



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



Efeito (radiação) de Fulling-Davies-Unruh.

Em verbete desta série, discutimos a **radiação de Hawking**. Neste, veremos um novo aspecto dessa radiação. Para isso, usaremos alguns resultados discutidos naquele verbete. Em 1916 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* **1**, pgs. 189; 424), o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) encontrou uma solução (conhecida como a **métrica de Schwarzschild**) para a **equação de Einstein** (1915) e que apresentava o célebre **raio de Schwarzschild**. Essa métrica é definida pela expressão:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2mG}{R}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2mG}{R}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2$$

onde 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 de raio ficou como o **raio de Schwarzschild**.

Mais tarde, 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**, ele passou a ser conhecido como a **singularidade de Schwarzschild**.

Segundo nos conta o físico norte-americano John Archibald Wheeler (n.1911) no livro intitulado **Geons, Black Holes & Quantum Foam: A Life in Physics** (W. W. Norton & Company, 1998) [escrito em colaboração com o físico norte-americano Kenneth William Ford (n.1926), em 1957, ele discutiu com Martin David Kruskal (n.1925) a idéia de contornar a dificuldade encontrada no tratamento matemático do espaço-tempo na região em torno dessa singularidade. 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 **raio de Schwarzschild**, 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 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 **métrica de Schwarzschild**) que representava objetos colapsados gravitacionalmente rotativos e descarregados, objetos esses que foram denominados por Wheeler, em 1967, de **buracos negros**. Em 1971 (*Pis'ma Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **14**, 270), o cosmólogo russo Yakov Borisovich Zel'dovich (1914-1987) demonstrou que os **buracos negros Kerrianos** poderiam emitir bósons espontaneamente. Em 1973, Zel'dovich e o cosmólogo russo Aleksandr A. Starobinsky sugeriram a Hawking que essa emissão espontânea decorria do princípio quântico da incerteza Heisenbergiana.

Ainda em 1973 (*Physical Review* **D7**, p. 2850), o físico e matemático norte-americano Stephen A. Fulling investigou a Teoria Quântica de Campos em um espaço-tempo Riemanniano. Nessa investigação, ele demonstrou que o estado de vácuo e a densidade de energia de um campo livre em uma caixa com condições de fronteira diferem das associadas a uma região de mesmo tamanho, porém no espaço infinito e sem fronteiras. Desse modo, concluiu que essa ambigüidade poderia ser de interesse para um campo

gravitacional. Em 1974, Hawking descobriu a **radiação de Hawking**, isto é, um buraco negro poderia emitir, aleatoriamente, partículas (veja verbete nesta série). Em 1975 (*Journal of Physics: Mathematical and General* **A8**, p. 609), o físico inglês Paul C. W. Davies (n.1946) estudou a produção de partículas escalares em métricas do tipo Schwarzschild e Rindler. Registre-se que este tipo de métrica foi proposto por W. Rindler, em 1956 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **116**, p. 663).

Em maio de 1976 (*Physical Review* **D13**, p. 2720), Davies, Fulling e o físico canadense William George Unruh (n.1945) calcularam o tensor energia-momento Einsteiniano ($T_{\mu\nu}$) nas proximidades de um buraco negro em evaporação, isto é, calcularam pares de partículas criadas fora de seu horizonte de eventos, sendo uma das partículas do par dotada de energia negativa e dirigida para o futuro horizonte de eventos, enquanto a outra partícula do par contribui para o fluxo térmico no infinito.

Foi estudando esse tipo de evaporação que Unruh fez uma importante descoberta, relatada no artigo intitulado Notes on Black-Hole Evaporation e publicada, em agosto de 1976, na *Physical Review* D14, p. 870. Essa descoberta, conhecida como efeito (radiação) Fulling-Davies-Unruh [E(R)F-D-U], significa que aquilo que é visto como vácuo quântico (composto de pares de partículas virtuais) por um observador inercial (em movimento uniforme) é visto por um observador, com aceleração própria (α) como um banho térmico de todas as partículas (agora reais), cuja temperatura Unruh (T_U) é dada por $T_U = \frac{\hbar\alpha}{2\pi ck_B}$ onde c é a velocidade da luz no vácuo e k_B é a *constante de Boltzmann*.

Esse efeito (radiação) de Fulling-Davies-Unruh representa um resultado equivalente ao da Relatividade Restrita de Einstein, pois, assim como nesta o espaço e o tempo dependem do observador, naquela, o conceito de partícula elementar também depende do observador. Contudo, enquanto no primeiro caso o observador é inercial, ou seja, está em movimento uniforme, no segundo caso, o observador é não-inercial, ou seja, está uniformemente acelerado. Note-se que o nome efeito (radiação) Fulling-Davies-Unruh foi cunhado pelos físicos, o japonês Atsushi Higuchi (n.1957), o colombiano Daniel Sudarsky e o brasileiro George Emanuel Avraam Matsas (n.1964), em 1992, em artigos publicados na *Physical Review* D45; D46, pgs. R3308; 3450, nos quais mostraram que a radiação emitida por uma carga uniformemente acelerada em relação a um observador inercial no espaço-tempo Minkowskiano pode ser coerentemente interpretada no referencial co-acelerado, desde que se leve em conta esse efeito.

Obviamente, esse resultado [E(R)F-D-U] foi recebido com grande ceticismo pela comunidade científica internacional, uma vez que ele indicava ser a existência de partículas elementares dependente do estado de movimento do observador. Além do mais, os valores obtidos por intermédio da expressão para (T_U) vista acima, são extremamente inacessíveis pela disponibilidade experimental naquele momento e que ainda prevalece até o presente. Para que o leitor tenha uma idéia sobre a dificuldade de se observar o E(R)F-D-U, vejamos alguns valores da (T_U). Para $\alpha = g = 9,81 \text{ m/s}^2$ tem-se $T_U = 4 \times 10^{-20} \text{ K}$; para $\alpha = 10^{20} \text{ m/s}^2 (\approx 10^{19} \text{ g})$ tem-se $T_U < 1 \text{ K}$. E para $\alpha = 10^{26} \text{ m/s}^2 (\approx 10^{25} \text{ g})$ tem-se $T_U = 4 \times 10^5 \text{ K}$.

Apesar da dificuldade apontada acima, o próprio Unruh propôs, em 1977 (*Annals of the New York Academy of Sciences* 302, p. 186), um modo experimental de determinar o E(R)F-D-U. Uma nova proposta experimental foi apresentada também por Unruh, em 1981 (*Physical Review Letters* **46**, p.1351), ao mostrar que um espectro térmico de ondas sonoras, do mesmo tipo de sua radiação, poderá ser observado no horizonte sônico devido a um fluxo fluido transônico.

Para contornar a dificuldade referida acima sobre a observação do E(R)F-D-U, os físicos brasileiros Matsas e Daniel Augusto Turolla Vanzella (n.1975) propuseram, em 2001 (*Physical Review Letters* **87**, artigo n.º 15301), em meu entendimento, uma experiência de pensamento, usando para isso a aceleração de prótons. Vejamos qual é essa proposta. Segundo o Modelo Padrão da Física das Partículas Elementares, um nêutron (n) livre se desintegra, em pouco menos de 15 minutos, em próton (p), elétron (e^-) e antineutrino do elétron ($\bar{\nu}_e$) isto é: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Por sua vez, os prótons livres são estáveis. Contudo, se eles forem acelerados, poderão decair no nêutron, no pósitron (e^+) e no neutrino do elétron (ν_e) ou seja:

$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$. O tempo de vida desse decaimento foi calculado no artigo citado acima, considerando-se um observador inercial analisando tal decaimento. Ainda nesse artigo, os autores mostraram que esse mesmo tempo de vida poderá ser obtido no referencial co-acelerado com o próton usando o *banho térmico* decorrente do E(R)F-D-U. Com efeito, um observador parado em relação ao próton, verá esta partícula interagindo com esse *banho térmico* formado de pares de partículas (por exemplo: $e^-, e^+, \nu_e, \bar{\nu}_e$). Assim, esse observador poderia ver o próton interagindo com um elétron e decaindo em nêutron e neutrino do elétron ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$); ou interagindo com um antineutrino do elétron e decaindo em nêutron e pósitron ($p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$); ou ainda interagindo com o elétron e antineutrino do elétron e produzindo o nêutron ($p + e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow n$). Registre-se que o provável tipo de experiência, proposto em 2001, voltou a ser objeto de estudo por parte de Matsas e Vanzella, em 2002 *International Journal of Modern Physics D*11, p. 1573), no qual confirmaram a obrigatoriedade do E(R)F-D-U para manter a consistência da Teoria Quântica de Campos Padrão. Registre-se que, com esse artigo, os autores receberam Menção Honrosa no *Annual Essay Competition of the Gravity Research Foundation 2002*.

Para mais detalhes sobre o **efeito (radiação) Fulling-Davies-Unruh**, ver: GOTT, J. R. 2001. **Viagens no Tempo no Universo de Einstein**. EDIOURO Publicações S/A; FEDOTOV, A. M., NAROZHNY, N. B., MUR, V. D. and BELINSKI, V. A. 2002. arXiv:hep-th/0208061 V1 (7 August); MARTINETTI, P. 2004. *eprint arXiv:gr-qc/040116*; CASTIÑEIRAS, J., CRISPINO, L. C. B. e MATSAS, G. E. A. 2004. *Scientific American Brasil* **29**, p. 50; ALVES, D. T. and CRISPINO, L. C. B. 2004. *Physical Review D***70**, artigo n^o. 107703; MAIA, M. D. 2006. gr-qc/0505119, IJMPB (January); <http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/accel/>.

Página Inicial

ANTERIOR

SEGUINTE