

Um dos corpos celestes que despertam maior curiosidade hoje em dia são os buracos negros, regiões do espaço onde existem verdadeiros ralos cósmicos: sugam tudo que deles se aproxima demasiadamente, tamanha a força gravitacional que exercem.

Diferentemente das estrelas – que podemos ver por meio da luminosidade que emitem –, esses objetos não deixam escapar nem mesmo a luz – daí, o nome buracos negros. Ultrapassada uma linha imaginária de atração fatal – o chamado horizonte de eventos –, não há como se evadir do ‘abraço mortal’: tudo é engolido por esse sorvedouro de matéria e luz.

Embora invisíveis aos telescópios, esses corpos cósmicos podem, entretanto, ser identificados – bem como previstos e reconhecidos – pela perturbação que causam à sua volta: discos, jatos e redemoinhos de matéria ao seu redor.

Buracos negros são objetos bastante comuns no cosmos. E, até mesmo nossa galáxia, a Via Láctea, tem um (poderoso) em seu centro. Felizmente, nosso planeta está bem longe de seus tentáculos...

Com este folder, damos prosseguimento às atividades de divulgação científica realizadas pelo CBPF. Esta série destina-se ao público não especializado, que encontrará aqui informações sobre grandes temas da física, bem como referências para leituras mais aprofundadas. Mais uma vez, esperamos que esta iniciativa sirva para despertar vocações, mostrando a jovens estudantes como a ciência pode ser interessante.

João dos Anjos

COORDENADOR DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA

PRESIDENTA DA REPÚBLICA  
Dilma Rousseff

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
Marco Antonio Raupp

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA  
Arquimedes Diógenes Ciloni

DIRETOR DO CBPF  
Fernando Lázaro Freire Júnior

COORDENAÇÃO DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA  
João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCTI)

EDITORES CIENTÍFICOS  
George E. A. Matsas (Instituto de Física Teórica/Universidade Estadual Paulista)  
Daniel A. T. Vanzella (Instituto de Física de São Carlos/Universidade de São Paulo)

REDAÇÃO E EDIÇÃO DE TEXTO  
Cássio Leite Vieira (Instituto Ciência Hoje)

PROJETO GRÁFICO, DIAGRAMAÇÃO, INFOGRÁFICOS E TRATAMENTO DE IMAGEM  
Ampersand Comunicação Gráfica  
(ampersand@ampersanddesign.com.br)

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150  
22290-180 - Rio de Janeiro - RJ  
Tel: (0xx21) 2141-7100  
Fax: (0xx21) 2141-7400  
Internet: <http://www.cbpf.br>

Para receber gratuitamente pelo correio um exemplar deste folder, envie pedido pelo site do projeto Desafios da Física (<http://mesonpi.cat.cbpf.br/desafios/>), onde estão disponíveis, em formato PDF, os folders da série. No portal <http://www.cbpf.br/Publicacoes.html>, estão disponíveis outras iniciativas de divulgação científica do CBPF.



Ministério da  
Ciência, Tecnologia  
e Inovação



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

2012



# BURACOS NEGROS

## Devoradores cósmicos de matéria e luz

### Fontes

MATSAS, G. e VANZELLA, D. Buracos negros – rompendo os limites da ficção (Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2008).  
MATSAS, G. e VANZELLA, D. ‘Partículas elementares à luz dos buracos negros’. *Ciência Hoje* n. 182, maio de 2002.  
MATSAS, G. e VANZELLA, D. ‘O vácuo quântico cheio de surpresas’. *Scientific American Brasil*, agosto de 2003.  
CASTIÑEIRAS, J., CRISPINO, L. e MATSAS, G. ‘Horizonte de eventos’. *Scientific American Brasil*, outubro de 2004.  
CASTIÑEIRAS, J., CRISPINO, L., MATSAS, G. e VANZELLA, D. ‘Buracos negros’. *Scientific American Brasil* (coleção Gênios da Ciência), maio de 2006.  
CASTIÑEIRAS, J., CRISPINO, L., MATSAS, G. e VANZELLA, D. ‘Singularidade e Informação’. *Scientific American Brasil* (coleção Gênios da Ciência), maio de 2006.  
FREITAS-PACHECO, J. A. de. ‘Buracos negros supermassivos – os segredos revelados’. *Ciência Hoje* n. 293, junho de 2012.

### Sumário

- DE CURIOSIDADE A REALIDADE  
Coqueluche da astrofísica  
Algo de novo no front
- HORIZONTE E SINGULARIDADE  
Nada além do horizonte  
Ponto denso  
Terra em um ponto  
Cama de malabarista  
Bolinhas de gude
- NASCIMENTO E EVOLUÇÃO  
Puxa e empurra  
Patamar mínimo  
Mesma atração  
Redemoinho e canibalismo
- PARADOXOS E ENTROPIA  
Paradoxo da bagunça  
Eles têm entropia!  
Como uma panela quente  
Matéria e antimatéria
- GRANDES QUESTÕES  
Evaporação e sumiço  
Para onde vai a informação?  
Gravitação quântica  
Como o Big Bang

Buracos Negros  
Devoradores cósmicos de matéria e luz

## DE CURIOSIDADE A REALIDADE

**COQUELUCHE DA ASTROFÍSICA** • Se eleição fosse feita entre o grande público para indicar qual o corpo celeste mais exótico, é (bem) possível que nas primeiras colocações – talvez, até como vencedores – estivessem os buracos negros. Afinal, esses objetos cósmicos, que se tornaram a coqueluche da astrofísica, têm atributos suficientes para merecer tal popularidade. Talvez, o principal deles tenha a ver com o fato de serem devoradores incessantes de matéria e luz – sim, nem mesmo os fótons (corpúsculos de luz) conseguem escapar da fúria sugadora de um buraco negro, caso dele se aproximem.

**ALGO DE NOVO NO FRONT** • Até a década de 1960, buracos negros não passavam de mera curiosidade teórica. A predição desses ralos cósmicos surgiu em 1916 de cálculos feitos com base na teoria da relatividade geral, publicada naquele ano pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955). O feito é do astrofísico alemão Karl Schwarzschild (1876-1916), enquanto ele combatia na frente russa na Primeira Guerra Mundial. Cerca de duas décadas depois, o próprio Einstein diria não acreditar na realidade desses corpos. Hoje, com tantos dados experimentais, é praticamente impossível refutar a existências desses gigantes da gravidade.

## HORIZONTE E SINGULARIDADE

**NADA ALÉM DO HORIZONTE** • A definição moderna de buraco negro – por sinal, o nome buraco negro foi invenção do físico norte-americano John Wheeler (1911-2008), em 1967 – é a de uma região do espaço dotada de intensa gravidade, da qual nada, nem mesmo a luz, consegue escapar. A fronteira imaginária (imaterial) que delimita tal região foi batizada, em 1950, horizonte de eventos pelo físico de origem austríaca Wolfgang Rindler. Se nada escapa de um buraco negro, então um observador de fora do horizonte de eventos não poderia ver o que se passa para além dessa fronteira imaginária, assim como um marinheiro não pode ver além do horizonte – nesse caso, devido à curvatura da Terra.

**PONTO DENSO** • Esse intenso puxão gravitacional vem do fato de, no centro do buraco negro, haver uma singularidade, ou seja, um ponto que concentra uma densidade impressionantemente alta de matéria, algo que pode chegar a bilhões de massas solares. Nesse ponto sem dimensões físicas – e não importa quão grande seja a massa do buraco negro –, as leis conhecidas hoje pela física não são mais válidas.

**TERRA EM UM PONTO** • O tamanho do horizonte de eventos é diretamente proporcional à massa da singularidade, que pode variar de poucas massas solares a bilhões delas – estes últimos denominados buracos negros supermassivos. Em princípio, todo corpo com massa teria seu horizonte de eventos se fosse suficientemente compactado. Caso pudéssemos concentrar toda a massa da Terra em um ‘ponto’, teríamos um horizonte de eventos da ordem de ínfimos 9 mm. Já, num buraco negro com bilhões de massas solares, essa cifra iria para a casa dos bilhões de km.

Curvatura do espaço-tempo

**CAMA DE MALABARISTA** • Para entender o que ocorre com a matéria e mesmo a luz que se aproximam de um horizonte de eventos, a analogia mais empregada é a de uma grande cama elástica, como aquelas usadas por malabaristas de circo. Sobre ela, depositamos uma diminuta, mas pesadíssima esfera que irá deformar a cama, criando uma depressão. Nessa analogia, a cama faz o papel do espaço-tempo, um ‘tecido’ formado por três dimensões espaciais (altura, largura e comprimento) e uma dimensão temporal (tempo), como foi previsto pela relatividade geral. A esfera seria o buraco negro, que deforma brutalmente o espaço-tempo em seu redor.

**BOLINHAS DE GUDE** • Uma bolinha de gude que fosse atirada com alguma velocidade a partir da borda da cama elástica poderia sofrer um leve desvio ao passar pelas proximidades da deformação central causada pela esfera e, depois disso, seguir sua trajetória. Mas, se a velocidade de arremesso fosse baixa, a bolinha seria ‘sugada’ para o interior da deformação, espiralando, como a água que escorre por um ralo. Luz e matéria que ultrapassam o horizonte de eventos têm destino semelhante: acabam no interior do buraco negro, indo rumo à singularidade.

## NASCIMENTO E EVOLUÇÃO

**PUXA E EMPURRA** • Buracos negros se formam a partir de estrelas massivas que, ao final da vida, depois de queimarem todo seu combustível (predominantemente hidrogênio, que se funde no interior da estrela para gerar elementos químicos mais pesados), acabam colapsando sobre si mesmas, deixando como produto final dessa implosão um ‘corpo’ infinitamente denso, ou seja, a singularidade do interior do buraco negro. Até o momento do colapso, há um equilíbrio entre a pressão de dentro para fora, gerada pela radiação resultante da fusão nuclear, e a gravidade, que puxa as camadas externas para dentro. O combustível acaba, a pressão diminui, e a gravidade vence. Simplificando, o resultado é o colapso do interior da estrela, seguido de uma explosão de proporções cósmicas. Essa explosão ejeta boa parte da massa original da estrela, semeando os elementos químicos mais pesados pela galáxia. Onde antes brilhava uma estrela, agora jaz apenas um remanescente colapsado com uma fração da massa de sua genitora.

**PATAMAR MÍNIMO** • Nem todos os remanescentes da morte explosiva de uma estrela são buracos negros. Há um patamar mínimo da massa desse remanescente para que isso ocorra: esse limite está em cerca de três massas solares. Re-

manescentes de estrelas abaixo disso seguirão outra evolução, dando origem a outros objetos cósmicos, como estrelas anãs brancas e estrelas de nêutrons – estas últimas, no entanto, podem sofrer um segundo colapso gravitacional e gerar um buraco negro.

**MESMA ATRAÇÃO** • Ao contrário do que permeia o imaginário popular, um buraco negro não exerce uma atração gravitacional maior que a de uma estrela com a mesma massa, desde que testemos isso com um corpo à mesma distância dos dois. Ou seja, se nesse instante o nosso Sol se transformasse, num passe de mágica, num buraco negro com a mesma massa, o único efeito sobre a Terra seria que, depois de alguns minutos, não veríamos mais nenhuma luz vinda daquela região. De resto, nada mudaria, nem mesmo a órbita da Terra em torno desse temido objeto.

**REDEMOINHO E CANIBALISMO** • No entanto, o cenário seria bem diferente para um corpo desavisado que resolvesse se aventurar pelas proximidades de nosso Sol agora transformado em buraco negro. Uma espaçonave, um planeta ou mesmo outra estrela que chegassem a algumas dezenas de quilômetros dele seriam completamente despedaçados, formando um redemoinho de matéria (disco de acreção) que, ao final, seria engolida pelo buraco negro. Desse modo, um buraco negro pode canibalizar estrelas próximas ou nuvens de gás, interferindo, assim, na evolução da galáxia que o hospeda.

Disco de acreção

## PARADOXOS E ENTROPIA

**PARADOXO DA BAGUNÇA** • Tire o lixo de um lugar e jogue-o em outro. O primeiro local ficou mais organizado, mas o segundo perdeu organização. Mas e se jogássemos esses rejeitos em um buraco negro? Eles – e a informação que eles carregam – estariam perdidos para sempre. E o universo se tornaria um local mais organizado. Portanto, toda vez que um buraco negro suga matéria e energia (ou seja, informação), o universo fica mais organizado. Eis aí um aparente paradoxo, pois uma lei poderosíssima da física (a 2ª lei da termodinâmica) diz que, em sistemas fechados – e poderíamos considerar o universo como tal –, a entropia, que pode ser entendida como o grau de desordem, nunca pode diminuir.

**ELES TÊM ENTROPIA!** • A resolução do paradoxo da diminuição da desordem – portanto, da aparente diminuição da entropia do universo – veio de físicos teóricos: buracos negros também teriam entropia, e ela seria proporcional à área do horizonte de eventos. Assim, toda vez que matéria e energia (ou seja, informação) caíssem em um buraco negro, a massa do buraco negro aumentaria e seu horizonte de eventos também. E, conseqüentemente, sua entropia.

Concepção artística de um buraco negro com rotação que habitaria o núcleo da galáxia MCG-6-30-15

**COMO UMA PANELA QUENTE** • Mas dizer que buracos negros têm entropia levou a outra questão importante: se esses gigantes da gravidade têm entropia – retrucaram alguns físicos –, então, eles deveriam ter também outros atributos termodinâmicos, como temperatura. Em outras palavras, deveriam emitir radiação. Hawking, disposto a mostrar que buracos negros não tinham entropia (e, portanto, temperatura), chegou, em 1974, a uma conclusão surpreendente: buracos negros têm temperatura, ou seja, irradiam energia, como se fossem uma panela quente. Essa emissão de energia é hoje conhecida como radiação Hawking.

**MATÉRIA E ANTIMATÉRIA** • Hawking chegou à conclusão de que buracos negros irradiam energia quando adicionou, à teoria da relatividade geral, elementos da mecânica quântica (teoria que lida com os fenômenos da dimensão atômica e subatômica). Esse processo é basicamente assim: na borda do horizonte de eventos, dentro e fora dessa fronteira imaginária, pululam pares de partículas e antipartículas virtuais (elétrons e pósitrons, por exemplo) que formam o chamado vácuo quântico. Por vezes, alguns desses pares se materializam – ou seja, passam de virtuais a reais –, de tal forma que uma das partículas do par surge dentro do horizonte de eventos – e é sugada pelo buraco negro –, enquanto a outra escapa, dando origem à radiação Hawking.

## GRANDES QUESTÕES

**EVAPORAÇÃO E SUMIÇO** • Se os buracos negros perdem energia, eles, então, diminuem de tamanho e evaporam – em 1971, o próprio Hawking havia concluído que isso era impossível no contexto clássico, ou seja, sem levar em conta os princípios da mecânica quântica. O interessante é que os cálculos mostram que, quanto menor a massa de um buraco negro, mais rapidamente ele evaporaria.

**PARA ONDE VAI A INFORMAÇÃO?** • Mas a evaporação de um buraco negro nos leva a outra questão: se um buraco negro desaparece, o que resta é apenas radiação. E, sabe-se, com base nas leis da física, que não é possível recuperar toda a informação a partir apenas da radiação. Portanto, surge a pergunta: para onde vai a informação que cai em um buraco negro? A resposta a esse pergunta é um dos desafios atuais para os especialistas na área.

**GRAVITAÇÃO QUÂNTICA** • A solução para a questão do sumiço da informação quando um buraco negro evapora talvez seja alcançada apenas quando (e se) os físicos chegarem à chamada gravitação quântica, área que unificaria a relatividade geral e a mecânica quântica. A busca por essa união não tem sido tarefa fácil, e os físicos sequer concordam sobre quão perto (ou longe) estão disso.

**COMO O BIG BANG** • O estudo teórico e observacional dos buracos negros nos ajuda a entender não só a natureza e suas leis, mas também como evoluem as galáxias e mesmo como nasceu o universo. Os cientistas têm muitas evidências de que o universo teria começado a partir de um estado de matéria e energia extremamente concentradas, com pressões e densidades inimagináveis. Isso pode ser comparado à singularidade de um buraco negro desconhecido. Portanto, entender a física desses gigantes da gravidade nos ajudará a compreender melhor como se formou o universo. E, no final das contas, a nós mesmos.