

# O RETRATO DO monstrengo

PREVISTA PELA TEORIA DA  
RELATIVIDADE GERAL, A EXISTÊNCIA  
DESSES OBJETOS É AGORA  
AMPLAMENTE ADMITIDA. MAS  
HAWKING SUBVERTEU TUDO O QUE  
SE PENSAVA A RESPEITO

POR JORGE CASTIÑEIRAS, LUÍS C. B. CRISPINO,  
GEORGE E. A. MATSAS E DANIEL A. T. VANZELLA

Quando jogamos uma pedra para cima, ela volta ao solo depois de alcançar uma certa altura. Mas haveria alguma velocidade com a qual a pedra, uma vez arremessada, não mais voltasse? A resposta é afirmativa. Desprezando-se a resistência do ar, essa grandeza, denominada “velocidade de escape”, é, para a Terra, cerca de 11 km/s – e independe da massa do corpo lançado. No dia 27 de novembro de 1783, diante da Sociedade Real Britânica, em Londres, o astrônomo e geólogo inglês John Michell chamou a atenção para o fato de que estrelas densas o suficiente para que suas velocidades de escape fossem maiores que a velocidade da luz não seriam vistas a distância. Apenas observadores próximos o suficiente de sua superfície seriam capazes de receber a luz por elas emitida. Anos mais tarde, em seu livro intitulado *Exposição do sistema do mundo*, o matemático e astrônomo francês Pierre Laplace denominou-as “estrelas escuras”.

REPRESENTAÇÃO ARTÍSTICA DO QUASAR GB 1508. Esse objeto, cuja emissão de raios X foi observada pelo satélite Chandra, corresponderia a um buraco negro supermassivo, localizado no núcleo de uma galáxia situada a cerca de 13 bilhões de anos-luz da Terra. A esfera escura, parcialmente visível no centro, é o “horizonte de eventos”, a fronteira que separa o meio exterior da região interna, da qual nem mesmo a luz escapa. A nuvem luminosa é o “disco de acreção”, formado pelo gás, aquecido a temperaturas extremamente elevadas, que está sendo tragado pelo campo gravitacional esmagador do objeto. Os dois jatos espiralados, para cima e para baixo, são constituídos por campos magnéticos e partículas com velocidades próximas à da luz. Elas fazem parte da matéria que está sendo atraída, mas escapa da borda interna do disco de acreção e resvala pela perpendicular. Os jatos, que se estendem por distâncias de até 100 mil anos-luz, são as maiores estruturas formadas pelos buracos negros supermassivos. É neles que se produzem as emissões em ondas de rádio, luz visível e raios X detectadas por nossos instrumentos

ARTE: ERIKA ONDRA, COM BASE EM REFERÊNCIA DO AUTOR

O conceito de estrela escura surgiu com base nas leis da mecânica, da gravitação e da óptica formuladas pelo físico e matemático inglês Isaac Newton no final do século XVII e início do século XVIII. Por interessante que possa parecer a princípio, essa idéia foi substituída, no século XX, por outra ainda mais extraordinária. Hoje sabemos que, de acordo com a teoria da relatividade geral, estrelas densas o suficiente não devem dar origem às estrelas escuras de Michell, mas sim a buracos negros. Para entendermos o porquê disso, devemos retroceder até o início do século XX.

Em 1905, o físico Albert Einstein, nascido na Alemanha, desenvolveu o que hoje chamamos de teoria da relatividade restrita. Nela era incorporado o dado experimental de que a velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor, cerca de 300 mil km/s, medido por todos os observadores inerciais, independentemente do movimento da fonte emissora. Partindo dessa característica peculiar da luz e explorando suas conseqüências, Einstein mostrou que nossos velhos conceitos de espaço e tempo não eram absolutos, mas,

REGIÃO ONDE está localizado Cygnus X-1, situado a cerca de 6 mil anos-luz da Terra. Acredita-se que esse objeto invisível seja um buraco negro, com massa da ordem de dez vezes a do Sol. A cada seis dias, ele orbita sua companheira HDE 226868, o objeto mais brilhante da foto, uma estrela supergigante azul, com cerca de 30 massas solares



sim, relativos ao observador. Embora os efeitos previstos pela relatividade restrita sejam, em geral, pequenos demais para se fazerem notar na vida cotidiana, eles devem ser considerados em alguns aparelhos modernos de tecnologia fina, como o sistema de posicionamento global, ou GPS (*global positioning system*), amplamente empregado em navegação.

Depois disso, ficou claro que todas as teorias físicas, inclusive a teoria da gravitação de Newton, precisavam se adaptar ao novo para-

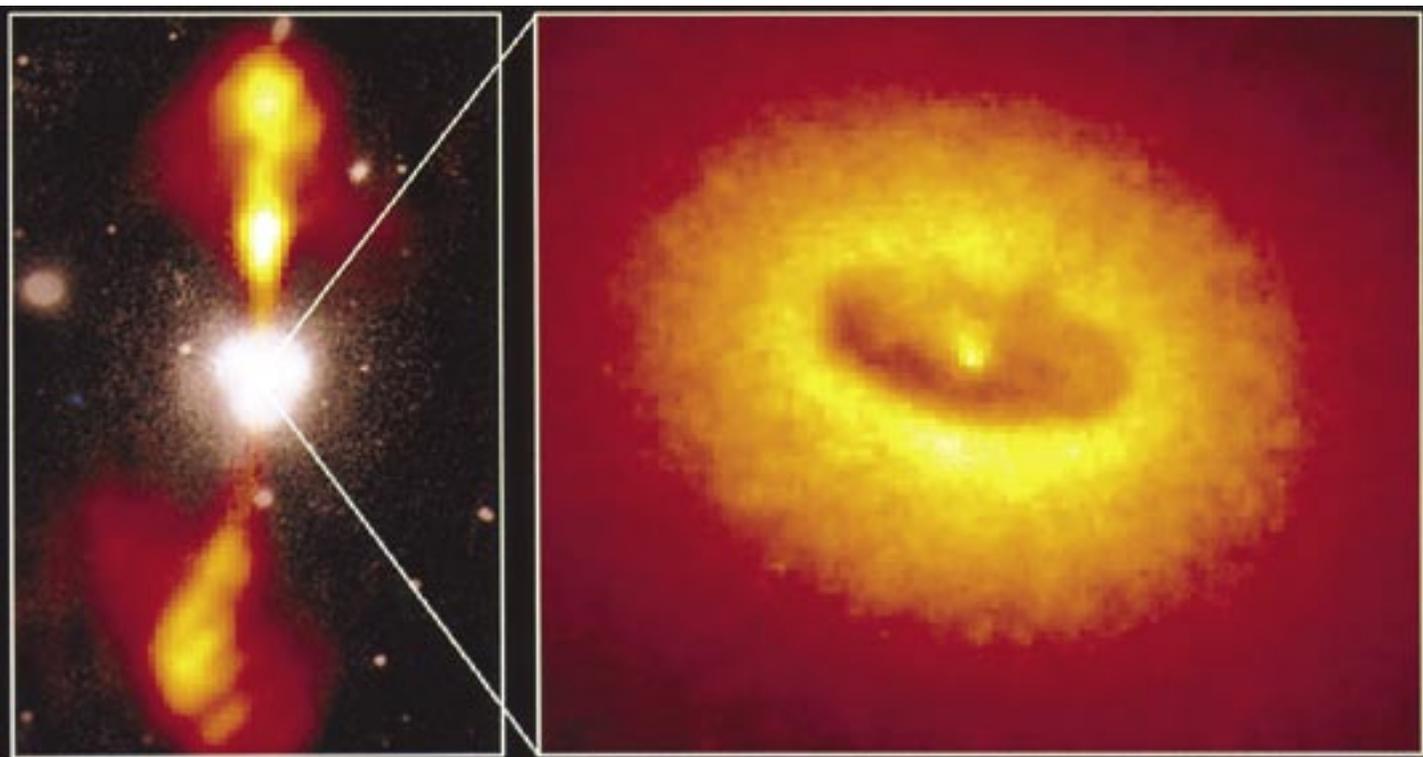
digma introduzido pela relatividade restrita. E foi assim que, dez anos mais tarde, Einstein chegou à formulação final de uma teoria da gravitação relativística, batizada de teoria da relatividade geral. Esperavam-se dela predições mais precisas que as de Newton, especialmente em campos gravitacionais fortes. Mas, além disso, ela nos descortinou toda uma nova faceta do Universo, à qual não tínhamos acesso anteriormente. Segundo a relatividade geral, o espaço-tempo é um ente que interage dinamicamente com os fenômenos físicos. A presença de massa ou energia numa região distorce a geometria do espaço-tempo, curvando-o. E essa curvatura, por sua vez, leva as trajetórias dos corpos, e mesmo dos raios de luz, a se desviarem da trajetória que teriam se o espaço-tempo fosse plano.

De fato, foi verificando o desvio de raios de luz provenientes de estrelas distantes, ao passarem pelas proximidades do Sol durante o eclipse de 29 de maio de 1919, que a relatividade geral teve sua primeira predição comprovada experimentalmente, conferindo a Einstein uma súbita fama mundial. Esse desvio é quase imperceptível nas imediações do Sol. Mas, se a massa solar fosse concentrada em uma região com pouco mais de 3 km de raio, o efeito da curvatura do espaço-tempo na trajetória da luz seria dramático. Neste caso, teríamos uma região compacta de cujo interior nenhum raio de luz ou partícula clássica conseguiria escapar. Ou seja: um buraco negro.

## Horizonte de Eventos

TODO BURACO NEGRO POSSUI UMA “fronteira de não-retorno” que caracteriza seus limites. Na década de 50, essa fronteira foi denominada de “horizonte de eventos” pelo físico anglo-americano de origem austríaca Wolfgang Rindler. Assim como marinheiros não podem ver o que se passa além do horizonte terrestre, astronautas externos ao buraco negro não poderiam observar o que se passa dentro dele. Essa característica é uma conseqüência direta do fato de que raios de luz emitidos a partir do interior do buraco negro são inevitavelmente tragados para regiões cada vez mais internas, mesmo que tenham sido direcionados inicialmente para fora. O mesmo acontece com estruturas massivas, que, além de engolidas, são também comprimidas indefinidamente, até ficarem esmagadas no centro do buraco negro, em uma região usualmente denominada “singularidade”, de volume ínfimo e densidade de energia altíssima. Nada pode evitar isso, pois para fazê-lo teria antes de impedir o tempo de seguir seu fluxo rumo ao futuro.

Buracos negros são, assim, devoradores cósmicos feitos de puro vácuo, com uma singularida-



NASA/HST/WFPC2

de em seu interior, constituindo uma tal distorção do tecido espaço-temporal que, uma vez dentro dele, nenhuma matéria, raio de luz ou qualquer outra forma de energia consegue escapar. O nome buraco negro foi cunhado, em 1967, pelo físico americano John Wheeler.

Os primeiros indícios teóricos da existência desses objetos surgiram apenas um ano depois de Einstein ter formulado a relatividade geral. Em 1916, pouco antes de morrer no front russo, o astrofísico Karl Schwarzschild, então oficial do exército alemão, obteve a solução das equações de Einstein para o vácuo com simetria esférica. No mesmo ano, o engenheiro e físico alemão Hans Reissner, que trabalhou com o conde Ferdinand Zeppelin em projetos de dirigíveis, conseguiu a primeira solução das equações de Einstein na presença de campos eletromagnéticos. Cerca de dois anos depois, de maneira independente, esta solução foi alcançada também pelo engenheiro e físico finlandês Gunnar Nordström. No entanto, apenas muito tempo depois ficaria claro que a solução de Schwarzschild descreve buracos negros estáticos descarregados e que a solução de Reissner-Nordström generaliza a solução de Schwarzschild, contemplando a adição de cargas elétricas ao objeto. Apenas em 1960, as soluções de Schwarzschild e de Reissner-Nordström foram completamente entendidas, graças aos trabalhos do físico-matemático americano Martin Kruskal e dos físicos americano John Graves e alemão Dieter Brill.

**GALÁXIA NGC 4261, localizada a cerca de 100 milhões de anos-luz da Terra, na constelação de Virgem. À esquerda, composição de imagens ópticas e de rádio obtidas por instrumentos na superfície terrestre. Destacam-se os dois jatos, em direções opostas, oriundos do núcleo da galáxia. À direita, imagem obtida pelo telescópio espacial Hubble, exibindo em detalhe o enorme disco de gás frio e poeira que está sendo acretado pelo buraco negro supostamente existente no centro dessa galáxia elíptica gigante. Estima-se que a massa desse buraco negro seja 1 bilhão de vezes maior que a do Sol**

Por menos intuitivas que sejam suas propriedades, sabe-se hoje que os buracos negros podem ser criados de maneira natural. Em 1938, o físico alemão Hans Bethe e seu colaborador americano Charles Critchfield concluíram que as estrelas são gigantescas fornalhas, nas quais núcleos atômicos relativamente leves se fundem, dando origem a elementos mais pesados e liberando grandes quantidades de energia, boa parte na forma de luz. A gigantesca pressão produzida por estas reações é suficiente para contrabalançar a força gravitacional que puxa a matéria da estrela para o centro, mantendo-a em equilíbrio por até bilhões de anos. Quando a estrela envelhece, porém, ela passa a ser rica em ferro e outros elementos pesados relativamente estáveis. E as reações de fusão não são mais suficientes para gerar a pressão capaz de evitar que ela colapse sob efeito de sua própria força gravitacional. Em 1939, trabalhando com modelos dotados de simetria esférica, os físicos americanos Julius Oppenheimer e Hartland Snyder concluíram que estrelas suficientemente massivas acabariam colapsando por completo no final de suas vidas, dando origem a buracos negros. Hoje, acreditamos que os colapsos este-

DOIS MODELOS de buracos negros, sem rotação e com rotação, e os respectivos espectros de suas emissões de raios X. A forma dos espectros, observados por satélites, permite distinguir entre um objeto e outro. Uma característica do buraco negro com rotação é que a borda interna de seu disco de acreção fica muito mais próxima do horizonte de eventos

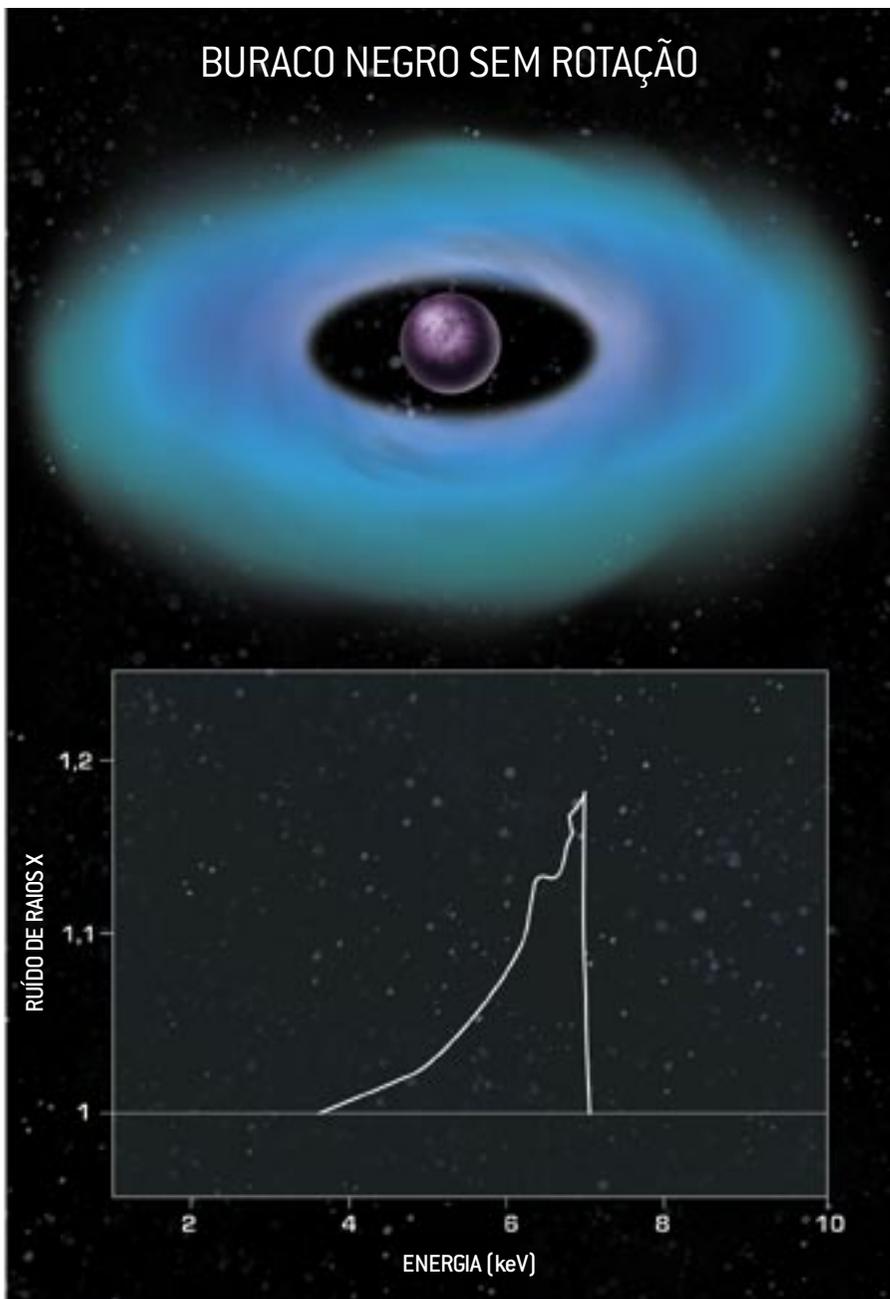
lares são tipicamente oscilatórios, como sugerem os trabalhos desenvolvidos na década de 60 pelos soviéticos Vladimir Belinsky, Isaac Khalatnikov e Evgeny Lifshitz. As estrelas não seriam compactadas de forma isotrópica, mas, sim, distendidas em uma direção e contraídas nas outras duas, de maneira caótica e alternada, até finalmente seus volumes serem reduzidos a zero.

De acordo com as fórmulas obtidas por Oppenheimer e Snyder, à medida que a estrela fosse colapsando, observadores distantes veriam sua imagem cada vez mais avermelhada e sua contração acontecer cada vez mais lentamente. Quando a superfície estelar alcançasse finalmente o horizonte de eventos, a imagem ficaria como

que congelada e desapareceria do campo de visão. Por outro lado, para um observador hipotético situado na própria superfície da estrela, a implosão prosseguiria continuamente, até toda a massa estelar ser compactada em um ponto, dando origem à singularidade. Foram necessários quase 20 anos para que, em 1958, outro físico americano, David Finkelstein, conseguisse encontrar uma forma de conciliar as descrições aparentemente contraditórias dos dois “observadores”. A despeito do que o observador no infinito “enxerga”, a estrela em colapso continua a existir mesmo quando seu raio se torna inferior ao do horizonte de eventos, assim como o Sol continua a existir depois de se pôr no horizonte terrestre.

Depois do trabalho de Finkelstein, pouco a pouco, a comunidade científica se familiarizou com esses corpos, passando a encará-los não mais como uma curiosidade teórica, mas, sim, como uma possibilidade física concreta. Desse modo, em meados da década de 60, teve início a era de ouro dos buracos negros. Um dos responsáveis pelo *boom* foi o matemático inglês Roger Penrose, que introduziu novos métodos na descrição das propriedades desses objetos. Usando técnicas matemáticas poderosas, ele conseguiu demonstrar que, no contexto da relatividade geral, os buracos negros originados de forma clássica sempre possuem uma singularidade em seu interior, independentemente dos detalhes do colapso estelar. Em 1969, Penrose introduziu a chamada “conjectura do censor cósmico”, segundo a qual toda singularidade que se forma a partir de um colapso gravitacional fica escondida (ou “censurada”) dentro de um horizonte de eventos.

Até hoje, pouco podemos dizer acerca da natureza física das singularidades. De acordo com a relatividade geral, elas seriam verdadeiros abismos, onde até mesmo o espaço e o tempo deixariam de existir. No entanto, se a interação gravitacional, em analogia com o que acontece, por exemplo, com a interação eletromagnética, tiver de ser corrigida em distâncias muito pequenas, com base nos princípios da mecânica quântica, então as



ARTE: ERIKA UNZIGRA, COM BASE EM REFERÊNCIA DO AUTOR

singularidades seriam, antes de tudo, regiões onde a própria relatividade geral falharia e cuja generalização quântica deveria ser levada em conta. Seja qual for essa teoria quântica da gravitação, não está claro se suas previsões acerca das singularidades poderiam ser verificadas na prática, devido à conjectura do censor cósmico.

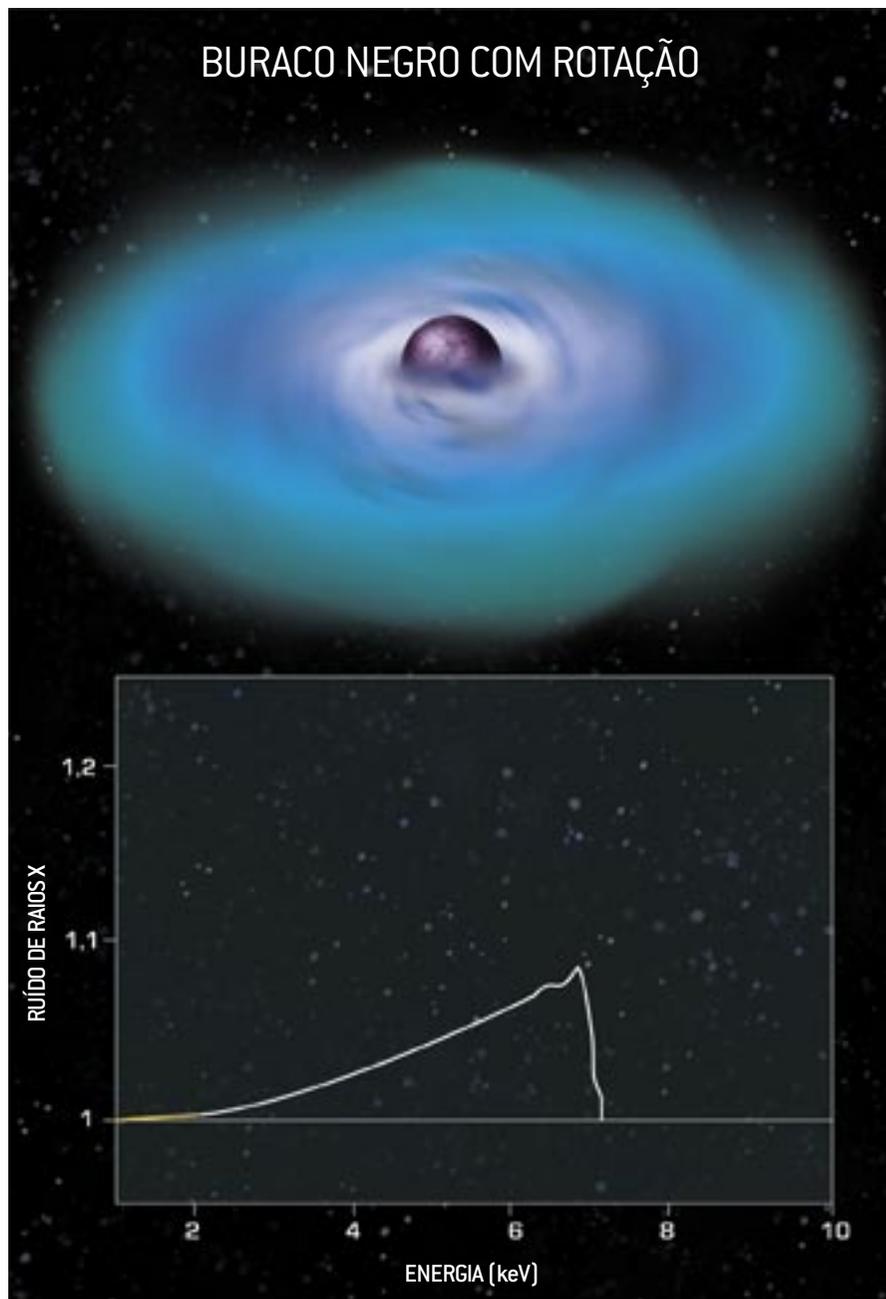
### Os Objetos mais Simples

É NA ERA DE OURO DOS BURACOS NEGROS que Stephen Hawking aparece no cenário científico internacional. No princípio da década de 60, ele começou seu doutorado na Universidade de Cambridge, sob a supervisão do físico britânico Dennis Sciama. E iniciou-se nos métodos introduzidos por Penrose, em companhia do qual estudou o aparecimento de singularidades no contexto de colapsos gravitacionais e da cosmologia – uma importante preparação para o que viria a seguir. Em 1971, demonstrou que os buracos negros não só seriam indestrutíveis, mas também não diminuiriam de tamanho por meio de nenhum processo clássico. Tal descoberta foi importante para os desdobramentos que ele mesmo protagonizaria pouco depois, em 1974. Nessa ocasião, estendendo a sua abordagem aos processos não-clássicos, ou seja, decorrentes de efeitos próprios da mecânica quântica, realizou a surpreendente descoberta de que os buracos negros evaporam, emitindo a chamada radiação de Hawking (ver o artigo “Singularidade e informação”, na pág. 70).

Vale enfatizar que, a despeito de todas as sutilezas envolvidas, os buracos negros estão longe de serem objetos intrinsecamente complexos. Ao contrário. No discurso proferido por ocasião do recebimento do Prêmio Nobel, em 1983, o físico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar afirmou: “Eles [os buracos negros] são, portanto, quase que por definição, os objetos macroscópicos mais perfeitos que existem no Universo (...) e os mais simples também”. A perfeição e a simplicidade a que Chandrasekhar se refere decorrem diretamente dos teoremas de unicidade dos buracos negros, para cujas deduções Hawking também contribuiu.

Segundo um de seus enunciados, as propriedades dos buracos negros estacionários, como soluções da relatividade geral para o vácuo, são completamente caracterizadas por sua massa e rotação.

Isso começou a ficar claro já em 1968, quando o físico de origem alemã Werner Israel mostrou que, se o colapso de uma estrela neutra e sem rotação levasse à formação de um buraco negro, este acabaria sendo perfeitamente esférico, e descrito pela solução de Schwarzschild, mesmo que, inicialmente, a estrela fosse muito deformada. Mas são os buracos negros girantes, provenientes do colapso de estrelas com movimento de rotação ao redor de seu próprio eixo, os mais interessantes do ponto de vista teórico e experimental. Estes



buracos negros são descritos por outra solução, descoberta em 1963 pelo matemático neozelandês Roy Kerr. Generalizada pelo físico americano Ezra Newman e colaboradores, que incluíram no cenário a presença de carga elétrica, a solução de Kerr foi, mais tarde, analisada em detalhe pelo físico australiano Brandon Carter.

Segundo a relatividade geral, corpos que giram tendem a arrastar o espaço-tempo no sentido de sua rotação. Assim, as partículas que orbitam livremente um buraco negro girantes seguem trajetórias diferentes daquelas que teriam se o objeto fosse estático. Longe de um buraco negro girante, esse efeito é muito pequeno. Mas, suficientemente próxima do horizonte de eventos, há uma região, chamada ergosfera, que mais parece um redemoinho irresistível. Dentro dela, tudo, até mesmo a luz, é obrigado a rodar no sentido da rotação do buraco. A existência desta região permite que o meio exterior roube energia de rotação do buraco, que, em consequência, tenderia a parar, conforme foi mostrado, na década de 60, por Penrose e, mais tarde, pelo físico americano Charles Misner.

Ainda não temos evidências diretas do arrastamento do espaço-tempo por corpos em rotação – e muito menos pela ocorrência desse suposto fenômeno devido a buracos negros. Mas esperamos que elas venham logo. Em abril de 2004, a Nasa e a Universidade Stanford colocaram em órbita da Terra um experimento denominado Gravity Probe B, com o intuito de medir o tênue efeito de arrastamento do espaço-tempo provocado pela rotação da Terra em torno de seu eixo. A análise dos dados ainda está sendo feita, porém, se o experimento tiver sucesso e o resultado for positivo, será a primeira confirmação direta do

efeito de arrastamento do espaço-tempo por corpos em rotação, e isso constituirá um forte apoio experimental à presença de ergosferas ao redor de buracos negros gigantes.

Por mais convincentes que sejam, todas as evidências experimentais disponíveis até o momento acerca da existência de buracos negros são indiretas. O primeiro forte candidato foi localizado em Cygnus X-1. Trata-se de uma fonte variável de raios X na constelação do Cisne, observada pela primeira vez em 1964 e estudada em mais detalhe a partir de 1971, inicialmente pelo satélite Uhuru e depois por outros. Acredita-se, neste caso, que a estrela supergigante HDE 226868, com cerca de 30 massas solares, faça parte de um sistema duplo que contém também uma “estrela morta” (ou seja, que não emite luz por falta de combustível nuclear), com cerca de dez massas solares. A matéria da supergigante estaria sendo gradativamente sugada, formando-se, com isso, um “disco de acreção” ao redor da companheira invisível. Enquanto a estrela supergigante emite luz visível, a região interna do disco de acreção emite raios X, devido às altas temperaturas que atinge. As teorias vigentes indicam que uma estrela morta tão massiva como esta não poderia ser outra coisa senão um buraco negro.

## Ondulações no Espaço-Tempo

OUTRO CANDIDATO, AINDA MAIS ESPETACULAR, encontra-se no centro da Via Láctea (que, na esfera celeste, está situada na constelação de Sagitário). Tudo parece indicar que, lá, existe um buraco negro com cerca de 3 milhões de massas solares. Em 2002, observou-se que uma estrela passou a apenas 17 horas-luz desse atrator central, denominado Sagitário A\*. Cálculos teóricos sugerem, a partir desta e de outras observações, que Sagitário A\* é denso demais para que seja outra coisa senão um buraco negro. Fortes indícios astrofísicos indicam que a existência de buracos negros gigantes no centro das galáxias é a regra e não a exceção.

Sem dúvida, já avançamos bastante na fronteira observacional, mas apenas a confirmação da presença do próprio horizonte de eventos poderia ser considerada uma evidência direta da existência de buracos negros. Recentemente foi chamada a atenção para o fato de que a contínua melhoria da

**DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPORAL** mostrando o colapso de uma estrela em rotação, que dá lugar a um buraco negro. Os planos horizontais representam a mesma fatia do espaço tridimensional que passa pelo centro da estrela, mas em instantes diferentes. Enquanto a estrela colapsa, seu raio diminui, até constituir uma singularidade. A ergosfera fica entre a fronteira de limite estático e o horizonte de eventos. Na ergosfera tudo, até mesmo a luz, é obrigado a girar no mesmo sentido do buraco negro



ARTE ERIKA ONDIFERA, COM BASE EM REFERÊNCIA DO AUTOR

NASA



IMAGEM DO VEÍCULO espacial que está em órbita da Terra e carrega o experimento Gravity Probe B. Este deverá medir o efeito de arrastamento do espaço-tempo provocado pela rotação da Terra em torno de seu eixo. Caso o fenômeno seja comprovado, isso constituirá um forte apoio experimental à presença de ergosferas ao redor de buracos negros girantes

resolução das observações astronômicas permitirá identificarmos em breve uma sombra em Sagitário A\*. Essa sombra seria causada pela subtração de parte da luz emitida em seus arredores que, em vez de nos alcançar, seria aprisionada pelo buraco negro. Neste caso, a presença do horizonte de eventos seria denunciada pelo desaparecimento de energia.

Mas há outra forma bastante distinta de detectar o horizonte de eventos – não pelo que falta em ondas eletromagnéticas, mas pelo que sobra em ondas gravitacionais. Em geral, quando perturbados, os buracos negros acabam provocando ondulações no próprio espaço-tempo. Estas perturbações de natureza gravitacional se propagam na forma de ondas, podendo ser detectadas na Terra. A informação da presença do horizonte de eventos seria então carregada no espectro da onda como uma verdadeira impressão digital. Existem atualmente alguns detectores de ondas gravitacionais em operação e outros em vias de operar, com boas chances de identificar efeitos cataclísmicos como a formação e a fusão de buracos negros ou a captura de estrelas por eles (contanto que os fenômenos aconteçam em regiões não muito distantes da Terra).

A possibilidade teórica de os buracos negros existirem, corroborada indiretamente por uma

sucessão de evidências astrofísicas, é uma das provas de que a ciência moderna nos permite descortinar realidades que vão muito além de nossa própria imaginação. Hoje, sabemos que o espaço-tempo é “maleável” e que suas armadilhas de vácuo vagam pelos céus. As singularidades que jazem em seus interiores devem possuir, se não todas, ao menos várias das propriedades da singularidade primordial, que associamos à própria criação do Universo, o Big Bang. Os buracos negros são, assim, fiéis depositários de alguns dos segredos mais fundamentais da Natureza. 

#### GLOSSÁRIO

- **Singularidade:** “região” do espaço-tempo na qual a curvatura se tornaria infinita e a relatividade geral deveria ser substituída pela gravitação quântica.
- **Horizonte de eventos:** fronteira de “não retorno” que delimitaria o buraco negro.
- **Ergosfera:** região externa ao horizonte de eventos de um buraco negro girante, na qual até mesmo a luz seria obrigada a girar no mesmo sentido do buraco.
- **Limite estático:** fronteira externa da ergosfera.

---

OS AUTORES trabalham na interface da relatividade geral com a mecânica quântica. Jorge Castiñeiras e Luís Crispino são pesquisadores da Universidade Federal do Pará; George Matsas é pesquisador do Instituto de Física Teórica da Unesp, em São Paulo; e Daniel Vanzella é professor da Universidade de São Paulo, em São Carlos