



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Einstein, as Ondas Gravitacionais e as Lentes Gravitacionais.

Segundo vimos em verbetes desta série, o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) formulou, em 1915, a famosa Teoria da Relatividade Geral (TRG), traduzida pela seguinte equação (**Equação de Einstein**; EE):

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

onde $R_{\mu\nu}$ é o **tensor geométrico de Ricci**, $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$, $K = 8\pi G/c^4$ é a **constante gravitacional de Einstein**, G é a **constante de gravitação universal de Newton-Cavendish**, c é a **velocidade da luz no vácuo**, e $T_{\mu\nu}$ é o **tensor energia-matéria**.

Logo em 1916 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **1**, p. 423; 688), Einstein obteve uma solução aproximada da EE, ao considerar campos gravitacionais fracos e, como resultado dessa consideração, concluiu pela existência de **ondas gravitacionais**. Ainda nesses trabalhos, Einstein tentou calcular a **radiação gravitacional** (de comprimento de onda λ) emitida por um sistema mecânico isolado excitado (sendo \bar{v} a velocidade média de suas partículas internas), com dimensões lineares r ($r \ll \lambda$), e no regime não-relativista ($\bar{v} \ll c$). Observe-se que, em 1917 (*Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-Physikalische Klasse* **1**, p. 53), o matemático alemão David Hilbert (1862-1943) estudou as **ondas gravitacionais** decorrentes da solução da EE. Em 1918 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **1**, p. 154), Einstein voltou a calcular a **radiação gravitacional** (RG), ocasião em que corrigiu um erro que havia cometido no artigo de 1916 sobre o mesmo tema, e apresentou sua célebre fórmula da RG decorrente da perda de energia mecânica. Em notação atual, essa **Fórmula do Quadrupolo de Einstein** (FQE) é dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{G}{5c^2} \left(\sum_{i,j=1,2,3} \frac{d^3 Q_{ij}}{dt^3} \right)^2,$$

onde $Q_{ij} = \int \rho [x_i x_j - (1/3) \delta_{ij} r^2] \times d^3 x$ é o **momento de quadrupolo**, ρ é a **densidade da fonte gravitacional**, δ_{ij} é o **tensor de Kronecker**, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ e $d^3 x = dx dy dz$ (lembrar que: $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$). Destaque-se que, em 1923 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A102**, p. 268), o astrônomo inglês Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) realizou um estudo teórico da propagação das **ondas gravitacionais einsteinianas** (OGE). Em 1935 (*Annals of Mathematics* **36; 37**, p. 657; 429), o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) estudou a quantização das OGE, denominadas por ele de **grávitons**, confirmando esse nome que já havia sido provavelmente proposto, em 1934 (*Pod Znamenem Marxisma* **6**, p. 147), pelos físicos russos Dmitri Ivanovich Blokhintsev (1908-1979) e F. M. Gal'perin. Logo depois, em 1936 (*Physical Review* **49**, p. 404; *Science* **84**, p. 506), Einstein analisou a possibilidade do desvio da luz devido à ação do campo gravitacional de uma estrela. Esse efeito ficou então conhecido como **lente gravitacional** (LG). Em 1937 (*Journal of the Franklin Institute* **223**, p. 43), Einstein e o físico norte-americano Nathan Rosen (1909-1995) estudaram as **ondas gravitacionais cilíndricas** como solução das **equações de Einstein** (EE), de 1915. É oportuno notar que, em 1941, os físicos russos Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962) e Evgeny

Mikhailovich Lifshitz (1915-1985) publicaram o livro intitulado **Teoriya Polya** (Nauka, Moscow) no qual mostraram que as auto-interações gravitacionais estão incluídas na FQE. O mesmo foi mostrado pelo também físico russo Vladimir Alexandrovich Fock (1898-1974) no livro **Teoriya Prostranstva Vremeni i Tyagoteniya** (Fizmatgiz, Moscow), publicado em 1955.

Por sua vez, em 1957 (*Nature* **179**, p. 1072), o astrofísico austro-inglês Sir Hermann Bondi (1919-2005) encontrou uma solução de **ondas gravitacionais planas** na EE. Ainda em 1957 (*Reviews of Modern Physics* **29**, p. 509), Wheeler e o físico norte-americano Joseph Weber (1919-2000) analisaram as **ondas gravitacionais cilíndricas de Einstein-Rosen**. Em 1958 (*Comptes Rendus de l'Académie de Sciences de Paris* **247**, p. 1094), L. Bel investigou a **radiação gravitacional**. Ainda em 1958, G. Gaposkin (*Handbuch der Physik* **50**, p. 225) e o astrônomo holandês Peter van de Kamp (1902-1995) (*Annals of Physics-NY* **50**, p. 187), investigaram a **radiação gravitacional** de estrelas binárias eclipsantes e típicas, respectivamente. As soluções de ondas planas exatas das **ondas gravitacionais** foram encontradas, em 1959 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A251**, p. 519), Bondi, Felix A. E. Pirani e I. Robinson. Em trabalhos independentes realizados também em 1959, os físicos norte-americanos R. L. Arnowitt e Stanley Deser (n.1931) (*Physical Review* **113**, p. 745) e Dirac (*Physical Review* **114**, p. 924) desenvolveram um formalismo hamiltoniano não-covariante da gravitação para calcular amplitudes de transição da **radiação gravitacional**. Como Dirac, em 1958 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A246**, p. 333), havia iniciado esse formalismo [completado em 1959 (*Physical Review* **114**, p. 924)], ele passou a ser conhecido com o **Universo de Dirac**.

A ideia de construir um equipamento para medir as **ondas gravitacionais** (OG) foi apresentada por Weber, em 1960 (*Physical Review* **117**, p. 307), constituído de grandes cilindros de alumínio (A#). Em 1961 e 1962 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A264**, p. 309; **A270**, p. 103), R. K. Sachs estudou as **ondas gravitacionais** no espaço-tempo plano assintótico. Também, em 1962 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A269**, p. 21), Bondi, M. G. J. van der Burg e A. W. K. Metzner estudaram as **ondas gravitacionais** de sistemas isolados com simetria axial. Em 1963, os físicos norte-americanos Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965) (*Physical Review* **130**, p. 1253) e Richard Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) (*Acta Physica Polonica* **24**, p. 697) usaram a Teoria de Campos para quantizar o campo gravitacional (**gráviton**). Por sua vez, as LG foram estudadas pelo astrofísico norueguês Sjur Refsdal (1935-2009), em 1964 (*Monthly Notices of the Royal Society of London* **128**, p. 295). Ainda em 1964 (*Physics Letters* **9**, p. 357; *Physical Review* **B135**, p. 1049; **B140**, p. 516), o físico norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979) estudou a probabilidade de emissão de **ondas gravitacionais (grávitons)** usando a Mecânica Quântica. Em 1965 (*Uspekhi Fizika Nauk* **86**, p. 433), o físico russo V. S. Braginsky discutiu como detectar as OG. Em 1966 (*Physics Review Letters* **17**, p. 1228), em 1967 (*Physics Review Letters* **18**, p. 498) e em 1968 (*Physics Review Letters* **20**, p. 1307), Weber voltou a descrever a construção de grandes cilindros de A# para detectar OG.

Segundo afirmamos no item 2.6, a OG só foi possível ser observada com a descoberta dos **pulsars**. Vejamos como ocorreu essa descoberta. Em agosto de 1967, a astrônoma irlandesa Susan Jocelyn Bell Burnell (n.1943), então estudante do rádioastrônomo inglês Antony Hewish (n.1924; PNF, 1974), encontrou objetos celestes, na *nebulosa de Caranguejo*, que emitiam vibrações regulares de ondas de rádio. Ao comunicar essa descoberta a Hewish, os dois pensaram então que haviam realizado contato com uma civilização extraterrestre, razão pela qual deram o nome de *Little Green Men* (LGM1) (“Pequenos Homens Verdes”). No entanto, a análise mais detalhada dessa observação levou Hewish e sua equipe (Burnell, J. H. D. Pilkington, Paul F. Scott e R. A. Collins) a anunciar, em 1968 (*Nature* **217**, p. 709) a anunciar a descoberta de uma estrela da ordem da massa solar e de raio da ordem de 10 km, e que gira em torno de si com um período de $\sim 1,337$ s. Essa estrela recebeu o nome de CP 1919, onde CP significa **Cambridge Pulsar** e 1919 indica sua posição nos céus. Note-se que, em 1968 (*Physics Review Letters* **21**, p. 395), Weber discutiu a possibilidade de o **pulsar** NP 0532, na *nebulosa de Caranguejo*, ser um emissor de OG. Em 1969 (*Physical Review Letters* **22**, p. 1320) e em 1970 (*Physics Review Letters* **24**; **25**, p. 276; 180), ele anunciou que havia encontrado evidências experimentais da **radiação gravitacional**, pois observou a coincidência de pulsos dessa radiação em cilindros de A# colocados a

uma distância de 1.000 km, entre o *College Park*, em Maryland, e o *Argonne National Laboratory*, em Illinois.

Em dezembro de 1973, o astrofísico norte-americano Russell Alan Hulse (n.1950; PNF, 1993) foi trabalhar no *Arecibo Radio Telescope*, em Porto Rico, operado pela Cornell University, na frequência de 430 MHz, no qual havia registros de cerca de 100 **pulsares** até então conhecidos. Seu objetivo era o de preparar sua Tese de Doutorado sob a orientação do astrofísico norte-americano Joseph Hooton Taylor Junior (n.1941; PNF, 1993) que ensinava na *University of Massachusetts*, especialista em **pulsares**, pois, em 1972 (*Nature-Physical Science* **240**, p. 74), juntamente com Richard N. Manchester e G. R. Huguenin desenvolveu um algoritmo de dispersão-compensação para estudar 22 **pulsares**. Entre dezembro de 1973 e janeiro de 1975, Hulse descobriu 40 novos **pulsares**. Contudo, um deles, observado no dia 02 de julho de 1974, na constelação de *Águia*, não se enquadrava na crença geral de que esses objetos celestes eram estrelas de nêutrons *solitárias* e girantes. Esse **pulsar**, denominado de PSR 1913 + 16, onde PSR significa **pulsar** e o número é a sua posição no céu, apresentava um período de 0,05903 s. Contudo, no dia 25 de agosto de 1974, Hulse tentou obter um período mais acurado para esse **pulsar**. Depois de realizar um ajuste do **efeito Doppler** (1842)-**Fizeau** (1848) devido ao movimento da Terra, Hulse encontrou uma diferença de 27 μ s (1μ s = 10^{-6} s) em suas medidas. Em princípio, pensou tratar-se de uma falha em seu programa de computador, o ZBTREE. Reescreveu-o e voltou a observar o PSR 1913 + 16, entre 01 e 02 de setembro de 1974. Novamente encontrou uma variação do período com o tempo, variação essa que permaneceu nas observações subseqüentes. Então, no dia 18 de setembro de 1974, escreveu uma carta para Taylor, que se encontrava em Amherst, dizendo-lhe que o PSR 1913 + 16 era um **pulsar-binário**, com cerca de oito (8) horas de período. Desse modo, Hulse e Taylor, em Arecibo, começaram a realizar uma análise desse objeto celeste usando as **leis de Kepler**, encontrando os seguintes dados: velocidade orbital ~ 300 km/s, tamanho da órbita da ordem do raio do Sol ($6,96 \times 10^8$ m), massas do sistema binário da ordem da massa solar ($1,99 \times 10^{30}$ kg), e período de 7 h 45 min. Essa descoberta foi anunciada em 1974 (*Astrophysical Journal Letters* **191**, p. L59) e em 1975 (*Astrophysical Journal* **195**, p. L51; *Astrophysical Journal Letters* **201**, p. L55). Registre-se que Hulse deixou de trabalhar com **pulsares**, a partir de 1977.

Registre-se que foi no artigo citado acima que Hulse e Taylor afirmaram que esse objeto celeste poderia servir para testar a previsão de Einstein, em 1916, sobre as OG, segundo registramos anteriormente. Segundo tal previsão, qualquer sistema que radiasse esse tipo de onda perderia energia. Assim, em virtude dessa perda de energia, as estrelas do **pulsar-binário** se aproximariam uma da outra e, em consequência, haveria uma diferença em seu período orbital. Considerando essa possibilidade, Taylor e colaboradores passaram a verificar se havia essa diferença no período do PSR 1913 + 16. O primeiro resultado dessa variação foi anunciado, em 1979 (*Nature* **277**, p. 437), por Taylor, Lee A. Fowler e Peter M. McCulloch. Mais tarde, em 1982 (*Astrophysical Journal* **253**, p. 908), Taylor e Joel M. Weisberg apresentaram o seguinte resultado: $(2,40 \pm 0,09) \times 10^{-12}$ s/s, contra um valor teórico einsteniano de: $(2,403 \pm 0,02) \times 10^{-12}$ s/s. Esse resultado levou Taylor a fazer o seguinte comentário: - *Portanto, 66 anos depois de Einstein prever as ondas gravitacionais, um experimento foi realizado e que apresenta clara evidência de sua existência.* Essa concordância entre experiência e teoria foi confirmada por Taylor em 1992 (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **341**, p. 117). Observe-se que antes, em 1991, Taylor [*Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)* **79**, p. 1054] mostrou que os **pulsares milissegundos** (períodos entre 1 e 10 ms) descobertos e estudados por ele são os relógios estáveis mais naturais do Universo, e que Taylor e Thibault Damour (*Astrophysical Journal* **366**, p. 501) investigaram a mudança do período orbital do PSR 1913 + 16. É interessante registrar que, em 1992 (*Nature* **355**, p. 145), Alexander Wolszczan e Dale A. Frail anunciaram a descoberta de um sistema de dois planetas, três vezes mais massivos do que a Terra, girando em torno do **pulsar milissegundo** PSR 1257 + 12. Note-se que Wolszczan, em 1994 (*Science* **264**, p. 538), anunciou a existência de um terceiro planeta girando em torno desse PSR 1257 + 12, com um período de 25, 34 dias.

Em 1992 (*Science* **256**, p. 325), A. Abramovici, W. E. Althouse, Ronald W. P. Drever, Y. Gursel, S. Kawamura, F. J. Raab, D. Shoemaker, L. Sievers, R. E. Spero, Kip Stephen Thorne (n.1940), R. E. Vogt, Rainer Weiss (n.1932), S. E. Whitcomb e M. E. Zucker apresentaram o projeto *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO) (“Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser”) cujo objetivo fundamental era o de observar OG de origem cósmica. Ele foi construído em 1999 e opera com dois observatórios para detectar as OG: o *Hanford Observatory*, do *Hanford Nuclear Reservation*, próximo de Richland, Washington, e o *Livingston Observatory*, em Livingston, Louisiana separados por 3.002 km, que corresponde a 10 ms ($1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$) na chegada da OG, uma vez que esta viaja, teoricamente, com a velocidade da luz no vácuo ($c = 300.000 \text{ km/s}$). Composto de interferômetros do **tipo-Michelson** e com **cavidades Fabry-Pérot**, o LIGO foi colocado em operação em 23 de agosto de 2002. Note que, muito embora até o presente momento (março de 2012) o LIGO ainda não tenha detectado nenhuma OG ele observou, em agosto de 2010, o eclipse do **pulsar** Swift J149.4-2807, que havia sido descoberto em junho de 2006.

Em 1994 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **271**, p. L31), os físicos, os brasileiros José Carlos Nogueira Araújo (n.1968), José Antônio de Freitas Pacheco (n.1942) e Mauro Sérgio Dorsa Cattani (n.1942), e o argentino Jorge Emiliano Horvath (n.1959) analisaram as OG emitidas por **pulsares cambaleantes** (“wobbling pulsars”).

Em 2000 [*Physical Review* **D63**, article number (a.n.) 023007], o físico norte-americano físico norte-americano Ezra Ted Newman (n.1929), Simonetta Frittelli e Thomas P. Kling estudaram a distorção da imagem de objetos ópticos em uma **lente gravitacional** não perturbativa.

Em 2001 (*The Astrophysical Journal* **556**, p. L1), o físico russo-norte-americano Sergei Kopeikin (n.1956) apresentou a ideia de usar o planeta Júpiter como uma **lente gravitacional** para interagir com a luz (onda eletromagnética) emitida pelo **quasar** (JO842+1835) que se alinharia com aquele planeta e a Terra em 08 de setembro de 2002, às 16h30min GTM (“Greenwich Mean Time”). Desse modo, ele e o radioastrônomo norte-americano Edward Formalont (n.1940) usaram um arranjo de telescópios terrestre, inclusive o VLBI (“Very Large Baseline Interferometry”) e, por intermédio da TRG encontraram para a **velocidade da OG** o valor de $(1,06 \pm 0,21)$ da velocidade da luz (c). Os resultados dessa medida foram apresentados por eles, em 2003 (*The Astrophysical Journal* **598**, p. 704), em 2006 (*Foundations of Physics* **36**, p. 1244), em 2007 (*General Relativity and Gravitation* **39**, p. 1583) e, em 2009 (*The Astrophysical Journal* **699**, p. 1395), sendo este com a colaboração de Gabor Lanyi e John Benson. Observe-se que o VLBI foi idealizado pelo radioastrônomo inglês Roger Clifton Jennison (1922-2006) em trabalhos realizados, em 1958 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **118**, p. 276) e 1961 (*Proceedings of the Physical Society* **78**, p. 596), porém só largamente utilizado a partir de 1974, usando três antenas.

Em 2012 (*Science* **335**, p. 561), o físico alemão Thomas M. Tauris usou simulações computacionais para mostrar que os **pulsares milissegundos** não são tão mais velhos do que o Universo como parecem ser (cerca de 15 bilhões de anos contra os 13,7 bilhões calculados pelo Modelo Padrão Cosmológico: Teoria do Big Bang, visto no item 2.7).

Concluindo este item é oportuno destacar que, em virtude das pequenas distâncias envolvidas no LIGO, a *National Aeronautics Space Administration* (NASA) e a *European Space Agency* (ESA) programaram construir o *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA) composto de três espaçonaves orbitando em torno do Sol para medir as OG. Porém, com a NASA desistiu de participar desse projeto em abril de 2011, a ESA o retomou e, em 17 de janeiro de 2012 (*arXiv.org*: 1201.3621v1[astro-ph.GO]), Pau Amaro-Seoane, Sofiane Aoudia, Stanislav Babak, Pierre Binétruy, Emanuele Berti, Alexandro Bohé, Chiara Caprini, Monica Colpi, Neil J. Cornish, Karsten Danzmann, Jean-François Dufaux, Jonathan Gair, Oliver Jennrich, Philippe Jetzer, Antoine Klein, Ryan N. Lang, Alberto Lobo, Tyson Littenberg, Sean T. McWilliams, Gijs Nelemans, Antoine Petiteau, Edward K. Porter, Bernard F. Schutz, Alberto Sesana, Robin Stebbins, Tim Sumner, Michele Vallisneri, Stefano Vitale, Marta Volonteri e Henry Ward descreveram a missão (eLISA) do *European New Gravitational Wave Observatory* (NGO) que poderá detectar as OG em uma banda de frequência (0,1 mHz – 1 Hz) e com suficiente sensibilidade para detectar fontes astrofísicas a distâncias cosmológicas com *red shift* $z = 15$.

Essa missão está programada para ser lançada pela ESA em 2014. Para detalhes sobre as OG, ver verbetes em: en.wikipedia.org/wiki/LICO; [Edward_Formalont](#); [Sergei_Kopeikin](#).



ANTERIOR

SEGUINTE