



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Modelos do Universo: Inflacionários e Alternativos.

Em verbetes desta série, vimos que o **Modelo do Big Bang** (MBB) (1927/1948) apresentava alguns problemas (“puzzles”): 1) *problema do horizonte*; 2) *problema da planura*; 3) *problema dos monopolos magnéticos* (MM), acrescido da presença incômoda da constante cosmológica einsteniana (Λ). Assim, os físicos, o russo Aleksandr A. Starobinsky (n.1950), em 1979 (*Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **30**, p. 719), e o norte-americano Alan Harvey Guth (n.1947), em 1981 (*Physical Review* **D23**, p. 347), formularam o **Universo 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} segundos 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 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 **Universo Cosmológico Inflacionário de Starobinsky-Guth** (MCIS-G) 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} segundos 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 (**problema do horizonte**). O estado mais energético do Universo referido acima, considerado como um estado de energia latente, chamado de **campo (ϕ) de bósons Higgs de valor zero**, foi interpretado como se tivesse um efeito antigravitacional – o **inflaton** -, e teria agido como o Λ . Nesse Universo mais energético, no qual a expansão fosse mais acelerada (pela ação de Λ) do que retardada pela atração gravitacional haveria tempo suficiente para a luz impregnar de informação todo o Universo.

Antes de prosseguir, é interessante registrar o significado dos MM e do **campo de Higgs** (CH). Em verbe de esta série, vimos que o MM foi postulado pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1931 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A133**, p. 60), para tornar as equações de Maxwell todas não-homogêneas, ou seja, com fontes de carga elétrica (monopolo elétrico) e de carga magnética (MM). O CH foi proposto, em 1964, e independentemente, pelos físicos, o inglês Peter Ware Higgs (n.1929)

(*Physics Letters* **12**, p. 132; *Physical Review Letters* **13**, p. 508), os belgas François Englert (n.1932) e Roberto Brout (n.1928) (*Physical Review Letters* **13**, p. 321), e G. S. Guralnik, C. R. Hagen e o indo-inglês Thomas Walter Bannerman Kibble (n.1932) (*Physical Review Letters* **13**, p. 585), como um mecanismo responsável pela massa das partículas.

Muito embora o MCIS-G tivesse contornado as dificuldades do BB, segundo vimos acima, esse modelo apresentava 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. 389), e os norte-americanos Andréas J. Albrecht (*Physics Letters* **B129**, p. 177) e Paul J. Steinhardt (n.1952) (*Physical Review Letters* **48**, p. 1220), ao formularem o **novo modelo cosmológico inflacionário** (NMCI), 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 o mecanismo denominado de **transição de rolamento lento** (*slow rolleyer transition*), estudado na Teoria da Grande Unificação (TGU), desenvolvida entre 1971 e 1974, para unificar as interações: eletromagnética, fraca e forte (vide verbete nesta série).

Novos problemas foram encontrados no NMCI 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 1983 (*Physical Review* **D26**, 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 **Universo Cosmológico Inflacionário Caótico**, no qual não há transição de fase ou super-resfriamento. A ideia central desse modelo consiste em supor uma distribuição inicial caótica de um **campo (φ) de bósons de Higgs**, cujas flutuações quânticas gerariam um estado de energia positiva [efeito gravitacional positivo (repulsivo), equivalente à constante Λ] capaz de compensar a atração gravitacional negativa, de modo que a energia total do Universo seja **completamente nula**. Em 1989 (*Physical Review Letters* **62**, p. 376; 1066), Daile La e Steinhardt propuseram outra versão da **Cosmologia Inflacionária**, denominada **inflação estendida** (IE), que diferia dos dois modelos anteriores, **nova inflação** (NI) e **inflação caótica** (IC), sobretudo como a **inflação** termina. Por exemplo, o fim da NI era semelhante ao da IC. Contudo, o fim da IE é parecido com o MCIS-G, ou seja: muitas “bolinhas” de matéria normal se formariam no meio do falso vácuo, bem ao estilo da ebulição da água. Mais tarde, em 1994 (*Physical Review* **D49**, p. 748), Linde mostrou que a **inflação híbrida** completaria a **inflação caótica**. Registre-se que Hawking afirmou que o **modelo inflacionário** e suas variantes não explicam o Universo porque sua configuração inicial 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** (Vemos o Universo do jeito que ele é porque existimos) para base de sustentação daqueles modelos.

Dificuldades com os **modelos cosmológicos do Universo** descritos até aqui levaram ao desenvolvimento de **modelos alternativos**, dos quais, destacamos:

1) Em 1979, apareceram as primeiras propostas de **Universos Sacolejantes** (*Bouncing Universes*) que não consideram o Universo como tendo um começo (caso do BB), e sim, propõem um Universo **sacolejante** (*bouncing*) que passou por um ponto de volume mínimo. Os dois primeiros desses modelos foram apresentados pelos cosmólogos, os russos Vitaly N. Melnikov e S. V. Orlov (*Physics Letters A70*, p. 263), tendo campos escalares, com quebra espontânea de simetria, como fontes, e os brasileiros Mário Novello (n.1942) e José Martins Salim (n.1951) (*Physical Review D20*, p. 377), tendo fótons não lineares como fontes. Esse tipo de **Universo Eterno** se caracteriza por apresentar um volume mínimo, mas não nulo e, portanto, uma energia (E) máxima, mas não infinita ($E = \infty$) como prevê o MBB, pois, segundo este modelo, no começo do Universo, o volume era nulo e o tempo também nulo ($\Delta t=0$), acarretando, pelo **Princípio da Incerteza de Heisenberg** (1927) – $\Delta E \Delta t \approx h$ – que $\Delta E = \infty$.

2) Em 1983 (*Astrophysical Journal 270*, p. 365), o físico israelense Mordehai Milgrom (n.1946) propôs a MOND (*Modified Newtonian Dynamics*), uma modificação da gravitação newtoniana, ou seja, esta só vale até um determinado limite da aceleração: $a_0 \sim 10^{-8} \text{ cm/s}^2$. Assim, quando $g \ll a_0$, a força de Newton passa a ser proporcional ao quadrado da aceleração ($F \propto a^2$). Observe-se que, em 2004 (*arXiv:astro-ph/0403694v1*, 30 March), o físico israelense Jacob David Bekenstein (n.1947) (de origem mexicana) desenvolveu a versão relativística da MOND, introduzindo três diferentes campos no espaço-tempo para substituir o campo gravitacional.

3) Em 1984 (*General Relativity and Gravitation 16*, p. 535), Novello e Hans Heintzmann propuseram um novo modelo para explicar o Universo - o **Dynamical Eternal Universe Scenario** (DEUS) – que descreve um Universo **aberto**, tipo-Friedmann (ver verbete nesta série), 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 ideias 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**, 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 MBB não existem e, portanto, o raio do Universo evolui estritamente de acordo com as leis da Física, e sua equação é dada por. $\dot{R}(t)/R(t) = H_0 \rightarrow R(t) = \exp(H_0 t)$.

4) Em 1993 (*Astrophysical Journal 410*, p. 437) e em 1994 (*Astronomy and Astrophysics 289*, p. 729; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 267*, p. 1007), os astrofísicos, os ingleses Sir Fred Hoyle (1915-2001), Geoffrey Roland Burbidge (1925-2010) e o indiano Jayant Vishu Narlikar (1938-2010) desenvolveram o **Universo 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** (M_P). Note-se que $M_P = 10^{-5}$ g, compõe os parâmetros de Planck: **comprimento de Planck** ($l_P = \sqrt{\hbar G/c^3} = 10^{-33}$ cm) e **energia de Planck** ($M_P c^2 = \sqrt{\hbar c^5/G} = 10^{19}$ GeV), onde c é a velocidade da luz no vácuo.

5) Em 1995 (*Physical Review* **D52**, p. 1837), Bharat Ratra e o físico norte-americano Phillip James Edwin Peebles (n.1935) formularam o **Universo 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 em que a relação entre a densidade real e a densidade crítica do Universo (Ω_0) é menor do que um ($\Omega_0 < 1$). 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 ideias lindas que a Natureza decidiu não usar, assim como não devemos nos queixar muito se estiver errada.*

6) Em 1996 (*Physical Review Letters* **76**, p. 2617), o astrofísico português João Carlos Rosa Magueijo (n.1967), Albrecht, David Coulson e Pedro Ferreira apresentaram um modelo para explicar, sem usar modelos inflacionários, a anisotropia da **radiação cósmica de fundo de microonda** (RCFM) registrada pelo satélite *Cosmic Background Explorer* (COBE) (*Explorador da Radiação Cósmica de Fundo*), lançado em 18 de novembro de 1989, pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Note-se que, em 1999 (*Physical Review* **D59**, p. 043516), Albrecht e Magueijo apresentaram o **Universo VSL** (*Varying Speed of Light*) para explicar os problemas (*puzzles*) cosmológicos referidos acima.

7) Segundo vimos em verbete desta série, em 1998 (*Astronomical Journal* **116**, p. 1009), Adam G. Riess (n. 1970; PNF, 2011), Alexei V. Filippenko, Peter Challis, Alejandro Clocchiatti, Alan Diercks, Peter M. Garnavich, Ron L. Gilliland, Craig J. Hogan, Saurabh Jha, Robert P. Kirshner, B. Leibundgut, Mark M. Phillips, David Reiss, Brian P. Schmidt (n.1967; PNF, 2011), Robert A. Schommer, R. Chris Smith, J. Spyromilio, Christopher Stubbs, Nicholas B. Suntzeff e John L. Tonry, componentes do projeto *High-z Supernova Search Team* (H-zSST) (*Equipe de Procura de Supernova de Alto-z*), ao observarem uma supernova do tipo Ia (SN-Ia), deduziram estar o Universo em expansão acelerada e, portanto, havia a necessidade de usar **Λ** para explicar essa aceleração. Em 1999 (*Physical Review* **D60**, p. 081301), Dragan Huterer e Michael S. Turner (n.1949) usaram, pela primeira vez, o termo **energia escura** (EnE ou DE: *dark energy*) para explicar essa aceleração inesperada do Universo, confirmada logo depois, em 1999, pelo projeto H-zSST (*Astronomical Journal* **117**, p. 707), e, independentemente, pelo *Supernova Cosmology Project* (SCP) ("Projeto de Cosmologia de

Supernovas”) composto por Saul Perlmutter (n.1959; PNF, 2011), G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, P. G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, A. Goodbar, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, J. C. Lee, N. J. Nunes, R. Pain, C. R. Pennypacker, R. Quimby, C. Lidman, R. S. Ellis, M. Irwin, R. G. McMahon, P. Ruiz-Lapuente, N. Walton, B. Schaefer, B. J. Boyle, Filippenko, T. Matheson, A. S. Fruchter, N. Panagia, H. J. M. Newberg e W. J. Couch (*Astrophysical Journal* **517**, p. 565).

8) Também em 1998 (*Physical Review* **D58**, a.n. 023501), os físicos, o norte-americano John Richard Gott III (n.1947) e o chinês Li-Xin Li investigaram a possibilidade de o Universo se autocriar. Registre-se que, antes, em 1994 (*Physical Review* **D50**, a.n. R6037), Li havia mostrado que a explosão do **vácuo quântico** poderia ser impedida colocando uma esfera reflexiva entre as “bocas” de um **buraco de minhoca** (*worm hole*) (vide verbete nesta série). Em 1999 (*Physical Review* **D59**, a.n. 123513), P. F. González-Díaz investigou a estabilidade do **Universo Autocriador de Gott III-Li**.

9) Em 2001 (*arXiv:astro-ph/0108103v1*, August), Turner propôs um novo **Modelo Cosmológico** tendo a **Equação de Einstein** (EE) (ver verbete nesta série) como base - por ser a causa da expansão acelerada do Universo, observada em 1998 - e caracterizado por: 1) O Universo está acelerando e sua geometria é plana; 2) Houve uma **inflação** no início da formação da Universo; 3) As inhomogeneidades da densidade do Universo decorrem das flutuações quânticas durante a inflação; 4) A composição do Universo é de $\sim 2/3$ de energia escura, $\sim 1/3$ de matéria escura [esta foi pela primeira vez observada pelo astrônomo búlgaro-suíço-norte-americano Fritz Zwicky (1898-1974), em 1937 (*Astrophysical Journal* **86**, p. 217)] e $1/200$ de estrelas brilhantes; 5) o conteúdo de matéria do Universo é de: $(29 \pm 4)\%$ de matéria escura fria; $(4 \pm 1)\%$ de matéria hadrônica conhecida (elétrons, prótons, nêutrons etc.); $\sim 0,3\%$ de neutrinos. Ainda nesse artigo, Turner afirma que a EnE, por ser de natureza difusa e se tratar de um fenômeno de baixa energia, não pode ser produzida em aceleradores de partículas e, portanto, o laboratório natural - e talvez único - para observá-la é o próprio Universo.

10) Em 30 de junho de 2001, a NASA lançou o satélite *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, cuja missão fora encerrada em 23 de dezembro de 1993). A missão do WMAP foi encerrada em setembro de 2003. Durante três anos a equipe do WMAP examinou os dados por ele enviados e, em março de 2006 [*Astrophysical Journal Supplement* **170**, p. 377 (2007)], essa equipe [David N. Spergel (n.1961), R. Bean, O. Doré, M. R.olta, Charles L. Bennett (n.1956), J. Dunkley, Hinshaw, N. Jarosik, E. Komatsu, L. Page, H. V. Peiris, L. Verde, M. Halpern, R. S. Hill, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, N. Odegard, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack e E. L. Wright] anunciou que o nosso Universo tem a idade de $(13,73 \pm 0,15)$ bilhões (10^9) de anos, que é composto de 23% de **matéria escura** (ME), 73% de **energia escura** (EnE) e 4% de matéria hadrônica conhecida (elétrons, prótons, nêutrons etc.). Além do mais, sua velocidade de expansão é de 21,8 km/s, por milhão de anos-luz, e sua densidade de massa crítica vale $\Omega_0 = 1,024 \pm 0,015$, o que significa dizer que o nosso Universo possui uma **geometria praticamente euclidiana** (observada desde 2000) e que se expandirá para sempre, sem a possibilidade de haver um **big crunch**. Note-se que, para explicar a ME e a EnE, foi necessário resgatar o Λ com outro significado físico, qual seja: $\rho_{\text{vac}} = \epsilon_{\text{vac}}$, sendo ρ_{vac} a **densidade de energia**

do **vácuo quântico**, e acrescentou-se ao segundo membro da EE, ou seja: $G_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)(T_{\mu\nu} + p_{\mu\nu} g_{\mu\nu})$, onde $G_{\mu\nu}$ é o **tensor de Einstein**, $T_{\mu\nu}$ é o **tensor energia-matéria**, $g_{\mu\nu}$ é o **tensor métrico**, G é a **constante de gravitação de Newton-Cavendish**, c é a **velocidade da luz no vácuo**, e $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$.

11) Em 2006 (*arXiv:astro-ph/0608407v1*, August; *Astrophysical Journal* **648**, p. L109), os astrônomos Douglas Clowe, Marusa Bradac, Anthony H. Gonzalez, Maxim Markevitch, Scott W. Randall, Christine Jones e Dennis Zaritsky estudaram o resultado da colisão entre dois aglomerados de galáxias, ocorrida há cerca de 100 milhões de anos. O resultado final dessa colisão deu origem ao aglomerado conhecido como **Projétil (bullet)** – 1E0657-556, considerado como uma **prova empírica direta da existência da matéria escura**. Para maiores detalhes dessa descoberta, ver: SPACE.com (23 de agosto de 2006) e *Ciência Hoje* **39 (231)** (outubro de 2006).

12) Em abril de 2009, foi lançado o satélite *Planck Surveyor* pela *European Spacial Agence* (ESA) (“Agência Espacial Européia”) cujas novas observações espaciais mostrarão se há ou não necessidade de modificar a **Cosmologia Newtoniana/Einsteiniana**.

13) Em janeiro de 2010 (*arXiv:hep-th/1001.0785v1*), Erik Verlinde propôs uma origem entrópica para a **gravitação newtoniana/einsteiniana**.

14) Em julho de 2010 (*arXiv:physics.gen-ph/1007.1750v1*), Wun-Yi Shu propôs **Universos Cosmológicos Sem Big Bang**, que são caracterizados por quatro aspectos: I) a velocidade da luz (c) e a constante gravitacional (G) não são constantes e variam com a evolução do Universo; II) o tempo não tem começo e nem fim; III) a secção espacial do Universo é uma 3-esfera; IV) o Universo experimenta fases de aceleração e de desaceleração.

Concluindo este verbete, registre-se que melhores detalhes dos temas nele tratados, podem ser vistos nos seguintes textos: Stephen Hawking, **Uma Breve História do Tempo** (Rocco, 1988); George Smoot e Keay Davidson, **Dobras no Tempo** (Rocco, 1995); Alan H. Guth, **O Universo Inflacionário** (Campus, 1997); Halton C. Arp, **O Universo Vermelho** (Perspectiva, 2001); Brian Greene, **O Universo Elegante e Tecido do Cosmos** (Companhia das Letras, 2001/2005); Stephen Hawking e Leonard Mlodinow, **Uma Nova História do Tempo** (Ediouro, 2005); João Carlos Rosa Magueijo, **Faster than the Speed of Light** (Perseus Publishing, 2002); Mário Novello, **O Que é Cosmologia? A Revolução do Pensamento Cosmológico** (Jorge Zahar, 2006); José Maria Filardo Bassalo, **Curiosidades da Física 1, 4, 5, 6** (Fundação Minerva, 2007; 2010, 2011, 2012); Mário Novello e Santiago Bergliaffa, **Bouncing Cosmologies** (*Physics Reports* **463**, Número 4, Julho de 2008); Alexandre Cherman e Bruno Rainho Mendonça, **Por que as coisas caem?** (Zahar, 2009); Timothy Clifton e Pedro G. Ferreira, **Existe mesmo uma Energia Escura?** (*Scientific American Brasil* **85**, p. 30, Junho de 2009); Mário Novello, **Do Big-Bang ao Universo Eterno** (Jorge Zahar, 2010); Stephen Hawking e Leonard Mlodinow, **The Grand Design** (Bantam Books, 2010).



ANTERIOR

SEGUINTE