



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### Os Modelos Cosmológicos Contemporâneos e o Big Bang.

Neste verbete, trataremos apenas dos modelos cosmológicos formulados no Século 20. Os modelos planetários que foram desenvolvidos desde os gregos antigos até o final do Século 19, poderão ser encontrados em vários textos, dentre os quais destacamos: Carl Sagan, *Cosmos* (Francisco Alves, 1982); Fátima Regina Rodrigues Évora, *A Revolução Copernicana-Galileana I, II* (EDUNICAMP, 1988); Arthur Koestler, *O Homem e o Universo* (Ibrasa, 1989); Roberto de Andrade Martins, *Universo: Teorias sobre a sua Evolução* (Editora Moderna, 1994); José Maria Filardo Bassalo, *Crônicas da Física, Tomo 4* (EDUFPA, 1994); Marcelo Gleiser, *A Dança do Universo: Dos Mitos de Criação ao Big-Bang* (Companhia das Letras, 1997); Alexandre Cherman, *Cosmo-o-qué? Uma Introdução à Cosmologia* (Fundação Planetário do Rio de Janeiro, 2000); Ronaldo Rogério de Freitas Mourão, *Kepler: A Descoberta das Leis do Movimento Planetário e Copérnico: Pioneiro da Revolução Astronômica* (Odysseus, 2003; 2004); e Stephen William Hawking, *Os Gênios da Ciência: Sobre os Ombros de Gigantes* (Editora Campus, 2005).

Em 1915 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* 2, p. 844), o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) formulou a Teoria da Relatividade Geral (TRG) traduzida pela equação de Einstein:  $R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R \equiv G_{\mu\nu} = K T_{\mu\nu}$ , onde  $g_{\mu\nu}$  ( $g^{\mu\nu}$ ) é o tensor métrico Riemanniano,  $R_{\mu\nu}$  é o tensor geométrico de Ricci,  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein,  $T_{\mu\nu}$  é o tensor energia-matéria,  $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ ,  $K = 8 \pi G/c^4$  é a constante de gravitação de Einstein,  $G$  é a constante de gravitação de Newton-Cavendish,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, e  $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ . Observe-se que, segundo essa equação, quando um corpo “cai” na Terra, por exemplo, ele não é puxado pela atração gravitacional Newtoniana de nosso planeta e sim, ele se desloca na curvatura do espaço-tempo produzida pela presença da massa da Terra, isto é, ele se movimenta na geodésica da Geometria Riemanniana ( $g_{\mu\nu}$ ) induzida pela massa terrestre. Logo depois, em 1916 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* 2, pgs. 189; 424), o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) encontrou uma solução rigorosa para essa equação Einsteiniana, ao considerar uma carga puntiforme colocada em um campo gravitacional isotrópico e estático. Essa solução ficou mundialmente conhecida como a métrica de Schwarzschild (vide verbete nesta série).

Em 1917 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* 1, p. 142), Einstein encontrou uma solução para a sua equação que, no entanto, diferentemente da solução encontrada por Schwarzschild, era dinâmica. Contudo, por essa época, não havia nenhuma evidência experimental sobre a dinâmica do Universo, isto é, se o seu raio dependia do tempo. Então, para contornar essa dificuldade, ele formulou a hipótese de que as forças entre as galáxias eram independentes de suas massas e que variavam na razão direta da distância entre elas, isto é, havia uma “repulsão cósmica”, além, é claro, da “atração gravitacional Newtoniana”. Matematicamente, essa hipótese significava acrescentar um termo ao primeiro membro de sua equação – o famoso termo cosmológico ou termo de repulsão cósmica ( $\Lambda g_{\mu\nu}$ ). Desse modo, Einstein postulou que o Universo era estático e, usando sua equação, demonstrou ser o mesmo finito e de curvatura Riemanniana positiva ou esférica. Em virtude disso, o seu modelo cosmológico ficou conhecido como o Universo Cilíndrico de Einstein, em que o espaço é curvo, porém o tempo é retilíneo. Conforme veremos mais adiante, hoje esse termo cosmológico tem um outro significado físico ( $P_{\nu} g_{\mu\nu}$ , sendo  $P_{\nu}$  a densidade de energia do vácuo quântico) e é acrescentado ao segundo membro da equação Einsteiniana visto acima, ou seja, essa equação passa a ter a forma  $G_{\mu\nu} = (8 \pi G/c^4) (T_{\mu\nu} + P_{\nu} g_{\mu\nu})$ , para poder explicar a aceleração da expansão do Universo, observada em 1998, nas supernovas do tipo Ia, que são explosões termonucleares de estrelas anãs brancas com **14** vez a massa do Sol (vide verbete nesta série).

Ainda em 1917 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 78, p. 3), o astrônomo holandês Willem de Sitter (1872-1934) encontrou uma outra solução estática da equação Einsteiniana com o termo cosmológico  $\Lambda$ , ao considerar o Universo homogêneo e uniforme, porém vazio, ou seja:  $T_{\mu\nu} = 0$ . No entanto, essa solução apresentava duas conseqüências notáveis: o espaço geométrico possuía uma estrutura que era *independente da matéria contida nele*; e o tempo era relativo, isto é, dependia do lugar, ao contrário do que acontecia com o Universo Einsteiniano em que o tempo cósmico  $t$  independe do lugar. Por essa razão, esse modelo cosmológico ficou conhecido como o Universo Esférico de de Sitter, uma vez que nele o espaço-tempo é curvo. É interessante observar que, em 1925 [*Journal of Mathematical Physics (MIT)* 4, p. 188], o astrônomo belga, o Abade Georges-Henri Edouard Lemaître (1894-1966), demonstrou que o Universo de de Sitter era “pseudo-estático”. Aliás, o mesmo resultado foi também demonstrado, em 1928 (*Philosophical Magazine* 5, p. 835), pelo astrônomo norte-americano Howard Percy Robertson (1903-1961).

A primeira solução não-estática da equação de Einstein foi obtida pelo matemático russo Aleksandr Friedmann (1888-1925) ao perceber que a consideração do termo cosmológico (caracterizado por  $\Lambda$ ) por parte de Einstein introduzia infinitos em sua equação, uma vez que, em certas situações, esse termo poderia ser nulo e Einstein havia dividido sua equação por esse mesmo termo. Em vista disso, Friedmann resolveu a equação Einsteiniana sem o termo cosmológico ( $\Lambda = 0$ ) e, ao assumir a hipótese de que a matéria homogênea do Universo se distribuía isotropicamente no espaço, encontrou duas soluções não-estáticas: em uma delas o Universo se expandia com o tempo e, na outra, se contraía. Esse resultado foi apresentado por ele em 1922 (*Zeitschrift für Physik* 10, p. 377). É oportuno notar que sobre a introdução de  $\Lambda$  por parte de Einstein e a sua não consideração por parte de Friedmann, há três manifestações de Einstein, depois da descoberta da lei de Hubble-Humason, que veremos mais adiante. A primeira seria a conversa que teve com o físico russo-norte-americano George Antonovich Gamow (1904-1968) (ex-aluno de Friedmann) na qual afirmou: *A introdução da constante cosmológica foi a maior besteira de minha vida*. A segunda, quando disse ao matemático alemão Hermann Weyl (1885-1955): *Se não há um mundo quase estático, então joguemos fora a constante cosmológica*. A terceira, quando em uma carta para Lemaître, escreveu: *Desde que introduzi este termo, eu sempre tive a consciência pesada... Não consigo acreditar que uma coisa tão feia seria real na natureza*.

A possibilidade teórica de um *Universo em expansão* prevista por Friedmann, começou a se tornar realidade devido aos trabalhos realizados pelo astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953). Com efeito, em dezembro de 1924, trabalhando com o novo telescópio *Hooker* do *Observatório de Monte Wilson*, Hubble estava examinando uma fotografia da *nebulosa (galáxia) de Andrômeda* (M31) [M, do catálogo preparado pelo astrônomo francês Charles Messier (1730-1817), em 1771]. Nesse exame, encontrou uma estrela do mesmo tipo existente em nossa nebulosa (galáxia), a *Via Láctea*. Continuando a estudar as nebulosas fora de nossa Galáxia, chegou a seguinte conclusão: *As galáxias são distribuídas no espaço de modo homogêneo e isotrópico*. Assim, pela primeira vez, a uniformidade do Universo não era colocada *a priori*, ela provinha de uma observação. Essas observações de Hubble foram publicadas em 1925 (*Astrophysical Journal* 62, p. 409) e em 1926 (*Astrophysical Journal* 63; 64, pgs. 236; 321).

Na continuação de suas observações, Hubble fez, em 1929 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* 15, p. 169), outra grande descoberta. Com efeito, ao observar cerca de 18 galáxias próximas de nossa Galáxia, percebeu que havia no espectro das mesmas um deslocamento para o vermelho (*red shift*). Interpretado esse deslocamento como devido ao efeito Doppler-Fizeau (vide verbete nesta série), o mesmo significava uma fuga das galáxias, em relação ao observador. Ao calcular a distância entre as várias galáxias, concluiu que (logo conhecida como Lei de Hubble): *As galáxias se afastam uma das outras com uma velocidade (V) proporcional à distância (D) que as separam*. A proporcionalidade ( $H_0$ ) entre V e H, traduzida pela expressão  $V = H_0 D$ , foi estimada por Hubble, ainda nessa ocasião, no valor de:  $H_0 \cong 500 \text{ km.s}^{-1}(\text{Mpc})^{-1} \cong 0.5 \times 10^9 \text{ anos}^{-1}$ . Como o inverso de  $H_0$  determina a idade do Universo, esse valor obtido por Hubble indicava ser de aproximadamente 2 bilhões de anos a idade do mundo. É oportuno destacar que, em suas observações, Hubble foi auxiliado pelo astrônomo norte-americano Milton La Salle Humason (1891-1972) que, antes de se tornar astrônomo, era mensageiro do *Hotel Monte Wilson*, que fornecia hospedagem para os astrônomos que visitavam o *Observatório de Monte Wilson* e, depois foi nomeado condutor de mulas desse Observatório. [Simon Singh, *Big Bang* (Record, 2006); Augusto Damineli, *Hubble: A Expansão do Universo* (Odysseus, 2003).] Como Hubble e Humason determinaram, em 1934 (*Astrophysical Journal* 74, p. 43), um novo valor para  $H_0 \cong 550 \text{ km.s}^{-1}(\text{Mpc})^{-1}$ , a lei de Hubble passou a ser também conhecida como a lei de Hubble-Humason e  $H_0$  como a constante de Hubble-Humason. Note-se que  $1 \text{ pc} = 1 \text{ parsec} = 3.0857 \times 10^{13} \text{ cm}$  e que  $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$ . Registre-se que, em 1952 (*Transactions of the International Astronomical Union* 8, p. 397), o astrônomo alemão Walter Baade (1893-1960) mostrou que as distâncias entre as galáxias eram duas vezes maiores das medidas por Hubble e Humason,

reduzindo portanto à metade o valor de  $H_0$  calculado por eles e, portanto, dobrando a idade do Universo. Por sua vez, em 1954 (*Astronomical Journal* 59, p. 180), o astrônomo norte-americano Allan Rex Sandage (n.1926) (aluno de Baade) aumentou aquela idade para 5,5 bilhões de anos. Note-se que, em 1994 (*Astrophysical Journal* 425, p. 14), Sandage e colaboradores (A. Saha, L. Labhardt, H. Schwengeler, F. D. Macchetto, N. Panagia e G. A. Tammann) encontraram  $H_0 \equiv 50 \text{ km.s}^{-1}(\text{Mpc})^{-1}$  usando observações do *Telescópio Espacial Hubble*, lançado em 24 de abril de 1990.

Sobre as observações de Hubble, é oportuno registrar quatro aspectos. O primeiro, refere-se ao fato de que as descobertas de Hubble colocaram um ponto final no Grande Debate que existia entre os astrônomos sobre a natureza das nebulosas. Com efeito, o *Observatório de Monte Wilson* era dominado por astrônomos que acreditavam que a *Via Láctea* era a única galáxia no Universo e que todas as nebulosas ficavam dentro dela, segundo a opinião do astrônomo norte-americano Harlow Shapley (1885-1972), Diretor do *Observatório de Harvard*. Por sua vez, o astrônomo norte-americano Heber Doust Curtis (1872-1942), que trabalhava no *Observatório Lick*, na Califórnia, defendia a hipótese de que as nebulosas são galáxias fora da *Via Láctea*. As descobertas de Hubble, além de mostrarem que Curtis tinha razão, indicavam uma forte evidência experimental sobre o início do Universo. Em vista disso, o Papa Pio XII [Eugenio Maria Giuseppe Giovanni Pacelli (1876-1958)], no discurso intitulado *As Provas da Existência de DEUS à luz da Moderna Ciência Natural*, proferido na *Academia Pontífice de Ciências*, em 22 de novembro de 1951, chegou a afirmar que Hubble havia provado que o Universo não era eterno, e sim criado por DEUS. O segundo aspecto, salientado pelo físico português João Carlos Rosa Magueijo (n.1967) (*Faster than the Speed of Light*, Perseus Publishing, 2002), relaciona-se com o telescópio usado por Hubble que era capaz de rodar em perfeita oposição à rotação da Terra, permitindo apontá-lo na mesma direção por horas a fio. Isto lhe permitiu desenvolver uma técnica revolucionária, qual seja, a de que, em vez de colocar um olho humano no foco de seu telescópio, Hubble colocou um filme fotográfico. Assim, longas exposições de filme fotográfico permitiram-lhe, com a ajuda de Humason, ver objetos muito mais tênues do que aquilo que poderia ver com o seu olho. O terceiro aspecto, me foi alertado pelo físico brasileiro André Koch Torres Assis (n.1962) que, em comunicação via e-mail, me informou que Hubble duvidou da recessão (expansão) das galáxias que havia descoberto pois, em textos posteriores passou a usar o termo “velocidade aparente-deslocamento” (entre aspas), indicando que, talvez, não houvesse uma velocidade real de afastamento das galáxias [Assis, A. K. T., *Apeiron* 12, p. 10 (1992)].

Por fim, o quarto aspecto está ligado à frustração de Hubble em não haver recebido o Prêmio Nobel de Física (PNF). Embora merecedor desse Prêmio pelas grandes contribuições que deu à Astronomia, por essa ocasião, o *Comitê Nobel de Física* (CNF) não considerava os astrônomos como físicos. Na esperança de que o CNF reconsiderasse essa posição, Hubble e sua esposa Grace contrataram os serviços de um agente publicitário que o fez aparecer na capa da revista *Time*, o que, no entanto, não foi suficiente para convencer aquele *Comitê*. Registre-se que o casal Hubble era amigo de muitos artistas de Hollywood e, por conta dessa amizade, em 1937, Hubble foi o convidado de honra do engenheiro e cineasta ítalo-norte-americano Frank Capra (1897-1991) na entrega do *Oscar* daquele ano. Como Hubble morreu no dia 28 de setembro de 1953, ele não soube que o CNF havia mudado, em segredo, suas regras para considerar os astrônomos como físicos e, por isso, iriam atribuir o PNF de 1953 para Hubble. Essa inconfidência foi informada a Grace Hubble por dois membros daquele Comitê: o físico italiano, o Nobelista (1938) Enrico Fermi (1901-1954) e o astrofísico indiano, o futuro Nobelista (1983) Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995). É oportuno registrar que o PNF de 1953 foi atribuído ao físico holandês Frits Zernike (1888-1966) pela invenção do microscópio de contraste de fase, e que os primeiros astrônomos a receber o PNF, em 1974, foram os ingleses Martin Ryle (1918-1984), pela descoberta dos quasars (1948) e Antony Hewish (n.1924), pela descoberta dos pulsars (1967). Mais detalhes sobre Hubble, ver: Singh, op. cit., e Daminieli, op. cit.

Depois dessa digressão sobre Hubble, voltemos aos modelos dos universos expansivos. Um deles foi formulado por Lemaître, em 1927 (*Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* 47A, p. 49). Contudo, nesse modelo, ele buscou uma solução intermediária que permitisse uma transição entre os modelos de Einstein e de de Sitter, ao considerar  $\Lambda = \Lambda_c$ , sendo  $\Lambda_c$  um valor crítico que corresponde a uma posição inicial de equilíbrio do Universo de Einstein e que, ao ser rompido, o mundo caminharia através de uma série contínua de estados intermediários, até o Universo de de Sitter. Assim, segundo Lemaître, o Universo teria começado a partir da explosão de um átomo primordial ou ovo cósmico que conteria toda a matéria do Universo. Observe-se que esse Modelo Cosmológico de Lemaître foi estudado pelo astrofísico inglês Arthur Stanley Eddington (1882-1944) (que havia sido professor de Lemaître, em Cambridge, Inglaterra), em 1930 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 90, p. 669), bem como pelo físico-químico-norte-americano Richard Chase Tolman (1881-1948), ainda em 1930 (*Proceedings of the National Academy of Sciences, Washington* 16, p. 582). O próprio Lemaître continuou realizando trabalhos com o seu modelo e que foram reunidos em seu famoso livro intitulado *L'Hypothèse de l'Atome Primitif* (Neuchâtel, Griffon, 1946).

O modelo cosmológico expansivo de Friedman-Lemaître, foi sintetizado por Robertson, em 1935 (*Astrophysical Journal* 82, p. 284) e 1936 (*Astrophysical Journal* 83, pgs. 187; 257) e, independentemente, pelo matemático inglês Arthur Geoffrey Walker (1909-2001), também em 1936 (*Proceedings of the London Mathematics Society* 42, p. 90), ao apresentarem a famosa métrica de Robertson-Walker. Desse modo, aquele modelo, dotado dessa métrica, indicava que o Universo havia começado pela explosão do “ovo cósmico Lemaîtreano”. Em vista disso, algumas questões foram então colocadas, principalmente a que se refere ao instante dessa explosão, bem como, a partir daí, como se formaram as galáxias do Universo, que ora contemplamos, com seus principais constituintes que são as estrelas. É oportuno registrar que, em 1949, o matemático austro-húngaro Kurt Gödel (1906-1978) apresentou uma nova solução da equação de Einstein na qual o Universo é infinito, sem tempo cósmico, estático (sem expansão) e giratório. Nesse Universo de Gödel, *um foguete pode viajar para qualquer região do passado, presente ou futuro e voltar atrás ...* [Gödel, IN: Paul Arthur Schilpp (Editor), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (Open Court, 1970).]

As questões discutidas até aqui sobre os modelos cosmológicos expansivos foram analisadas por Gamow. Com efeito, partindo da idéia da explosão inicial do Universo, apoiando-se na equação de Einstein e nas Leis da Termodinâmica, Gamow passou a elaborar o seu modelo cosmológico. Assim, em 1946 (*Physical Review* 70, p. 572), considerou que nos primeiros momentos, o Universo era bastante denso e muito quente, ocasionando rápidas reações termonucleares. Em 1948 (*Physical Review* 73, p. 803), em colaboração com seu aluno, o físico norte-americano Ralph Asher Alpher (n.1921), Gamow apresentou o seu famoso artigo no qual o “ovo cósmico Lemaîtreano” formado de nêutrons, no instante do big bang [nome cunhado, pejorativamente, pelo astrofísico inglês Sir Fred Hoyle (1915-2001), no último programa de rádio de uma série intitulada *The Nature of Things* que apresentou na *British Broadcasting Corporation* (BBC), em 1950], se desintegrou em prótons e elétrons. Ao serem formados esses prótons, alguns colidiram com nêutrons que ainda persistiam e, gradualmente, iam formando núcleos mais pesados da Tabela Periódica, num processo que ficou conhecido como nucleossíntese. É oportuno destacar que esse artigo também ficou famoso pelo senso de humor de Gamow, uma vez que persuadiu o físico germano-norte-americano Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) para também assiná-lo, com o objetivo de formar as três primeiras letras do alfabeto grego [alfa ( $\alpha$ ) (Alpher), beta ( $\beta$ ) (Bethe) e gama ( $\gamma$ ) (Gamow)], que combinavam bem com o propósito do artigo que era o de descrever o início do Universo! Em vista disso, esse modelo cosmológico ficou conhecido como modelo cosmológico  $\alpha\beta\gamma$ .

Nesse modelo  $\alpha\beta\gamma$ , seus autores fizeram a notável previsão de que a radiação (sob a forma de fótons) do início do big bang ainda deveria estar presente, com a única diferença que a temperatura inicial do Universo, agora, deveria apresentar um valor extremamente baixo, cerca de 25 K. Note-se que, antes, em 1946, o físico norte-americano Robert Henry Dicke (1916-1997), chefiando uma equipe do *Laboratório de Radiação* do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), encontrara o valor de 20 K, como limite superior para a temperatura de qualquer *radiação cósmica de fundo de microonda* - RCFM (“Cosmic Microwave Background” – CMB) extraterrestre e isotrópica. Nessa equipe, faziam parte os físicos norte-americanos Phillip James Edwin Peebles (n.1935), Peter Guy Roll e David Todd Wilkinson (1935-2002).

Ainda em 1948 (*Physical Review* 74, p. 1198), Alpher e o físico norte-americano Robert C. Herman (1922-1997), também colaborador de Gamow, encontraram para a RCFM um valor de aproximadamente 5 K. Por sua vez, em 1950 (*Progress in Theoretical Physics* 5, p. 224), o astrofísico japonês Chushiro Hayashi (n.1920) questionou o modelo  $\alpha\beta\gamma$  e apresentou a hipótese de que o Universo teria começado com números iguais de prótons e nêutrons, e que a conversão de nêutrons e prótons (e vice-versa) ocorreu principalmente pela colisão com pósitrons e elétrons, respectivamente. Em vista disso, em 1953 (*Physical Review* 92, p. 1347), Alpher e Herman (agora com a colaboração de J. W. Follin, Jr.) revisaram seu modelo e apresentaram um novo cálculo para o deslocamento do equilíbrio nêutron-próton. Em 1953 (*Astronomical Journal* 58, p. 39; *Science* 118, p. 570; *Matematisk-Fysiske Meddelelser Kongelige Danske Videnskabernes Selskab* 27, p. 1), Gamow encontrou um novo valor para a radiação de fundo, qual seja, o de aproximadamente 7 K. Note-se que Gamow chamava de *ylem* o material primordial do big bang.

A teoria da **nucleossíntese**, elaborada por Gamow e seus discípulos conforme vimos acima, apresentava uma grande dificuldade, qual seja, a explicação de como o hélio ( ${}^4\text{He}$ ) se convertera nos outros elementos químicos pesados nos momentos iniciais do big bang. Em seus trabalhos, eles mostraram que o acréscimo do núcleo do hidrogênio ( ${}^1\text{H}$ ) ao núcleo do  ${}^4\text{He}$  (partícula  $\alpha$ ) produziria o instável núcleo do lítio ( ${}^5\text{Li}$ ); a união de dois núcleos de  ${}^4\text{He}$  criaria um núcleo instável de berílio ( ${}^8\text{Be}$ ). A mesma dificuldade acontecia para criar um núcleo estável de carbono ( ${}^{12}\text{C}$ ) a partir da união do  ${}^4\text{He}$  com o  ${}^8\text{Be}$ . (Apostilas da Dona Fifi IN:<http://www.searadaciencia.ufc.com.br>.) Além do mais, suas previsões apresentavam resultados contraditórios. Por exemplo, conforme vimos, segundo a lei de Hubble-Humason a idade do Universo seria em torno de 2 bilhões de anos. Por outro lado, a Teoria da Radioatividade aplicada à desintegração dos elementos químicos,

principalmente a relação urânio/chumbo (U/Pb), indicava que algumas rochas terrestres tinham uma idade entre 2 e 6 bilhões de anos. Em vista disso, um novo modelo cosmológico foi apresentado, em 1948, em trabalhos independentes dos astrofísicos, o austro-inglês Sir Hermann Bondi (1919-2005) e o austro-norte-americano Thomas Gold (1920-2004) (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108, p. 252), e Hoyle (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108, p. 372), conhecido como modelo cosmológico de Bondi-Gold-Hoyle (BGH). Registre-se que, em 1961 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 123, p. 133) Hoyle e o cosmólogo indiano Jayant Vishnu Narlikar (n.1938), usaram o BGH para estudar estatisticamente a distribuição espacial das radiogaláxias.

Segundo o modelo BGH, na medida em que as galáxias se deslocam afastando-se umas das outras, de acordo com a lei de Hubble-Humason, novas galáxias estão em constante formação nos espaços entre elas, resultante de nova matéria que é continuamente criada. Portanto, *grosso modo*, o Universo pareceria o mesmo em todos os tempos, bem como em todos os pontos do espaço, segundo o princípio cosmológico perfeito proposto pelo cosmólogo inglês Edward Arthur Milne (1896-1950), em 1935, e que fora retomado por Gold para usar no artigo que fez com Bondi. No entanto, para que esse modelo cosmológico estacionário pudesse explicar a criação contínua da matéria, seus autores tiveram que introduzir modificações na Teoria da Relatividade Geral de Einstein (TGRE). Aliás, Milne já havia abandonado a TGRE ao criar, a partir de 1932, a Relatividade Cinemática, baseada na Geometria Pseudo-Euclidiana de Minkowski. (Milne, IN: Schilpp, op. cit.)

A dificuldade da **nucleossíntese** enfrentada pela teoria do big bang (e, também, pela BGH), foi resolvida por Hoyle. Vejamos como. Em 1953 (*Astrophysical Journal Supplement* 1, p. 121), Hoyle demonstrou que estados excitados (ressonâncias) do  $^{12}\text{C}$  (7,65 MeV acima do estado normal) teriam sua secção de choque aumentada e, por isso, o  $^{12}\text{C}$  poderia ser formado por intermédio de uma reação nuclear entre o  $^4\text{He}$  e o  $^8\text{Be}$ . Para essa conjectura, Hoyle usou o que hoje é conhecido como *princípio antrópico*: *Vemos o Universo do jeito que ele é porque existimos*. Ainda em 1953 (*Physical Review* 92, p. 649), D. N. F. Dunbar, R. E. Pixley, W. A. Wenzel e W. Whaling anunciaram que haviam encontrado o estado ressonante do  $^{12}\text{C}$  previsto teoricamente por Hoyle. Essa descoberta foi confirmada pelo astrofísico norte-americano William Alfred Fowler (1911-1995; PNF, 1983) e sua equipe do *Laboratório de Radiação Kellogg do California Institute of Technology (CALTECH)*. Desse modo, Hoyle havia resolvido o grande problema da **nucleossíntese**: o hélio se transformava em berílio e então em carbono. Assim, em um processo lento, bilhões de estrelas ao longo de bilhões de anos poderiam criar quantidades significativas de carbono. Mais tarde, em 1957 (*Science* 124, p. 611), Hoyle, Fowler e os astrofísicos ingleses Eleanor Margaret Burbidge (n.1922) e Geoffrey Ronald Burbidge (n.1925) apresentaram uma teoria sobre a *evolução estelar*, pela qual os elementos químicos são progressivamente sintetizados a partir dos mais leves até os mais pesados, por intermédio de reações nucleares. Esse trabalho [que se tornou conhecido apenas pelas iniciais de seus autores (B2FH)] ficou famoso e é hoje considerada uma das maiores contribuições para a Ciência do Século 20.

Muito embora a BGH tivesse sobrevivido a década de 1950, a descoberta experimental da RCFM, em 1964, fez com que essa teoria fosse abandonada. Vejamos como ocorreu essa descoberta. Vimos anteriormente que Dicke e colaboradores, assim como Gamow e colaboradores, nas décadas de 1940 e 1950, fizeram estimativas da RCFM. Em 1964, novas estimativas dessa radiação foram realizadas, independentemente, por Hoyle e Roger J. Tayler (*Nature* 203, p. 495), na Inglaterra, e pelo astrofísico russo Yakov Borisovich Zel'dovich (1914-1987), na Rússia. Ainda em 1964, Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson, na *Universidade de Princeton*, estavam tentando construir uma antena para detectar a radiação primordial do início do Universo, pois seus cálculos indicavam que a mesma estaria na faixa de ondas de rádio. No entanto, essa radiação já havia sido detectada acidentalmente, conforme veremos a seguir.

Utilizando uma antena de 20 pés que havia sido construída pela *Bell Telephone Laboratories* em Holmdel, New Jersey, nos Estados Unidos, os radioastrônomos, o alemão Arno Allan Penzias (n.1933; PNF, 1978) e o norte-americano Robert Woodrow Wilson (n.1936; PNF, 1978) mediram por intermédio dos satélites Echo e Telstar, microondas galácticas de 7,35 cm, em latitudes fora do plano da *Via Láctea*. Desse modo, em um certo dia de maio de 1964, descobriram que tais microondas eram independentes da direção apontada pela antena, isto é, eram isotrópicas. Continuando com suas observações, verificaram que as mesmas não recebiam variação sazonal e mais, correspondiam à temperatura de  $(3,5 \pm 1)\text{K}$ . Procuraram, então, possíveis fontes de erro no equipamento utilizado, mas foram totalmente incapazes de explicar o misterioso ruído que haviam detectado. Em vista dessa dificuldade, Penzias discutiu-a com seu amigo Bernard Burke do MIT. Este, então, sugeriu-lhe que contatasse com Dicke, já que seu outro colega Ken Turner, da *Carnegie Institution*, lhe dissera que ouvira Peebles pronunciar uma conferência na *Universidade John Hopkins*, na qual anunciou ser de aproximadamente 10 K a temperatura atual da radiação primordial. Desse modo, Penzias se reuniu com Dicke, e decidiram que escreveriam dois artigos anunciando essa fantástica descoberta: a detecção da radiação correspondente ao *big*

bang. Esses artigos foram publicados em 1965 no *Astrophysical Journal* 142, p. 414 (Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson) e *Astrophysical Journal* 142, p. 419 (Penzias e Wilson). Para maiores detalhes dessa descoberta, ver: Steven Weinberg, *Os Três Primeiros Minutos* (Guanabara Dois, 1980); e Singh, op. cit.

Muito embora a detecção da radiação primordial tenha dado bastante crédito ao modelo (teoria) do big bang (BB), este começou a ser contestado nas décadas de 1960 e 1970, em virtude de sua dificuldade em explicar quatro grandes problemas (“puzzles”). O primeiro deles, conhecido como *problema do horizonte* (“horizon puzzle”) [que já havia sido apontado pelo físico austro-norte-americano Wolfgang Rindler (n.1924), em 1956 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 116, p. 663)], refere-se à homogeneidade e isotropia do Universo, evidenciados nas características da radiação primordial referida acima. A dificuldade decorre do fato de que o BB sugere a existência de uma distribuição heterogênea, com muitas concentrações de matéria e energia no espaço, isto porque a luz emitida no instante do BB não teve tempo de alcançar todo o Universo, pois a grande expansão nos instantes iniciais, fez com que cerca de 90% dos fótons (*quanta* de luz) dessa expansão, estivessem além do horizonte causal do observador.

O segundo dos problemas, conhecido como *problema da planura* (“flatness puzzle”), foi originalmente apresentado por Dicke e Peebles, em 1979 (General Relativity: An Einstein Centenary Survey, Cambridge University Press), e diz respeito à densidade  $\Omega$  de massa do Universo, cujo valor, de acordo com o BB, é dado por:  $\Omega - 1 \propto t^{2n-1}$ , com  $n < 1$ . Assim, se  $\Omega < 1$ , a densidade de massa é insuficiente para deter a expansão, e o Universo continuará a expandir-se para sempre. Geometricamente significa dizer que o Universo é *aberto*, caracterizado por uma *geometria hiperbólica* ou *geometria de Lobachevski-Bólyai*. Se  $\Omega > 1$ , a expansão acabará, e o Universo presumivelmente colapsará em outra “bola de fogo” – o big crunch –, significando que ele é *fechado*, caracterizado por uma *geometria esférica* ou *geometria de Riemann*. Se  $\Omega = 1$ , então a expansão seguirá para sempre, e sempre diminuindo, mas sem chegar nunca a parar totalmente. Nessa situação, diz-se que o Universo é *plano*, caracterizado por uma *geometria plana* ou *geometria de Euclides*, e que seu equilíbrio é instável. Dada essa instabilidade, é surpreendente que dados experimentais indicam que:  $0,01 < \Omega < 10$ , valores esses que não permitem definir a geometria do Universo. Além do mais, para  $t = 1$  s após o BB,  $\Omega \neq 1$ , apenas por uma parte em  $10^{15}$ , resultado esse que o BB não explica. Para justificar porque  $\Omega \cong 1$  no começo do Universo, usa-se o *princípio antrópico de Hoyle*. Conforme veremos mais adiante, dados de 2006 indicam que  $\Omega = 1,024 \pm 0,015$ , o que significa dizer que a Geometria do Universo é praticamente Euclidiana.

O terceiro dos problemas enfrentados pela teoria BB relaciona-se com as *inhomogeneidades* (“inhomogeneity puzzle”) do Universo observável, composto de galáxias, aglomerados de galáxias e superaglomerados de galáxias, uma vez que, por aquela teoria, esse espectro de não-uniformidade deve ser considerado *ad hoc* no BB, como parte de suas condições iniciais. Por fim, o quarto problema tem haver com a produção de monopólos magnéticos (MM) na ocasião do início do Universo, daí esse problema ser conhecido como o *problema dos monopólos* (“monopole puzzle”). Conforme vimos no verbete sobre os MM, segundo a Teoria da Grande Unificação (TGU), o próton é uma partícula instável (vida média  $\approx 10^{31}$  anos) e tem o MM como um dos produtos de seu decaimento. Além do mais, a TGU prevê a produção de um número demasiadamente grande de MM, cerca de 100 vezes mais do que átomos e, no entanto, tais partículas ainda não foram observadas. Ainda segundo a TGU, a radiação de fundo atingiria a temperatura atual (da ordem de 3 K) passados apenas 30 mil anos após o BB, e não os supostos 10 ou 15 bilhões de anos já passados desde o início do mundo.

Para contornar os problemas apresentados pelo modelo (teoria) padrão BB descritos acima, acrescido da presença incômoda da constante cosmológica Einsteiniana ( $\Lambda$ ), os físicos, o russo Aleksandr A. Starobinsky (n.1950), em 1979 (*Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* 30, p. 719), e o norte-americano Alan Harvey Guth (n.1947), em 1981 (*Physical Review D* 23, p. 347), formularam o modelo cosmológico inflacionário, segundo o qual o Universo teria também começado com um BB, ocorrido entre 15 e 20 bilhões de anos atrás, porém, logo em seu começo sofreu um período de expansão muito acelerada, isto é, uma *inflação*, durante o qual o Universo passou do tamanho de um próton para o tamanho de uma uva (aumentou cerca de  $10^{50}$  vezes), durante o período de  $10^{-35}$  segundo contado a partir do BB. Esse modelo apresentou explicações para três dos problemas apontados acima. Com efeito, como o Universo teria sido muito maior no fim do período inflacionário do que o previsto pelo modelo padrão BB, o espaço seria muito mais achatado, o que explicaria o *problema da planura*. Por outro lado, por ser mais chato e liso o Universo na época da transição de fase entre a época inflacionária e o ritmo linear do Universo de hoje, produziram-se muito menos MM, o que resolveria o *problema dos MM*. Quanto ao *problema do horizonte*, o modelo cosmológico inflacionário de Starobinsky-Guth apresentou a seguinte explicação. Logo que o Universo se iniciou, sofreu um tipo de super-resfriamento, produzindo um “congelamento” das forças eletromagnética, fraca e forte, não havendo, portanto, a quebra dessa simetria (ocorrida depois de  $10^{-35}$  segundo contado a partir do BB) ocasionando então um estado instável, com

mais energia do que se a simetria fosse quebrada. Desse modo, quando ocorreu a fase inflacionária, quaisquer irregularidades do Universo foram simplesmente aplainadas, daí a sua homogeneidade e isotropia atuais. O estado mais energético do Universo referido acima, considerado como um estado de energia latente, chamado de campo de Higgs de valor zero (sobre esse campo, ver verbete nesta série), foi interpretado como se tivesse um efeito anti-gravitacional, e teria agido como a constante cosmológica Einsteiniana ( $\Lambda$ ). Nesse Universo mais energético, no qual a expansão fosse mais acelerada (pela ação de  $\Lambda$ ) do que retardada pela atração gravitacional, haveria tempo suficiente para a luz impregnar de informação todo o Universo.

Muito embora o modelo cosmológico inflacionário de Starobinsky-Guth tivesse contornado as dificuldades do modelo padrão BB, conforme vimos acima, aquele modelo apresentava um outro problema pois, se a fase de transição entre o Universo “super-resfriado” e o estado de expansão linear atual ocorresse subitamente, haveria a formação de “bolhas” (como ocorre no surgimento de cristais de gelo em qualquer água superfria) que se expandiriam gradualmente e se juntariam umas às outras, até a situação de expansão linear do Universo que perdura até hoje. Contudo, mesmo que as “bolhas” crescessem à velocidade da luz, estariam se afastando umas das outras e, portanto, nunca se juntariam. Essa dificuldade foi resolvida, em 1982, em trabalhos independentes realizados pelos físicos, o russo Andrei Dimitrievich Linde (n.1948) (*Physics Letters* B108, p. 398), e os norte-americanos Andréas Albrecht e Paul J. Steinhardt (n.1952) (*Physical Review Letters* 48, p. 1220), ao formularem o novo modelo cosmológico inflacionário, segundo o qual o fato de as “bolhas” não se juntarem poderia ser evitado se fossem tão grandes que nossa região do Universo estivesse toda contida numa única bolha. No entanto, para que isso ocorresse, a “quebra de simetria” deveria acontecer muito lentamente dentro da “bolha”, o que é perfeitamente possível de acordo com a TGU, por intermédio de um mecanismo denominado de transição de rolamento lento (“slow rolleyer transition”).

Como novos problemas foram encontrados nesse novo modelo cosmológico inflacionário como, por exemplo, o fato de que a “bolha” única deveria ser maior do que o Universo à época, conforme foi mostrado pelo astrofísico inglês Stephen William Hawking (n.1942) e seus colaboradores Ian G. Moss e John M. Stewart, em 1982 (*Physical Review* D26, p. 2681), e que as flutuações quânticas iniciais deveriam crescer mais do que o esperado, indicando um tempo de rolamento muito mais lento, o próprio Linde, em 1983 (*Physics Letters* B129, p. 177), apresentou o modelo cosmológico inflacionário caótico, no qual não há transição de fase ou super-resfriamento. A idéia central desse modelo consiste em supor uma distribuição inicial caótica de um *campo de bósons de Higgs*, cujas flutuações quânticas gerariam um estado de energia positiva [efeito gravitacional positivo (repulsivo), equivalente à constante  $\Lambda$ ] capaz de compensar a atração gravitacional negativa, de modo que a energia total do Universo seja completamente nula. É oportuno registrar que Linde, em 1974 (*Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* 19, p. 183), já havia apresentado a idéia de que um mecanismo similar ao *mecanismo de Higgs* (vide verbete nesta série) poderia produzir o efeito gravitacional positivo referido acima. Registre-se, também, que Hawking, em seu livro *Uma Breve História do Tempo* (Rocco, 1988), afirmou que o modelo inflacionário e suas variantes não explicam porque a configuração inicial do Universo não foi suficiente para produzir alguma coisa diferente da que vemos hoje e, desse modo, ele acredita que tal modelo está falido, restando apenas voltar ao princípio antrópico de Hoyle para base de sustentação daqueles modelos.

Aparentemente resolvido os principais problemas do modelo padrão BB por intermédio do modelo inflacionário e suas variantes, restou o problema da singularidade inicial prevista pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein, problema esse que apresenta uma grande dificuldade, já que na era de Planck – intervalo entre  $0$  e  $10^{-43}$  seg -, as leis da Física não se aplicam. Para contornar tal dificuldade, Hawking e o físico norte-americano Lee Smolin (n.1955), em trabalhos independentes e a partir da metade da década de 1970, realizam estudos sobre a quantização da gravitação, os quais, contudo, estão fora do contexto deste verbete. Note-se que, na era de Planck, as grandezas fundamentais – comprimento, massa e tempo - são assim definidos: Comprimento de Planck -  $l_p = h G/c^3 \approx 10^{-33}$  cm, Massa de Planck -  $m_p = (hc/G)^{1/2} \approx 10^{-5}$  g e Tempo de Planck -  $t_p = (G h/c^5)^{1/2} \approx 10^{-43}$  seg, onde  $h$  é a constante de Planck.

No final deste verbete, é oportuno apresentar mais alguns aspectos curiosos sobre os modelos cosmológicos tratados até aqui.

1) Por serem grandes divulgadores da Ciência, Gamow e Hoyle ganharam o *Prêmio Kalinga de Divulgação Científica da UNESCO*, respectivamente, em 1956 e 1967. Contudo, pelo que descrevemos até aqui, eles mereceriam o PNF.

2) Em 1973, o físico norte-americano Edward P. Tryon apresentou a idéia pioneira de que o nosso Universo teria se originado de uma flutuação quântica do vácuo. Segundo Guth, em seu livro intitulado *O Universo Inflacionário* (Campus, 1997), essa idéia foi inicialmente submetida à *Physical Review Letters*, que o rejeitou por

ser especulativo demais. Tryon então reescreveu o artigo original e o submeteu à *Nature* como uma “Carta ao Editor”. Os editores dessa revista não só o publicaram como o destacaram (*Nature* 246, p. 396). É interessante ressaltar que, em 1982 (*Physics Letters* B117, p. 25), o físico russo-norte-americano Alexander Vilenkin propôs uma ampliação dessa idéia de Tryon. Ele propôs que o Universo fosse criado por processos de tunelamento quânticos que começaram de literalmente nada (“nothingness”), o que significaria não só a ausência da matéria, mas também a do espaço e a do tempo. Registre-se que no livro de Guth referido acima há “Um Relato Irresistível de Uma das Maiores Idéias Cosmológicas do Século”, conforme indica o próprio sub-título desse livro. Nele, também, Guth conta toda a sua história como se tornou um cientista e suas “burrices” em não haver percebido o que os outros físicos perceberam sobre a sua idéia de *inflação*, idéia essa que ele mesmo escreveu em seu caderno de notas, como sendo uma REALIZAÇÃO ESPETACULAR, quando a concebeu no final de 1979.

3) Em 1977 (*Physical Review Letters* 39, p. 898), os físicos norte-americanos George Fitzgerald Smoot III (n.1945; PNF, 2006), M. V. Gorenstein e R. A. Muller anunciaram que haviam observado uma anisotropia da RCFM devido à velocidade da Terra, medida por um detector, construído por Smoot, que se encontrava a bordo do avião de reconhecimento *Lockheed-Martin* U-2, em 1976. Registre que esse avião ficou famoso por suas missões de espionagem durante a *Guerra Fria*.

4) Quando o PNF de 1983 foi atribuído a Fowler e a Chandrasekhar por suas contribuições ao entendimento da estrutura e evolução das estrelas, o mundo científico ficou surpreso porque o *Comitê Nobel de Física* (CNF) escolheu Fowler e não Hoyle, uma vez que foi este quem resolveu a questão da **nucleossíntese**, conforme vimos acima, importante para entender a formação dos elementos químicos nas estrelas e, também, por ser parceiro de Fowler no famoso artigo B2FH. Segundo nos conta o físico indiano-inglês Simon Singh (n.1964) em seu livro *Big Bang* (op. cit.), uma possível razão para o CNF haver esnobado Hoyle, deve-se ao fato de que este sempre se mostrou muito franco em suas atitudes, e não colocava o decoro acima da honestidade e da integridade. Uma dessas atitudes aconteceu quando o PNF de 1974 foi atribuído a Ryle, pela descoberta dos quasars (1948) e a Hewish (n.1924), pela descoberta dos pulsars (1967). Ele reclamou com veemência a ausência do nome da astrônoma irlandesa Susan Jocelyn Bell Burnell (n.1943), então colaboradora de Hewish na *Universidade de Cambridge*, na Inglaterra, por haver sido ela a primeira a observar, em agosto de 1967, o primeiro pulsar na *Nebulosa de Caranguejo*.

5) Em 1984 (*General Relativity and Gravitation* 16, p. 535), o físico brasileiro Mário Novello (n.1942) e Hans Heitzmann propuseram um novo modelo para explicar o Universo - o Dynamical Eternal Universe Scenario (DEUS) – que descreve um Universo aberto, tipo-Friedmann, eterno e sem singularidade, criado espontaneamente a partir da instabilidade de um estado de vácuo, instabilidade essa induzida pela interação deste vácuo com estruturas geométricas especiais, como o wist (estrutura da *geometria de Weyl* na qual as variações de comprimento são integráveis ao longo dos caminhos fechados), no começo da fase expansiva do Universo. Ainda segundo esse modelo, cujas primeiras idéias foram apresentadas por Novello, em 1982 (CBPF-CS-001/82), a matéria continua sendo criada no Universo, por intermédio da flutuação de imensos vazios no espaço-tempo, os chamados núcleos atrasados de matéria ou buracos brancos [conceito introduzido pelo astrofísico Roger Penrose (n.1931), que apresenta uma estrutura semelhante ao buraco negro (ver verbete nesta série), e possui um horizonte de eventos que permite a passagem no sentido oposto, isto é, de dentro para fora] e que, em vista disso, o Universo pode expandir-se e contrair-se entre o infinito passado e o infinito futuro sem, contudo, passar pela singularidade do início da criação. Nesse universo viscoso de Novello-Heintzmann, os problemas (“puzzles”) do modelo padrão BB não existem e, portanto, o Universo evolui estritamente de acordo com as leis da Física.

6) Em 18 de novembro de 1989, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) lançou o satélite chamado *Cosmic Background Explorer* (COBE) (“Explorador de Radiação Cósmica de Fundo”), para analisar minuciosamente a RCFM, e cujo projeto foi iniciado em 1974. Esse satélite levou três detectores de RCFM, construídos por equipes diferentes. Com efeito, o físico norte-americano Michael G. Hauser, liderou a construção do detector *Diffuse Infrared Background Experiment* (DIRBE) (“Experimento de Fundo Infravermelho Difuso”); o físico norte-americano John Cromwell Mather (n.1946; PNF, 2006) liderou a construção do detector *Far Infrared Absolute Spectrophotometer* (FIRAS) (“Espectrofotômetro Absoluto de Infravermelho Extremo”); e Smoot ficou com o *Differential Microwave Radiometer* (DMR) (“Radiômetro Diferencial de Microondas”), projetado especificadamente para medir variações da RCFM. Em 1990 (*Astrophysical Journal Letters* 354, p. L37), essa equipe do COBE anunciou que havia observado a RCFM correspondente a uma temperatura de corpo negro de **(2,728 ± 0,002) K**. Em 1992 (*Astrophysical Journal Letters* 396, pgs. L1; L7; L13), essa mesma equipe do COBE encontrou pequenas oscilações ( $\approx 30 \mu\text{K}$ ) na temperatura ( $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ ) da RCFM. Registre-se que o COBE completou sua missão científica no dia 23 de dezembro de 1993.

7) Em 1993 (*Astrophysical Journal* 410, p. 437), Hoyle, Geoffrey Burbidge e Narlikar desenvolveram o modelo cosmológico quase estacionário partindo de um Princípio de Mínima Ação, explicando então como a matéria e a radiação apareceram no Universo. Esse princípio inclui a possibilidade de uma linha-mundo (equivalente quadridimensional da trajetória tridimensional) típica de uma partícula ter um começo. Por intermédio de um campo escalar de criação, que atua negativamente no processo de mini-criação da matéria, ele contrabalança a energia positiva de criação. A mini-criação causa uma expansão no Universo, que reduz o valor médio daquele campo, tornando difícil uma nova mini-criação. A gravidade então atua superando a expansão e o Universo se contrai, aumentando aquele campo até que nova mini-criação ocorra. Segundo esse modelo, o Universo é eterno e infinito, alternando expansões que duram cerca de 40 bilhões de anos, com contrações. A massa é eternamente criada em buracos brancos e com o valor da *massa de Planck*.

8) Em 1995 (*Physical Review D* 52, p. 1837), Bharat Ratra e Peebles formularam o modelo cosmológico inflacionário aberto para explicar a origem do Universo. Nesse modelo, ao contrário de outras teorias de inflação que pressupõem uma quantidade grande de inflação, o novo tipo de inflação proposto - a *inflação aberta* - pode produzir um Universo com  $\Omega < 1$ . É interessante registrar que Peebles é autor da seguinte frase: *Se a inflação está errada, então DEUS desperdiçou um bom truque! A inflação é uma linda teoria. Contudo, existem muitas idéias lindas que a Natureza decidiu não usar, assim como não devemos nos queixar muito se estiver errada.* (Singh, op. cit.)

9) Em 1996 (*Physical Review Letters* 76, p. 2617), Magueijo, Albrecht, David Coulson e Pedro Ferreira apresentaram um modelo para explicar, sem usar modelos inflacionários, a anisotropia da RCFM registrada pelo COBE. Em 1999 (*Physical Review D* 59, p. 043516), Albrecht e Magueijo apresentaram o modelo VSL (“Varying Speed of Light”) para explicar os problemas (“puzzles”) cosmológicos referidos neste verbete. Sobre esse modelo ver o citado livro do Magueijo.

10) Em 30 de junho de 2001, a NASA lançou o satélite chamado *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) (“Sonda Anisotrópica de Microondas Wilkinson”), projetado para medir a RCFM numa resolução 35 vezes melhor do que a do COBE. Sua missão foi encerrada em setembro de 2003. Durante três anos a equipe do WMAP examinou os dados recebidos desse satélite e, em março de 2006, Charles L. Bennett [membro dessa equipe juntamente com David Spergel (n.1961) e Gary F. Hinshaw] anunciou que o nosso Universo tem a idade de **(13,73 ± 0,15)** bilhões de anos, que é composto de 23% de matéria escura, 73% de energia escura e 4% de matéria comum (hadronica). Além do mais, sua velocidade de expansão é de 21,8 km/s/milhão de anos-luz e sua densidade de massa crítica vale  $\Omega = 1,024 \pm 0,015$ , o que significa dizer que o nosso Universo possui uma Geometria praticamente Euclidiana e que se expandirá para sempre, sem a possibilidade de haver um big crunch.

Ao concluir este verbete destacaremos mais algumas referências (além das já usadas), nas quais o leitor poderá obter maiores detalhes dos modelos cosmológicos aqui tratados: George Cuncliffe McVittie, *General Relativity and Cosmology* (Chapman and Hall Ltd., 1965); Jacques Merleau-Ponty, *Cosmologia del Siglo XX* (Editorial Gredos, 1971); Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity* (John Wiley and Sons, 1972); Charles W. Misner, Kip S. Thorne and John Archibald Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman and Company, 1973); Ronaldo Rogério de Freitas Mourão, *O Universo Inflacionário* (Francisco Alves, 1983); Joseph Silk, *O Big Bang: A Origem do Universo* (EDUnB, 1985); Luís Carlos Bassalo Crispino, *Do Modelo Padrão do Big Bang à Teoria do Universo Inflacionário* (TIC/IFUSP, 1993); George Smoot e Keay Davidson, *Dobras no Tempo* (Rocco, 1995); John R. Gribbin, *No Início: Antes e Depois do Big Bang* (Campus, 1995); Richard Morris, *O Que Sabemos sobre o Universo* (Jorge Zahar, 2001); Brian Greene, *O Universo Elegante e Tecido do Cosmos* (Companhia das Letras, 2001; 2005); Lee Smolin, *Três Caminhos para a Gravidade Quântica* (Rocco, 2002); Thyrso Villela, Carlos Alexandre Wuensche e Rodrigo Leonardi, *Cosmologia Observacional (V Escola do CBPF, 2004)*; Maria Cristina Batoni Abdalla e Thyrso Villela Neto, *Novas Janelas para o Universo* (EDUNESP, 2005); Stephen Hawking e Leonard Mlodinow, *Uma Nova História do Tempo* (Ediouro, 2005); Mário Novello, *Cosmo e Contexto* (Forense-Universitária, 1988) e *O Que é Cosmologia? A Revolução do Pensamento Cosmológico* (Jorge Zahar, 2006); William H. Kinney, Edward W. Kolb, Alessandro Melchiorri e Antonio Riotto, *Physical Review D* 74, p. 023502 (2006) e [arXiv.org/abs/astro-ph/06053358](http://arXiv.org/abs/astro-ph/06053358); Ruben Aldrovandi, [arXiv.gr-qc/0405104](http://arXiv.gr-qc/0405104); Sabino Matarrese, Melchiorri e Riotto, *Scientific American BRASIL*, 61 (Junho/2007), p. 26; e [map.gsfc.nasa.gov/index.html](http://map.gsfc.nasa.gov/index.html).

