

*Todas as observações corroboram a existência destes que devem estar entre os objetos mais exóticos do cosmos: os buracos negros. Formados de pura gravitação, toda matéria que penetra seu interior é sugada cada vez mais para dentro, onde é finalmente dilacerada pela intensa gravidade de uma região singular que habita seu centro.*

*A única forma de o universo exterior recuperar a energia sorvida por esses 'abismos cósmicos' é através da emissão de partículas elementares geradas pelos próprios buracos negros.*

*Essa surpreendente descoberta acabou levando à compreensão de que os blocos fundamentais que formam a matéria do universo são muito mais furtivos do que se poderia imaginar.*

**George Emanuel A. Matsas**

*Instituto de Física Teórica,  
Universidade Estadual Paulista*

**Daniel A. Turolla Vanzella**

*Pós-doutorando do Centro  
de Gravitação e Cosmologia,  
Universidade de Wisconsin  
(Milwaukee, Estados Unidos)*

# Partículas



**Imagem feita pelo Telescópio Espacial Hubble da galáxia Circinus, no centro da qual deve existir um buraco negro**

# elementares à luz dos Buracos Negros

Em 1915, 10 anos depois de revolucionar os conceitos de espaço e tempo com a formulação da teoria da relatividade restrita, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955) concluía a relatividade geral, obra que o projetaria mundialmente. Enquanto a relatividade restrita unificou as três dimensões do espaço (altura, largura e comprimento) e o tempo em um uno quadridimensional, o espaço-tempo, a relatividade geral mostrou que, em geral, toda fonte de energia (como a matéria e a radiação) curva o espaço-tempo. Assim como uma bola de boliche colocada no meio de uma cama elástica a deforma, levando bolinhas de gude soltas sobre ela a rolaem naturalmente para o centro, a Terra, por exemplo, curva o espaço-tempo ao seu redor, fazendo com que os objetos, quando soltos, sejam naturalmente atraídos em sua direção. Modernamente entendemos a força da gravidade como uma consequência direta da curvatura do espaço-tempo (figura 1).

Um dos resultados mais marcantes da relatividade geral foi a predição da possível existência de buracos negros: regiões de campo gravitacional extremamente intenso, de onde nem mesmo a luz poderia escapar. A primeira solução matemática que continha em seu bojo um buraco negro foi descoberta já em 1916 pelo astrofísico alemão Karl Schwarzschild (1876-1916), pouco depois de a relatividade geral ter sido formulada – e apenas alguns meses antes de ele morrer na frente russa de batalha, onde servia como oficial alemão. ▶



**Figura 1.** O espaço-tempo (a unificação das três dimensões espaciais e da temporal) é curvado na presença de energia (como a matéria e a radiação). Quanto maior a massa de uma estrela, por exemplo, maior será essa curvatura. Com a teoria da relatividade geral, idealizada em 1915, a força da gravidade – entendida até então como uma ação a distância entre dois corpos – passou a ser vista como uma consequência direta dessa curvatura

Mas a aceitação da existência desses objetos não foi nada imediata. Mais de duas décadas depois, em 1939, ainda encontramos o próprio idealizador da relatividade, Einstein, escrevendo nas conclusões de um trabalho: “As singularidades de Schwarzschild [isto é, buracos negros] não existem na realidade física.” Isso não foi, contudo, o que o físico norte-americano Robert Oppenheimer (1904-1967) e seu estudante norte-americano Hartland Snyder (1913-1962) concluíram naquele mesmo ano, ao investigarem o destino de estrelas suficientemente grandes.

Pouco antes, em 1938, o físico alemão Hans Bethe, então na Universidade de Cornell (Estados Unidos), e seu colega norte-americano Charles Critchfield, da Universidade George Washington, também nos Estados Unidos, descobriram que as estrelas são como gigantescas usinas de produção de energia, onde núcleos do elemento químico hidrogênio se fundem para dar origem a núcleos mais pesados, liberando energia nuclear nesse processo. Boa parte dessa energia emitida é o que vemos na Terra na forma de luz.

Nas estrelas, essa radiação exerce tamanha pressão de dentro para fora que consegue contrabalançar a força gravitacional, que puxa a matéria de fora para dentro. É graças a isso que as estrelas permanecem em equilíbrio por até bilhões de anos. Nosso Sol, por exemplo, já tem cerca de 5 bilhões de anos, aproximadamente metade da idade do universo.

## LABORATÓRIOS TEÓRICOS

Mas o que acontece com uma estrela quando seu combustível nuclear, como o hidrogênio e outros elementos leves, se extingue? Nesse momento, deixa de existir a pressão que sustenta a matéria contra seu próprio peso, e a estrela começa a implodir. O que Oppenheimer e Snyder mostraram é que, se a massa da estrela for suficientemente grande (acima de duas ou três vezes a massa solar), nada pode deter esse colapso, e toda a matéria acaba por se concentrar em uma região de volume infinitamente pequeno, dando

origem ao que denominamos singularidade, devido às suas propriedades ‘surrealistas’, como densidade de energia infinita e campo gravitacional ilimitado.

Suficientemente próximo da singularidade, o campo gravitacional é tão intenso que tudo é obrigatoriamente sugado em sua direção. A fronteira que delimita a região dentro da qual até mesmo a luz fica aprisionada foi sugestivamente chamada ‘horizonte de eventos’ em 1950 pelo físico anglo-americano de origem austríaca Wolfgang Rindler. A região interna ao horizonte de eventos é o que denominamos buraco negro, batizada como tal em 1967 pelo físico norte-americano John Wheeler. Assim como um marinheiro em alto mar não pode ver além do horizonte, astronautas fora do horizonte de eventos não poderiam observar o que se passa dentro do buraco negro. E tudo o que ultrapassa essa fronteira imaginária tem a singularidade como seu derradeiro destino.

Hoje, os melhores candidatos a buraco negro podem ser separados em duas categorias: na primeira delas, os buracos negros são relativamente modestos, como, por exemplo, o que se encontra no sistema binário GRO J1655-40, possuindo umas sete massas solares. Já os buracos negros da segunda categoria estão localizados no centro da maioria das galáxias – senão de todas – e têm massas milhões de vezes maiores que a do Sol, como, por exemplo, o que se encontra em Sgr A\*, no centro da Via Láctea.

Se a idéia de buraco negro já é difícil de aceitar, o que então dizer das singularidades que habitam seu interior e que, segundo a relatividade geral, seriam ‘abismos’ onde nem mesmo espaço e tempo existiriam? Hoje, a esmagadora maioria dos físicos acredita que, não importa quão surrealistas acabem sendo as singularidades, elas não chegarão a ser verdadeiros ‘abismos espaço-temporais’. Por mais adequada que seja a relatividade geral para descrever campos gravitacionais intensos, ela também tem seus limites. Essa teoria não deve estar apta, por exemplo, a descrever campos gravitacionais gerados por estados hiperdensos da matéria – além de  $10^{94}$  gramas por centímetro cúbico –, que são alcançados nos instantes finais do colapso estelar, pouco antes da formação da singularidade.

Assim, para entendermos esses derradeiros momentos, alguma outra teoria precisará ser formulada. Uma teoria que una a relatividade geral à mecânica quântica, que é a outra grande pilastra da físi-

ca moderna e a teoria usada para descrever o micromundo (dos átomos e seus constituintes). Ainda não sabemos qual é a teoria que unificará a relatividade geral à mecânica quântica, mas os buracos negros, com suas singularidades, têm sido ‘laboratórios teóricos’ úteis nessa busca tortuosa e cheia de surpresas inesperadas.

## ENERGIA NEGATIVA

A partir da década de 1960, as principais características dos buracos negros começaram a ser desvendadas, uma após a outra. Hoje, sabemos, por exemplo, que os buracos negros são extremamente simples, pois todas as suas propriedades podem ser deduzidas a partir de sua massa, rotação e carga elétrica. Além disso, segundo cálculos iniciais do físico britânico Stephen Hawking, buracos negros não seriam apenas indestrutíveis, mas também não poderiam diminuir de tamanho por nenhum processo da natureza. Como consequência, cada buraco negro isoladamente seria um sorvedouro indestrutível e insaciável de energia, aumentando de tamanho a cada porção de matéria que conseguisse abocanhar. Mas surpresas ainda estavam por vir.

Todas as conclusões acima foram deduzidas com base apenas na relatividade geral. A mecânica quântica não havia sido levada em conta. Mas isso não preocupava os físicos, que, a despeito de saberem da potencial relevância da mecânica quântica para compreender as singularidades, não desconfiavam que essa teoria também pudesse ser útil para entender as propriedades macroscópicas dos buracos negros. A surpresa veio em 1974, quando, ao analisar novamente o processo de colapso estelar – e a subsequente formação de buracos negros –, Hawking concluiu, para espanto de todos, inclusive dele mesmo, que, levando-se em conta a mecânica quântica, buracos negros emitiam partículas elementares, ‘evaporando’ em decorrência disso, até possivelmente desaparecerem.

Mas como conciliar isso com a conclusão obtida anteriormente pelo próprio Hawking de que buracos negros eram indestrutíveis? A resposta está em uma das hipóteses que ele usou em sua demonstração. Toda a matéria ordinária, isto é, composta pelos elementos da tabela periódica, tem energia positiva. Assim, pareceu-lhe bastante natural assumir, como hipótese em sua dedução, que não haveria na natureza fontes de energia negativa. Porém, quando a mecânica quântica entra em jogo, isso não é mais necessariamente verdade.

A mecânica quântica prevê que o vácuo é povoado de partículas virtuais. Elas são chamadas assim porque aparecem e desaparecem aos pares tão rapida-

mente que é impossível, mesmo em princípio, observá-las. Podemos pensar nelas como formando um gás que, apesar de não poder ser detectado, tem uma certa energia. O curioso é que, em certas circunstâncias, essa energia pode ser negativa (ver ‘Energia de ponto zero’). Isso é exatamente o que acontece nas imediações do buraco negro, onde esse gás invisível de partículas virtuais tem energia negativa.

Levando em conta esse novo dado, podemos, então, entender a evaporação do buraco negro da seguinte maneira: vez por outra, as partículas do par virtual que surgem perto do buraco negro se distanciam o bastante para que o campo gravitacional possa ‘romper sua união’, antes que elas se juntem e desapareçam novamente. Quando isso acontece, as

### ENERGIA DE PONTO ZERO

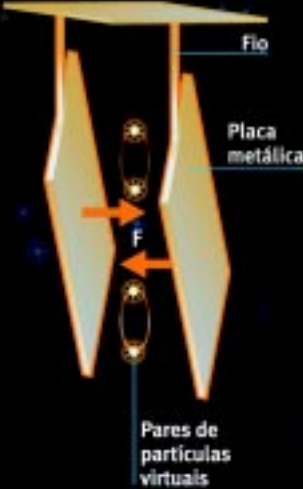
**O vácuo é usualmente definido como sendo o estado de mínima energia. Assim, se quisermos fazer vácuo dentro de um recipiente, devemos primeiro aspirar para fora todas as partículas de matéria e, em seguida, para eliminar toda a energia térmica, baixar a temperatura até o valor de zero absoluto (-273°C). O que resta chamamos vácuo.**

**E qual é a energia do vácuo? Segundo a física clássica, ela é nula. Mas, de acordo com a mecânica quântica, sempre resta uma energia residual denominada energia de ponto zero, que não pode ser extraída por nenhum processo imaginado.**

**Ainda mais bizarro é que, sob certas condições, essa energia residual pode ser negativa. É o que acontece entre duas placas metálicas paralelas. Quanto mais próximas, mais negativa é a energia de vácuo entre elas. Isso faz com que, pelo princípio da minimização de energia, surja uma força de atração entre as placas (figura).**

**Esse fenômeno, denominado efeito Casimir – em homenagem ao físico holandês Hendrik Casimir (1909-2000), que o descobriu –, foi observado em 1958, uma década depois de ter sido previsto.**

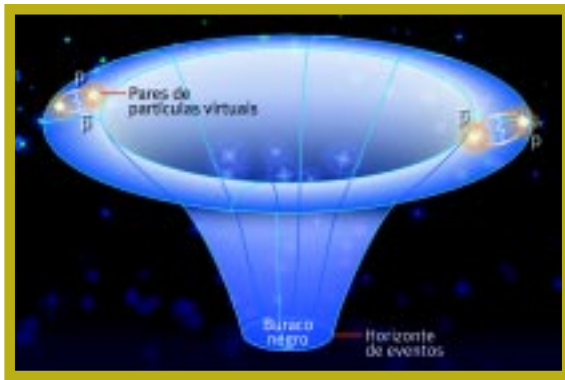
**Analogamente, nas vizinhanças de um buraco negro, a energia do vácuo quântico também é negativa, o que rigorosamente invalida a hipótese usada inicialmente por Hawking, em sua dedução com base somente na teoria da relatividade geral, de que buracos negros seriam indestrutíveis.**



Fio  
Placa metálica  
F  
Pares de partículas virtuais

Apesar de as partículas virtuais não poderem, em princípio, ser observadas, elas conferem uma energia negativa ao vácuo entre placas metálicas, o que faz surgir uma força de atração (F) entre elas. Essa força pode ser observada em laboratório e, portanto, pode ser entendida como uma evidência indireta da existência das partículas virtuais





partículas tornam-se reais e, portanto, detectáveis. A energia envolvida para transformar partículas virtuais em reais é fornecida pelo buraco negro, que, em consequência, diminui de tamanho (figura 2).

### VIDA CURTA, ACELERAÇÃO ALTA

A conclusão de Hawking de que buracos negros poderiam evaporar era baseada em uma dedução intrincada e cheia de sutilezas. Estaria ele realmente certo? Foi o que o físico canadense William Unruh se perguntava enquanto analisava diferentes aspectos da dedução. Como consequência, acabou descobrindo um novo efeito, um efeito que veio esclarecer resultados anteriores devidos ao físico e matemático norte-americano Stephen Fulling e ao físico britânico Paul Davies – por isso, o fenômeno ganhou o nome de efeito Fulling-Davies-Unruh.

O efeito Fulling-Davies-Unruh afirma que aquilo que é visto como vácuo (ou seja, inexistência de partículas reais) por observadores inerciais (isto é, livres da ação de forças) é visto por observadores com aceleração uniforme como um ‘banho’ formado por (todas as) partículas elementares. É como se os observadores acelerados pudessem ver como reais as partículas que, para seus companheiros inerciais,



**Figura 2.** Próximo ao buraco negro, o campo gravitacional é suficientemente forte para que as partículas virtuais possam ser materializadas. Quando isso acontece, algumas delas podem escapar para longe, enquanto suas companheiras acabam condenadas a ultrapassar o horizonte de eventos, entrando no buraco com energia negativa e subtraindo dele energia

existem apenas em um estado virtual (figura 3). Isso ilustra um fato altamente não trivial: ‘partículas elementares são entidades dependentes ou relativas ao observador’. Com base nisso, pode-se afirmar que não só o tempo e o espaço, mas também as partículas elementares não têm *status* absoluto.

Esse efeito foi recebido com ceticismo por grande parte da comunidade científica. Afinal, como seria possível que partículas elementares pudessem existir para alguns observadores, mas não para outros? Apesar de a dedução ser rigorosa e a conclusão categórica, boa parte da comunidade assumiu a postura de que apenas uma observação experimental direta seria convincente. Mas isso não seria tarefa fácil, pois as acelerações necessárias para que efeitos experimentais sejam observáveis são altas demais para que um observador (ou qualquer corpo macroscópico) possa resistir a elas e depois contar sua história. A título de ilustração, vale dizer que um observador acelerado a fantásticos  $10^{20} \text{ m/s}^2$  estaria sujeito a uma temperatura menor que 1 grau acima do zero absoluto ( $-273^\circ\text{C}$ ).

A estratégia teria que ser outra. Teria que ser uma experiência imaginária que mostrasse que a natureza necessita desse efeito para manter sua consistência. Foi exatamente essa a estratégia usada pelos autores deste artigo, que se inspiraram em trabalhos de Unruh com o físico norte-americano Robert Wald, bem como em resultados obtidos independentemente por um trio de físicos, o japonês Atsushi Higuchi, atualmente na Universidade de York (Inglaterra), o colombiano Daniel Sudarsky, atualmente na Universidade Nacional Autônoma do México, e por um dos autores deste artigo (G.E.A.M.).

Os prótons, ao lado dos nêutrons, são as partículas que formam os núcleos atômicos. Livres de forças e isolados do átomo, os nêutrons desintegram-se em pouco menos de 15 minutos – tempo medido por alguém em repouso em relação a eles. Já

**Figura 3.** Segundo o efeito Fulling-Davies-Unruh, observadores inerciais (a) – ou seja, livre da ação de forças – enxergam o vácuo como sendo formado por pares de partículas virtuais, enquanto observadores com aceleração uniforme (b) – dentro de uma nave, por exemplo – vêem o mesmo vácuo como um ‘banho’ formado por partículas elementares. É como se estes últimos pudessem ver como reais as partículas que, para os observadores inerciais, existem apenas em um estado virtual



Figura 4. Em (a), um cientista parado em relação a seu laboratório observa que um próton ( $p^+$ ) acelerado no vácuo se converte em nêutron ( $n^0$ ) pela emissão de um pósitron ( $e^+$ ) e um neutrino ( $\nu$ ). Em (b), o piloto, que leva um próton sobre uma pequena bandeja à sua frente, observa essa partícula se transformar em nêutron pela absorção de um elétron ( $e^-$ ) e/ou antineutrino ( $\bar{\nu}$ ) que estão presentes no vácuo. Por estar acelerado, o piloto da nave consegue observar essas partículas como reais, enquanto para o cientista elas são apenas virtuais

os prótons, nessas condições, são estáveis. Pelo menos, é isso o que a teoria-padrão das partículas elementares e os dados experimentais nos ensinam. Mas o que a teoria nos diz para prótons acelerados, isto é, sujeitos a forças? A resposta é que, nesse caso, os prótons passam a ser instáveis e podem se desintegrar em outras partículas, como mostrado abaixo:

(i) **próton**  $\rightarrow$  **nêutron** + pósitron + neutrino

O pósitron (ou antielétron) mostrado acima é uma partícula parecida com o elétron, mas com carga elétrica positiva, enquanto o neutrino e sua antipartícula (o antineutrino) são neutros e têm massa muito pequena (talvez, nula). Cálculos recentes dos autores deste artigo, publicados na revista *Physical Review Letters* (vol. 87, nº 15, 08/10/01), determinaram o tempo de vida dos prótons quando acelerados – esse tempo pode ser bem pequeno se a aceleração for suficientemente alta (ver *Ciência Hoje* vol. 30, nº 177, p. 14). Um exemplo: prótons altamente energéticos ( $10^{14}$  elétrons-volt), como os que cruzam nossa galáxia, poderiam se desintegrar em menos de um décimo de segundo se passassem por campos magnéticos suficientemente altos ( $10^{14}$  gauss), como os encontrados ao redor de certas estrelas, denominadas magnetares.

## EFEITO OBRIGATÓRIO

Essas conclusões sobre o tempo de vida dos prótons referem-se a cálculos efetuados considerando-se o ponto de vista de um observador inercial – por exemplo, parado em relação às estrelas fixas. Mas como entender o mesmo fenômeno de desintegração do próton acelerado do ponto de vista de um observador que, digamos, está ‘pegando uma carona na garupa’ dessa partícula? – claro, a situação é surreal, mas serve aqui para nossos propósitos. Afinal, para esse observador, o próton estaria parado e, portanto, não deveria se desintegrar.

Para resolver esse aparente paradoxo, devemos lembrar que, segundo o observador ‘caronista’, o próton estaria imerso no banho de partículas pre-

visto pelo efeito Fulling-Davies-Unruh. Surge, então, a possibilidade de o próton interagir com as partículas elementares que o rodeiam e, vez por outra, capturar um elétron e/ou um antineutrino, que forneceriam energia suficiente para transformá-lo em um nêutron, com a eventual emissão de um neutrino ou pósitron (figura 4). Em outras palavras, do ponto de vista de um observador parado em relação ao próton acelerado, sua transformação em nêutron não se daria por meio da reação (i), mas por meio de uma das seguintes reações:

(ii) **próton** + elétron  $\rightarrow$  **nêutron** + neutrino

(iii) **próton** + antineutrino  $\rightarrow$  **nêutron** + pósitron

(iv) **próton** + elétron + antineutrino  $\rightarrow$  **nêutron**

Mas como podemos estar tão certos de que é isso mesmo o que acontece? Uma nova descrição de um fenômeno apenas será aceita se ela conseguir prever o valor correto para as medidas experimentais. E, de fato, ao calcularmos o tempo de vida do próton do ponto de vista do observador ‘caronista’ – usando, para isso, as reações (ii), (iii) e (iv) –, obtemos exatamente o mesmo valor que havíamos previsto anteriormente para o caso dos observadores inerciais – usando o processo (i). Em resumo, o efeito Fulling-Davies-Unruh é obrigatório para a própria consistência da natureza.

A épica jornada que levou da descoberta dos buracos negros a essa compreensão mais profunda das partículas elementares ilustra bem a grande aventura da física teórica: atormentada por fórmulas cada vez mais intrincadas, ela nos mostra que há ordem (e progresso) onde parece haver apenas caos. Há algo de tranquilizador em tudo isso. ■

### Sugestões para leitura

THORNE, K. S.,  
*Black Holes and Time Warps*,  
Nova York, W. W. Norton, 1994  
HAWKING, S. W.,  
*Universo em uma casca de noz*,  
São Paulo, Editora Mandarin, 2001  
COUPER, H. e HENBEST, N.,  
*Buracos Negros*,  
São Paulo, Editora Moderna, 1997  
Na internet  
<http://oposite.stsci.edu/pubinfo/subject.html>  
<http://chandra.harvard.edu/pub.html>