

Detecção de ondas gravitacionais⁺*

*José Maria Filardo Bassalo*¹

Academia Paraense de Ciências

Belém – PA

*M. Cattani*²

Instituto de Física – USP

São Paulo – SP

Resumo

Em 11 de fevereiro de 2016, por ocasião de uma Conferência realizada na National Science Foundation (NSF), em Washington, D.C., o físico norte-americano David Reitze, Diretor Executivo do Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) anunciou que haviam sido observadas em 14 de setembro de 2015 Ondas Gravitacionais (OG). Esse evento foi denominado GW150914. Uma segunda observação de OG foi feita também pelo LIGO em 26 de dezembro de 2015 denominado de GW151226. Os sinais detectados nesses eventos são similares e foram gerados pela coalescência (fusão) de um sistema binário formado por dois Buracos-Negros (BN). As fontes de OG estariam localizadas, respectivamente, a distâncias de ~ 410 Mpc e de ~ 440 Mpc da Terra. Para entendermos o significado desses extraordinários eventos, faremos um breve resumo histórico sobre as OG e os BN.

Palavras-chave: *Teoria de Gravitação de Einstein; Ondas gravitacionais; Pulsares; Buracos-negros.*

⁺ Detections of the Gravitational Waves

^{*} *Recebido: maio de 2016.
Aceito: junho de 2016.*

¹ E-mail: jmfbassalo@gmail.com

² E-mail: mcattani@if.usp.br

Abstract

On February 11, 2016, during a conference held at the National Science Foundation (NSF), in Washington, D.C., the American physicist David Reitze, Executive Director of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) announced that it had been observed on September 14, 2015 Gravitational Waves (GW). This event was named GW150914. A second observation was also done by the LIGO on December 26, 2015 named GW151226. The signals of these two events are similar and are due to the coalescence of a binary black holes (BH). The GW sources are distant, respectively, of ~ 410 Mpc and ~ 440 Mpc from the Earth. To understand the significance of this extraordinary events we will make a historical summary of the GW and the BH.

Keywords: *Einstein's gravitation theory; Gravitational waves; Pulsars; Black-holes.*

I. Introdução

Em dezembro de 1915³, o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), formulou a hoje famosa *Teoria da Relatividade Geral* (TRG), traduzida pela também hoje célebre *Equação de Einstein* (EE):

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

sendo $R_{\mu\nu}$ o *tensor geométrico de Ricci* ($R_{\mu\nu}$), $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$, $g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu}$ o *tensor métrico riemanniano*, $K = 8\pi G/c^4$ a *constante gravitacional de Einstein*, G a *constante de gravitação universal de Newton-Cavendish* e c a *velocidade da luz no vácuo*, e $T_{\mu\nu}$ o *tensor energia-matéria*. Note-se que Einstein chegou à TRG aplicando a Teoria da Gravitação Newtoniana (TGN) ao problema da atração gravitacional entre corpos, chegando à conclusão de que essa atração não era devida a uma força que agia a distância, como afirmavam os newtonianos, e sim dada pela curvatura do espaço-tempo riemanniano ($R_{\mu\nu}$), provocado pela presença de $T_{\mu\nu}$. Desse modo, quando um corpo “cai” em qualquer planeta (Terra, por exemplo), ele não é puxado pela “força de atração gravitacional do planeta” e sim, ele se desloca na curva do espaço-tempo produzida pela presença da massa planetária, isto é, ele se movimenta na *geodésica* de $g_{\mu\nu}$ ($= g^{\mu\nu}$) induzida por essa massa.

³ *Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften*, v. 2, p. 778; 799; 831; 844, 1915.

No começo de 1916⁴, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) encontrou uma solução [conhecida como a *Métrica de Schwarzschild* (MS)] para a EE e definida pela expressão:

$$ds^2 = (1 - 2mG/R) c^2 dt^2 - [1/(1 - 2mG/R)] dr^2 - r^2 (d\theta^2 - \sin^2\theta d\phi^2),$$

na qual m é a massa de uma partícula puntiforme colocada em um campo gravitacional isotrópico e estático, G é a *constante gravitacional*, e (r, θ, ϕ) representam as coordenadas esféricas. Por essa expressão vê-se, claramente, que quando $R = 2mG$, há uma singularidade de ds , isto é: $ds \rightarrow \infty$. Esse valor ficou conhecido como o *Raio de Schwarzschild* (R_{Sch}) o que corresponde a conhecida *Singularidade de Schwarzschild* (SS).

II. Ondas Gravitacionais. Emissão Quadrupolar

Ainda em 1916⁵, 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* (RG) (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 1917⁶, o matemático alemão David Hilbert (1862-1943) estudou as *ondas gravitacionais* (OG) decorrentes da solução da EE. Em 1918⁷, Einstein voltou a calcular a 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:

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

na qual $Q_{ij} = \int \rho [x_i x_j - (1/3)\delta_{ij} r^2] \times d^3x$ 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 $d^3x = dx dy dz$ (lembrar que: $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$). Destaque-se que, em 1923⁸, o astrônomo inglês Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) realizou um estudo teórico da propagação das *ondas gravitacionais einsteinianas* (OGE). Em 1935⁹, o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) estudou

⁴ *Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften*, v. 1, p. 189, 1964.

⁵ *Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften*, v. 1, p. 423; 688, 1916.

⁶ *Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-Physikalische Klasse*, v. 1, p. 53, 1917.

⁷ *Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften*, v. 1, p. 154, 1918.

⁸ *Proceedings of the Royal Society of London*, A102, p. 268, 1923.

⁹ *Annals of Mathematics*, v. 36, p. 657; 37, p. 429, 1935.

a quantização das OGE, denominadas por ele de *grávitons*, confirmando esse nome que já havia sido provavelmente proposto, em 1934¹⁰, pelos físicos russos Dmitri Ivanovich Blokhintsev (1908-1979) e F. M. Gal'perin. Logo depois, em 1936¹¹, 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 1937¹², Einstein e o físico norte-americano Nathan Rosen (1909-1955) estudaram as *ondas gravitacionais cilíndricas* como solução da 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 Poly* (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 1957¹³, o astrofísico austro-inglês Sir Hermann Bondi (1919-2005) encontrou uma solução de *ondas gravitacionais planas* na EE. Ainda em 1957¹⁴, os físicos norte-americanos John Archibald Wheeler (1911-2008) e Joseph Weber (1919-2000) analisaram as *ondas gravitacionais cilíndricas de Einstein-Rosen*. Em 1958¹⁵, L. Bel investigou a RG. Ainda em 1958, G. Gaposkin¹⁶ e o astrônomo holandês Peter van de Kamp (1902-1995)¹⁷, investigaram as RG de estrelas binárias eclipsantes e típicas, respectivamente. As soluções de ondas planas exatas das OG foram encontradas, em 1959¹⁸, por Bondi, Felix A. E. Pirani e I. Robinson. Também, em 1962¹⁹, Bondi, M. G. J. van der Burg e A. W. K. Metzner estudaram as OG de sistemas isolados com simetria axial. Em trabalhos independentes realizados também em 1959, os físicos norte-americanos R. L. Arnowitt e Stanley Deser (n.1931)²⁰ e Dirac²¹ de-

¹⁰ **Pod Znamenem Marxisma**, v. 6, p. 147, 1934.

¹¹ **Physical Review**, v. 49, p. 404; **Science**, v. 84, p. 506, 1936.

¹² **Journal of the Franklin Institute**, v. 223, p. 43, 1937.

¹³ **Nature**, v. 179, p. 1072, 1957.

¹⁴ **Reviews of Modern Physics**, v. 29, p. 509, 1957.

¹⁵ **Comptes Rendus de l'Académie de Sciences de Paris**, v. 247, p. 1094, 1958.

¹⁶ **Handbuch der Physik**, v. 50, p. 225, 1958.

¹⁷ **Annals of Physics**, v. 50, p. 187, 1958.

¹⁸ **Proceedings of the Royal Society of London** A251, p. 519, 1959.

¹⁹ **Proceedings of the Royal Society of London** A269, p. 21, 1962.

²⁰ **Physical Review**, v. 113, p. 745, 1959.

²¹ **Physical Review**, v. 114, p. 924, 1959.

envolveram um formalismo hamiltoniano não-covariante da gravitação para calcular amplitudes de transição da RG. Como Dirac, em 1958²², havia iniciado esse formalismo [completado em 1959²³], ele passou a ser conhecido como *Universo de Dirac*.

III. Detectores Ressonantes de Ondas Gravitacionais

A ideia de construir um equipamento para medir as OG foi apresentada por Weber, em 1960²⁴, constituído de grandes cilindros de alumínio ($A \ell$). Em 1961 e 1962²⁵, R. K. Sachs estudou as OG no espaço-tempo plano assintótico. Também, em 1962²⁶, Bondi, M. G. J. van der Burg e A. W. K. Metzner estudaram as OG de sistemas isolados com simetria axial. Em 1963, os físicos norte-americanos Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965)²⁷ e Richard Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965)²⁸ 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 1964²⁹. Ainda em 1964³⁰, o físico norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979) estudou a probabilidade de emissão de OG usando a Mecânica Quântica. Em 1965³¹, o físico russo V. S. Braginsky discutiu como detectar as OG. Em 1966³², em 1967³³ e em 1968³⁴, Weber voltou a descrever a construção de grandes cilindros de $A \ell$ para detectar as OG.

A partir dessa proposta de Weber, foi desenvolvida a técnica de *detectores ressonantes*, que usa a oscilação de sólidos muito rígidos (geralmente na forma cilíndrica e esférica) para detectar as OG. Para detalhes sobre a emissão e detecção das OG, ver os artigos de um dos autores (Cattani), publicados em 2010³⁵.

²² *Proceedings of the Royal Society of London* A246, p. 333, 1958.

²³ *Physical Review*, v. 114, p. 924, 1959.

²⁴ *Physical Review*, v. 117, p. 307, 1960.

²⁵ *Proceedings of the Royal Society of London* A264, p. 309, 1961; A270, p. 103, 1962.

²⁶ *Proceedings of the Royal Society of London* A269, p. 21, 1962.

²⁷ *Physical Review*, v. 130, p. 1253, 1963.

²⁸ *Acta Physica Polonica*, v. 24, p. 697, 1963.

²⁹ *Monthly Notices of the Royal Society of London*, v. 128, p. 295, 1964.

³⁰ *Physics Letters* 9, p. 357; *Physical Review* B135, p. 1049; B140, p. 516, 1964.

³¹ *Uspekhi Fizika Nauk*, v. 86, p. 433, 1965.

³² *Physics Review Letters*, v. 17, p. 1228, 1966.

³³ *Physics Review Letters*, v. 18, p. 498, 1967.

³⁴ *Physics Review Letters*, v. 20, p. 1307, 1968.

³⁵ **Gravitational Waves I: Basic Emission Equations** [arXiv:1001.2518v1 (gr-qc)]; **Gravitational Waves II: Basic Emission Systems Equations** [arXiv:1003.2105v1 (gr-qc)]; e **Gravitational Waves III: Detecting Systems** [arXiv:1004.2470v1 (gr-qc)].

IV. Detectores Interferométricos, Pulsares, Buracos Negros e Big Bang

Após 30 anos de pesquisas verificou-se que os *detectores sólidos* são muito pouco eficientes e que se alguma OG fosse detectada seria um evento fortuito. Assim, a partir de 1990 esses detectores deixaram de ser usados e começaram a ser substituídos pelos grandes *interferômetros* (LIGO ou VIRGO) como veremos a seguir (CATTANI, op. cit.).

Nesta oportunidade, é interessante destacar que a detecção das OG se intensificou com a descoberta dos *pulsares*. Vejamos como ocorreu essa descoberta. Em agosto de 1967, a astrônoma irlandesa Susan Jocelyn Bell Burnell (n.1943), então estudante do radioastrônomo 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 então pensaram 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 1968³⁶ 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 $\approx 1,337$ s. Note-se que essa estrela recebeu o nome de CP 1919, onde CP significa *Cambridge Pulsar* e 1919 indica sua posição nos céus. Denote-se que, em 1968³⁷, Weber discutiu a possibilidade de o *pulsar* NP 0532, na *nebulosa de Caranguejo*, ser um emissor de OG. Em 1969³⁸ e em 1970³⁹, ele anunciou que havia encontrado evidências experimentais da RG, pois observou a coincidência de pulsos dessa radiação em cilindros de Al colocados a uma distância de 1.000 km, entre o *College Park*, em Maryland, e o *Argonne National Laboratory*, em Illinois.

Em 1972, o físico brasileiro Jayme Tiomno (1920-2011), em parceria com os astrofísicos, o norte-americano Marc Davis (n.1947) e o italiano Remo Ruffini (n.1943)⁴⁰ e com Ruffini e o astrofísico indiano C. V. Vishveshwara⁴¹ realizaram trabalhos sobre, respectivamente, a *radiação gravitacional* (RG) e a *radiação eletromagnética* de corpos caindo nas proximidades de uma SS.

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

³⁶ *Nature*, v. 217, p. 709, 1967.

³⁷ *Physics Review Letters*, v. 21, p. 395, 1968.

³⁸ *Physical Review Letters*, v. 22, p. 1320, 1969.

³⁹ *Physics Review Letters*, v. 24, p. 276; 25, p. 180, 1970.

⁴⁰ *Physical Review D*, v. 12, p. 2932, 1972.

⁴¹ *Nuovo Cimento Letters*, v. 3, p. 211, 1972.

na *University of Massachusetts*, especialista em *pulsares*, pois, em 1972⁴², 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 subsequentes. 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 período de ~ 8 horas. 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 (R_S) (= $6,96 \times 10^8$ m), massas do sistema binário da ordem da massa solar ($m_S = 1,99 \times 10^{30}$ kg), e período de 7 h 45 min. Essa descoberta foi anunciada em 1974⁴³ e em 1975⁴⁴. 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 as OG, pois 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 1979⁴⁵, por Taylor, Lee A. Fowler e Peter M. McCulloch. Mais tarde, em 1982⁴⁶, Taylor e Joel M. Weisberg apresentaram o seguinte resultado: $(2,40 \pm 0,09) \times 10^{-12}$ s/s, sendo o 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.

⁴² *Nature-Physical Science*, v. 240, p. 74, 1972.

⁴³ *Astrophysical Journal Letters*, v. 191, p. L59, 1974.

⁴⁴ *Astrophysical Journal*, v. 195, p. L51; *Astrophysical Journal Letters*, v. 201, p. L55, 1975.

⁴⁵ *Nature* **277**, p. 437, 1979.

⁴⁶ *Astrophysical Journal* **253**, p. 908, 1982.

Essa concordância entre experiência e teoria foi confirmada por Taylor em 1992⁴⁷. Observe-se que antes, em 1991, Taylor⁴⁸ mostrou que os *pulsares milissegundos* (períodos entre 1 e 10 ms) descobertos e estudados por ele são os relógios naturais mais estáveis do Universo, e que Taylor e Thibault Damour investigaram a mudança do período orbital do PSR 1913 + 16. É interessante registrar que, em 1992⁴⁹, Alexander Wolszczan (n.1942) e Dale A. Frail (n.1961) 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 1994⁵⁰, anunciou a existência de um terceiro planeta girando em torno desse PSR 1257 + 12, com um período de 25, 34 dias.

Em 1992⁵¹, A. Abramovici, W. E. Althouse, Ronald (“Ron”) W. P. Drever (n.1931), Y. Gursel, S. Kawamura, F. J. Raab, D. Shoemaker, L. Sievers, R. E. Spero, Kip Stephen Thorne (n.1940), Rochus E. (“Robbie”) Vogt, Rainer (“Rai”) 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 as OG de origem cósmica. [É interessante registrar que a concepção inicial do LIGO foi apresentada por Weiss, em 1968, no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e imediatamente aceita por muitos físicos, dentre eles: Drever, Thorne e Vogt]. Ele foi construído em 1999 e opera com dois observatórios (em forma de L, com 4 km de comprimento de lado) 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 das OG, uma vez que esta viaja, teoricamente, com a velocidade da luz no vácuo ($c = 300.000 \text{ km/s}$). Observe-se que o LIGO, que é composto de interferômetros do *Tipo Michelson-Morley* (1887) e com *Cavidades Fabry-Pérot* (1898), começou a operar em 23 de agosto de 2002, mas somente foi finalizado em 2010 por falta de investidores.

Em 1994⁵², os físicos, os brasileiros José Carlos Nogueira Araújo (n.1968), José Antônio de Freitas Pacheco (n.1942) e Cattani, e o argentino Jorge Emiliano Horvath (n.1959) analisaram as OG emitidas por *pulsares cambaleantes* (“wobbling pulsars”).

Em 2000⁵³, o 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.

⁴⁷ *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 341, p. 117, 1982.

⁴⁸ *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), v. 79, p. 1054, 1991.

⁴⁹ *Nature*, v. 355, p. 145, 1992.

⁵⁰ *Science*, 264, p. 538, 1994.

⁵¹ *Science*, 256, p. 325, 1992.

⁵² *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 271, p. L31, 1994.

⁵³ *Physical Review D*, v. 63, article number (a.n.) 023007, 2000.

Em 2001⁵⁴, 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 terrestres, inclusive o VLBI (“Very Large Baseline Interferometry”) e, por intermédio da TRG encontraram para a *velocidade da OG* o valor: $(1,06 \pm 0,21) \times c$. Os resultados dessa medida foram apresentados por eles, em 2003⁵⁵, em 2006⁵⁶, em 2007⁵⁷ e, em 2009⁵⁸, 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 1958⁵⁹ e 1961⁶⁰, porém só muito utilizado a partir de 1974, usando três antenas⁶¹.

Em 2002, os astrofísicos norte-americanos Andrew E. Lange (1957-2010), James (“Jamie”) J. Bock [*California Institute of Technology (Department of Physics)* (CALTECH-DP) e do *Jet Propulsion Laboratory (JPL)*], Brian G. Keating [*University of California (Department of Physics)*, em San Diego (UC/SD-DP)] e William L. Holzapfel (n.1965) [*University of California (Department of Physics)*, em Berkeley (UCBe/DP)] começaram a desenvolver um projeto para a construção de um radiotelescópio para medir a polarização da *Cosmic Microwave Background* [“Radiação Cósmica de Fundo de Micro-onda” (RCFM)], projeto esse conhecido como *Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization* (BICEP) (“Imageamento de Fundo da Polarização Cósmica Extragaláctica”). O principal objetivo desse projeto era o de medir os *modos-B* (“componentes torcidos”) de polarização da RCFM.

Antes de prosseguirmos, vejamos a razão pela busca desses *modos-B*. Segundo o astrofísico norte-americano Lawrence Maxwell Krauss (n.1954) [Cicatriz do Big Bang⁶²], logo em seu começo, o Universo sofreu um período de expansão muito acelerada, isto é, uma *inflação*, durante o qual o Universo passou do tamanho de um próton [cujo raio (r_p) vale: $r_p \approx 0,85 \times 10^{-15}$ m] para o tamanho de uma uva (aumentou cerca de 10^{50} vezes), durante o período de 10^{-35} s contado a partir do *Big Bang* (BB), e emitiu a RCFM. Porém, essa radiação primordial só passou a ser observável quando o Universo começou a esfriar suficientemente pela primeira vez, no tempo $\approx 38 \times 10^4$ anos depois do Big Bang (que aconteceu há $13,8 \times 10^9$ anos), dando

⁵⁴ **The Astrophysical Journal**, v. 556, p. L1, 2001.

⁵⁵ **The Astrophysical Journal**, v. 598, p. 704, 2003.

⁵⁶ **Foundations of Physics**, v. 36, p. 1244, 2006.

⁵⁷ **General Relativity and Gravitation**, v. 39, p. 1583, 2007.

⁵⁸ **The Astrophysical Journal**, v. 699, p. 1395, 2009.

⁵⁹ **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 118, p. 276, 1958.

⁶⁰ **Proceedings of the Physical Society**, v. 78, p. 596, 1961.

⁶¹ en.wikipedia.org/wiki/LIGO; Edward_Formalont; Sergei_Kopeikin, 1974.

⁶² **Scientific American Brasil**, v. 150, p. 46, Nov. 2014.

início a *era inflacionária do Universo*. Por essa ocasião, prótons livres capturaram elétrons livres formando átomos neutros, tornando o Universo transparente para a RCFM, radiação essa que chegou até nós. As primeiras tentativas para estimar o seu valor [em termos de temperatura absoluta (T)], ocorreram na década de 1940, devido ao trabalho do físico russo-norte-americano George Antonovich Gamow (1904-1968) sobre a formulação de um modelo para explicar a expansão do Universo observada pelo astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953), em dezembro de 1924. Desse modo, Gamow e os físicos norte-americanos Ralph Asher Alpher (1921-2007) e Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) (de origem alemã) desenvolveram o famoso *modelo cosmológico $\alpha\beta\gamma$* (α -Alpher, β -Bethe, γ -Gamow), em 1948⁶³, que previa o valor (≈ 25 K) para a RCFM. Ainda em 1948⁶⁴, Alpher e físico norte-americano Robert C. Herman (1922-1997), alunos de Gamow, estimaram (≈ 5 K) para aquele valor. Note-se que a RCFM só foi medida em maio de 1964⁶⁵ [$(3,5 \pm 1)$ K], pelos radio-astrônomos norte-americanos Arno Allan Penzias (n.1933; PNF, 1979) (de origem alemã) e Robert Woodrow Wilson (n.1936; PNF, 1978).

Ainda segundo Krauss, se na ocasião da *inflação cósmica* já existissem as OG, estas poderiam distorcer o espaço numa direção preferencial e, desse modo, a RCFM poderia ser polarizada. Acontece, no entanto, que a *polarização* dessa radiação primordial pode também ocorrer por outros efeitos, como, por exemplo, por sua *flutuação da temperatura*. Assim, a *polarização* da RCFM pode apresentar dois modos: *modo-B* (causada pelas OG) e *modo-E* (outras causas, como, p.e.: *flutuação de temperatura* e radiação emitida por *poeira polarizada* de nossa Via-Láctea). É interessante destacar que como a *anisotropia térmica* [oscilações em torno de $30 \mu\text{K}$ ($1 \mu = 10^{-6}$)] da RCFM, foi registrada pelo satélite *Cosmic Background Explorer* (COBE) (“Explorador da Radiação Cósmica de Fundo”) (lançado em 18 de novembro de 1989), em 1992, os astrofísicos apresentavam esses dois *modos* por intermédio de uma *relação r* (tensor/escalar) entre um possível sinal de *polarização por onda gravitacional* e a intensidade do sinal da *flutuação de temperatura* medido.

Voltemos ao BICEP. O BICEP1, basicamente desenvolvido na UC/SD-DP, foi instalado no *Observatório Astronômico Americano*, na *Amundsen-Scott South Pole Station* (A-SSPS), localizada no Polo Sul, começou a funcionar em janeiro de 2006 e ficou ativo até dezembro de 2008. Durante esse período de funcionamento, o BICEP1 observou o céu nas frequências de: a) 100 GHz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$; $1 \text{ Hz} = 1 \text{ ciclo/segundo}$), com a resolução de $0,93^\circ$ e constituído de um par de 25 sensores (*pixels*) cada; b) 150 GHz, com a resolução de $0,60^\circ$ e composto de um par de 24 sensores (*pixels*) cada. Esses sensores foram projetados para detectar os *modos-B* da polarização da RCFM. Registre-se que o BICEP 1, além dos pesquisadores da UC/SD-DP e do JPL, contou com a colaboração de pesquisadores de 23 instituições de

⁶³ *Physical Review*, v. 73, p. 803, 1948.

⁶⁴ *Physical Review*, v. 74, p. 1198, 1948.

⁶⁵ *Astrophysical Journal*, v. 142, p. 419, 1965.

pesquisa (15 dos Estados Unidos da América; 2 da França, 2 do Canadá; 1 da África do Sul; 1 do Chile; 1 do Reino Unido; e 1 do Japão).

É oportuno destacar que, em 11 de junho de 2008, a NASA lançou o foguete DELTA II7920-H levando a bordo o *Fermi Gamma-ray Burst Monitor* (GBM) ou *Gamma-ray Large Area Space Telescope* (GLAST), com o objetivo de observar raios gama (γ).

A partir de 2008, o programa BICEP começou a elaborar o BICEP 2 [com a participação de novos colaboradores, como os cosmólogos norte-americanos John M. Kovac (n.1970), do *Harvard-Smithsonian Centre for Astrophysics* (H-SCA), e Chao Lin Kuo, da *Stanford University* [*Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory* (SU-KIPAC/SLAC)], usando o mesmo telescópio-polarímetro, agora com outros detectores instalados usando uma tecnologia inteiramente nova, ou seja, um arranjo (bolômetro) contendo um sensor de transição de borda [*Transition Edge Sensor* (TES)] colocado no plano focal da lente de 26 cm de abertura, contendo um par de 256 sensores (*pixels*) cada, operando em 150 GHz e com uma resolução de 0.92° . Ele foi instalado em 2009, na *Amundsen-Scott South Pole Station* (A-SSPS), na Antártida, perto do Polo Sul Terrestre e funcionou entre 2010 e 2012.

É interessante registrar que, segundo o grupo da *European Space Agency* (ESA), responsável pelo *Satélite Planck* (lançado em 14 de maio de 2009), r é representado pelo intervalo: (0,00-0,13). Note-se que o *Planck Collaboration* (com 264 colaboradores sendo alguns do BICEP), apresentou seus resultados em 20 de março de 2013 [*arXiv:1303.5076* (astro-ph.CO)] e revisado em 20 de março de 2014 [*arXiv:1303.5076v3* (astro-ph.CO)] e submetido à publicação na revista *Cosmology and Nongalactic Astrophysics*, com o artigo intitulado: Planck 2013 Results. XVI. Cosmological Parameters.

A partir de 2013, o grupo do BICEP começou a publicar seus resultados, com destaque para dois deles:

1) O BICEP1 (composto de 34 pesquisadores) encontrou, em 04 de outubro de 2013 [*arXiv:1310.1422v2* (astro-ph.CO)], o seguinte valor para a importante relação r , qual seja: $r = 0,03$ ($\uparrow+0,27$ $\downarrow-0,23$) ou $r < 0,70$ com CL = 95%. No entanto, o espectro do *modo-B* é consistente com o valor zero (0), ou seja: ausência de OG. Note-se que esse artigo foi publicado em 14 de fevereiro de 2014⁶⁶;

2) O BICEP2 (composto de 47 pesquisadores) encontrou, em 14 de março de 2014 [*arXiv:1403.3885v1* (astro-ph.CO)] que: $r = 0,20$ ($\uparrow+0,07$ $\downarrow-0,05$), acima do limite máximo para r (que é: $r = 0,13$, como vimos acima). Como esse resultado indicava que o valor $r = 0$ era desfavorável no nível de CL = 7σ [$5,9\sigma$, subtraído o fundo (*foreground*), com 5σ representando menos do que um em um milhão de chances de erro], portanto, tal resultado sugeria a existência de OG. Esse trabalho do BICEP2 foi publicado em 19 de junho de 2014⁶⁷.

⁶⁶ *Astrophysical Journal*, v. 783, p. 67, 2014.

⁶⁷ *Physical Review Letters*, v. 112, a.n. 241101, 2014.

Note-se que o resultado acima foi analisado em uma reunião da *American Astronomical Society*, realizada em 05 de junho de 2014, ocasião em que o astrofísico norte-americano David Nathaniel Spergel (n.1961), professor da PU [*Department of Astrophysical Sciences* (PU-DAS)], arguiu que o *modo-B* detectado pelo BICEP2 poderia ser resultado da emissão térmica polarizada (*modo-E*) pela poeira (*dust*) das estrelas de nossa Galáxia. Em 22 de setembro de 2014, o *Planck Collaboration* (com 400 colaboradores, sendo alguns do BICEP) confirmou a conjectura de Spergel [*arXiv:1409.5738v1* (astro-ph.CO)], submetido à publicação na revista *Cosmology and Nongalactic Astrophysics*, com o artigo intitulado: Planck Intermediate Results. XXX. The Angular Power Spectrum of Polarized Dust Emission at Intermediate and High Galactic Latitudes.

Registre-se que logo que o BICEP2 terminou sua missão, em 2012, o *BICEP Collaboration* começou o BICEP3 (com 29 pesquisadores), usando um telescópio-polarímetro (do tipo do *Keck Array*, mas com uma abertura de 55 cm), contendo um par de 1280 sensores (*pixels*) cada, operando em 95 GHz e com uma resolução de 0.37° , proposto em 22 de julho de 2014 [*arXiv:1407.5928v1* (astro-ph.CO)]. Note-se que, em fevereiro de 2015, a colaboração BICEP2/Keck/Planck confirmou mais uma vez a conjectura de Spergel, isto é: a ausência de OG [*arXiv:1502.00612v1* (astro-ph.CO)]. É interessante registrar que o *Keck Array* (consiste de cinco polarímetros similares ao BICEP2), foi projetado inicialmente por Lange e pertence ao A-SSPS. Quando esta Estação Astronômica Norte-Americana foi inaugurada, em 1995, nas *Montanhas Usarp*, na Antártica, o observatório contendo o *Keck Array* recebeu o nome de *Martin A. Pomerantz Observatory* (MAPO), para homenagear o físico norte-americano Martin Arthur Pomerantz (1916-2008), então Diretor do *Bartol Research Institute*, da *University of Delaware*, e o líder no desenvolvimento da Astronomia Norte-Americana na Antártica. O *Keck Array* funcionou entre 2011 e 2013. Para maiores detalhes sobre as OG, ver: <wikipedia.org/BICEP_KickArray; www.searadaciencia.ufc.br/curiosidadesdafisica>).

Vejamos agora como surgiu o conceito de BN. A *Métrica de Schwarzschild* (MS) vista acima vale para pontos fora (e sem matéria) da superfície do corpo (de raio R e massa M) que produziu o campo gravitacional como (p. e: uma estrela) e com a seguinte condição: $r > 2 G M$. E para pontos internos, isto é: $r < 2 G M$? Para examinar essa questão, vejamos o estudo a *evolução estelar*. Em 1914, o astrônomo inglês Sir Arthur Eddington (1882-1944) escreveu o livro intitulado *Stellar Movements and the Structure of the Universe* (Cambridge University Press), no qual apresentou uma verdadeira sùmula de todo o conhecimento existente sobre a distribuição e dinâmica das estrelas nos diversos tipos de nebulosas. Logo depois, em 1915⁶⁸, estimou que a massa total (M) de um aglomerado (*clusters*) de estrelas em equilíbrio estatístico, como sendo dada por $M \approx 2 R_{cl} \langle v^2 \rangle / G$, sendo R_{cl} um adequado raio que depende da distribuição de massa do aglomerado e $\langle v^2 \rangle$ representa a *velocidade média quadrática* das estrelas do aglomerado. Em 1916⁶⁹, Eddington apresentou a ideia de que o equilíbrio estelar deve-se ao

⁶⁸ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 76, p. 525, 1915.

⁶⁹ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 77, p. 16, 1916.

balanço entre a atração gravitacional e as pressões: gasosa e de radiação. Já em 1920⁷⁰, em uma Reunião da *Sociedade Britânica para o Progresso da Ciência*, Eddington propôs que o mecanismo de geração de energia das estrelas decorria da conversão (fusão) de quatro átomos de hidrogênio (H) em um núcleo de hélio (He). Ainda nessa Reunião, ele afirmou que, devido a essa conversão, a estrela [principalmente a *anã branca*, que é o objeto celeste resultante do processo evolutivo de estrelas de até 10 M_S (M_S = massa do Sol)] perde energia e contrai-se provocando um aumento de temperatura e, conseqüentemente, esse tipo de estrela radiaria intensamente de acordo com a teoria clássica da relação entre energia térmica (E) e temperatura absoluta (T): $E = \sigma T^4$, onde σ é a *constante de Stefan* (1879)-*Boltzmann* (1884).

Em 1924⁷¹, Eddington retomou a ideia que tivera, em 1916, sobre o equilíbrio estelar e mostrou que nas *anãs brancas* o campo gravitacional é tão forte que produz uma grande contração, reduzindo-lhe o tamanho e, em consequência disso, os átomos perdem a maioria de seus elétrons, restando um gás altamente ionizado formando assim um estado de *matéria degenerada*, com uma densidade média de 10^8 kg/m³. Nesse trabalho, Eddington calculou como sendo da ordem de 20 km/s o desvio para o vermelho do comprimento de onda (λ) de um raio luminoso emitido por uma estrela desse tipo.

Contudo, esse *Modelo de Eddington* apresentava uma grande dificuldade, pois a *relação massa \times luminosidade* por ele utilizada indicava que, por apresentar uma alta temperatura, uma *anã branca* deveria irradiar intensamente de acordo com a relação entre energia térmica e temperatura vista acima. Isso, no entanto, não era observado. Essa dificuldade foi contornada pelo matemático inglês Sir Ralph Howard Fowler (1889-1944), em 1926⁷², ao mostrar que naquele tipo de estrela, no processo de converter H em He, ela perde energia e contrai-se até que a pressão interna (p) torna-se tão grande, o bastante para causar o colapso de sua estrutura atômica, configurando um estado de *matéria degenerada* formada apenas de elétrons. Desse modo, usando a *estatística de Fermi-Dirac* (1926), Fowler demonstrou que o puxão gravitacional ocorrido na estrela é equilibrado pela repulsão dos elétrons “degenerados”, repulsão essa decorrente do *princípio da exclusão de Pauli* (1925). Desse modo, para essa matéria “degenerada”, Fowler encontrou a seguinte relação entre p e a densidade (ρ): $p \propto \rho^{5/3}$, e que essa *Equação de Estado* independe de T. Registre-se que foi ainda em 1926, que Eddington publicou seu livro *The Internal Constitutions of the Stars* (Cambridge University Press), no qual apresenta suas pesquisas sobre a evolução estelar, iniciadas em 1914.

O *Modelo de Eddington-Fowler* foi modificado pelo astrofísico indiano-norte-americano Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995; PNF, 1983), entre 1931 e 1932⁷³, ao levar em

⁷⁰ *Observatory*, v. 43, p. 353, 1920.

⁷¹ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 84, p. 308, 1924.

⁷² *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 87, p. 114, 1926.

⁷³ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 91, p. 456, 1931; *Philosophical Magazine*, v. 11, p. 592, 1931; *Astrophysical Journal*, v. 74, p. 81, 1931; *Zeitschrift für Astrophysik*, v. 5, p. 321, 1932.

conta os efeitos relativísticos na *Equação de Estado* do gás de elétrons “degenerados”. Assim, quando a estrela se torna suficientemente densa, a repulsão eletrônica pauliana não será capaz de vencer a atração gravitacional. Desse modo, Chandrasekhar descobriu que nenhuma *anã branca* pode ter massa maior do que 1,44 M_{\odot} , valor esse que ficou conhecido como *limite de Chandrasekhar*. Note-se que, em 1938⁷⁴, Bethe e o físico norte-americano Charles Louis Critchfield (1910-1994) apresentaram o famoso *ciclo Hidrogênio-Hidrogênio* (H-H) como gerador da energia das estrelas tão (ou menos) massivas quanto o Sol. Ainda em 1938⁷⁵, o físico alemão Barão Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) propôs o igualmente famoso *ciclo Carbono-Nitrogênio-Oxigênio-Carbono* (C-N-O-C) como gerador de energia das estrelas mais massivas do que o Sol, ciclo esse confirmado por Bethe, em 1939⁷⁶.

Em 1938⁷⁷, os físicos norte-americanos Julius Robert Oppenheimer (1904-1964) e Robert Serber (1909-1997) e, em 1939, Oppenheimer, com a colaboração do físico russo-norte-americano George Michael Volkoff (1914-2000)⁷⁸ e do físico-norte-americano Hartland Snyder (1913-1962)⁷⁹ mostraram que, quando todas as fontes termonucleares de energia são exauridas de uma estrela suficientemente pesada, então a contração gravitacional continuará indefinidamente até seu colapso total. Como esse *colapso gravitacional* relaciona-se com o *Raio de Schwarzschild* (R_{Sch}), ele passou a ser conhecido como a *Singularidade de Schwarzschild* (SS).

Em 1942⁸⁰, Chandrasekhar e o físico brasileiro Mário Schenberg (1914-1990) apresentaram uma análise da evolução do Sol e de estrelas semelhantes que compõem a chamada *sequência principal* do *Diagrama de Hertzsprung* (1911) – *Russell* (1914). Nessa análise, na qual há um estudo da luminosidade desse tipo de estrela em função de sua massa, basicamente, foi verificado o que acontecia quando fosse queimado todo o H do centro dessas estrelas. Ainda nesse trabalho eles mostraram que não existe estrela estável na qual o caroço de He contém mais de 10% da massa da estrela. Esse resultado, conhecido como *Limite de Schenberg-Chandrasekhar*, explica a formação de estrelas vermelho-gigantes durante o curso da evolução estelar

Em 1957, o físico norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2008) discutiu com o físico e matemático norte-americano Martin David Kruskal (1925-2006) a ideia de contornar a dificuldade encontrada no tratamento matemático do espaço-tempo na região em torno da SS. Com efeito, à medida que ocorre o *colapso estelar*, a estrela decresce rapidamente de tamanho até uma distância crítica de seu centro, distância essa conhecida, conforme vimos acima, como

⁷⁴ *Physical Review*, v. 54, p. 248, 1938.

⁷⁵ *Physikalische Zeitschrift*, v. 39, p. 633, 1938.

⁷⁶ *Physical Review*, v. 55, p. 434, 1939.

⁷⁷ *Physical Review*, v. 54, p. 540, 1938.

⁷⁸ *Physical Review*, v. 55, p. 374, 1939.

⁷⁹ *Physical Review*, v. 56, p. 455, 1939.

⁸⁰ *Astrophysical Journal*, v. 96, p. 161, 1942.

o R_{Sch} , de modo que, nessa situação, a luz paira acima da estrela. Assim, o volume esférico no espaço-tempo traçado com esse raio por essa luz é chamado de *horizonte de eventos da SS* (hoje, *horizonte de eventos do buraco negro*). Em 1963⁸¹, o matemático neozelandês Roy Patrick Kerr (n.1934) encontrou uma nova métrica (conhecida como *Métrica de Kerr*, e que significa uma generalização da MS) que representava objetos colapsados gravitacionalmente rotativos (com spin) e descarregados. Em 1965⁸², o físico norte-americano Ezra Ted Newman (n.1929) e seus colaboradores W. E. Cough, K. Chinnapared, A. Exton, A. Prakash e R. J. Torrence descreveram *buracos negros rotativos e carregados*, por intermédio de uma métrica, hoje conhecida como *Métrica de Kerr-Newman*. Vejamos como apareceu o nome desses *objetos colapsados gravitacionalmente*.

Em agosto de 1967, a astrônoma irlandesa Susan Jocelyn Bell Burnell (n.1943), então estudante do astrônomo inglês Antony Hewish (n.1924; PNF, 1974), descobriu um objeto celeste na *nebulosa de Caranguejo* que emitia vibrações regulares de ondas de rádio, com o período aproximado de 1,337 s, e que, jocosamente, chamou-o de LGM (*Little Green Man*) (“Pequeno Homem Verde”). No outono daquele ano, o físico italiano Vittorio M. Canuto (n.1937), então chefe administrativo do *Goddard Institute for Space Studies*, da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), sediado em New York, convidou Wheeler para apresentar uma conferência objetivando uma possível interpretação dessa descoberta. Em certo instante de sua exposição, na qual argumentava sobre a possibilidade de o centro de tais objetos ser um *objeto colapsado completamente pela gravidade*, alguém da plateia sugeriu um nome mais compacto: - *How about black hole?* (“Que tal buraco negro?”). Como procurava desesperadamente por um nome compacto para descrever aquela situação física, Wheeler aceitou a sugestão e passou a adotá-la oficialmente, no dia 29 de dezembro de 1967, na conferência realizada na *Sigma X-Phi Beta Kappa*, sediada também em New York. Contudo, na literatura científica, o nome *buraco negro* (BN) (“black hole”) apareceu nos artigos que Wheeler publicou no *American Scholar* 37, p. 248 e no *American Scientist* 56, p. 1, ambos em 1968. [John Archibald Wheeler and Kenneth Ford, *Geons, Black Holes and Quantum Foam* (W. W. Norton & Company, 1998)]. É oportuno destacar que existem evidências observacionais de que o centro das galáxias seja um BN como, por exemplo, o de nossa *Via Láctea* e que teria uma massa em torno de $4,3 \times 10^6 M_s$. Por exemplo, no dia 27 de fevereiro de 2013, astrônomos da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e da *European Space Agency* (ESA) anunciaram que haviam medido a velocidade de rotação de um BN supermassivo ($2 \times 10^6 M_s$) no centro da galáxia em espiral NGC 1365⁸³.

⁸¹ *Physical Review Letters*, v. 11, p. 237, 1963.

⁸² *Journal of Mathematical Physics*, v. 6, p. 918, 1965.

⁸³ Mais detalhes sobre os BN, ver: Charles W. Misner, Kip S. Thorne and John Archibald Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman and Company, 1973); Kip S. Thorne, *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (W. W. Norton & Company, 1994); wikipedia/black_hole; www.nasa.gov/nustar.

V. Detecção das Ondas Gravitacionais

Vejamos agora como aconteceu a detecção das OG. Segundo vimos no *Resumo* deste artigo, em 11 de fevereiro de 2016⁸⁴, por ocasião de uma Conferência realizada na NSF, em Washington, D.C., o físico norte-americano David Reitze (n.1961), Diretor Executivo do LIGO anunciou que dois LIGOS da *Scientific Collaboration* (LSC) haviam detectado (em 14 de setembro de 2015) *Ondas Gravitacionais* (OG) provindas da fusão (*merger*) de um binário de *buracos-negros* (BN) com cerca de $62 M_{\odot}$ ($\approx 12,5 \times 10^{31}$ kg) e a uma distância $1,2 \times 10^9$ anos-luz ($\approx 1,2 \times 10^{25}$ m) da Terra, evento esse conhecido como GW150914. Note-se que essas OG (“ondas no espaço-tempo”) produziram expansões e contrações nos lados dos dois LIGOS da LSC (cujos braços estariam em posição favorável para a medida, inclusive com uma frequência de 250 Hz pouco antes do *merger*), registradas em cada um de seus detectores (um em Hanford e o outro em Livingston) e com uma diferença de tempo de 7×10^{-3} s⁸⁵. É interessante destacar que este resultado corresponde ao *confidence limit* (“limite de confiança”): $CL > 5,1 \sigma$ (99,9999%, significando ser menor do que *um* evento em cada 203.000 anos). É também oportuno destacar que o gráfico abaixo é muito parecido pelo deduzido por Tiomno, Davis e Ruffini, em 1972 (op. cit.).

Por sua vez, existe outra interpretação para esse evento (GW150914). Vejamos qual. Com uma visão instantânea de 70% do céu e 0,4 s depois do mesmo, o GBM detectou a presença de uma fonte fraca de energia eletromagnética acima de 50 keV e com a duração de 1 s. No artigo publicado pelo GBM [*arXiv:1602.03920v3* (astro-ph.HE)], em seu *Abstract*, seus 29 principais pesquisadores dizem que essa observação parece não estar conectada com nenhuma outra atividade astrofísica (solar, terrestre ou magnetosférica). Porém, por ser consistente com a direção do GW150914, tal observação sugere que tenha ocorrido uma *erupção de raios gama* (γ) e, portanto, incompatível com a *fusão de buracos negros*. Em vista disso, esses pesquisadores passaram a calcular a luminosidade (L) correspondente a emissão de raios-X duros, entre 1 keV e 10 MeV, e encontraram que: $L = [1,8^{+1,5}_{-1,0} \times 10^{49}$ (erg/s)]. Esse valor, ainda segundo os autores, tem uma confiabilidade de 75% e, mais ainda, assumindo que os dois eventos (LIGO/GBM) sejam correspondente ao mesmo GW150914, uma colaboração futura desses dois observatórios possa reduzir a 90% o intervalo de confiança numa locação do céu de 601 para 199 deg². Observe-se que deg² [$\equiv (^{\circ})^2$] (“graus quadrados”) é uma medida de ângulo sólido, dado pela expressão: $(\pi / 180)^2 \approx 3,0462 \times 10^{-4}$ esferoradianos.

É oportuno registrar que, em 01 de junho de 2016, os físicos J. Greiner, J. M. Burgess, V. Savchenko e H.-F. Yu escreveram um artigo intitulado *On the GBM event seen 0.4 sec after GW 150914* [*arXiv:1606.00314v1* (astro-ph.HE)], no qual afirmaram que o referido evento não foi gerado pela emissão de OG, mas, somente, por fótons emitidos.

⁸⁴ *Physical Review Letters*, v. 116, article number 061102 (12/02/2016), 2016.

⁸⁵ Para detalhes sobre como ocorrem os registros nos detectores, ver: Cattani [*aXiv:1004.2470v1* (gr-qc)] (op. cit.).

Uma segunda observação de OG foi feita pelo LIGO em 26 de dezembro de 2015. Esse evento denominado de GW151226 foi publicado na revista *Physical Review Letters* 116, 241103 (15/06/2016). O sinal detectado identicamente ao do evento GW150914 foi gerado pela coalescência de um sistema binário formado por dois *buracos negros* (BN) com massas $\sim 14.2 M_{\odot}$ e $\sim 7.5 M_{\odot}$. A fonte de OG estaria localizada a uma distância de ~ 440 Mpc da Terra. A onda detectada durou cerca de 1 s e a frequência das ondas variou de 35 a 450 Hz.

Acreditamos que essa segunda observação, o evento GW151226, feita pelo LIGO, veio confirmar que realmente as OG foram detectadas, descartando a dúvida apresentada pelo GBM citado acima.