

# A INOVAÇÃO DO Pe. GEORGE LEMAÎTRE NA COSMOLOGIA: O BIG- BANG.

ANTONIO TADEU F. AMADO\*

\* Antonio Tadeu F. Amado. Físico (PUCSP). Professor Titular de Física Geral da Universidade Católica de Santos -Santos SP- Brasil.

## RESUMO

Por várias décadas os físicos, inclusive brasileiros, têm tradicionalmente considerado que o pai da teoria do Big-Bang é o físico americano-soviético George Gamow, cujos estudos e pesquisas fornecem contribuições essenciais para a explicação das origens do universo e a consolidação da teoria do Big Bang. Mas eles ignoraram as conquistas em Cosmologia do padre belga e Georges Lemaître. Em 1927 ele se tornou o primeiro a propor uma teoria da expansão do universo para explicar os desvios para o vermelho das galáxias, um avanço que é frequentemente atribuído a Edwin Hubble. Lemaître publicou a versão original da Lei de Hubble e produziu a primeira estimativa da constante de Hubble. Ele propôs a teoria da expansão do Universo que ficou mais conhecida como a *teoria do Big Bang para a origem do universo*. Alexander Friedmann, Carl Wilhelm Wirtz, Vesto Slipher, Knut E. Lundmark, Willem de Sitter, Georges H. Lemaître e Edwin Hubble contribuíram para a descoberta da expansão do Universo. Se apenas duas pessoas devem ser classificadas como as mais importantes para a aceitação geral da expansão do universo, a evidência histórica aponta para Lemaître e Hubble, e a resposta adequada para a pergunta, *quem descobriu a expansão do universo*, é: Georges H. Lemaître.

## PALAVRAS-CHAVE

Inovação. Lei de Hubble. Origens do Universo. Expansão. Teoria do Big-Bang.

## INTRODUÇÃO.

**T**emos de volta ao nosso *dia a dia* (um embate que tem alimentado todo tipo de mídia e enriquecendo muitos e fragilizando outros) o famoso *dilema* do diálogo entre Fé e Razão, ou melhor ainda, que a Fé esteja em confronto permanente com a Razão, como se a segunda até fosse superior a primeira, no entanto, ambas são um produto humano sobre como compreender o que nos cerca e o que está para além

disso. Homens como Thomas Bradwardine, Robert Grossetest, N. Oresme, Abraham bar Chiyya, Abraham ibn Ezra, Johannes Kepler, o próprio Galileu Galilei e Isaac Newton, e tantos outros no séc. XX, são exemplos que souberam lidar com a *fé e o conhecimento científico sem conflitos*; muito antes, já faziam uso da citação de A. Einstein: ... *a Ciência sem a Religião é aleijada, a Religião sem a Ciência é cega*. [Einstein,1956]; ou, a citação de Richard Feynman: *Religião é a cultura da Fé, Ciência é a cultura da dúvida*; ou ainda a mensagem do Papa João Paulo II ao Pe. George Coyne, SJ, diretor do Observatório do Vaticano: *A Ciência pode purificar a religião do erro e da superstição; a Religião pode purificar a Ciência da idolatria e falsos absolutos. Cada um pode atrair um ao outro para um mundo mais amplo, um mundo no qual cada um pode florescer*. Não é possível discordar que, durante grande parte da História, a Religião foi uma *grande motivação para a busca de conhecimento* no mundo.

A harmonia entre *Fé e Razão* tem um ponto encontro na Física Moderna, mostrando de modo admirável que o *mundo passou do condensado para o difuso* e que o *mundo do átomo foi dividido em fragmentos, cada fragmento em pedaços ainda mais menores*, sem depreciar os polímatas gregos (inconceivelmente reduzidos a filósofos) pré-socráticos como Anaximandro (610 a. C— 546 a. C), Empédocles (495 a.C - 430 a.C) Leucipo (primeira metade do século V a.C) e Demócrito (460 a.C - 370 a.C), que foram os primeiros a considerar *que um tipo de organismo pode descender de outro tipo* [Sedley, 2003]. Na Ciência Moderna essa abordagem grega é rejeitada a partir do séc XVII, mostrando que a própria Natureza não é algo fixo de uma vez por todas, mas se encontra em *transformação*. A Ciência do latim *scientia*, traduzido por *conhecimento*, é um empreendimento sistemático que constrói e organiza o conhecimento na forma de explicações testáveis e como a Natureza está em *transformação*, portanto pode ser um arcabouço de uma reunião de fatos, teorias e métodos reunidos. Esse processo de desenvolvimento gradativo através do qual esses itens vão sendo adicionados, isoladamente ou em combinação sempre crescente, constitui o conhecimento e a técnica científica.

Neste trabalho, o objetivo é analisar o lampejo de genialidade do estudo feito pelo Pe. Georges Lemaître, que por sua fascinação pela antiga ideia de que a *lux pode ser o meio primordial do mundo* (como viam Tomas Aquino e Robert Grosseteste), um conceito que tem conotações teológicas e científicas (e que mostram a presença da ideologia na Ciência), desenvolveu a partir dessa ideia a *teoria cosmológica do Big-Bang*, que causou um grande impacto por sua estranheza e até um tanto indesejável, mas que ainda subtende as principais características do *modelo padrão* atual. Soube lidar com a *fé e o conhecimento científico sem conflitos*, um modelo do cientista moderno, um explorador apaixonado da Ciência e da vida e um pesquisador inspirado e aplicado. *Inovação*, essa palavra derivada do latim *innovatio*, modismo da mídia e de gestores em qualquer nível, foi o que o Pe. George Lemaître fez; não uma simples renovação, pois implicou numa ruptura com a situação vigente da época. Fez algo efetivamente novo e não a simples renovação (confundida atualmente com *inovação*), que implica fazer aparecer algo sob um aspecto novo. Desenvolveu sua pesquisa nos moldes ingleses, sem a participação da tão enaltecida *pesquisa institucional*, formada por *grupos* que não modificam o essencial.

## A EMERGÊNCIA DA COSMOLOGIA.

O desenvolvimento científico não pode ser examinado desde o alvorecer consciente do ser humano que procura compreender a Natureza, sem ser confrontado com a *magia*, o *misticismo* e as *visões míticas*. A imagem de um *microcosmo*, mundo habitado, cercado pelas regiões desérticas são identificadas com o *caos* e o *reino dos mortos*. Esse tipo de identificação permanece nas civilizações mais evoluídas do passado como as da Mesopotâmia, Egito,

Índia e China. Pelo fato de atacarem e colocarem em perigo o equilíbrio e a própria vida do território habitado e organizado, os inimigos eram identificados com as forças demoníacas, pois tentavam unificar esse microcosmo ao estado caótico. Hoje em dia ainda existem essas imagens quando se trata de definir os perigos que ameaçam um determinado tipo de grupo humano. No todo, essas expressões significam a abolição da ordem, de um Cosmos, de uma estrutura; redirecionando ao caótico. O estudo desses diferentes modos de conceber, nas civilizações antigas, de onde e como surgiu tudo que existe possui uma bibliografia vasta e bastante específica [Martins, 1994].

Aparentemente essas idéias podem parecer irrelevantes hoje, pois em nossa cultura científica somos educados a nos concentrar num mundo físico e material que está diante de nós, mas há aproximadamente 14 mil anos atrás, a sensação de estar *cercado pelo invisível* representava algo concreto, uma certa intelecção do *nume divino* [Otto, 2007]. Segundo Rudolph Otto, esse senso *numinoso* precedia qualquer desejo de explicar a origem do mundo ou de encontrar uma base para a conduta ética. Atuava nos seres humanos de modo diferente, infundindo o pavor, respeito, sensação de humildade e ao mesmo tempo inspirava uma excitação selvagem e uma calma profunda. Quando nossos antepassados começaram a criar seus mitos e a adorar seus deuses, não tinham como objetivo a busca de uma explicação literal para os fenômenos naturais.

Entre esses fenômenos naturais temos a aparência inconstante do céu que intrigava a mente do homem primitivo e a sua imaginação. Alguns deuses das religiões primitivas eram a Lua, o Sol e os cinco astros errantes cujos nomes mostram claramente esse aspecto da divinização (os nomes atualmente usados representam os deuses da mitologia grega): Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Nesse despertar, existe um grupo de conceitos que dizem respeito a algumas perspectivas do nosso tema: cosmologia, cosmogonia e cosmografia. Cosmologia (do grego: *cosmos / ordem / mundo / estudo*), foi e é usada tanto pela Filosofia que lida com o mundo, quanto na Ciência que investigam o início, os fenômenos, a ordem e as Leis do Universo. Combinar os dois termos Cosmologia e origens do Universo sem maiores especificações causa mal-entendidos e confusões. A Cosmogonia (do grego: universo e nascimento), investiga a origem e formação do Cosmos, não é tanto utilizada pela Ciência, mas pelas História das Culturas e Religiões, para indicar as doutrinas, teorias e reflexões relativas à *origem e formação do mundo*.

*Cosmos* é uma palavra inglesa, um órfão lingüístico, um substantivo, do mesmo modo como em português, que, no entanto, em sua origem no grego, é um verbo ativo, transitivo *kosméo*, colocar em ordem, arranjar, *arrumar a partir de um estado primordial* ou elementar sem a intervenção de deuses; embora com um componente estético que leva ao uso derivado de *kosmos*, significando *ornamento, ornamentar*. Portanto era uma forma inteligente de contemplação do Céu; levando ao conhecimento das principais estrelas e constelações; dos astros errantes (os cinco planetas visíveis a vista desarmada), da alternância dos dias e das noites, das fases da Lua e do deslocamento anual do Sol, propiciando uma medida do tempo (duração entre eventos), em dias, meses e anos, estabelecendo as *primeiras cronologias e calendários*, desenvolvidos à partir da observação do aparecimento e desaparecimento à Leste e a Oeste, de estrelas e constelações.

Uma tradição de propriedade comum de origem babilônica com influência sumeriana, cujo resultado principal combina temas cosmológicos, é apresentado num interessante *Poema da Criação* [Papavero, 1986], também conhecido como *Enuma Elish* (Quando no Alto), gravado em tabuinhas de argila, que remonta do terceiro milênio. Esse poema épico comemorava

a vitória dos deuses sobre o caos; não uma narrativa factual das origens físicas da vida na Terra, mas uma tentativa simbólica de sugerir um grande mistério e liberar seu poder sagrado.

De qualquer forma, todas as histórias ficam caracterizadas por uma concepção que podemos denominar como *astrológico-religiosa* (na verdade são mais propriamente *teogonias*), típica dos povos antigos quando tentavam explicar a organização do *Cosmos* pela projeção da experiência humana e social a um plano divino. Em todos os mitos aparecem informações sobre um *caos inicial* ocupado por um abismo de águas que pelo *triunfo da Luz* e essas águas são separadas em águas celestes e águas terrestres, estabelecendo assim a morada dos corpos celestes (deuses), animais, plantas e finalmente o homem, nessa ordem na maioria dos mitos [Papavero & Balsa, 1986]. O análogo ao *Enuma Elish*, pode ser encontrada no primeiro livro bíblico, uma espécie de Código Sacerdotal, o *Bereshit* (Gênesis), possivelmente enraizado no poema babilônico apresentado acima, possibilitando a identificação de uma redução das concepções politeístas e sintetizando numa concepção monoteísta mais bela, lógica e evoluída; mostrando a *sutileza do Criador*.

Nessas concepções, a idéia central é que o *céu*, sólido como um espelho (ou escudo) de bronze, extremamente firme, daí *firmamento*, sustentado por *colunas acima da terra* (solo); o *céu* sustentava acima de si as águas celestes, que por vezes eram deixadas cair; o *Sol percorria todo o firmamento* (e aqui existem várias alegorias sobre o comportamento do Sol: herói, esposo, etc); a terra (*plana*) é semelhante a uma embarcação flutuando sobre as águas terrestres e acima do abismo das águas inferiores. Abaixo ficava o *Sheol* o local onde se reuniam as almas dos mortos. Desta feita, seria possível explicar o porquê da *sustentação no espaço sem cair no vazio* como uma pedra

Embora notáveis, os *mitos cosmogônicos* pouco revelam do conhecimento astronômico e científico da Natureza, a não ser alguns nomes de estrelas e das constelações. No entanto eles nos parecem estranhos, acostumados como estamos por *considerarmos como válida uma Cosmologia* fundamentada pelo conhecimento astronômico de nossos dias. Se quisermos saber a forma do Universo e a posição que a Terra nele ocupa, ou a relação da Terra com o Sol e do Sol com as estrelas, estamos prontos para aceitar a opinião de um astrônomo ou em alguns casos de um físico, mas não a de um *místico*. Acreditamos hoje nas *observações pormenorizadas* realizadas por esses profissionais, de modo que as concepções de hoje são frutos de suas *pesquisas conscienciosas*. Mas a do *místico* como foi descrito acima, eram *verdades científicas* do passado. Os *mitos* nos informam sobre uma descrição *proto-científica* da Natureza, representam o *impulso informativo* que deram origem as *cosmologias mais técnicas e abstratas* que hoje são familiares [Hartmann, 1982].

A *Cosmogonia* é a área do conhecimento humano que faz a tentativa para decifrar a *origem dos sistemas celestes* e suas principais formações, desde p sistema solar às estrelas, *galáxias* e aglomerados de galáxias. A *Cosmologia* tem como foco as grandes estruturas, *estrutura física e evolução do Universo*, mas frequentemente envolve a *Cosmogonia*. Embora de origem desconhecida a Cosmologia, oferece respostas. Uma *mitológica*, registradas nos escritos das civilizações babilônicas, egípcia, grega, indiana e chinesa. Mesmo se aproximando supostamente da *verdade* estagnaram inevitavelmente devido a inflexibilidade e ao dogmatismo. A outra é a abordagem *científica de hoje* distanciando-se da visão mística e religiosa, com base na observação dos fenômenos mensuráveis; assim uma teoria moderna conhecida como *teoria do Big-Bang*, representa uma *teoria cosmogônica* e uma *teoria cosmológica*, portanto ambas, pois ela leva em conta a *origem* e a *estrutura* do Universo.

Os primeiros passos foram naturalmente limitados pelo estado primitivo da Astronomia e os *primeiros cosmólogos*, por assim dizer, fixaram sua atenção nas estrelas, no Sol, na Terra, na

Lua e nos cinco planetas conhecidos. O primeiro fato ocorreu no séc.VI a. C nas costas da Ásia Menor, onde houve um rompimento abrupto desse estudo surgido na *escola pitagórica*, buscando oferecer explicações para os fenômenos observados a partir de causas naturais; tentando oferecer uma *cosmologia racional* com base em certas leis quantitativas, rompendo radicalmente com a visão, até então prevalecente, de que a *Terra era plana* (parece até uma piada que as teorias conspiratórias em pleno séc. XXI retomem essas ideias tão primitivas). O segundo fato por volta do século XIII, quando um *scholar* inglês da Ordem Franciscana Robert Grosseteste (1175-1253), Bispo de Lincoln trabalhando no Merton College (de onde é originária a Universidade de Oxford) mergulhou nesse tema. Seu tratado *De luce. On the metaphysics of light*, é a obra mais original do mundo ocidental em que propõe uma *cosmologia* baseada na *doutrina da luz* como primeira forma de todos os corpos [Grosseteste, 1942].

Com os escritos dos astrônomos gregos se tornaram disponíveis, as especulações acabaram por retomar os estudos realizados pelos pitagóricos sobre o *heliocentrismo*, principalmente o trabalho do jovem pitagórico de Aristarco de Samos (310 a.C- 230 a. C) que propôs um *modelo heliocêntrico* consistente antecipando em 2000 anos a publicação do *cônego* Nicolau Copérnico (1473- 1543) *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Revolução das Orbes Celestes) em 1543, que fundou a denominada *cosmologia heliocêntrica* [Amado, 1998]. No séc. XVIII a *cosmologia* recebeu um grande impulso com William Herschel (1738 - 1822) quando ele observou as *manchas difusas de luz*, as nebulosas, através de seu telescópio, considerando-as como *universos isolados*. Criou assim um ramo independente da Astronomia, a *Astronomia Extragaláctica*, além de ter dado um grande passo no sentido de *posicionar a Terra* numa perspectiva adequada em relação ao resto do Universo.

No alvorecer do séc. XX se inicia um novo período do estudo, com uma estruturação matemática, começando em 1915 quando Albert Einstein e David Hilbert forneceram as *equações de campo* corretas para uma *teoria relativística da gravitação*, ou seja, a Relatividade Geral. Em 1917, Einstein usou sua nova teoria para descrever a *estrutura do Universo como um todo*, definindo o que ele chamou de *Considerações Cosmológicas* [Einstein, p. 225, 1972]. Daí surgiram os primeiros *modelos relativísticos do Universo*, derivados como veremos da ausência completa de qualquer pista observacional.

## QUEM É GEORGE LEMAÎTRE?

Georges Lemaître nasceu na cidade industrial belga de Charleroi em 17 de julho de 1894. Ele serviu como um soldado voluntário de infantaria do exército francês durante a Primeira Guerra Mundial. Ele nunca se tornou um oficial porque ele ousou corrigir os cálculos balísticos de seu instrutor. Após a escola secundária, ele ingressou na Universidade Católica de Louvain (Companhia de Jesus) para estudar Engenharia de Minas, mas acabou mudando de área de formação e completou, em apenas 1 ano, a formação em Matemática e Física, obtendo um MSc com uma dissertação sob a supervisão do famoso matemático belga Jean Étienne Gustave Nicolas, barão de *la Vallée Poussin* (1866-1962), especializando-se em Matemática Aplicada. Durante esse ano, em 1919, estudou também Filosofia, principalmente a de Aristóteles e Santo Tomás de Aquino, no Instituto fundado pelo Cardeal Mercier. Posteriormente, ele entrou no Seminário de Malines cursando também Teologia, tendo sido *ordenado* como *abbé* em 1922. Tinha uma vida espiritual muito profunda.

Desde a sua ordenação, ele se tornou membro da Fraternidade Sacerdotal dos Amigos de Jesus, fundada pelo cardeal Mercier, cujos sacerdotes faziam *voto de fé*, especialmente, um voto de pobreza, comprometendo-se a fazer uma hora de adoração depois da missa diária

e a participar de um retiro anual de dez dias. Durante este período, 1920–1923, o Cardeal Mercier deu-lhe permissão para continuar a estudar Física. Ele se encantou com a leitura dos artigos de Einstein sobre a Relatividade Geral e as primeiras publicações do físico e matemático belga Théophile de Donder (1872 – 1957), da Universidade de Bruxelas, que na época era um dos melhores especialistas na Teoria da Gravitação de Einstein. A influência de De Donder foi importante.

O primeiro artigo científico de Lemaître foi de fato dedicado ao *Cálculo Variacional*, área da Matemática para a qual De Donder fez grandes contribuições e que ainda hoje é um assunto de grande atividade em Matemática. No final dos seus estudos eclesiásticos, Lemaître tornou-se ele próprio um especialista em Relatividade Geral e acabou escrevendo um manuscrito de 131 páginas intitulado *La physique d'Einstein* [Stoffel and Lemaître, 1996], que possibilitou obter uma bolsa na Universidade de Cambridge para trabalhar com o astrônomo real britânico, Sir Arthur Eddington (1882- 1944) para estudar Astronomia, fato ocorrido entre os anos de 1923 - 1924.

Em 1924, ele foi para os Estados Unidos para fazer um estágio acadêmico, passando esse ano e o seguinte no Harvard College Observatory, em Massachusetts. Em 1925, ele foi convidado para o cargo de *Professor de tempo parcial* (Ordentlicher Professor) na Universidade Louvain, tendo aceitado, mas continuou ligado à Universidade de Harvard e ao Instituto de Tecnologia de Massachusetts, nos Estados Unidos para completar sua *tese de Ph.D.* Por sugestão de Eddington, escolheu como tema do seu Ph.D estudar um problema na área da Relatividade Geral, descrevendo o *campo gravitacional dentro de uma esfera preenchida por um fluido isotrópico, mas não homogêneo.*

Apresentou sua dissertação doutoral para obter o Ph.D. em 1927 no MIT, cujo supervisor foi o famoso astrônomo norte americano Harlow Shapley (1885- 1972) sob o título: *The gravitational field in a fluid sphere of uniform invariant density according to the theory of relativity.*

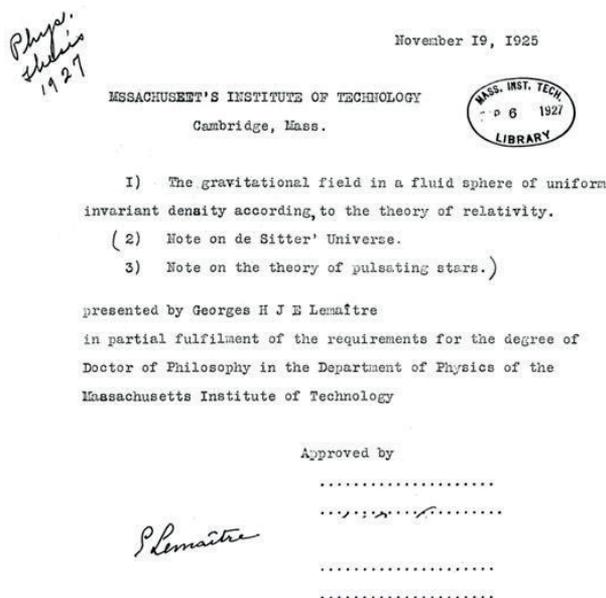


Figura 1

Após seu retorno a Louvain, ele publica em 1927 o artigo que ele desenvolveu, parte em Harvard, parte no MIT e parte em Louvain: *Un Univers homogène de masse constante et de rayon*

*croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques* [Lemaître, 1927]. Esse artigo mereceu um elogioso e longo comentário de sir Arthur Eddington em 1931 [Eddington, 1931], publicado nos *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Eddington o descreveu como uma *solução brilhante* para os problemas pendentes da Cosmologia. Einstein se recusou a aceitar a possibilidade de que *o universo estava se expandindo*, fazendo o seguinte comentário: *Vos calculs sont corrects, mais votre physique est abominable* (Seus cálculos estão corretos, mas sua física é abominável).

Mas o comentário de Einstein não procede muito, pois na tentativa suplantar a teoria gravitacional de Isaac Newton, ocasionando sim, o surgimento da *Cosmologia Teórica*, pois as *equações de campo gravitacional* obtidas a partir Teoria da Relatividade Geral e aplicadas a Cosmologia, dão origem a um conjunto inicial de três soluções distintas, cada uma delas caracterizada por um tipo de *curvatura do espaço-tempo* diferentes, portanto é uma *tarefa matemática*, pois para resolver o *problema cosmológico*, que consiste na determinação de uma *métrica em grande escala* do Universo 4-dimensional e uma correspondente *distribuição de massa-energia em grande escala*, as soluções devem satisfazer as equações.

No título de seu artigo, Lemaître apresentou uma interpretação do *redshift* das galáxias remotas que se tornou a interpretação padrão na Cosmologia moderna; ou seja, o fato ocorre devido à expansão do *espaço-tempo*, e não ao movimento das galáxias através de um *espaço-tempo estático*. É o *próprio espaço que se expande*, uma ideia tão radical que o astrônomo norte americano Edwin Powell Hubble (1889- 1953) cujas observações forneceram evidências de que a *velocidade recessiva de uma galáxia aumenta com sua distância da Terra* (uma propriedade agora conhecida como *Lei de Hubble*), e o qual mais tarde ficou conhecido como o *descobridor da expansão do universo*, nunca quis aceitar uma *concepção relativística de um espaço-tempo em expansão*.

Entre os vários cientistas que aplicaram a Relatividade Geral ao estudo do Universo, essa publicação de Lemaître, cujas soluções para o caso de um Universo homogêneo, isotrópico e em expansão fornece uma explicação natural para as observações de Vesto Slipher [Slipher, 1913] e posteriormente Hubble. Na verdade, essa solução foi encontrada de forma independente também pelo matemático russo Alexander Friedmann [1888-1925] em 1922, que não estava ciente de sua relevância astronômica. Infelizmente, seu artigo foi bloqueado por Einstein que não admitia, em parte por razões filosóficas (na verdade religiosas, por ser judeu e conhecer muito bem o *Bereshit*) a ideia de um *Universo não estático*. Na verdade, a aplicação dos princípios mais gerais à natureza do Universo produziu uma solução dinâmica que entrava em conflito com a noção einsteiniana de um *Universo estático* e vários físicos e matemáticos estabeleceram uma teoria consistente de um *Universo em expansão* usando as equações de campo da Relatividade Geral de Einstein. Em 1932, o próprio Einstein e o astrônomo holandês Willien De Sitter (1832- 1934) desenvolveram uma *cosmologia expansionista*, na qual a *geometria do espaço-tempo* se assemelha a do espaço euclidiano normal.

As ideias intuitivas e qualitativas de Lemaître receberam seu primeiro tratamento rigoroso por volta de 1930 no contexto de algumas noções hipotéticas de Robert A. Millikan (1868-1953) e seu colaborador G. Harvey Cameron (1902-1977) [Millikan & Cameron, 1928]. O problema abordado por Millikan era explicar a origem e a natureza dos *raios cósmicos* detectados por balões ou nos observatórios astronômicos de montanha. Ele presumiu que esses *raios* eram na verdade a *radiação eletromagnética*, cuja hipótese presumia a materialização (por um processo hipotético), que daria origem aos prótons, electrons e nêutrons (que ainda não haviam sido descobertos, uma concepção nuclear apenas de Ernest Rutherford); adotando a

ideia de um processo de materialização da radiação, mas não considerando o fato de que os raios cósmicos são uma fonte de partículas elementares.

Lemaître acabou chegando à conclusão sobre a possibilidade de que a *luz era o estado original da matéria e que toda a matéria condensada nas estrelas foi formada pelo processo proposto por Millikan* [Lemaître, 1930]. Essa ideia estranha e hipotética é o que o conduziu progressivamente no caminho da *pré-história* da Teoria do Big-Bang, ou seja, a *hipótese do átomo primordial*.

O que catalisa drasticamente a apresentação de tal hipótese são as publicações de Sir Arthur Eddington em 1931 e principalmente o artigo publicado na revista Nature [Eddington, 1931]. O astrônomo britânico *extrapolou o Universo em expansão para o passado*. O Universo parece entrar em colapso e tende ao que poderia ser considerado *um início da ordem atual*. Mas, de acordo com Eddington, seria *filosoficamente repugnante* porque é uma mera confusão entre a Física e a Teologia da Criação [Eddington 1931]. Lemaître respondeu imediatamente, afirmando que não é *nada repugnante* (confrontando seu ex-professor). Em uma *carta ao editor* da prestigiosa revista Nature, ele escreve [Lemaître, 1931]:

Sir Arthur Eddington afirma que, filosoficamente, a noção de um início da presente ordem da Natureza é repugnante para ele. Eu preferiria estar inclinado a pensar que o estado atual da Teoria Quântica sugere um início do mundo muito diferente da ordem atual da Natureza. Os princípios termodinâmicos do ponto de vista da Teoria Quântica podem ser enunciados como segue: (1) A quantidade total de Energia é constante distribuída em quanta discretos. (2) O número de quanta distintos está sempre aumentando. Se voltarmos no decorrer do tempo, devemos encontrar cada vez menos quanta, até encontrarmos toda a Energia do Universo embalada em poucos ou mesmo em um único quantum.

Invocou assim, que devido ao contexto Millikan-Cameron, o *início do espaço-tempo* pode ser considerado como a desintegração de um único quantum: o *átomo primordial*. Este *quantum*, isto é, o *estado inicial do universo em expansão*, nada mais é do que a versão de Millikan reescrita com a Mecânica Quântica. Conforme sua afirmação, o *início do mundo* é poético, *um pouco antes do início do espaço e do tempo* e não pode ser descrito estritamente por nossa física atual. Então não poderia ser *repugnante* e, ao contrário, a noção do *início do espaço-tempo* pode receber uma descrição física pura como a *pulverização de um quantum* [Lemaître, 1931]

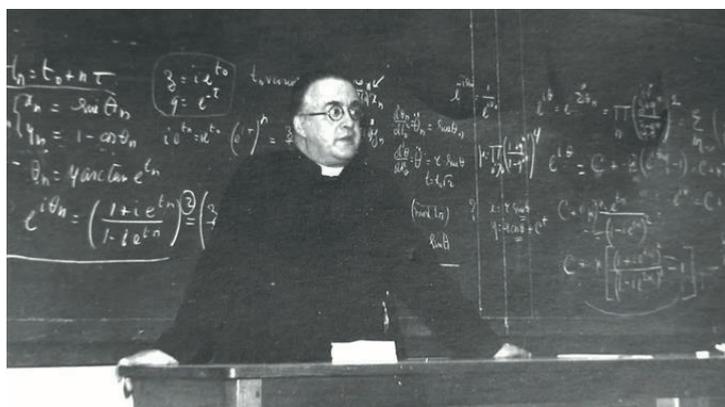


Fig. 2

Em 1933, Lemaître fez uma revisão de *sua cosmologia* em um artigo técnico publicado nos Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America [Lemaître, 1933] com o título Evolution of the expanding Universe (Evolução do Universo em expan-

são). Este artigo é interessante porque envolve alguns conceitos tratados por Lemaître em seu PhD e uma abordagem original sobre o *problema das singularidades*. Particularmente, Lemaître mostrou que o *raio de Schwarzschild* (físico e astrônomo alemão Karl Schwarzschild) [Schwarzschild, 1999], não era uma *singularidade física real*. Assim, ele deu início ao estudo do que hoje chamamos de *horizontes*. É interessante notar que já em 1925 Lemaître havia se interessado pelas singularidades, mostrando que seria possível eliminar um *horizonte fictício no Universo* de De Sitter, por uma mudança apropriada do sistema de coordenadas.

De acordo com Lemaître, a história completa do Universo não foi *pré-escrita* em um átomo primordial. Essa história mostra algumas inovações reais com as *relações de indeterminação* devido a W. Heisenberg (1901-1976) [Heisenberg, 1949]. Como Lemaître mesmo afirmou no artigo de 1931 [Lemaître, 1931]:

*Claramente, o quantum inicial não poderia esconder em si mesmo, todo o curso da evolução; mas, de acordo com o princípio da indeterminação, isso não é necessário. Nosso mundo agora é entendido como um mundo onde algo realmente acontece; toda a história do mundo não precisava ter sido escrita para baixo no primeiro quantum como uma canção no disco de um fonógrafo. Todo o assunto do mundo deve ter estado presente no início, mas a história que tem para contar pode ser escrita passo a passo.*

É importante notar que esse artigo de 1931 é dedicado a uma aplicação das relações de Heisenberg [Lemaître 1931], possivelmente e não podemos esquecer também, do artigo de seu ex-professor na revista *Mathematical Gazette* [Eddington 1931], onde na parte final afirma que *uma discussão das propriedades do tempo estaria incompleta sem a referência ao Princípio da Indeterminação de Heisenberg*. Ele havia estudado Mecânica Quântica durante sua estada no MIT, mas durante sua carreira ele realmente não se aprofundou muito no estudo da Mecânica Quântica e Teoria Quântica de Campos. Na verdade, ele falhou por não perceber que a Mecânica Quântica *não estava unificada* com a Relatividade Geral. Isso o impediu de apreciar também o tremendo progresso feito por uma jovem geração de físicos após a Segunda Guerra Mundial, trabalhando em Eletrodinâmica Quântica e Física de Partículas Elementares, que ele ironicamente caracterizou como um tipo de *entomologia*.

Lemaître ao tomar conhecimento das medidas realizadas por Hubble, isoladamente deduziu de seus resultados *solução das equações de Einstein* que envolviam uma *singularidade inicial*. Esse *modelo cosmológico* é uma esfera tridimensional que se expande com o Universo (esfera co-movente). Na publicação da *Monthly Notices, The Expanding Universe* [Lemaître, 1931], ele assumiu que o espaço-tempo é positivamente curvo (com *topologia elíptica*), densidade e pressão de matéria variável no tempo e uma *constante cosmológica* tal que, partindo de uma singularidade, o *Universo* primeiro se expande, depois passa por uma fase de *estagnação* durante a qual o seu raio se iguala ao da *solução estática de Einstein*, depois recomeça em expansão acelerada.

Lemaître introduz o revolucionário conceito de átomo primordial que ele imaginou como um *quantum de energia pura* num passado distante, assim o *Universo* seria tão condensado nessa única entidade, e numa visão quase poética, considerou que *o átomo primordial se desintegraria progressivamente dando origem a uma nuvem de átomos de vários pesos atômicos*. Enfatizou, ao contrário de Einstein, a importância da *singularidade inicial* e da *constante cosmológica*, afirmando que esta última oculta as *contribuições quânticas para a gravitação*. Essa *constante cosmológica* serviria também para tornar o período quase estático mais longo ou mais curto e, portanto, poderia ser usada para se ajustar à *idade do Universo* decorrente de dados astronômicos. Esse *modelo* resolveu o *problema da idade* e proporcionou tempo suficiente para formação

das galáxias: *Sou levado a chegar a uma solução da equação de Friedmann [Weinberg, 1972] onde o raio do espaço começa do zero com uma velocidade infinita, desacelera e passa pelo equilíbrio instável [...] antes de expandir novamente em velocidade acelerada.* É esse período de desaceleração que me parece ter desempenhado um dos papéis mais importantes na formação das galáxias e estrelas. Obviamente, está essencialmente ligado a constante cosmológica ...

Hoje podemos afirmar que quase todas as intuições cosmológicas de Lemaître estavam corretas, do *estado inicial denso* e até a ideia da existência de uma *radiação fóssil*. Ele acreditava que essa *radiação fóssil* era proveniente dos *raios cósmicos*, mas sabemos hoje que esses *raios* não devem ser confundidos com a *radiação cósmica de fundo* (CBR) ou o mais correto, *radiação de fundo em microondas* (RCFM).

Posso especular que talvez, se Lemaître ainda estivesse vivo em 2006, ele teria dividido o Prêmio Nobel de Física. O prêmio, foi concedido aos astrofísicos e cosmologistas norte-americanos John C. Mather e George F. Smoot *pela descoberta da forma do corpo negro e da anisotropia da radiação cósmica de fundo em micro-ondas*. Na verdade ele já o teria merecido em 1978, recebido pelos astrônomos norte-americanos da Bell Laboratories, Arno A. Penzias e Robert W. Wilson *pela descoberta da radiação cósmica de fundo* (que deu sustentação observacional para o *modelo do Big-Bang*). Infelizmente, mesmo sendo minha especulação, o fato revela uma daquelas situações em que transparece o preconceito (e porque não uma política) na comunidade científica (que é justificada de várias maneiras).

No final de sua vida, Lemaître se dedicou cada vez mais a problemas de Análise Numérica. Ele era um notável algebrista e desde 1930 usava as *máquinas de calcular* mais poderosas da época, como a Mercedes-Euklid. Em 1958, ele conheceu o Burroughs E101 da Universidade de Louvain, seu primeiro computador eletrônico. Sempre manteve um forte interesse pelo desenvolvimento de computadores e, ainda mais, pelos problemas de linguagem e programação de computadores. Seu último trabalho científico foi dedicado a um estudo muito original do Problema dos Três Corpos na Mecânica Clássica [Lemaître, 1963] apresentando um procedimento matemático que evita singularidades quando os corpos se aproximam, fazendo com que as forças gravitacionais tendam ao infinito.

Lemaître era indagado com frequência como conciliava a *Fé* com as descobertas da ciência moderna. Ele respondia invariavelmente que *não havia conflito*, acrescentando:

Quando você percebe que a Bíblia não pretende ser um manual científico, a velha controvérsia entre Religião e Ciência desaparece. Não há razão para abandonar a Bíblia porque acreditamos que levou dez bilhões de anos para criar o que julgamos ser o Universo. O Gênesis, apenas tenta nos ensinar que um dia em sete deve ser dedicado ao descanso, à adoração e à reverência, tudo que é necessário para a salvação.

é interessante que no final do manuscrito de seu famoso artigo de 1931, que é considerado o ponto de partida da teoria do Big-Bang, ele escreveu a seguinte conclusão para marcar claramente a fronteira entre a Ciência e a Teologia da Criação:

Acho que todos que acreditam em um Ser Supremo apoiando todos os seres e todas as ações, acreditam também que Deus está essencialmente oculto e podem ficar contentes em ver como a física atual fornece um véu que esconde a criação.

Em 1965, doente em um hospital em Louvain, ele soube por seu assistente, o astrônomo belga Odon Godart (1913-1996) da descoberta feita por Penzias e Wilson. Ficou feliz porque

a existência da *radiação fóssil* havia sido provada, mas ao mesmo tempo entristecido: sua natureza não eram os raios cósmicos. Veio a falecer em 20 de junho de 1966.

Hoje se pode afirmar que a intuição de Lemaître sobre a *radiação fóssil* pode ser considerada como uma verdade parcial (um argumento usado pela *nobre comunidade científica*).

## O DILEMA COSMOLÓGICO.

### i) O Problema Cosmológico de Einstein.

A Cosmologia moderna encontrou sua inspiração na Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein. Isso não apenas forneceu a dinâmica e a óptica necessárias, mas também abriu a porta para possibilidades geométricas empolgantes como modelos de Universos não estáticos na época em que os astrônomos descobriram, para sua grande surpresa, que eles eram necessários.

A maioria das Cosmologias modernas supõem a existência da *isotropia*. Esse fato caso dispensado, não leva a dificuldades excessivas como no caso da *homogeneidade*. A *isotropia* de todo modo, implica *homogeneidade* (mas não vice-versa). *Homogeneidade* significa, que a totalidade das observações que qualquer observador pode fazer no Universo é idêntica à totalidade das observações que outro observador pode fazer em qualquer lugar no Universo. Em outras palavras, se ao longo de todo o tempo nós aqui, como observadores, pudéssemos registrar todas as observações, como a densidade e distribuição direcional das galáxias, sua taxa de expansão, etc., juntamente com o registro do tempo em que as observações foram feitas (medidas, digamos, por relógios de césio padrão), então a *homogeneidade* seria equivalente à coincidência de todos esses registros (até uma possível translação no tempo, é claro) [Walker, 1937]. A suposição de *homogeneidade em grande escala*, associada com a suposição de *isotropia em grande escala*, portanto, as propriedades do Universo, são as mesmas para todos os observadores, é chamado de *Princípio Cosmológico*.

O *Princípio Cosmológico* (e todas as suposições de simetria semelhantes) pode ser considerado como definindo um *Universo relativístico*, ou seja, um *grupo de transformações sob as quais o Universo em grande escala se transforma em si mesmo*. Por esta razão, podemos considerar qualquer Cosmologia baseada em princípios como a Teoria da Relatividade Geral é nesse sentido uma *Cosmologia relativística*.

No artigo de 1917 Einstein [Einstein, 1917; Einstein, 1974] comenta sobre a *estrada indireta e cheia de armadilhas* que seguiu para chegar ao *primeiro modelo cosmológico moderno*, um Universo *isotrópico, homogêneo, ilimitado*, mas espacialmente *finito e estático* (não mencionou que o *espaço-tempo* é estático em média, como suposição). Quando Einstein introduziu seu *modelo relativístico* de Universo, quase nada se sabia sobre a *expansão*, de modo que não surpreende que o modelo não seja mais considerado viável. As soluções matemáticas ainda valem como um guia para as condições de um *modelo de Universo aceitável* e para a *física da expansão*.

Em 1915, havia poucas oportunidades ou nenhuma de testar a Teoria da Relatividade Geral (na verdade as oportunidades surgiram recentemente). Foram obtidas as equações de campo descrevendo a interação gravitacional equivalentemente a geometria de um *espaço-tempo curvo* determinado por seu conteúdo de matéria e energia [Misner, Thorne and Wheeler, 1973]

É um conjunto de *dez equações chamadas equações de campo de Einstein* [Amado, 2016] que relaciona a *geometria do espaço-tempo* de um lado e a distribuição de *massa / energia* do outro,

$$(1) \quad R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R = -8\pi GT_{\alpha\beta}$$

Na forma mais compacta

$$(1.a) \quad G_{\alpha\beta} = -8\pi GT_{\alpha\beta}$$

No entanto, em 1917, Einstein corajosamente estendeu a todo o Universo, pois oferecia esperança para a resolução de um conflito aparentemente irreconciliável entre a Gravitação newtoniana e a Cosmologia. O ponto crítico era a *condição de contorno no infinito* [Einstein, 1974]. A Gravitação newtoniana nos diz como encontrar o *potencial gravitacional*  $\phi(\mathbf{r})$  produzido por uma distribuição de massa a partir da equação de Newton - Poisson (historicamente, a *teoria relativística* da Cosmologia *precedeu* de fato a *teoria newtoniana*, a qual foi desenvolvida para fornecer uma interpretação mais simples para os resultados realísticos),

$$(1b) \quad \nabla^2\phi(\mathbf{r}) = -4\pi G\rho$$

Onde,  $\rho$  denota a *densidade de matéria*, e  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  [Nm<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>] a constante de acoplamento gravitacional de Newton. Como a *força gravitacional* tem alcance infinito, quando  $\phi(\mathbf{r}) \rightarrow 0$ ; a solução da equação de Newton - Poisson é

$$(2) \quad \phi(\mathbf{r}) = -G \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3\mathbf{r}'$$

Aqui a integral se estende sobre todo o espaço, dessa forma  $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$  denota a posição do ponto  $\mathbf{r}'$  em relação a fonte pontual em  $\mathbf{r}$ . Para a integral *convergir* a densidade deve se aproximar de zero mais depressa do que  $(1/r^2)$  quando  $r \rightarrow \infty$ . O sucesso obtido para o sistema solar e escalas galácticas deram aos cosmologistas newtonianos razões e confiança para sua validade no Universo inteiro. A *gravidade apenas atrai*, mas o Universo não entrou em colapso. Para explicar a não ocorrência dessa catástrofe, Newton formulou a hipótese de que a população de estrelas se estende ao infinito, simetricamente em todas as direções, com *densidade uniforme na escala cósmica*. No entanto, se a densidade  $\rho$  não se anula no infinito, então a integral *diverge*.

Einstein sugeriu uma saída para esse impasse de longa data, pois que mesmo que  $\phi(\mathbf{r})$  se mantenha finito para  $r$  muito grande, as dificuldades permaneceriam. Nesse sentido o *universo newtoniano* é finito, ainda que a sua massa total possa ser infinitamente grande. Resulta do fato que uma parte da radiação emitida pelos corpos celestes se esvanecerá para fora desse *universo newtoniano*. Por outro lado a premissa da existência de um *limite finito* para  $\phi(\mathbf{r})$  no infinito, irá implicar na possibilidade de um corpo celeste dotado de uma quantidade finita de Energia Cinética suficiente, poderia escapar da atração gravitacional das outras estrelas, da mesma forma que as moléculas de água evaporam no ar. Einstein levou em conta os princípios da Mecânica Estatística, afirmando a possibilidade de tais ocorrências ocasionais quando no sistema estelar existir energia total suficiente para poder ser transferida totalmente para um mesmo corpo celeste, transportando-o para o infinito sem regresso [Einstein, 1972]; a menos que se atribua um valor elevado para o valor  $\phi(\mathbf{r})$  no infinito.

As estrelas que compõem um sistema devem ser tratadas como as *moléculas de um gás ideal*, sendo assim, aplicando a Lei de distribuição de Boltzmann válida para moléculas de um gás, comparando o *sistema estrelas a um gás em que o movimento térmico seja estacionário*, esse sistema

não poderia existir. Portanto, a diferença de potencial finita existente entre o ponto central e o infinito corresponderá

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{r}') - \phi(\mathbf{r}) &\rightarrow \text{finito} \\ n_{\text{estrelas}} &= n_0 e^{-\frac{\phi(\mathbf{r})}{kT}} \quad \ln n_{\text{estrelas}} = -\frac{\phi(\mathbf{r})}{kT} \cdot l \\ n'_{\text{estrelas}} &= n_0 e^{-\frac{\phi'(\mathbf{r})}{kT}} \Rightarrow \ln n'_{\text{estrelas}} = -\frac{\phi'(\mathbf{r})}{kT} \cdot l \\ \frac{n_{\text{estrelas}}}{n'_{\text{estrelas}}} &= e^{-\frac{\overbrace{\phi'(\mathbf{r}) - \phi(\mathbf{r})}^{\text{finito}}}{kT}} \Leftrightarrow \text{finito} \end{aligned}$$

Logo, a dissipação da *densidade* no infinito implicaria na dissipação da *densidade* no centro [Einstein, 1972]. Então é feita uma alteração na equação de Newton- Poisson explorando tal cenário com uma *constante cosmológica*  $\Lambda$  na equação de Poisson (uma proposta que tem origem no séc. XIX),

$$(3) \quad \nabla^2 \phi(\mathbf{r}) - \Lambda \phi(\mathbf{r}) = -4\pi G \rho$$

Com a constante  $\Lambda$  suficientemente pequena, na escala de um Sistema Solar ou da Galáxia a densidade de massa  $\rho$  domina,  $\Lambda \phi(\mathbf{r})$  é desprezível e a solução newtoniana familiar prevalece. Na escala cósmica vendo o Universo como um *gás de galáxias* com alguma densidade constante suavizada  $\rho_0$ ,  $\phi(\mathbf{r}) \rightarrow \phi_0(\mathbf{r})$  é uniforme, então  $\nabla^2 \phi(\mathbf{r})$  se anula. Sob esta circunstância, a equação de Poisson modificada fixa o potencial cósmico como

$$(5) \quad G_{\alpha\beta} - \Lambda g_{\alpha\beta} = -8\pi G T_{\alpha\beta}$$

Então o **campo de gravidade se anula para permitir um universo estático**. Claro, quando Einstein apresentou essa modificação na equação, ele não estava tentando manter a *cosmologia newtoniana*; ele estava apenas demonstrando como uma nova constante poderia estender a gravitação a escalas cosmológicas sem comprometer os sucessos estabelecidos pela teoria [Einstein, 1972]. O conflito aqui desaparece.

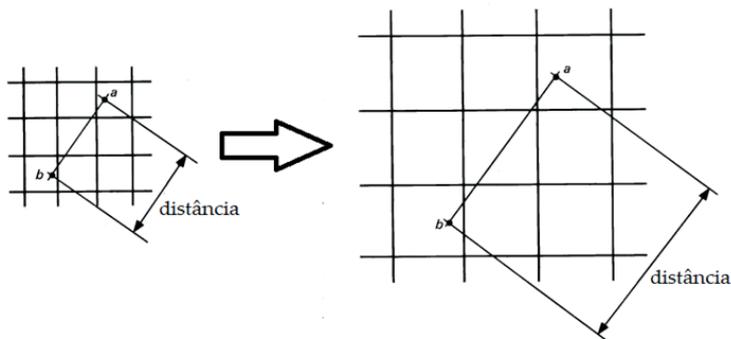
As modificações sugerem então a necessidade da consideração da mesma constante  $\Lambda$  para resolver o conflito do *infinito newtoniano*, tendo consciência que a introdução da constante levava a uma complicação da teoria, o que reduz seriamente sua simplicidade lógica;

$$(4) \quad \phi(\mathbf{r}) = -\frac{4\pi G}{\Lambda} \rho$$

O termo  $\Lambda g_{\alpha\beta}$  também pode ser considerado um *novo tipo de fonte de gravidade*. Se consideramos  $\Lambda > 0$ , um *Universo estático* é garantido pois  $\Lambda$  deve se opor à atração de fontes de gravidade comuns; daí o sinal escolhido para  $\Lambda$  na equação de campo modificada. Fazendo uma pequena alteração

$$\begin{aligned} G_{\alpha\beta} &= -8\pi G T_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta} = -8\pi G \left( T_{\alpha\beta} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\alpha\beta} \right) \\ (6) \quad G_{\alpha\beta} &= -8\pi G \left( T_{\alpha\beta} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\alpha\beta} \right) \end{aligned}$$

Se definirmos  $\Lambda > 0$ , para garantir um universo estático  $\Lambda$  deve se opor à atração de fontes gravitantes comuns; daí o sinal escolhido para  $\Lambda$  na equação de campo modificada. Para uma descrição do Universo como um sistema físico que satisfaz o *Princípio Cosmológico*, que o *espaço-tempo* deve ser definido a partir de um conjunto de coordenadas num referencial comóvel (síncrono).



**Figura 3** Um sistema de coordenadas em comovimento sobre uma superfície reticulada em expansão. Todas as distâncias entre os pontos  $a$  e  $b$  mantêm um valor constante (mas a distância real aumenta)

Isso corrige a parte geométrica da eq. 6 dada por  $G_{\alpha\beta}$ ; o termo representativo da fonte também deve ser compatível com um *espaço homogêneo e isotrópico*. A escolha *mais simples e plausível* é ter o *tensor de energia-momento* no segundo membro da equação representando um fluido ideal. Deve ser *ideal* porque a *condutividade térmica* e a *viscosidade* não são importantes no *fluido cósmico*. Então, a descrição mais apropriada de um fluido ideal é especificada por dois parâmetros: a densidade de massa  $\rho$  e a pressão  $p$ .

Lembrando da Relatividade Restrita [Amado, 2016] o tempo adequado no espaço-tempo está relacionado ao tempo do laboratório  $t$ , e nesse caso o tempo é simplesmente *convertido em metros* a partir da relação:  $s$  [metros] =  $c \cdot t$  [segundos]; onde  $c$  é a velocidade da luz. No entanto um espaço-tempo generalizado não será o familiar espaço plano de Minkowski  $M^4$  (o *Princípio da Equivalência* fornece um forte argumento para chegarmos a forma geométrica adequada que explica o porquê da *luz* se encurvar devido ao campo gravitacional: o *tecido espacial* suporta se encurva, ou seja, os *fotons* em queda livre caminham no *espaço-tempo distorcido* pela gravidade). Então o intervalo entre dois eventos infinitamente próximos quando o tempo e o espaço são medidos na mesma unidade, a expressão para o quadrado do *intervalo de espaço-tempo* entre os eventos assume uma forma particularmente simples:

Assim,

$$(7) \quad ds^2 = dt^2 - d\ell^2 = dt^2 - g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta$$

Logo  $d\ell$  é por definição a *separação espacial própria* entre os eventos no mesmo *tempo universo*. Lembrando que a expressão  $d\ell = (g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta)^{\frac{1}{2}}$  tem um significado *invariante* em termos do *comprimento próprio* ou *intervalo temporal* entre os eventos vizinhos, com coordenadas de separação  $dx^\alpha$  no espaço-tempo com a métrica dada por  $\mathbf{g}_{\alpha\beta}$ . No sistema de coordenadas locais de Minkowski,  $\mathbf{g}_{\alpha\beta} \equiv \eta_{\alpha\beta}$ . Nesse caso  $dx^\alpha$  e  $dx^\beta$  estão direcionados segundo os eixos coordenados ortogonais, essa quantidade se anula (pelo fato de que  $\mathbf{g}_{\alpha\beta} \equiv \eta_{\alpha\beta}$ , a matriz é definida apenas pelos elementos diagonais).

Como essas quantidades são independentes da escolha das coordenadas, a condição *invariante* de que  $dx^\alpha$  e  $dx^\beta$  são ortogonais implica que  $dx^\alpha \cdot dx^\beta = 0$ ; um fato que serve como um guia para considerar um conjunto de coordenadas convenientes para descrever um Universo espacialmente *homogêneo* e *isotrópico*. O *Princípio Cosmológico* nos permite escrever a *distância diferencial* (elemento de linha) imaginando uma esfera tridimensional *imersa* num espaço tempo quadridimensional com coordenadas cartesianas ortogonais  $x, y, z$  e uma quarta coordenada  $w$ . A distância diferencial entre os pontos vizinhos no espaço será

$$(8) \quad d\ell^2 = dw^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

A esfera tridimensional do *espaço de Einstein* para o conjunto de pontos  $(x, y, z, w)$  numa distância fixa  $R_E$  em relação ao observador (origem)

$$(9) \quad R_E^2 = \underbrace{x^2 + y^2 + z^2}_{r^2} + w^2 = \text{const.}$$

Logo a quarta coordenada é obtida assim

$$w^2 = R_E^2 - r^2$$

Diferenciando essa equação

$$d(w^2) = d(R_E^2 - r^2) \Rightarrow 2wdw = -2rdr \therefore dw = -\frac{rdr}{w}$$

Então

$$(10) \quad dw = -\frac{rdr}{(R_E^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}}$$

Voltando na eq. 4

$$(11) \quad d\ell^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + \frac{r^2}{R_E^2 - r^2} dr^2$$

Fica aqui interessante fazer uma mudança de coordenadas, de retangulares  $x, y, z$  para  $r, \phi, \theta$

$$\begin{cases} x = r \cos \phi \sin \theta \\ y = r \sin \phi \sin \theta \\ z = r \cos \theta \end{cases}$$

Dessa forma

$$\begin{aligned} d\ell^2 &= dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) + \frac{r^2}{R_E^2 - r^2} dr^2 \\ d\ell^2 &= \left( \frac{r^2}{R_E^2 - r^2} + 1 \right) dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \\ (12) \quad d\ell^2 &= \left( \frac{1}{1 - \frac{r^2}{R_E^2}} \right) dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \end{aligned}$$

Esta é a parte espacial do elemento de linha do modelo de Einstein. Ao adicionar a parte ortogonal do tempo na eq. 3, obtemos o elemento de linha quadridimensional desejado,

$$(13) \quad ds^2 = dt^2 - \left(1 - \frac{r^2}{R_E^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 \frac{(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)}{d\Omega^2}$$

$$(13.a) \quad ds^2 = dt^2 - \left(1 - \frac{r^2}{R_E^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

Quando  $r \ll A$  na eq. 10, o resultado se aproxima da forma de Minkowski. Quando  $r$  proporcional a  $A$  o desvio da geometria espacial euclidiana segue o comportamento familiar da superfície de uma esfera. A *homogeneidade* e a *isotropia* requerem que a densidade média de massa média e a pressão sejam funções apenas do tempo universal  $t$ . Fazendo uma nova alteração de coordenada para simplificar, o valor de  $r = A \cdot \text{sen}\chi$ , aqui  $\chi$  pode variar para valores arbitrariamente grandes, de modo que o volume do Universo seja ilimitado

$$(14) \quad ds^2 = dt^2 - R_E^2 [d\chi^2 + \sin^2 \chi d\Omega^2]$$

Além dos efeitos de desvios locais de *homogeneidade*, as galáxias têm que estar em repouso em relação aos observadores em movimento; além do fato que a *homogeneidade* e a *isotropia* exigirem a possibilidade de evoluir em função do tempo a partir da introdução de um fator universal de expansão (ou de escala)  $a(t)$ , escrita aqui como  $a(t)^2$ , portanto

$$(15) \quad ds^2 = dt^2 - a(t)^2 R_E^2 [d\chi^2 + \sin^2 \chi d\Omega^2]$$

A eq. 15 é conhecida como *elemento de linha* de Friedman-Robertson-Walker, um elemento de linha num espaço-tempo homogêneo e isotrópico. As várias formas da equação são obtidas transformando a coordenada radial  $r$ . Considerando que o espaço é vazio  $T_{\alpha\beta} = 0$ ,

$$ds^2 = dt^2 - d\ell^2 = dt^2 - g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta = dt^2 - dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Então é possível encontrar agora a relação entre a densidade de massa  $\rho$  e a taxa de expansão ou contração. A maior parte da densidade de energia reside na matéria ponderável das estrelas, enquanto a pressão vem da luz das estrelas e é relativamente pequena. Para uma distribuição espacialmente homogênea e isotrópica de massa e supondo que toda a matéria está contida numa região arbitrária do espaço limitada por uma esfera de raio  $r(t)$ , pequeno o suficiente para imaginar uma pequena quantidade de matéria, que no instante atual é dado por  $r(t) = r$ . Removendo toda a matéria,  $T_{\alpha\beta} = 0$  resulta que o espaço-tempo é plano dentro da esfera. Retomando a situação, o resultado faz uso da equação de Poisson acima, em uma situação análoga a de um gás cujas partículas se movimentam lentamente. A aceleração gravitacional que a matéria está sujeita é dada

$$(16) \quad \nabla^2 \phi(\mathbf{r}) = \nabla \mathbf{g} = -4\pi G(\rho + 3p)$$

A massa gravitacional na esfera de raio  $r$  será

$$(17) \quad m_g = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot G(\rho + 3p)$$

A aceleração nessa superfície imaginária (solução familiar da equação de Poisson para a lei do inverso do quadrado da distância) escalarmente é

$$\frac{d^2r(t)}{dt^2} = \ddot{r}(t) = -G \frac{m_g}{r^2} = -\frac{4}{3}\pi G(\rho + 3p)r^3$$

$$(18) \quad \ddot{r}(t) = -\frac{4}{3}\pi G(\rho + 3p)r$$

Esse resultado representa o limite newtoniano para a Relatividade Geral quando a distribuição de massa é homogênea e isotrópica [Milne & McCrea, 1934]. Como na Relatividade Restrita a massa é equivalente a quantidade de energia, fica então para o volume que a energia potencial gravitacional é  $U = \rho.V$ ; portanto quando sofre variação de  $r$  para  $(r+dr)$ , a variação da energia será de  $U$  para  $(U+dU)$ , portanto  $r=f(t)$ , assim a pressão exercida realizara um trabalho mecânico  $(-p dV)$ , mas é conhecido que

$$dU = d(\rho V) = \rho. dV + V. d\rho = -p. dV \Leftrightarrow V. d\rho = -(\rho + p). dV$$

Portanto

$$d\rho = -(\rho + p). \frac{dV}{V} = -(\rho + p). \frac{\frac{4}{3}\pi 3r^2. dr}{\frac{4}{3}\pi r^3}$$

$$d\rho = -3(\rho + p). \frac{dr}{r}$$

A variação no tempo em ambos os membros da equação leva a

$$\frac{d\rho}{dt} = \dot{\rho} = -\frac{3(\rho + p)}{r}. \frac{dr}{dt} = -3(\rho + p). \frac{\dot{r}}{r}$$

Isolando  $3p$ , na eq.15,

$$\ddot{r}(t) = -\frac{4}{3}\pi G \left( \rho - \dot{\rho}. \frac{r}{\dot{r}} - 3\rho \right) r$$

$$\ddot{r}(t) = \frac{8}{3}\pi G \rho r + \frac{4}{3}\pi G \dot{\rho}. \frac{r^2}{\dot{r}}$$

Assim, multiplicando toda a equação por  $\dot{r}$  obtém-se um diferencial exato cuja integral resulta o valor da velocidade

$$(19) \quad \dot{r}(t) = \frac{8}{3}\pi G \rho r^2 + K$$

A quantidade  $K$  é uma constante de integração. Essa constante de integração na equação para uma *solução estática*, onde  $r$  é constante, , onde  $R_E$  foi dado na eq. 11, e corresponde ao *raio de curvatura*. Num *Universo estático*, as eq. 15 e 16, se anulam

$$(20) \quad \frac{4}{3}\pi G(\rho + 3p)r = 0 \text{ e } \frac{8}{3}\pi G \rho r^2 - \frac{r^2}{R_E^2} = 0$$

Da segunda equação

$$(20. a) \quad \frac{8}{3}\pi G \rho - \frac{1}{R_E^2} = 0$$

Satisfazem as condições de um Universo em *equilíbrio estático* com  $r(t)$  constante. No entanto a primeira mostra que  $p=-1/3\rho$ , impossível para um sistema formado por um gás de

estrelas ou galáxias. Daí a posição de Einstein assumir a eq. 6 com a introdução da *constante cosmológica*  $\Lambda$ . Nesse caso para as condições de um *fluido ideal* em coordenadas de Minkowski locais e  $T_{\alpha\beta} \neq 0$ , a constante cosmológica introduz uma densidade de energia e pressão eficazes no universo que têm sinais opostos:

$$(21) \quad \rho = \rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G} \quad e \quad p = p_\Lambda = -\frac{\Lambda}{8\pi G}$$

As quantidades  $\rho_\Lambda$  e  $p_\Lambda$  devem ser adicionadas à densidade e pressão da matéria comum na eq. 17.a. Com as simplificações, dos resultados das eq.17.b e 18 obtemos

$$(22) \quad R_E = \frac{1}{\sqrt{\Lambda}}$$

Nessa equação  $R_E$  é o raio do Universo espacialmente fechado (esfera  $S^3$  de volume  $V = 2\pi^2 R_E^3$ ). A massa total do modelo de Einstein é finita. Tais resultados demonstram também que a *constante cosmológica* é desprezível na física do Sistema Solar, mas pode ter importância crucial nas grandes escalas cosmológicas. No modelo é anulado o efeito atrativo da auto-gravitação, evitando o colapso da matéria cósmica e possibilitando uma *solução estática e finita*. O modelo de *universo de Einstein* é, portanto, *estático em equilíbrio instável* e finito (embora, é claro, ilimitado), com uma curvatura positiva e uma densidade que são fixadas pelas constantes fundamentais  $\Lambda$  e  $G$ .

A partir de 1920, a descoberta de uma relação sistemática entre o *deslocamento para o vermelho*, os *redshifts* (existem três tipos mensuráveis de *redshifts*: o gravitacional, o clássico Doppler-Fizeau e o de *expansão*) e a *medida de distância* removeu qualquer interesse no *Universo estático de Einstein* como um modelo cosmológico realista. Einstein não especulou se o modelo é corroborado pela observação. Além disso, afirmou que o resultado foi obtido introduzindo uma *extensão das equações de campo* não justificada pelo conhecimento gravitacional da época. A *constante cosmológica* se fazia necessária apenas para tornar possível uma distribuição estática de matéria, como requerida pelas pequenas velocidades estelares (Einstein na época não tinha conhecimento das medidas de velocidade das galáxias) [Einstein, 1974].

## ii) A descoberta da expansão do Universo.

A descoberta da *expansão do Universo* na sequência histórica dos fatos foi uma grande surpresa, embora, como tantas vezes acontece na ciência física, possamos ver a conexão com o que veio antes. O Universo não parece ter uma borda, um centro ou uma parte externa, então como ele pode se expandir? A diferença está entre a *expansão do espaço* e a *expansão no espaço*, que embora pareça sutil, mas tem consequências para o tamanho do Universo, a taxa na qual as galáxias se afastam, o tipo de observações que os astrônomos podem fazer.

Para medir grandes distâncias, como a distância de um planeta ou uma estrela da Terra, os astrônomos usam o *princípio da paralaxe*. *Paralaxe* é o semi-ângulo de inclinação entre as linhas de visada para a estrela, observado quando a Terra está em lados opostos do Sol em sua órbita. Em Astronomia, a diferença na direção de um objeto celeste como visto por um observador de dois pontos amplamente separados representa a *paralaxe*. A medida da *paralaxe* é usada diretamente para encontrar a distância do corpo da Terra (*paralaxe geocêntrica*) e do Sol (*paralaxe heliocêntrica*). A primeira determinação da *paralaxe* foi realizada pelo astrônomo grego Hiparco de Nicéia (190 aC - 120 aC) para a Lua, de longe o corpo celeste mais próximo.

A partir do século XVII, a maioria dos astrônomos assumiu que as estrelas eram objetos semelhantes ao Sol, mas a distâncias muito maiores. O método de determinação de distância usado por Isaac Newton e outros envolveu, assumiu que o Sol e as estrelas têm as mesmas *luminosidades intrínsecas*, um procedimento hoje conhecido como método de *paralaxe fotométrica*. Então, a *lei do inverso quadrado* poderia ser usada para medir as distâncias relativas do Sol e das estrelas. O principal problema técnico era que o Sol é muito mais brilhante do que as estrelas mais brilhantes, o que tornava difícil obter boas estimativas da proporção de suas densidades de fluxo luminoso observadas, ou magnitudes aparentes. Uma solução engenhosa foi descoberta em 1668 pelo matemático inglês James Gregory (1638-1675), que usou a luminosidade do planeta Júpiter como um *padrão de luminosidade* intermediário, assumindo que sua luz era inteiramente composta de luz solar refletida do disco do planeta e que sua superfície era atuava como um refletor. Então, as magnitudes aparentes de Júpiter e da estrela Sirius poderiam ser comparadas, e descobriu-se que a distância de Sirius da Terra era de 83.190 unidades astronômicas. O mesmo método foi usado por John Michell (1724-1793) em 1767 para estimar uma distância de 460.000 unidades astronômicas para a estrela Vega, ou  $\alpha$ -Lyrae, da Terra (Michell, 1767); um resultado melhor do que o obtido em 1838 pelo astrônomo alemão Friedrich G. W. von Struve (1793- 1864) que usou o método da *paralaxe heliocêntrica* ou *trigonométrica*. O problema com essa abordagem é que ela depende da suposição de que as *luminosidades intrínsecas do Sol e das estrelas são as mesmas*. As dificuldades estão em como as distâncias podem ser medidas, uma vez que existem várias técnicas, mas todas envolvem os processos de medida dos *sinais luminosos*.

Métodos mais confiáveis podem ser usados apenas em um curto intervalo de distâncias; pois a medida que olhamos mais longe, somos forçados a usar métodos cada vez menos confiáveis, como por exemplo, a *paralaxe heliocêntrica*, a *paralaxe estatística*, as *técnicas de radar*, o *método do aglomerado de estrelas em movimento*, a *relação período-luminosidade*, medida do *brilho intrínseco*, o *diagrama cor-magnitude*, o *diâmetro das regiões H II*. São técnicas bem complexas, meticolosas e dependem de um grande intervalo de tempo.

Para uma exemplificação simples vou considerar o caso a *paralaxe trigonométrica*. A técnica emprega para a medição o deslocamento angular que nos permite determinar as distâncias:

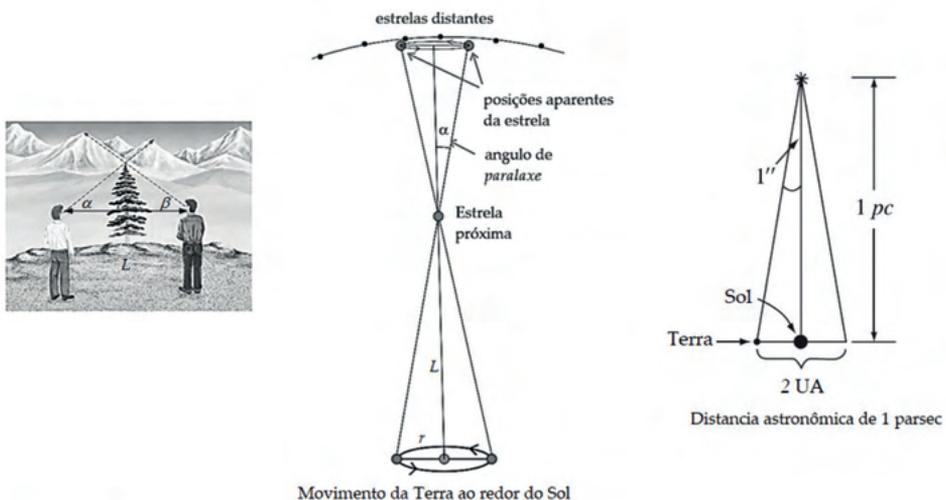


Figura 4

Procedimento semelhante foi usado pelos primeiros agrimensores para medir por exemplo a altura das montanhas (fig.4) usando linhas básicas mais longas. Em uma escala maior, o método das paralaxes foi usado há muito tempo para calcular as distâncias dos planetas e aplicado para medir a distância estelar a partir de um engenhoso artifício: a linha base é a distância entre duas posições da Terra em sua órbita, num intervalo temporal de 6 meses. Na fig.4 a imagem mostra que os observadores estão separados entre si pela distância  $d$  e a árvore está afastada deles a distância  $L$ . Por triangulação

$$\begin{aligned} d &= \frac{L}{\tan \alpha} + \frac{L}{\tan \beta} = L \left( \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \right) = L \left( \frac{\sin \beta \cos \alpha + \sin \alpha \cos \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} \right) \\ &= L \left( \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} \right) \\ (23) \quad L &= d \left( \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right) \end{aligned}$$

Assim se a linha base é o diâmetro médio orbital da Terra,  $3,0.10^8$  [km]= 1[u.a], lembrando a partir da segunda imagem na fig.4, se o *ângulo de paralaxe* é  $\alpha$  então

$$(24) \quad \tan \alpha = \frac{r}{L} \Rightarrow \tan \alpha \approx \alpha \therefore \alpha \approx \frac{r}{L}$$

Mas o ângulo está em *radianos* e precisa ser convertido para *segundos de arco*; assim se o valor do ângulo é  $\nu$

$$(25) \quad \nu \Rightarrow \nu \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3.600$$

Significa então no nosso caso que se a estrela tem *paralaxe*  $\alpha$  em *segundos de arco*

$$\begin{aligned} \alpha &\cong \frac{r}{L} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3.600 \therefore \\ (26) \quad L &= \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3.600 \text{ [u. a]} \end{aligned}$$

Para uma estrela cuja *paralaxe* é  $0,75''$

$$L = \frac{1}{0,75''} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3.600 \text{ [u. a]} = 275.159,23 \text{ [u. a]}$$

Como 1 [u.a]=  $4,84814.10^6$  parsec significa que

$$L = 1,32 \text{ parsec}$$

Na unidade mais convencional, o *ano-luz*, a nossa estrela se encontra a  $4 \text{ anos-luz}$  da Terra. Em outras palavras, a luz levaria 4 anos para atingir a Terra. Ela é *Alfa Centauri*, nossa vizinha galáctica mais próxima.

Esse método, no entanto, só funciona para distâncias de até cem *anos-luz* ou  $30 \text{ parsecs}$ , porque o deslocamento angular é ínfimo e impede uma medida com precisão. Também devido ao dato de muitas estrelas ocuparem regiões muito próximas entre si, a vista do observador, acabam compartilhando da mesma *paralaxe*, que são relativamente pequenas. Nesse caso foi desenvolvida a técnica da *paralaxe estatística* que amplia a escala de distância para mais de  $100 \text{ parsecs}$ .

O astrônomo e compositor alemão naturalizado inglês do séc. XVII, Sir William Herschel (1738 – 1822) anunciou em 13 de março de 1781 a descoberta do planeta Urano, o primeiro planeta a ser descoberto por meio de um telescópio, expandindo as fronteiras do Sistema Solar pela primeira vez na história moderna. Ele era um dos mais habilidosos fabricantes de telescópios. Herschel tentou mapear o Via Láctea em um procedimento que ele chamou de *aferição de estrelas*. Ao assumir que as estrelas tinham as mesmas luminosidades intrínsecas, ele propôs que as distâncias relativas às estrelas a partir das *intensidades relativas de sua luz* que recebemos na Terra. Assim, ele mapeou a Via Láctea, contando estrelas de várias magnitudes, em centenas de campos de visão.

Em 1793 mediu novamente as posições relativas de muitas estrelas duplas ou *estrelas binárias*, comprovando assim sua hipótese de que eram *sistemas binários* estrelas que orbitavam uma ao redor da outra e que obedeciam a mesma Lei da Gravitação newtoniana para os planetas do Sistema Solar (começou a observar estrelas duplas em 1779, publicando posteriormente um catálogo com cerca de 700 estrelas duplas) [Herschel, 1803]. Com isso a universalidade da Teoria da Gravitação de Isaac Newton foi finalmente confirmada. A descoberta do planeta Urano tornou Herschel famoso, mas a Cosmologia foi impulsionada quando ele observou *manchas difusas de luz*, ou *nebulosas* com seu telescópio.

Em sua História Geral da Natureza e Teoria do Céu em 1755, Immanuel Kant propôs duas idéias de longo alcance. A primeira hipótese foi que *as estrelas e seus planetas se formam na condensação de nebulosas*. A segunda hipótese sugeria que *as nebulosas são universos-ilhas, galáxias por si mesmas*, das quais a Via Láctea é o exemplo em que residimos. Kant escreveu: É muito mais natural e razoável supor que uma nebulosa não seja um Sol único e solitário, mas um sistema de sóis. A hipótese do *universo insular* de Kant era na época pura especulação e levantou uma controvérsia que continuou até 1924. Kant era um filósofo formidável, como não tivesse formação em matemática avançada ele não conseguia expressar seus conceitos na linguagem adequada que o poderiam levar a inferências quantitativas testáveis. Esse passo foi dado em 1796 por Pierre-Simon Laplace, que tornou quantitativo o conceito de *colapso da nebulosa* como o mecanismo de formação do Sistema Solar. Depois de 1845, foi sugerido que no *vórtice das nebulosas espirais* estamos vendo a formação do sistema solar em andamento.

Quando Herschel vislumbrou a possibilidade das *nebulosas* serem *universos isolados de estrelas* a Cosmologia tornou-se uma *ciência observacional*. Um século após sua morte as distâncias das *nebulosas em espiral* foram finalmente estabelecidas, chegando-se a conclusão de que as *nebulosas* na verdade são *galáxias* comparáveis a nossa própria galáxia, a Via Láctea. Para a *cosmologia observacional* as *galáxias* são os marcos fundamentais de que se utilizam os astrônomos para mapear o Universo.

O papel crucial no estabelecimento dos campos da Astronomia Extragaláctica e Cosmologia Observacional foi do astrônomo americano Edwin Powell Hubble (1889-1953).

Durante a década que precedeu as descobertas de Hubble, Henrietta Leavitt (1868- 1921), uma astrônoma do Harvard College Observatory, mostrou a existência de uma correlação entre a luminosidade absoluta de estrelas *variáveis cefeidas* e o período de oscilação da intensidade da luz vinda dessas estrelas, que tinham características periódicas únicas [Leavitt, 1912]. Os resultados de Leavitt permitiram inferir sua luminosidade absoluta. Assim, como a intensidade da luz cai com o inverso do quadrado da distância, podemos determinar a distância de uma *estrela cefeida* medindo sua luminosidade aparente e estimando sua luminosidade absoluta através da observação do período [Conceição de Barros, 2018].

O resultado das pesquisas de Leavitt foi utilizado por Hubble, que verificou a partir da relação conhecida entre o *período* e a *luminosidade das estrelas cefeidas* (a *variável cefeida* é uma estrela que pulsa radialmente, variando tanto em temperatura como diâmetro para produzir variações de brilho com um período e amplitude estáveis e bem regulares) em que a determinação do *período de variabilidade* da estrela não depende de sua distância, mas seu *brilho* observado ou aparente, depende da variação do fluxo luminoso com o inverso do quadrado da distância; portanto a partir do *brilho aparente das cefeidas* de Andrômeda em 1923 foi possível calcular a distância entre as galáxias de Andrômeda e Via Láctea, obtendo um valor de quase 1 milhão de anos-luz. Mesmo sendo um *valor errado* para a distância de Andrômeda (o valor aceito é de 2, 537 milhões de a.l), Hubble mostrou que ela estava muito além dos limites de nossa galáxia, que tem *cem mil anos-luz de diâmetro*. Assim ficou provado que Andrômeda era uma galáxia independente. Ao mesmo tempo Hubble estabeleceu indicadores de distância e conseguiu calcular as distâncias para galáxias até dez vezes maiores do que a galáxia de Andrômeda. Esse primeiro passo deu a Hubble os meios necessários para fazer uma descoberta revolucionária: *as galáxias distantes estão se afastando uma das outras*. Esse foi o resultado: *todas as galáxias estão se afastando de nós*.

Edwin Hubble determinou assim a *relação entre a distância de várias galáxias e sua velocidade radial*, derivada do deslocamento Doppler das linhas de absorção no espectro das galáxias.

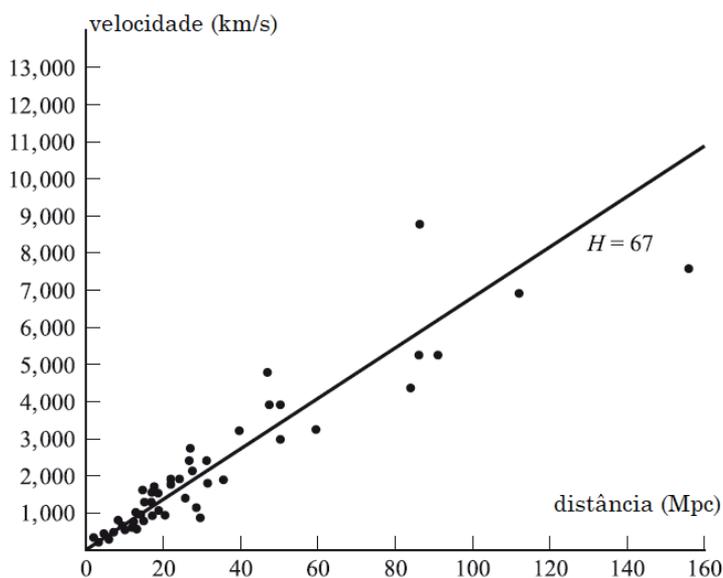


Figura 4 Lei de Hubble

O gráfico mostra que a *velocidade radial*  $v$  é diretamente proporcional à distância  $\ell$ . De modo que a *constante de Hubble*  $H$  é obtida a partir do coeficiente angular da reta

$$(27) \quad v = H \cdot \ell \text{ [kms}^{-1}\text{]}$$

A melhor estimativa hoje (presente) para a *constante de Hubble* é de  $(67,15 \pm 1,20)$   $[\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}]$ . O fato de todas as galáxias estarem se afastando de nós não significa que estejamos em um lugar especial no Universo. A Lei de Hubble pode ser medida em qualquer local do Universo, com o mesmo resultado.

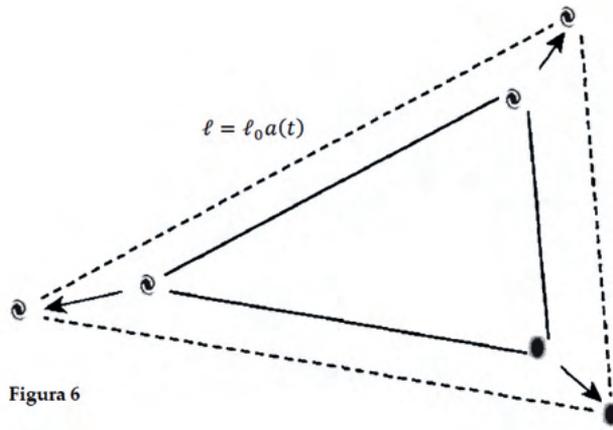


Figura 6

Isso significa que o movimento deve ser homogêneo e isotrópico: todas as regiões do Universo são semelhantes entre si; então como na fig.6, os triângulos novos e antigos devem ser semelhantes, com os mesmos ângulos e o comprimento de cada lado variando pelo mesmo fator. Se a distância física adequada  $\ell(t)$ , com um par de posições galácticas bem separadas no mesmo instante

$$(28) \quad \ell(t) = \ell_0 a(t)$$

A quantidade  $\ell_0$  é constante para cada par e  $a(t)$  é o fator universal de expansão. A variação com o tempo dessa expressão é a taxa de recessão de uma galáxia medida entre dois observadores,

$$\dot{\ell}(t) \equiv v = \ell_0 \dot{a}(t) = \frac{\ell(t)}{a(t)} \dot{a}(t) = \underbrace{\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}}_H \ell(t) \therefore$$

$$(29) \quad v = H \cdot \ell(t)$$

A recessão causa um desvio para o vermelho no espectro da luz recebida de uma galáxia por um observador na outra. Para velocidade de recessão pequena  $v$  este é o deslocamento Doppler de primeira ordem comum, onde o comprimento de onda  $\lambda_{med}$  observado, difere do comprimento de onda  $\lambda_e$  de emissão. A onda luminosa é emitida pela galáxia a uma velocidade de  $N$  ondas por segundo. Então a frequência é  $\nu_e = N$ . Se a galáxia está se afastando de nós a uma velocidade  $v$ , temos que em cada segundo a galáxia terá percorrido uma distância  $v/N$ . O intervalo entre duas ondas luminosas sucessivas emitidas pela galáxia é de  $1/N$  e durante esse tempo a galáxia percorreu a distância  $v/N$ . Portanto, como o observador está em repouso, o intervalo de tempo será

$$(30) \quad \Delta t = \frac{1}{N} + \left(\frac{v}{c}\right) \frac{1}{N} [s]$$

Aqui  $c$  é a velocidade da luz medida entre duas cristas da onda luminosa, considerando o efeito relativístico [Amado, 2016], com uma frequência para a luz menor do que a frequência de emissão

$$\frac{N_{med}}{N_e} = \frac{v_{med}}{v_e} = \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{v} \therefore \frac{\lambda_{med}}{\lambda_e} = 1 + \frac{v}{c} \Leftrightarrow \frac{\lambda_{med}}{\lambda_e} - 1 = \frac{v}{c}$$

$$(31) \quad \frac{\lambda_{med} - \lambda_e}{\lambda_e} \equiv Z = \frac{v}{c} = \frac{H \cdot \ell(t)}{c}$$

O resultado indica que a recessão resulta num desvio para o vermelho, um aumento do comprimento de onda. Mas só é válido para o caso em que as velocidades  $v$  sejam pequenas em relação a velocidade da luz; para  $v$  próxima da velocidade da luz é necessário a correção relativística [Amado, 2016]. A Lei de Hubble, com a correção, reflete o resultado da eq. 31

$$Z = \frac{H \cdot \ell(t)}{c}$$

Como a constante de Hubble é função do tempo

$$H = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

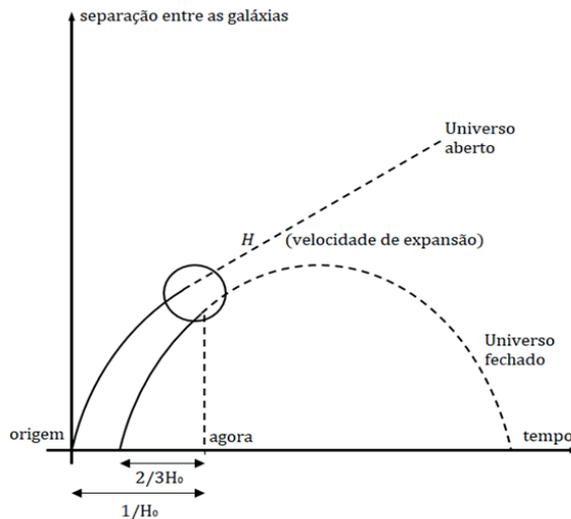
Por esse motivo, foi padronizado que no presente o valor é  $H_0$ .

$$(32) \quad Z = \frac{H_0 \cdot \ell(t)}{c}$$

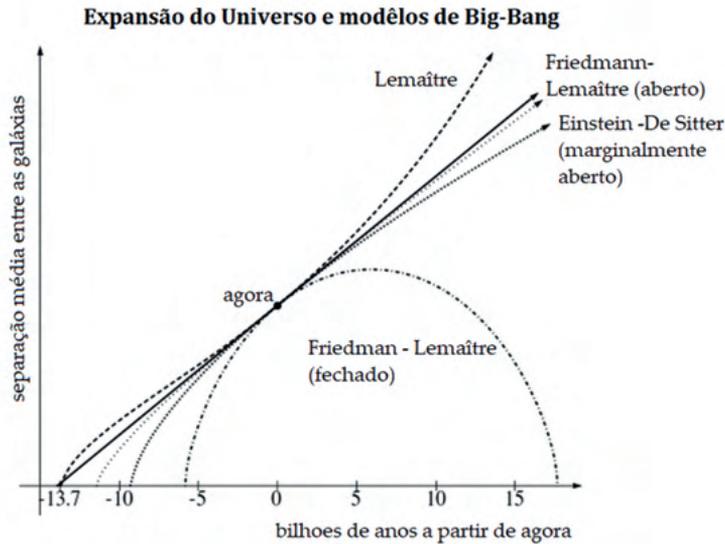
Podemos então calcular o tempo decorrido entre duas galáxias quaisquer e assim a expansão poderá ser rastreada de volta a um estado singular, onde a distância de separação entre as galáxias era nula. Em consequência a idade do Universo pode ser calculada aproximadamente em função da distância relativa e da velocidade relativa para as duas galáxias consideradas. É denominado tempo de Hubble.

$$(33) \quad T_H = \frac{\ell_0}{v} \equiv H_0^{-1}$$

Consistente com a homogeneidade essa escala de tempo é independente de  $\ell(t)$ . O tempo decorrido desde o início da expansão é simplesmente se as velocidades não variaram com o tempo. No entanto, as velocidades das galáxias podem mudar com o tempo, uma vez que a expansão cósmica pode se encontrar num processo de aceleração ou desaceleração; e isso afeta o cálculo de com o passar do tempo a partir do início.



A medida da constante de Hubble nos dá uma estimativa do tempo decorrido desde o instante em que toda a matéria do Universo estava localizada em um *estado arbitrariamente denso* a partir do qual começou a se expandir. Este início da expansão do Universo é o que foi denominado de *Big Bang*. Num Universo *fechado* a idade é menor do que  $2/3H_0$ ; num Universo *aberto* a idade é simplesmente  $1/H_0$ .



**Figura 8**

As observações astronômicas mais completas realizadas até o momento através da chamada *Colaboração Planck*, com base nos dados coletados pelo *satélite Planck*, da Agência Espacial Europeia (ESA), entre 2009 e 2013 mapeou o céu em busca de flutuações na chamada *radiação cósmica de fundo em micro-ondas* RCFM [Aghanim, Nabila, Yashar Akrami, Mark Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, A. J. Banday et al, 2020], tem mostrado que o valor é menor do que  $1/H_0$ , mais próximo do valor  $2/3H_0$ .

## OS MODÉLOS MATEMÁTICOS CLÁSSICOS DO UNIVERSO EM EXPANSÃO.

A falta de observações do Universo profundo, aliada as *considerações cosmológicas de Newton* sobre um Universo infinito e estático, bem como as suas dificuldades conceituais relativas as condições de fronteira no infinito, como vimos, induziram Einstein ao estudo do *Problema Cosmológico*. No entanto com as alterações feitas para acomodar o *equilíbrio estático instável* não se mostraram aceitáveis devido a sua artificialidade. O legado para alguém que havia conquistado notoriedade a partir de suas previsões surpreendentes foi frustrante.

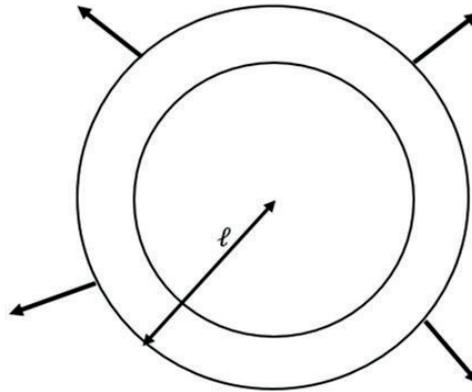
Vários físicos teóricos e muitos matemáticos começaram a investigar o *problema* numa tentativa de descrever a realidade que estava sendo apresentada pelas observações astronômicas.

Avaliando de uma forma elementar o problema, se inicialmente a *separação* entre dois pontos quaisquer é  $\ell(t)$  e igual a sua separação inicial  $\ell_0$  multiplicada pelo fator de expansão  $a(t)$ , não terá ocorrido nenhuma expansão, nessas condições

$$(34) \quad \ell(t) = \ell_0 \Rightarrow a(t) = 1$$

Logo, qualquer variação de  $a(t)$  pode implicar na *velocidade relativa* da expansão.

Seja então, um volume esférico arbitrário, e dividamos esse volume comóvel num grande número de esferas concêntricas, cada uma delas representando os instantes de expansão do Universo. Cada uma dessas esferas concêntricas só aumenta em decorrência da outra. Como a esfera considerada é arbitrária, segue que o raciocínio deve se aplicar a todas as esferas possíveis e, por conseguinte a todas as partículas do Universo. A *energia total* contida no interior dessas esferas concêntricas é dada pela *Energia cinética* e a *Energia Potencial gravitacional*, bem conhecidas do Ensino Médio.



**Figura 4**

A *densidade* no interior desse volume esférico é igual a *densidade de massa cosmológica média*  $\rho$ . Vale lembrar aqui, que o Universo real a matéria existe em *concentrações*, não é homogêneo. Numa esfera arbitrária, se  $\ell(t)$  é o coeficiente de medida que expressa o quanto a esfera se expandiu, a Energia Cinética de expansão do volume dessa esfera por *unidade de massa*, com velocidade de expansão  $v$ ; então;

$$(35) \quad K_e = \frac{1}{2} \underset{=1}{\overset{=1}{m}} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot v^2$$

Se o volume em expansão contém a massa total  $M_e$  que contribui para a sua Energia Potencial Gravitacional que pode ser representada aproximadamente por unidade de massa como

$$(36) \quad V_e = -G \frac{\overset{=1}{\underset{=1}{m}} \cdot M_e}{\ell} = -G \frac{M_e}{\ell}$$

Mas a *densidade cosmológica média* de matéria é

$$\rho = \frac{M_e}{\frac{4}{3}\pi\ell^3} \Rightarrow M_e = \frac{4}{3}\pi\ell^3\rho$$

A equação do movimento será obtida a partir do *Princípio da Conservação da Energia*, também conhecido do Ensino Médio. No entanto, a *cosmologia relativística* originária da Relatividade Geral, apresenta uma equação quase idêntica; mas a interpretação da constante que expressa a *quantidade total de energia* difere nas duas equações. Então

$$E = K_e + V_e = \text{const}$$

Introduzindo a *constante de Hubble*  $H$  a partir da eq. 27, requerida pela *isotropia*, em geral é função do tempo;

$$\frac{1}{2} \cdot v^2 - G \frac{M_e}{\ell} = const \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot (H(t) \cdot \ell(t))^2 - G \frac{4}{3} \pi \ell^3 \rho = const$$

$$(37) \quad \frac{1}{2} H^2(t) \cdot \ell^2(t) - \frac{4}{3} G \pi \ell^2 \rho = const$$

A constante representa a *constante de curvatura*  $\mathcal{K}$  e expressa a *energia média total* possuída por um grama arbitrário de matéria do Universo, um parâmetro matemático que não varia com o tempo assumindo os valores 0, +1, -1 [Amado, 2012].

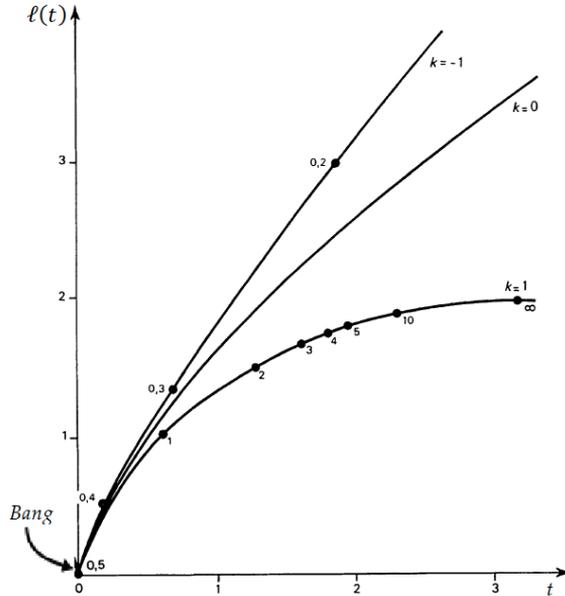


Figura 10. Variação de  $\ell(t)$  em função do tempo cósmico

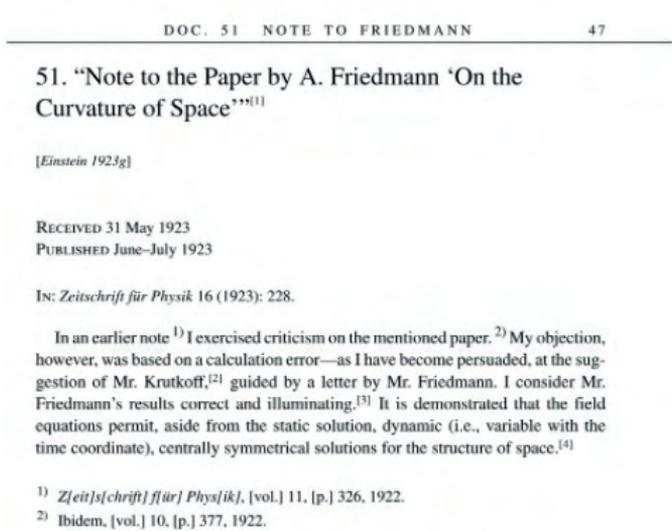
Esses valores são matemáticos, não uma realidade, mas os possíveis destinos alternativos para a matéria galáctica, levando assim aos *modelos alternativos* do Univers [Harrison, 2010]. Adotando para a esfera particular o valor  $-1/2 \mathcal{K}$

$$\ell^2 \left( \frac{1}{2} H^2(t) - G \frac{4}{3} \pi \ell^3 \rho \right) = -\frac{1}{2} \mathcal{K}$$

$$(38) \quad H^2(t) - \frac{8}{3} \pi G \rho = -\mathcal{K} \cdot \ell^{-2}$$

Esse resultado é conhecido como *equação de Friedmann*, em homenagem ao físico teórico russo Alexander Alexandrovich Friedmann [1888- 1925], quem primeiro obteve as *soluções cosmológicas* da Teoria da Relatividade Geral em 1922 (que em 2022 completará 100 anos), apresentando a ideia de um *Universo em expansão*. Os artigos de Friedmann [Friedmann, 1922] e em 1924 [Friedmann, 1924] foram notáveis. Suas equações estabeleceram as bases para a Cosmologia Moderna; tendo sido ele o primeiro a construir *modelos relativísticos de Universo* com um início em um passado finito e uma extensão espacial infinitamente grande. Suas correspondências com Einstein deixam claro que Einstein não estava disposto a aceitar a ideia de um Universo em evolução e, em vez disso, trabalhou para modificar suas equações para garantir um Universo estático eterno, como se acreditava desde a época de Newton. Em 1922 Einstein não arrefeceu e anunciou que Friedmann havia cometido um erro na dedução da solução de suas equações de campo. Não havia erro e Einstein foi obrigado a uma

retratação de suas críticas em 1923 [Einstein, 1923], mostrando que sua grandiosidade não ficava restrita à sua genialidade científica, mas a sua *humanidade*.



**Figura 12.** A retratação. *In* [Einstein, 2018]

Da eq. 28 encontramos uma das leis mais importantes da Cosmologia, os *red shifts na expansão*, uma lei simples, obtida do fato que o comprimento de onda da radiação muda da mesma maneira que o raio de uma esfera, então o valor de *Z* será dado por

$$Z = \frac{\lambda_{med} - \lambda_{emitido}}{\lambda_{emitido}} \equiv \frac{\lambda_{med}}{\lambda_{emitido}} - 1 \therefore \frac{\lambda_{med}}{\lambda_{emitido}} = 1 + Z$$

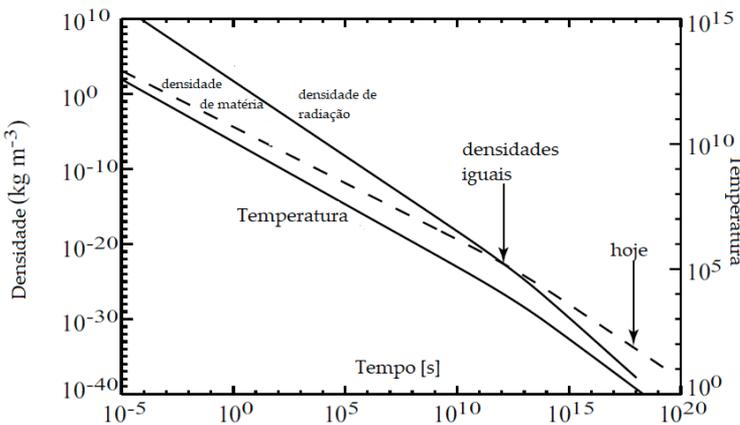
Mas como por hipótese

$$\frac{\lambda_{med}}{\lambda_{emitido}} \propto \frac{\ell_0}{\ell(t)}$$

Será

$$\frac{\ell_0}{\ell(t)} = 1 + Z \Leftrightarrow \ell(t) = \ell_0(1 + Z)^{-1}$$

(39)  $\ell(t) = \ell_0(1 + Z)^{-1}$



**Figura 14** História térmica do Universo *in* Hawley, Hawley and Holcomb, , 2005.

Então também nesse caso, para uma área e um volume comóveis,

$$A(t) = A_0(1 + Z)^{-2}$$

$$V(t) = V_0(1 + Z)^{-3}$$

A mudança na *densidade do Universo* fornece um exemplo importante da relação entre o *redshift da expansão* e o fator de escala  $\ell(t)$ . Se  $\rho$  representa o número de galáxias por unidade de volume é igual a densidade presente  $\rho_0$  multiplicada por  $V_0/V = (\ell_0/\ell)^3$ , portanto, o valor de  $Z$  é dado por

$$\rho = \frac{m_{cosmica}}{V} = \frac{m_{cosmica}}{\frac{4}{3}\pi\ell^3} \therefore \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\frac{m_{cosmica}}{\frac{4}{3}\pi\ell^3}}{\frac{m_{cosmica}}{\frac{4}{3}\pi\ell_0^3}} = \left(\frac{\ell_0}{\ell}\right)^3 =$$

$$(40) \quad \frac{\rho}{\rho_0} = (1 + Z)^3$$

Para  $Z=1$ , a densidade na época de emissão era oito vezes maior do que a atual densidade. Para um *redshift*,  $Z=100$ , a densidade seria 1 milhão de vezes maior do que agora, ou aproximadamente 1 átomo de hidrogênio por centímetro cúbico, que é típico da *densidade média da matéria* nas galáxias. Para um *redshift*  $Z > 100$ , galáxias na presente forma não existiriam. Normalmente não podemos olhar para o espaço e voltar no tempo para *redshifts* tão grandes, porque galáxias e quasares não existiam.

## 1º) O modelo de Einstein- De Sitter.

A partir da *equação de Friedmann* é possível obter um modelo de Universo que ficou conhecido como *Einstein- De Sitter*, inicialmente desenvolvido pelo astrônomo holandês Willem De Sitter (1872- 1934). Entre os primeiros que iniciaram uma discussão sobre cosmologia física estava Willem De Sitter, que reconheceu uma segunda versão possível do modelo de Einstein. Desde 1911, De Sitter vinha acompanhando de perto as publicações de Einstein sobre a Teoria da Relatividade Geral [De Sitter, 1911]. Em 1916, num conjunto de três longos artigos, apresentou uma solução matematicamente simples solucionando as equações de Einstein com constante cosmológica para um Universo vazio [De Sitter, 1916; De Sitter, 1917]. De acordo com a visão original de Einstein, sem a *constante cosmológica*, não haveria curvatura. O *espaço-tempo* em De Sitter pode ser definido como uma sub-variedade de um *espaço de Minkowski generalizado* de uma dimensão superior, isto é, *espaço-tempo* de uma esfera no espaço euclidiano comum. Significa que o *espaço é infinito* e possui as mesmas propriedades do *espaço euclidiano* comum. Em 1922, o físico teórico húngaro Cornelius Lanczos (1893- 1974) demonstrou [Lanczos, 1922] que se o Universo de De Sitter for descrito em um referencial acelerado, então esse *modelo de Universo* surge como um *Universo vazio com expansão acelerada* devido à tendência natural do espaço para se expandir.

Da equação de Friedmann correspondente a descrição da *expansão* nos tempos primitivos; considerando qualquer *efeito de pressão* desprezível, assim numa *esfera proporcional a  $\ell^3$* , a densidade decresce segundo  $\ell^{-3}$  enquanto o termo  $\hbar$  aumenta somente segundo  $\ell^2$ , assim torna-se desprezível. Partindo da eq. 35, fazendo  $\hbar=0$  a equação se reduz a

$$(41) \quad H^2(t) - \frac{8}{3}\pi G\rho = 0$$

A constante de Hubble; para a densidade é crítica

$$H(t) = \frac{v}{\ell(t)} \equiv \frac{\dot{\ell}(t)}{\ell(t)} \Rightarrow \left(\frac{\dot{\ell}}{\ell}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho = 0$$

Obtemos uma equação diferencial bem simples para  $\ell(t)$

$$(42) \quad \dot{\ell}^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho\ell^2$$

Mas essa *expansão da esfera* é realizada conservando o número de partículas, tal que a *massa cósmica* permanece constante, nesse caso

$$(43) \quad \rho\ell^3 = \text{const} \equiv \rho_{\text{crit}} \Leftrightarrow \rho = \rho_{\text{crit}}\ell^{-3}$$

Substituindo na eq.39

$$\begin{aligned} \dot{\ell}^2 &= \frac{8}{3}\pi G \rho_{\text{crit}}\ell^{-3} \Rightarrow \dot{\ell}^2 = \frac{8}{3}\pi G \rho_{\text{crit}}\ell^{-1} \Leftrightarrow \\ \dot{\ell} &\equiv \frac{d\ell}{dt} = \sqrt{\frac{8}{3}\pi G \rho_{\text{crit}} \cdot \ell^{-1}} \end{aligned}$$

Essa equação diferencial é do tipo . A integração leva a

$$\int y^n dy = \int A \cdot dt \therefore t = \frac{1}{A} \cdot \frac{y^{n+1}}{n+1}$$

No nosso caso teremos então

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{\left(\frac{8}{3}\pi G \rho_{\text{crit}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{2} + 1} \cdot \frac{\ell^{\frac{1}{2}+1}}{\frac{1}{2} + 1} = \frac{2}{3} \frac{1}{\left(\frac{8}{3}\pi G \rho_{\text{crit}}\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \ell^{\frac{3}{2}} \\ (44) \quad t &= \frac{2}{3} \frac{1}{\left(\frac{8}{3}\pi G \rho_{\text{crit}}\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \ell^{\frac{3}{2}} \end{aligned}$$

Obtemos a equação para  $\ell(t)$

$$\begin{aligned} \ell^{\frac{3}{2}} &= \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{8}{3}\pi G \rho_{\text{crit}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \Rightarrow \ell^3 = \left(\frac{3}{2}\right)^2 \cdot \frac{8}{3}\pi G \rho_{\text{crit}} \cdot t^2 \\ (45) \quad \ell(t) &= (6\pi G \rho_{\text{crit}})^{\frac{1}{3}} \cdot t^{\frac{2}{3}} \end{aligned}$$

A densidade será

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{\text{crit}}\ell^{-3} = \frac{\rho_{\text{crit}}}{\ell^3} = \frac{\rho_{\text{crit}}}{\left((6\pi G \rho_{\text{crit}})^{\frac{1}{3}} \cdot t^{\frac{2}{3}}\right)^3} = \frac{\rho_{\text{crit}}}{6\pi G \rho_{\text{crit}} \cdot t^2} \\ (46) \quad \rho &= \frac{1}{6\pi G t^2} \end{aligned}$$

A idade do Universo é então inversamente proporcional à constante de Hubble; então da eq.43 e eq.40

$$H^2(t) = \frac{8}{3}\pi G\rho \Leftrightarrow \rho = \frac{3.H^2}{8.\pi G}$$

$$\frac{3.H^2}{8.\pi G} = \frac{1}{6\pi Gt^2} \Rightarrow t^2 = \frac{8}{18} \cdot \frac{1}{H^2} = \frac{4}{9} \cdot \frac{1}{H^2} \therefore t = \frac{2}{3H}$$

$$(47) t = \frac{2}{3H}$$

Esse resultado é praticamente igual ao obtido na eq. 33. Na década de 1920, a situação do estudo cosmológico era tentadora, mas insatisfatória. Dois *modelos matemáticos do universo* haviam sido apresentados pelos físicos, o de Einstein e o de De Sitter. Ambos assumiram um *Universo* homogêneo, isotrópico e estático; ambos precisavam da *constante cosmológica*.

## 2º) O modelo de Lemaître.

O *Universo* de Einstein exigia matéria, mas não *redshifts*; o *Universo* de De Sitter não exigia matéria, mas os *redshifts* eram previstos! O *Universo real exige matéria e redshifts*. É estabelecido, no entanto um *equilíbrio instável*, digamos, para o modelo funcionar. Significa que qualquer desvio da uniformidade inicial, como aqueles devido ao movimento aleatório dos átomos, pode eventualmente aumentar. Isso é suficiente, no tempo ilimitado que dispõe um *Universo* estático para causar o colapso de vastas regiões da matéria que constituem as galáxias. Essa ideia convidativa, mas enganosa sobre a formação das galáxias, aceita durante alguns anos, poderia fazer o *Universo* se expandir como um todo, uma vez que a atração gravitacional global é ligeiramente menor quando a matéria está agrupada em determinadas regiões do espaço do que quando está uniformemente espalhada. Foi essa hipótese que levou Arthur Eddington e posteriormente George Lemaître a desenvolverem. Um modelo cosmológico que tem início como um *universo estático*, e começa a se expandir somente quando as galáxias começam a se condensar. Mas na *Cosmologia* conhecida como *Universo de Lemaître*, a expansão começa como uma *grande explosão padrão*, a partir do *super-átomo primordial* (ou o *quantum primordial*, o estado inicial do *Universo*).

Em um *Universo* uniforme, a densidade e a pressão são as mesmas em todo o espaço e os gradientes de pressão não influenciam o movimento. A equação de movimento radial (supondo que a expansão tem simetria esférica) de uma partícula de massa unitária na superfície de uma esfera de raio  $\ell$  e densidade  $\rho$  é, portanto, obtida da eq. 38 que pode ser escrita para o caso de um *universo fechado*

$$(48) H^2(t) = \frac{8}{3}\pi G\rho - \mathcal{K}.\ell^{-2}$$

Lembrando que  $\rho$  é proporcional a  $\ell^{-3}$ ; é evidente que a medida que  $\ell$  aumenta, no limite  $H^2$  tende a zero. Como consequência, o termo  $\mathcal{K}\ell^{-2}$  é dominante e  $H^2$  que é positivo assume a condição de negativo, que é uma contradição matemática que só é resolvida se  $\ell$  for máximo no primeiro zero de  $H^2$ . Fisicamente significa que o coeficiente de medida atinge o seu valor máximo quando a velocidade tender a zero e dessa forma o *Universo* colapsa. Considerando [Rindler, 1977] o caso dos modelos *não planos* com *constante cosmológica* igual a zero. A solução dada no modelo Einstein- De Sitter (na eq. 45); quando a *constante de curvatura*  $\mathcal{K} = 0$

$$\ell(t) = (6\pi G\rho)^{\frac{1}{3}}.t^{\frac{2}{3}} \Rightarrow \ell(t) = C^{\frac{1}{3}}.t^{\frac{2}{3}}$$

As outras possibilidades em termos de funções elementares

$$\begin{cases} t = C \left[ \sin^{-1} \sqrt{X} - \sqrt{(X - X^2)} \right], \text{ para } \mathcal{k} = 1 \\ t = C \left[ \sqrt{(X + X^2)} - \sinh^{-1} \sqrt{X} \right], \text{ para } \mathcal{k} = -1 \end{cases} \Leftrightarrow X = \frac{\ell(t)}{C}$$

Então, o primeiro desses casos é uma *cicloide*,  $\mathcal{k} = 1$ , algumas vezes denominado de *universo* de Friedmann - Einstein. A representação paramétrica é,

$$(49) \quad \begin{cases} \ell = C(1 - \cos \xi) \\ t = C(\xi - \sin \xi) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \ell = \frac{4\pi G \rho_{crit}}{3\mathcal{k}} (1 - \cos \xi) \\ t = \frac{4\pi G \rho_{crit}}{3\mathcal{k}^{\frac{3}{2}}} (\xi - \sin \xi) \end{cases}$$

Aqui  $\xi$  é um parâmetro que varia entre no intervalo  $[0, \pi]$  e  $\rho_{crit}$  é a densidade na era atual. Como  $\xi$  varia,  $\ell$  e  $t$  adquirem um valor definido, para cada  $\xi$ ; mostrando o comportamento de  $\ell(t)$  num *universo fechado*. No caso de um *universo aberto*, em que  $\mathcal{k} = -1$ , o universo se expande para sempre; a solução paramétrica da equação de Friedmann- Lemaitre adquire uma forma um pouco diferente, embora seja notavelmente semelhante a solução fechada, mas com funções trigonométricas hiperbólicas, pois não são periódicas, mas *monotônicas*, podendo aumentar sem limite

$$(50) \quad \begin{cases} \ell = \frac{4\pi G \rho_0}{3\mathcal{k}} (\cosh \xi - 1) \\ t = \frac{4\pi G \rho_0}{3\mathcal{k}^{\frac{3}{2}}} (\sinh \xi - \xi) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \ell = \frac{4\pi G \rho_{0t}}{3\mathcal{k}} \left[ \left( \frac{e^\xi + e^{-\xi}}{2} \right) - 1 \right] \\ t = \frac{4\pi G \rho_0}{3\mathcal{k}^{\frac{3}{2}}} \left[ \left( \frac{e^\xi - e^{-\xi}}{2} \right) - \xi \right] \end{cases}$$

A equação de Friedmann- Lemaitre nesse caso vem da eq. 43, para e para valores de  $\ell(t)$  muito grande (mas não infinito), o que torna inteiramente desprezível o termo com a *densidade*, nesse caso, é uma *boa ideia* trabalhar com a *constante de Hubble observável*

$$(51) \quad H^2(t) = \frac{8}{3} \pi G \frac{\rho_0}{\ell^3} - \mathcal{k} \cdot \ell^{-2} \rightarrow H_0^2(t) = -\mathcal{k} \cdot \ell^{-2}$$

A equação mais precisa leva em conta o parâmetro observacional, o desvio Z para o vermelho, então das soluções das eq. 39 e a eq. 40 para  $\ell_0 = 1$ , a equação de Friedmann- Lemaitre terá a forma

$$(52) \quad H^2(t) - \frac{8}{3} \pi G \rho_0 (1 + Z)^3 = -H_0^2(t) \left( 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \cdot (1 + Z)^2$$

A cosmologia *padrão* de Friedmann- Lemaitre, inclui então as seguintes possibilidades: um *universo fechado* num *espaço-tempo esférico*, predestinado ao colapso, um *universo aberto* num *espaço-tempo hiperbólico*, destinado a expansão eterna e um *universo Einstein- De Sitter*, num *espaço-tempo plano*, também destinado a expansão eterna. As diferenças entre as três soluções são significativas apenas em épocas recentes, pois no *universo primitivo* essas soluções não têm distinção.

As soluções de Lemaitre atraiu os cosmologistas para esses *universos exóticos* e interessantes, mas os muitos entraves fizeram com que a maioria abandonasse essa linha de trabalho. Hoje os *modelos de Lemaitre* estão quase totalmente esquecidos, uma vez que a motivação para essas construções complicadas desapareceu em função do menor valor obtido para a *constante de Hubble* nos anos 50 do séc. XX. Os modelos de Lemaitre são encarados como um exemplo de como as coisas levam a erro ou sem significação quando os teóricos aceitam de maneira cega observações não confiáveis e forçam seus modelos a se enquadrarem nelas: a *observação*

e a teoria dão-se melhor quando se misturam, ajudando-se mutuamente na busca da verdade (Eddington, 1935).

Lemaître foi talvez a primeira pessoa a levar a sério a física do modelo do Big-Bang. Ele tentou investigar como o *Universo* deve ter sido no início, quando toda a matéria estava comprimida, com densidade enorme, e cunhou a expressão de átomo primitivo para descreve-lo; numa época que pouco se sabia sobre como a matéria iria se comportar em altas densidades, de maneira que o estudo sério do *Universo inicial* teve que esperar pela próxima geração de físicos teóricos.

### 3º) O modelo do Big-Bang.

Desde a descoberta por acaso da *radiação cósmica de fundo em microondas* (RCFM) em 1965 pelos astrônomos norte-americanos Arno Penzias e Robert Wilson (Penzias and Wilson, 1965), uma extensa pesquisa teórica produziu um quadro bem detalhado de como o *Universo* provavelmente evoluiu até seu estado atual. Essa imagem é denominada de *modelo do Big Bang padrão*. Embora os aspectos básicos da Cosmologia do *Big-Bang* já estivessem em seus devidos lugares com os trabalhos de Hubble, Friedmann e Lemaître, o progresso posterior foi lento, pois apenas a relação entre a velocidade e as distâncias representava o único indício observacional bem escasso. A *teoria do Big-Bang* (que não tem origem num ponto no espaço) descreve o *Universo* como uma geladeira gigante que se esfria para sempre devido a sua expansão contínua.

A teoria implica na existência de um *Universo* que começou como um *caldeirão abrasador* com temperaturas da ordem de trilhões de graus, cujo remanescente sobrevive hoje como um reflexo, com uma radiação cuja temperatura é aproximadamente 3,0 K. O valor dessa temperatura foi determinada primeiramente pelo astrônomo canadense Andrew McKellar (1910- 1960) em 1940, que detectou pela primeira vez a presença de matéria molecular no espaço interestelar, identificando o espectro orgânico do *radical* CN e *radical* CH [McKellar, 1940] mostrando que o espaço interestelar era muito frio com uma temperatura no intervalo [0,8; 2,7] K. Essas determinações representam as primeiras evidência da *radiação cósmica de fundo* (uma *caricatura da grande explosão*). O resfriamento causado pela expansão pode ser explicado pela física convencional e a desaceleração da expansão, em virtude da ação da gravidade, descrita pelas equações de Friedmann e Lemaître baseadas na Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

Esse *caldeirão abrasador* parece refletir as *reações nucleares*, uma ideia fundamentada na Física Nuclear cujos alicerces seguros foram desenvolvidos nas décadas de 1930 a 1940, por meio de reações conhecidas, a *nucleossíntese do Big- Bang*. Foi o estudo de tais reações que permitiu que a partir de uma sugestão de Robert H. Dicke (1916 - 1997), da Universidade de Princeton, sobre a possibilidade de detecção de uma nova forma de *radiação cósmica* que o grupo formado pelo prêmio Nobel de 2019 James E. Peebles, Robert Dicke, P. G. Roll e R. B. Partridge avaliasse a *existência e a temperatura aproximada da RCFM sobrevivente até nossos dias*. Acredita-se que a *nucleossíntese* do Big- Bang tenha sido responsável pela formação dos elementos químicos mais leves do *Universo*: o hidrogênio, o hélio e o lítio; embora responsável por uma pequena fração dos elementos químicos é, porém, a origem de 98% de toda a matéria conhecida no cosmo.

Essa concepção teve início na década de 1930, devido a duas razões pelas quais a *síntese dos elementos químicos* nos estágios iniciais dos modelos evolutivos do *Universo* foi levada a sério. Em primeiro lugar, os estudos da astrônoma e astrofísica britânica naturalizada norte

americana, Cecilia Payne Gaposchkin (1900- 1979) e o astrônomo norte americano Henry Norris Russell (1877- 1957), mostraram que as abundâncias dos elementos nas estrelas eram notavelmente uniformes, sugerindo uma *origem comum para os elementos*. A segunda consideração foi que o interior das estrelas parecia não ser suficientemente quente para que a *nucleossíntese dos elementos químicos* ocorresse.

O ponto de partida para os estudos do *nucleossíntese primordial* foi, portanto, descobrir as abundâncias de equilíbrio dos elementos em altas temperaturas e assumir que, se a densidade e a temperatura diminuíssem suficientemente rápido, essas abundâncias permaneceriam *congeladas* à medida que o Universo se expandisse e esfriasse. Cálculos detalhados foram realizados em 1942 pelo astrofísico paquistanês e Prêmio Nobel, Subrahmanyan Chandrasekhar (1910- 1995) e o astrofísico norte americano, Louis R. Henrich, confirmando a *expectativa da teoria do equilíbrio* caso os elementos estivessem em equilíbrio em altas temperaturas. Nesse caos, suas abundâncias estariam inversamente relacionadas com suas energias de ligação (Chandrasekhar & Henrich, 1942). As condições físicas típicas sob as quais este resultado foi encontrado envolveram densidades de  $10^9$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ] e temperaturas  $10^{10}$  [K]. Existiam, no entanto, várias discrepâncias grosseiras entre as previsões e as abundâncias observadas dos elementos. Previa-se que os elementos leves, lítio, berílio e boro, seriam amplamente produzidos em relação às suas abundâncias cósmicas, e que o ferro seria subproduzido, assim como todos os elementos mais pesados com números de massa superiores a 70. Este resultado ficou conhecido como *catástrofe dos elementos pesados*. Concluiu-se que todos os elementos químicos não poderiam ter sido sintetizados em uma única densidade e temperatura.

Chandrasekhar e Henrich sugeriram que algum processo de *não equilíbrio* era necessário. Em contraste, o modelo do átomo primordial de Lemaître seria *instável*, então o processo de desintegração daria origem à formação dos elementos químicos, sugerindo também que a energia liberada nos processos de *fissão nuclear* poderia explicar as *altas energias dos raios cósmicos*.

O modelo de Lemaître *disparou o gatilho* para as ideias de George Gamow em relação ao *problema da origem dos elementos químicos*, apresentadas numa revista obscura publicado em 1935 (Gamow, 1935). A *cosmologia de Gamow* foi construída a partir da análise da ideia de que as *abundâncias relativas* dos elementos químicos podem ter sido determinadas pelo *relaxamento do equilíbrio estatístico* em temperaturas na faixa de  $10^9$  a  $10^{10}$  K, um conceito desenvolvido pelo físico e matemático indiano Meghnad N. Saha (1893- 1956) [Saha, 1921]. Desenvolveu assim sua ideia de um *Big Bang quente*. Sendo um físico especialista em radioatividade e fusão nuclear, em sua análise a maior explosão provocada pelo homem teria um análogo natural, a física da maior explosão natural. Ele provou a mistura de ambos. Em 1942, foi um dos primeiros a apontar que num Universo em expansão, seria necessário considerar processos de formação de elementos *fora do equilíbrio*. Em 1935 sugeriu a ideia geral do *acúmulo de elementos pela captura radiativa de nêutrons* aplicada a reações em estrelas. Hans Bethe (1906- 2005), descobriu o esquema de *reações nucleares envolvendo hidrogênio e carbono* (o famoso ciclo do carbono) que poderia produzir energia suficiente para explicar a radiação observada de estrelas.

Logo depois disso, Gamow e seu aluno de pesquisa Charles Critchfield (1910-1994), em colaboração com Bethe, desenvolveram o esquema da *síntese termonuclear baseado em reações diretas de próton-próton*. Hoje pelas evidências observacionais, sabemos que essas reações desempenham o papel dominante no Sol e estrelas menos brilhantes que o Sol, enquanto para estrelas mais brilhantes, como Sirius, o ciclo do carbono é dominante. No livro publicado por Gamow e Critchfield em 1949: *Theory of Atomic Nucleus and Nuclear Energy-Sources* é possível acompanhar a evolução de seu pensamento. No livro é descrita uma proposta de como

os elementos cresciam com *agregações de nêutrons*, e apresenta uma expressão para o acúmulo dos elementos por sucessivas *capturas de nêutrons*.

A descoberta da *captura radiativa de nêutrons* por núcleos pesados abriu novas possibilidades para as reações nucleares intraestelares. Os nêutrons que podem ser ejetados dos núcleos de elementos leves por colisões com prótons podem aderir aos núcleos de diferentes elementos pesados, garantindo assim a possibilidade de formação de núcleos ainda mais pesados. Este efeito tem um papel muito importante na formação de diferentes elementos no interior das estrelas. Tais fenômenos de *captura* só podem ser explicados como a *aderência de nêutrons incidentes ao núcleo* bombardeado com a liberação de energia excedente na forma de radiação gama. O fenômeno foi observado pela primeira vez em 1935 pelo físico italiano e Prêmio Nobel Enrico Fermi (1901 -1954), o qual mostrou a probabilidade da tal *captura radiativa de nêutrons*, que aumenta com a diminuição de sua energia e que se pode observar um *pico de máximo* para o feixe de neutrons com velocidades termalizadas (diminuídas) a partir das interações com núcleos de átomos hidrogenados (água, água pesada, grafite, parafina). É fácil entender que esse tipo de reação nuclear pode ocorrer sem dificuldade também para núcleos pesados, pois, devido à ausência de forças repulsivas entre o nêutron e o núcleo, não há barreira de potencial que impeça a penetração do nêutron na estrutura nuclear. A teoria da *captura radiativa de nêutrons lentos* por núcleos pesados também foi elaborada por Hans Bethe e está de acordo com as evidências experimentais.

A construção do modelo de Gamow para o *Big Bang* começou com uma combinação ousada de Física Nuclear e Cosmologia. Extrapolando os modelos de Friedman para épocas cosmológicas primitivas, nas quais as densidades eram altas o suficiente para que a *nucleossíntese* ocorresse, descobriu que a escala de tempo do Universo era muito pequena para estabelecer uma distribuição tal que levasse ao equilíbrio dos elementos. Em sua proposta original, o estado inicial consistia em um mar de *nêutrons* e subseqüentes decaimentos  $\beta$  além dos processos de *captura de nêutrons* que moveriam os núcleos em direção ao *locus* de estabilidade nuclear.

As reações nucleares foram assumidas para começar somente para valores de temperatura abaixo daquela correspondente à energia de ligação do deutério, 0,1 MeV, e o Universo foi considerado estático. Esta teoria foi publicada em 1948 por Alpher, Bethe e Gamow (o nome de Bethe foi adicionado para completar o trocadilho  $\alpha\beta\gamma$ ). Eles encontraram razoável concordância com as abundâncias observadas dos elementos. A importância do artigo publicado foi que ele chamou a atenção para a necessidade de uma *fase quente e densa* no Universo primitivo, permitindo assim que os elementos químicos fossem sintetizados cosmológicamente. Apenas para informação do leitor, curiosamente Lemaître não tinha interesse em desenvolver sua imagem do átomo primordial de acordo com o progresso da Física Nuclear, um ramo da ciência que não lhe agradava e que considerava inferior à Relatividade Geral.

A suposição básica desta teoria, além do próprio *Big Bang quente*, é que inicialmente a matéria seria composta de nêutrons. É importante comparar o comportamento da matéria e da radiação em um *Universo* em expansão. A densidade de partículas de material  $\rho_m$  e, portanto, a densidade de energia de repouso  $\rho_{rad}$ , da matéria diminui à medida que o Universo se expande na proporção em que um elemento de volume aumenta (estamos aqui assumindo que a matéria é conservada). Em termos do fator de escala  $\ell(t)$

$$(53) \quad \rho_m \cdot c^2 \propto \frac{1}{V(t)} = \frac{1}{\ell^3(t)}$$

Supondo que o Universo seja preenchido com uma distribuição homogênea e isotrópica de radiação; essa radiação, é claro, se move com a velocidade da luz em relação à matéria, e esse movimento está associado a um *desvio para o vermelho* (redshift) que reduz a energia da radiação na proporção  $1/\ell(t)$ . Temos, portanto, para a densidade de energia da radiação

$$(54) \quad \rho_r \cdot c^2 \propto \frac{1}{\ell^4(t)}$$

A Primeira Lei da Termodinâmica estabelece que a variação da energia  $E$  de um sistema em expansão é igual ao trabalho realizado pela pressão  $p$

$$(55) \quad dE = -p \cdot dV \equiv -p \cdot d(\ell^3(t))$$

A equação de Einstein da Relatividade Restrita nos fornece que . Aqui a massa  $m$  inclui a contribuição de matéria e a massa equivalente de energia radiante; dessa forma

$$(56) \quad E = m \cdot c^2 \equiv (\rho_m \cdot V(t) + \rho_r \cdot V(t)) \cdot c^2 \Leftrightarrow dE = d(\rho_t V(t)) \cdot c^2 = d(\rho_t \ell^3(t)) \cdot c^2$$

Igualando as duas

$$\begin{aligned} d(\rho_t \ell^3(t)) \cdot c^2 &= -p \cdot d(\ell^3(t)) \\ (57) \quad d(\rho_t \ell^3(t)) \cdot c^2 + p \cdot d(\ell^3(t)) &= 0 \Leftrightarrow d(\rho_t \ell^3(t)) + \frac{p}{c^2} \cdot d(\ell^3(t)) = 0 \end{aligned}$$

A variação com o tempo leva a

$$(58) \quad \frac{d}{dt}(\rho_t \ell^3(t)) + \frac{p}{c^2} \cdot \frac{d}{dt}(\ell^3(t)) = 0$$

Dessa equação podemos obter:

a) **Universo contendo matéria somente:**

$$(59) \quad \frac{d}{dt}(\rho_t \ell^3(t)) = 0$$

O que confirma a afirmação dada pela eq. 53.

b) **Universo contendo radiação somente:**

Como a pressão e densidade de radiação é dada por , da eq. 58

$$(60) \quad \frac{d}{dt}(\rho_r \ell^3(t)) + \frac{1}{3} \cdot \rho_r \frac{d}{dt}(\ell^3(t)) = 0$$

Equivale a (veja a eq.54)

$$(60) \quad \frac{d}{dt}(\rho_r \ell^4(t)) = 0$$

Integrando essa equação diferencial o resultado será

$$(61) \quad \rho_r = \rho_0 \left( \frac{\ell(t)}{\ell_0} \right)^{-4}$$

Como  $\ell(t)$  torna-se arbitrariamente pequeno no passado podemos concluir com Gamow, que na primeira fase desse modelo houve o *domínio da radiação*. Lembrando que essa espécie de modelo é consistente com o *princípio cosmológico de Einstein* na Relatividade Geral

$$(62) \quad \ell(t) \propto t^{\frac{1}{2}}$$

Estamos agora em posição de ver se o equilíbrio térmico teria sido criado como resultado de interações entre a radiação e a matéria.

c) o **Universo contendo matéria e radiação:**

Da eq. 56 na eq. 58, quando  $p = p_r$

$$(63) \quad \frac{d}{dt}(\rho_m \ell^3(t)) + \frac{1}{\ell(t)} \cdot \frac{d}{dt}(\rho_r \ell^4(t)) = 0$$

Assumindo estritamente a conservação da matéria, ou seja negligenciando a conversão de matéria em radiação então da eq. 63

$$(64) \quad \begin{cases} \frac{d}{dt}(\rho_m \ell^3(t)) = 0 \\ \frac{d}{dt}(\rho_r \ell^4(t)) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \rho_m = (\rho_m)_{inicial} \left( \frac{\ell(t)}{\ell(t=0)} \right)^{-3} \\ \rho_r = (\rho_r)_{inicial} \left( \frac{\ell(t)}{\ell(t=0)} \right)^{-4} \end{cases}$$

Numa época passada existiu

$$(65) \quad \ell_{crit} = \frac{(\rho_r)_{inicial}}{(\rho_m)_{inicial}} \cdot \ell(t=0)$$

Significa que para  $\rho_r > \rho_m$  quando  $\ell_{crit} > \ell(t)$ , a radiação pode ter sido dominante em épocas arqueológicas e a eq. 62 é válida. Assim, enquanto houvesse matéria presente para as *interações necessárias*, a radiação nos estágios iniciais do Universo tinham um *espectro de equilíbrio* (como um Corpo Negro) completamente caracterizado por uma temperatura  $T_{rad}$ . Esta temperatura está relacionada com a densidade de energia  $\rho_r$  pela fórmula usual da Lei de Stefan- Boltzmann

$$(66) \quad \rho_r = \sigma T_r^4$$

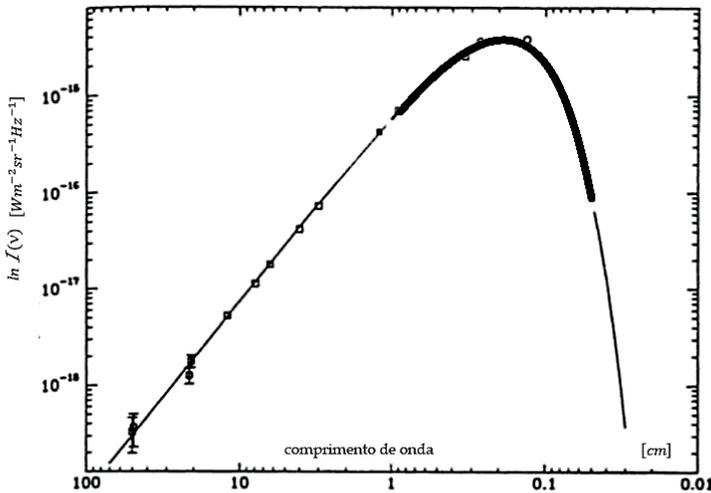


Figura 13 In ROWAN-ROBINSON, 2004

Da eq. 65 e a relação já conhecida no *coeficiente de desvio para o vermelho* (visto acima) causado pelo decréscimo de energia devido à expansão, quando o domínio da matéria ocorreu

$$(67) \quad \frac{(\rho_r)_{inicial}}{(\rho_m)_{inicial}} = Z$$

Uma boa aproximação é dada pela equação de Friedmann vista acima, cuja solução levou a eq. 45, quando  $n = 1$

$$\ell(t) = \left[ \frac{32\pi G}{3} \rho_0 \right]^{\frac{1}{4}} \cdot t^{\frac{1}{2}}$$

Como foi visto  $\rho_r = \rho_0 \cdot \ell^{-4}(t)$ , então

$$\ell(t) = \left[ \frac{32\pi G}{3} \rho_r \cdot \ell^4(t) \right]^{\frac{1}{4}} \cdot t^{\frac{1}{2}} \Leftrightarrow \ell^4(t) = \frac{32\pi G}{3} \rho_r \cdot \ell^4(t) \cdot t^2$$

$$(68) \quad \rho_r = \frac{3}{32\pi G t^2}$$

Em termos da temperatura da radiação eq. 68 é igual a eq.66

$$(69) \quad \frac{3}{32\pi G t^2} = \sigma T_r^4 \therefore T_r^4 = \frac{3}{32\pi G \sigma t^2}$$

$$(70) \quad T_r = \left( \frac{3}{32\pi G \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{1}{2}}}$$

O valor de  $T_r$  é medido em [K]. Criação de pares de partículas ocorreu em épocas anteriores a 1[s]

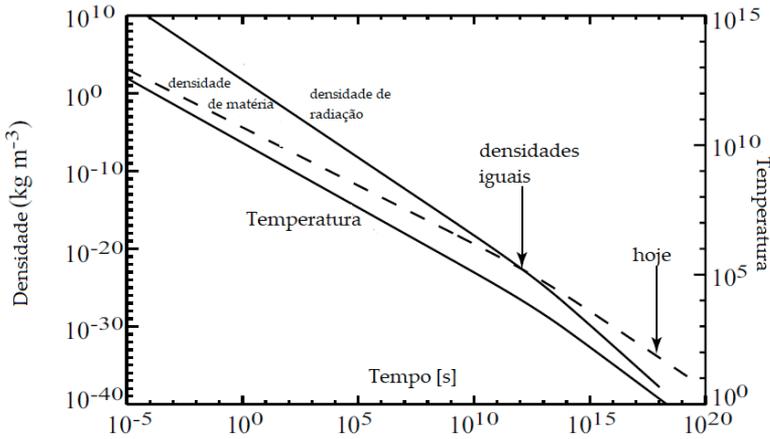


Figura 14 História térmica do Universo in Hawley, Hawley and Holcomb, , 2005.

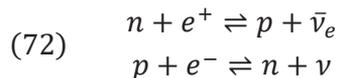
Em épocas posteriores a temperatura da radiação é dada por

$$(71) \quad T_r \cong (1 + Z) [K]$$

A temperatura da RCFM diminui com a expansão do Universo e está diretamente ligada ao *redshift* Z e pode usado como alternativa ao tempo para parametrizar a história do Universo.

O reconhecimento de que o Universo está se expandindo leva naturalmente à questão de suas origens. A partir do que o Universo pode ter se expandido? Se o Universo começou com um Big Bang, como foi esse evento? Podemos aprender algo sobre isso hoje, ou está muito longe de nossa experiência para tentar entender? Como podemos começar a pensar sobre o universo perto de seu início?

Extrapolando a expansão do Universo primitivo para um valor de  $Z$  aproximadamente igual a  $10^{10}$ , quando a temperatura era  $T \cong 3,0 \cdot 10^{10}$  [K]. George Gamow e seus colaboradores, especialmente Ralph Alpher e Robert Herman, como comentamos anteriormente, realizaram os primeiros cálculos de elementos da *nucleossíntese*, a criação de elementos, no Universo primitivo. A suposição básica desta teoria, além do *Big Bang quente* em si, é que inicialmente a matéria era composta de nêutrons. À medida que os prótons se tornaram disponíveis como resultado do decaimento  $\beta$  dos neutrons (um nêutron livre, ou um em um núcleo que tem muito mais neutrons do que prótons, pode decair emitindo uma partícula  $\beta$  e um neutrino, o qual não tem carga e tem massa praticamente nula, mas carrega uma apreciável quantidade de energia e de momento), assim os elementos mais pesados foram sintetizados por *captura de neutrons*. Em 1950, outro elo chave na cadeia foi fornecido por Chushiro Hayashi (1920-2010), apontando que, nas fases iniciais do Universo, a temperaturas apenas dez vezes maiores do que aquelas em que a nucleossíntese ocorre, os nêutrons e prótons eram mantidos em equilíbrio termodinâmico através das interações fracas. Ele mostrou que a RCFM também foi quente o suficiente para produzir um *mar de pares elétron-positron* e *pares de neutrinos-antineutrinos*, e que esses pares interagiram com os neutrons e prótons, a partir de reações tais como



O as setas de duplo sentido na eq. 72 significa que as reações podem se processar em qualquer um dos sentidos. Os *pares electron-positron* se aniquilam um tanto abruptamente quando a temperatura atinge  $10^{10}$  [K] ( $9,0 \cdot 10^5$  [eV]). Uma consequência é que essas reações param; o número de nêutrons tornar-se inalterável em relação ao número de prótons e electrons. Assim a quantidade de nêutrons pode ser expressa nesse intervalo de tempo em que o *equilíbrio* é dado pela relação entre prótons e nêutrons e as massas respectivas

$$(73) \quad \frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT}}$$

A consequência é a razão de um neutron para cada cinco prótons. Praticamente todos os nêutrons terminam por formar *núcleos de hélio*. A *probabilidade* de um neutron interagir com um próton é dada normalmente de modo aproximado devido a *seção de choque transversal* (portanto uma dimensão geométrica). Um cálculo não é tão simples, mas baseado na razão nêutron-próton e prevê que 25% da matéria no Universo deve ser hélio e 75% de hidrogênio. Ocorre uma cadeia sucessiva de reações nucleares. As mais importantes são:

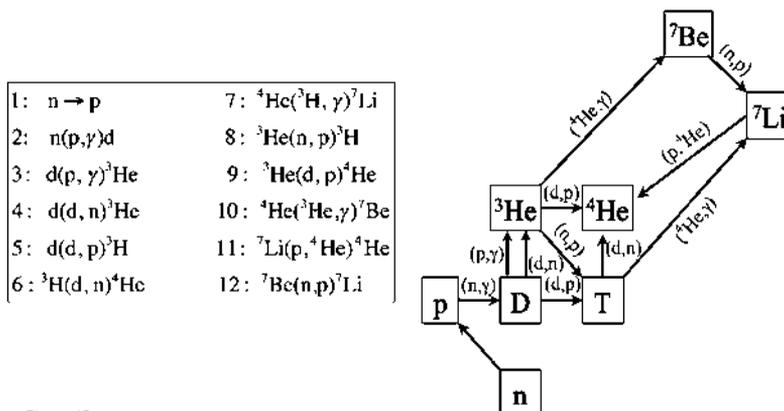


Figura 15

O grupo de Gamow chegou muito próximo da *imagem moderna da evolução térmica e nuclear do Universo primitivo*, incluindo o importante resultado de que, na imagem padrão do Big Bang, cerca de 25% do material primordial em massa é convertido em hélio.

Em 1949, Alpher e Herman, deduziram a possibilidade de uma *radiação de fundo remanescente* como separada da radiação estelar, fazendo uma aproximação para a *temperatura residual do calor original ao redor de 5 [K]*. Parece que as idéias de Gamow sobre o assunto eram diferentes e menos claras. Entre os anos 1950 e início dos anos 1960, a imagem do *Universo quente* de Gamow-Alpher certamente não foi esquecida. Um exemplo é o artigo de Gamow de 1956 sobre a importância da radiação térmica na Cosmologia [Gamow, 1956]. No entanto, não foi amplamente discutido e a atenção mudou para a formação dos elementos nas estrelas. Isso ocorreu em parte porque, como Alpher havia previsto, o processo de *captura de nêutrons* fica travado nas reações de produção do  ${}^4\text{He}$  e pela instabilidade de  ${}^5\text{He}$ . Além do que, certamente, devido ao surgimento de uma teoria concorrente, desenvolvida pelo grupo inglês da Universidade de Cambridge (que abominava essa ideia de Gamow), formado por Hermann Bondi (1919- 2005), Thomas Gold (1920 – 2004) e Fred Hoyle (1915- 2001): a *Cosmologia do Estado Estacionário*

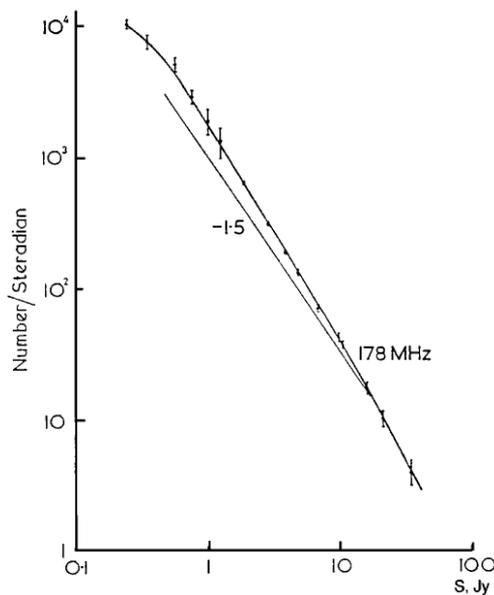
A Escola da Cosmologia guiada filosoficamente atingiu o auge no *modelo do estado estacionário*; uma teoria desenvolvida pela primeira vez em 1948 como uma alternativa a Teoria do Big- Bang. Hermann Bondi e Thomas Gold [Bondi & Gold, 1948] desenvolveram uma versão de uma *cosmologia do estado estacionário*, enquanto Fred Hoyle [Hoyle, 1948] simultaneamente, desenvolveu outra *cosmologia de estado estacionário*. Bondi e Gold estavam desconfortáveis com a Relatividade Geral; eles basearam seu modelo mais diretamente no princípio de Mach, e particularmente, no *princípio cosmológico perfeito*. Hoyle, em contraste, desenvolveu um modelo relativista que mantinha uma densidade constante pela introdução de um novo fenômeno físico, um *campo tensorial de criação de matéria*  $C_{\mu\nu}$  que ele introduz nas equações. Ambos os modelos exigiam uma espécie de *geração espontânea de matéria*, geralmente assumida na forma do hidrogênio.

Uma consequência da teoria e de maior importância para a Astrofísica foi que Hoyle começou a tentar encontrar um meio alternativo de entender a formação dos elementos químicos, e esta foi uma das motivações para sua notável previsão da ressonância do carbono e o subsequente artigo fundamental sobre os processos de nucleossíntese em estrelas por Burbidge [Burbidge, Fowler and Hoyle, 1957]. No entanto a ideia da *criação contínua de matéria* foi um grande obstáculo para muitos físicos e astrônomos. Em 1951, William McCrea (1904- 1999) acabou tendo uma visão mais profunda da física da proposta de Hoyle. McCrea

mostrou que os resultados de Hoyle poderiam ser derivados dentro do sistema da Teoria da Relatividade Geral, dando uma coerência física lógica. É intrigante que McCrea tenha percebido que não há nada intrinsecamente implausível sobre *uma equação de estado de energia negativa*.

Essas idéias já haviam sido prefiguradas por Lemaître em 1933. Há uma estreita relação entre a matemática de um Universo se expandindo exponencialmente sob a influência da constante cosmológica e o quadro de estado estacionário. Lemaître havia sugerido que a constante cosmológica *poderia ser interpretada em termos de uma equação de estado de energia negativa* (Lemaître, 1933). Nas palavras de McCrea, tudo aconteceria como se a *energia no vácuo fosse diferente de zero*.

Os problemas com o modelo do *estado estacionário* começaram a surgir entre 1950 e 1960, quando as observações começaram a apoiar definitivamente a ideia de um Universo variável: fontes de rádio brilhantes (quasares e galáxias de rádio) foram descobertas apenas em grandes distâncias (portanto, poderiam ter existido apenas no passado distante), não em galáxias mais próximas. Enquanto a teoria do Big Bang previa isso, o modelo de *estado estacionário* previa que tais objetos seriam encontrados em todo o universo, inclusive perto de nossa própria galáxia.



**Figura 17** Contagem das fontes na frequência de 178 [MHz] (1968). No espaço euclidiano estático, as contagens inteiras pertencem a uma reta tangente decrescente com coeficiente angular -1,5. Observe as contagens em excesso em unidades de fluxo (densidade), o *Jansky*, onde  $1[\text{Jy}] = 10^{-26}[\text{Wm}^{-2}\text{Z}^{-1}]$  [Ryle, Scheuer, 1955]

Em 1961, testes estatísticos baseados na pesquisa de fontes de rádio *havia descartado o modelo de estado estacionário da mente da maioria dos cosmólogos*; embora alguns proponentes do *estado estacionário* insistissem que os resultados encontrados eram suspeitos. Em 1964, quando Hoyle estava dando uma conferência, mostrou a possibilidade de realizar cálculos de *nucleossíntese primordial* com mais precisão. Naquela época, Roger Tayler (1929-1997) havia acabado de retornar a Cambridge e estava presente na platéia. Hoyle e Tayler perceberam que poderiam realizar cálculos muito mais precisos e, na semana seguinte, elaboraram os detalhes da formação do hélio nas fases iniciais do Big Bang. Hoyle e Tayler obtiveram o resultado de

que cerca de 25% de hélio é sintetizado no Big Bang, em notável concordância com a observação. A razão para a constância da abundância cósmica de hélio é que ela é determinada principalmente pela Termodinâmica do Universo primitivo, e não pela microfísica envolvida nas reações nucleares. Uma consequência do modelo do Big Bang que Hoyle e Tayler não mencionaram explicitamente em seu artigo (Hoyle e Tayler, 1964) foi que o *remanescente resfriado da radiação térmica* presente durante as fases iniciais deveria ser detectável em comprimentos de onda de centímetros e milímetros.

A ideia da busca da *reliquia radiação térmica* do Big Bang foi retomada no início da década de 60 no séc.XX pelo físico teórico soviético Yakov Zeldovich (1914- 1987) e seus colegas em Moscou e por Robert Dicke e seus colegas em Princeton, quando já estava quase esquecida a previsão de Alpher e Herman, quando a *teoria da nucleossíntese primordial* de Gamow havia falhado em explicar a criação dos elementos químicos. Smirnov [Smirnov, 1965; Peebles, 1993] revisou o trabalho de Gamow; considerando que a temperatura *radiação térmica reliquia* no presente estaria ao redor de aproximadamente entre 1 [K] e 10 [K]. Essa *radiação cósmica* de baixa energia que aparentemente preenche o Universo e banha a Terra em todas as direções. Intensa o suficiente para ser detectada por radiotelescópios convencionais, foi sem dúvida foi percebido, mas não reconhecido, por anos; na verdade, pois era responsável por parte do *ruído* que aparecia por exemplo nas *telas de televisão de tubo* (TVs antigas, que poderia ser utilizadas não somente para diversão e entretenimento) fora da frequência do canal escolhido.

Em 1964, dois físicos teóricos soviéticos Andrei. G. Doroshkevich e Igor D. Novikov ao analisarem a nota técnica D- 1130 do Sistema de Recepção da antena referentes do radiotelescópio de rastreamento em *formato de tuba*, com sistema de recepção de baixo ruído (em 2390 [Mc]) do projeto do satélite passivo Echo I do Bell Telephone Laboratories em Holmdel, Nova Jersey [Ohm 1961], mostraram que seria possível encontrar um limite para a *temperatura de radiação* no presente [Doroshkevich & Novikov, 1964]. A fig. 18 A, mostra o diagrama da antena e a tabela que chamou a atenção de Doroshkevich e Novikov

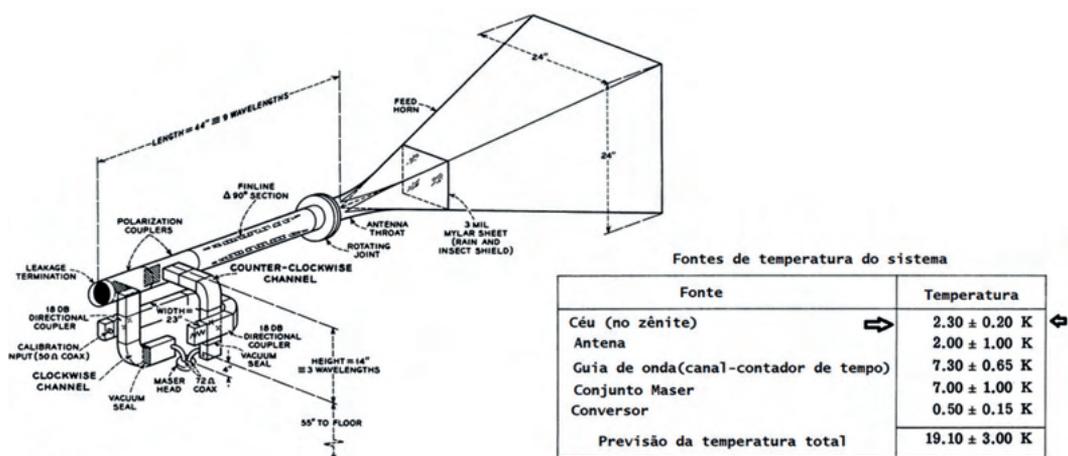


Figura 18 A

Mostra o diagrama do sistema da antena e o resultado das medidas de temperatura. Ver in [Ohm,1961]

Doroshkevich e Novikov interpretaram a descrição das propriedades de *ruído* do radiotelescópio como uma possível *temperatura cósmica de fundo*. Eles mostraram que essa previsão fornecia um *teste chave do cenário do Big Bang*.

O instrumento da Bell Telephone Laboratories tem como fundamento o *radiômetro*, um dispositivo inventado por Robert Dicke como parte de um projeto iniciado durante a Segunda Guerra Mundial no laboratório do MIT [Dicke, 1946], tendo usado este dispositivo para definir um limite na temperatura da radiação de comprimento de onda em centímetros menor do que 20 [K], do vapor de água atmosférico, da radiação emitida pelo Sol e a refletida pela Lua. Seu radiômetro foi caracterizado por uma técnica de *calibração de temperatura de ruído* usando um resistor comutável, conhecido como *resistor de Dicke*

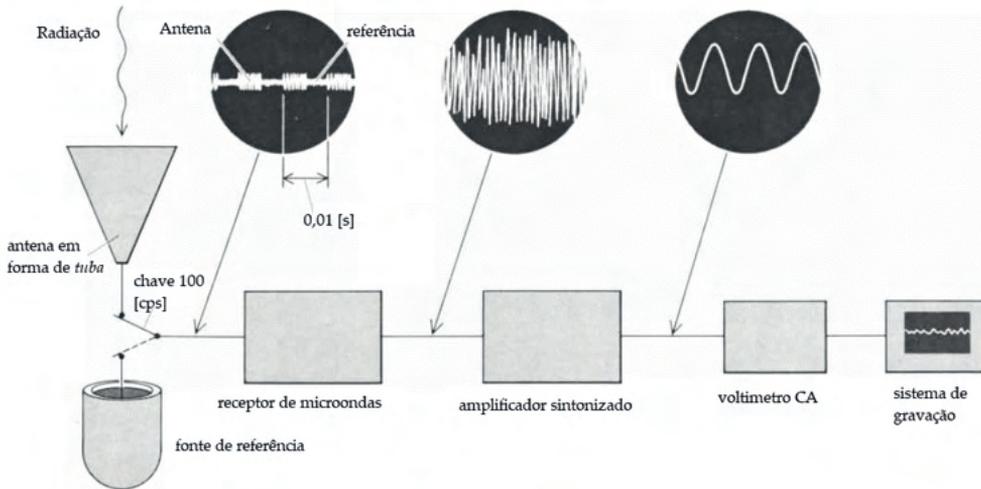


Figura 18 B Diagrama do radiômetro de Dicke in Peebles, 1967

A temperatura medida de ruído da antena inclui contribuições devidas à linha de transmissão do elemento de alimentação e aos circuitos de processamento. A potência do ruído por unidade de largura de banda disponível nos terminais de um resistor de resistência  $R$  temperatura  $T$ , foi determinada por H. Nyquist (1889- 1976)

$$(74) P_r = kT_r [WHz^{-1}]$$

Aqui  $k$  é a constante de Boltzmann. Assim, uma antena de radiotelescópio (e receptor) pode ser considerada como um radiômetro (um instrumento de medição de temperatura) para determinar a temperatura de regiões distantes do espaço através do ruído da radiação na antena. Em uma antena de radiotelescópio operando em comprimentos de onda da ordem de centímetros, pode ser dirigida para o feixe incidente proveniente de regiões do céu que estão efetivamente em temperaturas estão próximas do zero absoluto. A recepção é expressa como densidade de fluxo (potência); dessa forma a razão entre a potência recebida por unidade de largura de banda pela abertura  $A_e$  efetiva da antena fornece a metade da medida do fluxo  $S$ , mas se estiver alinhada em relação a fonte [Kraus e Carver, 1986]

$$\frac{S}{2} = \frac{P_r}{A_e} = \frac{kT_r}{A_e} \Rightarrow S = \frac{kT_r}{A_e}$$

$$(75) S = \frac{kT_r}{A_e} [Wm^{-2}Hz^{-1}]$$

A sensibilidade deverá ser suficiente para medir baixíssimas temperatura de ruído  $T_r$ ; de tal modo que a temperatura mínima detectável pelo receptor do radiotelescópio é dada por em função de uma constante adimensional do sistema  $\xi$ , a temperatura de ruído do sistema  $T_r$  em [K], a variação da banda de frequência de recepção do receptor  $\Delta\nu$  em [Hz] pela constante temporal  $t_r$  do receptor

$$(76) (T_r)_{min} = \frac{\xi(T_r)_{sist}}{\sqrt{\Delta\nu \cdot t_s}}$$

Mas, aqui lembramos que o espectro é do *corpo negro*, portanto a curva é explicada pela *Lei de Planck* que representa a *energia espectral*

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Mas a medida radiométrica é dada pela *radiância*  $I(\nu, T)$ , usada para descrever a quantidade de radiação eletromagnética;

$$\begin{aligned} u_\nu &= \frac{4\pi}{c} J(\nu, T) \therefore J(\nu, T) = \frac{c}{4\pi} u_\nu \\ J(\nu, T) &= \frac{c}{4\pi} \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \\ (77) \quad J(\nu, T) &= \frac{2h}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} [W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}] \end{aligned}$$

Como consequência, a temperatura é frequentemente usada em radioastronomia como uma medida de *brilho superficial*; especificamente, a *temperatura de brilho* na região de Rayleigh-Jeans é definida por

$$(78) T_{br} = \frac{\lambda^2 J(\nu, T)}{2k}$$

Da eq. 76 na forma a *temperatura da antena* é dada por

$$\frac{S}{2} = \frac{P_r}{A_e} = \frac{kT_r}{A_e} \Leftrightarrow T_r \equiv T_{ant} = \frac{SA_e}{2k}$$

Elas são portanto equivalentes à verdadeira temperatura termodinâmica  $T$  se somente se ; o que é verdade pois a temperatura da RCFM está próxima de 3[K]. Então a desigualdade vale apenas frequências  $\nu \lesssim 30$  [GHz]. Assim

$$\begin{aligned} J(\nu, T) &= \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \Leftrightarrow e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 = \frac{2h\nu^3}{J(\nu, T) \cdot c^2} \therefore e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 = \frac{2h\nu^3}{\frac{2kT_{br}}{\lambda^2} \cdot c^2} \\ e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 &= \frac{h\nu}{kT_{br}} \therefore T_{br} \equiv T_{ant} \\ e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 &= \frac{h\nu}{kT_{ant}} \therefore \frac{1}{T} \left( e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right) = \frac{1}{T} \cdot \left( \frac{h\nu}{kT_{ant}} \right) = \frac{1}{T_{ant}} \cdot \left( \frac{h\nu}{kT} \right) \\ (79) \quad T &= T_{ant} \left( \frac{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}{\frac{h\nu}{kT}} \right) \therefore T = T_{ant} \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{h\nu}{kT} + \frac{1}{6} \left( \frac{h\nu}{kT} \right)^2 \right) \end{aligned}$$

As medições do espectro RCFM em comprimentos de onda curtos, são expressas em  $T_{ant}$  ou  $T_{br}$ , no entanto requerem grandes correções para fornecer a  $T_{RCFM}$ , *temperatura termodinâmica do RCFM*. Nesse sentido para uma maior compreensão e aprofundamento, recomendamos ao leitor o texto de R. B. Partridge, *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation* [Partridge, 2007].

Em 1964, Dicke propôs a Universidade de Princeton a construção de um *radiômetro* capaz de detectar a *radiação do corpo negro* devido ao do Big-Bang quente. A essa altura, ele desconhecia o problema do *excesso de ruído* em um radiômetro como o apresentado pela antena em Holmdel, cerca de 48,28 [km] de distância. De modo geral a determinação efetiva da temperatura da RCFM é dada levando em conta outras contribuições convenientemente avaliadas e subtraídas

$$(80) \quad T_{RCFM} = T_{zênite} - T_{atm}^{abs} - T_{gal} - T_{cosm}^{abs}$$

Em 1965, com as duas *cosmologias concorrentes*, a do *estado estacionário* e do Big- Bang, um *indício observacional* mais convincente da *reliquia do Big- Bang*, descoberto mais ou menos ao acaso por dois jovens radio astrônomos, como comentado no início deste parágrafo, que não tinham a intenção de investigar nenhum problema cosmológico: Arno A. Penzias e Robert W. Wilson; foi o *divisor de águas* na Cosmologia.

Eles trabalhavam em um centro de comunicações por satélite estabelecido pela Bell Telephone Laboratories em Crawford Hill (que tinha uma forte tradição em financiar a pesquisa fundamental), um pouco distante das instalações dos Laboratórios Bell em Holmdel. Penzias e Wilson receberam o Prêmio Nobel de Física pela descoberta em 1978, na sequência do Prêmio Nobel de Física de 1974 que foi concedido conjuntamente a dois astrônomos, Sir Martin Ryle (1918- 1984) e Antony Hewish (1924- 2021) por sua pesquisa pioneira em Radio- astronomia.

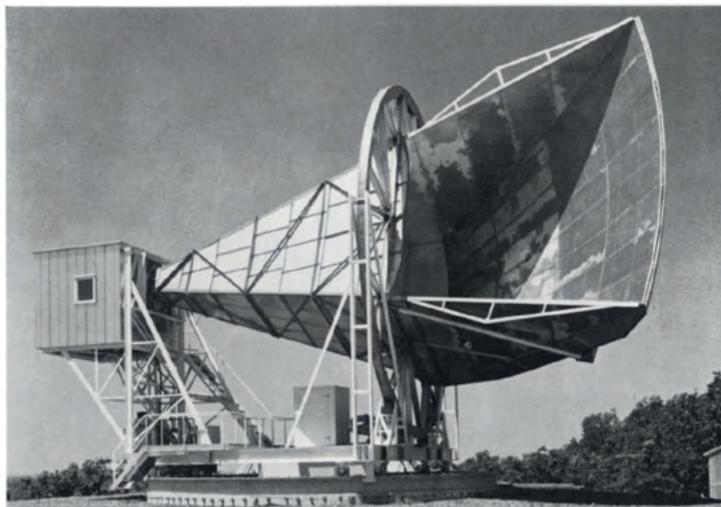


Figura 19 Antena em Holmdel utilizada por Penzias e Wilson em sua descoberta

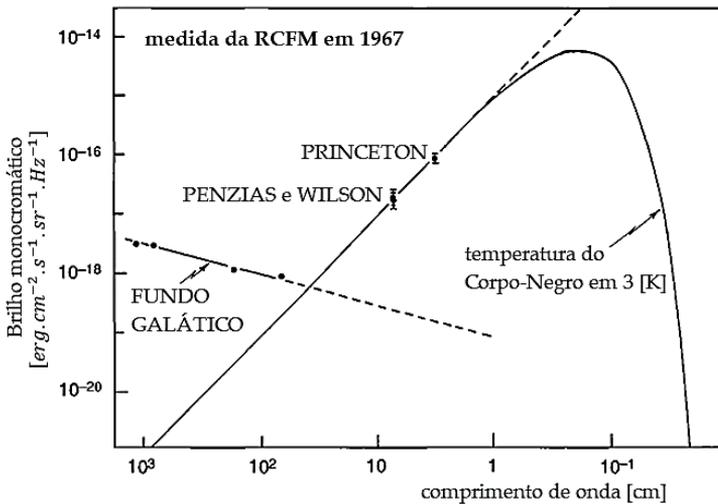
Em 1965 Penzias e Wilson ficaram responsáveis por de calibrar a antena para uso nessas frequências, para a qual construíram um receptor maser refrigerado. Uma das finalidades da radio antena era poderia ser usado para observações astronômicas por uma fração do tempo de observação. Onde quer que eles apontassem a antena para o céu, eles encontravam um *excesso de temperatura da antena*, que não poderia ser explicada por fontes de ruído no telescópio ou no sistema receptor, um sinal que produzia um leve chiado de fundo e que estava interferindo na comunicação por satélite. Uma lista de contribuições para o sinal total detectado é fornecida na tabela abaixo

Sinal	Ruído T [K]
temperatura total do ruído no zênite	$6.7 \pm 0.3$
emissão atmosférica	$2.3 \pm 0.3$
perdas ôhmicas	$0.8 \pm 0.4$
resposta do lado oposto da antena	$\leq 0.1$
Radiação Cósmica de Fundo	$3.5 \pm 1.0$

**Figura 19** Contribuições para a medida total do radio sinal em 4,08 GHz (7,35 [cm]); *in* Penzias & Wilson, 1965

Tendo calibrado cuidadosamente todas as partes da antena e do sistema receptor, eles descobriram que havia cerca de  $(3,5 \pm 1)$  [K] de contribuição de ruído em excesso (Penzias e Wilson, 1965).

Ao mesmo tempo, os membros do grupo de Princeton, liderado por Robert Dicke, tinham preparando exatamente o mesmo tipo de experimento para detectar a *radiação remanescente* do Big Bang e vinham apresentando suas ideias e cálculos em reuniões científicas. Numa aula de Jim Peebles sobre o Big Bang, o astrônomo norte americano Bernie Burke [1928 -2018], um dos fundadores da radioastronomia, estava presente e ouviu a afirmação sobre a importância da medição e a possibilidade de detectar a *radiação remanescente* do início do Universo. Posteriormente, Burke comentou com Arno Penzias, sobre o problema de *excesso de ruído* de 3,5 [K] e se referiu às ideias de Robert Dicke e seus colegas. Com a intenção de acompanhar qualquer possível explicação do significado da medida 3,5 [K], Penzias telefonou para Robert Dicke. Por acaso, o telefonema veio quando o grupo de Princeton estava reunido para um seminário no escritório de Robert Dicke. Dicke ouviu atentamente pois o grupo de Princeton, estava em meio ao desenvolvimento do projeto de construção de um equipamento bastante semelhante ao construído pela Bell Labs. Ao desligar fez o seguinte comentário para a equipe: *Bem, rapazes, fomos pegos*. A RCFM havia sido descoberta. Seguiram-se discussões com o grupo de Princeton, e ficou claro que Penzias e Wilson a haviam descoberto, [Partridge, 2007].



**Figura 20** Medida da RCFM realizada por David Todd Wilkinson e Peter Roll em 1966, confirmando o valor da temperatura [Partridge, 2007]

Muitas medições da *radiação de fundo* foram realizadas nos anos seguintes. Em comprimentos de onda milimétricos, observações muito difíceis por causa da absorção atmosférica; conseqüentemente o uso de balões estratosféricos em altitude ao redor de 30[km] para realização das medidas de temperatura da RCFM foram amplamente consistentes com um espectro de radiação de corpo negro a uma temperatura de cerca de 2,7 [K]. Para evitar os problemas de absorção atmosférica, foi desenvolvido o projeto de observações no espaço, e isso foi conseguido com o lançamento do Cosmic Background Explorer (COBE) em novembro de 1990. Os primeiros resultados deste experimento mostraram que o espectro da radiação cósmica, a radiação de fundo é da forma de corpo negro, sendo a temperatura da radiação foi de  $(2,725 \pm 0,01)$  [K] [LAMBDA, <https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/expt/>]. Os resultados finais, relatados em 1996, mostraram que os desvios de um espectro de *corpo negro perfeito* equivalem a menos de 0,03% da intensidade máxima ao longo da faixa de onda de 2,5 a 0,5 [mm], um *espectro de corpo negro natural perfeito*. A temperatura de radiação foi de  $(2,728 \pm 0,004)$  [K] (nível de confiança de 95%).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A história da Cosmologia moderna começou em 1917, quando Albert Einstein aplicou sua *teoria da gravitação* (Teoria da Relatividade Geral) ao *problema cosmológico*. Desde o seu início, a Cosmologia moderna representou uma mudança radical com relação ao pensamento científico anterior existente sobre o Universo. Quando Einstein apresentou a teoria não havia nada parecido. Tínhamos uma *teoria da gravidade* em perfeito funcionamento, a desenvolvida por Isaac Newton mais de dois séculos antes. Mas quase tudo que sabemos hoje (e não sabemos) sobre o Universo mais amplo hoje deriva da Relatividade Geral. Mas, a solução do *problema*, levou Einstein a crer que o Universo nunca teve um início e iria existir sempre, mais ou menos da mesma maneira, no futuro. Em seu modelo o Universo seria *estático*.

A descoberta de Hubble em 1929, mudou radicalmente a forma como entendemos o Universo. Seus resultados indicaram que o *Universo estava se expandindo*. A interpretação dessa *expansão* diz que o próprio espaço em que essas galáxias se encontram está aumentando. Isso contrastava com a idéia de um *universo estático*, proposta por Einstein. Às vezes se afirma que Hubble descobriu a *expansão do Universo* com seu trabalho de 1929. Essa é uma afirmação que tem pouco mérito, embora não tão pouco quanto a estranha afirmação de que Hubble também descobriu o Big Bang. O fato é que Hubble tendia atribuir a lei linear a um *efeito De Sitter*, o que não significa que os desvios para o vermelho das nebulosas sejam simplesmente causados por suas velocidades radiais. Os resultados do Hubble de 1929 demoliram esse preconceito.

O Hubble forneceu os dados observacionais que levaram à aceitação do *Universo em expansão*, mas foram outros cientistas que fizeram a proposta. Além disso, mesmo depois que a maioria dos astrônomos aceitou o *Universo em expansão*, Hubble optou por enfatizar a base observacional incerta da hipótese. E em 1953, pouco antes de sua morte, ele repetiu sua conclusão cautelosa de que é importante que a lei (*de Hubble*) *seja formulada como uma relação empírica entre dados observados*. Mas a teoria e a observação indicavam agora que havia algo seriamente errado com os *modelos estáticos*; portanto, o Universo estava em *expansão, tendo um passado em que foi diferente do que é hoje*.

Dois anos antes de Hubble, o Pe. Georges Lemaître tinha chegado à mesma descoberta inovando as soluções matemáticas das equações da Relatividade Geral para o caso cosmológico obtidas por Friedmann, obtendo naturalmente a *constante de Hubble* e da qual derivou

a taxa de expansão cósmica. Lemaître foi um dos fundadores da *Cosmologia física moderna, a cosmologia do Universo em expansão*, que pode ser chamada *Cosmologia do Big-Bang*.

Em 29 de outubro 2018 os membros da IAU recomendaram a renomeação da Lei Hubble como *Lei Hubble-Lemaître*, Resolution B4 XXX<sup>th</sup> IAU General Assembly, Vienna, <https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann18029/>. E agora, depois de todos esses anos, com a outorga de três Prêmios Nobel, 1978, 2006 e 2019; somos convidados a comemorar essa histórica aventura científica.

No entanto apesar dos aspectos positivos, com resultados observáveis e sólida evidencia científica, a Teoria do Big- Bang não tem um caráter hegemônico. A questão infelizmente passa por um viés filosófico- teológico. A lista dos contrários para exemplificar, é encabeçada por nada menos do que os físicos teóricos James Peebles, Prêmio Nobel de 2019 (justamente pela descoberta da RCFM), Neil Turok, Diretor Emérito do Perimeter Institute for Theoretical Physics, no Canadá, Stephen Hawking (premiado pela Academia de Ciências do Vaticano), o matemático norte americano Howard Robertson, com quem Lemaître trabalhou e o brasileiro, Mário Mário Novello do CBPF. O Prof. Novello em seu livro, *Do Big- Bang ao Universo Eterno* [Novello, 2010], no Prólogo, ele nos fornece um testemunho da situação em que a Cosmologia se encontra frente as redes sociais e a mídia, uma situação catastrófica em que leigos de todos os matizes, acreditam poder opinar no conhecimento científico, dando as interpretações que mais lhes convêm (algo que nesses dias de *pandemia SarsCov19*, se tornou estarrecedor, somado ao processo de politização do conhecimento médico).

A *Teoria do Big- Bang* passa hoje em dia por uma reavaliação, uma vez que surgiram algumas pequenas descobertas incomodas sendo provável um refinamento proposto para evitar essa *suposta singularidade* (a Origem) desenvolvendo um tratamento correto da *gravidade quântica*. Não se sabe o que poderia ter precedido *o estado quente e denso do universo primitivo ou como e por que ele se originou*, embora exista uma especulação na Cosmogonia [Hawking & Ellis, 1973].

Um modelo recente  $\Lambda$ CDM, Lambda Matéria Escura Fria, representa o *modelo de concordância* que explica as observações cósmicas realizadas sobre a RCFM; um modelo conhecido e mais simples, que está em acordo com todas as observações fornecendo uma descrição surpreendentemente precisa do Universo de tempos anteriores a 380.000 anos após o Big Bang, definindo a última superfície de espalhamento observada através da RCFM, até os dias atuais com uma idade de *13,8 bilhões de anos*. O modelo usa a métrica de Friedmann - Lemaître - Robertson - Walker, no qual as equações de Friedmann e as *equações cosmológicas de estado* descrevem um *Universo observável* desde a época inflacionária até o presente e futuro. Entretanto,  $\Lambda$ CDM é tão só um modelo.

De qualquer forma, creio que vale a afirmação profética de Ieshauáhu [Is 55, 8-9]: *Meus pensamentos não são como vossos pensamentos e vossos caminhos não são os meus caminhos, diz o SENHOR. Quanto os céus estão acima da terra, assim estão os meus caminhos acima dos vossos caminhos e meus pensamentos acima dos vossos pensamentos.*

## REFERÊNCIAS

- AGHANIM, N.; Yashar Akrami, M. A.; J. Aumont, C.;Baccigalupi, M.; Ballardini, A. J. Banday et al. Planck 2018 results-VI. Cosmological parameters, *Astronomy & Astrophysics* 641, p. A6, 2020.
- AMADO, A. T. F. A Revolução Copernicana como base para a síntese do conceito de gravitação. *Revista LUMEN* IV, n° 8, p.39, 1998.

- AMADO, A. T. F. *As Geometrias de Lobachevsky- Bolyai e Riemann*. Santos: Leopoldianum, 2012. (Elementos De Matemática 3)
- AMADO, A. T. F. *Matemática do Espaço-Tempo: A Teoria da Relatividade*. Santos: Editora Universitária Leopoldianum, 2016. (Elementos De Matemática 4)
- ARMSTRONG, K. *Uma História de Deus: quatro milênios de busca do judaísmo, cristianismo e islamismo*. Tradução de Marcos Santarrita. São Paulo: Companhia das Letras, 2008.
- BAXTER, E. J.; SHERWIN, B. D. Determining the Hubble constant without the sound horizon scale: measurements from CMB lensing, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 501, n° 2, p. 1823, 2021.
- BONDI, H.; GOLD, T. The steady-state theory of the expanding universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108, n° 3, p. 252, 1948.
- BURBIDGE, E. M.; BURBIDGE; G. R., FOWLER, W. A. ; HOYLE, F. Synthesis of the
- CHANDRASEKHAR, Subrahmanyan, and Louis R. Henrich. An attempt to interpret the relative abundances of the elements and their isotopes. *Astrophysical Journal* 95, p. 288-298, 1942.
- CONCEIÇÃO DE BARROS, M. As mulheres do Harvard College Observatory: Henrietta Swan Leavitt - a mulher que descobriu como medir a distância das galáxias, *História da Ciência e Ensino*, Volume 18 (especial), p. 12, 2018.
- DE SITTER, W. On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences. First Paper, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 76, n° 9, p. 699, 1916.
- DE SITTER, W.. On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences. First Paper, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77, n° 2, p. 155, 1917.
- DE SITTER, W. On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences. First Paper, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 78, n° 1, p. 3, 1916.
- DE SITTER, W. On the bearing of the Principle of Relativity on Gravitational Astronomy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 71, n° 5, p. 388, 1911.
- DICKE, R. The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies, *The Review of Scientific Instruments*, vol 17, n° 7, p. 268, 1946.
- DICKE, R.H.; PEEBLES, P. J. E.; Roll, P. G., ; WILKINSON, D. T. Cosmic black-body radiation, *The Astrophysical Journal* 142, p.414, 1965.
- DOROSHKEVICH, A.G.; NOVIKOV, I.D. Mean density of radiation in the Metagalaxy and certain problems in relativistic cosmology, *Soviet Physics-Doklady*, vol. 9, n° 2, p. 111, 1964.
- EDDINGTON, A. S. Preliminary note on the masses of the electron, the proton, and the universe, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 27, n° 1, p. 15, 1931.
- EDDINGTON, A. S.. The End of the World: from the Standpoint of Mathematical Physics, *The Mathematical Gazette* 15, n° 212, p. 316, 1931.
- EDDINGTON, A. S. The End of the World: from the Standpoint of Mathematical Physics, *Nature* 127, n° 3203, p.447, 1931.
- EDDINGTON, A. S. The recession of the extra-galactic nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 92, p.3, 1931.
- EDDINGTON, A. S. *New pathways in science: Messenger lectures (1934)*. Cambridge: Cambridge University Press, 1935.
- EINSTEIN, A; LORENTZ, H. A.; MINKOWSKI, H. *Textos fundamentais da Física Moderna, vol I: O Princípio da Relatividade*. Tradução de Mário José Saraiva. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1972.
- EINSTEIN, A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sutzungsher preuss (Questions of cosmology and the general relativity theory). *Akad. Wiss*, 1, p.142; p. 601, 1917.

- EINSTEIN, A.. Note to the Paper by A. Friedmann “On the Curvature of Space”. *Z. Phys* 16, p. 228, 1923.
- EINSTEIN, A. On the Cosmological Problem, appendix for the 2nd ed. in *The meaning of Relativity* (4th. paperback printing). Princeton: Princeton University Press, 1974.
- EINSTEIN, A. *Out of my later years*. Secaucus NJ: Citadel Press, 1956.
- EINSTEIN, A. *The Collected Papers of Albert Einstein: The Berlin Years: Writings & Correspondence, June 1925-May 1927*. Diana Kormos Buchwald [und 5 Weitere] Editors; Anthony Duncan [und 4 Weitere], Associate & Contributing Editors; Emily de Araújo [und 3 Weitere], Assistant Editors. Princeton: Princeton University Press, 2018.
- ELIADE, M. *Imagens e Símbolos*. Tradução de Sônia Cristina Tamer. São Paulo: Martins Fontes, 2002.
- FRIEDMAN, A. On the curvature of space (english translation), *General Relativity and Gravitation*, v. 31, n°12, p. 1991, 1999.
- FRIEDMAN, A. On the Possibility of a World with Constant Negative Curvature of Space, (english translation), *General Relativity and Gravitation*, v. 31, n°12, p. 2001, 1999.
- GAMOW, G. Expanding universe and the origin of elements. *Physical Review* 70, n° 7-8, p. 572, 1946.
- GAMOW, G. Nuclear transformations and the origin of the chemical elements. *Ohio Journal of Science* n°5, p. 406, 1935.
- GAMOW, G. The evolutionary universe, *Scientific American* 195, n° 3, p.136, 1956.
- GROSSETESTE, R. *On Light*. Translation by Clare C. Riedl. Milwaukee: Marquette University Press, 1942.
- HARRISON, E. R. *Cosmology: the science of the universe* 5th ed. New York: Cambridge University Press, 2010.
- HARTMANN, W. K. *Astronomy: The Cosmic Journey*. Belmont: Wadsworth Pu. Co., 1982.
- HAWKING, S. W.; ELLIS, G. F. R. *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.
- HAWLEY, J. F.; Hawley, John Frederick, and Holcomb, Katherine A. *Foundations of modern cosmology*. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- HEATH, T. L. *Aristarchus of Samos*. New York: Dover Pu. Inc, 1981.
- HEATH, T. L. *Greek Astronomy*. New York: Dover Pu. Inc, 1991.
- HEISENBERG, W. *The physical principles of the Quantum Mechanics*. Translated by Carl Eckart and F. C. Hoyt. New York: Dover Pu. Inc., 1949.
- HERSCHEL, W. Account of the Changes That Have Happened, during the Last Twenty-Five Years, in the Relative Situation of Double-Stars; With an Investigation of the Cause to Which They Are Owing, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 93, p. 339, 1803.
- HOYLE, F. ; Tayler, R. J. The mystery of the cosmic helium abundance, *Nature*, 203, p. 1108, 1964.
- HOYLE, F. A new model for the expanding universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108, p. 372, 1948.
- HUBBLE, E.; HUMASON, M. L. The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae, *The Astrophysical Journal* 74, p. 43, 1931.
- HUBBLE, E. Extragalactic nebulae, *Astrophysical Journal* 64, n° 64, p. 321, 1926.
- KRAUS, J. D. ; Carver, K. R. *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986.
- LANCZOS, C. Ein vereinfachendes Koordinatensystem für Einsteinschen Gravitationsgleichungen, *Phys. Zeit* 23, p. 539, 1922.
- LEMAÎTRE, G. On the random motion of material particles in the expanding universe. Explanation of a paradox. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands* 5, p. 273, 1930.

- LEMAÎTRE, G. The beginning of the world from the point of view of quantum theory, *Nature*, vol. 127, n° 3210, p. 447, 1931.
- LEMAÎTRE, G. The Expanding Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, p.490, 1931.
- LEMAÎTRE, G. Expansion of the universe, a homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, p.483, 1931.
- LEMAÎTRE, G. Spherical condensations in the expanding Universe, *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences de Paris*, 196, p. 903, 1933.
- LEMAÎTRE, G. The three-body problem, *Space Sciences Laboratory Technical Report Series*, 4, n° 49. Berkeley: University of California, 1963.
- LEMAÎTRE, G. Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*, vol. 47, p. 49. 1927.
- LONGAIR, M. S. *The Cosmic Century: a History of Astrophysics and Cosmology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- LOPEZ, C.A S. *Gravitação y Cosmologia: Del Génesis al Apocalipsis*. Santiago do Chile: Editorial Universitária, 1978.
- MARTINS, R. de A. *O universo: teorias sobre sua origem e evolução*. São Paulo: Moderna, 1994.
- MCKELLAR, A. Evidence for the molecular origin of some hitherto unidentified interstellar lines, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 52, n° 307, p. 187, 1940.
- MILLIKAN, R. A.; CAMERON, G. H. Evidence that the cosmic rays originate in interstellar space, *Proceedings of National Academy of Sciences*, August 1, 14, n° 8, p. 637, 1928.
- MILNE, E.; McCREA, W. H. Newtonian universes and the curvature of space, *The Quarterly Journal of Mathematics* n°1, p. 73-80.
- MISNER, C. W.; THORNE, K. S.; WHEELER, J. A. *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman & Co., 1973.
- NOVELLO, M.. *Do Big Bang ao universo eterno*. Rio de Janeiro: Zahar, 2010.
- OHM, E. A. Receiving system, *Bell System Technical Journal* 40, n° 4, p. 1065, 1961.
- OTTO, R. *O Sagrado*. Tradução de Walter O. Schlupp. Petrópolis (RJ): Vozes, 2007.
- PAPAVERO, N. ; BALSAL, J. *Introdução Histórica e Epistemológica à Biologia Comparada, com especial referência à Biogeografia: I. Do Génesis ao fim do Império Romano do Ocidente*. Belo Horizonte: Biótica, 1986
- PARTRIDGE, R. B. *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- PEEBLES, P. J. E., and WILKINSON, D. T.. The primeval fireball, *Scientific American* 216, n° 6, p. 28, 1967.
- PENZIAS, A. A.; and WILSON, R. W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s, *The Astrophysical Journal* 142, p. 419, 1965.
- POPPER, K. Darwinism as a metaphysical research programme. In *Philosophy after Darwin: Classic and contemporary readings*, p. 167-174, 2009.
- RIBEIRO, M. B. Cosmologia Newtoniana, *Boletim da Soc. Astronômica Brasileira* 14, p. 34, 1994.
- RINDLER, W. *Essential relativity: special, general, and cosmological*. New York: Springer-Verlag, 1977.
- ROWAN-ROBINSON, M.. *Cosmology*. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- SAHA, M. N. On a physical theory of stellar spectra. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*,

Containing Papers of a Mathematical and Physical Character 99, n°. 697, p. 135, 1921.

SCHWARZSCHILD, K. On the Gravitational Field of a Mass Point according to Einstein's Theory, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.)*, p. 189, 1916. Translation by S. Antoci and A. Loinger, arXiv preprint physics/9905030, 1999.

SEDLEY, D. Lucretius and the New Empedocles. *Leeds International Classical Studies* 2.4 2003.

SILK, J. O *Big Bang*: A origem do Universo. Tradução de Fernando Dídimo P. B. Vieira e revisão de Ronaldo Rogério de Freitas Mourão. Brasília: Universidade de Brasília, 1984

SLIPHER, V. M. The radial velocity of the Andromeda Nebula, *Lowell Observatory Bulletin* 2, p. 56, 1913.

SMIRNOV, Y. N. Hydrogen and He<sup>4</sup> Formation in the Prestellar Gamow Universe, *Soviet Astronomy* 8, p 864, 1965.

STOFFEL, J.F.; LEMAÎTRE, G. *La physique d'Einstein*, [https://philarchive.org/rec/STOLPD-5?all\\_versions=1](https://philarchive.org/rec/STOLPD-5?all_versions=1), 1996.

WALKER, A. G. On Milne's theory of worldstructure. *Proceedings of the London Mathematical Society* 2, n° 1, p. 90, 1937.

WEINBERG, S. *Gravitation and cosmology*: principles and applications of the general theory of relativity. New York: John Wiley & Sons Inc., 1972.

## ABSTRACT

For several decades the physicists, including brazilians, they have traditionally, it has been considered that the father of theory of Big-Bang is the american-soviet physicist George Gamow, whose studies and research provide essential contributions to the explanation of the origins of the universe and the consolidation of the Big Bang theory. But they has overlooked the achievements in Cosmology of the belgian priest and Georges Lemaître. In 1927 he became the first to propose a theory of the expansion of the universe to explain the redshifts of galaxies, an advance that is often attributed to Edwin Hubble. Lemaître published the original version of the Hubble Law, and he produced the first estimate of the Hubble constant. He proposed the theory of expansion of the Universe that became better known as the Big Bang theory for the origin of the universe. Alexander Friedmann, Carl Wilhelm Wirtz, Vesto Slipher, Knut E. Lundmark, Willem de Sitter, Georges H. Lemaître, and Edwin Hubble all contributed to the discovery of the expansion of the universe. If only two persons are to be ranked as the most important ones for the general acceptance of the expansion of the universe, the historical evidence points at Lemaître and Hubble, and the proper answer to the question, who discovered the expansion of the universe, is: Georges H. Lemaître.

## KEYWORDS.

Innovation. Hubble's Law. Origins of the Universe. Expansion. Big Bang theory.