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

A hipótese de Kerr

Carlos Herdeiro[1]

[1] Dept. Matemática e CIDMA, Universidade de Aveiro

A descrição científica da Natureza pretende ser universal e simplificadora. Tem conseguido explicar uma variedade de fenómenos, numa variedade de contextos, através de um pequeno número de princípios e atores. Uma ilustração extraordinária deste poderoso princípio é a "hipótese de Kerr": que todos os buracos negros (em equilíbrio) do Cosmos são essencialmente iguais, tendo apenas duas propriedades físicas (um número e um vector) que os podem diferenciar entre os seus pares. Esta simplicidade, a ser verdade, é única no mundo macroscópico e uma consequência da absoluta ditadura da gravidade sobre estes objetos, que reduz à irrelevância as forças não gravitacionais. Neste artigo, apresentamos a hipótese de Kerr como resultado da evolução histórica do conceito de buraco negro, e nas palavras de alguns dos seus protagonistas.

1. "Nenhuma teoria da gravitação havia conseguido isso até agora"

Qualquer relativista acorda no dia 25 de novembro com um sentimento de dia de aniversário. Foi em 25 de novembro de 1915 que Einstein apresentou na Academia Prussiana o seu artigo com a versão final das equações de campo da Relatividade Geral (RG) [1]. Uma semana antes, Einstein tinha encaixado a peça do puzzle que o convenceu. Nesse dia, escreveu a David Hilbert [2]: "*Hoje irei apresentar à Academia um artigo no qual derivo quantitativamente na RG, sem nenhuma hipótese adicional, o movimento do periélio de Mercúrio descoberto por Le Verrier. Nenhuma teoria da gravitação havia conseguido isso até agora*".

A formulação da RG que Einstein tinha acabado de concluir consistia num conjunto de equações de campo severamente complexas: 10 equações diferenciais, a derivadas parciais, não lineares e acopladas em quatro variáveis. Para atacar problemas como o avanço anómalo do periélio de Mercúrio (que o convenceu de que a teoria estava correta) ou do encurvamento de um raio de luz na vizinhança do Sol, que também reportou na mesma comunicação de 18 de novembro de 1915 [3] (um efeito confirmado por expedições britânicas que observaram o eclipse do Sol de 29 de maio de 1919 [4]), Einstein resolveu estas equações apenas aproximadamente, na vizinhança de um corpo como o Sol (idealizado como esférico). Seria possível obter soluções exatas (não-triviais) destas equações tão complexas? Tais soluções revelariam, certamente, efeitos verdadeiramente novos da gravitação relativista, para os campos gravitacionais mais intensos produzidos no Universo.

2 - "Apesar dos ferozes tiros"

A reposta à última pergunta foi surpreendentemente rapida. Em 22 de dezembro de 1915, o astrónomo e físico germânico Karl Schwarzschild escreve a Einstein, desde a frente Russa [5], onde se encontrava com o exército alemão em plena primeira Guerra Mundial. No tempo livre dos seus deveres militares, Schwarzschild familiarizou-se com o problema do periélio de Mercúrio e com os detalhes do cálculo de Einstein, que, no seu artigo de 18 de novembro de 1915 [3] tinha estudado a órbita de Mercúrio usando uma aproximação de primeira ordem para a geometria do espaço-tempo na vizinhança do Sol. Ao tentar compreender esta geometria numa ordem mais elevada, Schwarzschild deparou-se com o que lhe pareceu ser uma ambiguidade. Insatisfeito, escreveu [5] "*Então, arrisquei-me a tentar uma solução completa*". Ou seja, em vez de tentar uma solução perturbativa das equações da RG, Schwarzschild tentou uma solução exata, modelando o Sol como uma massa pontual. De seguida escreve o que hoje chamamos a "métrica de Schwarzschild" e explica que a solução é única para o problema em questão.

A carta de Schwarzschild a Einstein termina com uma deliciosa reflexão [5]: "*Como vê, a guerra tem tido uma disposição gentil para mim, permitindo-me, apesar dos ferozes tiros a uma distância decididamente terrestre, fazer esta caminhada nesta sua terra de ideias*".

Einstein responde a Schwarzschild, com uma primeira reacção, apenas uma semana depois, em 29 de dezembro de 1915, demonstrando satisfação e surpresa [6]: "*Eu não teria pensado que o tratamento rigoroso do problema de uma massa pontual fosse tão simples*". Depois de examinar o cálculo de Schwarzschild, Einstein escreve uma segunda carta em 9 de janeiro de 1916 [7], onde confirma a sua reação inicial bem como os detalhes matemáticos da solução obtida por Schwarzschild: "*Examinei o seu* *artigo com grande interesse. […] O tratamento matemático do assunto agrada-me muito. Na próxima quinta-feira, apresentarei o [seu] artigo na Academia [Prussiana] com algumas palavras de explicação*" [7]. Cumprindo a promessa, Einstein comunicou a solução de Schwarzschild a 13 de janeiro de 1916, sendo o artigo publicado seguidamente [8]. Infelizmente, a gratidão de Schwarzschild para com a guerra foi precoce. Durante a sua estada na Rússia apresentou sintomas de uma rara doença auto-imune de pele ("pênfigo") que na época não tinha tratamento. Nesta doença o sistema imunitário ataca as células da pele, causando bolhas dolorosas e promovendo infecções, certamente agravadas pelas condições sanitárias de um teatro de guerra. Depois de ser enviado para casa em março, acabaria por falecer devido a esta doença em 11 de maio de 1916, com 42 anos.

3 - "As singularidades de Schwarzschild não existem na realidade física"

A compreensão da solução de Schwarzschild, que virá a ser interpretada como descrevendo um "buraco negro", esteve longe de ser trivial. Na infância da RG, havia muita confusão relativamente a aspetos técnicos e conceptuais da teoria. No início da década de 1920, por exemplo, o matemático francês Paul Painlevé [9], e o oculista sueco Allvar Gullstrand [10], independentemente, encontraram uma alegada nova solução das equações de Einstein da RG. No entanto, em 1933, o padre e cosmólogo belga George Lemaître [11] demonstrou que a alegada nova solução coincidia com a de Schwarzschild, apenas escrita de um modo diferente (noutras coordenadas).

Para a solução de Schwarzschild, uma das fontes de debate era o que acontece no "raio de Schwarzschild". Este raio coincide (sugestivamente) com o raio de uma massa esférica para a qual a velocidade de escape é a velocidade da luz, na teoria newtoniana da gravitação. Note-se que uma tal massa esférica seria extraordinariamente compacta. Por exemplo, para a massa do Sol, o raio de Schwarzschild é apenas de cerca de 3 km. Na solução de Schwarzschild, esse raio apresenta comportamentos estranhos: há quantidades que se tornam infinitas e outras que se anulam, o que levou esse raio a ser chamado de "singularidade de Schwarzschild".

Einstein foi um dos que se interrogou sobre a realidade física da "singularidade de Schwarzschild". Num artigo de 1939 [12], ele investiga se poderia existir um corpo suficientemente compacto de modo ao seu efeito gravitacional ser descrito pela solução de Schwarzschild até ao raio de Schwarzschild. Einstein argumenta, por exemplo: "que um relógio mantido neste lugar [isto é, no raio de *Schwarzschild] iria a uma taxa zero".* Por outras palavras, o tempo pára no raio de Schwarzschild, visto por um observador externo a este raio. E acrescenta [12] *"Além disso é fácil mostrar que tanto raios de luz como partículas materiais demoram um tempo infinito a chegar ao raio de Schwarzschild oriundas de um ponto exterior a esse raio. Neste sentido a esfera correspondente ao raio de Schwarzschild constitui uma localização onde o campo é singular*". Einstein conclui, baseado ainda no facto de que nenhuma partícula material tem órbitas circulares até aquele raio, que o raio de Schwarzschild não é físico, escrevendo: "*O resultado essencial desta investigação é um claro entendimento da razão pela qual as "singularidades de Schwarzschild" não existem na realidade física*".

Einstein é frequentemente apontado como não tendo acreditado em buracos negros, devido a este artigo. Esta apreciação é desprovida de fundamento, dado que o moderno conceito de buraco negro estava longe de estar desenvolvido. Em qualquer caso, a lógica usada por Einstein traiu-o e a sua conclusão final sobre este assunto, ao qual não mais voltaria, foi incorreta.

4 - "A estrela tende a fechar-se de qualquer comunicação"

A interpretação correta da "singularidade" de Schwarzschild apareceu pouco depois, nesse mesmo ano de 1939. Num artigo publicado no dia em que começou a segunda guerra mundial, 1 de setembro de 1939 [13], o físico americano Robert Oppenheimer (Fig. 1, que se tornaria o "pai" da bomba atómica americana por ter dirigido o projeto Manhatten, bomba(s) que terminaria(m) essa mesma guerra), em colaboração com seu aluno Hartland Snyder, estudaram o colapso de uma nuvem perfeitamente esférica de matéria usando a RG. Observaram que [13] "*o tempo total do colapso, medido por um observador a cair com a matéria estelar, é finito*". Portanto o problema que Einstein tinha observado de o tempo "parar", para um relógio mantido no raio de Schwarzschild (visto por um observador exterior), não é um problema para qualquer relógio que se aproxime deste raio; um observador a cair (em queda livre) para o raio de Schwarzschild mede um tempo finito de queda, no seu relógio.

Em vez de interpretar o raio de Schwarzschild como uma "singularidade", Oppenheimer e Snyder perceberam que este raio é o que agora chamamos de "horizonte de eventos" (embora sem usar esse termo) [ver artigo de D. Hilditch neste volume]. Os autores afirmam [13]: "*A estrela, portanto, tende a fechar-se de qualquer comunicação com um observador distante; apenas seu campo gravitacional persiste*". Observamos nesta frase a génese da ideia de região do espaço-tempo aprisionada e, portanto, do conceito moderno de buraco negro, de que este artigo pode ser considerado o fundador.

O conceito de região aprisionada será posteriormente desenvolvido magistralmente por Roger Penrose, num artigo [14] em que se mostra a robustez do conceito de buraco negro e que justificou a atribuição de metade do prémio Nobel da Física de 2020 a Penrose [ver artigo de J. Natário neste volume].

5 - "Com o seu poder matemático, parecia ser exatamente quem precisava"

A solução de Schwarzschild representa um estado de equilíbrio: o "campo" gravitacional relativista de uma massa pontual. Mas a sua importância é mais abrangente. Um teorema do matemático norte-americano George Birkhoff [15] estabelece que a solução de Schwarzschild descreve o "campo" gravitacional fora de qualquer corpo esférico em RG, em parti-

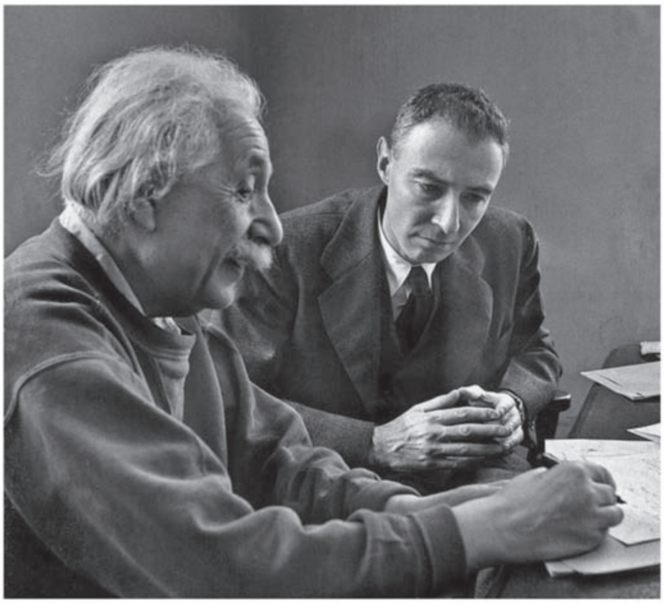

Figura 1 - *Einstein* e *Oppenheimer* discutindo, quiça, o que sucede no raio de *Schwarzschild.*

cular de uma estrela a colapsar de um modo perfeitamente esférico, como no cenário considerado por Oppenheimer e Snyder. Mas seria a solução de Schwarzschild estável? Isto é, sendo ligeiramente perturbada vibraria em torno da sua forma de equilíbrio como um flexível edifício com engenharia antissísmica ou seria irremediavalmente destruída, como um castelo de cartas?

John Wheeler, o influente físico norte-americano de Princeton, descreve na sua autobiografia científica [16] (cap. 12), como achava esta questão importante: "*não valia a pena procurar estas entidades na Natureza se não fossem estáveis. Não durariam tempo suficiente*". Apesar de a sua intuição lhe indicar que a solução de Schwarzschild deveria ser estável, Wheeler não tinha ainda sido capaz de o demonstrar matematicamente. Era um problema tecnicamente difícil. E problemas tecnicamente difíceis resolvem-se, frequentemente, encontrando o colaborador certo. E assim foi.

Wheeler relata como em 1955 conheceu numa conferência em Rochester, Nova Iorque, um brilhante e extrovertido jovem estudante de doutoramento Italiano, chamado Tulio Regge. Wheeler avaliou que [16] "*Regge, com o seu poder matemático, parecia ser exatamente quem precisava*" para atacar o problema da estabilidade da solução de Schwarzschild. Então, tendo Wheeler uma visão de como deveria ser o problema na globalidade e de como deveria ser estudado, escreveu [16] "*um artigo deixando espaços em branco para as equações*" que enviou para Regge, que entretanto havia regressado à sua Universidade em Turim, Itália. Regge [16] "*elevou-se à ocasião e preencheu os espaços em branco*". E

assim foi escrito o artigo de 1957 que estabelece o início da teoria de perturbações de buracos negros [17]. O artigo termina com a seguinte frase: "*Consequentemente, concluímos que a solução de Schwarzschild das equações do campo gravitacional é estável.*"

O artigo de Regge e Wheeler foi, mais de uma década depois, complementado por um outro, da autoria de um aluno de Wheeler, Frank Zerilli [18]. Juntos, os artigos completam a base que permite analisar as perturbações lineares da solução de Schwarzschild, e estabelecer que as vibrações produzidas por perturbações decaem no tempo (ao invés de crescer no tempo, o que demonstraria instabilidade). Portanto a solução de Schwarzschild tem uma excelente engenharia antissísmica! Quando perturbada, os seus modos de vibração (também chamados de modos quasi-normais) são assinaturas da massa da solução (que é o seu único grau de liberdade macroscópico). Assim, se "ouvirmos" uma solução de Schwarzschild a vibrar podemos saber a sua massa, da mesma maneira que, em certas circunstâncias, podemos "ouvir a forma de um tambor" através do seu som [19]. No caso da gravidade relativista, "ouvir" significa detetar as ondas gravitacionais. De facto, os modos quasinormais descrevem a parte final dos eventos gravitacionais que têm vindo a ser detetados desde 2015 pela colaboração LIGO-Virgo-Kagra [ver artigo de N. Sanchis-Gual neste volume].

6 - "Apenas negligenciei dizer ao Martin o que estava a fazer"

A compreensão da regularidade do "raio de Schwarzschild", por Oppenheimer e Snyder, e da robustez da solução de Schwarzschild, na sequência do trabalho de Regge e Wheeler, sugeria considerar seriamente a existência na Natureza de corpos mais compactos que o seu raio de Schwarzschild. Contudo a descrição matemática do raio de Schwarzschild, e o significado global da solução de Schwarzschild permaneciam por esclarecer. Este esclarecimento aconteceu de um modo curioso e bem revelador da personalidade única de John Wheeler.

Wheeler descreve [16] (cap. 13) que por volta de 1956-57, um físico de plasmas a trabalhar em Princeton, Martin Kruskal, lhe descreveu uma ideia para ultrapassar as dificuldades matemáticas no tratamento da "singularidade de Schwarzschild". Essencialmente, Kruskal propunha uma parametrização diferente da solução (um novo sistema de coordenadas) onde os infinitos e zeros mencionados anteriormente na "singularidade de Schwarzschild" eram resolvidos.[1] A apreciação de Wheeler pela proposta de Kruskal foi crescendo depois de ouvir a ideia, até porque a parametrização sugerida se relacionava com "buracos de minhoca" um tipo de configurações do espaço-tempo, com topologias não triviais, que interessava a Wheeler - e que ele batizou [16] cap. 10). Como em 1959 Kruskal ainda não tinha publicado esta ideia, Wheeler decidiu [16] "*tratar disso ele mesmo*". Escreveu um artigo da "autoria de M. D. Kruskal" e submeteu-o à Physical Review. Mas, nas palavras de Wheeler [16], "*apenas negligenciei dizer ao Martin o que estava a fazer*".

Passados uns meses, já em 1960, enquanto Wheeler estava na Alemanha de sabática, Kruskal recebe "inesperadamente" as provas de um artigo que não tinha escrito, da sua autoria (sem co-autores), para rever! Não demorou muito até Kruskal perceber o que havia sucedido, contribuindo para isso as figuras que ilustravam o texto. De facto, Wheeler era bem conhecido pelas suas cuidadas ilustrações - Fig. 2.

O artigo de Kruskal, publicado em 1960 [22], clarifica a estrutura global da solução de Schwarzschild, o que hoje se chama a "extensão analítica máxima da solução". Revela que para além da região aprisionada (região de buraco negro) e a região exterior, existem outras regiões, embora estas regiões adicionais sejam uma idealização de um buraco negro que sempre existiu; não estão presentes para um buraco que se forma do colapso gravitacional de uma estrela. Com o trabalho de Kruskal (e outro trabalho semelhante, mas independente, do matemático húngaro-australiano George Szekers [23]), podemos afirmar que a estrutura global da solução de Schwarzschild foi finalmente compreendida. Contudo, vários aspetos da estrutura global das soluções de buracos negros mais complexos (como da solução de Kerr descrita em baixo), especialmente em situações dinâmicas, continuam tópicos de investigação hoje em dia [ver artigo de J. Costa neste volume].

7 - "Está a rodar!"

Apesar dos sucessos descritos, faltava um ingrediente fundamental à solução de Schwarzschild para descrever objetos astrofísicos - a rotação. Planetas e estrelas rodam sobre os seus eixos. Logo, se um objeto muito compacto se forma pelo colapso gravitacional de uma estrela, é apenas natural esperar que também rode. Acresce que se o momento angular se conserva no colapso gravitacional, o objeto compacto rodará ainda mais rapidamente do que a estrela progenitora, como patinadores no gelo que fecham os braços para rodopiar vertiginosamente.

A procura da "versão" em rotação da solução de Schwarzschild iniciou-se logo depois desta ter sido descoberta. Contudo, as equações de Einstein tornam-se proibitivamente complicadas ao tentar descrever corpos em rotação. Em particular, a rotação induz desvios à simetria esférica (tal como o faz para o planeta Terra) e a simetria esférica simplifica dramaticamente as equações de Einstein da RG. Para resolver as equações (sem computadores!) era, por isso, necessário invocar hipóteses adicionais.

A primeira hipótese adicional é que, uma vez que se procura uma configuração de equilíbrio, esta não deve depender do tempo. Diz-se que a solução é "estacionária". Note-se que no caso da solução de Schwarzschild esta hipótese não é necessária. Assumindo apenas simetria esférica, as equações de Einstein encarregam-se de implicar a estacionaridade (de facto algo ainda mais forte - a estaticidade). A segunda hipótese adicional é mais abstrata. Tinha-se verificado que a solução de Schwarzschild tem uma curiosa propriedade matemática (diz-se que é "algebraicamente especial") e assumiu-se que a sua versão em rotação teria a mesma propriedade. Saltos de fé, como esta hipótese, têm dois desfechos possíveis: o vazio ou a iluminação. No caso em questão, verificou-se o segundo.

Fazendo uso de um resultado matemático publicado em 1962 [24], que permitia simplificar as equações de Einstein para geometrias algebraicamente especiais, o físico-matemático neo-zelandes Roy Kerr conseguiu, em 1963, enquanto investigador pós-doutoral na Universidade do Texas em Austin, obter uma solução mais geral das equações da RG do que a de Schwarzschild. Seria a procurada solução em rotação?

Kerr relata [25] que após ter colocado a nova solução na forma adequada, mencionou ao seu anfitrião científico em Austin, o relativista Alfred Schild "*que iria de seguida calcular o*

Figura 2 - Uma palestra de *John Wheeler*, exibindo as suas características ilustrações.

[1] Outras parametrizações com o mesmo propósito, mas não cobrindo globalmente a solução de Schwarzschild, foram sugeridas por Arthur Eddington [20] e David Finkelstein [21].

momento angular do corpo central. Ele [Schild] estava tão excitado como eu e portanto juntou-se a mim no meu gabinete enquanto eu calculava. Éramos ambos fumadores inveterados naquela época, e portanto pode-se imaginar a atmosfera, Alfred fumando o seu cachimbo numa velha poltrona, e eu fumando um cigarro atrás de outro na minha mesa. (…) Quando me virei para Alfred Schild, que ainda estava sentado na poltrona a fumar e disse "Está a rodar!" ele ficou ainda mais excitado do que eu estava."

A solução de Kerr foi publicada em 1 de setembro de 1963 [26], mas a sua verdadeira importância ainda estava por revelar. É de notar que Kerr não usa a terminologia "buraco negro" para descrever a sua solução. Essa terminologia apenas seria introduzida oficialmente em 1968, embora o seu uso oficioso seja anterior. Mas essa é outra história [27].

8 - "Os buracos negros não têm cabelo"

Existe um objeto astronómico trans-neptuniano, chamado Ultima Thule [28], coloquialmente denominado por "boneco de neve", devido à sua forma que lembra estas icónicas construções de inverno, e que tem cerca de 33 km de comprimento. A autogravidade deste objeto (ou seja, a gravidade que o objeto origina) é uma microgravidade.

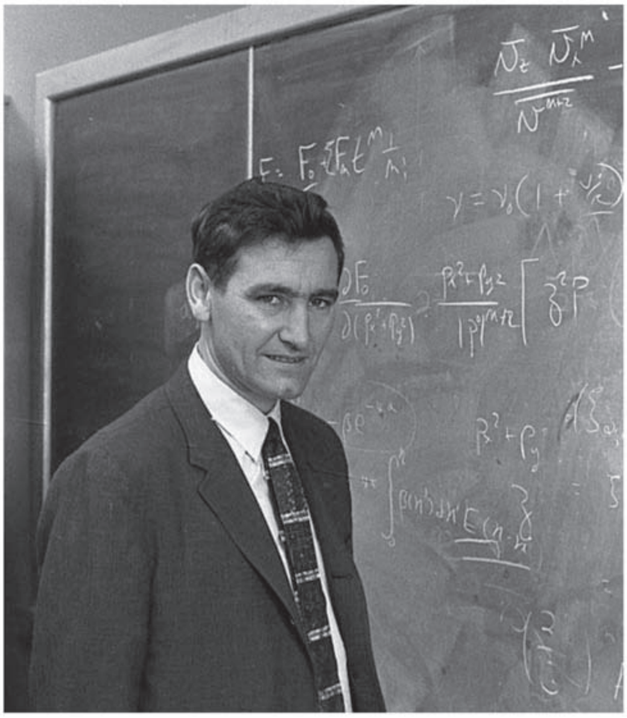

Figura 3 - *Roy Kerr*, na década de 1960.

Não existem estrelas com a forma de um boneco de neve: são sempre bastante mais esféricas. A razão é que a autogravidade da estrela é muito mais importante do que a de um objeto como o Ultima Thule (ou a de qualquer objeto do nosso dia a dia). Se a estrela tivesse a forma de um boneco de neve, a sua matéria tenderia a redistribuir-se mais esfericamente para equilibrar as pressões e a gravidade. Ainda assim, a autogravidade não é ditatorial na estrela. Existe alguma democracia com as interações eletromagnéticas e nucleares, que também desempenham papéis cruciais no equilíbrio e evolução da estrela. Adicionalmente, a rotação da estrela pode afastar a sua forma de uma esfericidade perfeita, e esta rotação pode estar distribuída de uma forma complexa. Uma estrela típica não roda como um corpo rígido; tem uma rotação diferencial que depende da distância ao centro e da latitude do elemento de matéria.

A democracia entre forças é destruída no colapso gravitacional completo. Neste "coup d'etat" a gravidade torna-se ditatorial e dita o resultado, que é um buraco negro. O buraco negro, se não rodar, é perfeitamente esférico e tem apenas um grau de liberdade, a sua massa, que determina o quão grande é. Contra-intuitivamente, quanto maior o buraco negro, menos destrutivo será para um objeto que se aproxima da sua fronteira virtual - o horizonte de eventos. Os buracos negros perfeitamente esféricos são descritos pela solução de Schwarzschild.

A solução de Kerr possui, para além da massa, um vector que descreve a rotação.[2] O tamanho deste vetor é a magnitude do momento angular do buraco negro. A rotação do buraco negro é simples - de acordo com a solução de Kerr, o seu horizonte de acontecimentos roda como um corpo rígido. Adicionalmente, a rotação deforma o buraco negro relativamente à esfericidade. Até um certo ponto, podemos imaginar que o horizonte fica achatado, como acontece à superfície da Terra, devido à sua rotação; mas para além desse ponto as subtilezas do espaço-tempo curvo impedem-nos de imaginar com rigor qual a morfologia do buraco negro [29].

Precisamente há 50 anos (relativamente à escrita deste artigo) o físico australiano da Universidade de Cambridge, Brandon Carter, estabeleceu que os buracos negros de Kerr [30] "representam "os" (em vez de meramente "alguns possíveis") campos externos de buracos negros com os valores de massa e momento angular correspondentes". Este resultado é extraordinário, precisamente porque a solução de Kerr tem apenas 2 graus de liberdade macroscópicos (massa e momento angular). A interpretação deste resultado é que depois do colapso gravitacional, a ditadura da gravidade determina que toda a diferenciabilidade que existe entre as estrelas é abafada: os únicos estados de equilíbrio possíveis variam apenas na sua massa e na sua rotação (que é simples).

John Wheeler (novamente!) juntamente com o físico Italiano Remo Ruffini apresentaram a ideia que resulta do teorema de Carter da seguinte forma curiosa [31]: "*O colapso leva a um buraco negro dotado de massa (…) e momento angular, mas, até onde podemos julgar, nenhum outro parâmetro ajustável: "Um buraco negro não tem cabelo." Faça-se um buraco negro de matéria; outro, da mesma massa [e] momento angular (…) de antimatéria. Ninguém jamais foi capaz de propor uma maneira viável de dizer qual é qual. Tampouco se conhece uma maneira de distinguir um terceiro buraco* *negro, formado pelo colapso de uma quantidade muito pequena de matéria e seguidamente construído até a massa e momento angular especificados disparando fotões, neutrões ou gravitões suficientes. E em pé de igualdade está um quarto buraco negro, desenvolvido pelo colapso de uma nuvem de radiação totalmente livre de qualquer "matéria".*"

9 - "A experiência mais devastadora"

Há algumas hipóteses que suportam o teorema de Carter [32] (que constroí sobre um teorema do relativista de origem alemã Werner Israel [33] e que foi complementado por vários autores, mais notoriamente pelo britânico David Robinson [34]) e que a comunidade científica continua a discutir. Adicionalmente, existe a interpretação de que o teorema de Carter tem como implicação que os buracos negros astrofísicos são todos, de facto, descritos pela solução de Kerr. Esta interpretação tem vindo a ser denominada pela comunidade como a "*hipótese de Kerr*"[3], que tem funcionado como a hipótese de trabalho de muitas análises efetuadas nas últimas décadas para modelar o impacto de buracos negros em fenómenos astrofísicos relativistas.

Não há, neste momento, tensão observacional entre a hipótese de Kerr e as observações de campo forte que começaram a ser feitas nas últimas décadas, mais notoriamente com as deteções de ondas gravitacionais, iniciadas com o primeiro evento detetado em 2015 [35], com a primeira imagem de um buraco negro [36] [ver artigo de P. Cunha neste volume] ou com as observações de estrelas perto do centro da via Láctea [ver artigo de A. Amorim e P. Garcia neste volume]. Estas últimas justificaram a parte do prémio Nobel da Física de 2020 a Andrea Ghez e Reinhard Genzel [ver artigo de J. Lemos neste volume]. Mas o aumento da quantidade e da qualidade destas diferentes observações torna o nosso tempo a época ideal para testar a hipótese de Kerr.

Do ponto de vista teórico, por outro lado, há modelos e cenários onde os buracos negros podem ter "cabelo", isto é, outro tipo de graus de liberdade macroscópicos (ver por exemplo [37]) e onde, consequentemente, a hipótese de Kerr é invalidada. A questão torna-se então se estes cenários são fisicamente (em particular, dinamicamente) viáveis e se todos os ingredientes necessários têm realidade física. Acresce que os problemas conceptuais originados pela gravitação e pelos buracos negros - como a natureza da matéria escura e da energia escura, a resolução das verdadeiras singularidades físicas no centro de buracos negros ou a compreensão da termodinâmica dos buracos negros [ver artigo de J. Rocha neste volume] - impelem que continuemos a desbravar as hipóteses teóricas, numa época em que os desenvolvimentos técnicos [ver artigo de M. Zilhão neste volume] e as observações permitem-nos testá-las e, se for o caso, falsificá- las.

A confirmar-se a hipótese de Kerr, o Universo é surpreendentemente monocromático no espectro de objetos sob o jugo ditatorial da gravidade. Esta surpresa fica bem patente nas palavras de Subramanian Chandrasekhar [38]: "*Em toda a minha vida científica, que se estende por quarenta e cinco anos, a experiência mais devastadora foi a compreensão de que uma solução exata das equações de campo da relatividade geral de Einstein, descoberta pelo matemático da Nova Zelândia, Roy Kerr, fornece a representação absolutamente exata de um indizível número de buracos negros massivos que povoam o Universo.*"

Falta, no entanto, confirmar o "grau de exatidão" com que a solução de Kerr representa o indizível número de buracos negros do Cosmos [ver artigo de J. Afonso neste volume]. E vivemos no tempo certo [ver artigo V. Cardoso neste volume] para começar a vislumbrar uma resposta.

Agradecimentos

Agradeço a C. Dahlem pela leitura atenta e comentários a este artigo. Agradeço ao José Sande Lemos a parceria no desafio de trazer à luz este volume especial da Gazeta de Física. Agradeço à equipa editorial da Gazeta, em particular ao Bernardo Almeida e à presidente da Sociedade Portuguesa de Física, Conceição Abreu, pela receptividade relativamente à nossa proposta. Agradeço aos muitos colaboradores e colegas que proporcionaram tantos momentos memoráveis a discutir a verdadeira natureza destes objetos fascinantes. Agradeço ainda o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia e da Universidade de Aveiro.

[2] Escolhendo a direção do vector momento angular como o eixo z, a solução de Kerr é apenas descrita por dois parâmetros numéricos: a massa, M e a magnitude do momento angular, J.

[3] Note-se que esta hipótese não foi proposta por Roy Kerr.

Referências

[1] A. Einstein, "*The Field Equations of Gravitation*", Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math.Phys.) 1915 (1915) 844-847.

[2] https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/176

[3] A. Einstein, "*Explanation of the Perihelion Motion of Mercury from the General Theory of Relativity*", Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.) 1915 (1915) 831-839.

[4] F. W. Dyson, A. S. Eddington and C. Davidson, "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919", Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A 220 (1920) 291-333.

[5] https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/191

[6] https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/197

[7] https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/203

[8] R. L. Cook, K. E. Torrance (1982), "A reflectance model for com-

[8] K. Schwarzschild, "On the Gravitational Field of a Mass Point according to Einstein's Theory", Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math.Phys.) 1916 (1916) 189-196 https://arxiv.org/abs/physics/9905030.
[9] P. Painlevé, "La mécanique classique et la théorie de la relativité", Comptes Rendus Academie des Sciences (serie non specifiee), 173 (1921) 677-680.
[10] A. Gullstrand, "Allgemeine Lösung des statischen Einkörperproblems in der Einsteinschen Gravitationstheorie", Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik, 16 (1921) no. 8, 1-15.
[11] G. Lemaître, "L'Univers en expansion", Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, A53 (1933) 51-85.
[12] A. Einstein, "On a Stationary System With Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses", Annals of Mathematics, 40 (1939) no. 4, 922-936.
[13] J. R. Oppenheimer, H. Snyder, "On continued gravitational contraction", Physical Review 55 (1939) 455.
[14] R. Penrose, "Gravitational collapse and space-time singularities", Physical Review Letters, 14, no. 3 (1965) 57-59.
[15] G. D. Birkhoff, "Relativity and Modern Physics", Harvard University Press, 1923.
[16] J. Wheeler, "Geons, black holes and quantum foam: a life in physics", North & Company, 1998.
[17] T. Regge and J. A. Wheeler, "Stability of a Schwarzschild singularity'', Phys. Rev. 108 (1957) 1063-1069
[18] F. J. Zerilli, "Effective potential for even parity Regge-Wheeler gravitational perturbation equations'', Phys. Rev. Lett. 24 (1970) 737-738.
[19] M. Kac, "Can One Hear the Shape of a Drum?", American Mathematical Monthly 73 (4, part 2) (1966) 1-23.
[20] A. S. Eddington,"A Comparison of Whitehead's and Einstein's Formulæ", Nature 113 (2832) (1924) 192.
[21] D. Finkelstein, "Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle'', Phys. Rev. 110 (1958), 965-967.
[22] M. D. Kruskal, "Maximal extension of Schwarzschild metric'', Phys. Rev. 119 (1960) 1743-1745.
[23] G. Szekeres, "On the singularities of a Riemannian manifold'', Publ. Math. Debrecen 7 (1960), 285-301
[24] J. N. Goldberg and R. K. Sachs, "A theorem on Petrov types", Acta Phys. Pol., 22 (1962) 434.
[25] R. P. Kerr, "Discovering the Kerr and Kerr-Schild metrics'', [arXiv:0706.1109 [gr-qc]].
[26] R. P. Kerr, "Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics'', Phys. Rev. Lett. 11 (1963) 237-238
[27] C. A. R. Herdeiro and J. P. S. Lemos, "The black hole fifty years after: Genesis of the name", Gazeta de Fisica, 41(2) (2018) 2, arXiv: 1811.06587
[28] https://pt.wikipedia.org/wiki/486958_Arrokoth (consultada em 30/7/2021)
[29] L. Smarr, "Surface Geometry of Charged Rotating Black Holes'', Phys. Rev. D 7 (1973), 289-295
[30] B. Carter, "Axisymmetric Black Hole Has Only Two Degrees of Freedom'', Phys. Rev. Lett. 26 (1971), 331-333
[31] R. Ruffini and J. A. Wheeler, "Introducing the black hole'', Phys. Today 24 (1971) 1, 30
[32] B. Carter, "Has the black hole equilibrium problem been solved?'', [arXiv:gr-qc/9712038 [gr- qc]].
[33] W. Israel, "Event horizons in static vacuum space-times'', Phys. Rev. 164 (1967), 1776-1779.
[34] D. C. Robinson, "Uniqueness of the Kerr black hole'', Phys. Rev. Lett. 34 (1975), 905-906.
[35] B.P Abbott et al., LIGO Scientific, Virgo, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102, arXiv:1602.03837.
[36] K. Akiyama et al., "First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Super- massive Black Hole", Astrophys. J., 875, no. 1 (2019) p. L1.
[37] C. A. R. Herdeiro and E. Radu, "Asymptotically flat black holes with scalar hair: a review'', Int. J. Mod. Phys. D 24 (2015) no.09, 1542014.
[38] S. Chandrasekhar, in "Truth and Beauty", University of Chicago Press, 1987.

Carlos Herdeiro, é licenciado em Física/ Matemática aplicada pela Universidade do Porto e doutorado em Física Teórica pela Universidade de Cambridge (2001), em Inglaterra. Trabalhou nos departamentos de Física: da Universidade de Stanford, EUA (2001-2002), da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2002-2010), da Universidade de Aveiro (2010-1018) e do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (2018-2019). É atualmente Investigador Coordenador de carreira no Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro onde coordena o grupo de Geometria e Dinâmica Gravitacional do Centro de Investigação em Matemática e Aplicações (CIDMA). A sua investigação centra-se na interface da gravitação, cosmologia, astrofísica, física-matemática e física de altas energias, tendo publicado mais de 180 artigos em revistas internacionais em vários temas nesta interface e dirigido duas redes internacionais Marie Curie financiadas pela União Europeia. É também autor de um livro de texto Universitário de Mecânica Quântica. Foi presidente da delegação norte da SPF (2007-2010). É membro fundador e vice-presidente em exercício da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação.