



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



Radiação Hawking.

Em 27 de novembro de 1783, o filósofo natural e geólogo inglês John Michell (1724-1793) discutiu na *Royal Society of London* a possibilidade de estrelas suficientemente compactas parecerem totalmente escuras. Em 1795, o matemático e astrônomo francês Pierre Simon, Marquês de Laplace (1749-1827), em seu célebre trabalho intitulado **Exposition du Système du Monde** ("Exposição do Sistema do Mundo"), voltou a mencionar essa mesma possibilidade usando a Mecânica Celeste Newtoniana. Em 1915 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* 2, p. 778; 799; 831; 844), o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) formulou a Teoria Geral da Relatividade e, ao aplicá-la ao problema da atração gravitacional dos corpos, chegou à conclusão de que essa atração decorria da curvatura do espaço-tempo provocada pela presença da energia-matéria que induz nesse espaço-tempo uma geometria não-euclidiana. Esse resultado é traduzido pela famosa **equação de Einstein**: $G_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}$, onde $G_{\mu\nu}$ é o **tensor de curvatura de Einstein**, $T_{\mu\nu}$ é o **tensor momento-energia**, G é a **constante gravitacional de Newton-Cavendish** e c é a velocidade da luz no vácuo. É oportuno esclarecer que Einstein, em 1917 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* 1, p. 142), introduziu o **termo cosmológico** ($\Lambda g_{\mu\nu}$, sendo $g_{\mu\nu}$ o **tensor métrico**) ao primeiro termo de sua equação, tomando a forma ($G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}$, de caráter puramente geométrico, para criar um modelo de Universo estático, então observável, a fim de contrabalançar a atração gravitacional em escalas cósmicas.

Hoje, esse **termo cosmológico** tem um outro significado físico (${}^{\rho}_{\text{vac}}g_{\mu\nu}$, sendo ${}^{\rho}_{\text{vac}}$ a **densidade de energia do vácuo quântico**) e é acrescentado ao segundo membro da equação acima, ou seja:

$G_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)(T_{\mu\nu} + {}^{\rho}_{\text{vac}}g_{\mu\nu})$ para explicar a aceleração da expansão do Universo, observada em 1998, nas supernovas do *tipo Ia*, que são explosões termonucleares de estrelas anãs brancas com 1,4 vez a massa do Sol. Registre-se que, embora o **termo cosmológico e a densidade de energia do vácuo quântico** sejam matematicamente equivalentes, conceitualmente eles são bem diferentes: o primeiro é uma propriedade do espaço-tempo e a segunda é uma propriedade energética do vácuo quântico que deriva de pares virtuais de partículas e antipartículas, conforme se pode ver no artigo de L. M. Krauss e M. S. Turner, *Scientific American Brasil* 29, p. 42 (2004).

Em 1916 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* 1, p. 189; 424), o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) encontrou uma solução para a equação de Einstein e que apresentava a célebre divergência conhecida como o raio de Schwarzschild, dado por: $r = 2MG/c^2$, onde M é a massa de uma partícula puntiforme. Observe-se que essa solução ficou conhecida como métrica de Schwarzschild. Mais tarde, entre 1938 e 1939, o físico norte-americano Julius Robert Oppenheimer (1904-1964), com a colaboração dos também físicos norte-americanos Robert Serber (1909-1997) [*Physical Review* 54, p. 540 (1938)], George Michael Volkoff (1914-2000) (de origem russa) [*Physical Review* 55, p. 374 (1939)] e Hartland Snyder (1913-1962) [*Physical Review* 56, p. 455 (1939)], 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, ele passou a ser conhecido como a singularidade de Schwarzschild.

Em maio de 1952, o físico norte-americano John Archibald Wheeler (n.1911) se preparava para ensinar a Teoria da Relatividade no Departamento de Física da *Universidade de Princeton*, para o ano letivo 1953-1954. Nesse preparo, ele começou a desenvolver a idéia do **geon** (g de "gravidade", e de

"eletromagnetismo", e **on** da palavra raiz de "partícula"), uma "partícula" feita de luz e que poderia gerar um campo gravitacional. Assim, a luz representava um campo gravitacional feito inteiramente de campo eletromagnético, isto é, uma entidade "massiva sem massa". Em continuação, ele especulou a possibilidade de haver um fenômeno quântico que pudesse mudar a natureza do geon e, em consequência, ele passaria a irradiar energia. E mais ainda, para Wheeler, essa entidade poderia ser um estado de transição entre a "onda gravitacional Einsteiniana" e o "colapso gravitacional Oppenheimeriano".

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 segundos, e que, jocosamente, chamou-o de LGM (*Little Green Man*) ("Pequeno Homem Verde"). No outono daquele ano, o físico italiano Vittorio Canuto, então chefe administrativo do *Goddard Institute for Space Studies*, da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), sediado em New York, convidou Wheeler para fazer uma conferência objetivando uma possível interpretação dessa descoberta. Em um 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 platéia 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 Sociedade *Sigma X-Phi Beta Kappa*, sediada também em New York. Na literatura científica, o nome **black hole** ("buraco negro") apareceu nos artigos que Wheeler publicou no *American Scholar* 37, p. 248 e no *American Scientist* 56, p. 1, ambos em 1968. Essa história foi contada pelo próprio no livro que escreveu, em colaboração com o físico norte-americano Kenneth William Ford (n.1926) e intitulado **Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics** (W. W. Norton and Company, 1998).

Antes de esses objetos "colapsados pela gravidade" receberem a denominação de buraco negro, eles foram motivo de pesquisa por parte de vários físicos. Por exemplo, em 1963 (*Physical Review Letters* 11, p. 237), o matemático neozelandês Roy Patrick Kerr (n.1934) encontrou um conjunto de soluções das equações de Einstein que representavam objetos colapsados em rotação (que possuíam momento angular, isto é, spin), porém descarregados, soluções essas que descrevem a métrica do espaço-tempo em torno desses objetos. Observe-se que essa métrica de Kerr representa uma generalização da métrica de Schwarzschild. Logo em 1964, os físicos, o russo Yakov Borisovich Zel'dovich (1914-1987) (*Soviet Physics Doklady* 9, p. 915) e o austro-norte-americano Edwin Ernest Salpeter (n.1924) (*Astrophysical Journal* 140, p. 796), mostraram que a acreção de matéria em tornos desses objetos colapsados é uma grande fonte de energia. Em 1967 (*Physical Review* 164, p. 1776), o físico germano-canadense Werner Israel (n.1931) encontrou nas equações de Einstein uma solução indicando que um objeto colapsado estático deve ser esférico. Em 1969 (*Nuovo Cimento (Numero Speciale)* 1, p. 252), o físico inglês Roger Penrose (n.1931) encontrou objetos colapsados (agora denominados de buracos negros) Kerrianos no interior do **horizonte de eventos**, bem como mostrou que existe uma região em torno de um buraco negro, conhecida como ergosfera, na qual qualquer objeto que nela adentre poderá sofrer dois efeitos: ou desaparecerá em seu interior, ou será devolvido para fora dele com energia maior que tinha antes. É oportuno destacar que o **horizonte de eventos** é uma superfície no espaço-tempo traçada em torno do buraco negro. Essa superfície apresenta a propriedade de não deixar escapar nada de seu interior. Esse nome foi cunhado pelo físico austro-norte-americano Wolfgang Rindler, em 1956 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 116, p. 663). Um estudo mais detalhado sobre essa superfície, ver o artigo dos físicos brasileiros George Emanuel Avraam Matsas (n.1964) e o Daniel Augusto Turolla Vanzella (n.1975), *Ciência Hoje* 31(182), p. 28 (2002).

Em 1970 (*Physical Review Letters* 25, p. 1596), o físico grego Demetrios Christodoulou (n.1952) confirmou o "processo ou mecanismo Penrose" mostrando como um buraco negro descarregado e girante perde parte de sua massa. Também em 1970 (*Bulletin of the American Physical Society* 15, p. 76), Wheeler e o físico italiano Remo Ruffini (n.1943) apresentaram a conjectura de que o buraco negro é um objeto extremamente simples visto de fora, já que ele só pode influenciar os objetos a seu redor por intermédio de sua massa, carga e spin, e nada mais. Na década de 1970, essa conjectura foi demonstrada e ficou conhecida como o famoso Teorema: O buraco negro não tem cabelo, conforme foi denominado por Wheeler.

Ainda na década de 1970, novos resultados importantes sobre os buracos negros foram obtidos. Assim, logo em 1971 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 152, p. 75; *Physical Review Letters* 26, p. 1344), o astrofísico inglês Stephen William Hawking (n.1942) publicou dois trabalhos nos quais demonstrou, respectivamente, que qualquer buraco negro Kerriano tem sempre um eixo de simetria, e que a colisão de buracos negros provoca a emissão de radiação gravitacional. Nesse mesmo ano de 1971 (*Pisma Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 14, 270), Zel'dovich mostrou que um buraco negro Kerriano poderia emitir bósons (partículas de spin inteiro) espontaneamente. Em 1972 (*Lettere al Nuovo Cimento* 4, p. 737), o físico israelense Jacob D. Bekenstein (de origem mexicana) sugeriu que a área do horizonte de eventos de um buraco negro fosse a medida da entropia desse corpo celeste. Contudo, em 1973 (*Communications in Mathematical Physics* 31, p. 161), James A. Bardeen, Brandon Carter (n.1942) e Hawking mostraram que, se um buraco negro tivesse entropia, deveria, então, possuir também temperatura e, conseqüentemente, pelas Leis da Termodinâmica, deveria irradiar, o que contradizia o próprio conceito desse objeto cósmico. Desse modo, concluíram que a entropia de um buraco negro era infinita.

Como Zel'dovich havia demonstrado em 1971 que buracos negros Kerrianos poderiam emitir bósons espontaneamente, conforme vimos acima, ele e o físico russo Aleksandr Starobinsky sugeriram a Hawking, em setembro de 1973 [conforme o próprio Hawking registra em seu famoso livro **Uma Breve História do Tempo: Do Big Bang aos Buracos Negros** (Rocco, 1988)], que essa emissão espontânea decorria do *Princípio da Incerteza Heisenbergiano*, básico da Mecânica Quântica. Desse modo, procurando uma relação entre a Teoria da Relatividade Geral e a Mecânica Quântica, em 1974, Hawking publicou um artigo na *Nature* 248 (p. 30), intitulado *Black Hole Explosions?*, no qual apresentou a idéia de que os buracos negros poderiam criar e emitir partículas, tais como neutrinos ou fótons, em uma temperatura T_H , em graus Kelvin (K), conhecida como **temperatura Hawking**, cuja expressão é dada por: $T_H = \frac{\hbar \kappa}{2\pi m c k_B}$, onde κ é a gravidade superficial do horizonte de eventos, k_B é a constante de Boltzmann, e \hbar é a constante de Planck (h) dividida por 2π .

Essa idéia da emissão de partículas por parte de um buraco negro, hoje conhecida como **radiação Hawking**, foi completada por Hawking, em 1975 (*Communications in Mathematical Physics* 43, p. 199), em um trabalho no qual deduziu a célebre fórmula para a entropia de um buraco negro (S_{BN}) que, no caso de ele ser esfericamente simétrico, tem a forma:

$S_{BN} = 4\pi M^2 (k_B G / \hbar c)$, hoje conhecida como **fórmula de Bekenstein-Hawking**, expressão que claramente que a entropia por unidade massa (S_{BN}/M) é proporcional à massa M do buraco negro, confirmando o que Hawking havia sugerido em 1974, ou seja, que um buraco negro poderia irradiar. Registre-se que um resultado análogo a esse foi encontrado, ainda em 1975, em trabalhos independentes de Robert M. Wald (*Communications in Mathematical Physics* 45, p. 9) e L. Parker (*Physical Review D* 12, p. 1519).

É oportuno registrar a polêmica que se travou entre os físicos sobre essa **radiação Hawking**. Esta, segundo Hawking, decorria da seguinte visão heurística. Segundo a Mecânica Quântica (Teoria Quântica de Campos), pares de partículas-antipartículas virtuais são constantemente criados e imediatamente aniquilados no vácuo. Contudo, perto do horizonte de eventos de um buraco negro, devido à atração gravitacional, uma das partículas do par pode ser capturada pelo buraco negro enquanto a outra escapa constituindo aquela radiação. Ainda para Hawking, essa radiação ocorria aleatoriamente, ou seja, ela seria incapaz de carregar informação. Em 1996 (*Physics Letters B* 379, p. 99), Andrew Strominger e Cumrun Vafa publicaram um artigo no qual, usando a Teoria de Cordas, estudaram a origem microscópica de S_{BN} considerando que os buracos negros são corpos complexos, feitos de estruturas multidimensionais chamadas de p-branas. Assim, segundo esses físicos, a informação que cai dentro do buraco negro é armazenada em ondas naquelas estruturas e pode acabar vazando. Em 1997, Hawking e os físicos norte-americanos John P. Preskill e Kip S. Thorne (n.1940) fizeram uma aposta. Enquanto Hawking e Thorne acreditavam que toda a informação contida naquilo que caísse no interior dos buracos negros estava irremediavelmente perdida, Preskill achava que algum mecanismo da

Natureza poderia recuperá-la. Essa posição de Preskill também era defendida pelos físicos, o norte-americano Leonard Susskind, e o holandês Gerardus 't Hooft (n.1946; PNF, 1999). Em fevereiro de 2004 (*Journal of High Energy Physics* 2, 008), Gary T. Horowitz e Juan Maldacena sugeriram que a partícula de um dos pares virtuais formados pelo vácuo, no horizonte de eventos de um buraco negro, quando escapa deste carrega não apenas massa pura, mas também informação, uma vez que, devido à Mecânica Quântica (Teoria Quântica de Campos), ela está entrelaçada com a companheira que cai no buraco negro, a qual, por sua vez, fica também entrelaçada com um pedaço de matéria. Portanto, esse **processo (mecanismo) Horowitz-Maldacena** é responsável, em forma de **radiação Hawking**, pela informação desejada. É oportuno registrar que Hawking finalmente aceitou estar errado, em julho de 2004, em uma Conferência Internacional sobre Relatividade Geral realizada em Dublin, na Irlanda. Para maiores detalhes sobre essa "radiação" e a polêmica referida acima, ver os artigos dos físicos, os brasileiros Jorge Castiñeiras (Rodriguez) (n.1969) (de origem cubana), Luís Carlos Bassalo Crispino (n.1971) e Matsas, *Scientific American* 29, p. 50 (2004), bem como os artigos publicados no *Scientific American Brasil, Edição Especial*, p. 18 e Volume 31, p. 48 (2004), e *Gênios da Ciência - Stephen Hawking* (2006).

[Página Inicial](#)

[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)