13
artigo geral
VOL. 44 - N. 2/3

O interior de buracos negros - singularidades e censura cósmica

João L. Costa[1,2]

[1] Departamento de Matemática, ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa, Avenida das Forças Armadas, 1649-026, Lisboa, Portugal

[2] Center for Mathematical Analysis, Geometry and Dynamical Systems, Instituto Superior Técnico – IST, Universidade de Lisboa – UL, Avenida Rovisco Pais 1, 1049 Lisboa, Portugal

I. RESUMO

Os buracos negros são uma das mais fascinantes previsões da Relatividade Geral, a extraordinária teoria da gravitação divulgada ao mundo por Albert Einstein em 1915. O que se passa no seu interior tem entusiasmado a nossa curiosidade coletiva e esse fascínio tem sido o motor de notáveis avanços científicos, que têm acompanhado e impulsionado o desenvolvimento da teoria.

Neste artigo de divulgação vamos concentrar-nos naquilo que a análise da geometria e dinâmica das equações de Einstein (ver Figura 1), devidamente temperada por factos observacionais estabelecidos, nos diz sobre o que se passa no interior dum buraco negro. Vamos recordar como a interpretação da gravitação enquanto deformação da geometria do espaço-tempo, a essência da Relatividade Geral, nos puxa para o conceito de buraco negro, analisar se a formação de singularidades no seu interior é ou não é uma inevitabilidade e discutir, no contexto das Conjeturas da Censura Cósmica, o que essa formação, ou falta dela, nos diz acerca dos limites da teoria de Einstein.

É um grande prazer divulgar estas ideias num contexto de celebração do prémio Nobel da Física, de 2020, atribuído a Roger Penrose "*for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity*", e a Reinhard Genzel e Andrea Ghez "*for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy.*"[1]

II. A DEFORMAÇÃO DA GEOMETRIA DO ESPAÇO-TEMPO E A FORMACÃO DE BURACOS NEGROS.

Como poderá já ter lido neste ou noutro número da Gazeta de Física, a Relatividade Geral é uma teoria, descoberta (quase em exclusivo) por Einstein, há pouco mais dum século, que explica a gravitação em termos da deformação da geometria do espaço-tempo causada pelo seu conteúdo de energia/matéria.

É importante realçar, desde já, que, em geral, esta deformação não acontece no espaço e no tempo em separado mas sim ao nível do espaço-tempo, um conceito unificador e fundamental em relatividade. Esse conceito foi desenvolvido por Hermann Minkowski, em 1907, como forma de sistematizar geometricamente a teoria da Relatividade Restrita, uma percursora da sua congénere Geral com aplicabilidade restringida, entre outras coisas, a fenómenos não gravíticos. Apesar de Einstein ter, inicialmente, desvalorizado a geometria de Minkowski como "erudição supérflua" [1], o conceito de espaço-tempo acabou por se revelar indispensável ao desenvolvimento da sua teoria relativista da gravitação e, de facto, essencial para uma compreensão mais profunda de qualquer teoria física causal, onde a propagação de informação não acontece de forma instantânea - no caso da relatividade, o limite máximo de velocidade de propagação é imposto, localmente, pela velocidade da luz e não é um limite qualquer porque, de facto, corresponde a um limite universal que restringe todos os fenómenos físicos clássicos. Em primeira aproximação, a necessidade de introduzir o conceito de espaço-tempo é muito fácil de compreender recorrendo apenas à nossa experiência mundana: se quisermos combinar com alguém temos de acertar tanto o local como a hora para o encontro. Nenhuma dessas informações, em separado, é suficiente: se soubermos apenas o local, vamos provavelmente falhar o encontro por estarmos no mesmo sítio em momentos diferentes; por outro lado, estar à mesma hora em locais diferentes até pode facilitar, em tempos de pandemia, o distanciamento social, mas dificilmente pode ser considerado como um encontro signficativo. O espaço-tempo é então o conjunto de todas as possibilidades de encontros (de todos os "eventos", na terminologia relativista). Mas para obter uma teoria relativista temos ainda de dar outro salto conceptual e libertar cada evento (encontro relativista) e, em seguida, as próprias leis da física, duma qualquer caracterização específica em termos de coordenadas espaciotemporais.

[1] The Nobel Prize in Physics 2020. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2021.Sun.30 May 2021. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary/



Figura 1 - As equações de Einstein como encontradas em Uyuni, Bolivia, no verão de 2005. ©Madalena Miranda..

Resumindo: ao contrário do que sucede na teoria Newtoniana, na gravitação à la Einstein a geometria do espaço-tempo não está predefinida, sendo antes uma estrutura dinâmica que evolui, duma forma determinada pelas equações de Einstein, tendo em conta o conteúdo de energia/matéria; em simultâneo, a geometria do espaço-tempo é a arena onde se dá a evolução dinâmica do seu conteúdo de energia/matéria. Ou como John Wheeler expôs de forma magistral: "O espaço-tempo diz à matéria como se mover e a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar".

À primeira vista, é tentador afirmar que no espaço-tempo a distinção entre espaço e tempo se esbate. Mas não é bem assim, já que a geometria da Relatividade Geral está munida duma forma inequívoca de distinguir se dois eventos estão separados por: i) intervalos do tipo espaço, se os dois eventos forem simultâneos de acordo com um qualquer sistema de relógios; ii) intervalos do tipo tempo, se esses dois eventos corresponderem a dois pontos na órbita duma partícula com massa não nula; e ainda iii) intervalos do tipo luz, se os dois eventos corresponderem a dois pontos na órbita duma partícula com massa nula (por exemplo, um fotão). Dizemos ainda que dois eventos têm uma relação causal se estiverem separados por intervalos do tipo tempo ou do tipo luz, isto é, se for possível comunicar entre eles através do envio de sinais.

Para perceber uma das consequências desta dinâmica gravitacional vamos reutilizar o imaginário de Einstein e supor que o nosso espaço-tempo vem munido dum sistema de réguas, para medir intervalos do tipo espaço, e dum sistema de relógios, para medir intervalos do tipo tempo - essencialmente, a geometria do espaço tempo é isso mesmo. O que pode suceder, e de facto sucede, é que a presença de energia/matéria ao deformar essa geometria pode transformar as réguas em relógios e vice-versa! Isto é, o que numa região do espaço-tempo usávamos para medir distâncias (espaciais), noutra região pode apenas servir para medir o tempo a passar. E é isso mesmo que permite o conceito de buraco negro.

Mas estamos a adiantar-nos porque ainda não dissemos o que é um buraco negro? Vamos então tratar disso. Para começar temos de definir o que é a região exterior: para simplificar vamos definir o exterior como sendo a região onde nós estamos, isto é, vamos assumir que nem eu estou a escrever este texto, nem o leitor o está a ler, no interior dum buraco negro.[2] Um buraco negro é então uma região que não consegue comunicar de forma causal com o exterior; ou dito de outra forma, qualquer sinal emitido a partir dum buraco negro permanece para sempre no seu interior. Em particular, nem mesmo a luz lhe consegue escapar - daí a sua designação sombria. A fronteira que separa o interior do exterior (dum buraco negro) designa-se por horizonte de acontecimentos. Como já referi anteriormente, é a distorção da geometria do espaço-tempo que permite este fenómeno, ao deformar o espaço em tempo. Mais precisamente, num buraco negro o tempo flui no sentido do seu interior e, assim sendo, não podemos evitar afundarmo-nos cada vez mais (no seu interior), tal como não podemos evitar a próxima segunda-feira.

À partida, este conceito poderia não ser mais do que uma mera curiosidade matemática, uma deliciosa e fascinante curiosidade, mas apenas uma curiosidade. No entanto, como resultado do trabalho desenvolvido pela comunidade relativista, donde realço as contribuições seminais de Subrahmanyan Chandrasekhar (Nobel da Física em 1983), de Robert Oppenheimer em colaboração com Hartland Snyder, de Penrose (Nobel da Física em 2020) e de Demetrios Christodoulou, foi-se tornando cada vez mais evidente que os buracos negros são, no contexto da relatividade geral, uma consequência natural de processos astrofísicos, como o colapso gravitacional de estrelas massivas ou a concentração de ondas gravitacionais. Estes resultados teóricos têm sido complementados por extraordinários desenvolvimentos observacionais que permitiram, por exemplo, a deteção de ondas gravitacionais que, em particular, transportam informação relativa a colisão de buracos negros (o que levou à atribuição do prémio Nobel da Física de 2017 a Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne) e a descoberta dum objecto compacto supermassivo no centro da nossa galáxia (um trabalho celebrado com o prémio Nobel da Física de 2020 atribuído a Genzel e Ghez). Todos estes avanços indicam que os buracos negros são fenómenos ubíquos ao nosso universo que, para além do mais, estão intimamente ligados ao desenvolvimento duma multitude de estruturas cósmicas, nas mais variadas escalas.

Muito bem, mas o que sabemos sobre o que se passa no seu interior? É finalmente sobre isso que vamos falar agora.

[2] Se esta "definição" lhe está a parecer um pouco circular, é porque é. Mas por favor não se preocupe, a teoria dos buracos negros está construída em cima de alicerces sólidos que incluem uma definição como deve ser de "exterior". Infelizmente uma apresentacão dessa definição rigorosa exigiria um digressão inevitavelmente técnica e ainda mais longa que esta nota de rodapé. Mais ainda, quando o buraco negro é o resultado dum processo astrofísico, como o colapso duma estrela, uma noção de exterior emerge naturalmente associada ao exterior da estrela - a região para onde esta emitia luz, nos bons velhos tempos em que ainda brilhava.

III. O INTERIOR DE BURACOS NEGROS

Parece-me natural começar pelo óbvio: tudo o que sabemos sobre o que se passa no interior dum buraco negro tem origem no estudo e interpretação da geometria e da dinâmica de soluções matemáticas das equações de Einstein, como por exemplo as soluções descobertas por Karl Schwarzschild, por Hans Reissner e Gunnar Nordström, e por Roy Kerr. Não é que, em princípio, não seja possível observar o que lá se passa diretamente, mas para tal teríamos necessariamente de entrar num buraco negro - o interior de buracos negros são mesmo o tipo de coisa que, por definição, não podemos observar a partir do seu exterior! No entanto, esta estratégia não parece ser uma grande ideia: não pensem que digo isto com medo da entrada no buraco negro em si, porque se este for suficientemente grande e massivo, podemos atravessar o seu horizonte de acontecimentos sem que os efeitos gravitacionais associados ponham em causa a nossa integridade física[3]. Também não pensem que é por medo do escuro, porque o interior dum buraco negro não tem de ser escuro, antes pelo contrário - um buraco negro é um pouco como o "Hotel Califórnia", a luz pode entrar à vontade não pode é sair. Então qual é o problema? Bem, em primeiro lugar, a viagem seria longa, mas o principal problema é que, depois de todo o esforço, não teríamos forma de comunicar com a terra para nos gabarmos dos nossos feitos - "*what happens in a black hole stays in the black hole*".[4]

Fiquemo-nos então pela exploração matemática. Então o que é que a análise das equações de Einstein nos diz sobre o que se passa no interior dum buraco negro? Bem, isso depende do tipo de buraco negro!

A. Buracos negros eletricamente neutros e sem rotação

Vamos considerar este caso tal como é descrito pela solução de Schwarzschild (publicada em 1916), a mais antiga das soluções não triviais das equações de Einstein[5]. Podemos ser então um pouco mais específicos e considerar que, em cada instante de tempo (como medido pelos relógios de observadores que se mantêm estáticos em relação ao buraco negro), o exterior, tal como uma cebola, é folheado por esferas. Nessa região, a área dessas esferas pode ser usada como uma coordenada espacial que mede a distância a que nos encontramos do buraco negro - quanto maior for a área da esfera maior a distância. O interior também pode ser folheado por esferas, em consonância com o que foi feito no exterior. No entanto, tal como descrito anteriormente de forma genérica, a distorção da geometria do espaço-tempo vai fazer com que a área destas esferas mude o seu caráter causal: se no exterior a área era uma medida de espaço, no interior, a área das esferas fornece-nos uma medida de tempo - no interior, os ponteiros dos relógios movem-se no sentido de diminuição da área das esferas! Por isso é que, uma vez no interior do buraco negro, o passar do tempo nos leva cada vez mais para as suas "profundezas".

Neste caso temos então área/hora marcada com a morte! A passagem do tempo e consequente diminuição da área das esferas levará qualquer observador, sem escapatória, ao encontro duma singularidade onde a área das nossas esferas se anula. Neste processo, a curvatura do espaço-tempo torna-se infinita, de tal forma que as forças de maré associadas levarão à destruição de qualquer objeto macroscópico (via compressão na direção das esferas e "esparguetificação" na direção transversal às mesmas). Mais ainda, as próprias equações de Einstein deixam de fazer sentido e deixa de ser possível continuar (de forma significativa) a geometria do espaço-tempo para o futuro; assim sendo, faz todo o sentido promover este tipo de singularidade ao estatuto de singularidade terminal.

Gostava de aproveitar para clarificar que a singularidade referida não é um "ponto no espaço onde tudo o que entrar no buraco negro se junta": Em primeiro lugar, não é uma posição no espaço, mas antes um instante no tempo. Em segundo lugar, não é um ponto, mas antes o limite de cilindros de comprimento infinito em que a área das suas secções esféricas se anula. Finalmente, observadores que entrem no buraco negro não têm de ficar arbitrariamente próximos à medida que cumprem o seu terrível destino em direção à singularidade. De facto, dois objectos que entrem no buraco negro em queda livre vão ter tendência a afastar-se, mesmo que comecem a sua queda arbitrariamente próximos: este fenómeno está intimamente ligado à "esparguetificação" referida à pouco.

B. Buracos negros eletricamente carregados.

Se acrescentarmos carga elétrica ao buraco negro a situação muda radicalmente. Vamos considerar a situação como descrita pela solução de Reissner-Nordström (1918). Mais uma vez o espaço-tempo pode ser folheado por esferas cuja área nos fornece uma coordenada que muda o seu caráter causal quando se atravessa o horizonte de acontecimentos. Então qual é a grande diferença? A grande diferença é que, neste caso, um observador que entre no buraco negro não tem o destino marcado com uma singularidade terminal (*à la Schwarzschild*); antes que isso possa acontecer, o observador irá encontrar um novo horizonte, conhecido como horizonte de Cauchy, que conseguirá atravessar sem percalços.

[3] Pode parecer contra-intuitivo que quanto maior for o buraco negro menores serão os efeitos sentidos por um corpo, ao atravessar o horizonte de acontecimentos, como consequência das forças de maré, mas é mesmo assim. Podemos obter uma explicação para este facto se tivermos em conta que, no caso mais simples, a área das secções do horizonte de acontecimentos é da ordem do quadrado da massa do buraco negro, o que indica que quanto maior for o buraco negro menos "denso" será.

[4] Esta foi a minha ultima cedência à cultura pop. Prometo.

[5] Esta solução foi descoberta por Schwarzschild, poucas semanas depois da descoberta das respetivas equações relativistas do campo gravítico, quando este se encontrava em campanha durante a Primeira Grande Guerra! No entanto, seria necessário esperar aproximadamente meio século até que uma compreensão do seu conteúdo geométrico e a correspondente interpretação enquanto buraco negro se tornassem claras.

Do ponto vista deste observador intrépido esta situação é claramente mais agradável, mas do ponto de vista da teoria (da Relatividade Geral), a situação é catastrófica! O horizonte de Cauchy corresponde à fronteira da região do espaço-tempo determinada de forma unívoca pelas equações de Einstein. Assim sendo, o que acontece ao observador para lá desse horizonte não pode ser determinado recorrendo à teoria! Este último ponto é subtil e merece um pouco mais de atenção. O horizonte de Cauchy não corresponde a uma fronteira terminal do espaço-tempo a partir da qual as equações de Einstein deixam de ser capazes de produzir soluções (antes fosse). O problema é o oposto, a partir do horizonte de Cauchy as Equações de Einstein passam a poder produzir uma infinitude de novas soluções, todas elas compatíveis com o que se passou até então! Qual é o problema? O problema é que esta situação põe em causa o determinismo em Relatividade Geral, uma característica fundamental de qualquer teoria física respeitável. De forma muito sucinta, uma teoria respeita o determinismo (Laplaciano) se, no contexto da mesma, o futuro for univocamente determinado pelo passado. Como diz o matemático e relativista Mihalis Dafermos "as teorias físicas são como a burocracia, querem ter toda a gente devidamente contabilizada". É exatamente isto que falha ao atravessarmos o horizonte de Cauchy: existem infinitas possibilidades distintas para o que se passa no seu futuro e, assim sendo, a Relatividade Geral não consegue determinar de forma unívoca o futuro a partir do passado!

Se esta situação lhe parece agradável e não gosta de burocracias, então não vai gostar do que vem já a seguir: vamos invocar um Censor Cósmico para pôr termo a esta rebaldaria.

Mas antes de o fazer, gostava de realçar que o problema com a existência de horizontes de Cauchy e a consequente quebra de determinismo sucede de forma análoga no caso dum buraco negro em rotação estacionária, tal como descrito pela solução de Kerr (1963). Devo ainda salientar que, à partida, este é o caso com maior relevância astrofísica. Então porque é que não nos centramos nesta solução? Bem, porque a geometria de Kerr é bem mais complicada que a de Reissner-Nordström, mas, apesar disso, ambas partilham uma estrutura causal global com muitas semelhanças - incluindo a existência de horizontes de Cauchy no interior do seu buraco negro. Parafraseando Wheeler " a carga é o "parente pobre" do momento angular".[6]

C. O efeito de desvio para o azul.

As singularidades Schwarzschildeanas, que descrevemos anteriormente, não podem ser observadas nem a partir do exterior, porque se encontram dentro do buraco negro, nem mesmo a partir do interior, porque a sua localização corresponde a um instante de tempo que se encontra no futuro de qualquer observador que por lá se aventure. No entanto, não e difícil encontrar outras soluções das equações de Einstein[7] que têm singularidades visíveis, mesmo a partir da região exterior. Peço desculpa pelo aparente puritanismo, mas o facto destas singularidades nuas serem observáveis cria todo o tipo de problemas ao nível da preservação do determinismo Laplaciano! Perante estas dificuldades, Penrose conjecturou, no final dos anos 60 [2], que uma teoria tão extraordinária quanto a Relatividade Geral, que explicava com uma precisão notável fenómenos tão diversos como o encurvamento da luz, a precessão do periélio da órbita de Mercúrio, a expansão do universo ou a dinâmica de Pulsares, teria de ter um mecanismo interno de autocorreção que garantisse que, genericamente, todas as singularidades formadas num processo evolutivo de colapso gravitacional se encontrassem no interior dum buraco negro. Surge então o Censor Cósmico, cuja missão primária é garantir à preservação do determinismo Laplaciano, tendo para tal de proibir o nudismo de singularidades, ao impor que todas se encontrem devidamente cobertas por um horizonte de acontecimentos.

Agora que conhecemos o Censor Cósmico, se herói ou vilão deixo ao critério do leitor, podemos voltar aos problemas causados pela existência de horizontes de Cauchy. Recorde que, tal como as singularidades nuas, mas por razões diversas, estes horizontes criam sérios entraves à preservação do determinismo Laplaciano. Assim sendo, a proibição da sua formação está dentro da jurisdição do Censor Cósmico. Mas desta vez, não vamos recorrer à censura cósmica como um mero auto de fé; vamos antes munir o nosso Censor duma ferramenta apropriada ao cumprimento da sua missão: o mecanismo de desvio para o azul[8], que foi descoberto por Penrose [3], pela mesma altura em que conjurou o Censor Cósmico, e corresponde a um de entre muitos momentos de extraordinária inspiração com que este grande matemático nos presenteou.

Este mecanismo está diretamente relacionado com a seguinte notável propriedade causal dos horizontes de Cauchy: a totalidade da história da região exterior pode ser visualizada por um observador, nos instantes antes deste chegar a um horizonte de Cauchy!

Este processo de compactificação dum intervalo de tempo infinito (a totalidade da história) num intervalo de tempo finito arbitrariamente pequeno (os instantes antes de chegar ao horizonte de Cauchy) permite criar um mecanismo de amplificação, arbitrariamente grande, que vamos passar a descrever com mais detalhe.

Imaginemos que duas amigas, a Alice e a Belimunda, orbitam um buraco negro de Reissner-Nordström e combinam realizar a seguinte experiência: Alice, que tem por hábito cair em buracos, irá aventurar-se no interior do buraco negro, enquanto que a clarividente Belimunda[9] decide ficar, eternamente, na segurança da sua orbita estacionária, comprometendo-se ainda a enviar, com uma frequência constante, como medida pelo seu relógio, sinais luminosos para o interior do buraco negro; note que Belimunda irá enviar uma quantidade infinita de sinais na direção de Alice. Acontece que, na sua incur-

[6] No original, "charge is the `poor-man's' angular momentum".

[7] Por exemplo, soluções de Reissner-Nordström sobrecarregadas e soluções de Kerr em sobre-rotação.

[8] É difícil resistir à tentação de realçar a coincidência cromática entre o mecanismo ao dispor do Censor Cósmico e a famosa cor de lápis usada pelos censores do Estado Novo.

[9] Talvez Belimunda tenha acesso privilegiado ao supercomputador Baltasar (Sete Sóis) e, tal como tantos de nós, tenha com isso melhorado o seu conhecimento sobre a física de buracos negros e decidido ficar a uma distância de segurança; ou talvez tenha sido apenas uma questão de bom senso.

são pelo buraco negro, Alice irá necessariamente chegar ao horizonte de Cauchy, num intervalo de tempo finito, como medido pelo seu relógio. Assim sendo, a infinitude de sinais enviados por Belimunda terá de chegar, na perspetiva de Alice, num tempo finito. Em particular, à medida que se vai aproximando do horizonte de Cauchy, Alice irá detetar os sinais a chegarem com uma frequência cada vez maior e, portanto, com luz desviada para o azul. É importante realçar que este aumento de frequência, e portanto de energia, é divergente, isto é, cresce sem limite, na vizinhança do horizonte de Cauchy.

Penrose percebeu então, de forma magistral, que este processo poderia corresponder exatamente ao mecanismo interno de salvaguarda do determinismo de que a teoria necessita tão desesperadamente. Mais precisamente, se um buraco negro contém um horizonte de Cauchy, então qualquer perturbação arbitrariamente pequena da região exterior, como o bater de asas duma borboleta, irá gerar ondas gravitacionais que, ao propagarem-se para o interior, podem ser infinitamente amplificadas pelo mecanismo de desvio para o azul. Mas, assim sendo, como segundo as equações de Einstein o conteúdo de energia determina a geometria do espaço-tempo, a divergência da frequência das perturbações poderá levar a uma divergência na geometria e, consequentemente, à formação duma singularidade Schwarzschildeana, que, recorde, corresponde a uma fronteira terminal para a teoria, onde todos os observadores são destruídos (viva!) e as equações de Einstein deixam de fazer sentido (hurra!).

Pode ser difícil compreender o gáudio perante tamanho poder destrutivo, mas segundo a situação que acabámos de descrever, a Relatividade Geral cumpre completamente o seu desígnio de permitir determinar, de forma unívoca, a evolução do futuro (gravitacional) do universo. Nesta perspetiva, a formação de singularidades terminais é positiva, porque ajuda à preservação do determinismo. Se isso choca com o nosso repúdio natural com a morte é de pouca relevância para uma teoria cuja única responsabilidade é a explicação da gravitação. Portanto, senão querem ser destruídos no interior dum buraco negro, em vez de se insurgirem contra a formação de singularidades em Relatividade Geral, façam como a Belimunda e mantenham-se a uma distância de segurança; tal como se quiserem evitar os efeitos nefastos dum atropelamento, olhar antes de atravessar é bem mais produtivo do que criticar as leis de conservação de energia da mecânica clássica.

Ponto da situação: vantagem para o Censor Cósmico! Mas o jogo está longe de estar terminado.

D. Um buraco negro num universo em expansão acelerada.

Para infelicidade do Censor Cósmico, no exterior de buracos negros, existem mecanismos de atenuação de perturbações. Um destes mecanismos é, de certa forma, análogo à forma como as ondas geradas na superfície dum lago tendem a dissipar-se[10]. Por um lado, estes mecanismos são fundamentais para a estabilidade da região exterior, mas por outro, competem com o mecanismo de desvio para o azul.

Recorde que o Censor Cósmico espera que o efeito de desvio para o azul gere, a partir duma qualquer perturbação, uma energia divergente (uma espécie de bomba azul) que seja suficientemente forte para destruir um horizonte de Cauchy, transformando-o numa singularidade terminal. Mas, se um mecanismo antagónico conseguir diminuir as perturbações de forma eficiente, a explosão azul pode deixar de ser suficientemente poderosa para garantir que os objetivos do Censor sejam cumpridos. Portanto, a validade da Censura Cósmica depende agora de qual dos fenómenos vence esta competição.

A clarificação de qual é o vencedor deste embate exige uma compreensão quantitativa detalhada de como as ondas gravitacionais, geradas por perturbações do exterior, se propagam dentro e fora do buraco negro. Mais uma vez, estas propriedades dependem das caraterísticas do modelo de buraco negro que estamos a considerar; mas, desta feita, é a geometria do exterior a ditar o perfil do decaimento das perturbações.

Tal como foi feito pelos relativistas que estudaram estes fenómenos, consideremos primeiro que o nosso buraco negro é um objeto isolado mergulhado num espaço-tempo cuja geometria se aproxima, no infinito, da geometria plana e estática de Minkowski (um buraco negro assintoticamente plano). Nesse caso, é perfeitamente consensual que a capacidade de atenuação de perturbações no exterior não é suficientemente eficiente para contrapor o efeito de desvio para o azul [4]. Como consequência, os horizontes de Cauchy são instáveis e não têm qualquer possibilidade de se formarem na natureza, já que qualquer perturbação arbitrariamente pequena os transforma numa singularidade terminal - a censura cósmica vence e o determinismo Laplaciano está assegurado!

Mas será este o modelo mais apropriado para descrever o exterior dum buraco negro? Tudo indica que o nosso Universo não é estático nem assintoticamente plano! De facto, segundo sabemos, o universo que habitamos não só se encontra em expansão, como essa expansão é acelerada! Isso leva-nos então a considerar buracos negros de de Sitter, que nos fornecem modelos de buracos negros mergulhados num Universo em expansão acelerada. Essa dinâmica cosmológica dá origem, em particular, a um novo mecanismo de atenuação de ondas gravitacionais, tal como o esticar duma película elástica leva ao seu alisamento. É possível verificar que, consequentemente, os mecanismos que levam ao decaimento de perturbações se tornam muito mais eficientes e que, de facto, têm agora uma força comparável ao efeito antagónico de desvio para o azul. Perante esta competição "taco a taco", o Censor Cósmico fica numa situação muito delicada, cuja resolução depende agora, duma forma muito subtil, da relação entre os parâmetros do buraco negro - massa, carga e momento angular - e

a aceleração do universo, determinada, no caso de de Sitter, por uma quantidade conhecida por constante cosmológica, que pode ser interpretada como uma energia (escura) do vácuo.

Mas o que sabemos ao certo sobre o desfecho desta compe-

[10] Ou nas palavras do grande divulgador científico William Shakespeare: "Glory is like a circle in the water, Which never ceaseth to enlarge itself, Till by broad spreading it disperse to naught." (The first Part of Henry the Sixt)

tição? Bem, como já referi, a situação é particularmente subtil e longe de estar completamente clarificada. Como forma de realçar este último ponto deixem-me partilhar dois resultados recentes e contrastantes:

Se considerarmos buracos negros eletricamente carregados, sem rotação, num Universo em expansão acelerada, como descritos pelas soluções de Reissner-Nordström-de Sitter, então, próximo da saturação elétrica, o desvio para o azul não é suficientemente forte para contrabalançar os efeitos da expansão do Universo. Neste contexto, um horizonte de Cauchy mantém-se estável e suficientemente regular para que seja possível continuar a utilizar as equações de Einstein e produzir uma infinidade de possíveis futuros alternativos, para lá desse horizonte [5]. Como vimos anteriormente, este radioso mundo cheio de possibilidades é desastroso para a teoria - o determinismo Laplaciano cai por terra e o Censor Cósmico é severamente derrotado. Mas se, em alternativa, considerarmos buracos negros eletricamente neutros, em rotação (num universo em expansão acelerada), como descritos pelas soluções de Kerrde Sitter, a situação volta a mudar radicalmente [6]. De facto, neste caso, quando perturbados, os horizontes de Cauchy darão de novo origem a singularidades terminais - o determinismo Laplaciano é preservado e o Censor Cósmico vence !... mas à justa.

Porquê "à justa"? Porque à medida que o buraco negro se aproxima do seu limite máximo de rotação a singularidade terminal vai-se tornando cada vez mais fraca, aproximando-se perigosamente dum regime onde as equações de Einstein voltam a fazer sentido, tal como acontece no caso, atrás descrito, dos buracos negros (sem rotação) com carga elétrica muito elevada.

Então e o que sucede se juntarmos um pouco de carga elétrica a um buraco negro em rotação quase extrema? Isso gostava eu de saber! Mas, sinceramente, não sei e não me apetece arriscar um palpite. As equações de Einstein não são propriamente fáceis de analisar, por isso convém ter calma ... havemos de lá chegar. Portanto, mantenham-se bem atentos aos próximos episódios, porque a censura cósmica tem mais reviravoltas inesperadas que uma novela mexicana.

IV. EM CONCLUSÃO: O TRABALHO ÁRDUO DO CENSOR CÓSMICO.

O Censor Cósmico é uma emanação (de origem bem humorada, ao contrário do que o seu nome barroco possa dar a entender à primeira vista) dos mecanismos de autoregulação de que a Relatividade Geral dispõe para preservar o seu caráter determinístico. A expectativa de que esses mecanismos são, de facto, suficientes para o cumprimento desse grande objetivo é a essência da Conjetura da Censura Cósmica.

Tendo em conta o que discutimos anteriormente, será que essa conjetura é válida?

Se considerarmos a Censura Cósmica como uma conjetura matemática sobre as propriedades globais das soluções das equações de Einstein, então os resultados atrás referidos, sobre buracos negros próximos da saturação elétrica, mergulhados num Universo em expansão acelerada, indicam que, nesse regime, a resposta é: não! Estes resultados revelam ainda que o trabalho do Censor Cósmico é muito dificultado pela expansão acelerada do Universo; mas também que, mesmo perante esta adversidade, a competência do nosso Censor é notável, sendo capaz de preservar o determinismo, por vezes de formas inesperadas, em quase todos os cenários possíveis; só mesmo nas situações mais extremas é que o Censor claudica e não consegue cumprir o seu propósito.

Em alternativa, podemos ter uma atitude menos exigente em relação ao alcance do nosso Censor Cósmico e exigir "apenas" que a sua ação garanta a preservação do determinismo em contextos com relevância astrofísica.

Será razoável exigir mais? A Relatividade Geral foi construída para descrever o Universo em que vivemos e, portanto, será sensato exigir que seja igualmente competente na descrição de outros universos hipotéticos? Por exemplo, é esperado que os buracos negros que se formam por processos astrofísicos tenham uma carga elétrica residual. Isto revela, que pode estar perfeitamente ao alcance do Censor Cósmico garantir que não existam buracos negros com carga eléctrica elevada no Universo e, desta forma, evitar as situações nefastas descritas anteriormente. Se este for o caso, é legítimo que o Censor Cósmico reivindique a aplicação duma nova lei de conservação, que assegure a conservação do seu posto de trabalho.

Referências

[1] A. Pais, Súbtil é o Senhor, Gradiva 1ªedição/2ª tiragem, pg. 192.

[2] R. Penrose, *Gravitational collapse: The role of general relativity*, Riv.Nuovo Cim. 1 (1969) 252-276, Gen.Rel.Grav 34 (2002) 1141-1165.

[3] R. Penrose, *Structure of space-time, in Battelle rencontres - 1967 lectures in mathematics and physics*, 121-235, (Ed. by C. M. DeWitt and J. A. Wheeler), Benjamin; 1st edition (January 1, 1968).

[4] J. Luk and S.-J *Oh, Strong cosmic censorship in spherical symmetry for two-ended asymptotically flat initial data I. The interior of the black hole region*, Annals of Math., 190(1):1-111, 2019.

[5] V. Cardoso, J. Costa, K. Destounis, P. Hintz and A. Jansen, *Quasinormal modes and Strong Cosmic Censorship*, Phys.Rev.Lett. 120 (2018) 3, 031103.

[6] O. Dias, F. Eperon, H. Reall and J. Santos, *Strong cosmic censorship in de Sitter space*, Phys.Rev.D 97 (2018) 10, 104060.



João Lopes Costa, é professor do Departamento de Matemática do Iscte e membro do Centro de Análise Matemática, Geometria e Sistemas Dinâmicos do IST-ULisboa. O seu trabalho científico centra-se no estudo de propriedades globais de soluções das equações de Einstein, com especial ênfase nas soluções que descrevem buracos negros e cosmologias em expansão acelerada.