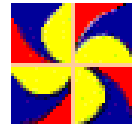




CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br



Detecção das Ondas Gravitacionais – Parte 2: Histórico dos Buracos Negros.

Neste verbete, veremos como surgiu o conceito de *buraco negro* (BN). A *Métrica de Schwarzschild* (MS) vista na Parte 1 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 súpula de todo o conhecimento existente sobre a distribuição e dinâmica das estrelas nos diversos tipos de nebulosas. Logo depois, em 1915 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 76, p. 525), estimou que a massa total (M) de um aglomerado (*clusters*) de estrelas em equilíbrio estatístico, como sendo dada por $M \approx 2 R_{ce} \langle v^2 \rangle / G$, sendo R_{ce} 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 1916 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77, p. 16), Eddington apresentou a ideia de que o equilíbrio estelar deve-se ao balanço entre a atração gravitacional e as pressões: gasosa e de radiação. Já em 1920 (*Observatory* 43, p. 353), 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 $10 M_{\odot}$ (M_{\odot} = 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 1924 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **84**, p. 308), 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/m^3 . Nesse trabalho, Eddington calculou com 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 1926 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **87**, p. 114), 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 1932 [*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **91**, p. 456 (1931); *Philosophical Magazine* **11**, p. 592 (1931); *Astrophysical Journal* **74**, p. 81 (1931); e *Zeitschrift für Astrophysik* **5**, p. 321 (1932)], ao levar em 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 1938 (*Physical Review* **54**, p. 248), 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 1938 (*Physikalische Zeitschrift* **39**, p. 633), 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 1939 (*Physical Review* **55**, p. 434).

Em 1938 (*Physical Review* **54**, p. 540), 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) (*Physical Review* **55**, p. 374) e do físico-norte-americano Hartland Snyder (1913-1962) (*Physical Review* **56**, p. 455) 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 1942 (*Astrophysical Journal* **96**, p. 161), 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

acontecendo 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 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 1963 (*Physical Review Letters* **11**, p. 237), 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 1965 (*Journal of Mathematical Physics* **6**, p. 918), o físico norte-americano Ezra Ted Newman (n.1929) e seus colaboradores W. E. Couch, 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 $4,3 \times 10^6 M_{\odot}$. 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 ($2 \times 10^6 M_{\odot}$) no centro da galáxia em espiral NGC 1365. 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.



ANTERIOR

SEGUINTE