



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Einstein e as Métricas dos Primeiros Modelos do Universo.

Como vimos em verbete desta série, 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) tendo como fundamento a *Equação de Einstein* (EE) dada por:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = G_{\mu\nu} = K T_{\mu\nu},$$

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 $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$.

Logo em 1916 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **1**, pgs. 189; 424), o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) encontrou uma solução (conhecida como a **métrica de Schwarzschild**) para a EE, definida pela expressão:

$$ds^2 = (cdt)^2 = (1 - 2mG/r) dt^2 - (1 - 2mG/r)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2,$$

onde m é a massa de uma partícula puntiforme colocada em um campo gravitacional isotrópico e estático, τ e t representam, respectivamente, o **tempo próprio** (tempo medido por um relógio preso a partícula) e o **tempo coordenada** (medido por um relógio em repouso colocado no infinito), G é a **constante gravitacional**, $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$, Ω é o **ângulo sólido**, e (r, θ, ϕ) representam as coordenadas esféricas. Por essa expressão vê-se, claramente, que quando $r = 2 m G$ há uma singularidade de ds , isto é: $ds \rightarrow \infty$. Esse valor de raio ficou conhecido como o **raio de Schwarzschild**, que define uma **singularidade no espaço-tempo** [mais tarde denominada de **buraco negro** ("black hole") (BN)].

Observe-se que, ainda em 1916, o físico holandês Johannes Droste (1886-1963) (*Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam* **19**, p. 197) também encontrou uma **singularidade** na EE, e o engenheiro alemão Hans Jacob Reissner (1874-1967) (*Annalen der Physik* **50**, p. 106) obteve uma solução da EE que continha um BN com massa, carga (elétrica ou magnética) e simetria esférica.

Um ano depois, em 1917 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **1**, p. 142), Einstein apresentou um novo de sua equação:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R - \Lambda g_{\mu\nu} = K T_{\mu\nu},$$

onde $\Lambda g_{\mu\nu}$ é o famoso **termo cosmológico** (TC). Esse termo foi colocado por ele em virtude de a solução que encontrara de sua equação de 1915, não conter soluções estáticas. Assim, para contornar essa dificuldade 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, que havia uma **repulsão cósmica**, além, é claro, da atração newtoniana. Matematicamente, essa hipótese significava acrescentar um termo à sua equação: o TC. Desse modo, Einstein postulou que o Universo era estático – conhecido

como **Universo (Cilíndrico) de Einstein** (UE) -, e demonstrou ser o mesmo finito e de curvatura positiva, cuja **métrica** (hoje, **métrica de Einstein**) - era dada por:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R_{UE}^2 (d\chi^2 + \text{sen}^2 \chi d\theta^2 + \text{sen}^2 \chi \text{sen}^2 \theta d\phi^2),$$

onde $r = R_{UE} \text{sen} \chi$ ($0 \leq \chi \leq \pi$), R_{UE} é o **raio do espaço esférico tridimensional**, que é constante, e θ e ϕ são coordenadas angulares esféricas. Para obter essa solução, Einstein considerou que a matéria do Universo era um *fluido perfeito*, cuja pressão era nula ($p = 0$) e a **densidade** constante ($\rho_{UE} \sim 10^{-23} \text{ g/cm}^3$). Desse modo, Einstein obteve para o raio (R_{UE}) e a massa (M_{UE}) de seu Universo, os seguintes valores:

$$R_{UE} = 3,46 \times 10^2 \text{ anos-luz (1 ano-luz} \sim 9,45 \times 10^{12} \text{ km)}; M_{UE} = 7 \times 10^{55} \text{ g.}$$

É interessante destacar que nesse Universo proposto por Einstein, ele considerou que: - *A inércia de um corpo é influenciada pela matéria (a distâncias finitas), mas não determinada por ela*. Essa afirmação estava em completa harmonia com a ideia do físico e filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916) apresentada, em 1883, no livro intitulado **Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch Dargestellt** ("A Mecânica e uma Consideração Crítico-Histórica de seu Desenvolvimento") (Open Court, 1974), segundo a qual a inércia se origina da interação de uma massa pontual com as demais massas do Universo.

Ainda em 1917 (*Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam* **26**, p. 392; 649), o físicos holandeses Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) e Droste obtiveram uma solução da EE usando métodos aproximativos, baseados no limite newtoniano da TRG.

Novas **métricas** decorrentes da EE foram então sendo descobertas. Com efeito, ainda em 1917 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **78**, p. 3; 341; *Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam Proceedings* **19; 20**, p. 1217; 229), o astrônomo holandês Willem de Sitter (1872-1934) encontrou uma nova solução da EE, com o TC, ao considerar ser o Universo homogêneo e uniforme, porém vazio ($T_{\mu\nu} = 0$). No entanto, essa solução apresentava duas importantes consequências: 1) o **espaço geométrico** possuía uma estrutura que era independente da matéria contida nele; 2) o **tempo** era relativo, isto é, dependia do lugar, ao contrário do que acontecia no UE em que o **tempo cósmico** (t) independia do lugar, daí ser chamado de **cilíndrico**. Esse **Universo (Esférico) de de Sitter** (UdS) é caracterizado pela **métrica – métrica de de Sitter**:

$$ds^2 = c^2 \cos^2 \chi dt^2 - R_{UdS}^2 (d\chi^2 + \text{sen}^2 \chi d\theta^2 + \text{sen}^2 \chi \text{sen}^2 \theta d\phi^2),$$

onde: $R_{UdS} = 3/\Lambda$.

Também em 1917 (*Annales der Physik Leipzig* **54**, p. 117), o físico e matemático alemão Hermann Weyl (1885-1955) usando métodos variacionais para estudar a TRG, obteve um Universo (**Universo de Weyl**) caracterizado pela **métrica – métrica de Weyl** -, dada por:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2,$$

onde M e Q representam, respectivamente, a massa e a carga elétrica da **singularidade** (BN). Destaque-se que, em 1918 (*Nuovo Cimento* **15**, p. 191), C. Longo reencontrou a **métrica de Weyl**. Ainda em 1918 (*Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam* **20**, p. 1230), o físico franco-finlandês Gunnar Nordström (1881-1923) reencontrou a solução de Reissner, de 1916, hoje conhecida como a **métrica de Reissner-Nordström**:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{r} + \frac{GQ^2}{r^2}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{r} + \frac{GQ^2}{r^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2,$$

onde M e Q representam, respectivamente, a massa e a carga elétrica da **singularidade**, como na **métrica de Weyl**, e G é a **constante gravitacional**.

O ano de 1918 foi bastante rico em discussões sobre a solução da EE. Com efeito, o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) (*Physikalische Zeitschrift* **19**, p. 20) considerou o Universo como um fluido sob alta pressão e densidade nula ($\rho = 0$) e, com isso, obteve uma solução da EE que não dependia do TC. Einstein, por sua vez, publicou vários artigos [*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **1**, p. 154; 270; 448 (SPAW1); *Physikalische Zeitschrift* **19**, p. 115; 165 (PZ19); *Annales der Physik Leipzig* **55**, p. 241 (AdPL)] nos quais discutiu a relação entre $g_{\mu\nu}$ e $T_{\mu\nu}$, o UdS (SPAW1, p. 270), cunhou o termo **princípio de Mach** (AdPL) e respondeu a Schrödinger (PZ19, p. 165) dizendo: - *O caminho seguido por Schrödinger não me parece acessível, pois ele conduz uma mata cerrada de hipóteses*.

Agora, vejamos novas soluções da EE e correspondentes **métricas** delas decorrentes obtidas na década de 1920. Logo em 1921 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A99**, p. 123), o físico inglês George Barker Jeffery (1891-1957) reencontrou a métrica obtida por Weyl, em 1917, e por Longo, em 1918. Em 1922 (*Physikalische Zeitschrift* **23**, p. 539), o físico húngaro Cornelius (Kornel) Lanczos (Loewy) (1893-1974) mostrou que o UdS poderia ser descrito por uma **métrica** na qual as partículas de teste se afastavam nesse Universo e com uma taxa que variava exponencialmente. Contudo, foi também em 1922 (*Zeitschrift für Physik* **10**, p. 377) que o matemático russo Aleksandr Aleksandrovich Friedmann (1888-1925) fez a grande crítica ao UE. Nesse trabalho ele ressaltou que Λ considerado por Einstein, em 1917, para tornar o Universo estático introduzia infinitos na EE, já que, em certas situações, poderia ocorrer que $\Lambda = 0$, e Einstein havia dividido a EE por essa constante. Assim, tomando a EE sem Λ e admitindo uma matéria homogênea e distribuída isotropicamente no Universo, encontrou duas soluções **não-estáticas** para a EE. Assim, considerando a **métrica** (hoje, **métrica de Friedman**):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) d\sigma^2,$$

Friedmann demonstrou que seu **tensor métrico** g_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) poderia ser solução da EE sem Λ , sempre que a variedade diferenciável definida por $d\sigma$ fosse constante. Desse modo, encontrou para a curvatura k dessa variedade três soluções: $k = 0$, $k > 0$ e $k < 0$ (plano, esférico e hiperbólico). Além do mais, verificou que não existe nenhuma solução estática para o raio $R(t)$ do Universo. Numa dessas soluções, o Universo se expandiria com o tempo (t) e, na outra, se contrairia. Ainda em 1922 (*Zeitschrift für Physik* **11**, p. 326), Einstein apresentou uma crítica ao trabalho de Friedmann que, no entanto, foi retirada logo depois, em 1923 (*Zeitschrift für Physik* **16**, p. 228).

É interessante observar que, em 1922 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* **174**, p. 437; 593), em 1923 (*Annales de la École Normale Supérieure de Paris* **40**, p. 325) e em 1924 (*Annales de la École Normale Supérieure de Paris* **41**, p.1), o matemático francês Elie Cartan (1869-1951) usou, pela primeira vez, o **campo tetrada** e as **formas diferenciais** na TRG. Assim, considerando uma **conexão afim não simétrica** (espaço com torsão), ele generalizou a Teoria da Gravitação de Einstein, razão pela qual essa generalização ficou conhecida como o **Universo de Einstein-Cartan**.

Ainda em 1923, Weyl (*Zeitschrift für Physik* **24**, p. 228) e o astrônomo inglês Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) [*The Mathematical Theorie of Relativity* (Cambridge University Press)] encontraram uma propriedade singular do UdS, qual seja, a de que duas partículas de prova se repelem mutuamente no Universo. Apesar desse resultado teórico, eles não perceberam que haviam conseguido a primeira evidência teórica do **afastamento para o vermelho** ("red shift") das galáxias, uma vez que se uma dessas partículas levasse uma fonte emissora de luz, a outra veria a mesma deslocada para o vermelho, de acordo com o **efeito Doppler** (1842)-**Fizeau** (1848) (ED-F) (vide verbete nesta série).

Friedmann voltou, em 1924 (*Zeitschrift für Physik* **21**, p. 326), a estudar a EE e mostrou que se $\Lambda \neq 0$, então existem soluções que são espacialmente abertas (com geometria hiperbólica), ao contrário do que Einstein havia encontrado, em 1917, para essa mesma condição, isto é, um Universo espacial fechado.

Em 1925 (*Journal of Mathematics Physics* **4**, p. 188), o astrônomo belga, o abade Georges Edouard Lemaître (1894-1966) apresentou uma nova **métrica** para o UdS:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R_0^2 \exp(2at) \times [dr^2 + r^2(d\theta^2 + d\Omega^2)],$$

com: $a = \sqrt{\Lambda/3}$.

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, ele descobriu 22 estrelas cefeidas [estrelas de brilho variável encontradas na *constelação de Cephei* pelo astrônomo inglês, de origem holandesa, John Goodricke (1764-1786), em 16 de outubro de 1784] na *nebulosa Messier 33* (M33) e 12 na M31 e, desse modo, demonstrou a natureza extragaláctica das nebulosas espiraladas. E mais ainda, ele foi capaz de estimar em cerca de 285.000 anos-luz os tamanhos dessas nebulosas, um valor muito maior do que o astrônomo norte-americano Harlow Shapley (1885-1972) estimara, em 1918 (*Astrophysical Journal* **48**, p. 89) para a nossa *Via Láctea*: 100.000 anos-luz. 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. Foi ainda nesses trabalhos que Hubble apresentou sua famosa classificação das nebulosas: *elípticas e espiraladas: normais, barradas e irregulares*. Essas observações de Hubble foram publicadas em 1925 (*Astrophysical Journal* **62**, p. 409) e em 1926 (*Astrophysical Journal* **63**, p. 236; **64**, p. 321).

Ainda em 1925 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* **11**, p. 590), o astrônomo norte-americano Howard Percy Robertson (1903-1961) apresentou uma **métrica geral** para a variedade 4-dimensional da TRG:

$$ds^2 = f(x, y, z, t)(dx^2 + dy^2 + dz^2) + g(x, y, z, t)dt^2.$$

Também em 1925, segundo registramos acima, Lemaître propôs uma nova métrica para o UdS e, em 1927 (*Annales de la Société Scientifique des Bruxelles* **A47**, p. 49), apresentou um modelo de Universo que representava uma solução intermediária entre os universos UE e UdS, ambos de 1917, como também já registramos. Com efeito, Lemaître considerou, inicialmente, $\Lambda = \Lambda_e$, sendo este um valor crítico de Λ que correspondia a uma posição inicial de equilíbrio do UE e que, ao ser rompido, o Universo caminharia através de uma série contínua de estados intermediários até o UdS. Desse modo, para Lemaître, o Universo teria começado a partir da explosão de um **átomo primordial** ou **ovo cósmico**, que conteria toda a matéria do Universo. Note-se que Lemaître reuniu seus trabalhos sobre seu modelo de Universo no livro intitulado **L'Hypothèse de l'Atome Promitif** (Neuchâtel, Griffon, 1946).

Mais tarde, em 1928 (*Philosophical Magazine* **5**, p. 835), Robertson anunciou que havia deduzido uma **métrica** para o UdS, semelhante à proposta por Lemaître, em 1925, usando uma adequada escolha de coordenadas. Por fim, em 1929 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* **15**, p. 822), ele propôs a famosa **métrica de Robertson**:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \frac{R^2(t)}{(1+kr^2/4)^2} \times [dr^2 + r^2(d\theta^2 + d\Omega^2)],$$

sendo $k = 0, +1, -1$ (**curvatura do espaço**: plano, esférico e hiperbólico), t é o **tempo cósmico**, e $R(t)$ é um **fator de escala** que descreve como a distância entre duas quaisquer linhas-mundo muda com t .

Na continuação de seus trabalhos de observação do Universo, 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 “red shift”. Interpretado esse deslocamento como devido ao ED-F, 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 seguinte expressão $V = H_0 D$, foi estimada por Hubble no valor de: $H_0 \cong 500 \text{ km.s}^{-1}(\text{Mpc})^{-1} \cong 0.5 \times 10^9 \text{ anos}^{-1}$, é a **constante de Hubble**. 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) (ver verbete nesta série).

O estudo das **métricas** continuou na década de 1930. Com efeito, logo em 1930 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **90**, p. 669), Eddington desenvolveu um modelo de Universo a partir da **métrica de Lemaître**. Por sua vez, em 1931 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin* p. 231), Einstein escreveu que o TC seria “teoricamente insatisfatório”. Desse modo, ele tornou público o que havia escrito para seus amigos sobre Λ como, por exemplo, para o físico russo-norte-americano George Antonovich Gamow (1904-1968): - *A introdução da constante cosmológica foi a maior besteira de minha vida*; para Weyl: - *Se não existe um mundo quase estático, então joguemos fora a constante cosmológica*; e para Lemaître: - *Desde que introduzi este termo, eu sempre tive a consciência pesada ... Não consigo acreditar que uma coisa tão feia seria real na natureza*.

Ainda em 1931 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **91**, p. 483; 490; *Nature* **127**, p. 706), Lemaître retomou o modelo de Universo que havia proposto em 1927, considerando $\Lambda > 0$. Em 1932 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* **18**, p. 213), Einstein e de Sitter propuseram o famoso **Universo de Einstein-de Sitter** (UE-dS), o qual foi obtido do UE considerando-se nulos Λ e a curvatura espacial. Nesse modelo de Universo, o **raio do Universo** [$R(t)$] seria dado por: $R(t) = (t/t_0)^{2/3}$, sendo $t_0 = 2/3H_0$, e a **densidade média** $\rho_0 = 3H_0^2 / (8\pi G)$. É oportuno destacar que, como em 1934 (*Astrophysical Journal* **74**, p. 43) Hubble e Humason determinaram 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 pc = 1 parsec = 3.0857×10^{18} cm** e que **1 Mpc = 10^6 pc**.

Foi também em 1934 (*Quarterly Journal of Mathematics* **5**, p. 64; 73), que os cosmólogos ingleses Edward Arthur Milne (1896-1950) e Sir William Hunter McCrea (1904-1999) desenvolveram um modelo para o Universo usando um argumento puramente newtoniano. Assim, eles consideraram certa distribuição de massa a uma distância (r_0) de um observador situado no centro de uma esfera homogênea isotrópica. Expandindo-se todos os comprimentos dessa esfera pelo **fator de escala** $R(t)$, então r_0 passa para o valor $r(t) = R(t) r_0$. Portanto, desse modo, a velocidade [$v = dr/dt = \dot{r}(t)$] de expansão da esfera e, portanto, da distribuição de massa considerada será dada por:

$$v = \dot{r}(t) = \dot{R}(t)r_0 = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} r(t) \equiv H_0(t)r(t)$$

Como $H_0(t)$ é a **constante de Hubble-Humason**, vê-se que Milne e McCrea deduziram a **Lei de Hubble-Humason** (LH-H) usando um argumento puramente newtoniano.

Uma possibilidade de ligar dois possíveis Universos foi proposta, em 1935 (*Physical Review* **48**, p. 73), por Einstein e pelo físico norte-americano Nathan Rosen (1909-1995) ao demonstrarem que a **singularidade de Schwarzschild** era dupla e, portanto, elas poderiam ser ligadas a dois Universos distintos ou dois pontos de um mesmo Universo, sendo a geometria resultante desse **Universo de Einstein-Rosen** então conhecida como **ponte de Einstein-Rosen** ou **buraco de minhoca** (“worm hole”), nome este cunhado, em 1957 (*Annals of Physics/NY* **2**, p. 525), pelos físicos norte-americanos John Archibald Wheeler (1911-2008) e Charles W. Misner (n.1932).

Em 1936 (*Astrophysical Journal* **83**, p. 187; 257), Robertson voltou a trabalhar com a **métrica** que havia encontrado em 1928. Porém, nesse mesmo ano de 1936 (*Proceedings of the London Mathematics Society, Series 2*, **42**, p. 90), o matemático inglês Arthur Geoffrey Walker (1909-2001) encontrou a mesma expressão de Robertson e, por isso, passou a ser conhecida como **métrica de Robertson-Walker**. Observe-se que, em 1939 (*Annals of Mathematics* **40**, p. 922), Einstein mostrou que a **singularidade de Schwarzschild** não pode existir na Natureza, já que a matéria não pode se concentrar arbitrariamente em um ponto. Se isso fosse possível, aduziu Einstein, suas partículas constituintes atingiriam a velocidade da luz.

Os **Universos Cosmológicos Expansivos**, propostos nas décadas de 1920 e 1930, registrados acima, foram analisados por Gamow (ex-aluno de Friedmann). Com efeito, partindo da ideia da explosão inicial do Universo, apoiando-se na **equação de Einstein** (1915) e nas Leis da Termodinâmica (1845), 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 (1921-2007), Gamow apresentou o seu famoso artigo no qual o “ovo cósmico lemaîtreano” formado de nêutrons, no instante do **big bang** (BB) [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 (α) (Alpher), beta (β) (Bethe) e gama (γ) (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 **Universo Cosmológico Alfa-Beta-Gama** ($\alpha\beta\gamma$).

Nesse **modelo** $\alpha\beta\gamma$, seus autores fizeram a notável previsão de que a radiação (sob a forma de fótons) do início do BB ainda deveria estar presente, com a única diferença que a temperatura inicial do Universo, agora, deveria apresentar um valor extremamente baixo, ~ 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). Registre que, em 1948 (*Nature* **162**, p. 774), Alpher e o físico norte-americano Robert C. Herman (1922-1997), também colaborador de Gamow, encontraram para a RCFM: ~ 5 K. É oportuno destacar que a RCFM foi detectada, em 1964, pelos radioastrônomos, o alemão Arno Allan Penzias (n.1933; PNF, 1978) e o norte-americano Robert Woodrow Wilson (n.1936; PNF, 1978), conforme vimos em verbete desta série.

O **modelo** $\alpha\beta\gamma$ elaborado 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 BB. Em seus trabalhos, eles mostraram que o

acréscimo do núcleo do hidrogênio (${}^1_1\text{H}$) ao núcleo do ${}^4_2\text{He}$ (partícula α) produziria o instável núcleo do lítio (${}^5_3\text{Li}$); a união de dois núcleos de ${}^4_2\text{He}$ criaria um núcleo instável de berílio (${}^8_4\text{Be}$). A mesma dificuldade acontecia para criar um núcleo estável de carbono (${}^{12}_6\text{C}$) a partir da união do ${}^4_2\text{He}$ com o ${}^8_4\text{Be}$. Além do mais, suas previsões apresentavam resultados contraditórios. Por exemplo, segundo a LH-H 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, ainda 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 Society of London* **108**, p. 252), e Hoyle (*Monthly Notices of the Royal Society of London* **108**, p. 372), conhecido como **Universo Estacionário de Bondi-Gold-Hoyle** (UB-G-H), segundo o qual na medida em que as galáxias se deslocam afastando-se uma das outras de acordo com a LH-H, novas galáxias estão em constante formação nos espaços entre elas, resultantes de nova matéria que é continuamente criada. Para chegarem a esse modelo, esses cientistas usaram o **princípio cosmológico** proposto por Milne, em 1935 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **95**, p. 560), pelo qual o Universo pareceria o mesmo em todos os tempos, bem como em todos os pontos do espaço. Observe-se que, para explicar a criação contínua da matéria contida no UB-G-H, seus autores introduziram modificações na TRG. É interessante ressaltar que a dificuldade da **nucleossíntese** enfrentada pela teoria do BB e, também, pela UB-G-H, foi resolvida por Hoyle (vide verbete nesta série).

Um novo modelo de Universo foi proposto pelo matemático austro-húngaro Kurt Gödel (1906-1978), em 1949 (*Reviews of Modern Physics* **21**, p. 447), ao encontrar uma solução da EE 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*.

O **Universo de Friedmann** foi generalizado pelo físico alemão Ernst Pascual Jordan (1902-1980) e apresentado, em 1952, no livro **Schwerkraft und Weltall** (Vieweg, Braunschweig), ao tratar o Universo como uma hiperesfera cheia de matéria incoerente e um campo escalar (ϕ) dependente do tempo, conhecida como **campo (constante) gravitacional de Jordan**. Nesse seu modelo de Universo, Jordan descreveu o $R(t)$ do Universo por intermédio de uma equação diferencial, conhecida como a **equação de Jordan**. Observe-se que, em 1956 (*Helvetica Physica Acta* **24**, p. 128), Markus Eduard Fierz (1912-2006) mostrou que a **constante de Jordan** não se referia à gravitação e sim, ao campo elétrico, mas precisamente, à **constante dielétrica do vácuo** (ϵ_0). Logo depois, em 1957 (*Zeitschrift für Physik* **148**, p. 72), Engelbert L. Schucking encontrou soluções simetricamente esféricas da **equação de Jordan**, que representa uma generalização da **equação de Friedmann** para o raio $R(t)$ de um Universo em expansão ou em contração. Por outro lado, a **métrica de Schwarzschild** foi generalizada, em 1959 (*Physical Review* **116**, p. 778), pelo físico norte-americano Christian Fronsdal (n.1931) e, em 1960, pelo físico e matemático norte-americano Martin David Krusdal (1925-2006) (*Physical Review* **119**, p. 1743) e o matemático polonês George Szekeres (1911-2005) (*Publicationes Mathematicae Debrecen* **7**, p. 285) usando um engenhoso sistema de coordenadas para descrever completamente a natureza do espaço-tempo até a singularidade de um BN, singularidade essa que havia sido denominada de **singularidade de Schwarzschild** nos trabalhos realizados em 1939, pelos físicos norte-americanos Julius Robert Oppenheimer (1904-1964) e George Michael Volkoff (1914-2000) (de origem russa) (*Physical Review* **55**, p. 374), e de Hartland Snyder (1913-1962) (*Physical Review* **56**, p. 455) sobre o **colapso gravitacional**.

O **Universo de Jordan** foi também encontrado pelos físicos norte-americanos Carl Henry Brans (n.1935) e Dicke, em 1961 (*Physical Review* **124**, p. 925) usando o **princípio de Mach**, porém com o ϕ associado ao tensor métrico $g_{\mu\nu}$. Esse **Universo de Jordan-Brans-Dicke** (UJ-B-D) é caracterizado por: $\phi = [8\pi/(3+2\omega)T]$, onde ϕ é o **operador de Laplace-Beltrami** ou **operador covariante de onda**, T é o traço do $T_{\mu\nu}$, isto é: T^μ_μ . Em 1962, Brans (*Physical Review* **125**, p. 388; 2194) e Dicke (*Physical Review* **125**, p. 2163) voltaram a trabalhar no UJ-B-D. Em 1963 (*Physical Review Letters* **11**, p. 237), o matemático neozelandês Roy Patrick Kerr (n.1934) encontrou uma solução da EE que

descreviam **buracos negros rotativos** (BNR), porém descarregados. Tal solução descreve a **métrica** (hoje, **métrica de Kerr**) do espaço-tempo em torno dessas singularidades cósmicas; esta **métrica** foi generalizada, em 1965 (*Journal of Mathematical Physics* **6**, p. 918), pelo físico norte-americano Ezra Ted Newman (n.1929), W. E. Couch, K. Chinnapared, A. Exton, A. Prakash e R. J. Torrence para descrever **buracos negros rotativos e carregados**, caracterizados pela massa M, momento angular J e carga elétrica Q. Essa **métrica de Kerr-Newman** é solução da EE tendo como fonte o tensor de energia momentum do campo eletromagnético: o **tensor de Maxwell** ($T_{\mu\nu}$) Note-se que, em 1963 (*Journal of Mathematical Physics* **4**, p. 915), Newman, L. A. Tamborino e T. Unti haviam generalizado a **métrica de Schwarzschild** para incluir o espaço vazio.

Em 1966 (*Journal of Mathematical Physics* **7**, p. 443), R. Kantowski e R. K. Sachs propuseram um **modelo cosmológico** com uma topologia espaço-temporal do tipo $M^4 = R \times \Sigma$, onde R é o eixo-temporal e Σ é a secção espacial, com a seguinte **métrica**:

$$ds^2 = a^2(\eta) \times [d\eta^2 - d\rho^2 - \text{senh}^2(\rho) d\varphi^2] - b^2(\eta) d\zeta^2,$$

onde: $a(\eta) = \alpha \cdot [\cosh(\eta) - 1]$, $b(\eta) = 3\alpha \cdot [\mu \coth(\eta/2) - 2]$, sendo α uma constante.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)