

CONTROVÉRSIAS NA COSMOLOGIA¹

¹Alexandre Bagdonas Henrique, ²Cibelle Celestino Silva

¹Universidade de São Paulo, Instituto de Física, alebagonas@gmail.com,

²Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, cibelle@ifsc.usp.br

1 Introdução

Neste texto serão apresentadas algumas controvérsias envolvendo teorias cosmológicas que ocorreram ao longo do século XX, especialmente entre as décadas de 1940 e 1970. Vamos fornecer subsídios para uma melhor compreensão do processo de construção dos modelos cosmológicos que foram apresentados de maneira lúdica no texto *Big Bang Brasil*²

Inicialmente, vamos discutir brevemente o que é cosmologia e alguns sentidos possíveis atribuídos ao termo *universo* (seção 2). Em seguida vamos apresentar dois tipos de modelos cosmológicos: o universo estático (seção 3) e o universo em expansão (seção 4). Dentre os vários modelos de universo em expansão, estão as duas teorias rivais envolvidas na controvérsia cosmológica das décadas de 1950 a 1970: a teoria do Big Bang (seção 5) e a teoria do Estado Estacionário (seção 6). Nas próximas atividades serão discutidos aspectos filosóficos e religiosos que influenciaram esta controvérsia.

2 O que é cosmologia?

Durante muito tempo a cosmologia esteve relacionada às chamadas “perguntas fundamentais”, como: Que tipos de coisas existem no universo? O universo foi criado por um ser inteligente? Existe um sentido para a vida ou para o universo? Por que o universo existe? Por que algo deve existir? Por que as coisas são como são? De onde surgiu o universo? Ele vai existir para sempre? Quase todos os povos tentaram responder o que é o homem, o que é o universo e qual o lugar do homem no universo. São perguntas ousadas, para as quais há uma ampla possibilidade de formas de buscar respostas.

Filósofos, historiadores, cientistas, teólogos e estudiosos em geral estão refletindo, debatendo a respeito dessas questões ao longo dos últimos séculos e é provável que nunca se chegue a respostas definitivas. Num sentido amplo, a cosmologia é a união das ciências com a filosofia, as religiões e as artes, sendo talvez tão antiga quanto a própria humanidade. Numa perspectiva humanista, a vontade de entender as origens, a história da vida, da terra e do universo, é uma das características exclusivas dos seres humanos, o que faz com que o interesse pela cosmologia seja considerado como uma das características que nos diferenciam dos outros animais (Kragh 1996, p. ix).

¹ Este texto é parte da pesquisa de mestrado “Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da história da cosmologia”, orientada pela profa. Cibelle Silva no Programa Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo.

² Adaptado a partir de <http://ceticismo.wordpress.com/2007/10/24/big-bang-brasil/>.

Esta cosmologia antiga, que era mais próxima das religiões e dos mitos, sofreu grandes transformações conforme foram surgindo novas formas de responder a estas questões.

Há mais de dois mil anos, em alguns lugares do mundo, como a Grécia e a Índia, apareceu gradualmente um pensamento filosófico que procurou dar uma explicação para o mundo sem utilizar mitos. Ele propôs novas idéias, modificando ou mesmo abandonando a tradição religiosa. Por fim, com o desenvolvimento da ciência, apareceu outro modo de estudar a evolução do universo (Martins, R. 1994, p.1)³.

Com o surgimento de novas teorias físicas e com o aperfeiçoamento dos aparatos tecnológicos que são utilizados nas observações astronômicas, a cosmologia se transformou bastante, passando gradualmente a ser considerada uma ciência. Nas teorias cosmológicas, o universo é modelado como uma entidade única, cujas variáveis estudadas são grandezas físicas, como, por exemplo, pressão, densidade e energia. A cosmologia é a ciência que estuda os fenômenos em grandes escalas, o estudo do universo como um todo. Os avanços da cosmologia nos últimos anos permitiram a consolidação do chamado *modelo padrão da cosmologia*, que leva em conta aspectos de diversas áreas da física, como a relatividade geral, a física atômica, quântica, nuclear, de partículas elementares e da gravitação.

Sendo assim, a partir desta seção, utilizaremos o termo *cosmologia* com o sentido mais restrito de cosmologia científica, como uma das partes da astronomia que utiliza modelos físicos e matemáticos para estudar o universo em larga escala.

2.1 Modelos de universo

O objeto de estudo da cosmologia é o universo como um todo. Geralmente os cientistas costumam utilizar o termo universo referindo-se a totalidade das entidades físicas existentes, mas há vários sentidos possíveis para a palavra *universo*.

Neste trabalho decidimos utilizar o termo com “u” minúsculo, seguindo o conselho do professor Edward Harrison, que afirma que

A palavra grandiosa *Universo* (...) quando utilizada sozinha, sem a especificação de que modelo de Universo temos em mente, pode passar a impressão de que o Universo é uma entidade conhecida (Harrison 1981, p. 9).

O Universo com o significado de tudo o que existe, seja ou não conhecido pelo homem, deve ser único. Neste sentido, não é possível falar em vários Universos. O Universo com “U” maiúsculo costuma se referir à realidade, a partir da qual a nossa interação gera uma base empírica sobre a qual os diferentes modelos (teóricos) são construídos (Videira & Ribeiro 2004, p. 532). Já o termo *universo*, com “u” minúsculo, se refere a um *modelo de universo*, criado num certo contexto, modificado pelos seres humanos e que um dia poderá ser eventualmente descartado. Sendo assim, podemos

³ Para saber mais sobre as cosmologias de diferentes povos na Antiguidade, recomendamos os primeiros capítulos do livro *O Universo: teorias sobre sua origem e evolução* (Martins R. 1994).

definir a cosmologia como o estudo dos universos. Isso não quer dizer que existam vários universos de fato, numa postura realista⁴. Trata-se de um uso da palavra em que o universo existe como modelo, cada criador faz seu próprio universo, logo há vários universos.

Numa visão realista, o universo é tudo o que existe. Já numa visão anti-realista, ou instrumentalista o universo é tudo o que podemos conhecer, pois não temos acesso à realidade última. Numa visão extrema, que pode ser denominada nominalista, o universo seria *apenas uma idéia*, um nome, ou uma invenção arbitrária dos seres humanos, sem qualquer relação segura com a realidade. Outro extremo é o realismo ingênuo, que consiste em acreditar que os modelos cosmológicos são a própria realidade, sem perceber que toda teoria científica é uma representação da natureza e não a própria natureza.

3 O universo estático

Na primeira parte do texto *Big Brasil* é apresentado o modelo cosmológico estático, que foi desenvolvido por Albert Einstein no fim da década de 1920. Logo no começo do texto, Einstein conta para Bial sobre como ele teria começado a desenvolver seu modelo cosmológico:

Einstein - Bem, tudo começou em 1915, quando eu desenvolvi minha teoria da relatividade geral. Ela revelou uma coisa muito incômoda, que deixou todo mundo meio perturbado aqui...

Bial - Vish, alemão, o que você aprontou aí?

Einstein - Você sabe, na relatividade geral eu costurei espaço, tempo, matéria, energia e gravidade, tudo no mesmo pacote. Aí, sabe como é, sem muita coisa para fazer aqui dentro da casa, decidi iniciar uma continha. Coisa simples, para flexionar os músculos cerebrais -- eu adoro malhar, sabe?

O texto brinca com uma imagem comum que se faz dos cientistas: seriam gênios excêntricos e criativos, que quando estão “sem muita coisa pra fazer” têm insights reveladores e acabam construindo novas teorias. Essa abordagem divertida pode gerar alguns problemas se for levada para a sala de aula no ensino de ciências, pois pode conduzir a visões distorcidas sobre a natureza da ciência, dando a impressão de as teorias científicas surgem prontas nas cabeças dos “grandes gênios” (Martins, R. 2006, p. xxii).

Por isso, vamos apresentar algumas contribuições de outros cientistas que levaram a construção do modelo cosmológico estático, mostrando que as contribuições de Einstein para a cosmologia foram importantes, mas que ele não foi nem o único nem o primeiro cientista a pensar neste problema. Vamos apresentar alguns modelos de universos

⁴ Independente do sentido atribuído ao termo universo, é uma questão aberta na cosmologia a possibilidade da existência de vários universos isolados um dos outros. Para mais detalhes ver Kragh 2009.

estáticos, desde uma breve apresentação dos modelos newtonianos do século XVI até os primeiros modelos relativísticos no século XX.

3.1 A cosmologia newtoniana

A grande maioria dos modelos cosmológicos atuais tem como premissa básica a hipótese de que a interação entre corpos do universo é de origem gravitacional. Hoje, a teoria mais aceita para explicar essa interação, utilizada em quase todas as teorias cosmológicas, é a relatividade geral. Contudo, mesmo antes de seu desenvolvimento, houve algumas explicações do comportamento do universo como um todo utilizando a gravitação newtoniana.

Segundo a teoria formulada por Isaac Newton (1643-1727), a gravidade é uma força de atração entre corpos que têm massa. No entanto, se a força da gravidade é sempre atrativa, é um problema explicar a estabilidade do universo. O que impede o colapso gravitacional de toda a matéria no universo?

Newton já havia percebido este problema. Numa tentativa de solução, ele propôs que o universo seria infinito, com infinitas estrelas cercando certo corpo. Assim, a força gravitacional total se anularia.



Figura 1: Modelo de universo estático e homogêneo⁵

Na figura acima, vemos que no modelo newtoniano a distribuição de estrelas seria homogênea, já as distâncias entre elas seriam iguais, assim como a massa de cada estrela. Neste modelo infinito de universo, a soma das forças gravitacionais sobre cada estrela é nula, de forma que o universo possa ser estático⁶.

Agora imagine que, por um motivo qualquer, uma estrela saia do lugar e se choque com outra, formando uma estrela com o dobro da massa. Essa estrela tenderá a atrair mais as estrelas ao redor. Essa pequena instabilidade já seria suficiente para fazer com

⁵ Esta figura foi retirada de: http://www.asterdomus.com.br/Artigo_porque_a_noite_e_escura.htm, acesso em janeiro de 2010.

⁶ O modelo de universo estático é *em média* estático. Não quer dizer que não existam quaisquer movimentos de corpos celestes (Waga 2005, p. 161).

que as estrelas fossem se agrupando cada vez mais e o universo acabaria entrando em colapso.

Alguns autores propuseram alterações na fórmula matemática da força gravitacional, como os teóricos alemães Carl Von Neuman e Hugo Von Seeliger (1849 - 1924), que no fim do século XIX propuseram uma queda exponencial da força gravitacional com a distância.

$$F = \frac{GMm}{d^2} e^{-\Lambda r}$$

Estes autores propuseram de forma independente que o universo seria infinito (seguindo a tradição newtoniana), mas que a quantidade de matéria seria finita. Seeliger, que era um matemático, estudou contagens estatísticas de estrelas, chegando à conclusão de que a densidade de estrelas tenderia a zero para distâncias maiores do que aproximadamente 8000 anos luz do nosso Sistema Solar, ou seja, que praticamente só existiria matéria nas nossas vizinhanças do universo. As regiões mais distantes seriam vazias (Herrera 2002, p. 46).

Este tipo de universo ganhou suporte observacional com os trabalhos do astrônomo alemão Jacobus Kapteyn (1851-1922), que a partir de uma série de trabalhos em 1910 chegou à conclusão de que universo visível (ou seja, contendo estrelas) seria idêntico a Via Láctea. Não se acreditava que existissem estrelas além da nossa vizinhança (Kragh 1996, p. 6).

Dessa forma, vemos que havia uma cosmologia científica antes do século XX, baseada na gravitação newtoniana, mas esta era bem diferente da cosmologia atual. Duas diferenças fundamentais foram a consolidação do conceito moderno de galáxia (que será descrita na seção 4.1) e a criação de uma nova teoria para a gravitação: a relatividade geral desenvolvida pelo físico alemão Albert Einstein (1859 -1955), que será apresentada na próxima seção.

3.2 Einstein: um universo finito e estático

A física newtoniana descreve com sucesso o movimento dos corpos nas situações corriqueiras da vida cotidiana, como os choques de bolas de bilhar e queda de objetos na superfície terrestre. Ela também permite a descrição do movimento dos corpos celestes, como as órbitas dos planetas, asteróides e cometas ao redor do Sol. Contudo, no início do século XX foram criadas as teorias da relatividade, que mostraram os limites da física newtoniana: nas situações que envolvem altas energias (grandes velocidades e massas) as explicações dos movimentos dos corpos envolvem noções bastante diferentes das noções do senso comum sobre o espaço, o tempo e a matéria.

A teoria da relatividade restrita foi desenvolvida a partir dos estudos desenvolvidos por diversos cientistas, sendo os mais importantes Hendrik Lorentz (1853-1928), Henri Poincaré (1854-1912) e Albert Einstein (1879-1955). A primeira teoria da relatividade

não tinha nenhuma relação direta com o estudo da gravitação. Ela surgiu a partir de estudos sobre a luz, sobre a eletricidade e o magnetismo (Martins, R. 1994, p. 134).

Einstein partiu de dois postulados:

1. As leis físicas são as mesmas em todos os referenciais inerciais;
2. A velocidade da luz é constante.

A partir destes dois postulados foram deduzidas uma série de resultados surpreendentes. Dentre estes, a noção de que as medidas de tempo e espaço dependem da velocidade do observador. Os conceitos newtonianos de espaço e tempo absolutos foram substituídos por um novo conceito: o “espaço-tempo”. A teoria da relatividade restrita colocava em cheque a força newtoniana como uma entidade que se propaga instantaneamente, pois estabelece um limite máximo para as trocas de informações entre dois corpos, dado pela velocidade da luz.

A relatividade restrita só é válida em referenciais inerciais. A partir de 1907, Einstein buscou generalizar a teoria da relatividade para todos os referenciais, incluindo a ação da gravidade. Em 1915, publicou a chamada teoria da relatividade geral, que se consolidou como uma nova visão sobre a gravidade. O conceito newtoniano de força gravitacional, que se propagaria instantaneamente, foi substituído pela ideia de que a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço-tempo, moldado pela matéria e pela energia que nele estão contidas.

Não se pode dizer que Einstein inventou a cosmologia⁷, mas ele contribuiu para o estabelecimento das bases matemáticas necessárias para os desenvolvimentos seguintes: uma nova teoria física para o tratamento de fenômenos gravitacionais que ficou conhecida como relatividade geral (Kragh 1996, p.6; Videira & Ribeiro 2004, p. 520).

A partir de 1917, Einstein desenvolveu uma teoria cosmológica, tentando explorar os resultados de suas equações da relatividade geral para o universo como um todo. No entanto, persistia o problema sobre a estabilidade do universo, que já havia sido percebido por Newton.

Até a década de 1920, o espaço era normalmente visto com um lugar vazio, sereno e estático. As estrelas se distribuíam pelo universo, com planetas girando ao redor do Sol. Mas de acordo com o modelo de Einstein, o universo não poderia ser *estático*. Para resolver este problema ele introduziu em suas equações um fator chamado *constante cosmológica*, que representa um tipo de repulsão, equilibrando a atração gravitacional e permitindo a existência de um universo estático, em equilíbrio.

⁷ Neste trabalho vamos estudar a cosmologia desenvolvida após a Relatividade geral, com apenas uma leve introdução aos problemas cosmológicos abordados a partir da física newtoniana. Para maiores detalhes sobre a cosmologia pré-relativística ver (Kragh 1996, p. 3-7; North 1965).

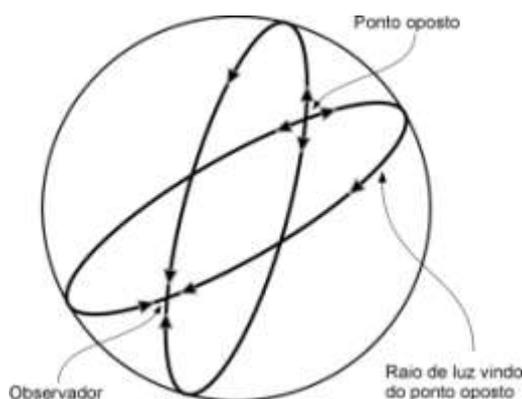


Figura 2: Espaço curvo no modelo de Einstein⁸

O universo de Einstein era finito e ilimitado, num espaço curvo fechado. A figura acima mostra que um raio de luz emitido por um observador na Terra vai viajar por todo o universo (em uma geodésica) e vai acabar voltando ao ponto de partida. Vemos assim que o espaço curvo tridimensional do universo de Einstein é finito, mas não tem um limite ou fronteira: não se chega nunca ao lugar onde ele termina, por isso é ilimitado.

A parte I do texto Big Bang Brasil termina apresentado de maneira bastante superficial as controvérsias envolvendo a introdução da constante cosmológica de Einstein nas equações da relatividade geral:

Einstein - Pois é, o que minhas contas mostraram é que o universo não podia estar parado -- ele devia estar ou se contraindo, ou se expandindo.

Bial - Que absurdo, alemão!

Einstein - Concordo. Tanto que decidi mudar a teoria no ano seguinte para impedir isso, incluindo uma letra lambda nas equações, de modo a fazer com que o universo ficasse paradinho, do jeito que devia...

Friedmann - Mas alemão, as suas contas estavam certas! **A equação original era a mais bonita**, você deveria ter acreditado no que ela sugeria... eu mesmo conferi os cálculos.

(...)

Einstein - O nosso querido padre belga devia ficar mais no confessionário, isso sim. Depois de fazer cálculos com base na minha relatividade, **em vez de adotar a versão com o lambda**, ele apostou na versão original da teoria e agora defende a idéia de que o universo inteiro nasceu de algo como um "átomo primordial", que explodiu e deu origem a tudo que vemos. Uma bobagem.

Para muitos cosmólogos, a introdução de dessa constante foi uma modificação artificial, não muito bem recebida. Einstein admitiu que a introdução da constante não era justificável pelo conhecimento cosmológico da época. Por outro lado, para outros autores, introduzir artificialmente essa constante era o mais sensato a se fazer, já que o

⁸ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p. 294.

universo parecia ser estático. De forma geral, a constante cosmológica acabou sendo admitida como uma possibilidade a ser investigada (Martins, R. 1994, p. 136, Kragh 1996, p.9).

As falas marcadas em negrito acima dão a entender que Friedmann e Lemaître (personagens que serão apresentados na seção 3, sobre o universo em expansão) seriam contra a introdução da constante cosmológica, por terem defendido os universos em expansão. Na entanto, ele e outros autores também utilizaram a constante cosmológica em seus trabalhos, mesmo para universos em expansão. Um dos autores que também fez uso da constante cosmológica e criou um modelo de universo estático foi W. de Sitter.

3.3 W. de Sitter: um universo estático e vazio

Em 1917, dois anos depois da publicação da teoria da relatividade geral, Einstein publicou seu famoso modelo de universo com a constante cosmológica, acreditando que sua solução seria a única possível. Contudo, no mesmo ano Willem de Sitter (1872-1934), um matemático, físico e astrônomo holandês, publicou outra solução para as equações de Einstein, que hoje é conhecida como modelo de universo de W. de Sitter. Trata-se de um universo semelhante ao de Einstein: estático e finito⁹, porém sem matéria (Kragh 2004, p. 74).

Pode parecer pouco útil para entender o universo real um modelo de universo sem matéria. O modelo de W. de Sitter era visto como uma abstração matemática, um modelo aproximado para o universo real. A densidade de matéria no universo é muito pequena, de forma que considerar essa densidade nula pode ser uma aproximação razoável. As idealizações e simplificações são muito presentes nas teorias físicas em geral, principalmente na cosmologia.

A solução de De Sitter também envolvia a constante cosmológica, cujo efeito seria equivalente a uma força repulsiva, numa analogia newtoniana. De Sitter mostrou que em seu modelo cosmológico sem matéria, quando partículas materiais de teste estivessem presentes, elas se espalhariam com uma velocidade proporcional à distância (Waga 2005, p. 158). Este efeito ficou conhecido como *Efeito De Sitter*.

No entanto, De Sitter não interpretou esse efeito como se os corpos estivessem *realmente* se afastando por causa da expansão do espaço. Para ele isso era um efeito particular da métrica do espaço-tempo descrevendo esse tipo de universo. Ele escreveu:

As linhas espectrais de várias nebulosas distantes devem, portanto, ser sistematicamente desviadas em direção ao vermelho, dando origem a uma velocidade radial positiva (De Sitter apud Kragh 1996, p. 12).

⁹ No modelo de De Sitter as unidades de comprimento crescem sem limite quando a distância ao centro tende ao infinito. O universo permanece finito, no sentido de que é possível percorrê-lo em um tempo finito (como De Sitter escreve, “o universo é finito em medida natural (Herrera 2002, p. 59).

Einstein criou a constante cosmológica para manter o seu modelo de universo estático. De Sitter também manteve tanto a constante cosmológica, quanto a imposição de que o universo deva ser estático, apesar do estranho “efeito De Sitter” indicar que as galáxias podiam estar se afastando, ele utilizou o termo “velocidade fictícia”, indicando que adotava uma concepção instrumentalista para esse afastamento. Já Friedmann, Lemaître e Eddington, alguns anos depois, continuaram utilizando a constante cosmológica, mesmo para universos em expansão.

4 O universo em expansão

Nesta seção vamos apresentar os trabalhos destes teóricos, assim como as evidências observacionais estudadas por Hubble e seus colaboradores, que permitiram a consolidação dos modelos de universo em expansão a partir da década de 1930.

Como em 1917 estava acontecendo a Primeira Guerra Mundial, a relatividade geral não ficou muito conhecida fora da Alemanha. No entanto, uma vez que a Holanda manteve-se neutra durante a guerra, W. de Sitter pôde manter contato com Einstein e agiu como um diplomata, divulgando a relatividade geral para os países de língua inglesa. Além de ser holandês, W. de Sitter tinha prestígio na comunidade científica da época, fazia parte da Royal Society de Londres (Kragh 1996, p. 11).

Alguns pesquisadores continuaram a investigar as soluções das equações de Einstein. Dentre eles, podemos citar Friedmann, Lemâitre, Eddington, Robertson e Tolman, que serão apresentados nas seções posteriores. Eles investigaram outras possibilidades de universos não-estáticos.

Inicialmente apresentaremos as teorias de Friedmann, Lemaître e Eddington, que consistiram em modelos teóricos de universos em expansão, assim como as evidências experimentais que embasaram estes modelos, discutidas a partir dos trabalhos de Hubble e seus colaboradores.

4.1 Friedmann: universos em expansão e contração

O matemático russo Alexander Friedmann (1888-1925) publicou seus trabalhos em 1922, portanto numa época em que a ideia de um universo em expansão não era bem vista pela comunidade científica. Ele investigou soluções das equações da relatividade geral, mostrando que havia várias possibilidades de universos em expansão ou contração.

A figura abaixo ilustra três tipos básicos de modelos cosmológicos:

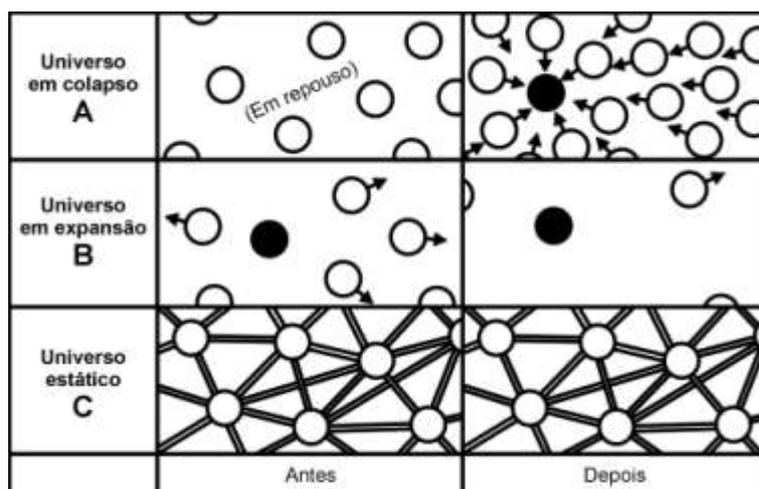


Figura 3: Universo em contração, em expansão e estático¹⁰

- A) universo em colapso: as distâncias entre os corpos diminuem com o tempo
- B) universo em expansão: as distâncias entre os corpos aumentam com o tempo
- C) universo estático ou estacionário: as distâncias entre os corpos são constantes

Neste texto, representaremos graficamente a evolução temporal de alguns dos modelos cosmológicos. No eixo horizontal dos gráficos será representado o tempo e no eixo vertical o fator de escala, que é uma grandeza cosmológica que relaciona medidas de distância e está relacionado com o tamanho do universo.

Em cosmologia, há várias definições diferentes para distâncias e muitas delas não são intuitivas. Normalmente, estamos acostumados com a noção de um espaço plano, euclidiano, em que a menor distância entre dois pontos é uma reta. No caso do espaço-tempo de quatro dimensões da relatividade geral, esses conceitos ficam consideravelmente mais complicados¹¹.

O gráfico abaixo mostra o universo de Einstein, que é instável. Sem a introdução da constante cosmológica ele pode entrar em colapso, contraindo-se até atingir um volume nulo (o chamado Big Crunch ou singularidade), ou se expandir, de forma que as distâncias entre os corpos aumentem com o tempo.

¹⁰ Esta figura foi retirada de *Creation of the Universe* (Gamow 1950), um livro de divulgação científica escrito pelo cosmólogo George Gamow, que fez uso dos resultados estudados por Friedmann. Gamow é considerado junto com Friedmann e Lemaître um dos principais autores que contribuíram para a formação do chamado modelo padrão da cosmologia, também conhecido como teoria do Bang, que será apresentado na seção 5.5.

¹¹ Contudo, o fator de escala não é exatamente o “raio” do universo. Para uma definição mais precisa desta grandeza ver Harrison 1981, p. 219. Para entender alguns dos tipos de distância em cosmologia, como a distância luminosidade e distância própria, ver (Waga 2000, p. 166). Para o conceito de distância comóvel ver Harrison 1981, p. 216.

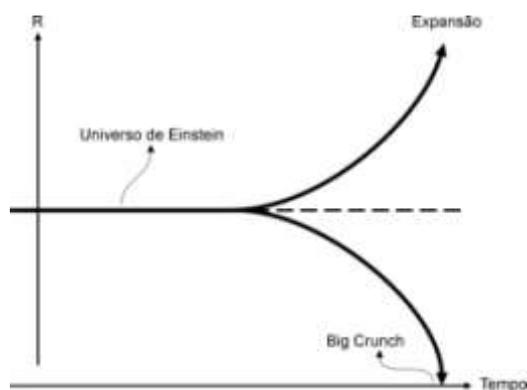


Figura 4: Universos em expansão e contração¹²

Como hoje a ideia de que o universo está em expansão é praticamente uma certeza para boa parte da comunidade científica, é tentador ver Friedmann como um visionário¹³, olhando seu trabalho com olhos modernos. Contudo, é prudente tomar cuidado para não deixar-se influenciar pelo conhecimento da ciência atual no estudo do passado (Kragh 1996, p. 25).

As obras de Friedmann são muito mais matemáticas do que físicas. Ele estava interessado em explorar as soluções das equações de Einstein, mas não em interpretá-las fisicamente. Tanto que em seu trabalho há soluções cuja densidade de matéria é negativa, que não tem significado físico. Ele acreditava que o conhecimento disponível na época não seria suficiente para decidir quais das possíveis soluções seriam correspondentes ao nosso universo. Assim, não se pode dizer que Friedmann propôs *o* universo em expansão, mas sim *um* universo em expansão (Kragh 1996, p. 27).

Em 1925, Friedmann já era considerado físico teórico renomado em Leningrado (hoje chamada de São Petersburgo), na URSS. Fez um vôo de balão para estudar a alta atmosfera que atingiu 7400m, o recorde soviético até então (Waga 2005, p. 158; Kragh 1996, p. 23). Segundo George Gamow, que era um jovem estudante nessa época, bastante influenciado pelas palestras de Friedmann na Universidade de Leningrado, ele morreu de pneumonia após pegar um resfriado nesta viagem de balão meteorológico (Harrison 1981, p.297). Sua morte prematura interrompeu suas promissoras pesquisas em cosmologia.

A figura abaixo ilustra alguns dos modelos de universo estudados por Friedmann:

¹² Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p.295.

¹³ Para mais detalhes sobre a obra e vida de Friedmann ver (Waga 2005, p. 158; Kragh 1996, p. 23).

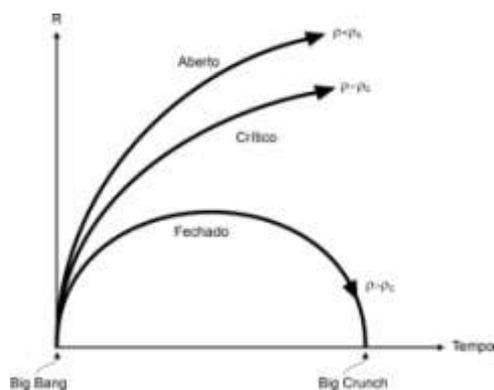


Figura 5: Tipos de universo nos modelos de Friedmann¹⁴

De acordo com modelos de Friedmann o que determina a evolução do universo é a sua densidade de matéria. Podem ocorrer três tipos de universo:

1. Se a densidade for alta a atração gravitacional é muito forte, de forma que a expansão é interrompida e o universo aumenta de tamanho até um ponto máximo e então volta a contrair e o raio tende a zero novamente. Esse tipo de universo é chamado *fechado e finito*.
2. Se a densidade for baixa, a expansão continua indefinidamente e o universo é *aberto e infinito*.
3. O estado intermediário entre esses dois regimes é chamado *universo crítico*. Ele se expande cada vez mais lentamente, até atingir uma velocidade marginal. No limite, a uma distância infinita, a velocidade de expansão seria nula. Esse tipo de universo é chamado *marginalmente aberto*.

O tipo de universo fechado pode ser também *cíclico*. O universo se expande, chega a um máximo, volta a se contrair até que possa começar uma nova expansão, uma nova contração e assim o ciclo poderia se repetir. A figura abaixo mostra que este tipo de universo contém vários pontos em que o tamanho do universo é nulo.

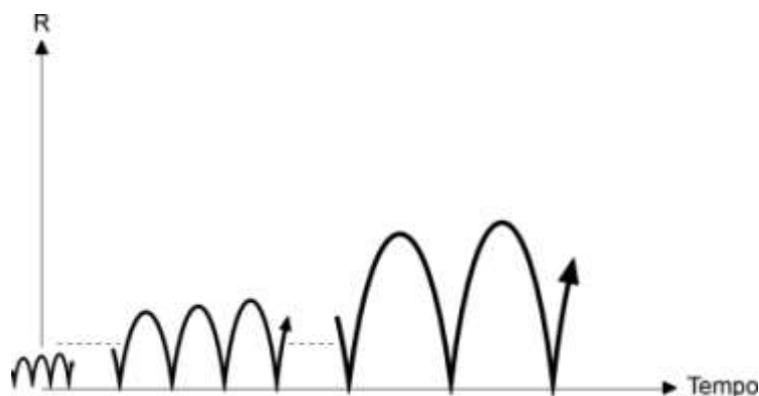


Figura 6: Universo oscilante¹⁵

¹⁴ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p.298.

Friedmann era particularmente fascinado por essa possibilidade de universo oscilante:

Alguns casos também são possíveis em que o raio de curvatura muda periodicamente: O universo contrai em um ponto (em nada) e então aumenta seu raio desde o ponto até um certo valor, então novamente diminui seu raio de curvatura, transforma-se num ponto, etc. Isso traz à mente o que a mitologia Hindu tem a dizer sobre os ciclos de existência e também permite falar sobre “a criação do mundo a partir do nada”, mas tudo isso deve ser considerado como fatos curiosos que não podem ser suportados de forma confiável pelos dados observacionais astronômicos inadequados (Friedmann 2000, p. 109 apud Kragh 2004, p. 126).

A partir da noção de um começo do tempo e do espaço, Friedmann foi provavelmente um dos primeiros a introduzir na cosmologia relativística dois conceitos muito importantes: a criação e a idade do universo, que serão discutidos nas próximas atividades.

4.2 Lemaître e Eddington: o universo em expansão

Georges Lemâitre (1894-1966) foi um padre e cosmólogo belga, que reproduziu os resultados obtidos por Friedmann, sem conhecê-los. No entanto, a abordagem do seu trabalho não era apenas matemática, ele queria explicar o universo real, em que vivemos. Esta diferença fez com que Lemaître se preocupasse com as evidências observacionais que pudessem dar suporte ao seu modelo (Kragh 2004, p. 129).

Lemaître nasceu em 1894, em uma família profundamente religiosa. Estudou num colégio de jesuítas. Serviu o exército belga na Primeira Guerra Mundial e então começou sua carreira como físico teórico, ao mesmo tempo em que estudava para se tornar padre na Igreja Católica¹⁶. Entre 1923 e 1924 estudou em Cambridge onde foi aluno de pós-graduação de Arthur Eddington (1882-1944), quando este já era um renomado astrofísico britânico (Kragh 2004, p. 127).

Eddington¹⁷ tornou-se um dos astrônomos mais importantes do século XX, por seus trabalhos em diversos campos da astronomia. Dentre eles organizou uma expedição para observar um eclipse solar na Ilha do Príncipe, na África, para testar previsões da Relatividade geral sobre o desvio gravitacional da luz das estrelas causado pela massa do Sol.

Foi em 1925 que os dados astronômicos foram conectados à teoria da relatividade geral, por Lemaître, que se interessou pelo tema depois de entrar em contato nos EUA com Harlow Shapley, Hubble e Slipher. Ele se convenceu de que havia um desvio

¹⁵ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p. 299. O raio do universo torna-se cada vez maior por que segundo os estudos de Richard Tolman, a cada ciclo a entropia seria maior e também a quantidade de radiação térmica.

¹⁶ Para mais detalhes sobre a vida e obra de Lemaître ver (Waga 2005, p. 159; Kragh 1996, p. 28).

¹⁷ Para mais detalhes sobre a vida e obra de Eddington ver (Herrera 2002).

sistemático para o vermelho do espectro das nebulosas e que os modelos cosmológicos precisavam explicar esse dado experimental (Herrera 2002, p. 72).

Em 1927, Lemâitre publicou um modelo cosmológico, correspondente a um universo estático (semelhante ao de Einstein), mas que após certo tempo saiu do equilíbrio e passou a se expandir. Eddington também estudava cosmologia e na época em que conheceu Lemaître, ambos estavam investigando novas soluções para as equações da relatividade geral. Nessa época, os estudiosos da cosmologia tinham o dilema de escolher entre os modelos de W. de Sitter ou de Einstein. Eddington estava em dúvida se colocava movimento no modelo estático de Einstein ou matéria no universo vazio de W. de Sitter.

Apesar de haver publicado seu artigo de 1922 na prestigiosa revista "Zeitschrift fur Physik", o trabalho de Friedmann não recebeu a devida atenção. Seu artigo chegou a receber respostas de Einstein (que já era famoso na época) e julgou ter encontrado erros nas contas de Friedmann. Mas este refez os cálculos e respondeu, mostrando que sua teoria estava correta. Einstein aceitou as soluções, mas apenas a matemática, acreditava que elas não tinham sentido físico (Kragh 1996, p. 26).

Já Lemaître, publicou o seu trabalho em um jornal pequeno, de pouco impacto. Talvez por estar intimidado por Einstein, ou por ter reconhecido na época que Friedmann já havia obtido suas soluções. Ele mandou cópias do seu trabalho para astrônomos consagrados na época, como Eddington e W. de Sitter, mas não recebeu quase nenhuma atenção. Sua obra só seria reconhecida no começo da década de 1930, quando a ideia do universo em expansão se tornou mais aceita entre os cosmólogos (Kragh 2004, p. 131).

Somente em 1930, Eddington se deu conta que o trabalho de Lemaître de 1927 era a resposta que estava procurando. A partir de então, o trabalho de Lemaître ficou famoso, divulgando entre os cosmólogos a interpretação do trabalho de Hubble como evidência experimental da expansão do universo (Kragh 1996, p. 31).

O modelo de Lemaître publicado em 1927 foi desenvolvido e apoiado por Eddington, criando uma nova versão da teoria que ficou conhecida como modelo de *Lemaître-Eddington*. Trata-se de um modelo de universo em expansão que sempre existiu.

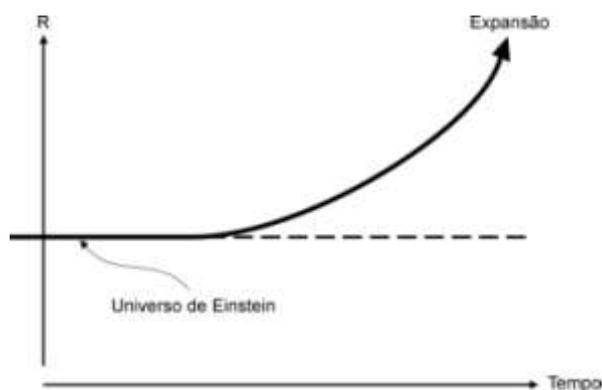


Figura 7: Modelo de Lemaître-Eddington¹⁸

A figura acima ilustra este modelo, que inicialmente é estático como o de Einstein, contendo uma distribuição uniforme de matéria em equilíbrio instável que passou a evoluir bem lentamente. Com o tempo, a expansão torna-se cada vez mais rápida.

Porém a concordância entre Lemaître e Eddington não durou muito tempo (Kragh 1996, p. 45). Em 1931, Lemaître introduziu na cosmologia a ideia audaciosa de um começo do universo numa perspectiva realista, contrariando Eddington, que admitiu ter postulado um passado infinito, porque a ideia de um começo no tempo lhe parecia desagradável. Em um texto curto publicado na revista *Nature*, ele escreveu que discordava de Eddington, quando este afirmava que

“Filosoficamente, a noção de um começo da ordem atual da natureza é repugnante para ele. Eu estou inclinado a pensar que o estado atual da teoria quântica sugere um começo do mundo bem diferente da atual ordem da Natureza. (...) podemos conceber o começo do universo na forma de um único átomo, cujo peso atômico é dado pela massa total do universo. Este átomo altamente instável, teria começado a se dividir, fragmentando em pedaços cada vez menores numa espécie de super processo radioativo” (Lemaître 1931).

A figura abaixo mostra que no novo modelo de Lemaître há um começo do tempo, em $R=0$ e $t=0$.

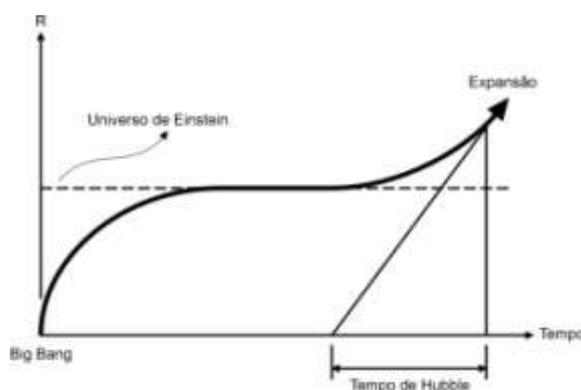


Figura 8: Universo de Lemaître¹⁹

¹⁸ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p. 302.

¹⁹ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p. 302. A expressão tempo de Hubble será explicada na seção 5.5.1.

O universo de Lemaître tem um começo abrupto, um “dia sem ontem” (Midbon 2000). Este modelo contém um certo tempo “de hesitação”, em que o universo permanece estático, como o de Einstein e posteriormente passa a se expandir exponencialmente. Este modelo ficou conhecido como “o modelo do átomo primordial” e pode ser visto como um dos precursores do modelo do Big Bang.

Porém, este modelo não chamou muito a atenção da comunidade científica até a década de 1950. De maneira geral, os cosmólogos preferiam o modelo de Lemaître-Eddington, em especial na primeira metade da década de 1930. Foi defendido por diversos autores, como W. de Sitter, Tolman e Robertson por permitir a existência de um mundo sem catástrofes, tanto no passado quanto no futuro (Kragh 1996, p. 56).

Uma consequência do pequeno impacto do modelo do átomo primordial de Lemaître é que atualmente é comum a associação da teoria do Big Bang a George Gamow e não a Lemaître, Friedman e os demais autores que já haviam estudado o universo em expansão.

Vamos voltar a discutir o modelo do átomo primordial de Lemaître nas atividades seguintes. Como ela era padre será muito interessante analisar a influência da religião sobre a construção de suas teorias cosmológicas.

4.3 Hubble: evidências observacionais a favor do universo em expansão

Hoje a visão mais aceita é a de um universo em evolução, repleto de galáxias que se afastam com velocidades altíssimas. Até o começo do século XX o conceito de galáxia ainda estava em construção²⁰. Desde o século XVII os astrônomos debatiam o que seriam as então chamadas “nebulosas”, objetos difusos, que quando observados com um telescópio não são pontuais como as estrelas, pois ocupam uma pequena área do campo de visão. Só no século XX, quando foram construídos grandes telescópios e foi possível observar essas nebulosas com uma ampliação muito maior, permitindo perceber que elas eram conjuntos de estrelas e não nuvens de gás como se acreditava anteriormente (Martins, R. 1994, p.143). Hoje em dia, boa parte dos corpos que antes eram chamados de nebulosas são conhecidos como galáxias.

O astrônomo estadunidense Edwin Hubble²¹ conseguiu medir as distâncias de algumas “nebulosas”, através do estudo de estrelas de brilho variável, chamadas cefeidas, na então “nebulosa” de Andrômeda. Ele utilizou o método de medir distâncias estelares desenvolvido pela astrônoma estadunidense Henrietta Leavitt (1868-1921), baseado na relação entre a magnitude absoluta²² e o período de variação do brilho das

²⁰ Para mais detalhes e referências sobre o processo de construção do conceito de galáxia ver (Andrade & Henrique 2009, Henrique et al. 2009).

²¹ Para mais detalhes sobre a vida e obra de Hubble ver (Neves 2000 A p.190; Waga 2000, p. 163; Kragh 1996, p. 16).

²² Magnitude é uma medida do brilho de uma estrela. A magnitude aparente é o brilho visto da Terra. Já a magnitude absoluta é o brilho intrínseco, que não leva em consideração a distância da estrela. Para mais detalhes sobre medidas de distâncias astronômicas, ver (Andrade & Henrique 2009, p. 42)

cefeidas. Conhecendo a magnitude absoluta de uma estrela, é possível medir sua distância. Em 1923 Hubble calculou uma distância de cerca de um milhão de anos luz²³ para a cefeida que observara (Kragh 1996, p. 17).

Como o valor de distância encontrado é muito maior do que o das estrelas da Via Láctea, a medida de Hubble foi vista como um indício de que Andrômeda é um corpo exterior à nossa galáxia. Sendo assim Andrômeda deixou de ser considerada uma nebulosa em nossa galáxia, passando a ser considerada como outra galáxia. Com o tempo constatou-se que o mesmo ocorria para outras “nebulosas”.

Nos anos seguintes, trabalhando no grande observatório de Monte Wilson, nos EUA, com seu colaborador, o astrônomo estadunidense Milton Humason (1891-1972), Hubble conseguiu medidas de distâncias e redshift²⁴ para corpos mais distantes do que se conseguira até então (Kragh 1996, p. 18). Supondo que nosso planeta não se encontra num local privilegiado do cosmo, é plausível pensar que ao observar os espectros de tais galáxias, algumas delas se afastariam, enquanto outras se aproximariam da Via Láctea. É de se esperar também que a distribuição angular de galáxias que se afastam e que se aproximam deva ser isotrópica, isto é, igual em todas as direções. Entretanto não foi isso que Hubble observou. Em 1929 publicou um trabalho em que apresentava os dados de 46 galáxias, com medidas razoavelmente confiáveis das distâncias de 20 delas. A quase totalidade das galáxias vizinhas, exceto algumas muito próximas e, portanto sujeitas ao nosso campo gravitacional, estariam se afastando.

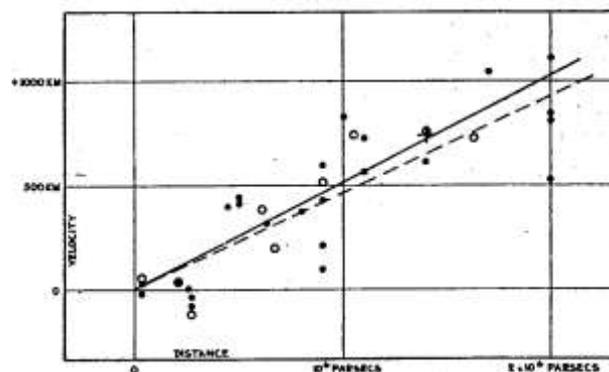


Figura 9: A lei de Hubble²⁵

²³ A distância da galáxia de Andrômeda conhecida atualmente, através de medidas mais precisas que a de Hubble, é de cerca de dois milhões de anos luz.

²⁴ Redshift, ou desvio espectral para o vermelho, é um aumento do comprimento de onda da radiação eletromagnética recebida, comparado com o comprimento de onda emitido por uma fonte utilizada como padrão.

²⁵ Nas palavras do próprio Hubble, vemos algumas das simplificações realizadas em seu modelo: “Os discos pretos e a linha cheia representam a solução para o movimento solar utilizando as nebulosas

A figura acima mostra um gráfico em que o eixo y contém

velocidades radiais, corrigidas pelo movimento solar e o eixo x as distâncias das galáxias estimadas a partir das luminosidades médias das nebulosas no aglomerado (Hubble 1929, p. 172).

Com esses dados, ele chegou à relação linear entre os redshift das galáxias e a sua distância, que ficou conhecida como a Lei de Hubble.

$$v_{\text{radial}} = H_0 d$$

Onde v é a velocidade radial da galáxia, d a distância da mesma ao observador e H_0 uma constante, chamada *constante de Hubble*.

A figura 9 mostra que a relação linear entre velocidade e distância não estava muito bem clara a partir dos dados de Hubble. É possível notar uma relação de proporcionalidade, mas que não é necessariamente linear (Waga 2005, p. 161).

4.4 Quem descobriu o universo em expansão?

Muitas vezes se atribui a Hubble a **descoberta** do universo em expansão. Numa visão empirista exagerada, ele teria apontado seu telescópio para as galáxias e descoberto a partir da observação direta que as galáxias estão se afastando. E talvez até seja possível imaginar que ele descobriu isso sozinho, por ser um grande gênio.

Em 1931, De Sitter em uma conferência sobre o modelo de Lemaître, usou o termo descoberta duas vezes na mesma frase: “a saída para este dilema (de escolher entre os modelos de Einstein ou De Sitter) foi demonstrada pelo professor Lemaître, cuja brilhante descoberta, o “universo em expansão”, foi descoberto pela comunidade científica há cerca de um ano e meio, três anos após a sua publicação” (De Sitter apud North 1965, p. 122).

A palavra descoberta é usada na linguagem comum em diversas situações. Na frase de De Sitter, primeiro Lemaître teria feito uma descoberta científica: a de que o universo está em expansão. Após três anos, a comunidade científica teria descoberto o seu artigo, que estava esquecido em uma revista de pouco impacto. Então, quem teria sido o descobridor do universo em expansão? Hubble ou Lemaître?

Hubble nunca mediu diretamente as velocidades. O que ele e vários outros pesquisadores mediram foram os desvios para o vermelho das nebulosas extragalácticas. Desde o início do século XX, Vesto M. Slipher (1875-1969), astrônomo estadunidense que trabalhava no Observatório Lowell, nos EUA, estudava o espectro da luz vinda de estrelas e nebulosas. Em 1912 ele percebeu que as linhas espectrais de Andrômeda estavam deslocadas para o azul, isto é, para a região do espectro de menores comprimentos de onda (Kragh 1996, p.14).

individualmente, os círculos brancos e a linha pontilhada representam a solução combinando as nebulosas em grupos, a cruz representa a velocidade média correspondente à distância média das 22 nebulosas, cujas distâncias não puderam ser estimadas individualmente” (Hubble 1929, p. 172).

Em 1925 Slipher já conseguira medir o desvio do espectro de 45 corpos cuja distância era conhecida, tendo encontrado 41 redshift e somente 4 blueshift, de corpos mais próximos (Waga 2000, p. 164). No mesmo ano, Lemâitre publicou um trabalho em que analisava soluções das equações de Einstein que levavam a um universo em expansão. Nesse trabalho, ele deduz teoricamente uma expressão para a relação entre o redshift e a expansão do universo, que leva a uma aproximação linear para a relação entre a velocidade de recessão e a distância do corpo:

$$v_{radial} = \frac{c}{R_o \sqrt{3}} d$$

Onde c é a velocidade da luz, R_o é o raio de curvatura do universo e d é a distância do corpo. Ele inclusive estimou o valor da constante de proporcionalidade, hoje chamada constante de Hubble, utilizando medidas de redshift de 42 galáxias, encontrando um valor de $625 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, próximo do que o que Hubble mediu alguns anos depois (Kragh 2004, p.129). Vemos assim que a famosa Lei de Hubble estava clara no artigo de Lemaître, de forma que poderia muito bem ter sido chamada “Lei de Lemaître” (Kragh 1996, p. 30).

Em 1928, antes de Hubble, o cosmólogo estadunidense Howard Robertson (1903-1961) utilizou as medidas dos redshift de Slipher e as medidas de distâncias das nebulosas que Hubble já havia publicado e mostrou que estes resultados estavam de acordo com a já conhecida relação entre a velocidade e a distância. Como Robertson era um teórico, publicou seu trabalho em um jornal de física que não era normalmente lido por astrônomos (Harrison 1981, p.208).

Sendo assim, vemos que antes de Hubble, Slipher já havia observado os redshift das galáxias e investigado sua relação com as distâncias dos corpos. Pode-se até dizer que Hubble estendeu e reinterpretou o programa de pesquisa de Slipher (Kragh 1996, p. 16). Além disso, Lemaître, Robertson e outros já haviam estudado esta questão teoricamente e comparado os modelos com os dados experimentais disponíveis.

Portanto, dizer que Hubble “descobriu” o universo em expansão é uma afirmação perigosa. Nossa intenção nessa seção não foi a de tirar os méritos do trabalho de Hubble, ou discutir prioridades históricas, sobre quem teria sido o “primeiro” a fazer esta descoberta. O que nos interessa não é fazer “justiça”, atribuindo o crédito ao verdadeiro merecedor, mas sim pensar sobre o conceito de descoberta na ciência. Seria razoável perguntar “quem foi o descobridor” da expansão do universo? (Kragh & Smith 2003, p. 142)..

Normalmente se diz que ocorreu uma descoberta científica quando o cientista, através da observação ou da experimentação, encontra um novo fenômeno na natureza, que anteriormente não era conhecido. Sendo assim, não se pode dizer que Hubble foi o único "descobridor da Lei de Hubble" e nem mesmo o primeiro. A relação entre o

desvio espectral dos corpos celestes e sua distância já havia sido estudada por vários autores e sua interpretação foi bastante debatida no início do século XX.

Além disso, quando Hubble encontrou a relação linear entre os redshift e as distâncias das galáxias, ele não descobriu a expansão do universo (Kragh & Smith 2003, p. 144). A construção da teoria do universo em expansão teve vários colaboradores, foi processo que durou alguns anos, envolvendo tanto aspectos teóricos, quanto experimentais. Sendo assim, não podemos nem mesmo dizer que Hubble criou a ideia do universo em expansão.

A ideia do universo em expansão surgiu hipoteticamente em 1922 com Friedmann, observacionalmente com Slipher em 1912, mas só passou a ser aceita na comunidade científica na década de 1930, com a divulgação dos trabalhos de Lemaître de 1927. A partir de então, houve uma mudança de paradigma e rapidamente os modelos estáticos tornaram-se obsoletos (Kragh 1996, p.33).

Como vimos a chamada Lei de Hubble é dada por: $v_{radial} = H_0 d$. Mas o que são os termos V, H e d? As medidas de distância na cosmologia são bastante complexas, o que faz com que o conceito de velocidade na equação de Hubble não tenha uma interpretação trivial. O que os observadores (como Slipher e Hubble) mediram foi uma relação entre o redshift e a distância: redshift = constante x distância.

A partir dessa relação, *teoricamente* se infere que os redshift têm uma relação com velocidades de recessão. Hoje, esta lei é interpretada como uma evidência de que o universo está em expansão e considerada um dos pilares mais importantes da cosmologia moderna (Kanipe 1995). Porém ao longo do tempo houve várias interpretações diferentes para os redshift das galáxias. Uma delas é que o desvio espectral seria causado por uma velocidade de afastamento, segundo o chamado *Efeito Doppler*.

Para baixas velocidades, é possível mostrar que os redshift do tipo Efeito Doppler estão relacionados linearmente com a velocidade de recessão dos corpos:

$$z = \frac{v}{c}$$

Onde z é o redshift, v_r é chamada velocidade de recessão e c é a velocidade da luz. Dessa forma, as medidas observacionais dos redshift das galáxias estariam relacionadas às velocidades de recessão: $v_r = H.d$.

Interpretando esse desvio do espectro como sendo causado pelo Efeito Doppler, isso indica que Andrômeda está se aproximando do Sol, com uma enorme velocidade de 300 km/s.

As medidas de redshift feitas desde o começo do século XX por Slipher e outros astrônomos só chamaram a atenção dos cosmólogos quando Willem De Sitter publicou seu modelo cosmológico, que continha o chamado “efeito De Sitter”. A solução de De Sitter também envolvia a constante cosmológica, cujo efeito seria equivalente a uma

força repulsiva, numa analogia newtoniana. Uma partícula observada a uma distância r do observador pareceria afastar-se com o tempo, com uma aceleração dada por:

$$a = \frac{\Lambda c^2 r}{3}$$

Onde c é a velocidade da luz e Λ é a constante cosmológica. De Sitter mostrou que em seu modelo cosmológico sem matéria, quando partículas materiais de teste estivessem presentes, elas se espalhariam com uma velocidade proporcional à distância (Waga 2005, p. 158). Este efeito ficou conhecido como *Efeito De Sitter*.

No entanto, De Sitter não interpretou esse efeito como se os corpos estivessem *realmente* se afastando por causa da expansão do espaço. Para ele isso era um efeito particular da métrica do espaço-tempo descrevendo esse tipo de universo. Ele escreveu: "*As linhas espectrais de várias nebulosas distantes devem, portanto, ser sistematicamente desviadas em direção ao vermelho, dando origem a uma velocidade radial positiva*" (De Sitter apud Kragh 1996, p. 12).

Até então, o modelo dominante era o de um universo estático. Os modelos de Friedmann de 1922 e de Lemaître de 1927 não foram vistos como descrições para o universo real. A ideia de expansão do universo numa perspectiva realista só passou a ser considerada no fim da década de 1920 (Kragh 1996, p. 13). Einstein criou a constante cosmológica para manter o seu modelo de universo estático. De Sitter também manteve tanto a constante cosmológica, quanto a imposição de que o universo deva ser estático, apesar do estranho “efeito De Sitter” indicar que as galáxias podiam estar se afastando, ele utilizou o termo “velocidade fictícia”, indicando que adotava uma concepção instrumentalista para esse afastamento. Já Friedmann, Lemaître e Eddington, alguns anos depois, continuaram utilizando a constante cosmológica, mesmo para universos em expansão.

Em 1929, Hubble ficou impressionado pelo bom acordo entre suas medidas observacionais (relação redshift-distância das galáxias) e a previsão teórica do “efeito De Sitter”:

A importante característica, contudo, é a possibilidade de que a relação distância-velocidade possa representar o efeito de Sitter e, portanto, que dados numéricos possam ser introduzidos na discussão da estrutura geral do espaço. Na cosmologia de De Sitter, o deslocamento do espectro origina-se de duas fontes, uma diminuição aparente das vibrações atômicas e uma tendência geral das partículas materiais se dispersarem. Esta última envolve uma aceleração e, portanto, introduz o fator tempo. A importância relativa destes dois efeitos deveria determinar a forma da relação entre distâncias e velocidades observadas; e neste contexto deve ser enfatizado que a relação linear encontrada na presente discussão é uma primeira aproximação, representando uma faixa restrita em distância (Hubble 1929, p. 139).

Gradativamente, durante a década de 1930, a ideia de um universo em expansão foi se tornando mais difundida na comunidade científica. Posteriormente, Hubble se

mostrou mais cauteloso em relação à interpretação dos resultados de seus trabalhos de 1929. Em uma carta a De Sitter em 1931, escreveu que ele e seu colaborador Milton Humason sentiam “*que a interpretação (dos redshift das galáxias) deve ser deixada para você e os outros poucos que são suficientemente competentes para discutir esta questão com autoridade*” (Hubble 1931 apud Kragh & Smith 2003, p. 152).

Em 1935 Hubble e seu colaborador Richard Tolman afirmaram que:

Até que novas evidências estejam disponíveis, eles gostariam de manter a mente aberta a respeito das explicações mais satisfatórias sobre os redshift das nebulosas, na apresentação de descobertas observacionais, continuar utilizando a frase “velocidades de recessão aparentes”. No entanto, ambos tendem à opinião, de que se o redshift não é causado por um movimento de recessão, sua explicação deverá envolver novos princípios físicos (Hubble & Tolman 1935, p. 303).

A tradição positivista era bastante influente no período entre guerras nos EUA. Hubble seguia essa tradição, defendendo que a meta da ciência seria a do “conhecimento positivo de domínio público” e que valores não teriam lugar nos projetos científicos (Kragh 2004, p. 153).

Em 1936, em seu livro *The Realm of the Nebula*, Hubble analisou alguns argumentos observacionais contra a interpretação dos redshift como velocidades de recessão. De maneira geral, adotou uma postura cautelosa, afirmando que a cosmologia, até então, era marcada por “*especulações não verificadas que cientistas corretamente consideravam como tópicos para conversas, até que testes fossem planejados*” (Hubble 1936, p. 6 apud Kragh 2004, p. 152) e que “*as interpretações dos próprios desvios para o vermelho não inspiram tão grande confiança*” (Hubble 1936 apud Assis et al. 2008, p. 206).

As visões de Hubble sobre a natureza dos redshift foram interpretadas de maneiras bastante diferentes por diversos historiadores. Donald Osterbrock e John North afirmaram que Hubble não aceitou completamente que os redshift resultavam necessariamente de velocidades radiais de objetos. Já para Norriss Hetherington²⁶, ainda que Hubble tenha se mostrado de uma maneira “agnóstica”, ele na verdade preferia o modelo do universo em expansão.

Esta visão foi contrariada por Stephen Brush, foi apoiado por Helge Kragh e Robert Smith²⁷ ao afirmar que:

Dizer que Hubble “descobriu o universo em expansão” é o mesmo que dizer que Max Planck “descobriu o quantum”: ele estabeleceu uma fórmula empírica que parece implicar na teoria e de fato levou outros a adotarem-na, (...), porém ele desistiu de defender explicitamente (a teoria do universo em expansão) como um enunciado verdadeiro sobre

²⁶ Donald Osterbrock é professor de Astronomia da Universidade de Chicago, John North (1934-2008) foi um historiador da ciência e da cosmologia inglês. Norris Hetherington é um historiador da ciência e foi professor na universidade da Califórnia (Berkeley, EUA).

²⁷ Stephen G. Brush é pesquisador da universidade de Maryland, (EUA), Helge Kragh da universidade de Aarhus (Dinamarca) e Robert Smith é professor da Universidade de Alberta (Canadá). Todos são historiadores da ciência.

o universo e em algumas ocasiões até mesmo sugeriu que ela era falsa (Brush 2001 apud Kragh & Smith 2003, p. 142).

O físico brasileiro André Assis e seus colaboradores também defendem uma visão parecida. Afirmam que Hubble continuou receoso em relação à ideia de um universo em expansão até o final de sua vida. Apesar de reconhecer que até o momento não era possível uma conclusão segura sobre o assunto, demonstrava uma preferência pela ideia de um universo estático e pela explicação dos redshift que ficou conhecida como “luz cansada”, formulada por seu grande amigo, o astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974) (Assis et al. 2008, p. 202).

5 A teoria do Big Bang

Vimos que a partir da década de 1930 os modelos de universo em expansão eram os mais aceitos entre os estudiosos da cosmologia. No final da década de 1940 a cosmologia ainda era pouco valorizada e quase não recebia apoio institucional. Não havia cosmólogos, pois os poucos cientistas que se dedicavam a problemas cosmológicos só o faziam em parte do seu tempo de trabalho, enquanto continuavam a realizar pesquisas em áreas do conhecimento mais tradicionais como a astronomia, física e matemática (Kragh 1996, p. 143).

Admitindo a expansão do universo e utilizando as descobertas da física de partículas, no fim da década de 1940, George Gamow²⁸ (1904–1968), físico russo que se mudou para os EUA, formulou o modelo cosmológico que ficou conhecido como a teoria do Big Bang.

Em 1946, Gamow propôs o modelo de universo cujo começo era muito quente e denso. A matéria era formada por uma espécie de gás de nêutrons e fótons, chamada “ylem”, que passou esfriar com a expansão. Os nêutrons sofriam reações nucleares (decaimento β), dando origem a prótons e elétrons. Seu modelo era basicamente um modelo de física nuclear para o estágio inicial do universo, que passou a expandir de acordo com as equações de Friedmann-Lemaître (Waga 2005, p.193; Kragh 2004, p.230).

O modelo de Gamow tinha muitos aspectos comuns ao modelo do *átomo primordial* de Lemaître: um universo primordial muito pequeno, quente e denso, que passou a se expandir e esfriar. No instante inicial o volume seria nulo, o que caracteriza a chamada singularidade inicial: toda a matéria existente estava concentrada em um ponto, cuja densidade é infinita.

²⁸ Para mais detalhes sobre a obra e vida de Gamow ver (Waga 2005, p. 162; Kragh 1996, p. 89).

Tanto o modelo de Lemaître, quanto o de Gamow precisavam enfrentar dois desafios, que ocuparam os astrônomos e cosmólogos nessa época: explicar o chamado problema da idade do universo e a origem dos elementos químicos (Kragh 1996, p.108; Martins, R. 1994, p.161-162).

5.1 A idade do universo

Se de fato o universo estiver em expansão, então, há algum tempo atrás, todas as galáxias devem ter estado muito próximas, um universo primordial muito pequeno, quente e denso, que passou a se expandir e esfriar. Desta forma, o universo teria sido criado num tempo definido no passado.

Conhecendo a velocidade de expansão atual é possível estimar há quanto tempo o universo está em expansão, ou seja, realizar uma estimativa da idade do universo. Supondo-se a velocidade constante, temos que o tempo (T) seria dado pela distância (d) dividida pela velocidade (V):

$$T = \frac{D}{V} = \frac{D}{H_0 D} = \frac{1}{H_0}$$

Onde H_0 é a constante de Hubble (definida na seção 4.3). A partir da equação acima vemos que o inverso da constante de Hubble fornece um valor estimado para a idade do universo.

O chamado “problema da idade do universo” é bastante simples: qualquer estimativa de idade do universo não pode fornecer um valor que seja menor que a idade calculada para qualquer um de seus componentes, como o Sistema Solar, a Terra, os seres vivos, etc.

George Gamow, em 1952, comentou as alternativas viáveis para solucionar este problema:

Como poderia o universo ter menos que dois bilhões de anos se ele contém rochas de 3 bilhões de anos? Esta discrepância incomodou os que propuseram modelos de universo em expansão por várias décadas, desde o trabalho original de Hubble até a década de 1950. Uma possibilidade foi sugerida por Lemaître, que introduziu a constante cosmológica, originalmente utilizada por Einstein para construir um universo estático. Esta constante corresponde a uma força repulsiva atuando entre as galáxias, que aumenta proporcionalmente com a distância. A presença dessa força faria o universo expandir com uma velocidade cada vez maior e mudaria o valor estimado para a idade do universo (Gamow 1952, p. 29).

Com os dados disponíveis na época de Hubble, o valor estimado para a idade do universo era muito baixo: da ordem de 2 bilhões de anos. Isso era um problema, pois estudos geológicos mostravam que a Terra tinha pelo menos 4 bilhões anos (Kragh 1996, p.73).

O “problema da idade do universo” foi importante para o surgimento da teoria do Estado Estacionário. Gamow comentou sobre esta teoria como uma das alternativas viáveis para solucionar este obstáculo:

Outra possibilidade muito mais radical de modificação do modelo de universo em expansão foi proposta por H. Bondi, T. Gold e F. Hoyle. (...) De acordo com essa visão as galáxias mais velhas estariam se afastando cada vez mais, mas a todo momento novas galáxias seriam formadas pela condensação da matéria criada nos espaços alargados, criados entre as antigas. Portanto, o show continua, sem um começo e sem um fim (Gamow 1952, p. 30).

Como a teoria do Estado Estacionário propõe que o universo sempre existiu, ela se livra naturalmente do problema da “idade do universo”.

5.2 A formação dos elementos químicos

Duas questões fundamentais guiaram o trabalho de Gamow até que ele formulasse o modelo do Big Bang: Qual é a fonte de energia irradiada pelas estrelas? Como os elementos químicos foram formados nas estrelas? Estas questões foram investigadas por diversos autores, desde o século XIX, de uma maneira mais especulativa. Porém, com a descoberta da relatividade e depois com o desenvolvimento da física nuclear, as investigações destas questões se tornaram mais bem embasadas (Kragh 1996, p.81).

No fim da década de 1930, Hans Bethe (1906-2005) um físico nuclear alemão, que foi morar no EUA em 1933, desenvolveu o primeiro modelo quantitativo para a produção de energia do Sol²⁹, envolvendo o princípio da fusão nuclear, em que elementos leves são fundidos para formar elementos mais pesados.

Esta teoria mostrou um excelente acordo entre as previsões teóricas e os dados experimentais, de forma que foi vista como um dos maiores sucessos da astrofísica até a época e fez com que Bethe recebesse o prêmio Nobel em 1967. Em seu trabalho, Bethe também mostrou que:

nenhum elemento mais pesado que o He⁴ pode ser construído nas estrelas comuns, de forma que os elementos mais pesados encontrados nas estrelas devem ter existido antes que as estrelas tenham sido formadas (Bethe 1939, p.434).

Vemos assim que até o começo da década de 1940, os físicos nucleares tinham problemas para explicar a formação de núcleos mais pesados que o hélio, pois não

²⁹ Antes de Hans Bethe houve várias teorias para a explicação da energia solar. Este problema envolveu diversos debates entre físicos e geólogos sobre a idade do universo no século XIX. Para mais detalhes ver Martins, R. 1994, capítulo 11, p.155.

existem elementos estáveis com 5, nem com 8 partículas. Nesse contexto, havia a necessidade de investigar a formação dos elementos pesados antes que eles tivessem presentes nas estrelas.

Estas reações nucleares só ocorrem em condições extremas, com temperatura e pressão muito altas. A partir desta ideia, Gamow e seus colaboradores, os jovens os cosmólogos estadunidenses Ralph Alpher (1921-2007) e Robert Hermann (1920-1997)³⁰ tentaram explicar o surgimento dos elementos químicos com seu modelo de universo quente e denso. Sua tese era que no universo primordial, quando a temperatura e a pressão eram muito altas, os elementos leves como o hidrogênio se fundiam formando hélio, lítio, carbono e outros elementos mais pesados.

Em 1948 foi publicado o artigo “The Origin of Chemical Elements” (Alpher et al., 1948), assinado por Alpher, Bethe e Gamow. Admitindo a expansão do universo e utilizando as descobertas da física nuclear, o artigo propunha que os elementos leves que existem hoje teriam sido criados no universo primordial:

Imaginamos o estágio primordial da matéria como um gás de nêutrons altamente comprimido que começou a decair em prótons e elétrons, quando a pressão caiu como resultado da expansão universal. A captura radioativa dos nêutrons que ainda restavam pelos prótons recém formados deve ter levado à formação dos primeiros núcleos de deutério. As capturas sucessivas de nêutrons levaram à formação de núcleos cada vez mais pesados (Alpher et al. 1948, p.803).

Contudo, havia diversas outras abordagens para explicar o surgimento dos elementos químicos. O astrônomo inglês Fred Hoyle, famoso autor da teoria do Estado Estacionário, foi um dos que investigou a possibilidade de que os elementos pesados sejam criados nas próprias estrelas, mas não em estrelas comuns e sim em casos extremos envolvendo altíssimas condições de pressão e temperatura. Em 1957 Hoyle e outros colaboradores, publicaram um importante artigo em que explicaram os mecanismos de síntese de elementos químicos nas estrelas (Burbidge et al. 1957).

As teorias aceitas atualmente propõem dois estágios para a formação dos elementos químicos. No universo primordial foram formados os elementos leves (H, He e Li). Os demais elementos foram formados nas estrelas, por processos de fusão nuclear (como descrito no trabalho de H. Bethe) ou nas explosões de supernovas, em estrelas de grande massa, conforme defendeu Hoyle (Waga 2005, p. 163).

5.3 Analogias para entender o Big Bang

Em cosmologia, há várias definições diferentes para distâncias e muitas delas não são intuitivas. Normalmente, estamos acostumados com a noção de um espaço plano, euclidiano, em que a menor distância entre dois pontos é uma reta. No caso do espaço-tempo de quatro dimensões da relatividade geral, esses conceitos ficam consideravelmente mais complicados.

³⁰ Para mais detalhes sobre a obra e vida de Alpher e Hermann ver (Kragh 1996, p.111).

Para entender esses conceitos, vamos fazer uso de duas analogias didáticas preferidas dos autores da cosmologia: vamos primeiro pensar no universo em expansão como uma granada explodindo e em seguida imaginar que o universo é bidimensional, como a superfície de uma bexiga esférica.

A “grande explosão” como uma granada

Interpretar o Big Bang pelo significado literal da palavra, uma “grande explosão” pode levar ao entendimento errado desse acontecimento, já que não houve qualquer “explosão” (no sentido usual da palavra) dando origem ao universo. É comum pensar na grande explosão como uma granada que explode no ar, cujos fragmentos se espalham no espaço. Essa imagem possui alguns elementos adequados para entender o conceito de Big Bang, mas pode levar a alguns equívocos (Waga 2005, p. 161).

Entendemos bem o conceito do que é uma explosão por vê-la ocorrer no espaço com três ou mais dimensões onde existimos. Uma explosão é a liberação violenta de energia por um processo súbito. Como a formação do Universo teria ocorrido com a violenta liberação de uma quantidade anormalmente grande de energia de modo súbito, o nome “grande explosão” pode ser associado, de certo modo, a esse processo.

No entanto, é preciso que fique claro que o nome “grande explosão” (“Big Bang”) não tem absolutamente nenhuma outra relação com o processo comum de explosão que conhecemos no dia-a-dia. Uma explosão é um processo de combustão intenso, que exige a presença de oxigênio³¹. No caso comum uma explosão é um processo químico que ocorre no interior de um espaço tridimensional. No caso do Big Bang essa “explosão” é extremamente especial, um processo de súbita liberação de energia que dá origem ao espaço e ao tempo. O Big Bang não ocorre dentro de um espaço de três dimensões. Ele cria o espaço-tempo. Assim, qualquer visualização do Big Bang, como uma explosão vista pelo “lado de fora” (o que normalmente aparece em filmes e documentários) é errada, até mesmo porque não existia “fora”, o Big Bang é o surgimento não só da matéria, mas do espaço-tempo. Não existe espaço exterior ao universo, pois ele é por definição, tudo o que existe.

31

Um universo bidimensional em expansão: a analogia do balão

Outra analogia que facilita a explicação de conceitos cosmológicos é pensar o nosso universo que tem quatro ou mais dimensões como um modelo bidimensional, como na superfície de uma bexiga esférica sendo inflada.

Quase todos nós já estudamos um pouco de geometria plana no colégio (ou fomos forçados a estudar). Há várias propriedades que julgamos valer sempre, como o fato de a soma dos ângulos internos de triângulo ser igual a 180° , ou que retas paralelas não se cruzam. No entanto, estas propriedades só valem para espaços planos. O espaço plano infinito é chamado Euclidiano em homenagem ao matemático grego Euclides.

Nos espaços curvos, como a superfície de uma esfera, a menor distância entre dois pontos não é mais uma reta, como no espaço plano, mas sim um círculo máximo, chamado de geodésica. Seguindo numa certa direção, um ser bidimensional que vive nesse universo em duas dimensões acabaria chegando ao mesmo ponto de partida. Na figura abaixo, vemos que num espaço curvo a soma dos ângulos internos de um triângulo podem ser maiores que 180 graus e que geodésicas paralelas podem se cruzar (por exemplo, no caso dos meridianos terrestres que são paralelos no equador e se cruzam nos pólos).

Mas há uma diferença importante entre o modelo da superfície bidimensional e o espaço curvo tridimensional do modelo de Einstein. A superfície esférica é encurvada em uma direção determinada, em uma outra dimensão. O espaço tridimensional não é encurvado para lado nenhum, nem é preciso supor que exista uma outra dimensão na qual o espaço se encurve. A noção de espaço curvo é totalmente independente desse tipo de suposição. É um conceito matemático abstrato, que só pode ser representado de modo imperfeito, pela analogia da superfície de uma esfera (Martins, R. 1994, p. 140).

Num modelo de universo bidimensional como uma bexiga esférica sendo inflada as galáxias seriam pequenos pedaços de papel distribuídos uniformemente sobre a superfície da bexiga. Nesse modelo precisamos desprezar a espessura dos discos, supondo que o universo está restrito a duas dimensões.

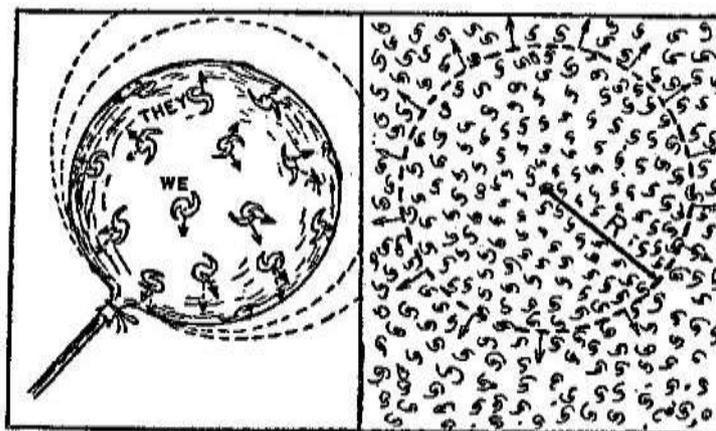


Figura 10: Uma analogia do universo em expansão com uma bexiga³²

Conforme o raio da bexiga aumenta, aumentam as distâncias entre as “galáxias” que estão sobre a superfície da bexiga. Quanto mais distantes estão dois pontos, maior parece ser sua velocidade de afastamento.

Essa mesma analogia do universo bidimensional pode ser pensada sobre a superfície da Terra. Se imaginarmos que o raio da Terra está aumentando, como o tempo as distâncias sobre a superfície também vão aumentar na mesma proporção.

Se fosse realizadas medidas das distâncias entre Salvador e cada uma das outras capitais brasileiras, seria possível notar que todas as capitais estão se afastando de Salvador e que as mais distantes estão se afastando mais rapidamente do que as mais próximas (é claro que todas as distâncias dobram ao mesmo tempo, mas dobrar a distância entre Salvador e Porto Alegre é um aumento muito maior do que dobrar a distância entre Salvador e Belo Horizonte). Se tivessem apenas essa informação, os habitantes de Salvador poderiam imaginar que estão no centro de um estranho processo, em que todos estão fugindo de Salvador. Mas não é nada disso. Todas as cidades terão exatamente a mesma impressão. Está ocorrendo uma expansão geral, para todos os lados e não existe um centro dessa expansão (Martins, R. 1994, p. 146).

De acordo com os modelos cosmológicos mais aceitos atualmente todas as galáxias estão se afastando da nossa, com velocidades que aumentam com a distância. Mas então, isso não nos mostraria que voltamos para o centro do universo, como defendiam os geocentristas? Se todos os corpos se afastam de nós, isso não nos coloca novamente numa posição privilegiada?

³² Esta analogia é bastante comum em livros e artigos sobre cosmologia, tais como (Hoyle 1950, p.115-116, Harrison 1981, p.212-215; Waga 2005, p. 161 e Gamow 1952, p. 23), de onde a figura 18 foi retirada.

6 A teoria do Estado Estacionário

No começo da década de 1950, a maior parte dos pesquisadores preferia a cosmologia relativística e o universo com uma idade finita, mas dificilmente se considerava que estes modelos correspondessem ao universo real. A teoria do Big Bang de Gamow ainda não havia se estabelecido como a teoria dominante. A maior parte dos astrônomos aceitava que o universo estivesse em expansão, levando em conta os trabalhos de Hubble e acreditavam que se podia calcular a idade do universo a partir das equações de Freidmann-Lemaître. Porém, evitavam dizer que o universo foi criado (Kragh 1996, p.142).

Na mesma época em que Gamow alterava a teoria do Big Bang com o artigo $\alpha\beta\gamma$, uma nova teoria cosmológica rival surgiu em Cambridge, na Inglaterra. Logo ficou conhecida como a cosmologia do Estado Estacionário.

Muitas vezes os conceitos de estático e estacionário são confundidos, pois existem diversas definições possíveis para estes termos na cosmologia³³. Enquanto no universo estático não há expansão ou contração, o universo estacionário não muda *em aparência*. Houve vários modelos de Estado Estacionário, mas o mais famoso foi o criado em 1948, pelos físicos Hermann Bondi (1919-2005), Thomas Gold (1920-2004) e Fred Hoyle (1915-2001). Sendo assim, utilizamos o conceito de estacionário utilizado por estes autores, que é equivalente ao princípio cosmológico perfeito: o universo não muda em larga escala, apesar de haver mudanças locais. Os modelos de Newton, Einstein e W. de Sitter que foram discutido na seção 2 são estáticos e estacionários. Já o modelo de Bondi, Gold e Hoyle não é estático, mas sim **estacionário e em expansão**. Um rio pode estar em um Estado Estacionário, mas a água está fluindo e, portanto, ele não é estático. Da mesma forma o universo pode estar em expansão mas ser estacionário.

Hermann Bondi e Thomas Gold estudaram em Cambridge, onde conheceram o físico e astrônomo inglês Fred Hoyle³⁴. Eles frequentemente tinham conversas informais sobre cosmologia, a partir das quais acabaram desenvolvendo em conjunto um novo modelo de universo em expansão. Estes três jovens adotaram a interpretação mais comum sobre os redshift das galáxias: a de que as galáxias estão realmente se afastando. Assim, achavam que o universo não poderia ser estático, como defendeu Einstein.

Na primavera de 1949, Hoyle fez uma série de palestras sobre cosmologia para a BBC de Londres, que foram posteriormente transcritas e publicadas na forma de um livro intitulado *The Nature of the Universe* (Hoyle 1950). Tanto o livro quanto as palestras fizeram bastante sucesso ao longo dos anos seguintes.

³³ Isto acontece porque existem vários conceitos diferentes referentes a medidas de tempo e espaço, como as coordenadas próprias e as comóveis (North 1965, p.112). Algumas delas serão apresentadas na seção 4.1, ao discutir o fator de escala.

³⁴ Para mais detalhes sobre a vida de Fred Hoyle, Hermann Bondi e Thomas Gold ver (Kragh 1996, p. 162-169).

Os cinco primeiros capítulos constituíram um bom livro de divulgação de astronomia básica, sobre a origem e o futuro da Terra, do Sol, das Estrelas e dos Planetas. Já os dois últimos capítulos eram um pouco mais controversos. Hoyle deixou claro que seu objetivo não era dar uma visão objetiva e imparcial sobre a cosmologia da época, mas sim sua visão pessoal sobre o assunto (Kragh 1996, p. 191).

No capítulo 6, sobre a expansão do universo, Hoyle menciona as grandes questões da cosmologia:

O que causa a expansão? A expansão significa que conforme o tempo passa o universo observável se torna cada vez menos ocupado por matéria? O espaço é finito ou infinito? Qual é a idade do universo? (...) Primeiro, eu vou considerar as ideias mais antigas – dos anos 1920 e 1930 - e então vou oferecer a minha opinião.

*De maneira geral, as ideias mais antigas podem ser divididas em dois grupos³⁵. Um deles se caracteriza por assumir que o Universo começou há um tempo finito, em uma grande explosão. Nesta suposição a expansão atual é um legado da violência desta explosão. Essa ideia do **Big Bang** me pareceu ser insatisfatória, mesmo antes que um exame detalhado tenha mostrado que ela leva a sérias dificuldades (Hoyle 1950, p.120).*

A expressão *Big Bang* foi popularizada por Hoyle, que se referiu de uma forma irônica, nestas palestras da BBC, à teoria “que começou há um tempo finito em uma grande explosão”. O trio de Cambridge concordava que a teoria de Gamow tinha sérios problemas. Dois dos principais foram: o problema da idade do universo e a formação dos elementos químicos (discutidos na seção 5.1 e 5.2).

Em dezembro de 1946, pouco antes de Gold propor a ideia da criação contínua de matéria, Hoyle estava pesquisando sobre a formação dos elementos pesados nas estrelas. Ele era um crítico da proposta de Gamow de que os elementos pesados teriam surgido durante um estágio primordial do universo e investigava a possibilidade de que eles fossem fabricados nas estrelas. Uma pergunta que surgiu de seu trabalho, feita por seu ex-supervisor, era “De onde veio o hidrogênio?”. Isso fez com que ele estivesse bastante receptivo para a ideia de Gold, quando ela surgiu. (Kragh 1996 p.176).

Até a primavera de 1947, Hoyle, Bondi e Gold tinham uma ideia vaga de sua teoria do Estado Estacionário. Para torná-la publicável era preciso criar argumentos quantitativos e embasados pelas observações disponíveis. Apesar de os três terem

³⁵ Adiante Hoyle descreve o outro grupo, que é dado pelas teorias com a constante cosmológica positiva, como o modelo de Lemaître cuja solução para o problema da idade do universo também foi descrita por Gamow e foi exposta na seção 5.5.1 (Hoyle 1950, p. 120-121).

contato constante nas contínuas discussões em Cambridge, as ideias de Bondi e Gold eram ligeiramente diferentes das de Hoyle. Sendo assim, a teoria foi publicada pela primeira vez em dois artigos diferentes na revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* de 1948 (Hoyle 1948) e (Bondi & Gold 1948). No entanto, conforme as duas versões da teoria foram enfrentando cada vez mais opositores, as duas versões acabaram sendo vistas como representações diferentes da mesma teoria, a teoria do Estado Estacionário (Kragh 1996, p. 187).

Em 1948, Gold e Bondi propuseram uma versão mais qualitativa da teoria do Estado Estacionário, partindo de dois postulados que se relacionam entre si:

1. O universo deve ter sempre o mesmo aspecto, em larga escala, para qualquer observador, em qualquer posição no espaço e no tempo.
2. Como o universo está em expansão, para a densidade média se manter constante, a matéria deve ser continuamente criada numa taxa determinada pela velocidade de expansão (Kragh 1996, p. 142).

O primeiro dos postulados é conhecido como Princípio Cosmológico Perfeito: todos os lugares do universo são semelhantes no tempo e no espaço, pois não há nenhum observador privilegiado.

Sendo assim, num universo estacionário a taxa de expansão é constante e nunca pode mudar. Os componentes do universo, como as galáxias, estrelas e planetas envelhecem, mas novos átomos são criados para substituí-los, de forma que a idade média dos corpos do universo é sempre a mesma (Harrison 1981, p. 92).

Bondi e Gold afirmaram que as leis da física devem ser constantes, para que os experimentos na terra sejam reprodutíveis. Argumentaram que o universo não pode mudar em larga escala, pois mudanças no universo acarretariam mudanças nas leis da física³⁶. Assim, eles partiram do postulado do princípio cosmológico perfeito por razões puramente filosóficas (North 1965, p. 211, Kragh 1996, p.182).

Ainda que seu artigo contivesse poucas equações, Bondi e Gold conseguiram chegar a um grande número de previsões testáveis, pois todas as características do universo devem obedecer ao princípio cosmológico perfeito. Assim, a taxa de expansão, dada pela constante de Hubble, as densidades de matéria e radiação, assim como a média de idade das galáxias observadas devem ser sempre as mesmas, constantes no tempo. Cálculos relativamente simples levam à conclusão de que o universo deve estar em expansão, com o fator de escala crescendo exponencialmente com o tempo, como no modelo de Sitter (Harrison 1981, p. 319).

A taxa de criação de matéria também poderia ser estimada quantitativamente, dada por $3\mu H \sim 10^{-43} \text{ g.s}^{-1}\text{cm}^{-3}$. Em outras palavras, equivale à massa de um átomo de

³⁶ Esta noção foi influenciada pelo chamado Princípio de Mach, segundo o qual todas as forças inerciais são causadas pela distribuição de matéria no universo. Este princípio também foi bastante influente sobre a formulação de Einstein da teoria da relatividade geral (Harrison 1981, p. 176).

hidrogênio criado a cada bilhão de anos, em um volume de um litro (Bondi 1952, p. 143). Ela era tão baixa que não poderia ser detectada experimentalmente. Isso contribuiu para que muitos astrônomos que seguiam a tradição empirista não levassem a teoria muito a sério.

De maneira geral, a postura de Bond, Gold e Hoyle era a de desconfiar das observações realizadas pelos astrônomos que não podiam ser explicados pela teoria do Estado Estacionário. Como veremos na Atividade II: *O desfecho da controvérsia* eles obtiveram um razoável sucesso com esta estratégia durante certo tempo. Porém, a postura de valorização de argumentos teóricos e filosóficos, assim como o pouco valor dado às observações gerou um sentimento forte de oposição em relação à teoria do Estado Estacionário.

No começo da década de 1950 a teoria do Estado Estacionário se estabeleceu com um dos modelos cosmológicos disponíveis, entre vários outros, mas não chamou a atenção de muitos cientistas. Apenas alguns estudiosos britânicos, como os cosmólogos William McCrea e Dennis Sciama publicaram artigos científicos comentando e desenvolvendo a teoria. No entanto as palestras e livros populares escritos por Hoyle contribuíram para que a teoria ficasse conhecida entre o público em geral (Kragh 2004, p. 232).

7 O desfecho da controvérsia

Nesta seção vamos apresentar brevemente como os desenvolvimentos da astronomia observacional causaram o término da controvérsia entre a teoria do big bang e a do estado estacionário.

No fim da década de 1950 após muitas controvérsias a teoria do estado estacionário era considerada como uma das principais teorias alternativas à teoria do big bang de Gamow. Desenvolvimentos da astronomia observacional permitiram o rápido crescimento de dados para serem interpretados e utilizados para testar as teorias cosmológicas, de forma que os argumentos filosóficos, estéticos e religiosos passaram a ter uma importância cada vez menor no âmbito das discussões científicas (Kragh 1996, p.318).

7.1 Sucessos da teoria do estado estacionário

Uma série de argumentos observacionais foram utilizados contra a teoria do estado estacionário. A princípio, Hoyle, Bondi e Gold se saíram bem defendendo sua teoria. Um deles foi o chamado efeito Stebbins-Whitford. Os astrônomos estadunidenses Joel Stebbins (1878 – 1966) e Albert Whitford (1905-2002) observaram uma série de galáxias elípticas que pareciam mais vermelhas do que o esperado a partir de suas medidas de redshift. Isso parecia indicar que as galáxias mais distantes seriam mais vermelhas, o que contraria o Princípio Cosmológico Perfeito. Segundo a teoria do

estado estacionário, a distribuição de galáxias vermelhas deveria ser uniforme ou aleatória. O fato de que galáxias mais distantes serem mais vermelhas poderia ser interpretado como evolução temporal do universo: as galáxias mais distantes seriam mais vermelhas por conter mais gigantes vermelhas, que são estrelas velhas.

Em 1954, Bondi, Gold e Sciama escreveram um artigo criticando a interpretação dos dados do chamado efeito Stebbins-Whitford. Dois anos depois o próprio Whitford assumiu que seus dados eram inconclusivos para a questão cosmológica e em pouco tempo esta questão foi esquecida (Kragh 1996, p. 278) Acabou se concluindo que as medidas não eram confiáveis e essa evidência foi descartada (Hoyle et al. 2001, p. 66). Sendo assim pode-se dizer que a teoria do estado estacionário teve certo sucesso ao se livrar desta possibilidade de refutação.

7.2 A resolução do problema da idade do universo

Outro argumento observacional a favor da teoria do estado estacionário era o chamado problema da idade do universo, que era enfrentado pelos modelos em expansão e resolvido naturalmente pela teoria do trio de Cambridge. Hermann Bondi, afirmou em 1952:

A importância do problema da escala de tempo do universo tem sido bastante enfatizada em muitas teorias. A dificuldade aparece por que o recíproco da constante de Hubble, deduzido a partir da relação velocidade-distância, é consideravelmente menor do que a idade da Terra, das estrelas e dos meteoritos, que foram determinadas por diversos métodos diferentes. Dada a importância crucial desta discrepância para tantas teorias, é provável que não existam outras investigações tão significativas para a cosmologia quanto a pesquisa sobre escalas de tempo. Uma redeterminação da constante de Hubble poderia provavelmente ser realizada, aumentando a precisão. Medidas da velocidade de recessão de nebulosas suficientemente distantes, para que sejam pouco influenciadas pelas velocidades aleatórias, seria particularmente valioso (Bondi 1952, p. 165).

Na figura abaixo o canto inferior esquerdo contém as medidas realizadas por Hubble até 1929. Com o tempo, foram realizadas medidas de redshift de galáxias cada vez mais distantes, como Bondi havia previsto.

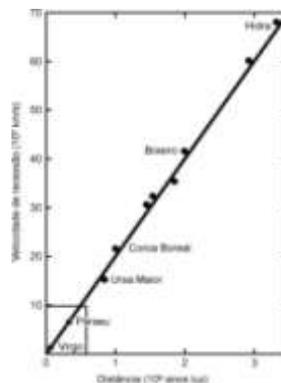


Figura 18: Medições da constante de Hubble³⁷

Novas medidas mais precisas da relação entre a velocidade de recessão das galáxias e de suas distâncias permitiram novas estimativas para a constante de Hubble. Em 1952, Walter Baade, um astrônomo alemão mostrou erros na calibração da curva período-luminosidade utilizada por Hubble para medir distâncias de estrelas variáveis. Com estas modificações, ele chegou a um valor cerca de 3.6 bilhões para o inverso da constante de Hubble.

Isto resolveu parcialmente o chamado problema da “idade do universo”, que era considerado um dos maiores desafios enfrentados pela teoria do big bang nas décadas de 1930 a 1950. Quase todos os astrônomos perceberam que o valor da constante de Hubble ainda era incerto e que poderia ser bem menor que as medidas atuais (Kragh 1996, p. 274).

Este resultado não invalidou a teoria do estado estacionário, mas fez com que ela perdesse força porque eliminou um dos maiores problemas enfrentados pela teoria do big bang.

7.3 A radiação cósmica de fundo

Em 1964, Arno Penzias (1933-) e Robert Wilson (1936-), dois astrônomos americanos, encontraram um ruído de fundo desconhecido usando uma antena de rádio numa empresa de telecomunicações. Após várias tentativas sem sucesso de identificar sua fonte, notaram que o ruído persistia em todas as direções. Perceberam que se tratava de uma radiação na faixa de microondas, que correspondia a uma temperatura de aproximadamente três Kelvin.

Na mesma época, dois físicos teóricos trabalham em Princeton, o estadunidense Robert Dicke (1916-1997) e o canadense James Peebles (1935-), estavam investigando um modelo de universo oscilante, do tipo que já havia sido proposto por Friedmann. Nestes processos de expansão e contração, os elementos químicos seriam criados e destruídos. Eles estimaram a temperatura da radiação de fundo deste universo primordial em cerca de 10 K. Em 1965, Dicke, Peebles e outros colaboradores trabalhavam neste modelo e chegaram a construir um equipamento para detectar a radiação prevista. Quando Penzias percebeu que a radiação encontrada por acaso podia ser o que os físicos teóricos estavam procurando, ele procurou Dicke e em Julho de 1965 Penzias, Wilson e os físicos teóricos de Princeton publicaram um artigo em colaboração no *Astrofísica Journal*. Penzias e Wilson apresentaram sua descoberta experimental e estimaram uma temperatura de 3.5 ± 1 K, sem mencionar as implicações sobre a cosmologia. Isto foi feito por Dicke e Peebles, que interpretaram a radiação encontrada como um fóssil do universo primordial, que ficou conhecida como Radiação

³⁷ A figura 18 foi adaptada de Harrison 1981 p.207.

Cósmica de Fundo (RCF) ³⁸. Isso mostrava que nos estágios iniciais do universo a temperatura e a densidade eram muito altas, como previa a teoria do big bang. Devido a este trabalho, Penzias e Wilson receberam o Prêmio Nobel de Física em 1978. (Kragh 1996, p. 349-350; Neves 2000 b, p. 206).

Na maioria dos livros sobre cosmologia se diz que esta foi uma grande comprovação experimental da teoria do big bang. Gamow e seus colaboradores já teriam previsto a temperatura desta radiação (cerca de 2.7 K) e que a teoria do estado estacionário de Hoyle, Bondi e Gold era incapaz de explicá-la. No entanto, ambos os modelos aceitavam a expansão do universo (Assis & Neves 1995, p.83).

Houve várias previsões para a medida da chamada “temperatura do universo” desde o século XIX (ver tabela 1). Guillaume e Eddington estimaram a temperatura média do espaço interestelar a partir de cálculos envolvendo a radiação eletromagnética emitida pelas estrelas, antes da década de 1930, quando se consolidaram os modelos de universo em expansão. Sendo assim, podemos dizer que seus modelos assumiam que o universo é estático e estacionário. Em 1933, o físico alemão Erich Regener (1881-1955) também estimou a temperatura do espaço interestelar a partir de estudos envolvendo raios cósmicos e encontrou o valor de 2.8K, muito próximo do valor atual medido para a temperatura da RCF (Neves 2000 A, p.193).

O mesmo valor foi confirmado pelo seu compatriota, o já renomado físico, ganhador do premio Nobel de química em 1920, Walther Nernst (1864-1941), que desenvolveu um modelo de estado estacionário semelhante ao de Hoyle, Bondi e Gold, com criação de matéria, mas sem expansão. Este modelo envolvia uma explicação alternativa para os redshift das galáxias e foi desenvolvido pelos físicos Finlay-Freundlich, Max Born e Louis De Broglie.³⁹ Em 1954, Finlay-Freundlich estimou a temperatura do universo no intervalo entre 1,9K e 6K.

Já Gamow e seus colaboradores fizeram estimativas um pouco maiores para a temperatura do espaço, assumindo um modelo de universo em expansão:

A presente densidade de radiação, (10^{-32} g/cm³) corresponde a uma temperatura da ordem de 5 K. Isto significa que a temperatura do Universo pode ser interpretada como a temperatura de fundo resultante da expansão universal” (Alpher & Hermann 1949 apud Neves 2000 A, p. 191).

Dois anos depois, Gamow fez uma nova estimativa, no seu livro “Creation of the universe” (1952, p.40):

A relação anteriormente estabelecida entre o valor da constante de Hubble e a densidade média do universo nos permite derivar uma expressão simples para a temperatura durante os estágios primordiais da expansão em função do tempo, contado a partir do momento de

³⁸ Para mais detalhes sobre a Radiação Cósmica de Fundo ver (Neves 2000 b, p.206; Waga 2005, p. 165, Arthur 2009).

³⁹Os físicos brasileiros André Assis e Marcos Neves defendem que este modelo “quase nunca é considerado nos livros atuais sobre cosmologia, mas este modelo mostra ser o mais importante de todos eles” (Assis & Neves 1995, p. 83).

compressão máxima. Expressando-o em segundos e a temperatura em graus (...), temos:

$$Temperatura = \frac{15.10^9}{\sqrt{tempo}}$$

Portanto, quando o universo tinha 1 segundo, 1 ano e 1 milhão de anos de idade, sua temperatura era, respectivamente, de 15 bilhões, 3 milhões e 3000 graus absolutos. Inserindo a atual idade do universo na fórmula nós encontramos $T_{presente} = 50K$, o que está de acordo com a estimativa atual para a temperatura do espaço interestelar. Sim, nosso universo levou algum tempo para esfriar e o calor escaldante dos seus primeiros dias tornou-se o frio congelante de hoje!(Gamow 1952, p. 40).

Após a descoberta da RCF o próprio Gamow, numa carta a Penzias, tentou convencê-lo de que ele e seus colaboradores já haviam previsto a temperatura da RCF correta. Ele escreveu que em 1952 teria estimado um “limite superior” de 50K. No entanto, em seu livro fica claro que esta estimativa não era um limite, mas a própria temperatura do espaço interestelar.

ANO	Universo Estático	big bang	Temperatura (K)
1896	Guillaume		5,6
1926	Eddington		3,2
1933	Regener		2,8
1937	Nernst		2,8
1949		Alpher & Hermann	≥ 5
1952		Gamow	50
1954	Finlay-Freundlich		$1 < T < 6$

Figura 20: Medidas para a temperatura do universo⁴⁰

Analisando a tabela, vemos que até a década de 1960, as previsões das teorias de universos estacionários e estáticos eram mais próximas do valor experimental medido por Penzias e Wilson do que as previsões a partir da teoria do big bang. Sendo assim dizer que Gamow já havia previsto a temperatura correta é uma reconstrução racional do processo histórico. Essa postura é comum nos manuais didáticos que não levam em conta a complexidade do processo histórico (Assis & Neves 1995, p.84).

Na década de 1990, com o satélite espacial COBE foi possível se fazer medições muito precisas das flutuações de temperatura presentes na radiação cósmica de fundo. Em 1992 foram apresentados os artigos dos cosmólogos estadunidenses George Smoot (1945-) e John Mather (1946-) com as medidas e suas interpretações teóricas. Em 2003, outro satélite, chamado WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), obteve medidas ainda mais precisas. Como os dados obtidos tinham grande concordância com as previsões da teoria do big bang, seus trabalhos foram vistos como um grande

⁴⁰ A tabela foi retirada de (Neves 2000 a, p. 194). Podemos hoje associar essas previsões a temperatura da radiação cósmica de fundo, porém estes autores fizeram medidas anteriores a sua descoberta, sem acreditar que essa medida pudesse ser confirmada experimentalmente

sucesso, tanto que Smoot e Mather ganharam o prêmio Nobel de 2006 (Arthur 2009, p.9-11).

Comentando seus trabalhos, Smoot lembrou que

Fred Hoyle afirmou certa vez que a teoria do big bang era falha porque não podia explicar a formação primordial das galáxias. Os resultados do COBE provam que ele estava errado. A existência das dobras no tempo, como as vemos, nos mostra que a teoria do big bang, incorporando o efeito da gravidade, pode explicar não só a formação primitiva das galáxias, mas também a agregação, nesses 15 bilhões de anos, de estruturas massivas que sabemos estar presentes no universo de hoje, o que é um triunfo para a teoria e a observação (Smoot 1995, p. 310 apud Arthur 2009, p. 10).

Concordando com Smoot, John Mather afirmou que o resultado das medidas do satélite espacial acabou com as dúvidas acerca da validade da teoria do big bang. Ao comentar os resultados dessa descoberta em jornais, alguns cientistas dramaticamente sugeriram que se estava vendo “a face de Deus”, ou o “Santo Graal da Cosmologia” (Hoyle et al. 2001, p. viii, Kanipe 1995, p 112).

Smoot e Mather parecem defender que a descoberta da Radiação Cósmica de Fundo pode ser considerada como uma *prova experimental* da teoria do big bang. A ideia de que as teorias científicas são confiáveis por serem provadas é considerada uma concepção inadequada sobre a natureza da ciência. Atualmente a grande maioria da comunidade científica acredita que a partir da teoria do big bang se pode explicar não só a temperatura, mas também outras características observadas pelos satélites espaciais, como suas flutuações de temperatura.

7.4 Novas teorias do estado estacionário

Outra possibilidade de testar a teoria do estado estacionário surgiu com o desenvolvimento da radioastronomia. Martin Ryle (1918-1984), radioastrônomo da universidade de Cambridge (a mesma de Hoyle, Bondi e Gold) completou em 1955 uma pesquisa de contagem de fontes de rádio, cujos resultados eram inconsistentes com a teoria do estado estacionário⁴¹. Os autores da teoria do estado estacionário tentaram defender a sua teoria questionando a validade das medidas e obtiveram certo sucesso até o começo da década de 1960, quando os radio astrônomos resolveram alguns problemas iniciais de suas medidas. Então, a maior parte da comunidade científica passou a concordar que a teoria de Hoyle, Bondi e Gold não era capaz de explicar estas medidas (Kragh 2004, p.234).

A teoria do estado estacionário de Hoyle, Bondi e Gold, que já havia sido seriamente desafiada pelas observações das fontes de rádio, tornou-se ainda mais marginalizada com a descoberta da radiação cósmica de fundo. Para piorar ainda mais a situação da teoria, em 1966 novos dados sobre redshift e quasares tornavam as explicações envolvendo a teoria do estado estacionário muito difíceis e artificiais. A

⁴¹ A interpretação destes dados não é muito simples e por isso foi omitida nesse texto. Para mais detalhes ver (Kragh 1996, p. 306-316, 323-331)

explicação mais simples era a de que o universo no passado era diferente do estado atual (Harrison 1981, p.92; Martins, R. 1994, p. 163, Kragh 2004 p.234).

Bondi e Gold acabaram perdendo o interesse pela cosmologia e passaram a estudar com sucesso outros campos da física e da astronomia. Já Hoyle alterou a teoria antiga, abandonando o chamado Princípio Cosmológico Perfeito (Kragh 1996, p.359). Com dois novos parceiros, o físico inglês Geoffrey Burbidge(1925-) e o astrofísico indiano Jayant Narlikar, Hoyle criou uma nova versão da teoria do estado estacionário, que explica inclusive os dados das flutuações da RCF medidos pelo satélite COBE (Hoyle et al. 2001, p. 197) . Contudo esta teoria não recebeu muita atenção da comunidade científica, trata-se de uma teoria marginalizada⁴².

7.5 O universo teve um começo ou sempre existiu?

Há um número crescente de cientistas que acham que a teoria do Big Bang não é satisfatória, buscando modelos alternativos (Kanipe 1995, Videira & Ribeiro 2004, Hoyle et al 2001, Neves 2000, Novello 2006).

Mesmo dentre os cientistas que aceitam a teoria do big bang, ainda há divergências sobre o que teria acontecido nos instantes iniciais do universo. O físico francês Lévy-Leblond (1940-), por exemplo, aponta que

De acordo com a teoria da relatividade, corpos com massa não podem chegar a velocidades superiores à da luz. Quando se fornece energia para um corpo, aumentando sua velocidade, sua massa inercial também aumenta, de forma que quanto maior a velocidade atingida, mais energia é necessária para aumentar esta velocidade. Assim, a velocidade da luz pode ser vista como uma grandeza “infinita”, porque não pode ser atingida. Porque utilizamos instrumentos de medida e unidades contingentes, nós encontramos um valor finito. Mas, na realidade, é um infinito. O mesmo vale para a idade do Universo: pode-se afirmar que o Universo há vinte bilhões de anos é uma medida convencional e dizer que sua idade é infinita é uma significação profunda, conceitual da teoria. [...] Precisa-se sair da falsa ideia de que o big bang seria um instante. O big bang é uma fase, a fase mais explosiva da vida do Universo, que começou em um tempo infinito e, deste ponto de vista, de que o Universo sempre existiu (Lévy-Leblond 1994 apud Neves 2000 b, p. 226).

Entre os defensores do big bang há uma ampla variedade de posições sobre o que teria acontecido nos instantes iniciais. O big bang pode não ter sido único, mas apenas um dos muitos estágios de contração de um universo oscilante, com vários big bang e big crunch. Pode-se preferir falar sobre o que aconteceu antes do big bang como “outro universo”, mas é também possível ver a situação como o mesmo universo passando por várias fases. É possível ver o big bang como o começo do tempo, mas esta não é única possibilidade (McMullin 1981, p. 39).

⁴² Para mais detalhes sobre a teoria do estado quase estacionário ver Kanipe 1995, p. 113 e Hoyle et al. 2001.

Afinal, o universo sempre existiu ou teve um começo no tempo? A maior parte da comunidade científica aceita a teoria do big bang, que propõe que o universo teve um começo há cerca de 13 bilhões de anos. Esta resposta é a mesma dada pela maior parte das religiões, que propõe um universo criado no passado, com uma idade finita. Tanto que muitas vezes o modelo do big bang foi visto como dando suporte a visão de um universo criado, compatível com o cristianismo.

Porém, não é possível dar uma resposta definitiva para esta pergunta, porque o conhecimento científico não é constituído de verdades absolutas. Sendo assim não se pode afirmar que a ideia de que o universo teve um começo foi provada, ou mesmo aceita de forma unânime na comunidade científica. Ainda há muitas dúvidas sobre o assunto, o que nos leva a uma pluralidade de teorias possíveis para explicar o surgimento do universo (Henrique & Silva 2009, p.12).

8 Bibliografia

ALPHER, Ralph; BETHE, Hans e GAMOW, George. The Origin of Chemical Elements. *Physical Review* v.73, n.7, p. 803-804, 1948.

ALPHER, Ralph e HERMANN, Robert. Remarks on the evolution of the expanding universe, *Physical Review*, 75, 1089-1095, 1949.

ANDRADE, Victória F. e HENRIQUE, Alexandre B. Uma breve história da galáxia. In: *Atas da 61ª Reunião Anual da SBPC*, Manaus, 2009. Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/61ra/minicursos/MC_VictoriaAndrade.pdf>, acesso em janeiro de 2010.

ARP, Halton. *O Universo Vermelho – Desvios para o vermelho, cosmologia e ciência acadêmica*. São Paulo: Editora Perspectiva, 2001.

ARTHURY, Luiz Henrique M. A cosmologia moderna à luz dos elementos da epistemologia de Lakatos In: *Atas do VII Encontro de Pesquisa em Educação em Ciências- ENPEC*. Florianópolis, 2009.

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.

ASSIS, André. K. T.; NEVES, Marcos C. D. e SOARES, Domingos S. d. L. *A cosmologia de Hubble: De um universo finito em expansão a um universo infinito no espaço e no tempo*. In: M. C. D. Neves e J. A. P. d. Silva (Editores), *Evoluções e Revoluções: O Mundo em Transição*, Editora Massoni e LCV Edições, Maringá, pp. 199-221, 2008.

BEISBART, Claus e JUNG, Tobias. Privileged, typical or not even that? – Our place in the world according to the Copernican and the Cosmological Principles. *Journal for General Philosophy of Science*, v. 37, p. 225–256, 2006.

BETHE, Hans. Energy production in stars. *Physical Review*, v. 55, p. 434–456, 1939.

BONDI, Hermann. *Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1952.

BONDI, Hermann e GOLD, Thomas. The Steady-State Theory of the Expanding Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* v.198, p. 252–270, 1948.

BRASIL. Secretaria de Educação Fundamental. *Parâmetros Curriculares Nacionais: ciências naturais*. Brasília: MEC/SEF, 1998.

BURBIDGE, E., Burbidge, G., Fowler, W. and Hoyle, F., Synthesis of elements in stars, *Reviews of Modern Physics*, v.29, p. 547–650, 1957.

- GAMOW, George. *The Creation of the Universe*. Viking Press, (edição de 1961), 1952.
- GODART, Odon e HELLER, Michael. *The expanding universe: Lemaître's unknown manuscript*. Tucson: Pachart Publishing House, 1985.
- HARRISON, Edward. R. *Cosmology. The Science of the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge, 1981.
- HELLER, Michael. *Lemaître, Big Bang, and the Quantum Universe*. (Pachart History of Astronomy, 10) Tucson: Pachart Publishing House, 1996.
- HENRIQUE, Alexandre B.; ANDRADE Victória F. e SILVA, Cibelle C. Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da história da cosmologia: O Grande Debate. In: *Atas do XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física- SNEF*. Vitória, ES, 2009.
- HENRIQUE, Alexandre B. e SILVA, Cibelle Celestino. Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da história da cosmologia: o universo teve um começo ou sempre existiu? In: *Atas do VII Encontro de Pesquisa em Educação em Ciências- ENPEC*. Florianópolis, SC, 2009.
- HERRERA, Nury Isabel Jurado. *A dinâmica do universo: Sir Arthur Eddington e as cosmologias relativísticas* (2002). Dissertação de Mestrado, Instituto de Física "Gleb Wataghin", Unicamp.
- HOYLE, Fred. A new model for the Expanding Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* v.198, p. 372–382, 1948.
- HOYLE, Fred. *The Nature of the universe*. New York, Harper & Row, (edição de 1960), 1950.
- HOYLE, Fred; BURBIDGE Geoffrey e NARLIKAR, Jayant. *A different approach to cosmology*. Cambridge University Press, 2001.
- HUBBLE, Edwin. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15: 168-173, 1929.
- HUBBLE, Edwin e TOLMAN, Richard. Two methods of investigating the nature of the nebular red-shift, *Astrophysical Journal*, 82: 302-337, 1935.
- HUBBLE, Edwin. *The Realm of the Nebulae*, Dover, New York (edição de 1958), 1936.
- KANIPE, Jeff. The pillars of cosmology: a short history and assessment. *Astrophysics and Space Science*, v.227, p.109-118, 1995.
- KRAGH, Helge. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton, Princeton University Press, 1996.
- KRAGH, Helge. The construction of cosmology as a physical science, *Fifth Biennial History of Astronomy Workshop*, Notre Dame University, p. 2, <www.hd.edu/~histast4/exhibits/papers/kragh.html>, 5–8 July, 2001
- KRAGH, Helge e SMIT, Robert. Who discovered the expanding universe? *Hist. Sci*, xli, p.141-162, 2003.
- KRAGH, Helge. *Matter and Spirit in the Universe: Scientific and Religious Preludes to Modern Cosmology*. London: Imperial College Press, 2004.
- KRAGH, Helge. Contemporary History of Cosmology and the Controversy over the Multiverse, *Annals of Science*, v.66, n.4, p. 529 – 551, 2009.
- LARACY, Joseph. The Faith and Reason of Father Georges Lemaître, *Homiletic and Pastoral Review*. p. 50-59, February 2009.
- LEMAÎTRE, Georges. The beginning of the world from the point of view of the quantum theory. *Nature*, v. 127, p.706, 1931.
- LÉVY-LEBLOND, Jean. Science's fiction *Nature*, v.413, p.573, 2001.
- MARTINS, Roberto de A. *O universo: teorias sobre sua origem e evolução*. Ed. Moderna, São Paulo, 1994.

- McMULLIN, Ernan. Is Philosophy relevant to cosmology? *American Philosophical Quarterly*, v.18, n.3, p. 177-189, 1981. Artigo reproduzido em LESLIE, John (ed.) *Physical cosmology and philosophy*, New York, MacMillan Publishing Company, 1990.
- MIDBON, M. A Day Without Yesterday: Georges Lemaitre and the Big Bang, *Commonweal*, p. 18-19, 2000. Disponível em: <<http://www.catholiceducation.org/articles/science/sc0022.html>>, acesso em janeiro de 2010.
- NARLIKAR, Jayant. Was there a Big Bang? *New Scientist*, v. 91, n.1260, p. 19-21, 1981. Artigo reproduzido em LESLIE, John (ed.) *Physical cosmology and philosophy*, New York, MacMillan Publishing Company, 1990.
- NARLIKAR, Jayant e Arp, Halton. Flat spacetime cosmology: a unified framework for extragalactic redshifts. *Astrophysics Journal*, v.405, n.1, p. 51-56, 1993.
- NEVES, Marcos C. D. A questão controversa da cosmologia moderna: uma teoria e suas incongruências - parte 1. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.17 n.2, p. 189-204, 2000 a.
- NEVES, Marcos C. D. A questão controversa da cosmologia moderna: uma teoria e suas incongruências - parte 2. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.17 n.2, p. 205-228, 2000 b.
- NEVES, Marcos C. D. Do mundo fechado da Astronomia à Cosmologia do Universo fechado do Big Bang: revisitando novos dogmas da ciência astronômica. In: SILVA, Cibelle C. (org.) *Estudos de História e Filosofia das Ciências, Subsídios para a aplicação no Ensino*. São Paulo, Editora Livraria da Física, Pp. 139-166, 2006.
- NORTH, John David. *Measure of the universe: a history of modern cosmology*. New York: Dover, (edição de 1991), 1965.
- NOVELLO, Mário. O que é cosmologia?. Editora Jorge Zahar, 2006.
- OLIVEIRA, Jorge H. Noções de cosmologia no ensino médio: o paradigma criacionista do Big Bang e a inibição de teorias rivais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática, Universidade Estadual de Maringá, 2006.
- ROSENFELD, Rogério. A cosmologia. *Revista Física na Escola*, v. 6, n. 1, 2005.
- SCIAMA, Dennis. W.: 1959, *The Unity of the Universe*, Faber and Faber, London.
- VIDEIRA, Antonio A. P.; RIBEIRO, Marcelo B. Cosmologia e Pluralismo Teórico. *Scientiae Studia* (USP), São Paulo, v. 2, n. 4, p. 519-535, 2004.
- VIDEIRA, Antonio A. P. Princípios em Cosmologia. In: Roberto de Andrade Martins, Guillermo Boido, Victor Rodriguez. (Org.). *Física: Estudos Filosóficos e Históricos*. 1 ed. Campinas: AFHIC, p. 1-18, 2006 b.
- WAGA, Ioav. A expansão do universo *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 22, n. 2, p.163-175, jun. 2000.
- WAGA, Ioav. Cem anos de descobertas em cosmologia e novos desafios para o século XXI. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, p. 157-173, mar. 2005.