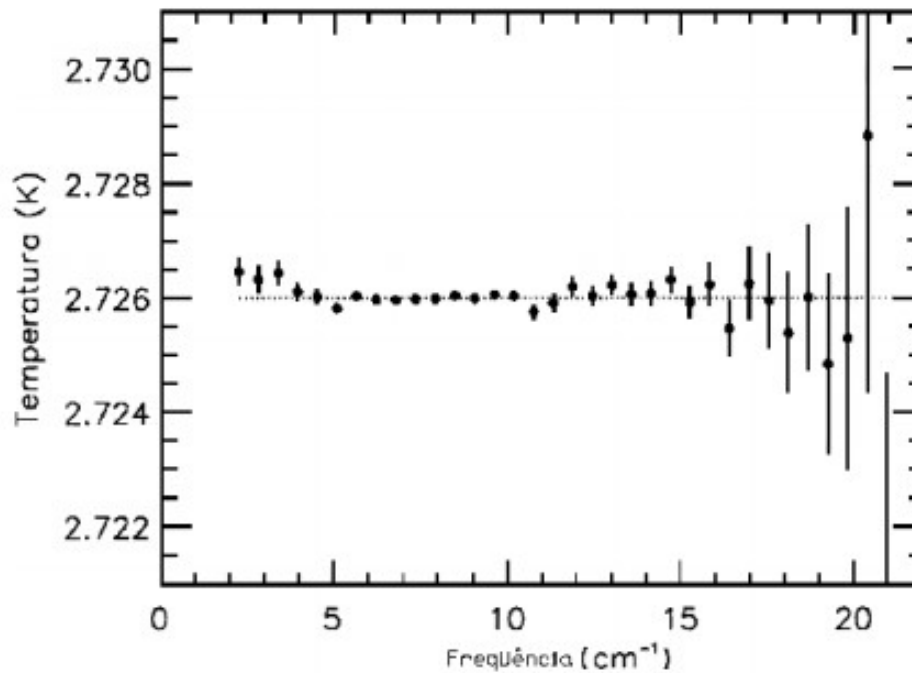


Figura 17: homogeneidade da R.C.F (SUZUKI, 2004)

Os principais cientistas envolvidos no lançamento do WMAP e análise de seus resultados foram laureados em 2006 com o prêmio Nobel da Física pelas luzes lançadas sobre tão significativa questão acerca da origem do Universo.

4.8 - Considerações Finais

O que buscamos argumentar ao longo deste capítulo é que o desenvolvimento da cosmologia científica ao longo do século XX foi conduzido por uma ampla disputa entre duas teorias, e não entre programas de pesquisa alternativos. Houve adaptações, modificações e concessões, especialmente na proposta da teoria do estado estacionário, para conformar-se às recentes confirmações empíricas de algumas das previsões elaboradas pelos proponentes do Big Bang.

A disputa não foi simplesmente decidida pela detecção da radiação cósmica de fundo, mas também pelas hipóteses cosmológicas sobre formação de elementos químicos, uma evolução das medidas de idade do Universo que a compatibilizaram com os dados geológicos, a distribuição dos QUASARES pelo universo (sobre o qual nos deteremos no próximo capítulo) e, portanto, um lento e gradual amadurecimento das teorias colocou a proposta do grupo de Gamow em uma condição de maior conteúdo empírico se comparada com a defendida por Hoyle e seus colaboradores. Essa disputa é delimitada, segundo Lakatos, pela heurística positiva do programa, onde a série de teorias pode ser empiricamente ordenada como: $T_{\text{Lemaître}} < T_{\text{E.E}} < T_{\text{BB}}$.

Cronologicamente as teorias do estado estacionário e da grande explosão são praticamente simultâneas, o que torna a descrição da Cosmologia um estudo de caso bastante peculiar em relação à epistemologia de Lakatos. Colocamos abaixo um breve quadro comparativo entre as teorias.

Teoria do Estado Estacionário

- Validade universal do Princípio Cosmológico Perfeito.
- Violações do Princípio de conservação de massa/energia
- Galáxias de diversas idades igualmente distribuídas pelo universo
- Sem previsão de R.C.F, formação de elementos químicos ou idade do Universo (eterno)

Teoria do Big Bang

- Validade universal da conservação massa/energia
- Hipóteses de formação cosmológica dos elementos químicos.
- Galáxias distantes de maior idade
- Estimativa de temperatura para R.C.F

A posição das teorias dentro do programa pode ser inserida no quadro abaixo, versão mais completa em relação ao apresentado no final do capítulo anterior. No próximo capítulo buscaremos dar um parâmetro atual deste cenário onde, após as detecções dos satélites COBE e WMAP a disputa entre as teorias praticamente se encerrou.

Programa de Pesquisa de Friedman-Lemaitre

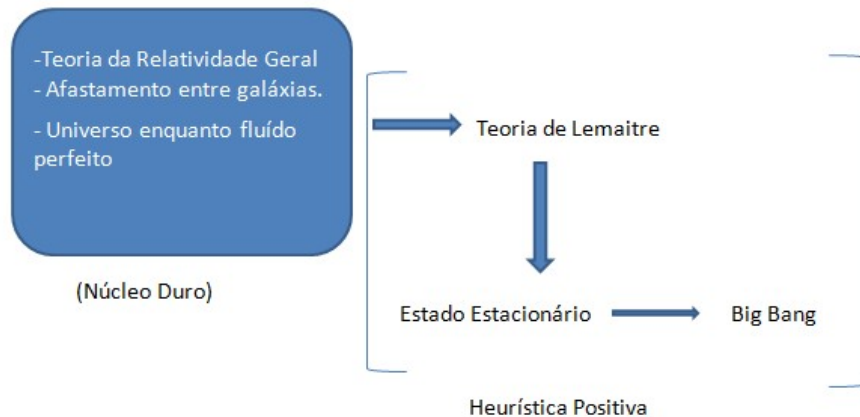


Figura 18: resumo do programa de pesquisa de Friedman-Lemaitre (créditos ao autor)

REFERÊNCIAS

- ALPHER, R. BETHE, H. GAMOW, G. The Origin of Chemical Elements. Physical Review, 1948.
- ALPHER, R. A, GAMOW, G, HERMAN, R. Thermal cosmic radiation and the formation of protogalaxies. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1967.
- ALPHER, R. HERMAN, R. Remarks on the Evolution of the Expanding Universe. 1948.
- ALPHER, R. FOLLIN, J. HERMAN, R. Physical Conditions in the Initial Stages of the Expanding Universe. Phys. Rev. 92. 1953.
- ASSIS, A. NEVES, M. History of the 2.7 K Temperature Prior to Penzias and Wilson, Apeiron (volume 2, páginas 79-84). 1995.
- BONDI, H, GOLD, T. The steady-state theory of the expanding universe. Royal astronomical society (Provided by the NASA Astrophysics Data System). 1948.
- BRUSH, S. How Cosmology Became a Science. Scientific American. pp. 62-71. 1992.
- CHIAPPIN, J. R. N, LEISTER, C. Duhem como precursor de Popper, Kuhn e Lakatos sobre a metodologia da escolha racional de teorias: da dualidade à trialidade metodológica. Veritas: revista de Filosofia da PUCRS, v.60, n.2, maio-agosto. 2015.

GAMOW, G. Expanding Universe and the origin of elements. *Physical Review*. 1946.

HACKING, I. (2012). *Representar e intervir: tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural*. Rio de Janeiro: EdUERJ.

HARRISON, E. R. *Cosmology: The Science of the Universe*. Cambridge University Press. Cambridge. 1981.

HEMPEL, C. G. *Filosofia da ciência natural*. Rio de Janeiro: Zahar, 1981

HOYLE, F. A new model for the expanding universe. *Royal astronomical society (Provided by the NASA Astrophysics Data System)*. 1948.

KRAGH, H. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press, 1996.

_____. Big Bang: the etymology of a name. *Astronomy & Geophysics*, Volume 54, Issue 2, April 2013, Pages 2.28–2.30, 2013.

LAKATOS, I; MUSGRAVE, A. *A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*. 1965. Cambridge University Press. Traduzido por Cajado, O. M e Mariconda, P.R; Universidade de São Paulo e editora Cultrix, 1979.

OLIVEIRA, K. S. F.; SARAIVA, M. F. O. 2010. *Astronomia e Astrofísica*. Rio Grandedo Sul: Editora da Universidade.

RODRIGUES, D. M. O ECLIPSE DE SOBRAL EM 1919: Breve análise sobre a proposta epistemológica de Larry Laudan. *Revista Paranaense De Filosofia*, 1(2), 111–128. 2021.

SOUZA, R. *Introdução à cosmologia*. EDUSP. 2004.

TOLMAN, R. *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, Oxford Press, New York. 1934.

TORT, A, NOGAROL, F. Revendo o debate sobre a idade da Terra. *Revista brasileira de ensino de Física*, 2013.

Capítulo 5

O CENÁRIO ATUAL DO PROGRAMA DE PESQUISA

Nos capítulos anteriores buscamos reconstruir o secular processo que levou à formação do programa de pesquisa de Friedman-Lemaitre na cosmologia, desde a formação de seu núcleo, identificado nas diferentes teorias formuladas posteriormente, até chegarmos nas teorias em si, que se diferenciaram nas hipóteses auxiliares, mantendo em comum seu compromisso ontológico e epistemológico com as teses de seu núcleo. Podemos nos perguntar, entretanto, como se encontra atualmente este programa: se em estado progressivo ou degenerado, uma vez que passamos de um século desde o início de sua formulação nos trabalhos de Einstein e Friedman. Na concepção Lakatosiana os conceitos de “derrota” ou “vitória” na comparação entre teorias, ou até mesmo entre programas de pesquisa são sempre bastante temporários. A própria dinâmica da ciência permite a “ressureição” de teorias aparentemente mortas ou que programas de pesquisa que se mostraram, até certo momento, de baixo conteúdo empírico e poder preditivo passem para uma fase progressiva à luz de novas descobertas empíricas, desenvolvimentos conceituais adicionais ou, até mesmo, reinterpretações de conhecidos resultados empíricos.

Está visto, porém, que os cientistas nem sempre julgam corretamente situações heurísticas. Um cientista precipitado pode afirmar que sua experiência derrotou um programa, e partes da comunidade científica podem até, precipitadamente, aceitar-lhe a afirmativa. Mas se um cientista do campo “derrotado” apresentar, alguns anos depois, uma explicação científica da pretensa “experiência crucial” no programa pretensamente derrotado, o título honorífico pode ser retirado e a “experiência crucial” pode converter-se, de uma derrota, numa nova vitória para o programa (Lakatos, 1979, p.215)

Expandimos parte dessa mesma conclusão lakatosiana para a série de teorias, onde entendemos que se localiza de forma correta a disputa entre as duas grandes teorias cosmológicas da segunda metade do século XX. A dinâmica do conhecimento científico pode ainda trazer argumentos a favor do modelo do estado estacionário ou de outros. A possibilidade de reabilitação de alguma parte de um programa que degenera nunca poderia ser excluída racionalmente. Só um processo difícil e relativamente longo pode estabelecer um programa de pesquisa capaz de suplantar o seu rival; e não convém empregar a expressão “experiência crucial” com excessiva precipitação. Nos parece que a teoria do Big-Bang vem se mostrando progressiva, atualmente sendo chamada de “Modelo Padrão” na cosmologia, dada a hegemonia alcançada, apesar de apresentar algumas importantes anomalias. Nossa interpretação encontra importantes oposições na literatura atual que devem, para o saudável diálogo científico, ser citadas e, em alguma medida, respondidas. O objetivo deste

capítulo é mostrar um pouco do cenário atual e de possíveis perspectivas futuras sobre os caminhos da cosmologia científica.

5.1 - A TEORIA QUE SE CONVERTE EM “MODELO-PADRÃO” DA COSMOLOGIA

Na filosofia muitos são os autores que já alertaram para o cuidado que devemos ter ao invocar os chamados “experimentos cruciais” (Hempel, Lakatos) na história da ciência. Neste caso, porém, temos um episódio que assim costuma ser lembrado, apesar de todas as bem conhecidas ressalvas: a descoberta da radiação cósmica de fundo, descrita em mais detalhes no capítulo precedente. Podemos amenizar um pouco, no intuito de buscar maior fidelidade ao papel ocupado por esse experimento na cosmologia científica. Trata-se, no mínimo, do primeiro resultado empírico em relação ao qual as duas teorias divergiam em suas previsões. O experimento é tratado como um dos marcos iniciais da cosmologia empírica.

O universo realmente começou no big bang, ou houve uma fase de contração anterior - um "big crunch" – que levou à altas temperaturas e densidades? O universo continuará a se expandir para sempre ou acabará entrando em colapso em um buraco negro? A criação do universo envolve elementos da teoria quântica de uma forma fundamental? Essas ideias agora dominam o pensamento físico. Que os cientistas consideram tal questões dignas de investigação séria é, em grande parte, uma consequência da descoberta da radiação cósmica de fundo, que transformou a cosmologia em uma ciência empírica. (BRUSH, 1992, p.70)

Entendemos que tal descrição possa ser demasiadamente simplista, por diferentes motivos. Tanto pela narrativa polêmica e controversa do que seja “científico” ou não (conferir capítulo 2) quanto pelo fato de que a descoberta da radiação cósmica de fundo, definitivamente, não foi o único resultado empírico a influenciar a comunidade internacional de astrônomos e físicos a favor do Big Bang. A descoberta dos QUASARES²² e, principalmente, da forma com que estes objetos se encontram espalhados pelo universo, ocupou importante papel de desarticular muitos dos que ainda buscaram defender a teoria do estado estacionário.

A radioastronomia desempenha importante papel da astronomia observacional, pois corresponde a um ramo da Astronomia que investiga um intervalo de comprimentos de onda nos quais a radiação atravessa a atmosfera terrestre e pode ser detectada por nossos telescópios de solo, bem como a radiação visível. As primeiras medições de intensas fontes de rádio astronômicas foram feitas por astrônomos australianos em 1949 (AMANCIO, pág. 206) e associadas às galáxias NGC 5128 e 4486, dando início à busca por novas radiogaláxias, um novo grupo de objetos

²² Fontes de rádio quase estelares (quasi stellar radio sources)

extragalácticos. Em 1961 Thomas Matthews e Alan Sandage descobriram um objeto óptico (magnitude aparente 16) de aspecto estelar, cuja posição coincidia com uma já conhecida fonte de rádio, chamada 3C48. Tais objetos visíveis associados a fontes de rádio foram batizados de quasares e, em todos eles, encontramos uma característica bastante peculiar: altos valores de redshifts.

A maioria das galáxias que conhecemos possui espectro com redshift abaixo de 0,2. Quase todas essas galáxias estão localizadas dentro de uma esfera de raio 1200 Mpc. Se os quasares participam da expansão do Universo, seus enormes redshifts e brilhos aparentes indicam que são os objetos mais brilhantes e mais distantes do universo observacional. (AMANCIO, p. 214). A existência de objetos tão distantes e de idade cosmológica tão elevada foi rapidamente interpretada como um argumento contrário ao princípio cosmológico perfeito e, conseqüentemente, ao modelo do Estado Estacionário. Por que objetos tão antigos não se encontram espalhados em variadas distâncias?

Já no cenário hipotético de uma explosão inicial, a expansão do universo arrastaria a posição de objetos primordiais para as grandes distâncias. Em um interessante artigo de 1966, Sciama e Rees, antigos defensores do estado estacionário, apresentam o que consideram como o mais decisivo argumento contra a teoria do estado estacionário “o objetivo deste relatório é apontar que os recentes as medições dos desvios para o vermelho dos quasares fornecem a evidência mais decisiva obtida até agora contra o modelo do estado estacionário do universo”. (SCIAMA; REES, 1966, pág.1) Podemos observar que o gráfico apresentado por eles divide o eixo vertical em três regiões ($0 < z < 1,2$; $1,2 < z < 1,55$; $1,55 < z < 2,02$) e argumentam que, de acordo com a teoria do estado estacionário, deveríamos encontrar nas três regiões a mesma distribuição de quasares com potência acima de P_1 e que, se associarmos os redshifts com as suas respectivas distâncias, o resultado constitui um forte argumento contrário à teoria de Hoyle.

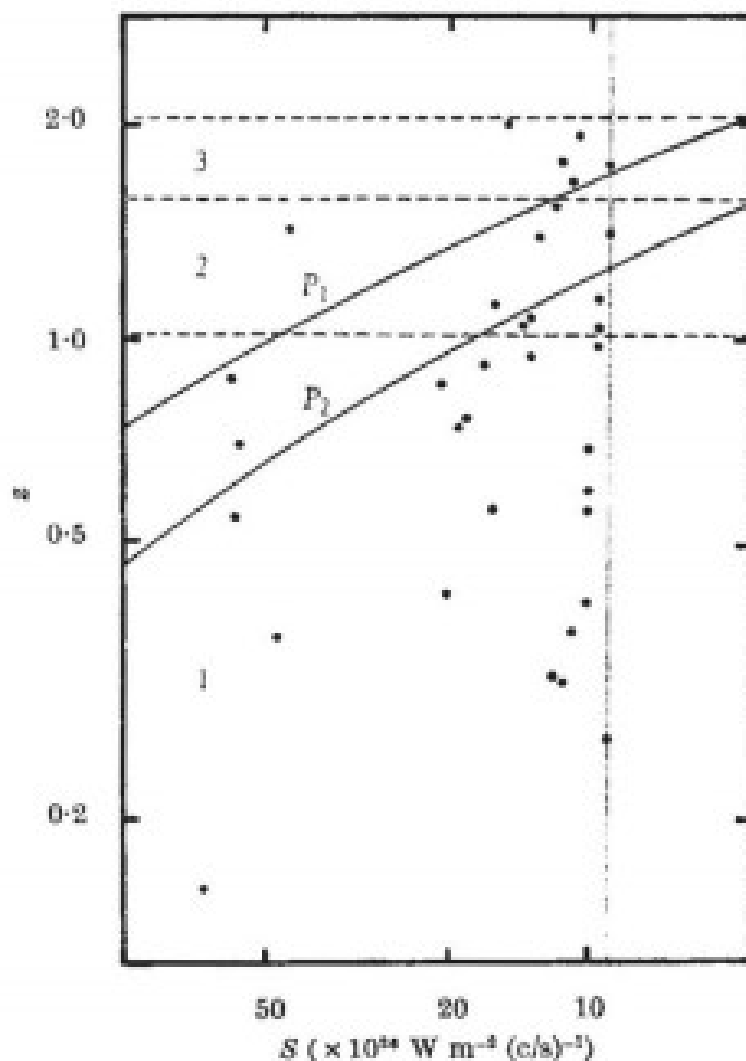


Figura 19: distribuição de quasares pelo universo, os mais antigos se encontram a maiores distâncias, informação que serviu de corroboração independente para a teoria do Big-Bang (SCIAMA; REES, 1966)

5.2 - O MODELO PADRÃO DA COSMOLOGIA

A teoria de Gamow e seus colaboradores vêm passando, desde a detecção da radiação cósmica de fundo em 1965, por um período de grande sucesso preditivo e de evolução conceitual. A cosmologia passou, dentro deste modelo, a incorporar importantes avanços da nascente Física de Partículas e muitas previsões teóricas feitas nas últimas três décadas foram confirmadas nos grandes aceleradores de partículas. Tamanha vem sendo a hegemonia, que esta teoria é atualmente conhecida como o “Modelo Padrão” da cosmologia. Muitos são os trabalhos que interpretam os recentes avanços na cosmologia como uma continuidade, ou melhor, um desdobramento dos trabalhos do grupo de Gamow. A crença em uma origem temporal do universo, sustentada por diversas evidências empíricas, norteou a pesquisa em cosmologia nas últimas décadas, tal crença é apontada pelo prêmio Nobel da Física, Steven Weinberg,

apesar do modelo ainda lidar com importantes anomalias e algumas dificuldades empíricas.

O modelo-padrão não é o final da história. Ele deixa a gravidade de fora; não explica a “matéria escura” que os astrônomos nos dizem compor cinco sextos da massa do universo; e envolve um volume excessivo de quantidades numéricas inexplicadas, como as razões das massas dos vários quarks e partículas similares aos elétrons. Mas, mesmo assim, o modelo-padrão oferece uma visão consideravelmente unificada de todos os tipos de matérias e forças (exceto a gravidade) que encontramos em nossos laboratórios, num conjunto de equações que cabe numa folha de papel. (WEINBERG, 2015, pág. 328)

Como evidenciado nas palavras de Weinberg, o modelo padrão não deixa de conviver com anomalias e dificuldades, tanto de ordem conceitual quanto empírica, o que não deixa de mantê-lo como o caminho de pesquisa mais seguido atualmente. Faremos a seguir um breve resumo de alguns recentes avanços da física nuclear e da física de partículas elementares no intuito de melhor explicar onde se situam as recentes confirmações empíricas e poder preditivo do modelo padrão da cosmologia, enquanto continuidade da teoria de Gamow, Alpher e Herman, e de algumas das recentes confirmações experimentais que trouxeram ainda mais suporte e confiança a esta teoria.

Segundo esse modelo, toda a matéria ordinária do universo é formada por léptons, quarks e bósons, suas partículas mais elementares. A interação básica entre tais partículas seria regida por três das quatro interações fundamentais da natureza: a força eletromagnética, a interação fraca (decaimentos radioativos) e a interação forte (responsável pela estabilidade dos núcleos atômicos), ficando apenas a gravidade fora da descrição do modelo. Essa interação entre quarks e léptons seria mediada (ou transportada) pelos bósons. O bóson transportador da força eletromagnética é o fóton, o glúon é o responsável pela interação forte, enquanto a interação fraca seria mediada pelos bósons W^+ , W^- e W^0 . O gráviton seria a hipotética partícula transportadora da interação gravitacional. O modelo prevê um total de 61 partículas: seis tipos de quarks (chamados “sabores”) com suas respectivas antipartículas, cada um deles possui três tipos de cores (propriedade que não guarda nenhuma relação com o conceito óptico de “cor”), o que corresponde a 36 partículas. Restam ainda os oito tipos de glúons, 6 variedades de léptons e suas respectivas antipartículas, além dos quatro bósons descritos acima.

Inicialmente não foram muitas as confirmações empíricas da teoria do Big-Bang, parte da dificuldade empírica se deve à alta complexidade de se reproduzir experimentos em escala cosmológica. Curiosamente esse cenário se alterou drasticamente nas últimas décadas. No início do século XX houveram enormes avanços no estudo das menores estruturas existentes na matéria. Os famosos experimentos de Rutherford e de J.J. Thompson revelaram indícios da existência do núcleo atômico e do

elétron. Em 1930 o experimento conduzido por Chadwick levou à descoberta do nêutron, partícula de massa igual ao próton, porém mais penetrante e sem carga elétrica, esclarecendo a diferença nas relações entre carga e massa dos diferentes nucleons²³.

A primeira antimatéria descoberta foi o pósitron, em experimento conduzido em câmaras de nuvens sujeitas a campos magnéticos. O feixe de pósitrons foi assim batizado por apresentar carga de mesmo módulo que o elétron, mas por se desviar em sentido oposto quando sujeito à ação de um mesmo campo magnético. A partir dessa descoberta, prevista inicialmente por Dirac, uma teoria mais abrangente sobre produção e aniquilação de pares de partículas e antipartículas foi concebida por ele e por Richard Feynman. A colisão entre um par leva à formação de dois ou três fótons, conservando energia e momento linear do sistema durante o processo.

5.3 - PARTÍCULAS MEDIADORAS

As forças que atuam à distância foram, ao longo do tempo, objeto de muita inquietação por parte dos cientistas. É famosa a controvérsia entre Newton e Leibniz sobre a propagação da força gravitacional e semelhante dificuldade foi notada no eletromagnetismo do século XVIII. Com o advento da física de partículas houve um importante avanço nessa questão: todas as interações fundamentais se resumem apenas à gravidade, eletromagnetismo, interação nuclear fraca ou interação nuclear forte. Cada uma dessas forças seria a manifestação macroscópica da troca de uma partícula específica. A força elétrica entre prótons e elétrons, por exemplo: é bem conhecido que pode ser atrativa ou repulsiva, entre partículas de sinais opostos ou entre partículas de mesmo sinal. Essa interação pode ser interpretada como uma troca de fótons pelos pares. Na atração uma partícula busca arrancar um fóton da outra, na repulsão uma partícula emite um fóton, que é absorvido pela outra.

A gravidade seria explicada em termos da troca de uma partícula chamada gráviton, ainda não detectada. Fóton e gráviton são partículas sem massa, a primeira com spin igual a um e a segunda com spin igual a dois. A interação forte, entre prótons e nêutrons no núcleo atômico, seria mediada por uma partícula chamada glúon ($m=0$, $\text{spin} = 1$). A interação fraca, responsável pelo decaimento beta (um nêutron se transforma em 1 próton, 1 elétron e 1 antineutrino) é mediada pelos bósons W^+W^- e W^0 , partículas de vida muito curta, cuja existência foi confirmada em 1983 em experimento realizado no CERN (prêmio Nobel da Física de 1984).

Em 1935 o físico japonês Hideki Yukawa sugeriu algumas propriedades da partícula mediadora da interação forte, batizada de méson. No ano seguinte foram realizados experimentos com raios cósmicos que detectaram partículas de mesma massa que o elétron, conhecidas como múons. Os múons (μ^+ e μ^-) apresentaram massa

²³ Prótons e neutrons são nucleons, por serem partículas encontradas no núcleo dos átomos

cerca de 207 vezes a massa do elétron e , principalmente, interagem fracamente com o núcleo. Portanto, não correspondem à partícula prevista por Yukawa. Somente em 1947 foi detectada uma partícula chamada pión, ou méson π , com massa cerca de 270 vezes maior que o elétron com as características sugeridas por Yukawa. A descoberta do méson π contou com grande participação de físicos brasileiros, suscitando ainda hoje controvérsia sobre os motivos de não terem sido contemplados com o prêmio Nobel da Física (ibid – BARATA; NATERCIA, 2005).

Faremos um breve resumo dos principais termos empregados na classificação das muitas partículas descobertas ao longo do século XX, especialmente nos aceleradores e nos detectores, que se tornaram a partir dos anos 60 na única possibilidade de detecção e descoberta de muitas delas. A sobreposição de duas diferentes classificações pode tornar a apropriação das classificações uma tarefa confusa, o que justifica esse resumo

Quanto à massa: os léptons são leves (ex: elétron), os mésons são intermediários (ex: píons) e os bárions são pesados (nucleons).

Léptons: são partículas que não interagem pela força nuclear forte, são consideradas partículas elementares no sentido de, de acordo com o modelo padrão, não apresentarem estruturas internas. O grupo dos léptons engloba o elétron, o múon e o tau, com seus neutrinos e antipartículas. Possuem spin igual a $\frac{1}{2}$ e, por isso, são classificados como férmions.

Hádrons: não são elementares, por serem compostos por 3 quarks, e estão sujeitos à interação “forte”. Acreditamos que algumas classificações adicionais não sejam necessárias para nossos propósitos e serão omitidas²⁴. (ibid – Sears; Zemansky, 2008)

O modelo-padrão descreve a interação entre seis tipos de léptons, seis tipos de quarks e suas partículas mediadoras (glúons, fótons bósons W^+ , W^- e Z^0 além do hipotético gráviton). Muitas são as tentativas de unificação entre as quatro interações fundamentais da natureza. Relativo sucesso nesse empreendimento levou à unificação entre a força fraca e a eletromagnética, levando à criação da “teoria eletrofraca”, segundo a qual a diferença de massa entre as partículas mediadoras²⁵ dessas interações é responsável pela manifestação de 2 forças distintas no baixo regime de energias de que ainda dispomos em nossos melhores laboratórios, situação distinta do

²⁴ O grupo dos hádrons engloba partículas que interagem fortemente, cada hádron possui sua respectiva antipartícula e podem ser classificados em: mésons possuem spin igual a 0 ou 1 e, portanto, são bósons, bárions possuem spin semi-inteiro e, portanto, são férmions, englobando os nucleons e híperons

²⁵ Enquanto o fóton, que transmite a força eletromagnética, não possui massa, os bósons que transmitem a força fraca são dotados de massa.

universo primordial, poucos instantes após o Big-Bang. A diferença de massa entre as partículas mediadoras pode ser a chave para decompor uma única interação fundamental nas quatro que conhecemos.

O modelo-padrão da física de partículas

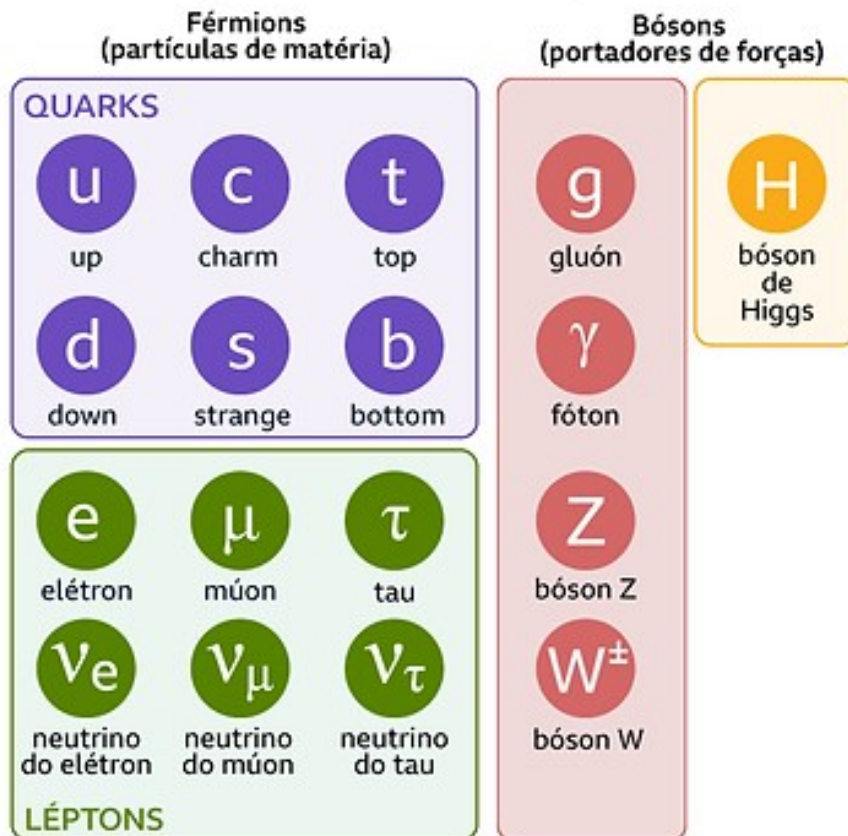


Figura 20: resumo das partículas fundamentais previstas pelo modelo-padrão da cosmologia

5.4 - O UNIVERSO EM SEUS PRIMÓRDIOS: A UNIFICAÇÃO ENTRE A FÍSICA DE PARTÍCULAS E A COSMOLOGIA

O modelo-padrão, com todo esse “zoológico” de partículas, fornece um modelo interessante que permite reconstruir o universo em seus instantes iniciais após o violento nascimento. Ele se comporta tal como um fluido ideal em expansão e, à medida que seu volume aumenta, sua temperatura diminui. A mecânica quântica, por meio do princípio da incerteza de Heisenberg, estabelece uma incerteza mínima para medidas de comprimento e de tempo, conhecidos, respectivamente, como “comprimento de Planck” e “tempo de Planck”. O tempo de Planck é calculado como $t_P = 10^{-43}$ segundos e somente após esse intervalo de tempo decorrido a partir do Big-Bang que o modelo faz previsões sobre a dinâmica do Universo.

$$L_P = \sqrt{\hbar \cdot G / 2\pi c^3} = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$t_P = L_P / c = 0,539 \times 10^{-43} \text{ seg}$$

Em $t_p = 10^{-43}$ segundos, a temperatura do universo se encontrava próxima de $T = 10^{32}$ K e a energia cinética de cada partícula, portanto, valia aproximadamente 10^{19} GeV, que é um possível valor de energia onde as quatro forças encontravam-se unificadas²⁶. Entre os intervalos de tempo $t = 10^{-43}$ e $t = 10^{-35}$ segundos a força nuclear forte e a eletrofraca se desacoplaram apenas da interação gravitacional.

Para acompanhar a história do universo durante esta era, tudo o que precisamos saber é o quão quente tudo estava em um determinado momento. Ou, colocando de uma maneira diferente - como a temperatura está relacionada ao tamanho do universo à medida que o universo se expande? (WEINBERG, 1979, pág. 82)

O universo neste período era comparável a uma sopa de quarks sem distinção. Os léptons, nesse intervalo, são constantemente criados e aniquilados aos pares. Após esse instante, o universo passa por uma grande aceleração em sua taxa de expansão, com a separação entre a força nuclear forte e a eletrofraca. O fator de escala²⁷ aumenta por um fator de 10^{50} até o instante 10^{-32} segundos.

No instante 10^{-32} segundos o universo era composto por quarks, léptons e os bósons mediadores. Quanto mais se expandia, mais se resfriava. No instante 10^{-6} segundos a temperatura é suficientemente baixa para permitir a ligação entre quarks, formando os pares nucleóons/antinucleóons. Para concluir esse breve resumo de um modelo bastante complexo e detalhado, no instante $t = 14$ segundos, a temperatura do universo diminui ao ponto de permitir a formação de pares elétrons/pósitrons. Os neutrinos deixam de ser absorvidos pela matéria existente e se desacoplam. O modelo prevê a existência de neutrinos residuais deste período, com temperaturas próximas de 2K.²⁸

Essa é uma das verificações empíricas para as quais ainda não dispomos de toda a tecnologia que possa ser necessária. Observemos, por outro lado, que além de adequação empírica e poder preditivo, temos um elemento que não foi diretamente citado por Lakatos: a coerência interna e externa de um programa de pesquisa. O modelo padrão é fruto do diálogo e da conexão entre duas áreas da pesquisa científica: a cosmologia e a Física de partículas. Tornou possível a previsão de uma série de partículas importantes para a reconstrução do universo “jovem” e muitas delas, como exposto acima, foram detectadas posteriormente, o que corrobora seu poder preditivo, ao contrário do que foi afirmado por Merritt. O elo entre duas importantes áreas é percebido nas palavras de Weinberg:

²⁶ Essa é a chamada GUT (teoria da Grande Unificação), cujos praticantes buscam encontrar evidências de tal unificação das 4 forças em uma única interação fundamental.

²⁷ O fator de escala é um instrumento matemático utilizado para medir distâncias em uma geometria curva. Para fins de simplificação, é proporcional ao “raio” do universo, que não é necessariamente esférico.

²⁸ A detecção de tais neutrinos frios ainda não é uma expectativa concreta para o futuro próximo, por serem partículas de detecção extremamente difícil ainda atualmente.

A velha intimidade entre física e astronomia prossegue. Agora entendemos as reações nucleares a um grau suficiente não só para calcular o brilho e a evolução do Sol e das estrelas, mas também para entender como os elementos mais leves foram produzidos nos primeiros minutos da atual expansão do universo. E, como no passado, a astronomia agora apresenta à física um desafio tremendo: a expansão do universo está se acelerando, presumivelmente devido a uma “energia escura” que está contida não em movimentos e massas de partículas, mas no próprio espaço. (WEINBERG, 2015, pág. 329)

A mesma teoria que explica a origem do universo também explica o funcionamento dos núcleos estelares e sua produção de energia, também explica a existência de partículas como os neutrinos, detectados indiretamente e de forma independente dos modelos cosmológicos. A detecção que possivelmente mais tenha gerado ansiedade e expectativas na comunidade científica internacional envolve um dos elementos mais importantes na teoria do Big-Bang, que acabou batizado de “partícula de Deus”, o bóson de Higgs. O contexto e os impactos de suas primeiras detecções são mostrados na seção a seguir.

5.5 - A DETECÇÃO DO BÓSON DE HIGGS NO L.H.C

O mecanismo que gera tal distinção de massa também é objeto de investigação científica, exatamente por poder contribuir com a concepção de uma grande unificação. Esse é o chamado “mecanismo de Higgs”, o bóson de Higgs é responsável pela diferença de massas. Essa breve descrição totalizou 60 partículas fundamentais. A última corresponde ao chamado bóson de Higgs e sua descoberta, evento que recebeu bastante cobertura da imprensa internacional e rendeu o prêmio Nobel da Física a Peter Higgs, corresponde a um dos maiores sucessos preditivos da teoria ao longo das últimas décadas. Uma das mais importantes distinções entre a física clássica e a relatividade de Einstein está no conceito de massa. No ano de 1961 Sheldon Lee Glashow propõe uma teoria que unifica as interações eletromagnéticas e nucleares fracas. Todavia, as partículas mediadoras da primeira não deveriam ser massivas, enquanto que as mediadoras da força nuclear fraca, que é de curto alcance, deveriam ser portadoras de grande massa. Essa dificuldade é resolvida pelo mecanismo proposto por Robert Brout e François Englert [6], Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen e Tom Kibble [7] e Peter Ware Higgs [8], sugeriram, independentemente, que os bósons vetoriais W^+ , W^- e Z_0 adquirissem massa devido ao chamado campo de Higgs.

O modelo padrão também prevê a existência do chamado campo de Higgs, que permeia todo o Universo dando massa a todas as partículas que interagem com ele, inclusive aos bósons vetoriais, como predito no modelo eletrofraco. De acordo com o modelo padrão, quanto maior for a interação de uma partícula com o campo de Higgs, maior será a massa desta partícula (PIMENTA, 2013, pág. 3)

Portanto, o campo de Higgs, que preenche todo o universo, estaria na base da explicação fornecida para as diferentes massas contidas nas diversas partículas que hoje consideramos elementares. A existência do bóson de Higgs, do ponto de vista teórico, seria necessária para explicar as massas de todas as outras partículas. A equivalência entre massa e energia permite a existência de pares de partículas-antipartículas que se aniquilam, liberando o equivalente conteúdo energético do par. O processo inverso também é conhecido e detectado: em que tais pares surgem a partir de uma região em que não havia nenhuma partícula, graças apenas ao campo de energia preexistente naquela região do espaço

Na Mecânica Quântica toda partícula elementar é associada a um campo. Assim, quando o campo de Higgs, que permeia todo o universo, recebe energia suficiente, ele cria uma partícula, o Higgs, que é uma excitação do campo de Higgs. Por outro lado, quando a partícula de Higgs interage com outras partículas elementares, ela transfere energia, na forma de massa, do campo de Higgs para a partícula elementar (PIMENTA, 2013, pág. 4)

O modelo padrão permitiu a previsão de uma série de partículas mediadoras das interações que conhecemos em um modelo que remete à instantes posteriores ao Big-Bang, faz uma reconstrução do universo em seus primórdios, incluindo as diferentes etapas de sua expansão, das interações entre matéria e energia e da formação das partículas que compõem os átomos. Cerca de um século atrás ocorreram as primeiras detecções indiretas da existência dos elétrons e dos componentes do núcleo atômico. Atualmente a ciência encontra-se no estágio tecnológico em que possam ser concebidos experimentos capazes de detectar os componentes do núcleo atômico e suas partículas mediadoras

5.6 - O MECANISMO DE HIGGS

Ao longo da história da ciência muitos conceitos foram tendo suas respectivas definições atualizadas e, por vezes, radicalmente alteradas ao longo dos séculos. Um importante exemplo para a presente investigação diz respeito ao conceito de massa. No contexto da mecânica clássica, da teoria da relatividade de Einstein, na mecânica quântica a palavra “massa” é associada a conceitos sutilmente distintos. A detecção do bóson de Higgs é aclamada como uma importante confirmação empírica do modelo padrão e, conseqüentemente, da teoria elaborada pelo grupo de Gamow. Para melhor explicarmos o impacto e o contexto desta descoberta devemos compreender, mesmo que sutilmente, o chamado “mecanismo de Higgs”, responsável por fornecer massa às partículas elementares.

O problema, de natureza matemática, é que a natureza exibe uma determinada simetria de gauge, e que todas as partículas do modelo-padrão devem ser não massivas para que o modelo padrão apresente esta simetria de gauge. Por outro lado, quarks e léptons carregados são massivos. Para resolver este problema, Peter Higgs sugeriu um mecanismo semelhante ao mecanismo encontrado na supercondutividade e no emparelhamento nuclear. Analogamente aos fônons dos pares de Cooper, Higgs sugeriu um bóson que daria massa às partículas elementares massivas, o bóson de Higgs ϕ (PIMENTA, 2013, pág. 3)

Na moderna teoria de campos, o termo que representa o quadrado da massa das partículas (μ^2) é usualmente representado em uma lagrangeana pelo termo que multiplica o quadrado ϕ^2 do potencial, na seguinte forma geral.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} \boxed{m^2} \phi^2$$

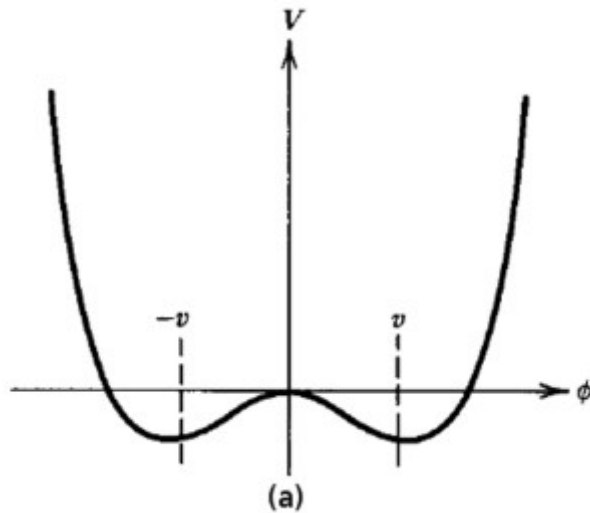
Figura 22: lagrangeana que descreve o mecanismo de Higgs

O campo de Higgs, obtido através da lagrangeana do modelo-padrão é um escalar complexo, mas vamos ilustrar o mecanismo de Higgs por meio de um campo real, com o intuito de simplificar a descrição do método sem perder seus principais aspectos matemáticos. A lagrangeana do caso complexo é mais ampla e apresenta quatro termos, pode ser consultado em (PIMENTA, 2013, pág. 9). Ela é invariante sob a transformação de sinal de ϕ . O comportamento do potencial $V(\phi)$ possui a forma dada na figura 22, onde derivamos para encontrar seus valores nulos, que não coincidem com os mínimos.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^2 - \underbrace{\left(\frac{1}{2} \mu^2 \phi^2 + \frac{1}{4} \lambda \phi^4 \right)}_{V(\phi)}$$

com $\lambda > 0$ e $\mu^2 < 0$ (uma vez que o termo de μ^2 na lagrangeana complexa é positivo)

$$\frac{\partial V}{\partial \phi} = \phi(\mu^2 + \lambda \phi^2) = 0 \quad \Rightarrow \quad \phi^2 = -\frac{\mu^2}{\lambda} \equiv v^2$$



Um aspecto anômalo desse gráfico é que no ponto $\phi = 0$, apesar de representar o vácuo, não corresponde ao valor de mínimo potencial $V(\phi)$. Outra dificuldade conceitual deste resultado é o valor negativo encontrado para o quadrado da massa μ^2 , associando um valor complexo para a massa. Uma solução encontrada para essas dificuldades foi obtida deslocando-se verticalmente os valores de $V(\phi)$. Coincidir seus mínimos com os valores de $V(\phi) = 0$ é possível por meio da transformação $\phi' = \phi + \eta$, onde $\eta = \sqrt{-\mu^2/\lambda}$. Com essa alteração, o comportamento gráfico do potencial coincide seus pontos de mínimo com o valor nulo.

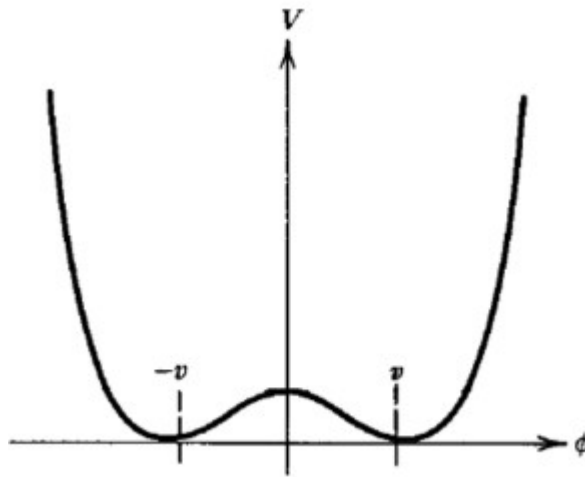


Figura 21: solução da lagrangeana sem o mecanismo de Higgs (a) e com o mecanismo de Higgs (b)

Tal alteração, quando inserida na lagrangeana, a leva a apresentar a seguinte estrutura geral.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi')^2 - \frac{1}{2} \left(\sqrt{-2\mu^2} \right)^2 \phi'^2 - \lambda \eta \phi'^3 - \frac{1}{4} \lambda \phi'^4$$

O campo ϕ' passa a apresentar massa positiva dada por $m_{\phi'} = \sqrt{-2\mu^2}$, além do potencial $V(\phi')$. A contrapartida, porém, dessa opção (substituição de ϕ por ϕ') é que a lagrangeana não apresenta mais a equivalência na troca de ϕ' pelo seu valor negativo, o que pode ser interpretado por uma quebra de simetria. A interpretação de Higgs é que essa quebra de simetria explica a massa das partículas na seguinte sequência.

- i) O vácuo é preenchido com o campo de Higgs (constituído, por sua vez, por partículas do bóson de Higgs).
- ii) As outras partículas interagem com o vácuo, trocando energia com ele, recebendo assim suas respectivas massas.
- iii) Os quarks interagem fortemente com o campo de Higgs, recebendo grandes massas. Os elétrons interagem fracamente e os fótons praticamente não interagem com ele.

5.7 - A DETECÇÃO DO BÓSON DE HIGGS PELO ATLAS E PELO CMS

O LHC (grande colisor de hádrons) é o mais robusto acelerador de partículas já concebido. Sua construção foi motivada pela possibilidade de detecção de importantes partículas previstas no modelo-padrão da cosmologia. Por um investimento de, aproximadamente U\$ 8 bilhões. O CERN conta com a participação de 20 países membros e com a colaboração de diversos outros, inclusive o Brasil. O comprimento de cerca de 27 quilômetros permite que, pela ação de campos magnéticos, feixes de prótons se aproximem da velocidade da luz e colidam a uma escala de energia similar ao universo em seus primórdios, permitindo a detecção de partículas nucleares, feito que não seria possível a velocidades inferiores.

O LHC consiste em um túnel subterrâneo circular, de 27 km de comprimento, no qual feixes de partículas são lançados e viajam a velocidades enormes até colidirem entre si. Na colisão, as partículas reagem produzindo novas partículas as quais, após a colisão, viajam através dos experimentos. O resultado da colisão é, então, monitorado por quatro detectores: ATLAS e CMS, sendo os dois maiores, e ALICE e LHCb. Os dados obtidos são analisados por cientistas do mundo inteiro que buscam por novas partículas e por explicações para alguns dos maiores mistérios da física, como a composição da matéria escura. (<https://jornal.unesp.br/acesado em 06/06/2023>)

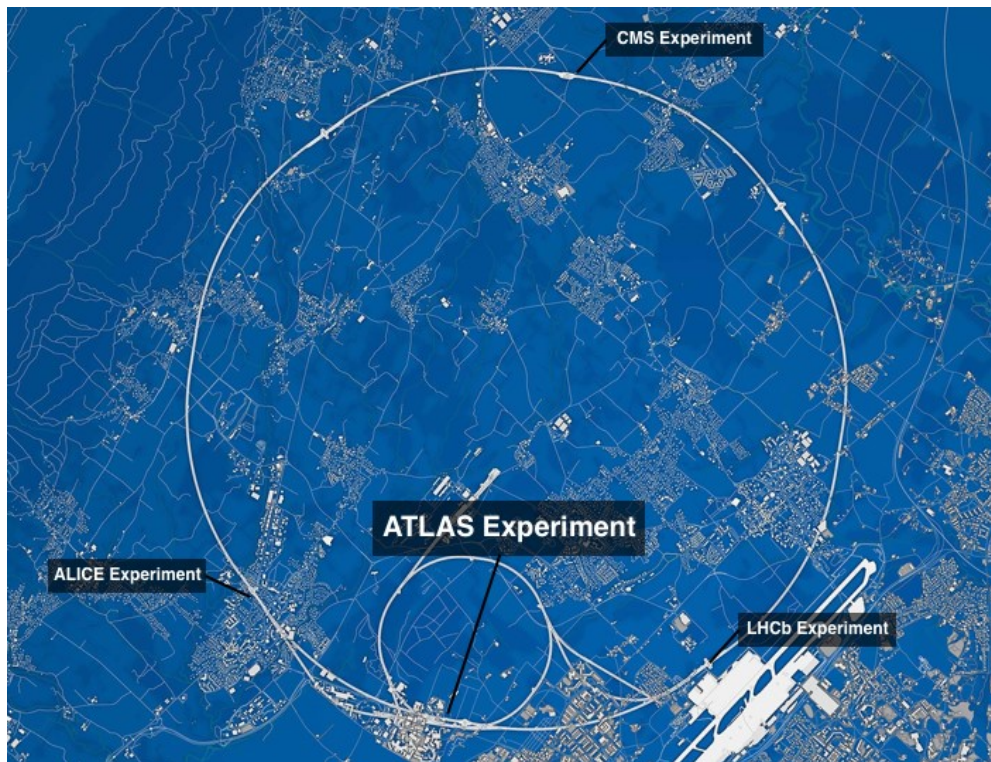


Figura 23: vista aérea do LHC e seus experimentos (créditos: CERN)

Uma das primeiras detecções do bóson de Higgs foi obtida pela análise estatística de colisões, produzidas no LHC, entre pares de prótons, numa combinação de resultados obtidos pelo ATLAS e pelo CMS. A maneira indireta com a qual nos referimos em ciência a conceitos tais como “detecção” é exemplar de questões de fundamental importância em nossa reconstrução racional. Uma colisão entre prótons, segundo o modelo-padrão da cosmologia, pode dar origem a uma variada diversidade de partículas, a depender da energia em que ocorre tal colisão. No referencial do centro de massa, com energias da ordem de 13 TeV, a colisão entre feixes de prótons produziria pares de quarks-antiquarks do tipo TOP, além do bóson de Higgs. Uma dificuldade envolvida no experimento é que, quase imediatamente depois, tais produtos decaem em outros grupos de partículas elementares, também previstas pelo modelo-padrão.

Um quark top decai quase exclusivamente em um quark bottom e um bóson W que, subsequentemente decai em um quark e um antiquark, ou em um lépton carregado e seu neutrino associado. O bóson de Higgs apresenta um rico espectro de possíveis decaimentos, que inclui um par quark-antiquark bottom, um par de léptons $\tau^+\tau^-$ (tau), um par de fóton e combinações de quarks e léptons do decaimento de bósons W e Z intermediários dentro ou fora da camada. Assim, a produção de ttH (quark top e sua antipartícula, somados ao bóson de Higgs) dá origem a uma ampla variedade de produtos finais. (Sirunyan. A. M. *et al*, 2018. Pág. 1)

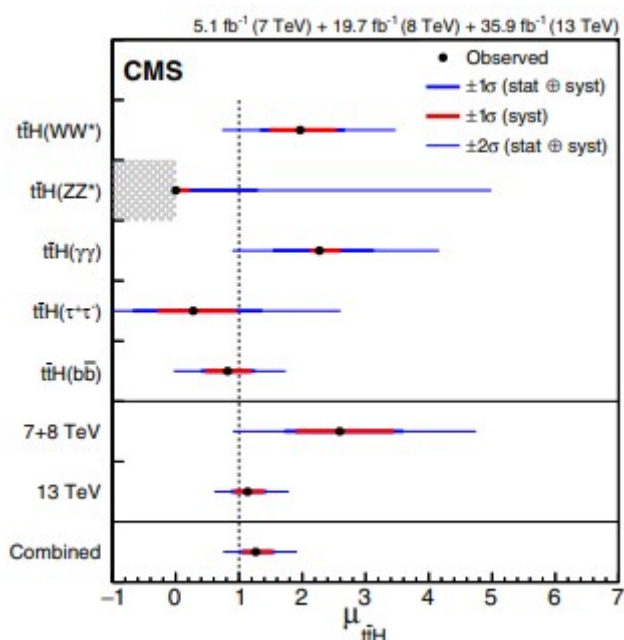


Figura 22: anúncio da possível detecção do bóson de Higgs obtida por experimentos no detector CMS

O que se chama, portanto, de “detecção” da partícula, em uma linguagem comum, se trata da detecção do produto de seu decaimento em outras partículas, na escala de energias prevista no modelo padrão. Uma observação indireta, portanto, que verifica não apenas essa previsão, mas o comportamento em conjunto de uma série de outras entidades teóricas e equipamentos experimentais. Um longo e refinado tratamento estatístico dos dados obtidos pelo experimento do CMS permite uma análise gráfica da atuação do mecanismo de Higgs. Uma “busca” na região de energias entre 110 e 160 GeV é apresentada com o intuito de detectar o efeito do decaimento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4L$ (decaimento do bóson de Higgs em dois bósons e, conseqüentemente, em 4 léptons).

O decaimento para dois fótons indica que a nova partícula é um bóson com spin diferente de um. Os resultados aqui apresentados são consistentes, com alguma incerteza, com as expectativas para o bóson de Higgs do modelo padrão. A coleta de mais dados permitirá um teste mais rigoroso desta conclusão e uma investigação para saber se as propriedades da nova partícula implicam uma física além do modelo padrão. (Sirunyan. A. M. et al, 2018. pág. 5)

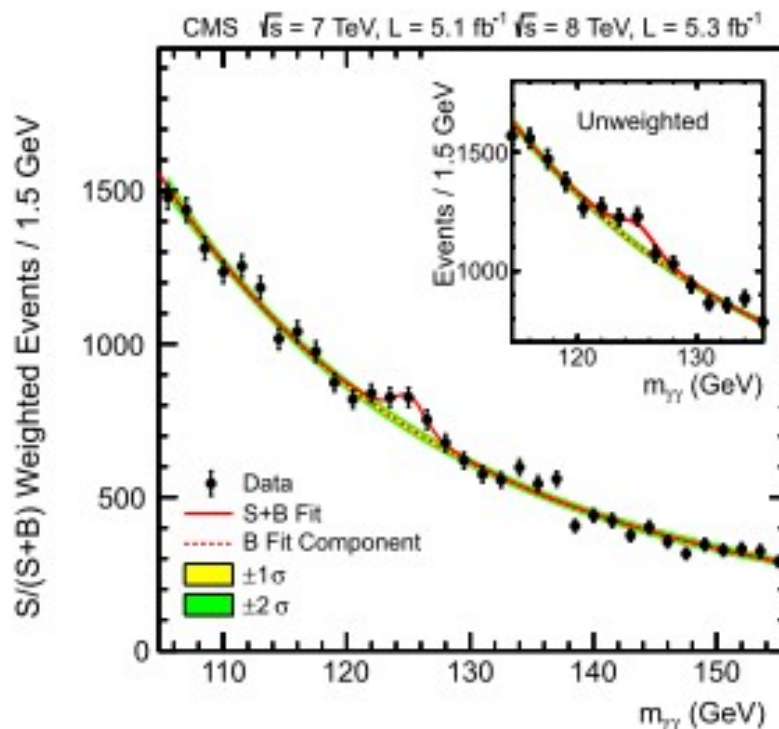


Figura 24: anúncio da possível detecção independente do bóson de Higgs pelo detector ATLAS

5.8 - LIMITAÇÕES, DIFICULDADES E DESAFIOS DO MODELO-PADRÃO

Após a descrição das dificuldades superadas em um enorme esforço colaborativo internacional para a detecção do bóson de Higgs, encerramos esse capítulo com os argumentos contrários à tese de seu valor enquanto programa de pesquisa. Tal controvérsia não é diretamente afetada por inserirmos o modelo padrão no interior de um programa de pesquisa mais amplo (programa de Friedman-Lemaitre). Existem numerosos trabalhos que negam a atual progressividade de tal programa e, também, aqueles que sequer consideram essa teoria como um verdadeiro programa de pesquisa. Não podemos deixar de responder a esses questionamentos, uma vez que a discussão trata do status atual do programa que nos propomos a reconstruir ao longo dessa dissertação. Tal contraponto é apresentado, por exemplo, no texto de Merritt (MERRITT, 2017)

O arco atual da teoria cosmológica falha claramente em atender aos padrões estabelecidos por Lakatos para um programa de pesquisa progressivo. Nada no modelo pré-existente apontava para a necessidade de matéria escura ou energia escura; as observações que motivaram essas hipóteses foram uma completa surpresa. Nem foi a relação de discrepância entre massa-aceleração antecipada antes de ser estabelecido observacionalmente. Além disso, uma grande quantidade de esforços no campo - talvez a maior parte dos esforços - é direcionada para lidar com as discrepâncias. já faz muito tempo—talvez não desde a década de 1960—que os desenvolvimentos no campo foram conduzidos por sua lógica interna, e não por fatos observacionais imprevistos. (MERRITT, 2017, pág. 50)

O termo “matéria escura”, bastante citado no texto de (MERRITT) embora já utilizado muito antes, ganha fama com a publicação de um artigo de Fritz Zwicky em 1933, em que chama a atenção para a grande discrepância entre a “massa luminosa”, atribuída às galáxias do aglomerado de COMA e a “massa dinâmica” necessária para explicar as velocidades observadas.

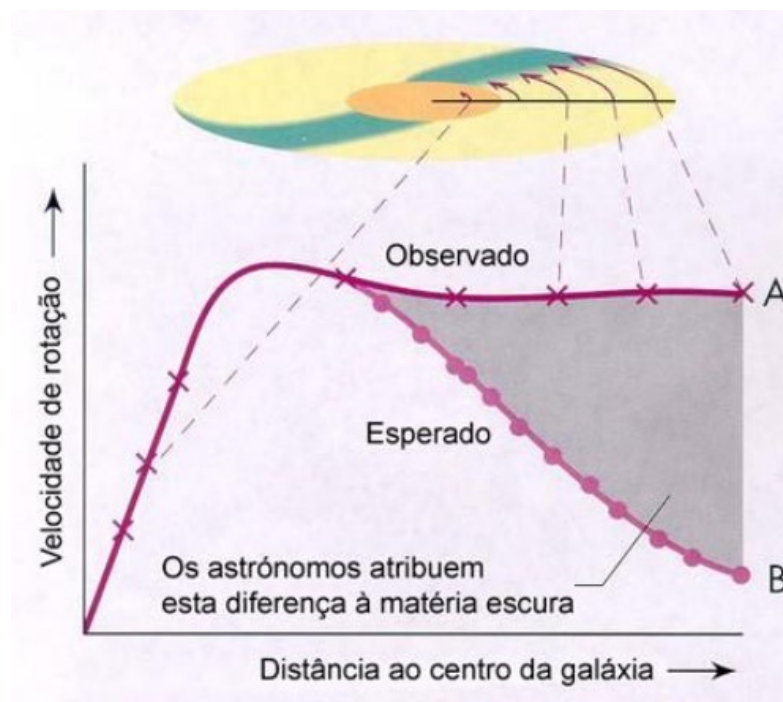


Figura 25: curva de velocidades em galáxias e aglomerados estelares, obtida de Maria de Fátima Oliveira Saraiva (<http://astro.if.ufrgs.br/galax/index.htm>)

O trabalho de Zwicky foi um dos primeiros indícios da existência de matéria escura, sendo melhor interpretado após estudos sobre a distribuição de velocidades estelares ao longo dos discos galácticos. Esperava-se que seguissem a “distribuição Kepleriana” fornecida pela física clássica, segundo a qual as velocidades decrescem à taxa proporcional ao inverso da raiz quadrada da distância até o centro galáctico. Tal comportamento é muito diferente daquele medido, levando os astrônomos a propor a existência de matéria não-luminosa nas periferias dos aglomerados estelares.

Essa “intervenção gravitacional” explicaria as curvas de rotação medidas observacionalmente. Uma importante confirmação dessa hipótese foi feita em 1940, quando Jan Oort, estudando a galáxia NGC 3115 observa que a distribuição de massa do sistema parece quase não ter relação com a distribuição da luz. A partir dos anos 80 surgiram importantes confirmações independentes da existência de matéria escura: emissões de raios-X, lentes gravitacionais e os MACHOS's (Massive Compact Halo Objects

– Objetos Compactos Massivos do Halo das galáxias) apresentam fortes indícios de que a hipótese de Zwicky se mostrou assertiva. (ibid - RODRIGUES; ARBOLEDA, 2021)

Dados recentes obtidos pelo satélite WMAP) Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) que mediram a distribuição da radiação cósmica de fundo levam os astrônomos a estimar que apenas cerca de 4% da matéria do universo é formada de prótons, nêutrons e elétrons (matéria bariônica). O restante seria composto por 23% de matéria escura e 73% por energia escura, algo ainda menos compreendido do que a natureza da matéria escura e que deve ser objeto de importantes pesquisas futuras.

Merritt classifica os episódios históricos associados às formulações dos conceitos de “matéria escura” e “energia escura” não como descobertas, mas como estratégias convencionalistas, no sentido Popperiano do termo. Não negamos que tal classificação seja pertinente, fazemos apenas duas ressalvas:

- i) A classificação normativa concebida por Popper, em diversos de seus componentes, é acusada por seus críticos de não se sustentar quando confrontada com o exame da história da ciência. Os episódios que cercaram as formulações dos conceitos de matéria e energia escura podem servir não apenas para “avaliar a cientificidade de tais descobertas à luz da epistemologia de Popper”, mas para avaliar a própria epistemologia de Popper à luz da análise de episódios da história da ciência. Isso parece ter sido ignorado por Merritt.
- ii) O próprio Popper admite que teorias ad hoc, formuladas apenas com o propósito de conciliar uma teoria com os dados empíricos, apesar de não serem científicas, podem tornar-se científicas no futuro, com o acúmulo de novos e, até então desconhecidos, dados empíricos. Nesse sentido nos parece que a leitura que o autor faz de Popper nos pareça ser excessivamente rígida.

Não nos parece, entretanto, problemático que o autor classifique as supostas descobertas feitas da matéria e escura no universo como estratégias convencionalistas. De certa forma é inegável que o tenham sido, pela justificativa do autor que partilhamos abaixo.

O modelo padrão da cosmologia lida com essa anomalia de uma maneira diferente: por meio de uma hipótese auxiliar. Postula-se que o universo é preenchido com um fluido, chamado 'energia escura', que tem todas as propriedades necessárias para converter a desaceleração cosmológica prevista em uma aceleração, e de maneira a reproduzir a dependência observada do desvio para o vermelho da galáxia em distância. A teoria da gravidade de Einstein é mantida, assim como as outras suposições (homogeneidade e isotropia em grande escala) que fundamentam o modelo cosmológico padrão. (MERRITT, 2017, p.45)

O ponto que nos distancia das conclusões de Merritt é que consideramos que o conteúdo empírico da moderna cosmologia não se reduza às discussões sobre matéria e energia escura no universo. Se tratam, no máximo, de exemplos de incômodas anomalias, com as quais os programas de pesquisa convivem mesmo em sua fase mais progressiva. Resultado similar é alcançado por Kuhn ao descrever a persistência de anomalias mesmo durante a prática da ciência normal. Entendimento similar é encontrado no pensamento de Popper e também de Duhem e, portanto, não entendemos que mereça mais longa discussão. (CHIAPPIN; LEISTER, 2015) Voltamos nossa atenção, todavia, para o conteúdo empírico do Sistema Padrão ocultado na obra de Merritt. Entendemos que o modelo padrão seja um desdobramento da teoria do Big-Bang, formulada por Gamow, Alpher e Hermann, que remete suas raízes aos trabalhos de Einstein, Friedman, Lemaitre, DeSitter, Hubble, entre outros. A detecção da partícula de Higgs foi um enorme empreendimento voltado à confirmação de uma hipótese formulada na década de 60 (CHATRCHYAN, S. et al, 2012) que buscava explicar a formação das partículas elementares nos instantes posteriores ao Big-Bang. Se esse evento, tal como descrito e modelado pelo grupo de Gamow, faz parte do cenário em que o bóson de Higgs foi previsto, sua detecção é uma confirmação empírica da teoria como um todo.

5.9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cosmologia científica é atualmente um dos campos mais férteis da atividade científica. Sua reconstrução racional, portanto, se esforça por delimitar um começo, mas não um final. Devemos, por outro lado, investigar sobre a situação atual desta pesquisa no âmbito da ciência contemporânea. O programa de pesquisa de “Friedman-Lemaitre” não se conclui com a teoria do Big-Bang formulada pelo grupo liderado por Gamow. Se a hipótese da expansão do universo se tornou, de alguma forma, consenso entre a comunidade de astrônomos e físicos, a física de partículas passou a ocupar importantes questões vinculadas à cosmologia. Inicialmente foram duas áreas de pesquisa distintas e, quando a hipótese de uma explosão inicial se mostrou mais fértil e promissora do que o modelo do estado estacionário, ela passou a fazer parte dos principais pressupostos conceituais para explicar a origem das partículas fundamentais existentes na natureza. A abundância de elementos químicos no universo, especialmente hidrogênio e hélio, direcionou a atenção de físicos e astrônomos à tentativa de criar modelos para a criação dos diversos elementos químicos neste universo descrito pelo programa de pesquisa, em constante expansão e resfriamento.

Algumas questões de grande relevância filosófica emergem da análise acerca do atual cenário do programa. A primeira é de ordem ontológica: o que realmente existe de fundamental no universo? De que maneira a ciência atual se propõe a lidar com essa questão. Discussões sobre realismo são muito antigas na ciência (HACKING,

2012) e usualmente se dividem em categorias: realismo de teorias ou realismo de entidades. Cientes de não ser esse o foco do presente trabalho, observamos em que medida tal questão permeia o programa cosmológico atualmente. A construção do LHC (grande colisor de hádrons) é um exemplo da presença de um importante argumento em prol da crença ontológica sobre a existência de partículas elementares: os poderes causais.

Os melhores tipos de evidencia para a realidade de uma entidade postulada ou inferida é nossa capacidade de entender algo a respeito de seus poderes causais, como, por exemplo, por meio de medição. Esse tipo de compreensão atesta-se, por sua vez, quando somos capazes de construir maquinas de funcionamento razoavelmente confiável, as quais se beneficiam deste ou daquele nexo causal, de forma que é a engenharia, e não a teorização, a melhor provado realismo científico de entidades. (HACKING, 2012, p.385)

Todo empreendimento tecnológico, como a construção de grandes aceleradores de partículas, envolve a crença direta e indireta em uma série de comportamentos, de natureza teórica ou experimental, de entidades teóricas e de funcionamentos de diferentes instrumentos e recursos tecnológicos. A crença na existência de elétrons, prótons, campos magnéticos, funcionamento de bobinas, diodos, e uma infinidade de outros componentes é pressuposta em construções de aparelhos que utilizam tais entidades como pressupostos para inferir a existência de entidades independentes. Os grandes aceleradores de partículas podem, aparentemente, ser construídos com o intuito de verificar a existência do bóson de Higgs, ou alguma outra partícula em especial. Por trás desse objetivo, entretanto, está a crença sobre o comportamento e existência de uma série de outras partículas e demais fenômenos físicos.

Ninguém em pleno domínio de suas faculdades mentais pode dizer que os elétrons “na realidade” são apenas pequenas bolinhas que giram e que, se tivéssemos a mão suficientemente pequena, poderíamos agarra-los de modo a descobrir a direção de seu spin com o polegar. O que existe é uma família de propriedades causais com base nas quais experimentadores competentes podem descrever e fazer uso de elétrons de modo a promover investigações a respeito de outras coisas, como correntes neutras fracas ou bósons neutros. (HACKING, 2012, p.381).

A questão sobre nexos causais e verificações em cadeia sobre a existência de uma serie de entidades e teorias, traz à tona uma discussão ainda mais antiga e debatida sobre a atividade científica: a impregnação teórica de qualquer experimento. Essa questão foi bastante discutida desde Pierre Duhem, com uma série de exemplos extraídos da história da física. Suas reflexões chamam a atenção para a impossibilidade de testes sobre entidades em particular, o que os experimentos controlados e reproduzíveis testam não são apenas sentenças isoladas sobre a existência ou não de determinadas partículas, mas complexos sistemas conceituais, que envolvem diversas entidades teóricas.

O físico nunca pode sujeitar ao controle da experiência uma hipótese isolada, mas apenas um conjunto de suposições. Quando a experiência está em desacordo com suas previsões, ele descobre que pelo menos um dos pressupostos que constituem essa

configuração é inaceitável e deve ser modificado, mas isso não significa que sabe qual deve ser alterado. (DUHEM, 2014, p.229)

Tal impregnação teórica dos experimentos na ciência se mostra nítida também ao observarmos os resultados experimentais produzidos pela física, e alguns foram descritos ao longo deste trabalho. As conclusões obtidas pressupõem uma enorme variedade de comportamentos teóricos. O que observamos diretamente são fenômenos como: deslocamentos de agulhas, espectros de absorção deslocados para a região do vermelho, comportamentos gráficos com certas particularidades. Não “observamos” elétrons, galáxias se afastando, elementos químicos se formando no universo ou uma explosão inicial.

Um fato teórico único pode, por conseguinte, ser traduzido por uma infinidade de fatos práticos díspares. Um fato prático único corresponde a uma infinidade de fatos teóricos incompatíveis. Essa dupla constatação torna clara a verdade que queríamos pôr em evidência: entre os fenômenos realmente constatados no curso de uma experiência e o resultado dessa experiência, formulado pelo físico, se intercala uma elaboração intelectual muito complexa que, a um conjunto de fatos concretos, substitui um julgamento abstrato e simbólico (Duhem, 2014, p.192)

A compreensão do encadeamento de conceitos e crenças no funcionamento de entidades e teorias é fundamental para a correta análise do caráter, progressivo ou degenerado, de um programa de pesquisa. Nas considerações finais faremos uma breve descrição da física de partículas e do colossal empreendimento em busca da confirmação experimental da existência de uma partícula fundamental para a mais ampla descrição da formação dos blocos constituintes da matéria, no universo em seus primeiros instantes após o Big-Bang. A descoberta do Bóson de Higgs é, portanto, uma “instância corroborativa” de uma série de outras hipóteses, inclusive da expansão do Universo a partir de uma explosão há quase 14 bilhões de anos.

REFERÊNCIAS

ALFVÉN, H. *Worlds-Antiworlds: Antimatter in Cosmology*. W. H. Freeman & Co., San Francisco. 1966.

BARATA, Germana; NATERCIA, Flávia. CÉSAR LATTES: vida dedicada à física e ao conhecimento. **Cienc. Cult.**, São Paulo , v. 57, n. 3, p. 51, Sept. 2005 . Available from <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252005000300022&lng=en&nrm=iso>. access on 16 July 2023.

BRUSH, Stephen G. How cosmology became a science, *Scientific American*, 267, 62-70, 1992.

CHATRCHYAN, S. et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Physics Letters B*, Volume 716, Issue 1, 2012.

CHIAPPIN, J. R. N, LEISTER, C. Duhem como precursor de Popper, Kuhn e Lakatos sobre a metodologia da escolha racional de teorias: da dualidade à triadidade metodológica. *Veritas: revista de Filosofia da PUCRS*, v.60, n.2, maio-agosto. 2015.

DUHEM, P. *A Teoria Física. Seu Objeto e Sua Estrutura*. Editora UERJ. 2014.

FRIAÇA. A, DAL PINO. E, SODRÉ JR. L, JATENCO-PEREIRA. V. *Astronomia: uma visão geral do universo*. EDUSP. 2000.

HACKING, I. *Representar e Intervir: tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural*. EDUERJ. 2012.

KNEUBIL, F. B. (2018). The meanings of mass and $E = mc^2$: an approach based on conceptual maps. *Revista Brasileira De Ensino De Física*, 40(4), e4305. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0027>

LAKATOS, I. O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. In:

LAKATOS, I. e MUSGRAVE, A. (org.) *A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*. São Paulo: Cultrix, 1979.

MERRITT, David. Cosmology and convention. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 57, p. 41-52, 2017.

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

SCIAMA, D; REES, M. Cosmological Significance of the Relation between Red-shift and Flux Density for Quasars. *Nature*. 1966.

SEARS, F.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY, M.W. *Física IV*. 12. ed., São Paulo: PEARSON, 2008.

Sirunyan, A. M. *et al.* (CMS Collaboration) Observation of $t\bar{t}H$ Production. *Phys. Rev. Lett.* 120, 231801 – Published 4 June 2018.

WEINBERG, Steven. *Para Explicar o Mundo*. Editora Companhia das letras, 2015

_____ *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Front Cover. Steven Weinberg. Bantam Books, 1979.

6. Considerações Finais

Tendo concluído essa reconstrução racional da cosmologia científica, podemos fazer algumas análises da importância que as atividades dessa natureza possuem para a dinâmica do conhecimento científico. Como descrito no capítulo inicial, não se trata apenas de “contar” uma história sobre o desenvolvimento intelectual da cosmologia nos últimos cem anos, o papel dos trabalhos em filosofia da ciência engloba também uma forma de “organizar” os saberes na área em questão. Um exemplo bastante concreto de tal organização envolve a localização das concepções alternativas dentro da cosmologia. Se a Relatividade Geral é uma teoria que ocupa parte do núcleo do programa, podemos inserir “cosmologias alternativas” dentro ou fora do programa. Fora do programa se violam alguma das teses de seu núcleo, como a Relatividade Geral. Existem trabalhos nacionais e internacionais que questionam as interpretações ortodoxas no campo da cosmologia. Faremos breves menções a alguns deles com o intuito de posicioná-los dentro ou fora do programa de Friedman-Lemaitre.

Nas mais diversas fases de sua evolução, a teoria do Big Bang sempre foi confrontada com interpretações alternativas para parte de seu conteúdo empírico. Atualmente encontramos algumas concepções que, apesar de minoritárias, merecem citação neste trabalho. Não se trata aqui de uma tomada de partido, mas da descrição o mais realista possível do status da cosmologia atual. O primeiro aspecto que podemos destacar envolve interpretações do resultado de Hubble que não impliquem em velocidades de recessão galácticas. Recordemos que o próprio Hubble se absteve de interpretações cosmológicas acerca de sua relação empírica entre os redshifts (z) em função das distâncias galácticas. Também nos sentimos impelidos a fazer uma breve avaliação do que foi esse estudo de caso da epistemologia de Imre Lakatos e apontar as dificuldades que surgiram nesta “acomodação” da história da cosmologia científica dentro da noção de programa de pesquisa.

6.1 - AVERMELHAMENTOS INTRÍNSECOS

O físico estadunidense Halton Arp (1927 - 2013) foi um físico bastante conhecido por defender que os desvios espectrais para o vermelho estejam associados ao efeito Doppler e, mais ainda, foi um forte opositor da expansão do universo. Parte de suas ideias remonta à antiga “teoria da luz cansada” postulada pelo búlgaro Fritz Zwicky (1898–1974) em 1929²⁹, segundo a qual os resultados de Hubble poderiam ser explicados se admitirmos que a velocidade de um raio de luz diminua à medida que o

²⁹ O artigo de Zwicky é apresentado no mesmo volume 15 dos *Anais da Academia Nacional de Ciências* dos Estados Unidos que a primeira versão do trabalho de Hubble e Humason

mesmo percorra maiores distâncias no universo. A bem conhecida relação de Planck apresenta uma relação entre a frequência e velocidade

$$E = mc^2$$

$$E = h.f$$

$$f = mc^2/h$$

Uma suposta diminuição no valor de c ao longo do tempo levaria a uma redução na frequência do raio de luz. Todavia essa redução jamais foi comprovada ou, sequer, fundamentada de forma convincente por Zwicky.

A hipótese de Harp é apresentada de forma um pouco mais robusta. O americano apresenta uma vasta quantidade de imagens de grupos próximos de quasares e galáxias (ARP, 2001) na defesa de que corpos com redshifts muito distintos estejam interagindo gravitacionalmente, o que refutaria a hipótese tradicionalmente aceita de que, com valores distintos de redshift (z), estes corpos astronômicos estejam a distâncias também muito distintas de nós. O livro de Arp citado abaixo expressa seus questionamentos em relação ao modelo padrão e sua explicação alternativa para os redshifts estelares e galácticos, o que alteraria radicalmente a interpretação usual sobre a lei de Hubble.

Se as massas das partículas são função do tempo, então elétrons mais jovens (criados mais recentemente) têm massas maiores. Quando um elétron com massa menor realiza uma transição entre as órbitas atômicas, o fóton envolvido tem menor energia e a linha espectral resultante é desviada para o vermelho. A lição consistente das observações que estamos discutindo é que quanto mais jovem é o objeto, maior é o desvio para o vermelho intrínseco. (ARP, 2001, p.336).

Sua principal conclusão, para a discussão cosmológica, é de que nossa galáxia existe há 15 bilhões de anos e que não há nada que podemos afirmar sobre objetos além do Universo Observável, cujo raio se expande à velocidade da luz: “no Big Bang isso é tudo o que há no universo e ele está se expandindo em direção ao nada. Em nosso modelo o universo é um substrato indefinidamente grande, no qual nosso conhecimento está se expandindo” (p. 374). Nessa breve listagem dos principais modelos cosmológicos formulados ao longo das últimas décadas, além da dupla Big Bang x Estado Estacionário, não podemos deixar de fora a concepção (com algumas variações) de um universo oscilante, no qual a explosão ocorrida há cerca de 13,8 bilhões de anos teria ocorrido de fato, mas enquanto um ponto de inflexão, onde o universo passa de um período de contração para outro de expansão.

Também houveram proponentes de um universo em equilíbrio termodinâmico, sem expansão ou criação contínua de matéria. Podemos citar as contribuições de alguns astrônomos brasileiros neste debate. Um interessante trabalho de Assis trás, em seu final, uma conclusão bastante polemica e inusitada sobre a descoberta de Penzias e Wilson. Questionam, entre outras coisas, o intervalo de valores nas previsões feitas pelo grupo de Gamow para a temperatura da R.C.F e buscam argumentar ao longo do texto que defensores do universo em equilíbrio realizaram, antes de Gamow, medidas mais precisas da temperatura de fundo do universo.

Afinal de contas, os modelos de um universo em equilíbrio dinâmico previram o valor desta temperatura antes de Gamow e com melhor precisão. E não apenas isto, já que Max Born também previu que o desvio para o vermelho cosmológico e a radiação cósmica de fundo deveriam estar relacionados com a radioastronomia, com esta previsão sendo feita onze anos antes da descoberta de Penzias e Wilson utilizando uma antena refletora no formato de chifre que havia sido construída para estudar emissões de rádio! Nossa conclusão é que a descoberta da radiação cósmica de fundo (RCF) por Penzias e Wilson é um fator decisivo favorável a um universo em equilíbrio dinâmico, além de ser contrária aos modelos de um universo em expansão, tais como o modelo do estrondão (big bang) e o modelo do estado estacionário (steady-state). (ASSIS, 1995, pág. 16)

Também podemos citar outro físico brasileiro, Mario Novello, com uma boa quantidade de obras publicadas em português em que critica o modelo do Big Bang e, mais do que isso, considera que a cosmologia atual começa a dar passos concretos no sentido de uma ruptura com essa teoria. Dentre suas principais críticas está o caráter não científico contido na interpretação de que o início do Universo se deu a partir de uma singularidade. Defende que a degenerescência do modelo do estado estacionário não deveria ter levado, de imediato, à aceitação da teoria rival, fechando a possibilidade de discussão sobre outros modelos possíveis para a evolução dinâmica do Universo.

A derrota de um cenário cosmológico isento de singularidade e, em sentido rigoroso, eterno foi a principal responsável pela atitude dos cientistas que deixaram de lado outros modelos de Universo sem singularidade. Podemos dizer que o fracasso primeiro do steady state funcionou como verdadeiro bode expiatório de todos os demais cenários eternos. (NOVELLO, 2014, p. 72)

Novello se situa em um nascente grupo de astrônomos e físicos defensores de um modelo oscilante de Universo, segundo o qual houve uma fase de compressão anterior à grande explosão ocorrida há cerca de 13,8 bilhões de anos. Considera que a ausência de singularidade, mas apenas um ponto de inflexão (que pode ser um dentre

infinitos ocorridos no passado) seja uma vantagem do modelo, além da expectativa em explicar questões ainda em aberto.

Uma de suas teses centrais é de que, a partir de 1998, a hipótese de aceleração na expansão universal tornou-se de grande aceitação entre a comunidade científica. Interpreta que abandonar certas partes da teoria geral da relatividade seria um caminho possível, mas que, ao contrário, a maior parte dos astrônomos preferiu preservar a teoria às custas de postular a existência de uma pressão negativa neste fluido universal, causada por uma forma desconhecida de matéria, batizada de matéria escura.

A possibilidade de que o universo esteja sendo acelerado produziu uma verdadeira revolução nas ideias que sustentavam o modelo do Big Bang, pois significava, em linhas gerais, que sua descrição do conteúdo material do Universo estava errada ou, na melhor das hipóteses, incompleta... As condições para ir além do Big Bang e produzir um Universo eterno passaram a ser aceitas (NOVELLO, 2014, p. 74).

É possível que Novelo esteja sendo demasiadamente otimista sobre a derrocada da teoria do Big Bang. Como descrevemos anteriormente, seu conteúdo empírico apresenta-se em fase de crescimento, com alguns importantes desdobramentos recentes. Mas frisamos que concepções alternativas continuam a ser formuladas. O que observamos é que, após 1965, houve uma mudança significativa no perfil dos modelos opositores. Fazemos menção especial a Hoyle e seus trabalhos da posteridade, mesmo após o abandono de seus antigos aliados. Há um modelo formulado em colaboração com Burbidge e Narlikar, publicado em 1994, conhecido como QSSC, bem como uma formulação de Hannes Alfvén.

Em ambos os trabalhos são apresentadas formulações de universo oscilante. Essa alternativa é uma forma de incorporar a detecção da radiação cósmica de fundo e podemos dizer que se tornou uma teoria rival ao cenário do Big Bang, ainda em estágio bastante embrionário e sem um claro indicativo de que ganhará alguma força empírica nas próximas décadas.

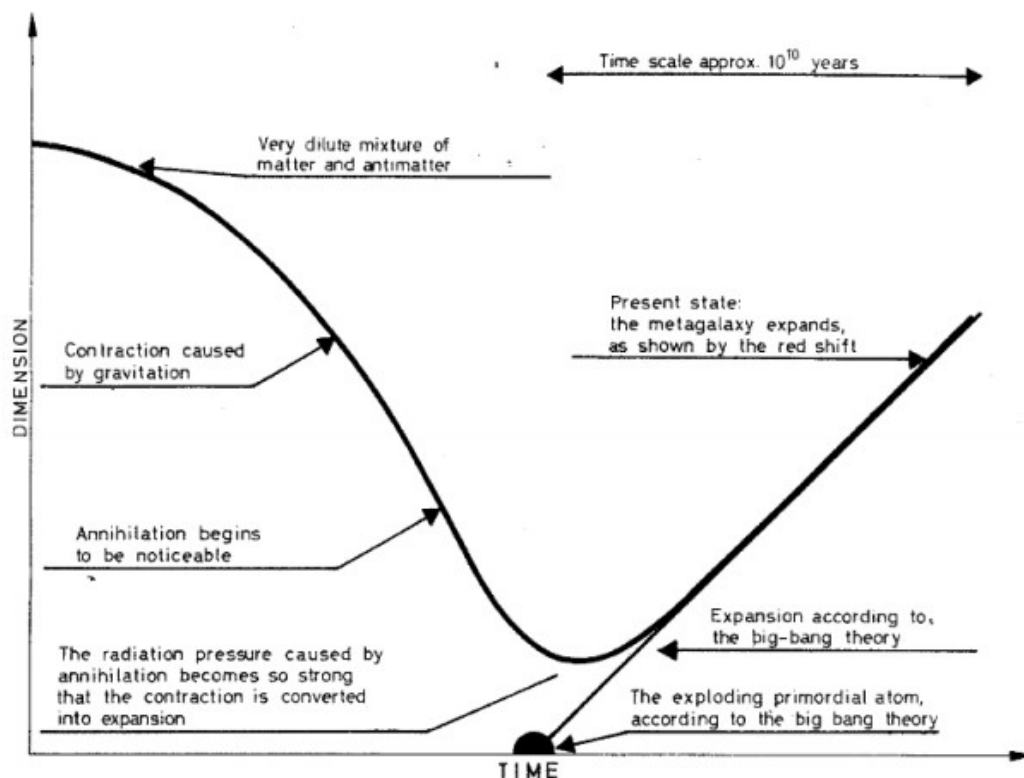


Figura 26: cenários possíveis para o Universo antes do Big-Bang

Esperamos dar um cenário, mesmo que bastante superficial, de concepções cosmológicas alternativas ao modelo padrão que buscam conformar-se aos recentes avanços empíricos, sejam relacionados à velocidade de expansão, à curvatura do espaço, ou à natureza da matéria e energia escura. Tais concepções parecem estar enraizadas em uma insatisfação com a singularidade inicial proposta pelo Big Bang que persiste, o que explica a radical distância entre tais modelos e o antigo Estado Estacionário, proposto por Hoyle, Gold e Boldi.

Parte dos atuais modelos consiste em inserir uma nova teoria na heurística positiva do programa atual. Outra parte, porém, parece mais inclinada a lançar dúvidas sobre alguns aspectos da bem consolidada relatividade geral, o que caracterizaria a tentativa de elaboração de um novo programa de pesquisa, de acordo com a reconstrução apresentada neste trabalho. Os trabalhos de Harp parecem estar inseridos em um programa de pesquisa alternativo, uma vez que lançam dúvidas sobre pressupostos básicos do núcleo, como a relatividade geral (a constância da velocidade das radiações eletromagnéticas no vácuo). As teses de Novello, por outro lado, se mostram inseridas em uma mesma tradição, com um mesmo núcleo em comum com as teorias do Estado estacionário e do Big Bang. Seu principal questionamento em relação à cosmologia tradicional está em associar o estado ocupado pelo universo há 14 bilhões de anos a uma singularidade ou a um “começo de tudo”, o que também não

foi defendido por Friedman, Lemaitre e, tampouco, por Hubble. A teoria de Novello é, no máximo, mais uma teoria situada na heurística positiva do programa de Friedman-Lemaitre.

Acreditamos que o chamado “modelo padrão” da cosmologia encontra-se ainda em fase bastante progressiva, o que não significa que deixem de existir importantes problemas ainda abertos, desafios observacionais para as próximas décadas e importantes perguntas a serem respondidas. As próximas décadas revelarão por quanto tempo esse programa de pesquisa inaugurado por Friedman e Lemaitre se revelará progressivo e quais próximas teorias moldarão o formato e dinâmica de seu cinturão de proteção.

6. 2 – SOBRE O ESTUDO DE CASO DA EPISTEMOLOGIA DE IMRE LAKATOS

O que observamos de mais “problemático” na repercussão deste trabalho após a interação com colegas filósofos e historiadores da ciência foi a “escolha” do núcleo duro do programa de Friedman-Lemaitre. Utilizamos as aspas para reforçar que a mera possibilidade de escolha já é, em si, uma questão que diverge opiniões entre estudiosos e comentadores da obra de Lakatos. Ao elaborarmos uma reconstrução racional é inevitável que façamos um recorte, mais ou menos completo, dentro de um universo muito vasto de trabalhos existentes, com diferentes relevâncias diante da comunidade científica. Contornar essa dificuldade nos parece ser algo que Kuhn se propõe a fazer, ainda que com alguma circularidade, com o papel que atribui à comunidade científica. O próprio Lakatos nos parece tangenciar essa questão ao elaborar o controverso conceito de “história internalista” da ciência, já discutido nos parágrafos anteriores.

uma comunidade científica, ao adquirir um paradigma, adquire igualmente um critério para a escolha de problemas que, enquanto o paradigma for aceito, poderemos considerar como dotados de uma solução possível. Em uma larga medida, esses são os únicos problemas que a comunidade admitirá como científicos ou encorajará seus membros a resolver (Kuhn 1975 [1962], p. 60).

Ao longo dessa dissertação defendemos exaustivamente que a leitura mais apropriada da cosmologia relativística em termos dos instrumentos concebidos por Lakatos envolva o programa de pesquisa de Friedman-Lemaitre, e não um programa de pesquisa de Einstein, uma vez que o mesmo tenha sido abandonado pelo próprio Einstein antes de qualquer avaliação empírica de seu modelo de universo fosse sequer concebida. Todavia, seria possível reconstruir essa história afirmando que o núcleo duro está contido no modelo de Einstein e que os modelos de Friedman e Lemaitre sejam as primeiras teorias contidas na heurística positiva do programa?

Ou ainda, o que consideramos ser uma objeção mais forte à reconstrução elaborada nesta dissertação: poderíamos descrever a disputa entre o modelo do Big-

Bang e o modelo do Estado Estacionário como uma competição entre programas de pesquisa distintos? Uma vez que Lakatos descreve majoritariamente a história da ciência em termos de competição entre programas de pesquisa, e não entre teorias dentro de um mesmo programa. Entendemos a força de tal objeção e suas razões, mas a ela está associada uma dificuldade que consideramos ser ainda mais imperativa. A “extensão” do núcleo deve, segundo Lakatos, ser perceptível em todas as teorias que compõem sua heurística positiva. Sendo mais específicos sobre o caso da cosmologia: nos parece nítido que a lei de Hubble está no núcleo do programa, demonstramos nos capítulos anteriores que a mesma é pressuposta em todos os trabalhos inseridos na defesa de ambos os modelos de universo: tanto na teoria do estado Estacionário quanto na teoria do Big-Bang.

Qualquer reconstrução alternativa implicaria na existência de programas distintos, mas com núcleos muito similares, com a equivalência na maioria de suas hipóteses fundamentais, o que geraria o estranho fenômeno de um programa que se divide em 2 “subprogramas” (CHIAPPIN e LEISTER, 2011) abrindo margem para discussões ainda mais amplas sobre a possibilidade de reconstruções distintas de um mesmo período da história da ciência. Defendemos que, em Lakatos, a extensão do núcleo é medida por TODAS aquelas hipóteses fundamentais cujas negações por parte de qualquer teoria implique, necessariamente, em abandonar o programa como um todo. A negação da lei de Hubble por parte de qualquer teoria, nos parece fortemente que a faria abandonar por completo o programa de pesquisa que vinha se formando desde as primeiras décadas do século XX.

Encerramos essa dissertação cientes de tal dificuldade e esperançosos em poder rever essa questão em trabalhos posteriores. A realização de estudos de caso é fundamental para consolidar e amadurecer as diferentes concepções de ciência, de progresso e de demarcação. É salutar que outros pesquisadores realizem investigações similares a essa em outras áreas da ciência e que, a cada vez mais, possamos refletir sobre os instrumentos teóricos concebidos por Lakatos e por tantos outros filósofos, que nos permitem compreender um pouco melhor esse estranho empreendimento que atende pelo nome de ciência.

Referências

ASSIS, André K.T. e NEVES, Marcos C.D. History of the 2.7K temperature prior to Penzias and Wilson. *Apeiron* v.3, n.2, p.79-87, 1995.

ARP, H, O Universo Vermelho. Desvios para o Vermelho, Cosmologia e Ciência Acadêmica (Editora Perspectiva, São Paulo, 2001).

CHIAPPIN, J. R. N & LEISTER, A. C. UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL DO PROGRAMA DE PESQUISA DO RACIONALISMO NEOCLÁSSICO: OS SUBPROGRAMAS DO

CONVENCIONALISMO/ PRAGMATISMO (POINCARÉ) E DO REALISMO ESTRUTURAL CONVERGENTE (DUHEM). *TRANS/FORM/AÇÃO: Revista De Filosofia Da Unesp*, 34(2), 103–134. 2011

KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1975 [1962] .

NOVELLO, M. *Do big bang ao universo eterno*. Editora Zahar. 2014 (ano da segunda reimpressão).

Apêndice 1

AS SOLUÇÕES DE FRIEDMANN, EINSTEIN E A CONSTANTE COSMOLÓGICA.

Optamos por omitir, ao longo deste capítulo, os pormenores matemáticos de certos resultados teóricos. Por outro lado, por considerar que possamos estar dialogando com estudantes e pesquisadores de astronomia, deixamos para este post scriptum um pequeno resumo dos cálculos relacionados a certos resultados apresentados ao longo do texto, com o intuito de tornar mais explícitos os resultados expostos anteriormente. A cosmologia do século XX se valeu de importantes resultados da matemática do século XIX. Diversos matemáticos, como os notáveis Carl Gauss e Georg Riemann, na tentativa de verificar se o 5º postulado de Euclides emerge como consequência dos outros 4, terminaram por inaugurar um novo ramo da matemática moderna que terá enormes implicações para a teoria da relatividade.

O desenvolvimento de geometrias alternativas à euclidiana, como a elíptica ou hiperbólica, rapidamente levou ao questionamento sobre qual seria a geometria do Universo, considerada até então plana (Figura 6). O Universo poderia ser essencialmente plano, aberto ou fechado: a resposta a essa questão depende de um conceito geométrico chamado *curvatura*. Na virada do século XIX para o século XX, essa questão, anteriormente despercebida, ganha força. A descoberta de qual dessas três geometrias se aplica à natureza física seria uma indagação essencialmente empírica, a ser resolvida pela observação. Ao desenvolver sua teoria geral da relatividade, Einstein deriva sua equação de campos, permitindo determinar a geometria de uma dada distribuição de massa e energia. A equação apresenta a seguinte forma:

$$E_{ik} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}$$

(Eq. 18)

Nessa expressão, E_{ik} representa o tensor de curvatura do espaço-tempo, enquanto, do lado direito, temos o tensor energia-momento (T_{ik}), o qual relaciona os efeitos de uma certa distribuição de massa e energia, na curvatura do espaço-tempo ao seu redor. A resolução dessa equação, considerando o universo como homogêneo e isotrópico (princípio cosmológico), possibilita a descrição de evolução dinâmica na forma de uma equação diferencial; seu resultado foi obtido independentemente por Friedman em 1922 e, por esse motivo, tornou-se conhecido como equação de Friedman:

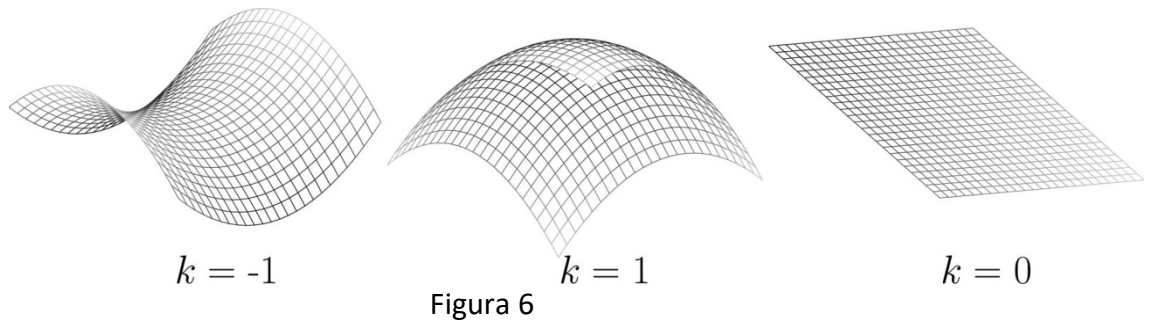
$$\left[\left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{8}{3} \pi G \rho \right] R^2 = -kc^2$$

(Eq. 19)

Nessa expressão, a constante K representa o valor da curvatura do universo e, com o auxílio da equação de Hubble, pode ser expressa por meio da equação 19, como:

$$K = \frac{1}{c^2} \left(\frac{8}{3} \pi G \rho - H_0^2 \right)$$

(Eq. 20)



Há um aspecto bastante curioso sobre a exposição matemática das equações que descrevem a expansão do universo. Estamos reconstruindo ao longo destas páginas um trabalho iniciado por Einstein, aperfeiçoado por Friedman e Lemaitre que chegam a equações equivalentes, até encontrar importante confirmação empírica com a lei de Hubble. Apenas após tais desenvolvimentos, os cosmólogos britânicos Edward Milne e Willian McCrea mostraram que as equações que descrevem tal expansão, poderiam ser derivadas diretamente da física de Newton (HARRISON, E. R. *Cosmology: the Science of the Universe*. Cambridge University Press. Cambridge. 1981) Evidentemente estamos nos referindo a um trabalho realizado à posteriori, de posse dos resultados finais, mas não deixa de ser uma bela demonstração do valor e da abrangência das leis da mecânica e da gravitação newtoniana.

Newton, ainda em vida, jamais chegou a tais resultados e tampouco poderia, uma vez que não assumiu como hipótese que o universo se encontre em um estado dinâmico. Apesar de obtermos uma dedução newtoniana, não fazemos mais do que resolver um problema análogo ao de nosso real interesse. Em cosmologia, alguns conceitos clássicos como força, energia e velocidade perdem parte de seus significados originais.

Tal como o clássico problema de um projétil disparado para cima, digamos que da superfície da Terra, é possível calcular e interpretar o significado de sua velocidade de escape: a velocidade inicial necessária para que o projétil abandone completamente o campo gravitacional e se mova livremente pelo espaço. Imaginemos agora que ao invés de tratarmos do problema de partículas que abandonam um corpo esférico, seja a própria esfera que realize um movimento de expansão. Se sua velocidade inicial de expansão for menor que aquela velocidade de escape, a própria gravidade da esfera vencerá sua expansão e a mesma acabará, por fim entrando em colapso. Tal problema, amplamente conhecido no século XX pode ser utilizado para obtermos as equações de Friedman.

A demonstração clássica da equação de Friedman pode ser obtida a partir da equação de Poisson ou, conseqüentemente, como expressão do princípio da conservação da energia mecânica (Eq. 21).

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dR_s}{dt} \right)^2 = \frac{GM_s}{R_s(t)} + U ,$$

Eq. 21

Nesta expressão temos as bem conhecidas equações para a energia cinética (E_{kin}) e para a energia potencial gravitacional de um corpo (E_{pot})

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \left(\frac{dR_s}{dt} \right)^2 ,$$

$$E_{\text{pot}} = -\frac{GM_s}{R_s(t)} ,$$

Escrevendo a massa de uma distribuição esférica de matéria, em função de seu volume e de sua densidade, e seu raio em termos de um fator de escala $a(t)$, muito utilizado para medir distancias em geometrias esféricas:

$$M_s = \frac{4\pi}{3} \rho(t) R_s(t)^3 .$$

$$R_s(t) = a(t) r_s$$

Substituindo estas expressões na equação 21 obtemos:

$$\frac{1}{2} r_s^2 \dot{a}^2 = \frac{4\pi}{3} G r_s^2 \rho(t) a(t)^2 + U .$$

Que também pode ser reescrito como:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) + \frac{2U}{r_s^2} \frac{1}{a(t)^2} .$$

Eq. 22

Essa equação, como citado diversas vezes ao longo deste capítulo, foi obtida de forma equivalente e independente por Friedman e Lemaitre. Einstein, movido pela convicção de que o universo deveria encontrar-se em equilíbrio estático, inseriu um termo ad hoc com o intuito de neutralizar a atração gravitacional entre as estrelas de modo que as mesmas possam configurar-se em repouso. Esse termo, jamais tornado suficientemente claro por ele, ficou conhecido como “constante cosmológica” (Λ) e interpretado como uma força de repulsão ou, como muitos descrevem, uma “anti-gravidade”.

Se inserirmos, como fez Einstein, um termo adicional na equação de Poisson:

$$\nabla^2 \Phi + \Lambda = 4\pi G \rho$$

Eq. 23

A derivação da equação de Friedman a partir da equação de campos de Einstein (conferir RYDEN, 2016) apresenta a seguinte expressão:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \varepsilon - \frac{\kappa c^2}{R_0^2 a^2} + \frac{\Lambda}{3} .$$

Eq. 24

Esta equação pode ser combinada com a primeira lei da Termodinâmica para um fluido em expansão, que pode ser expressa por:

$$\dot{\epsilon} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\epsilon + P) = 0$$

Combinando as duas expressões, obtemos a versão modificada da equação de Friedman:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\epsilon + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

Equação 25

Nesta nova expressão, podemos perceber que a inclusão do termo Λ corresponde à adição de mais um termo de energia potencial dado pela seguinte expressão:

$$\epsilon_{\Lambda} \equiv \frac{c^2}{8\pi G}\Lambda$$

Se Λ permanece constante no tempo, o mesmo deve ocorrer com sua densidade de energia ϵ , portanto, a primeira lei da termodinâmica nos impõe que:

$$P_{\Lambda} = -\epsilon_{\Lambda} = -\frac{c^2}{8\pi G}\Lambda$$

Assim determinamos o termo adicional de pressão radial gerado pela inclusão deste termo na equação de Poisson. Dando um passo a mais, em um hipotético universo estático podemos impor que sua velocidade de expansão e aceleração sejam ambas nulas:

$$0 = -\frac{4\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda}{3}$$

$$0 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{\kappa c^2}{R_0^2} + \frac{\Lambda}{3} = 4\pi G\rho - \frac{\kappa c^2}{R_0^2}$$

O que levou Einstein a fazer uma estimativa do raio do universo

$$R_0 = \frac{c}{2(\pi G\rho)^{1/2}} = \frac{c}{\Lambda^{1/2}}$$

Equação 26

APÊNDICE 2

A DIFICULDADE COM A ESCALA COSMOLÓGICA DE TEMPO

Uma questão muito séria, com a qual a nascente cosmologia se viu obrigada a interagir envolveu a idade do Universo. No início do século XX a idade da Terra já estava bem estabelecida pelos recentes avanços no ramo da geologia. (TORT, 2013) O trabalho de Hubble permitiu aos astrônomos a primeira estimativa da idade do universo. Todavia os cálculos apontavam uma idade muito inferior à do nosso planeta, o que impôs uma enorme dificuldade para os defensores da futura teoria do Big Bang. Enquanto a idade do universo fora estimada em aproximadamente 1,8 bilhões de anos, a idade da Terra era conhecida como cerca de quatro bilhões de anos com boa precisão. Uma estimativa mais superficial pode ser facilmente compreendida através da curva empírica entre distancias e velocidades apresentadas com a lei de Hubble-Lemaitre. A idade do universo a partir do coeficiente angular da reta.

$$V = H_0 \cdot d \quad (12)$$

Em uma primeira aproximação, onde consideramos movimentos uniformes, o inverso do coeficiente linear dessa reta (conhecido como constante de Hubble) equivale à idade do universo:

$$V = \frac{d}{\Delta t} \quad (13)$$

Igualando as expressões (13) e (12), temos uma expressão para a idade do universo:

$$\Delta t = \frac{1}{H_0} \quad (14)$$

Esse cálculo descrito acima parte da premissa de que a expansão do Universo ocorra à velocidade constante, o que não é verdade, contudo, pode servir como estimativa inicial da ordem de grandeza de sua idade. Podemos refazer as contas sem essa hipótese, com base na lei da conservação da energia e considerando que o Universo seja dotado de geometria plana, uma importante questão no âmbito da relatividade geral (conferir OLIVEIRA, 2010). Se escrevermos a velocidade de expansão como a derivada da posição em relação ao tempo:

$$V = dr / dt \quad (15)$$

Na expressão da energia mecânica:

$$\frac{1}{2} m (dr / dt)^2 = GMm / r \quad (16)$$

$$\frac{dr}{dt} = \left(\frac{2GM}{r}\right)^{1/2}$$

E, portanto, podemos reescrever da seguinte forma:

$$r^{1/2} dr = (2GM)^{1/2} dt \quad (17)$$

Integrando de ambos os lados e adotando $r = 0$ para $t = 0$, obtemos:

$$\frac{2}{3} r^{3/2} = (2GM)^{1/2} t \quad (18)$$

De acordo com a lei de Hubble, podemos escrever:

$$\frac{dr}{dt} = H_0 \cdot r \quad (\text{para } t = t_0)$$

Substituindo os valores de (12) e de (17):

$$\frac{dr}{dt} = H_0 \cdot r = \left(\frac{2GM}{r}\right)^{1/2} \quad (19)$$

Que também pode ser expresso por:

$$(2GM)^{1/2} = H_0 r^{3/2}$$

Substituindo, neste ponto, a expressão (18):

$$\frac{2}{3} = H_0 \cdot t$$

e, portanto:

$$t = \frac{2}{3H_0} \quad (20)$$

Para os valores mais recentes da constante de Hubble, obtemos $t = 13,8$ bilhões de anos, aproximadamente. Todavia, as primeiras estimativas para a idade do universo foram em torno de 4 bilhões de anos. A dificuldade residia no método empregado por Hubble para determinar as distâncias nebulares. Uma importante menção deve ser feita a dois astrônomos que contribuíram para solucionar o problema da escala de tempo. O primeiro é Walter Baade, imigrante alemão residente nos Estados Unidos, que trabalhou com Hubble no observatório de Monte Wilson e, durante a segunda guerra mundial, trabalhou na calibração da distância à galáxia de Andrômeda, favorecido pelos blecautes em Los Angeles durante os anos de guerra. Na década de 40 estava se tornando claro para a comunidade internacional de astrônomos que existem duas classes de estrelas variáveis cefeidas: população II (mais velhas) e população I (maiores temperaturas, menor idade e formadas a partir de explosões de estrelas da população I). Sem saber dessa distinção em 1929, Hubble cometera o erro

nas estimativas de brilhos intrínsecos de estrelas variáveis na galáxia de Andrômeda, levando considerar que a galáxia se encontra demasiadamente próxima de nós.

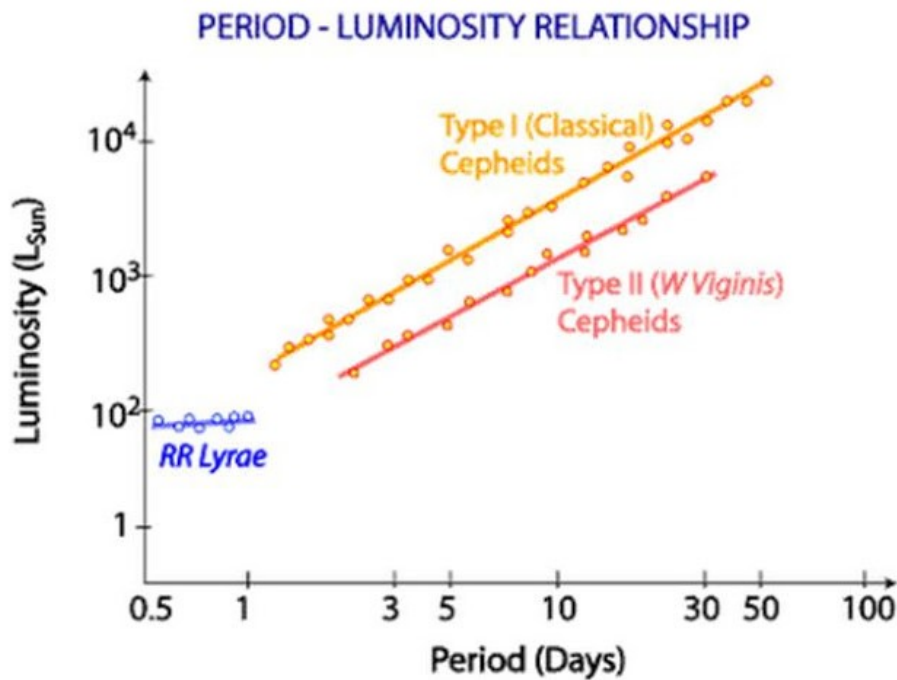


Figura 4: distinção entre variáveis de tipo I e tipo II

As calibrações de Baade elevaram a idade do universo para 3,6 bilhões de anos, deixando de ser incompatível com a idade da Terra. Valor ainda bastante suspeito do ponto de vista cosmológico, uma vez que o modelo do Big Bang prevê um importante intervalo de tempo entre a origem do universo e a formação de galáxias, estrelas e planetas. Uma nova e importante recalibração na idade do universo foi realizada pelo segundo astrônomo que gostaríamos de fazer menção: o aluno de Walter Baade chamado Alan Sandage.

Sandage observou que em trabalhos tomados como referência haviam confundido regiões conhecidas como HII, que são compostas por vastas nuvens de hidrogênio que absorvem grande quantidade de luz e se aquecem até cerca de 10 mil graus, com estrelas genuínas. As estimativas de distância para galáxias mais longínquas assumem que as estrelas mais brilhantes de diferentes galáxias possuem o mesmo brilho. A estimativa em si permaneceu, mas a confusão entre estrelas e regiões de HII foi desfeita por Sandage. Suas correções elevaram as estimativas da idade do universo para o intervalo entre 10 e 20 bilhões de anos, eliminando a dificuldade na escala de tempo. O valor da constante de Hubble é ainda hoje constantemente atualizado e refinado à luz de novos desenvolvimentos astronômicos e a idade do universo encontra-se atualmente em um valor próximo de 13,8 bilhões de anos.