



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br



Matéria e Energia Escuras e o Gás de Chaplyin.

Segundo vimos em verbetes desta série, entre 1924 e 1926, o astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953) realizou, no *Observatório de Monte Wilson*, observações que o levaram a afirmar que o Universo estava em expansão. Em vista disso, em 1927, o astrônomo belga, o Abade Georges-Henri Edouard Lemaître (1894-1966) formulou um modelo cosmológico segundo o qual o Universo teria começado a partir da explosão de um **átomo primordial** ou **ovo cósmico** que conteria toda a matéria do Universo [Georges Lemaître, *L'Hypothèse de l'Atome Primitif* (Neuchâtel, Griffon, 1946)]. Em 1948, os físicos norte-americanos Ralph Asher Alpher (1921-2007), Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) (de origem alemã) e George Antonovich Gamow (1904-1968) (de origem russa) formularam o **modelo alfa-beta-gama** ($\alpha\beta\gamma$) que previa que a “big explosão lemaîtreana” [denominada, em 1950, de **big bang** pelo astrofísico inglês Sir Fred Hoyle (1915-2001)] teria deixado um *rastro térmico* (calculado em torno de 20 K), a chamada **radiação cósmica de fundo de microonda** (RCFM), que foi detectada, em 1965, pelos radioastrônomos norte-americanos Arno Allan Penzias (n.1933; PNF, 1978) (de origem alemã) e Robert Woodrow Wilson (n.1936; PNF, 1978) com uma temperatura correspondente a $(3,5 \pm 1)$ K. Contudo, esse **modelo (teoria) do big bang** (MBB ou TBB) apresentava uma série de problemas que, no entanto, foram tratados com novos modelos, principalmente os chamados **modelos cosmológicos inflacionários**, nas décadas de 1970 e 1980. Registre que o M(T)BB teve um grande suporte teórico com a demonstração feita pelos cosmólogos ingleses Stephen William Hawking (n.1942) e Roger Penrose (n.1931), em 1969 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A314**, p. 529) demonstraram que, de acordo com a Teoria da Relatividade Geral Einsteiniana, é inevitável que haja uma singularidade (infinito) no M(T)BB. [Para uma discussão desses problemas, ver: George Smoot e Keay Davidson, **Dobras no Tempo** (Rocco, 1995); Alan Harvey Guth, **O Universo Inflacionário** (Campus, 1997); Brian Greene, **O Tecido do Cosmo: O espaço, o tempo e a textura da realidade** (Companhia das Letras, 2005); Simon Singh, **Big Bang** (Record, 2006); José Maria Filardo Bassalo no site www.searadaciencia.ufc.br/curiosidadesdafisica].

Em 1988, C. Wetterich (*Nuclear Physics* B302, p. 668) e, independentemente, Bharat Ratra e o físico canadense Phillip James Edwin Peebles (n.1935) (*Physical Review* D37, p. 3406) anunciaram que haviam observado, nas galáxias, uma larga fração de um componente de matéria fracamente empilhada (“clustered weakly”) com **pressão negativa**, confirmando a observação realizada, em 1937, pelo astrônomo búlgaro-suíço-norte-americano Fritz Zwicky (1898-1974) no **aglomerado Coma**. Essa **pressão negativa** indicava uma espécie de “repulsão gravitacional” que havia sido introduzida pelo físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), em 1917, e denominada por ele de **termo cosmológico** ($\Lambda g_{\mu\nu}$), colocado *ad hoc* em sua célebre equação de 1915, conforme se pode ver pela expressão: $G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = -KT_{\mu\nu}$, onde $g_{\mu\nu}$ é o **tensor métrico de Riemann**, $G_{\mu\nu}$ é o **tensor de Einstein**, $T_{\mu\nu}$ é o **tensor energia-matéria** e K é a **constante de gravitação**

de Einstein. Contudo, nessa equação, $\Lambda g_{\mu\nu}$ tem um significado geométrico (ver verbete nesta série). Porém, para explicar a **pressão negativa** houve necessidade de reinterpretar esse **termo cosmológico einsteiniano** com um outro significado físico, qual seja: $\rho_{\text{vac}} g_{\mu\nu}$, sendo ρ_{vac} a **densidade de energia do vácuo quântico**, e acrescentou-se ao segundo membro da **Equação de Einstein**, vista acima, tornando-se: $G_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4) (T_{\mu\nu} + \rho_{\text{vac}} g_{\mu\nu})$. Essa “**matéria estranha**” é hoje conhecida como **matéria escura (ME ou DM – “dark matter”)**.

Com o objetivo de estudar minuciosamente a RCFM, prevista pelo M(T)BB, conforme vimos acima, a *National Aeronautics Space Administration* (NASA) lançou, em 18 de novembro de 1989, o satélite chamado *Cosmic Background Explorer* (COBE) (“Explorador de Radiação Cósmica de Fundo”), cujo projeto foi iniciado em 1974. Esse satélite levou três detectores da 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 o físico norte-americano George Fitzgerald Smoot III (n.1945; PNF, 2006) ficou com o *Differential Microwave Radiometer* (DMR) (“Radiômetro Diferencial de Microondas”), detectores esses projetados especificadamente para medir variações da RCFM. [Registre que, em 1977 (*Physical Review Letters* **39**, p. 898), Smoot III, M. V. Gorenstein e R. A. Muller já haviam detectado uma anisotropia da RCFM devido ao movimento da Terra]. Em 1990 (*Astrophysical Journal Letters* **354**, p. L37), a equipe de astrofísicos norte-americanos do COBE [Mather, Edward S. Cheng, Robert E. Eplee Junior, Richard B. Isaacman, Stephan S. Meyer, Richard A. Shafer, Rainer Weiss, Edward L. Wright, Charles L. Bennett, Nancy W. Boggess, Eliahu Dwek, Samuel Gulkis, Michael G. Hauser, Michael Janssen, Thomas Kelsall, Philip M. Lubin, Samuel H. Moseley Junior, Thomas L. Murdock, Robert F. Silverberg, Smoot III e David Todd Wilkinson (1935-2002)] anunciou que havia observado a RCFM correspondente a uma temperatura de corpo negro de $(2,728 \pm 0,002) \text{K}$. Em 1992 (*Astrophysical Journal Letters* **396**, p. L1; L7; L13), três equipes do COBE encontraram pequenas oscilações ($\approx 30 \mu\text{K}$) na temperatura da RCFM: $\Delta T/T \approx 10^{-5}$. Além dos astrofísicos do COBE citados anteriormente (excluindo: Eplee Junior, Dwek, Isaacman e Shafer), participaram desses trabalhos: J. Aymon, G. Deamici, G. Hinshaw, P. D. Jackson, E. Kaita, P. Keegstra, C. Lineweaver, K. Loewenstein, L. Rokke e L. Tenorio. Registre-se que o COBE completou sua missão científica no dia 23 de dezembro de 1993.

Na década de 1990 vários resultados (teóricos e experimentais) foram realizados no sentido de entender o nosso Universo. Com efeito, logo em 1991 (*Astrophysical Journal* **379**, p.52), Simon D. M. White e Carlos S. Frenk escreveram um artigo no qual registraram haver observado que, no **aglomerado Coma**, a massa das galáxias desse aglomerado (“cluster”) era constituída de 30% de bárions (prótons e nêutrons), valor esse muito maior do que o calculado pelo M(T)BB. Para explicar essa “**massa estranha**” (ME), em 1993 (*Astrophysical Journal* **416**, p. 1), A. Klypin, J. Holtzman, J. R. Primack e E. Regös desenvolveram um modelo, segundo o qual 70% dela são compostas de partículas que interagem fracamente (WIMP – “weak interacting massive particles”, com massa de aproximadamente 50 vezes a massa do próton, isto é: $50 m_p$) e os 30% restantes consistem de uma espécie de “neutrinos estéreis massivos”. [Lembrar que na Teoria do Modelo Padrão das Partículas Elementares, o neutrino não tem massa, e são de três tipos: eletrônico (ν_e), muônico (ν_μ) e tautônico (ν_τ) (vide verbete nesta série)]. Esse modelo envolvendo “neutrinos estéreis” foi confirmado, em 1994 (*Astronomy and Astrophysics* **284**, p. 703), por Y. P. Jing, H. J. Mo, G. Börner e L. Z. Fang e, em 1995 (*Physical Review Letters* **74**, p. 2160), Primack, Holtzmann, Klypin e D. O.

Caldwell admitiram que esses neutrinos têm massa de $\approx 2,4 \text{ eV}/c^2$. Nova evidência da ME foi encontrada ainda em 1995, por J. Frieman, C. T. Hill, A. Stebbins e Ioav Waga (*Physical Review Letters* **75**, p. 2077) e, independentemente, por Patrick Petitjean, Jan Mucket e Ronald Kates (*Astronomy and Astrophysics* **295**, p. L8). Também em 1995 (*Astrophysical Journal Letters* **438**, p. L17), Adam G. Riess, W. H. Press e Robert P. Kirshner estudaram o movimento de um grupo de estrelas, o chamado **grupo local**, usando as formas das curvas de luz (lente gravitacional, que provoca o desvio da luz que passa próximo de uma determinada massa gravitacional) da supernova do tipo Ia (SN-Ia) (esta é resultante de uma violenta explosão de uma estrela anã-branca, estrela essa que resulta do resíduo de uma estrela que completou o ciclo de vida normal e, portanto, acabou a fusão nuclear que a alimentava). Em 1996 (*Astrophysical Journal* **472**, p. 153), Reinhard Genzel, N. Thatte, A. Krabbe, H. Kroker e L. E. Tacconi-Garman estudaram uma possível concentração de ME no centro de nossa galáxia, a *Via Láctea*. Um ano depois, em 1997 (*Nature* **386**, p. 37), W. Hu, N. Sujiyama e Joseph Silk examinaram a anisotropia da RCFM.

Conforme vimos acima, até 1997, duas questões preocupavam os cosmólogos: a anisotropia da RCFM e a ME (cerca de 30% da massa do Universo), que não eram explicadas pelos modelos cosmológicos inflacionários então vigentes. Para complicar esse questionamento, no ano seguinte, houve uma descoberta muito mais surpreendente em nosso Universo. Com efeito, em 1998 (*Astronomical Journal* **116**, p. 1009), Riess, Alexei V. Filippenko, Peter Challis, Alejandro Clocchiatti, Alan Diercks, Peter M. Garnavich, Ron L. Gilliland, Craig J. Hogan, Saurabh Jha, Kirshner, B. Leibundgut, Mark M. Phillips, David Reiss, Brian P. Schmidt, 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), ao observarem uma supernova do tipo Ia (SN-Ia) (já estudada por Riess, Press e Kirshner, em 1995, conforme vimos antes), deduziram estar o Universo em expansão acelerada e, portanto, havia a necessidade de usar a **constante cosmológica einsteniana** (Λ) para explicar essa aceleração. Ainda em 1998/1999 [*arXiv:astro-ph/0108103v1*, August (1988); *Physical Review D* **60**, p. 081301 (1999)], Dragan Huterer e Michael S. Turner usaram, pela primeira vez, o termo **energia escura** (EE 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) composto dos cosmólogos Saul Perlmutter, 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).

É interessante destacar que, em 2000, foi calculada a densidade de massa crítica do Universo: $\Omega = 1,0 \pm 0,04$, em observações sobre a RCFM celestes realizadas por P. De Bernardis, P. A. R. Ade, J. J. Bock, J. R. Bond, J. Borrill, A. Boscareli, K. Coble, B. P. Crill, G. De Gasperis, P. C. Farese, P. G. Ferreira, K. Ganga, M. Giacometti, E. Hivon, V. V. Hristov, A. Iacoangeli, A. H. Jaffe, A. E. Lange, L. Martinis, S. Masi, P. V. Mason, P. D. Mauskopf, A. Melchiorri, L. Miglio, T. Montroy, C. B. Netterfield, E. Pascale, F. Piacentini, D. Pogosyan, S. Prunet, S. Rao, G. Romeo, J. E. Ruhl, F. Scaramuzzi, D. Sforma e N. Vittorio (*Nature* **404**, p. 955), e por S. Hanany, Ade, A. Balbi, Bock, Borrill, Boscareli, De Bernardis, Ferreira, Hristov, Jaffe, Lange, A. T. Lee, Mauskopf, Netterfield, S. Oh, Pascale, B. Rabii, P. L. Richards, Smoot III, R. Stompor, C. D. Winant e J. H. P. Wu (*Astrophysical Journal* **545**, L5). Esse valor $\Omega \approx 1$ significa dizer que o nosso Universo possui uma **geometria praticamente euclidiana** (plana) e que se expandirá para sempre.

Em 2001 ([arXiv:astro-ph/0108103v1](#), August), Turner propôs um novo **Modelo Cosmológico** tendo a EE 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 do Universo*; 3) *As inhomogeneidades da densidade do Universo decorrem das flutuações quânticas durante a inflação*; 4) *A composição do Universo é de ~ 2/3 de energia escura, ~1/3 de matéria escura e 1/200 de estrelas brilhantes*; 5) *o conteúdo de matéria do Universo é de: (29 ± 4)% de matéria escura fria; (4 ± 1)% de bárions; ~ 0,3% de neutrinos*. Ainda nesse artigo, Turner afirma que a EE, 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.

Com o término da função do COBE, em dezembro de 1993, a NASA iniciou um outro projeto para medir a anisotropia do RCFM com uma resolução 35 vezes melhor do que a do COBE. Desse modo, em 30 de junho de 2001, ela lançou o satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) (“Sonda Anisotrópica de Microondas Wilkinson”) cuja missão foi encerrada em setembro de 2003. Durante três anos a equipe desse novo satélite examinou os dados por ele enviados e, em março de 2006 [*Astrophysical Journal Supplement* **170**, p. 377 (2007)], a equipe do WMAP [David N. Spergel (n.1961), R. Bean, O. Doré, M. R. Nolta, Bennett, 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 ± 0,15) bilhões (10⁹) de anos, que é composto de 23% de **matéria escura**, 73% de **energia escura** e 4% de matéria bariônica comum conhecida (sobre essa matéria, vide verbete nesta série). 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 $\Omega = 1,024 \pm 0,015$, o que confirma a quase “planura euclidiana” de nosso Universo, observada desde 2000, conforme registramos acima.

Ainda 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).

Com a confirmação da ME e a descoberta da EE, os cosmólogos começaram a propor modelos para tentar explicá-las. Para a explicação da ME, além das WIMP e dos “neutrinos estéreis”, vistos acima, outros candidatos foram incluídos como os **áxions** e os MACHO (“MAssive Compact Halo Object”), que são objetos compactos massivos e que, por emitirem pouca radiação, são de difícil detecção. Note que os **áxions** foram previstos em 1977 (*Physical Review* **D16**, p. 1791), pelos físicos norte-americanos Roberto D. Peccei (n.1942) e Helen R. Quinn (n.1943) como partículas leves (massa da ordem $\mu\text{eV}/c^2$), de spin zero, e que explicam a não violação da operação carga-paridade [CP - trocar a partícula por sua antipartícula (C) e refleti-la no espelho (P)] na interação forte (força entre prótons e nêutrons), muito embora essa operação seja violada na interação fraca (responsável pela radioatividade) ([astro.if.ufrs.br/evol/axions/axions.htm](#)). Por sua vez, a EE também tem propostas para sua existência, dentre elas, a energia potencial de um campo dinâmico no vácuo, conhecido como **quintessência** [certamente para lembrar que o filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322) já havia usado esse termo para se referir aos corpos supralunares que tinham essa constituição] que, no entanto, parece ser uma “energia fantasma”, uma vez que sua densidade aumenta com o tempo, como decorrente de uma “flutuação quântica do vácuo”. É oportuno

destacar que existem outras explicações para essas anomalias cósmicas como, por exemplo, mudar a teoria da gravitação, como prevê o modelo proposto pelo físico israelense Mordehai Milgrom (n.1946), em 1983 (*Astrophysical Journal* **270**, p. 365) e intitulado **Modified Newtonian Dynamics** (MOND) e, recentemente, em janeiro de 2010 (*arXiv:hep-th/1001.0785v1*), por Erik Verlinde, que propõe uma origem entrópica para a gravitação newtoniana/einsteiniana.

É ainda interessante destacar que, além dos modelos que mudam a gravitação, objetivando contornar as intrigantes observações de nosso Universo analisadas acima, existem **Modelos Cosmológicos do Universo Eterno** (MCUE) que não consideram o Universo como tendo um começo [caso do MBB], e sim, propõem um Universo “sacolejante” (*bouncing*) que passou por um ponto de volume mínimo. Os dois primeiros desses modelos foram apresentados, em 1979, 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 $\Delta E = \infty$. [Mário Novello e Santiago Bergliaffa, **Bouncing Cosmologies** (*Physics Reports* **463**, Número 4, Julho de 2008); Mário Novello, **Do Big Bang ao Universo Eterno** (Jorge Zahar Editor, 2010)].

Conforme vimos até aqui, os resultados experimentais indicam que a ME e EE são, provavelmente, as responsáveis pela aceleração de nosso Universo, observada em 1998. Portanto, essa aceleração funciona como uma **pressão negativa de um gás**. Em vista disso, modelos baseados na equação de estado de um gás [proposta pelo físico e matemático russo Sergey Alexeyevich Chaplygin (1869-1942), em 1902, em sua Tese de Doutorado, *O gazovyykh struyakh* (“Sobre o fluxo de gases”), defendida na *Universidade de Moscou*, dada pela expressão: $p = -A/\rho^\alpha$, onde p é a pressão, ρ é a densidade, A é uma quantidade positiva e $\alpha = 1$], consideram que existe uma forma de energia - a **quartaessênica** ou **gás de Chaplygin** – que unifica os conceitos de ME e de EE. [J. S. Alcaniz and J. A. S. Lima, **Measuring the Chaplygin gas Equation of State from Angular and Luminosity Distances** (*The Astrophysical Journal* **618**, 16 (2005); Timothy Clifton e Pedro G. Ferreira, **Existe mesmo uma Energia Escura?** (*Scientific American Brasil* **85**, p. 30, Junho de 2009) pt.wikipedia.org/wiki/Energia_escura; en.wikipedia.org/wiki/Dark_Energy].

Por fim, para poder entender as questões levantadas neste verbete sobre o nosso Universo, em abril de 2009, foi lançado o satélite *Planck Surveyor* (PS) pela *European Spacial Agence* (ESA) (“Agência Espacial Européia”) de cujas novas observações se espera alguma ideia para entender essas anomalias (!?) cósmicas.



ANTERIOR

SEGUINTE