

CONTROVÉRSIAS NA COSMOLOGIA¹

¹Alexandre Bagdonas Henrique, ²Cibelle Celestino Silva

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

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

Conteúdo

1	O que é cosmologia?	2
1.1	Modelos de universo.....	3
2	O universo estático	3
2.1	A cosmologia newtoniana	4
2.2	Einstein: um universo finito e estático.....	6
3	O universo em expansão	8
3.1	Friedmann: universos em expansão e contração	9
3.2	Lemaître e Eddington: o universo em expansão.....	12
3.3	Hubble: evidências observacionais a favor do universo em expansão	15
4	A teoria do Big Bang	17
4.1	A idade do universo.....	18
4.2	A formação dos elementos químicos.....	19
5	A teoria do Estado Estacionário	21
6	O universo teve um começo ou sempre existiu?	24
7	Bibliografia	25

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 Brasi*²

Inicialmente, vamos discutir brevemente o que é cosmologia e alguns sentidos possíveis atribuídos ao termo *universo* (seção 2). Em seguida vamos apresentar dois

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. Pode ser utilizado para fins educativos desde que citada a fonte.

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

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).

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

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).

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 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

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.

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 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.

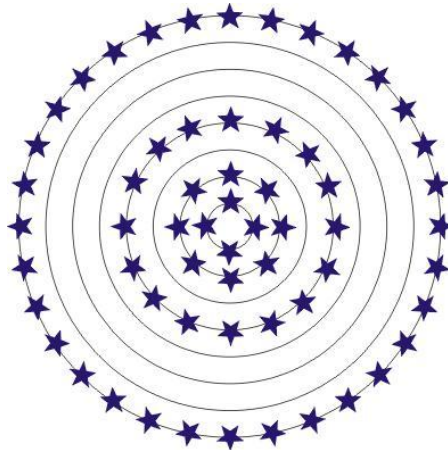


Figura 1: Modelo de universo estático e homogêneo⁵

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 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 (segundo 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

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).

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.

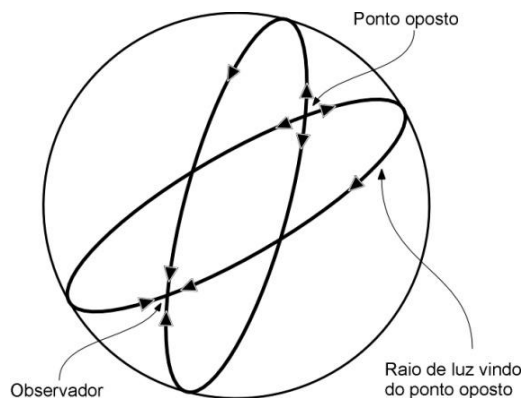


Figura 2: Espaço curvo no modelo de Einstein⁸

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.*

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).

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

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 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.

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:

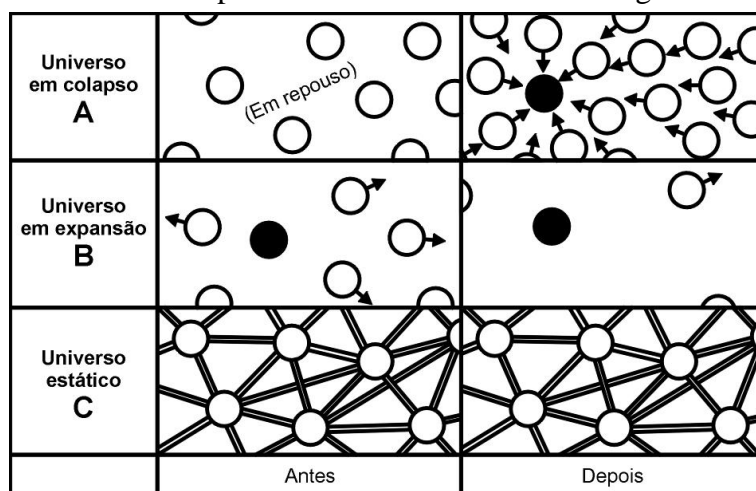


Figura 3: Universo em contração, em expansão e estático⁹

- 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

⁹ 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.

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 complicados¹⁰.

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.

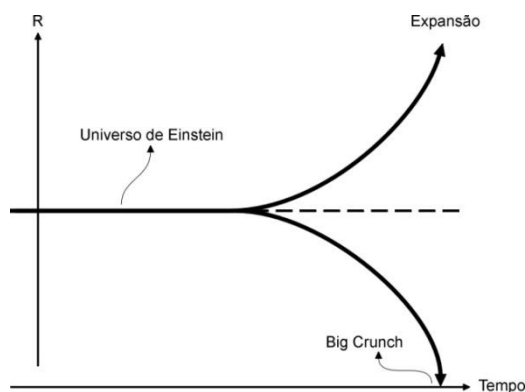


Figura 4: Universos em expansão e contração¹¹

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 visionário¹², 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

¹⁰ 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.

¹¹ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p.295.

¹² Para mais detalhes sobre a obra e vida de Friedmann ver (Waga 2005, p. 158; Kragh 1996, p. 23).

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:

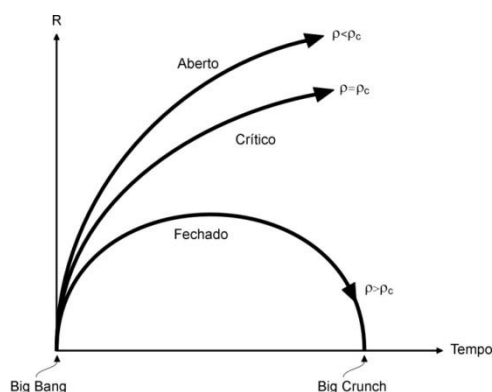


Figura 5: Tipos de universo nos modelos de Friedmann¹³

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*.

¹³ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p.298.

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.

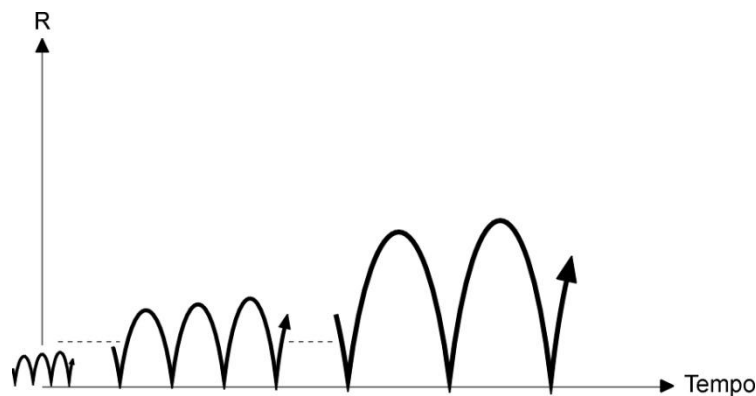


Figura 6: Universo oscilante¹⁴

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 Lemâitre se preocupasse com as evidências observacionais que pudessem dar suporte ao seu modelo (Kragh 2004, p. 129).

¹⁴ 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.

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 Católica¹⁵. 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).

Eddington¹⁶ 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 sistemático para o vermelho do espectro das nebulosas e que os modelos cosmológicos precisavam explicar esse dado experimental (Herrera 2002, p. 72).

Em 1927, Lemaître 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,

¹⁵ Para mais detalhes sobre a vida e obra de Lemaître ver (Waga 2005, p. 159; Kragh 1996, p. 28).

¹⁶ Para mais detalhes sobre a vida e obra de Eddington ver (Herrera 2002).

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.

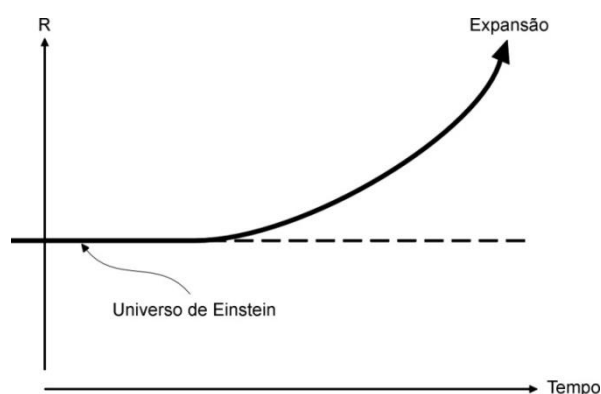


Figura 7: Modelo de Lemaître-Eddington¹⁷

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 $t=0$.

¹⁷ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p. 302.

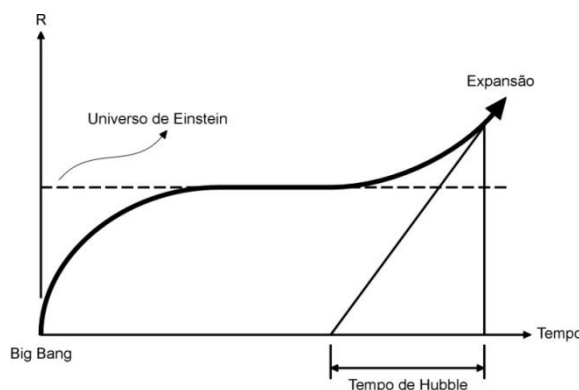


Figura 8: Universo de Lemaître¹⁸

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 construção¹⁹. 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

¹⁸ Esta figura foi adaptada a partir de Harrison 1981, p. 302. A expressão tempo de Hubble será explicada na seção 5.5.1.

¹⁹ Para mais detalhes e referências sobre o processo de construção do conceito de galáxia ver (Andrade & Henrique 2009, Henrique et al. 2009).

(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 Hubble²⁰ 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 absoluta²¹ e o período de variação do brilho das 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 luz²² 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 redshift²³ 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.

²⁰ Para mais detalhes sobre a vida e obra de Hubble ver (Neves 2000 A p.190; Waga 2000, p. 163; Kragh 1996, p. 16).

²¹ 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)

²² 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.

²³ 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.

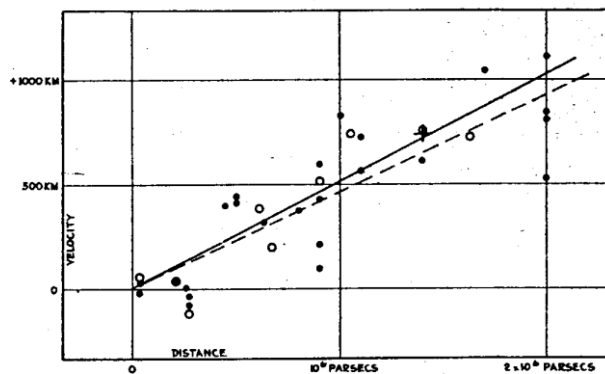


Figura 9: A lei de Hubble²⁴

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.

$$v_{radial} = H_0 d$$

Onde v é a velocidade radial da galáxia, d a distancia 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).

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 Gamow²⁵ (1904–1968), físico russo que

²⁴ 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 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).

²⁵ Para mais detalhes sobre a obra e vida de Gamow ver (Waga 2005, p. 162; Kragh 1996, p. 89).

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.

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 Sol²⁶, 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 premio Nobel em 1967. Em seu trabalho, Bethe também mostrou que:

nenhum elemento mais pesado que o He^4 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 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)²⁷ 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).

²⁶ 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.

²⁷ Para mais detalhes sobre a obra e vida de Alpher e Hermann ver (Kragh 1996, p.111).

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).

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 Friedmann-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 cosmologia²⁸. 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.

²⁸ 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.

Hermann Bondi e Thomas Gold estudaram em Cambridge, onde conheceram o físico e astrônomo inglês Fred Hoyle²⁹. 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.

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 grupos³⁰. 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).

²⁹ Para mais detalhes sobre a vida de Fred Hoyle, Hermann Bondi e Thomas Gold ver (Kragh 1996, p. 162-169).

³⁰ 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).

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 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 reproduzíveis. Argumentaram que o universo não pode mudar em larga escala, pois mudanças no universo acarretariam mudanças nas leis da

física³¹. 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 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 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).

³¹ 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).

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).

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.sbpnet.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.