

CRONOLOGIA

1783 – John Michell e posteriormente Pierre Laplace (1796) concebem as *estrelas escuras*

1916 – Karl Schwarzschild encontra a solução de vácuo esféricamente simétrica das equações de Einstein que contempla buracos negros sem rotação

1916 – Hans Reissner e independentemente Gunnar Nordström (1918) obtêm a solução das equações de Einstein correspondente a buracos negros estáticos com carga elétrica

1939 – Julius Oppenheimer e Hartland Snyder concluem que estrelas, ao colapsarem, podem dar origem a buracos negros

1963 – Roy Kerr encontra a solução de vácuo das equações de Einstein para buracos negros com rotação

1965 – Roger Penrose prova que dentro do horizonte de eventos de um buraco negro sempre se esconde uma singularidade

1967 – John Wheeler cunha o termo *buraco negro*

1971 – Um grupo de astrônomos e físicos experimentais observa fortes evidências de que Cygnus X-1 abriga um buraco negro

1971 – Stephen Hawking prova que a soma das áreas dos horizontes de eventos de um sistema de buracos negros nunca decresce por nenhum processo físico clássico

1973 – Jacob Bekenstein associa entropia aos buracos negros e enuncia a Segunda Lei Generalizada da Termodinâmica

1974 – Stephen Hawking descobre que buracos negros podem evaporar quanticamente

2004 – Hawking volta atrás e afirma que a informação contida nos buracos negros não desaparece



HORIZONTE DE EVENTOS

A existência dos buracos negros, embora inferida como consequência direta da relatividade geral, continua a apresentar paradoxos para os cientistas – dilemas que talvez só possam ser resolvidos com a unificação da teoria de Einstein com a mecânica quântica

Por Jorge Castiñeiras, Luís C. B. Crispino e George E. A. Matsas



TELESCÓPIO ESPACIAL CHANDRA

IMAGEM EM RAIOS X da região central da nossa galáxia, obtida pelo telescópio espacial Chandra. Ela revela centenas de estrelas anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros imersos em uma névoa incandescente, composta de gases a uma temperatura de milhões de graus. O buraco negro supermaciço do centro da nossa galáxia está dentro da região branca brilhante na primeira parte da imagem.

Os buracos negros são figuras que fazem parte da própria cultura popular

moderna, mas teorias sobre a existência de corpos desse tipo já têm mais de 200 anos de idade. Usando as leis estabelecidas pelo filósofo natural inglês Isaac Newton, o astrônomo e geólogo britânico John Michell e o matemático e astrônomo francês Pierre Laplace conjecturaram, no final do século XVIII, que estrelas suficientemente densas, cuja velocidade de escape fosse maior que a da luz, não poderiam ser vistas a distância. Laplace, em seu livro *Exposition du System du Monde*, denominou-as estrelas escuras, pálidas precursoras dos buracos negros.

O conceito moderno de buraco negro surgiu no século XX. Um ano depois de Albert Einstein ter completado a teoria da relatividade geral, em 1915, o astrofísico alemão Karl Schwarzschild encontrou a solução de vácuo esféricamente simétrica para as equações de Einstein. Como ficaria claro anos mais tarde, essa solução podia descrever também aquilo que seria identificado como um buraco negro estático. Mas, afinal, o que são buracos negros?

Na *Divina Comédia*, de Dante Alighieri, encontramos a frase que, na literatura, melhor captura a essência dos buracos negros, escrita nas portas do Inferno: “Abandonai toda esperança, ó vós que entraís!”. Um buraco negro é como uma armadilha de pura gravitação que impede todo corpo, raio de luz ou outro sinal clássico de escapar de seu interior. A fronteira que delimita o buraco negro é denominada horizonte de eventos.

Ao ser agraciado com o prêmio Nobel, em 1983, o físico indiano radicado nos EUA Subrahmanyan Chandrasekhar concluiu sabiamente sua palestra dizendo: “Eles (*os buracos negros*) são, portanto, quase que por definição, os objetos macroscópicos mais perfeitos que existem no Universo (...) e são também os objetos mais simples”.

RESUMO

- A existência dos buracos negros, deduzida a partir das equações da relatividade geral, tem sido comprovada indiretamente por numerosas observações astronômicas, mas ainda há muito o que entender sobre sua natureza.
- Os físicos ainda precisam explicar de forma satisfatória o chamado paradoxo da perda de informação e entender o que acontece na chamada singularidade, a região de densidade aparentemente infinita no interior desses objetos.

A perfeição e a simplicidade a que Chandrasekhar se refere são uma consequência direta dos teoremas de unicidade dos buracos negros estacionários, os quais nos ensinam que, como soluções de vácuo da relatividade geral, suas propriedades são completamente caracterizadas por quanta energia e rotação possuem. Isso começou a ficar claro 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, ele acabaria sendo perfeitamente esférico, mesmo que, inicialmente, a estrela estivesse muito deformada. O que Schwarzschild havia descoberto, em 1916, era o caso particular de buracos negros sem rotação nem carga elétrica. Por outro lado, há bons motivos para crer que buracos negros típicos são basicamente neutros, mas possuem

Por mais convincentes que sejam, todas as evidências experimentais que temos até o momento da existência de buracos negros são indiretas. O primeiro forte candidato a buraco negro 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 detalhes a partir de 1971, inicialmente pelo satélite Uhuru. Acredita-se, nesse caso, que a estrela supergigante HDE 226868, com cerca de 30 massas solares, esteja formando um sistema duplo com uma estrela morta, ou seja, apagada por falta de combustível nuclear, com cerca de dez massas solares. A estrela supergigante estaria sendo gradativamente sugada, formando-se, com isso, o chamado disco de acreção (*ver figura na pág. 55*) ao redor da companheira invisível. Enquanto a es-

Um buraco negro é como uma armadilha de pura gravitação, que impede todo corpo, raio de luz ou outro sinal clássico de escapar

alguma rotação. Esses buracos negros são completamente descritos por outra solução, descoberta muito mais tarde, em 1963, pelo matemático neozelandês Roy Kerr, como foi provado pelo físico australiano Brandon Carter em 1973.

Segundo a relatividade geral, corpos que giram tendem a arrastar o espaço-tempo no sentido de sua rotação. Partículas orbitando livremente buracos negros em rotação seguem, assim, trajetórias diferentes daquelas que teriam se o buraco negro não girasse. Longe de um buraco negro que gira esse efeito é muito pequeno, mas, perto do horizonte de eventos, há uma região, chamada de ergosfera, que mais parece um redemoinho irresistível, dentro do qual tudo, até mesmo a luz, é obrigado a rodar no mesmo sentido do buraco.

Em abril deste ano, a Universidade Stanford e a NASA 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. Se tiver sucesso, será a primeira confirmação direta desse efeito puramente relativístico, que aparece de forma extrema perto de buracos negros girantes. Mas quão certos estamos de que buracos negros realmente existem?

trela supergigante emite luz visível, a região interna do disco de acreção emite raios X. As teorias vigentes indicam que uma estrela morta, tão maciça quanto essa, não poderia ser outra coisa senão um buraco negro.

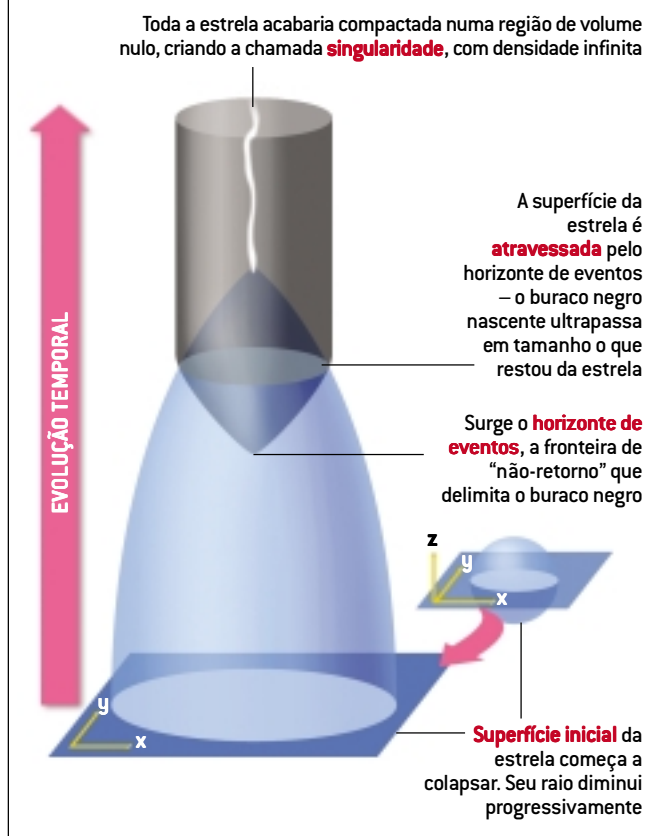
Gigante Galáctico

OUTRO CANDIDATO, AINDA MAIS ESPETACULAR, encontra-se no centro da Via Láctea, que, na esfera celeste, está situado na constelação de Sagitário. Tudo parece indicar que lá exista 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 dessa e de outras observações, que Sagitário A* é denso demais para que seja outra coisa além de um buraco negro. Fortes indícios astrofísicos sugerem que a existência de buracos negros gigantes no interior 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 Heino Falcke, do Instituto Max Planck, na Alemanha, Fulvio Melia, da Universidade do Arizona em Tucson, e Eric Agol, da Universidade Johns Hopkins, chamaram a atenção para o fato de que a contínua melhoria da resolução das observações astronômicas permitirá que, em breve, identifiquemos uma sombra em Sagitário A*. Essa sombra seria causada pela subtração de parte da luz emitida em seus arredores que, em

Colapso Estelar

EM GERAL, OS BURACOS NEGROS nascem do colapso da massa que restou da explosão de uma grande estrela – as chamadas supernovas. Veja abaixo o diagrama mostrando o colapso de uma estrela, dando lugar a um buraco negro. O plano horizontal representa uma fatia do espaço tridimensional que passa pelo centro de estrela.



vez de alcançar o infinito, seria aprisionada pelo buraco negro. Nesse caso, a presença do horizonte de eventos seria denunciada pelo desaparecimento de energia. Mas há outra forma bastante distinta de detectar o horizonte, não pelo que *falta* em ondas eletromagnéticas, mas pelo que *sobra* em ondas gravitacionais.

Em geral, quando perturbados, buracos negros acabam provocando ondulações no próprio espaço-tempo. Essas 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 gravitacio-

nais que estão começando ou vão começar a operar. Os detectores ainda não alcançaram o grau de precisão necessário para acusar um sinal positivo, mas há boas chances de que isso aconteça no futuro próximo.

Desde o início, o estudo dos buracos negros foi cercado de muita controvérsia e, como veremos a seguir, ela continua até hoje, mas num nível mais sofisticado. Em 1939, Einstein publicou um trabalho no qual analisava o comportamento de um aglomerado de partículas sob influência do próprio campo gravitacional. Ele notou que, ao diminuir o raio do aglomerado, as partículas tinham que se mover cada vez mais rapidamente se exigíssemos que o aglomerado permanecesse estável. Como antes de o aglomerado se contrair a ponto de formar um buraco negro a velocidade das partículas excederia a velocidade da luz, ele concluiu que buracos negros *não poderiam existir* na realidade física. Mas por que assumir, assim como Einstein, que ao longo do processo de contração o aglomerado não poderia colapsar?

De fato, naquele mesmo ano, os físicos americanos Julius Oppenheimer e Hartland Snyder concluíram corretamente, ao contrário de Einstein, que estrelas suficientemente maciças acabariam colapsando totalmente sob a influência de seu próprio campo gravitacional, dando origem a buracos negros.

Misteriosa Singularidade

MAS HAVIA AINDA QUESTÕES A SEREM RESPONDIDAS. De acordo com as fórmulas obtidas por Oppenheimer e Snyder, à medida que o processo fosse evoluindo, observadores distantes veriam a estrela colapsar enquanto sua imagem iria se desvanecendo, até que sua superfície alcançasse o horizonte de eventos. A imagem da estrela ficaria, então, congelada, ao mesmo tempo que desapareceria da vista dos observadores externos. Por outro lado, do ponto de vista de um observador hipotético sobre a superfície da estrela, a implosão prosseguiria continuamente até toda a estrela ser compactada numa região de volume nulo, dando origem à chamada singularidade, com densidade infinita. Foram necessários quase 20 anos para que, em 1958, outro físico americano, David Finkelstein, conseguisse encontrar uma forma de conciliar essas visões aparentemente contraditórias.

Uma estrela colapsando continua a existir mesmo quando seu raio se torna inferior ao do horizonte de eventos, assim como o Sol continua existindo após se pôr no horizonte, ao final de cada dia. Aliás, foi precisamente por essa analogia que foi escolhida a denominação *horizonte* (de eventos), pelo físico anglo-americano de origem austríaca Wolfgang Rindler, para a fronteira do buraco negro. No entanto, não podemos ir muito longe com essa comparação, pois o Sol volta a se mostrar no amanhecer seguinte, enquanto tudo o

Redemoinho Relativístico

EM UM BURACO NEGRO de Kerr, que possui rotação, o horizonte de eventos está rodeado por uma região chamada de ergosfera, onde tudo, até mesmo a luz, é obrigado a girar no mesmo sentido do buraco negro.



e Evgeny Lifshitz. Assim, a estrela seria compactada, não de uma forma homogênea, mas distendida em uma direção e contraída nas outras duas de maneira caótica e alternada até finalmente seu volume ser reduzido a zero.

Os métodos usados por Penrose, no entanto, pouco podem dizer sobre as singularidades além do fato de serem verdadeiros abismos, onde até mesmo o espaço e o tempo deixam de existir. Ainda temos muito a avançar na compreensão dessas regiões extremas. Há fortes indícios de que apenas uma teoria de gravitação quântica, que consiga combinar a relatividade geral com a mecânica quântica, possibilitará o entendimento dessas estruturas.

Até o início dos anos 1970, acreditava-se que pelo menos as propriedades macroscópicas dos buracos negros não seriam influenciadas de maneira relevante por efeitos quânticos. Por exemplo, não havia por que acreditar que efeitos quânticos pudessem desafiar o resultado seminal, descoberto pelo físico britânico Stephen Hawking em 1971, que estabelecia que a área do horizonte de eventos de um buraco negro nunca poderia decrescer por meio de nenhum processo físico.

Mas, em 1974, o próprio Hawking fez uma descoberta surpreendente. Ao reestudar a formação de buracos negros por colapso estelar, levando em conta princípios da mecâ-

Para que um buraco negro do tamanho do Sol evaporasse completamente, seria preciso mais tempo que a idade do Universo

que cai para dentro do horizonte de um buraco negro, segundo a teoria clássica, ficará permanentemente inacessível para um observador no meio externo.

Ao contrário do horizonte de eventos, cuja existência esperamos comprovar diretamente, não sabemos como testar a região interna dos buracos negros, a não ser teoricamente. Nesse sentido, uma grande contribuição foi dada em 1965 pelo matemático britânico Roger Penrose, quando verificou que a singularidade existente na solução de Oppenheimer e Snyder reflete uma propriedade genérica dos buracos negros. Ele mostrou que buracos negros originados classicamente por colapso estelar *sempre* possuem uma singularidade em seu interior. Tudo aquilo que penetra no horizonte de eventos é, então, continuamente comprimido ao longo de sua trajetória rumo à destruição, acabando como parte indistinguível da própria singularidade.

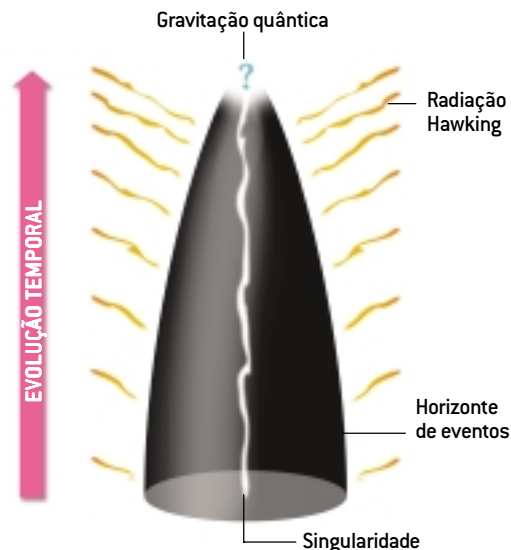
Já o colapso estelar em si deve ser tipicamente oscilatório, como sugerem os trabalhos desenvolvidos na década de 1960 pelos soviéticos Vladimir Belinsky, Isaac Khalatnikov

quântica, ele concluiu que observadores distantes veriam um fluxo de partículas elementares provenientes do buraco negro, com temperatura bem definida. Para a materialização dessas partículas, a energia seria extraída do próprio buraco negro, que, como consequência, evaporaria. Afinal, buracos negros não seriam tão indestrutíveis como se acreditava a princípio.

Buracos negros típicos emitiriam um fluxo de partículas com temperatura muito baixa para que pudessem ser observadas com a tecnologia atual. A título de ilustração, um buraco negro com massa equivalente à do nosso Sol teria uma temperatura da ordem de 60 bilionésimos acima do zero absoluto. Para que ele evaporasse completamente à custa desse efeito, necessitaria de muito mais tempo do que a própria idade do Universo. Buracos negros pequenos, por outro lado, precisariam de muito menos tempo para evaporar completamente, mas ainda não está claro se o Universo já possuiu, ao longo de sua vida, algum mecanismo eficiente de formação de miniburacos negros.

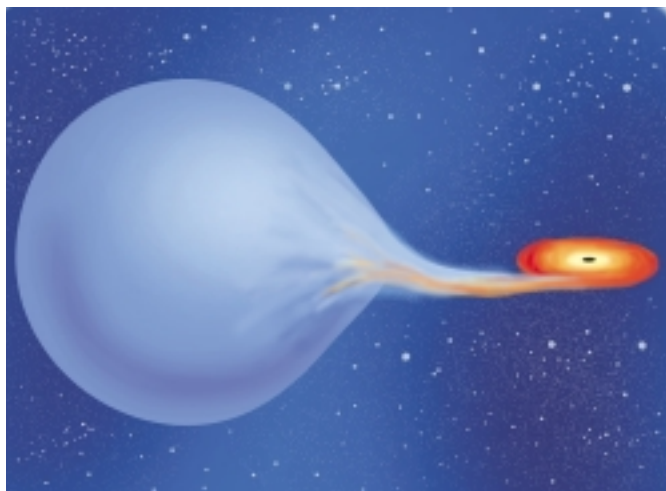
Evaporação Quântica

O ESQUEMA AO LADO mostra como funcionaria a evaporação de buracos negros por meio da radiação Hawking. De acordo com a teoria quântica de campos, pares de partículas e antipartículas virtuais são constantemente criados e imediatamente aniquilados no vácuo. Perto do horizonte, devido à atração gravitacional, uma das partículas do par pode ser capturada pelo buraco negro enquanto a outra escapa para o infinito, constituindo a radiação Hawking. A energia contida nessa radiação é tirada do campo gravitacional do buraco negro, o que se traduz em uma diminuição da sua massa e, conseqüentemente, de seu raio. Existe um raio a partir do qual a teoria da relatividade geral deixaria de valer e seria necessária uma teoria quântica da gravitação para poder prever o que acontece nessa situação extrema. Não é à toa que há uma interrogação nesse ponto – os físicos ainda precisam chegar a essa unificação.



Se, por um lado, a descoberta da evaporação de buracos negros não revolucionou a astrofísica observacional, por outro, as implicações conceituais que dela derivaram desafiam os teóricos até hoje. O fato de buracos negros possuírem temperatura sugere que eles também tenham outras propriedades termodinâmicas. Com efeito, pouco tempo antes da descoberta de Hawking, o físico israelense de origem mexicana Jacob Bekenstein, inspirado nas quatro leis mecânicas dos buracos negros, enunciadas em 1973 por James Bardeen, Brandon Carter e pelo próprio Hawking, já havia associado uma *entropia* aos buracos negros. Tal entropia seria proporcional à área do horizonte de eventos.

A entropia de um sistema tem a ver com seu grau de de-



CYGNUS X-1 É UMA FONTE DE RAIOS X composta da estrela supergigante azul HDE226868 e de uma companheira invisível e muito compacta, cuja massa sugere que seja um buraco negro. Os raios X seriam emitidos pela matéria da estrela que está sendo sugada pelo buraco negro.

sordem. A Segunda Lei da Termodinâmica estabelece que, em um sistema fechado, a entropia contida na forma de matéria ordinária nunca decresce. Bekenstein propôs então a Segunda Lei Generalizada da Termodinâmica, de acordo com a qual, em um sistema fechado, a entropia contida na forma de matéria ordinária somada àquela na forma de buracos negros nunca decresceria. Apesar de a Segunda Lei da Termodinâmica já ter sido testada e confirmada exaustivamente, sua versão *generalizada* tem sido apenas confrontada com experimentos mentais; afinal, não temos nenhum buraco negro disponível para usarmos em experimentos diretos. No entanto, todos os indícios teóricos apontam para sua validade. Fica então a questão: qual a natureza microscópica da entropia dos buracos negros? Onde poderia estar codificada sua “desordem”? Embora várias possibilidades estejam sendo aventadas, ainda não temos certeza da solução. A resposta dessa e de outras questões cruciais, como o chamado paradoxo da perda de informação por buracos negros, deverá esperar por uma teoria plena e confiável de gravitação quântica.


Paradoxo da Informação

PARA ENTENDERMOS O PARADOXO DA PERDA de informação por buracos negros, imaginemos uma estrela preparada em um “estado puro”, de forma a determos a máxima informação sobre seu estado. O problema aparece quando percebemos que, no processo de colapso estelar, formação do buraco negro e subsequente completa evaporação, acabamos com um “estado térmico misto”, perdendo informação sobre a estrela original. O Universo sofreria, assim, uma perda líquida de informação, o que é incompatível com a mecânica quântica. Quais alternativas teríamos para resolver esse pa-

radoxo? Estaria o problema na própria mecânica quântica, que deveria ser reformulada de modo que permitisse a perda de informação? Será que, ao levar em conta efeitos quânticos na interação gravitacional, o buraco negro não evaporaria completamente, mas deixaria algum tipo de remanescente que seria o depositário da informação da matéria que o formou? Ou, talvez, faria com que a informação da matéria que originou o buraco negro acabasse codificada em correlações sutis na própria radiação emitida? Se alguma dessas possibilidades, ou uma combinação delas, é a solução do paradoxo, é algo atualmente muito controverso e fonte de numerosas discussões.

Em 1997, Hawking e os físicos americanos John Preskill e Kip Thorne fizeram uma aposta. Enquanto Hawking e Thorne acreditavam que toda a informação depositada nos buracos negros estaria definitivamente perdida, Preskill defendia que a natureza teria algum mecanismo ainda desconhecido que permitiria recuperá-la. Em julho deste ano, em uma conferência internacional sobre relatividade geral, em Dublin, Irlanda, Hawking declarou publicamente ter mudado de opinião e que, portanto, buracos negros não seriam destruidores irremediáveis de informação. Apesar de a solução apresentada por Hawking estar longe de ser consensual-

mente aceita, quem sabe, assim como Dante foi capaz de retornar das profundezas do Inferno, a informação, no final, consiga escapar dos buracos negros e não se torne irremediavelmente inacessível ao universo exterior.

É difícil dizer para onde toda essa jornada vai nos levar. Talvez nos ensine algo sobre mecânica quântica. Talvez nos ensine algo sobre o espaço-tempo. Talvez, quem sabe, nos conduza diretamente à própria gravitação quântica. Seja como for, enquanto ainda procuramos pelas respostas, o certo é que os objetos mais simples e perfeitos da natureza continuam sendo também os mais misteriosos. 

PARA CONHECER MAIS

Black Holes and Time Warps. Kip Thorne. W. W. Norton & Company, Inc., Nova York, 1994.

The Future of Spacetime. Stephen Hawking e outros. W. W. Norton & Company, Inc., Nova York, 2001.

Space, Time, and Gravity. Robert M. Wald. The University of Chicago Press, Chicago, 1992.

Os Buracos Negros e o Universo. Igor Novikov. Elfos Editora Ltda., Rio de Janeiro, 1990.

Breve História do Tempo Ilustrada. Stephen Hawking. Editora Albert Einstein Ltda., Curitiba, 1997.

Um bom exercício
para a inteligência:
sentar no sofá
e ligar a TV.
Rede SescSenac
de Televisão.

DOCUMENTÁRIOS OPINIÃO ECOLOGIA CULTURA CINEMA MÚSICA INFORMAÇÃO ARTE EDUCAÇÃO

Assista, agora, a variedade e conhecimento: STV - Rede SescSenac de Televisão. STV é o canal a cabo que respeita sua inteligência 24 horas por dia. Aliando cultura, educação e informação, seus programas de entretenimento são feitos sob medida para quem gosta de se atualizar e aprender. E sem abrir mão da modernidade, do dinamismo e da diversão. Tem gente que tem a cidadania guardada na cabeça. Nossos telespectadores também têm na mão. Sintonize STV. Para informações sobre como sintonizar a STV em sua região, acesse o site www.redestv.com.br



O canal da educação e da cidadania