





informação

SINGULARIDADE E

ESSES EXTRAVAGANTES OBJETOS

SÃO ACUSADOS DE VIOLAR A LEI DA

CONSERVAÇÃO DA INFORMAÇÃO.

MAS A CIÊNCIA AINDA NÃO TEM UMA

OPINIÃO DEFINITIVA A RESPEITO

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

Fundada no século III a.C., a Biblioteca Real de Alexandria foi durante séculos o maior centro de saber do mundo antigo. Seu acervo, estimado na época áurea em até 700 mil manuscritos, condensava o conhecimento acumulado pela civilização desde o seu florescer. A versão mais aceita atribui a Teófilo, bispo de Alexandria, a responsabilidade pela destruição de tal tesouro. As conseqüências desse incidente, ocorrido em fins do século IV d.C., ainda hoje são difíceis de avaliar. A informação adquirida ao longo de séculos foi destruída pelas chamas... Mas foi mesmo?

Uma característica crucial das leis fundamentais que acreditamos regerem a Natureza microscópica é o fato de elas não permitirem a destruição de qualquer informação contida em um sistema físico fechado (ou seja, isolado). Uma vez conhecidas, em um dado instante, todas as características de tal sistema, podemos tanto di-

A BIBLIOTECA DE ALEXANDRIA. Será que o incêndio criminoso que queimou seus 700 mil manuscritos destruiu irremediavelmente a informação neles contida? Do ponto de vista da mecânica quântica, essa informação talvez se encontre fora de nosso alcance, mas não estaria perdida

© ANG BERLIM/PRES

SEGUNDO BEKENSTEIN, TODA VEZ QUE MATÉRIA OU ENERGIA CAEM NO BURACO NEGRO, AUMENTANDO O SEU TAMANHO, SUA ENTROPIA TAMBÉM AUMENTA, GARANTINDO QUE A ENTROPIA DO UNIVERSO COMO UM TODO JAMAIS DIMINUA

O FÍSICO RUSSO Yakov Zeldovich (abaixo) estudou os efeitos que intensos campos gravitacionais (como aqueles dos buracos negros) provocam no vácuo quântico. Verificou-se, então, que mudanças no campo gravitacional podem perturbar o vácuo quântico a ponto de transformar algumas partículas virtuais em reais. Essa seria a causa da radiação de Hawking

zer como ele era no passado quanto prever como será no futuro. Assim, em princípio, o conhecimento detalhado de todas as características “microscópicas” das cinzas de um livro incinerado, juntamente com as da fumaça produzida, seria suficiente para determinar o que ele era quando o fogo foi ateado e recuperar as informações nele contidas. As informações não teriam sido destruídas pelo fogo, mas transformadas em uma forma menos organizada.

Nível de Desordem

ESSE EXEMPLO ILUSTRA UMA PROPRIEDADE aparentemente geral da Natureza: embora possa evoluir para uma forma menos organizada e talvez inadequada aos propósitos práticos, a informação que caracteriza completamente um sistema físico é conservada. O aumento no nível de “desordem”, que quase sempre acompanha a evolução de um sistema, é associado ao aumento de uma grandeza chamada “entropia”. Mas as

leis da Natureza, sejam elas clássicas ou quânticas, impõem que, acessíveis ou não, as informações características de um sistema fechado não sejam destruídas. Existe, no entanto, uma situação extrema que talvez constitua exceção a essa regra – situação cuja plena compreensão aguarda por uma teoria que compatibilize a gravitação, descrita pela teoria da relatividade geral, com os princípios da mecânica quântica. Tal situação é a evaporação de buracos negros.

A teoria da relatividade geral nos mostrou que o espaço-tempo pode estar tão curvado sobre si mesmo em certas regiões do Cos-

mos que nem mesmo a luz é capaz de escapar de seu interior. Assim se originariam os objetos que chamamos de buracos negros. Eles seriam não apenas devoradores implacáveis de matéria e energia, mas também devoradores de informação, pois toda a informação depositada em seu interior não poderia ser recuperada por observadores externos. Porém, apesar de inacessível aos de fora, não havia motivos para acreditar que

a informação tivesse sido destruída. Afinal, não tínhamos nenhum precedente de um sistema fechado que destruísse informação. Essas premissas foram abaladas, contudo, por descobertas feitas na década de 70.

Como se afirmou no exemplo do livro incinerado, a perda de informação para todos os propósitos práticos é acompanhada pelo aumento da entropia do sistema. Em essência, essa é a segunda lei da termodinâmica, confirmada cotidianamente nas mais diversas situações. Na presença de buracos negros, no entanto, essa lei parecia perder sua validade. Poderíamos, por exemplo, jogar em seu interior os restos do livro queimado, diminuindo a entropia do mundo exterior e, portanto, do Universo como um todo, já que, na época, se assumia que buracos negros tivessem entropia nula. Isso levava diretamente à violação da segunda lei da termodinâmica.

Insatisfeito com tal situação, o físico israelense Jacob Bekenstein, inspirado nas quatro leis mecânicas dos buracos negros, enunciadas em 1973 pelo americano James Bardeen, o australiano Brandon Carter e o inglês Stephen Hawking, associou a cada buraco negro uma entropia proporcional à área do seu horizonte de eventos (aquele que define a fronteira entre o que pode e o que já não pode mais retornar ao mundo exterior). Bekenstein enunciou, então, a segunda lei generalizada da termodinâmica: toda vez que matéria ou energia (e, portanto, informação) cai no buraco, aumentando o seu tamanho, sua entropia também aumenta, garantindo que a entropia do Universo como um todo nunca diminua. Mas essa atribuição *ad hoc* de entropia aos buracos negros não agradou a todos. Hawking observou que, se a entropia fosse associada aos buracos negros, eles também deveriam possuir uma temperatura, o que significa que deveriam emitir radiação. E argumentou que isso era absurdo: nada poderia sair de um buraco negro.

Fluxo de Partículas

EM 1974, PORÉM, O PRÓPRIO HAWKING fez uma descoberta surpreendente. Ao reestudar a formação de buracos negros por colapso estelar, levando em conta os princípios da mecânica quântica, ele concluiu que, no final do processo, observadores estáticos distantes veriam um fluxo de partículas elementares saindo do buraco negro. E ainda mostrou que, para buracos ne-



CORTESIA PROF. V. I. GOLDANSKI/SONOMA STATE UNIVERSITY/ DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY



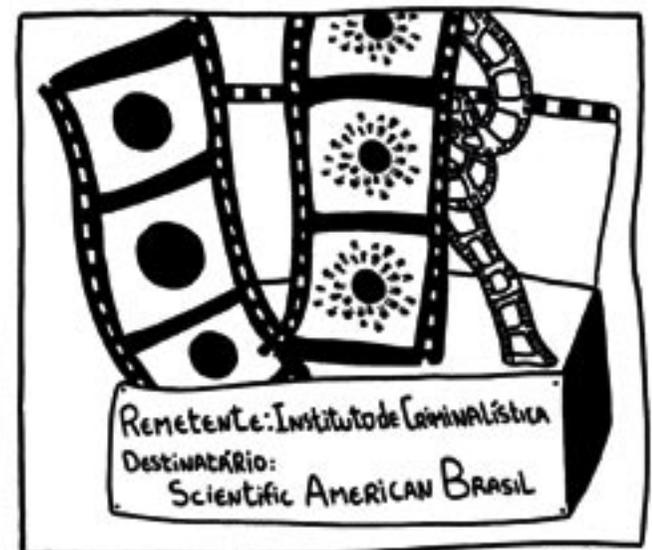
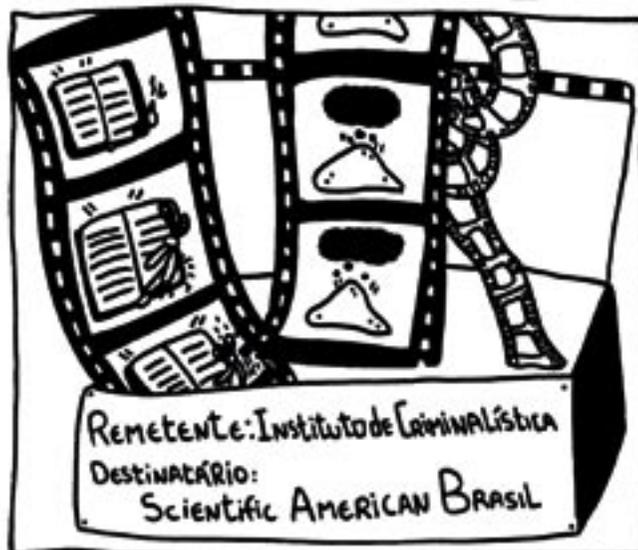
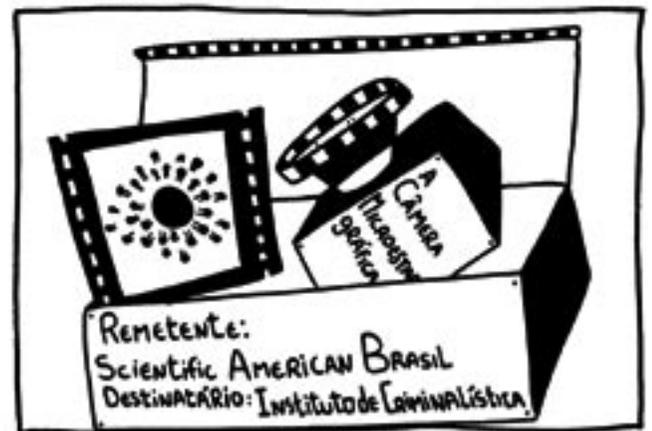
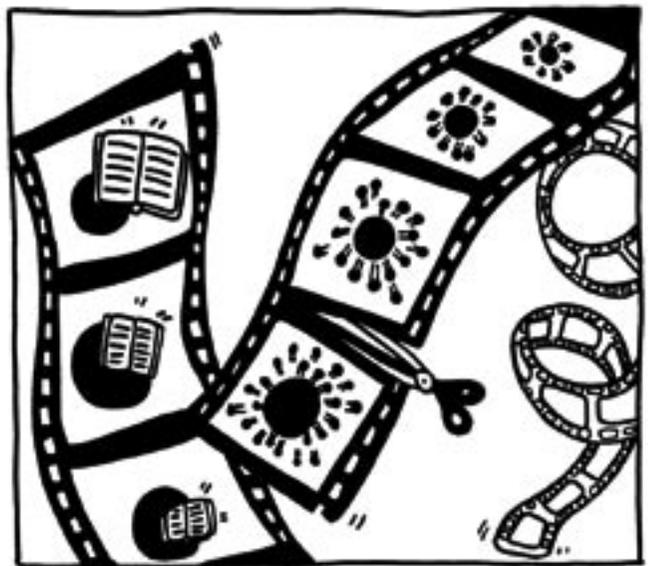
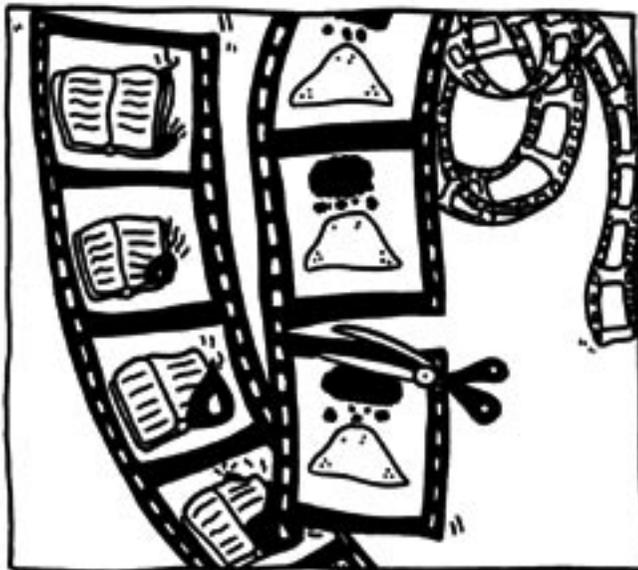
gros estáticos, tal fluxo possuía uma temperatura bem definida, inversamente proporcional à massa – o que fazia com que sua entropia fosse de fato proporcional à área, conforme a conjectura de Bekenstein. A energia para o processo de irradiação seria fornecida pelo próprio buraco negro que, em conseqüência, “evaporaria”. O suposto fenômeno ficou conhecido como radiação de Hawking. E evidências teóricas suplementares a seu favor foram fornecidas logo depois pelo canadense William Unruh, o inglês Paul Davies e o americano Stephen Fulling. Afinal, os buracos negros não seriam tão indestrutíveis como se acreditava. Mas como conciliar essa radiação com a característica mais marcante dos buracos negros, a de que nada pode escapar de seu interior? A solução desse aparente paradoxo residia no “vazio” que os circunda: o vácuo.

O vácuo é comumente associado ao estado de mínima energia que descreve a ausência total de matéria e radiação em uma dada região. Mas o que restaria depois de se extrair todas as partículas de matéria e radiação, levando a região ao mais perfeito vácuo? Segundo a mecânica quântica, a região continuaria povoada por uma legião de partículas, denominadas virtuais, que não podem ser removidas. Ademais, elas surgem e se aniquilam aos pares, tão rapidamente que sua detecção direta é impossível.

No final da década de 60, o físico americano Leonard Parker e o soviético Yakov Zeldovich começaram a estudar como o vácuo quântico era afetado pela presença de campos gravitacionais intensos. Verificou-se, então, que mudanças no campo gravitacional podem perturbar suficientemente o vácuo quântico, a ponto de transformar algumas destas partículas virtuais em reais.

STEPHEN HAWKING começou a se ocupar do “paradoxo da informação” em meados da década de 70. E sustentou, inicialmente, que outras informações além da massa, da carga elétrica e do momento angular ficariam para sempre perdidas nos buracos negros, o que configuraria uma “grande crise para a física”. Em 2004, ele surpreendeu o mundo ao reconhecer que a superfície do buraco negro apresentaria flutuações quânticas capazes de possibilitar o escape de toda a informação aprisionada em seu interior

PARADOXO DA INFORMAÇÃO (O FILME)



VISCA

VISCA, COM BASE EM DESENHO DE JORGE CASTIGRAS

IMAGINEMOS QUE EXISTA uma câmera diferente: ela não registra apenas a imagem das coisas, mas também seu exato estado microscópico. Se, com essa câmera “microestadográfica” filmarmos um livro sendo queimado, então, em princípio, bastaria mandar o último quadro do filme (que registra o estado microscópico das cinzas e da fumaça) junto com a câmera (que faz parte do sistema fechado) a um perito, para que este, usando as leis fundamentais da Natureza, consiga reproduzir o filme inteiro, até o quadro onde está registrado o estado inicial do livro. Se, por outro lado, em vez de atearmos fogo ao livro, o jogarmos em um buraco negro, não é claro que o perito seja capaz de reproduzir o filme inteiro como no primeiro caso. Se isso realmente for impossível, o sistema terá sofrido perda de informação

Que alternativas teríamos para resolver esta situação paradoxal? Uma possibilidade seria dizer que o problema reside na própria mecânica quântica, que deveria ser reformulada para acomodar situações desse tipo. Uma segunda explicação poderia estar no fato de que, no contexto de uma teoria completa de gravitação quântica, a radiação de Hawking exiba um pequeno desvio de termalidade, no qual estaria codificada toda a informação devorada pelo buraco negro. Uma terceira especulação, finalmente, é que o buraco negro não evapore de todo, mas deixe algum resí-

ZELDOVICH VERIFICOU QUE MUDANÇAS NO CAMPO GRAVITACIONAL PODEM PERTURBAR O VÁCUO QUÂNTICO A PONTO DE TRANSFORMAR PARTÍCULAS VIRTUAIS EM REAIS. ESSA É A ORIGEM DA RADIAÇÃO DE HAWKING

Essa era exatamente a origem da radiação de Hawking: o horizonte de eventos do buraco negro perturba de tal maneira o vácuo quântico que parte das partículas virtuais são convertidas em reais à custa da energia dele. Essas partículas, produzidas na vizinhança externa do buraco negro, escapam para o espaço exterior, onde podem ser observadas como um fluxo térmico, conferindo temperatura e entropia ao buraco negro. A título de ilustração, um buraco negro com massa igual à do Sol teria uma temperatura da ordem de 60 bilionésimos de grau acima do zero absoluto (aproximadamente -273°C). Se, por um lado, a descoberta da evaporação dos buracos negros não revolucionou a astrofísica observacional, por outro, as implicações conceituais que dela derivam desafiam os teóricos até hoje.

Evaporação Completa

PARA ENTENDER O PORQUÊ DESSE DESAFIO, retornemos às nossas considerações acerca da conservação da informação ao longo da evolução de um sistema físico fechado. Havíamos dito que se esperava que a informação devorada por um buraco negro não fosse destruída se o considerássemos parte do “sistema fechado”. Porém, se admitirmos agora que um buraco negro evapore por completo, concluiremos que tudo o que sobra ao final é a radiação por ele emitida. Ora, sabemos que, se for exatamente térmica, a radiação não conterà toda a informação originalmente depositada no interior do objeto. Neste caso, os buracos negros estariam destruindo informação de maneira irrecuperável. A mesma mecânica quântica que leva ao efeito Hawking e salva a segunda lei da termodinâmica, acaba ameaçando um de seus próprios cânones: a conservação da informação.

duo, onde aquela informação ficaria depositada. Se alguma dessas possibilidades, ou a combinação delas, é a solução do paradoxo, este é atualmente motivo de controvérsia e fonte de numerosas discussões.

Mudança de Opinião

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 de 2004, Hawking declarou publicamente ter mudado de opinião: os buracos negros não seriam destruidores irremediáveis de informação. Apesar de a solução apresentada por Hawking estar longe de ser consensualmente aceita, pode ser que, de fato, a informação consiga escapar de sua rede e não se torne irremediavelmente inacessível ao universo exterior.

É difícil dizer para onde esta jornada vai nos levar. Talvez nos ensine algo sobre mecânica quântica. Talvez nos ensine algo sobre o espaço-tempo. Talvez nos conduza diretamente à tão almejada gravitação quântica. Seja como for, não há dúvida de que os buracos negros podem ser a porta para alguns dos mais bem guardados mistérios da Natureza. 

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