

GAZETA DE
física

Para os físicos e amigos da física.

WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA / VOL. 44- N.º 2/3 / 2021 / Publicação Trimestral / €5,00

Buracos Negros

Edição especial

Editores convidados: Carlos A. R. Herdeiro e José Pizarro de Sande e Lemos

Índice

1 Editorial

- artigo geral
2 **A hipótese de Kerr**
Carlos Herdeiro
- artigo geral
9 **O Horizonte** de eventos
David Hilditch
- artigo geral
13 **O interior de buracos negros - singularidades e censura cósmica**
João L. Costa
- artigo geral
19 **Penrose e o Prémio Nobel da Física de 2020**
José Natário
- artigo geral
23 **Relatividade Numérica e Buracos Negros**
Miguel Zilhão
- artigo geral
28 **A ubiquidade do buraco negro na física moderna**
Jorge V. Rocha
- artigo geral
36 **Em busca dos primeiros buracos negros supermassivos do Universo**
José Afonso
- artigo geral
43 **O “buraco negro” no centro da nossa galáxia e o Prémio Nobel 2020**
Paulo J. V. Garcia, António Amorim
- artigo geral
47 **A galáxia M87 e a sombra de buracos negros**
Pedro V. P. Cunha
- artigo geral
51 **A era da astronomia de ondas gravitacionais**
Nicolas Sanchis-Gual
- artigo geral
56 **O futuro em física de buracos negros**
Vitor Cardoso
- artigo geral
58 **Os prémios Nobel de física para astrofísica e gravitação e o prémio Nobel para buracos negros: Passado, presente e futuro**
José Sande Lemos
- 69 **Notícias**

CRÉDITOS

Imagem da capa: imagem feita por Pedro Cunha, a partir de uma imagem da NASA's Goddard Flight Center/Jeremy Schnittman

Ficha Técnica

Estatuto Editorial

<http://www.spf.pt/gazeta/editorial>

Propriedade | Sede | Redacção | Editor

Sociedade Portuguesa de Física
Av. da República, 45 – 3º Esq.
1050-187 Lisboa
Telefone: 217 993 665

Director

Bernardo Almeida

Editores

Francisco Macedo
Nuno Peres
Olivier Pellegrino

Secretariado

Maria José Couceiro - mjose@spf.pt

Comissão Editorial

Conceição Abreu - Presidente da SPF
Gonçalo Figueira - Anterior Diretor Editorial
Teresa Peña - Anterior Diretor Editorial
Carlos Fiolhais - Anterior Diretor Editorial
Ana Luísa Silva - Física Atómica e Molecular
Ana Rita Figueira - Física Médica
Augusto Fitas - Grupo História da Física
Carlos Portela - Educação
Carlos Silva - Física dos Plasmas
Constança Providência - Física Nuclear
Joaquim Moreira - Física da Matéria Condensada
José Marques - Física Atómica e Molecular
Luís Matias - Geofísica, Oceanografia e Meteorologia
Manuel Marques - Óptica e Laser, Uiversidade do Nuno Castro - Física Partículas
Rui Agostinho - Astronomia e Astrofísica
Sofia Andringa - Física Partículas

Correspondentes

André Pereira - Delegação Norte
Fernando Amaro - Delegação Centro
José Marques - Delegação Sul e Ilhas

Design / Produção Gráfica

FR Absolut Graphic Lda.
frabsolut@gmail.com

NIPC 501094628

ISSN 0396-3561

Tiragem 1 000 Ex.

Registo ERC 110856

Depósito Legal 51419/91

Publicação Trimestral

As opiniões dos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Preço N.º Avulso 5,00 € (inclui I.V.A.)

Assinatura Anual 15,00 € (inclui I.V.A.)

Assinaturas Grátis aos Sócios da SPF.

O prémio Nobel da Física 2020 para buracos negros foi o coroar do trabalho de toda uma comunidade científica internacional durante mais de um século. Essa atribuição deu-nos o ímpeto para homenagear tais objetos dedicando-lhes uma edição especial da prestigiada *Gazeta de Física*.

O conceito de buraco negro nasceu da convergência de duas direções distintas. Por um lado, apareceram soluções exatas das equações da teoria da relatividade geral para um corpo esfericamente simétrico. Estas soluções, de difícil interpretação física, direcionaram uma investigação ativa para a sua melhor compreensão como objetos geométricos do espaço-tempo. Por outro lado, cimentou-se a constatação teórica e observacional que estrelas muito diferentes do Sol, as estrelas compactas, existem. Estas estrelas, nomeadamente as anãs brancas e as estrelas de neutrões, são um estágio final da evolução de estrelas, mas havia ainda a possibilidade última de um estágio em que a estrela, ao se tornar tão compacta, colapsasse para dentro dela própria. A junção de soluções exatas da relatividade geral com a possibilidade de existirem estrelas totalmente colapsadas gerou o conceito de buraco negro. Entretanto, a ideia mostrou ser mais geral, não se aplica só a estrelas colapsadas. Qualquer quantidade de matéria completamente colapsada é um buraco negro. Assim, há buracos negros supermassivos, com massas galácticas, em que o centro de uma galáxia inteira é um buraco negro. Há também a possibilidade de haver buracos negros de todos os tamanhos, em todas as escalas, desde buracos negros em escalas de Planck, a escala mais ínfima possível onde mecânica quântica e a gravitação se juntam, a mini buracos negros do tamanho de um protão, até buracos negros em escalas de um universo inteiro.

O buraco negro como objeto físico e astrofísico foi se impondo gradualmente ao longo do século XX e dos primeiros anos do século XXI. A aceitação da ideia de buraco negro como objeto totalmente colapsado gravitacionalmente é um enorme triunfo do método científico. Hipóteses diferentes, alternativas ao conceito de buraco negro, foram constantemente sendo propostas, mas os desenvolvimentos observacionais em ondas rádio, infravermelhos, ópticas, raios X, raios gama e finalmente em ondas gravitacionais, das últimas décadas foram usados para demonstrar definitivamente, e para lá de qualquer possível dúvida, que as consequências fenomenológicas advindas de buracos negros e da matéria à sua volta estão corretas.

O início da era da astronomia gravitacional com a primeira deteção de ondas gravitacionais vindas de uma

colisão de dois buracos negros de cerca de trinta massas solares cada, em 14 de setembro de 2015, tem-se mostrado auspiciosa. Já foram detetadas numerosas colisões de vários tipos, a saber, colisões entre dois buracos negros, entre um buraco negro e uma estrela de neutrões e entre duas estrelas de neutrões. Em breve, colisões dos buracos negros supermassivos que habitam o centro das galáxias estarão também a ser detetadas em interferómetros espaciais de precisão formidável, e tudo isto, conjuntamente com observações em todo o espectro eletromagnético, nos dará um impulso extraordinário para uma melhor compreensão do Universo em que vivemos.

Para além de ser um objeto astrofísico, um buraco negro é, na sua essência, um objeto físico que obedece às leis da física. Sendo uma de suas características o poderem existir em todas as escalas, podemos com eles percorrer toda a física, desde a sonhada gravitação quântica, à física de partículas elementares e à astrofísica. Ademais, o buraco negro ao levar a física ao extremo, fará por seu turno com que uma sua melhor compreensão vá descortinar o próximo nível das leis fundamentais da própria física. Com o contínuo desenvolvimento dos diferentes métodos teóricos e computacionais e com a nova era de precisão observacional, teremos mais e melhor informação sobre esta fronteira do nosso conhecimento, o que irá influenciar não apenas a física e a ciência, mas também a tecnologia e toda a nossa civilização.

A edição deste número especial da *Gazeta de Física* é o resultado do esforço coletivo para o entendimento de buracos negros e ilustra algumas das diferentes abordagens que investigam este assunto em Portugal. Agradecemos a todos os autores que contribuíram para este volume. Agradecemos também a um conjunto mais alargado de físicos e astrofísicos interessados em buracos negros que ao longo dos anos tem crescido no nosso país, motivando iniciativas como a *Black Holes Workshop*, um encontro científico anual sobre esta temática realizado em universidades portuguesas desde 2008. Esperamos que assim continue, porque o problema de entender buracos negros na sua multiplicidade de perspectivas é tão desafiante que apenas verdadeiras sinergias coletivas nacionais e internacionais poderão ter sucesso. Para aqueles, como nós, que são entusiasmados desde sempre por esta matéria, dificilmente poderíamos ter sido mais afortunados pela época em que o acaso nos fez viver. Que a sorte esteja connosco para podermos ainda testemunhar mais alguns dos desenvolvimentos espetaculares nesta área que, indubitavelmente, estarão perante nós e que claramente serão prova de mais um triunfo do pensamento humano!

Agradecemos ao corpo Editorial da *Gazeta de Física*, especificamente ao seu diretor, Bernardo Almeida, pela pronta receptividade à ideia deste número especial sobre buracos negros.

Carlos A. R. Herdeiro

José P. S. Lemos

A hipótese de Kerr

Carlos Herdeiro¹

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 resposta à última pergunta foi surpreendentemente rápida. 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 reacção 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 Lemaitre [11] demonstrou que a alegada nova solução coincidia com a de Schwarzschild, apenas escrita de um modo diferente (noutas 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 atômica americana por ter dirigido o projeto Manhattan, 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 gênese 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-

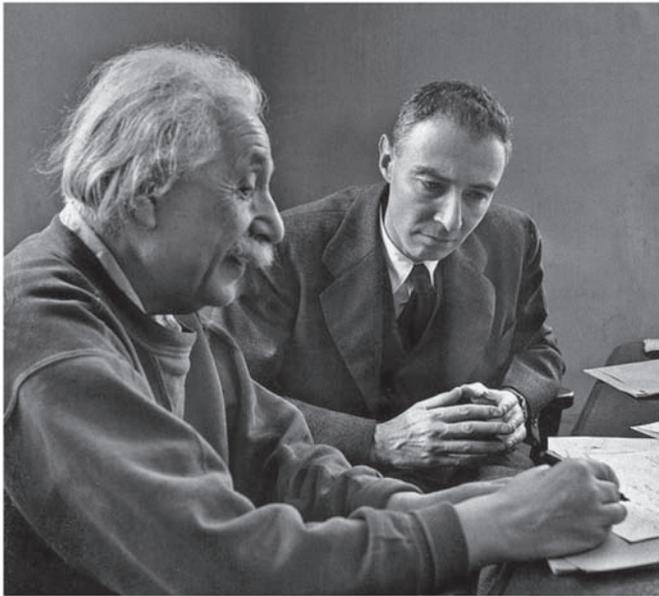


Figura 1 - Einstein e Oppenheimer discutindo, quiçá, o que sucede no raio de Schwarzschild.

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 irremediavelmente 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 Tullio 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 quasi-normais 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

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



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

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

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-zelandês 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

¹ Outras parametrizações com o mesmo propósito, mas não cobrindo globalmente a solução de Schwarzschild, foram sugeridas por Arthur Edington [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.

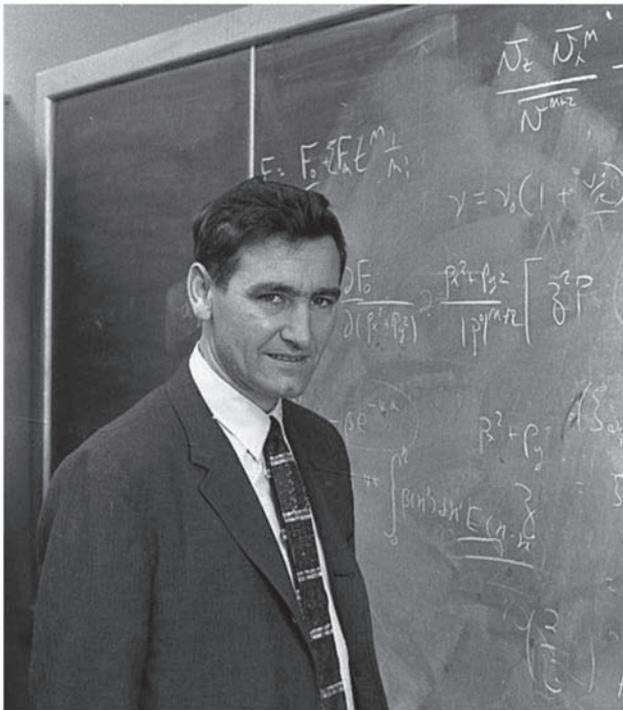


Figura 3 - Roy Kerr, na década de 1960.

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 esféricamente 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'état" 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 vector 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 fótons, 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 constrói 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, conseqüentemente, 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 es-

cure 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 contínuemos 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.

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>

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.

- [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 specifiée), 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 Física, 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 (2010-2018) 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 (CID-MA). 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.

O Horizonte de Eventos

David Hilditch¹

¹ CENTRA, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico – IST, Universidade de Lisboa – UL, Avenida Rovisco Pais 1, 1049 Lisboa

1 - Introdução

Em contraste com muitos dos termos formais usados na física, o “*horizonte de eventos*” é abençoado com um nome que dá um sentido útil ao seu significado na linguagem comum (isto, é não-científica). Alguns dicionários *online*, por exemplo, oferecem as definições:

- Evento; algo que acontece. [Merriam-Webster] [1].
- Horizonte; o limite ou alcance da percepção ou conhecimento (ou noções semelhantes) [Dictionary.com] [2].

A partir destes conceitos familiares, e aplicando apenas um toque de raciocínio motivado, podemos sugerir um esboço de definição para o horizonte de eventos do seguinte tipo:

- Horizonte de eventos; a fronteira daquilo que é sempre perceptível.

Como veremos, esta definição é na verdade uma boa primeira tentativa. Contudo, precisamos de entender este conceito num sentido específico (não espiritual!). O primeiro objetivo deste breve texto é desvendar estas ideias.

Nos últimos anos, tem havido muito entusiasmo em torno dos resultados do “*Telescópio Horizonte de Eventos*” [3]. Esta colaboração científica produziu imagens surpreendentes da região próxima do centro de duas galáxias, sendo uma a nossa própria Via Láctea. O segundo objetivo deste texto é explicar as ideias (muito) básicas desta conquista.

Para manter estes objetivos um desafio para mim e, espero, agradável para si, leitor, tentarei gerir estes dois objetivos sem usar nenhuma equação.

2 - Estrutura Causal na Relatividade Restrita

Mantendo o nosso esboço de definição em mente (dada em cima), começaremos por conceber noções idealizadas de simultaneidade e percepção.

Começemos por imaginar uma arena, chamada espaço-tempo, que consiste no espaço e no tempo unidos de alguma forma. De acordo com a de-

finição da linguagem comum acima, os pontos nesta arena representam coisas que acontecem. Eles são chamados de “eventos”. Na nossa vida cotidiana, atribuímos nomes aos eventos. Por exemplo, podemos marcar um encontro com amigos num restaurante às 20:00. Os físicos chamam a estes nomes de “coordenadas”. Mas os nomes que escolhemos para dar a eventos específicos não são importantes. O que importa são as possíveis relações que existem entre eles. Estas relações permitem-nos imaginar o espaço-tempo não apenas como uma confusão aleatória de pontos, mas ocorrendo com uma estrutura que podemos tentar entender. Então, quais são as regras físicas desta estrutura do espaço-tempo que nos permitem entender os seus mistérios?

Imaginamos a seguir que alguém existe no espaço-tempo. Este alguém é altamente idealizado, existindo apenas como uma abstração chamada, no jargão da física, de “observador”. No nosso pequeno modelo, os observadores e os seus poderes de comunicação são necessários para satisfazer uma série de regras invioláveis, que por sua vez determinam a estrutura do espaço-tempo mencionada acima. Apresentaremos essas regras à medida que forem necessárias. A primeira regra é que os observadores devem se mover exclusivamente para o futuro e, em cada instante temporal (ou seja, em cada ponto no tempo), eles habitam um único ponto no espaço. Assim, um observador é uma coleção de eventos no espaço-tempo que podem ser encadeados ao longo de uma curva, chamada de “linha de mundo do observador”.

A relatividade restrita de Einstein (de 1905) consiste em duas ideias centrais. Ele diz que, além da escolha sem importância de unidades, dois observadores que se movem um em relação ao outro, medem, ainda assim, o mesmo valor para a velocidade da luz, e que este valor serve como um limite de velocidade universal para todos os observadores (e de facto para todos os sinais). Podemos distinguir entre um observador genérico e um observador “inercial”. Os observadores inerciais são apenas observadores em queda livre, o que significa que nenhuma força actua sobre eles. Em relatividade restrita, os observadores inerciais são especiais porque existe um procedimento que pode ser usado para desenhar coordenadas nas quais a velocidade da luz, o limite de velo-

cidade universal, assume o mesmo valor constante em todos os eventos. Essas coordenadas especiais são chamadas de “coordenadas inerciais globais”.

Acrescentar estas regras simples ao nosso modelo mental tem consequências profundas na estrutura do espaço-tempo.

Voltando ao nosso modelo, suponha que dois observadores estão a comunicar por meio da troca de mensagens que viajam com uma velocidade finita (que no máximo será dada pela velocidade da luz na relatividade restrita). Se tomarmos ‘receber uma mensagem’ como uma aproximação para o conceito de ‘percepção’, usado na nossa definição de linguagem comum acima, chegamos à ideia de cones nulos de um evento. Estes são conjuntos de eventos conectados ao primeiro por um caminho viajando a esta velocidade máxima. Para o futuro, um observador pode afetar qualquer evento que se encontre no, ou dentro, do seu cone nulo futuro. De forma análoga, os observadores no passado podem ser afetados por qualquer evento no, ou dentro, do seu cone nulo passado. Na Fig. 1, fiz um esboço destes conceitos.

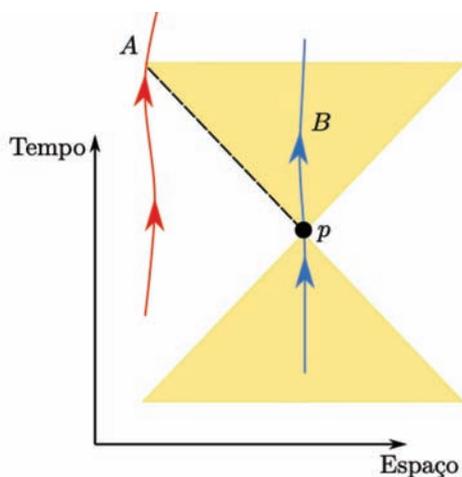


Figura 1 - Um esboço da estrutura do espaço-tempo na relatividade restrita. “Espaço” vai horizontalmente com o tempo aumentando verticalmente. A linha de mundo de dois observadores, A e B, é denotada. Os cones de luz futuro e passado do evento (ponto do espaço-tempo) p também são denotados. Em p, o observador B envia uma mensagem, denotada pela linha tracejada preta, ao observador A. Esta mensagem viaja à velocidade da luz; nenhuma mensagem poderia viajar mais rápido.

Recordo que o nosso esboço de definição do “horizonte de eventos” foi como sendo a fronteira daquilo que é sempre perceptível. Na explicação dada em cima, parece que uma mensagem de um observador acabará eventualmente por chegar sempre ao seu parceiro. Se fosse esse o caso, não importa a distância a que os nossos dois observadores estejam; eles podem comunicar um com o outro se forem suficientemente pacientes. Se isto estiver certo, então nada está fora do reino da percepção e, portanto, nenhum horizonte de eventos existe. Estará este raciocínio incorreto? De que estrutura adicional, se houver alguma, precisamos nas nossas noções de espaço-tempo?

3 - Curvatura do espaço-tempo

Na descrição acima, parti do pressuposto de que a velocidade máxima universal, vista por observadores inerciais, assumia o mesmo valor em qualquer lugar no espaço-tempo. Isso foi possível pelo uso de coordenadas muito especiais, as coordenadas inerciais globais. Mas acontece que tais

coordenadas só podem ser construídas se o espaço-tempo for, num sentido matemático específico, plano. Já que não quero ficar atolado em detalhes técnicos, direi apenas que a descoberta central da teoria da gravidade de Einstein, a teoria da relatividade geral de 1915, é que o espaço-tempo não é plano, mas sim curvo de uma maneira que pode ser descrita usando a geometria riemanniana conforme concebida na década de 1850. Na relatividade geral, a gravidade é a curvatura.

Voltando ao nosso modelo, queremos então relaxar a suposição de que observadores inerciais podem ser usados para construir coordenadas inerciais globais. Consequentemente, vamos imaginar que podemos desenhar coordenadas “inerciais locais” centradas na linha de mundo de um observador inercial pelo mesmo procedimento que usamos antes. Ao longo dessa linha do mundo, ainda é verdade que usando estas coordenadas para medir o limite de velocidade universal obteremos o valor que tínhamos antes. Mas, crucialmente, ao afastarmos-nos da linha do mundo do nosso observador, o valor medido do limite de velocidade pode mudar.

Como não havia nada de especial na linha do mundo que escolhemos, a mesma construção é possível para qualquer observador inercial. O que isso significa, portanto, é que o espaço-tempo localmente (muito perto de um observador) tem a mesma estrutura causal que vimos antes, com cones e assim por diante. Mas em grandes escalas, como o limite de velocidade universal pode mudar dependendo de para onde olhamos no espaço-tempo, surpresas podem acontecer!

4 - Buracos negros e o horizonte de eventos

Imagine-nos agora, dentro do nosso modelo mental de espaço curvo, como um observador e suponha que, à medida que nos afastamos da nossa linha de mundo, a velocidade que medimos para os sinais enviados na nossa direção diminui em magnitude. Obviamente, teríamos que esperar mais tempo do que no nosso modelo anterior para receber mensagens de um segundo observador. Na verdade, isso é exatamente o que a relatividade geral diz que deve acontecer para sinais que se propagam para fora de um campo gravitacional forte, conosco a desempenhar o papel de observadores à distância, e o segundo observador a desempenhar o papel de um observador dentro do campo gravitacional forte.

Isto não é mero sofisma como no paradoxo de Zenão, mas uma característica honesta do nosso modelo e, mais importante, uma previsão da relatividade geral que foi verificada experimentalmente na Terra já no início dos anos 1970, colocando relógios de alta precisão em voos longos e comparando, no final da viagem, os seus tempos com aqueles decorridos em relógios deixados em Terra.

Levando a ideia ao extremo, podemos conceber uma situação em que uma sequência de observa-

dores que se distanciam sucessivamente nos envia mensagens. Mensagens de observadores próximos chegam rapidamente, mas se a redução do limite de velocidade for grande o suficiente, estas mensagens enviadas para nós de dentro da região de campo forte nunca chegam! Curiosamente, não há necessidade de que essa desconexão ocorra em ambas as direções, e ainda podemos ser capazes de enviar mensagens ao nosso/a azarado/a amigo/a, estando ele/a incapaz de nos responder, não importa o quanto queira.

O conjunto de eventos do qual nenhum sinal pode emergir para nos alcançar, estando nós longe do campo forte, é chamado de região do buraco negro. Além do mais, agora vemos como realizar a nossa definição anterior de linguagem natural de horizonte de eventos no nosso modelo. O horizonte de eventos é simplesmente o limite da região do buraco negro e, na verdade, o limite daquilo que é sempre perceptível, pelo menos de fora. Isso é esboçado na Fig. 2. Nada de anormal precisa acontecer no próprio horizonte de eventos. Na verdade, um observador poderia navegar através dele do horizonte de eventos (de fora para dentro) sem ter ideia de que o tinha feito. Para dar uma descrição satisfatória da relatividade geral, é claro que precisaríamos de formalismo matemático, mas a definição central do horizonte de eventos é essencialmente conforme a discutida aqui, mesmo na teoria completa.

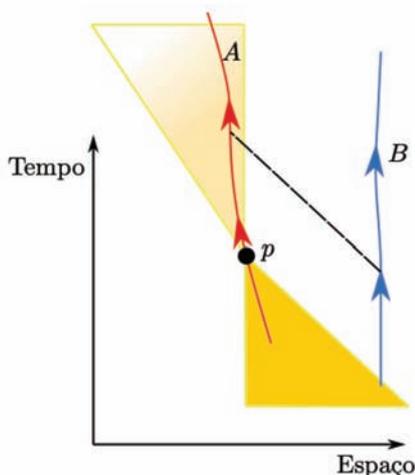


Figura 2 - Um esboço da estrutura do espaço-tempo num espaço-tempo de buraco negro. Como antes, vemos a linha de mundo de dois observadores, A e B, mas desta vez os cones de luz inclinam-se em direção a A, e a partir do evento p estão tão inclinados que A não pode mais responder à mensagem de B!

5 - Descrição matemática

É claro que a discussão acima, dada apenas em palavras, é necessariamente qualitativa. Para fornecer uma descrição quantitativa detalhada, é necessário um formalismo matemático pesado. Mas essa maquinaria está bem desenvolvida e tem sido usada para estabelecer fatos profundos sobre o desenvolvimento do horizonte de eventos. Por exemplo, foi estabelecido já na década de 1970, em trabalhos

famosos de Hawking [4,5], que se tomarmos dois cortes do horizonte de eventos em momentos diferentes, então a área do corte posterior deve ser maior ou igual à do corte anterior. Por outras palavras, na relatividade geral, os buracos negros só podem crescer! Apesar desse trabalho clássico, ainda há questões a serem respondidas - e pesquisas ativas estão em andamento. Na relatividade numérica, por exemplo (ver o artigo de Miguel Zilhão nesta edição para uma introdução) “localizadores de horizonte de eventos” são uma ferramenta importante [6,7], cuja tarefa é identificar a posição do horizonte de eventos dentro de espaços-tempos construídos computacionalmente. Uma vez tendo encontrado o horizonte de eventos este pode ser investigado, e até questões subtis, por exemplo relativas à sua suavidade, podem ser abordadas.

6 - Buracos negros na astrofísica

O objetivo fundamental da física é fornecer uma descrição precisa da realidade. Portanto, belas definições alucinantes como a do horizonte de eventos devem, no mínimo, ser compatíveis com as observações. Existem, de facto, inúmeras evidências independentes da existência de buracos negros, que agora são considerados um pilar da astrofísica.

Nos últimos anos, por exemplo, grandes avanços experimentais foram dados por:

- Detecção de ondas gravitacionais.
- Rastreamento do movimento das estrelas ao redor de Sagitário A*, o objeto supermassivo no centro da Via Láctea (amplamente considerado um buraco negro) - ver o artigo de P. Garcia e A. Amorim neste volume.
- O telescópio do horizonte de eventos - ver o artigo de P. Cunha neste volume.

O trabalho para a primeira e segunda evidência mencionadas foi premiada com os prémios Nobel de 2017 e 2020, respectivamente. Agora vou discutir brevemente apenas o último desses três, mas não resisto a mencionar que a deteção de ondas gravitacionais, pelos detectores LIGO / Virgo, finalmente tornou possível examinar experimentalmente [8] resultados aparentemente abstratos como o teorema da área de Hawking mencionado acima!

O telescópio do horizonte de eventos é operado por uma colaboração internacional de cientistas que coletam dados de vários observatórios de rádio distribuídos por todo o planeta. A combinação cuidadosa desses dados permite que a colaboração crie efetivamente um único detector virtual enorme. Esta estratégia é chamada de interferometria de linha de base muito longa. Consequentemente, a colaboração foi capaz de construir e apresentar, em 2019, a primeira imagem de observação direta de um buraco negro, nomeadamente o buraco negro supermassivo situado no centro da galáxia Messier 87. Adicionalmente, em março deste ano, a colaboração apresentou, a partir dos mesmos dados, uma análise mais detalhada que incorpora informações sobre a polarização da radiação. Dada a definição acima, claramente não é possível ‘tirar uma foto’ do horizonte de eventos em si. Em vez disso, o que estas agora famosas imagens realmente mostram é uma representação da luz emitida por gás perto do buraco negro. A colaboração realizou cálculos detalhados para construir uma imagem semelhante em

modelos teóricos, assumindo que a relatividade geral está correta, e descobriu que as observações são perfeitamente compatíveis com estas previsões. Uma introdução mais aprofundada ao trabalho do telescópio de horizonte de eventos, juntamente com uma reprodução das suas imagens espetaculares, pode ser encontrada neste número, no artigo de Pedro V.P. da Cunha.

7 - Resumo

Ao realizar um conjunto de experiências mentais, fomos capazes de arquitetar uma definição para o horizonte de eventos e um modelo no qual essa definição é realizada. Para o nosso pensamento foram cruciais as noções de estrutura causal local e global. Posteriormente, consideramos as evidências recentes de buracos negros na astrofísica.

O leitor interessado em ir mais longe descobrirá que há uma abundância de livros acessíveis sobre o assunto dos buracos negros, incluindo [9,10].

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. José Sande Lemos e ao Prof. Carlos Herdeiro pelo convite para escrever este artigo.

Agradeço ao Francisco Duque e ao Carlos Herdeiro pela sua ajuda na tradução do texto original, e ao Justin Feng por discussões interessantes. Este trabalho recebeu apoio da FCT (Portugal) IF Program IF/00577/201 and Project No. UIDB/00099/2020.



David Hilditch. Depois de completar o seu doutoramento na Universidade de Southampton no Reino Unido, David Hilditch passou alguns anos como investigador na Universidade de Jena Friedrich Schiller, na Alemanha. Depois, mudou-se para o Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, onde é agora Professor Assistente. Ele trabalha em relatividade matemática e numérica.

Referências

- [1] <https://www.merriam-webster.com/>
- [2] <https://www.dictionary.com/>
- [3] <https://eventhorizontelescope.org/>
- [4] *Gravitational Radiation from Colliding Black Holes*, S. Hawking, Phys. Rev. Lett., 26, 1344 (1971).
- [5] *Black holes in general relativity*, S. Hawking, Comm. Math. Phys., 25(2), 152-166 (1972).
- [6] *Event and Apparent Horizon Finders for 3 + 1 Numerical Relativity*, J. Thornburg, Living Rev. Relativ., 10, 3 (2007); <https://doi.org/10.12942/lrr-2007-3>.
- [7] *Horizon dynamics of distorted rotating black holes*, T. Chu, H. Pfeiffer, M. Cohen, Phys. Rev. D 83, 104018 (2011).
- [8] *Testing the black-hole area law with GW150914*, M. Isi, W. Farr, M. Giesler, M. Scheel, S. Teukolsky, Phys. Rev. Lett., 127, 011103 (2021).
- [9] *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, Kip S. Thorne, ISBN: 0-393-21276-3.
- [10] *Black Hole Survival Guide*, Janna Levin, ISBN-10: 052565822X.

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 FORMAÇÃO DE BURACOS NEGROS.

Como poderá já ter lido neste ou noutra 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 precursora 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 significativo. 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, Bolívia, 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, numa 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 numa 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 fóton). 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 à 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 apresentação 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 física³. 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 Einstein⁵. 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 ge-

nérica, a distorção da geometria do espaço-tempo vai fazer com que a área destas esferas mude o seu carácter 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 conseqüente 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 carácter 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 última 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 de 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 infinidade 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. Parafraçando Wheeler “a carga é o “parente pobre” do momento angular”.⁶

C. O efeito de desvio para o azul.

As singularidades schwarzschildianas, 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 é difícil encontrar outras soluções das equações de Einstein⁷ 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 a 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 azul⁸, 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 Belimunda⁹ 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 incursão pelo buraco negro, Alice irá necessariamente chegar

⁶ 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.

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.

ao horizonte de Cauchy, num intervalo de tempo finito, como medido pelo seu relógio. Assim sendo, a infinidade de sinais enviados por Belimunda terá de chegar, na perspectiva 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 dum 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, conseqüentemente, à formação dum singularidade Schwarzschildiana, 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 perspectiva, 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-se¹⁰. Por um lado, estes mecanismos são fundamentais para a estabilidade da região exterior, mas por outro, com-

petem 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 dum 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 características 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 dum película elástica leva ao seu alisamento. É possível verificar que, conseqüentemente, 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, dum 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 competição? Bem, como já referi, a situação é particularmente subtil e

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 Sixth)

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 Kerr-de 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 emanção (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, *Sútil é o Senhor*, Gradiva 1ª edição/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.

Penrose e o Prémio Nobel da Física de 2020

José Natário¹

¹ Departamento de Matemática, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

1. Introdução

O Prémio Nobel da Física de 2020 foi atribuído (em parte) ao físico matemático britânico Sir Roger Penrose (fig. 1) “pela descoberta de que a formação de buracos negros é uma previsão robusta da Teoria da Relatividade Geral”. De acordo com o comité Nobel, Penrose “usou métodos matemáticos engenhosos na sua prova de que os buracos negros são uma consequência direta da Teoria da Relatividade Geral de Einstein” [1]. Neste artigo, vamos tentar explicar qual foi a contribuição de Penrose para estabelecer os buracos negros como objetos físicos reais, hoje em dia indispensáveis na nossa compreensão do Universo.

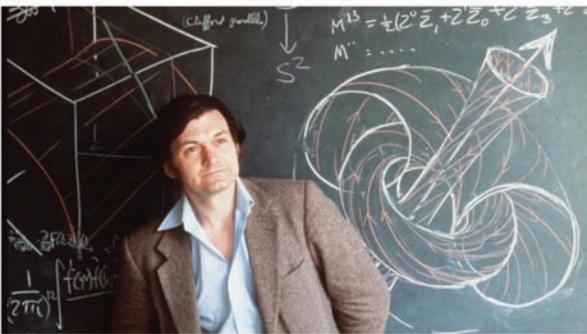


Figura 1 - Sir Roger Penrose, numa fotografia tirada em 1980 (Anthony Howarth/Science Photo Library).

2. O que é um buraco negro?

O conceito de buraco negro é muitas vezes introduzido recorrendo à noção newtoniana de velocidade de escape. Como é bem sabido, um corpo celeste esfericamente simétrico de massa M e raio R possui uma velocidade de escape igual à raiz quadrada de $2GM/R$, onde G é a constante de gravitação universal. Esta é a velocidade mínima com que um objeto deve ser lançado a partir da superfície do corpo celeste para escapar ao seu campo gravitacional: se for lançado com velocidade inferior, necessariamente acabará por se deter na sua trajetória e tornar a cair na superfície. No contexto da mecânica newtoniana, podemos então imaginar corpos celestes cuja velocidade de escape é superior à velocidade da luz,

$c = 300\,000$ quilómetros por segundo, ou, equivalentemente, cujo raio é inferior ao chamado **raio de Schwarzschild**, dado por $R_S = 2GM/c^2$. Admitindo que os fótons que compõem a luz se comportam como qualquer outro objeto no campo gravitacional, seria então impossível ver estes corpos celestes, uma vez que a luz por eles emitida não conseguiria escapar. Tais “estrelas escuras” foram consideradas por John Michell e Pierre-Simon Laplace no final do século XVIII [2], mas caíram no esquecimento à medida que a natureza ondulatória da luz se tornava evidente, e a teoria corpuscular de Newton perdia popularidade.

O comportamento da luz num campo gravitacional só foi elucidado com a publicação da Teoria da Relatividade de Einstein, em 1915 (fig. 2). Nesta teoria, a descrição newtoniana da gravidade como um campo de forças é substituída pela curvatura do próprio espaço-tempo. Resolvendo as equações de Maxwell, que regem o comportamento do campo eletromagnético, neste espaço-tempo curvo, é então possível estudar a propagação da radiação eletromagnética (em particular da luz) num campo gravitacional. O resultado desta análise é que os raios de luz seguem trajetórias especiais, chamadas geodésicas nulas, na geometria curva do espaço-tempo. No caso mais simples em que a curvatura do espaço-tempo se deve apenas à curvatura do espaço, estas trajetórias correspondem a geodésicas espaciais (ou seja, curvas de compri-

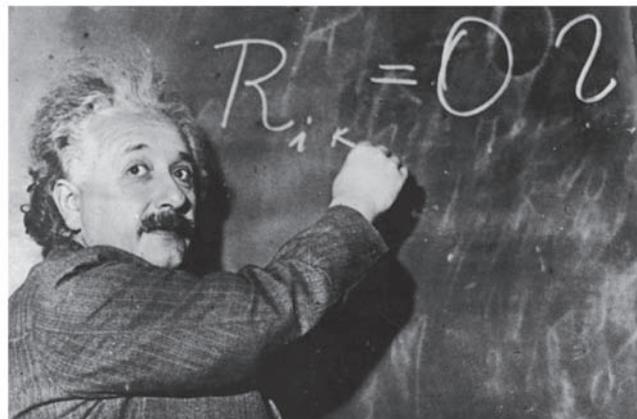


Figura 2 - Albert Einstein escrevendo a sua equação, numa fotografia tirada em 1931 (Associated Press).

mento mínimo no espaço) percorridas à velocidade da luz. Por exemplo, no caso em que o espaço é o análogo tridimensional da superfície de uma esfera (o chamado universo de Einstein), as geodésicas nulas correspondem a círculos máximos percorridos à velocidade da luz.

A curvatura do espaço-tempo é determinada pela matéria nele presente, e pode ser calculada a partir da chamada **equação de Einstein**. A primeira solução exata desta equação, correspondente ao campo gravitacional criado por um corpo esfericamente simétrico, foi obtida por Karl Schwarzschild em 1916. Da expressão desta solução ficou imediatamente claro que algo de estranho se passava no raio de Schwarzschild $R_S = 2GM/c^2$, onde certas quantidades pareciam tornar-se infinitas. Uma análise mais cuidada revelou que na realidade a superfície esférica de raio R_S era algo nunca antes encontrado em Física: uma superfície esférica que, apesar de se estar a expandir à velocidade da luz, se mantinha sempre do mesmo tamanho! Tal superfície viria a ser batizada de **horizonte de acontecimentos**, e a região no seu interior de **buraco negro**.

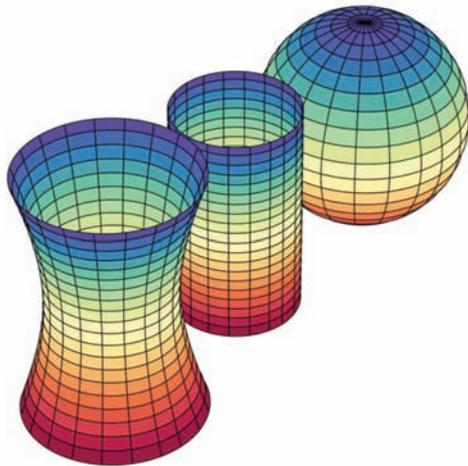


Figura 3 - Três exemplos de espaços curvos: hiperbolóide, cilindro e esfera (Wikimedia Commons).

Habitualmente, o raio de uma superfície esférica que se esteja a expandir à velocidade da luz tem necessariamente que aumentar. Uma superfície esférica que se expande à velocidade da luz mas cujo raio se mantém constante só é possível em regiões onde a curvatura do espaço-tempo é muito acentuada. Para dar uma ideia de como é que a curvatura pode permitir este tipo de fenómenos, imaginemos um universo cilíndrico, ou seja, um espaço tridimensional composto por superfícies esféricas todas com o mesmo raio. É muito difícil (ou mesmo impossível) visualizar tal espaço, mas este pode ser compreendido por analogia com a superfície de um cilindro (Fig. 3). Neste modelo bidimensional, as superfícies esféricas são representadas pelas circunferências ortogonais ao eixo do cilindro, que possuem todas o mesmo raio. Deve ser claro que mesmo que uma destas circunferências se esteja a propagar à velocidade da luz ao longo da superfície do cilindro, o seu raio permanece constante; da mesma forma, o raio de uma superfície esférica que se esteja a mover à velocidade da luz no universo cilíndrico não se altera. Note-se que isto é simplesmente um exemplo ilustrativo num espaço-tempo

muito simples, em que apenas o espaço é curvo; a geometria da solução de Schwarzschild é consideravelmente mais complicada.

Uma vez que, de acordo com a Teoria da Relatividade, nada se pode mover mais depressa que a luz, nenhum objeto físico (ou sinal) pode atravessar o horizonte de acontecimentos vindo do seu interior. Desta forma, o buraco negro não pode emitir luz para o exterior, o que explica o seu nome. Note-se que apesar de possuírem o mesmo raio R_S das “estrelas escuras” de Michell e Laplace, os buracos negros da Relatividade Geral são conceptualmente muito diferentes. Por exemplo, o facto das “estrelas escuras” terem velocidade de escape igual à velocidade da luz não impede um foguetão de escapar da sua superfície, movendo-se sempre com velocidade inferior à da luz: basta que tenha combustível suficiente para contrabalançar a atração gravitacional da “estrela escura” à medida que se afasta da sua superfície. Tal não é possível no caso de um buraco negro: nada lhe pode escapar, por muito que acelere. Aliás, é possível mostrar que a aceleração necessária para um observador no exterior se manter imóvel em relação ao horizonte de acontecimentos (cujo tamanho, recordemos, não varia) tende para infinito à medida que o observador é colocado cada vez mais próximo do horizonte de acontecimentos.

O comportamento das superfícies esféricas que se expandem à velocidade da luz no interior do buraco negro de Schwarzschild é ainda mais bizarro: o raio de tais superfícies diminui, até eventualmente ser zero. Novamente, uma vez que nada se pode mover mais rápido que a luz, qualquer objeto físico no interior desta superfície esférica será necessariamente esmagado num ponto, ao qual se costuma chamar a **singularidade**. Pode mostrar-se que a curvatura do espaço-tempo de Schwarzschild é infinita neste ponto, o que implica a destruição de qualquer objeto na sua vizinhança. Desta forma, observadores no interior do buraco negro de Schwarzschild (bem como raios de luz) só podem existir durante um intervalo de tempo finito: o espaço-tempo de Schwarzschild termina na singularidade.

3. O teorema de singularidade de Penrose

Durante muito tempo, pensou-se que o buraco negro de Schwarzschild poderia ser uma particularidade da simetria esférica, e que soluções mais realistas não conteriam singularidades. De facto, é natural esperar que se um corpo perfeitamente esférico colapsa para o interior do seu raio de Schwarzschild, formando um buraco negro, todo o material acabe por se concentrar no centro, originando um ponto de densidade infinita (e portanto, de acordo com a equação de Einstein, de curvatura infinita) – ou seja, uma singularidade. Na ausência de simetria esférica, seria concebível que o momento angular das partículas do corpo em colapso as levasse a afastarem-se do centro após uma determinada aproximação máxima, fa-

zendo com que o corpo ressaltasse após atingir um estado de densidade muito elevada. Não existindo singularidade, não haveria também nenhuma razão especial para pensar que existisse um horizonte de acontecimentos, e portanto talvez o buraco negro de Schwarzschild fosse apenas uma curiosidade matemática, uma solução instável da equação de Einstein que na prática nunca seria observada na Natureza.

Foi esta a questão que Penrose veio esclarecer, provando que na realidade qualquer colapso aproximadamente esférico levaria ao aparecimento de singularidades [3]. Mais concretamente, o teorema de Penrose estabelece a existência de singularidades em espaço-tempos que:

1. São espacialmente ilimitados;
2. Não contêm energia negativa;
3. Contêm uma **superfície aprisionada**.

A primeira hipótese é natural quando se procura estudar um sistema isolado (se bem que em Relatividade Geral também é possível considerar espaço-tempos que são espacialmente limitados, como por exemplo o universo de Einstein). A segunda hipótese, que se destina a garantir que a gravidade é sempre atrativa, é também satisfeita pela generalidade dos modelos (macroscópicos) de matéria (em que as energias negativas das ligações moleculares, atômicas e nucleares, são largamente compensadas pelas energias correspondentes às massas de repouso das partículas). Finalmente, uma superfície aprisionada é uma superfície cuja área diminui quando ela se propaga à velocidade da luz em ambas as direções possíveis. Isto é o que se passa com as superfícies esféricas no interior do buraco negro de Schwarzschild. Para dar uma ideia de como tais superfícies podem existir num espaço-tempo curvo, consideremos novamente o universo de Einstein, em que o espaço é o análogo tridimensional da superfície de uma esfera (Fig. 3). O análogo do equador neste universo é uma superfície esférica bidimensional de raio máximo, cuja área diminui quer esta se propague na direção do polo norte ou do polo sul. Novamente, isto é simplesmente um exemplo ilustrativo num espaço-tempo muito simples, em que apenas o espaço é curvo; a geometria da solução de Schwarzschild é consideravelmente mais complicada.

Na sua prova, Penrose usou a técnica da redução ao absurdo, mostrando que a não existência de singularidades levaria a uma contradição. Apesar dos detalhes matemáticos da prova estarem fora do âmbito deste artigo, é possível dar uma ideia do essencial do argumento. Penrose começou por mostrar que qualquer ponto do espaço pode ser atingido por raios de luz com origem numa dada superfície fechada, e que, dentre estes, o primeiro a chegar é emitido perpendicularmente à superfície. Foi neste passo que Penrose assumiu a não existência de singularidades, porque uma eventual singularidade impediria a passagem de alguns raios de luz. De seguida, Penro-

se provou que um raio de luz perpendicular à superfície que atinja um ponto focal (ou seja, um ponto onde interseção de raios de luz vizinhos) deixa de ser o primeiro raio de luz a atingir os pontos por onde passa para além do ponto focal. Isto é plausível se pensarmos no exemplo dos raios de luz emitidos por uma superfície esférica para o seu interior, que deixam de ser os primeiros raios quando passam no ponto focal (neste caso o centro da esfera). Finalmente, Penrose considerou o caso em que a superfície fechada era uma superfície aprisionada. Neste caso, os raios emitidos perpendicularmente em **ambas** as direções possíveis estão a convergir. O facto de que não existe energia negativa, e portanto a gravidade é atrativa, evita que os raios tornem a divergir (como acontece por exemplo no espaço-tempo em que o espaço é o análogo tridimensional da superfície do hiperbolóide representado na Fig. 3). Portanto, os raios deixam de ser o primeiro raio a uma distância finita da superfície aprisionada. Mas então todos os pontos do espaço estão a uma distância finita (o máximo das distâncias focais) da superfície aprisionada, em contradição com a hipótese de que o espaço é ilimitado.

O teorema de Penrose tornou imediatamente claro que o colapso gravitacional produziria singularidades mesmo em situações sem simetria esférica. De facto, é fácil mostrar que pequenas deformações de superfícies aprisionadas são ainda superfícies aprisionadas. Deste modo, colapsos aproximadamente esféricos formam inevitavelmente este tipo de superfícies (porque elas existem nos colapsos esfericamente simétricos), e portanto, em virtude do teorema de Penrose, formam também singularidades. Existem agora duas hipóteses: ou estas singularidades são visíveis para observadores arbitrariamente distantes (situação que Penrose batizou como a existência de **singularidades nuas**), ou forma-se um horizonte de acontecimentos que oculta a singularidade do exterior, como no caso da solução de Schwarzschild. Penrose apresentou vários argumentos em favor desta segunda possibilidade [4], que se tornou conhecida como a **conjectura da Censura Cósmica**. Admitindo a veracidade desta conjectura, o teorema de Penrose implica então a existência de buracos negros como objetos físicos, resultantes de colapsos gravitacionais reais.

4. Evidência observacional

O Prémio Nobel da Física de 2020 foi também atribuído à astrónoma americana Andrea Ghez e ao astrofísico alemão Reinhard Genzel, pelas suas observações das estrelas no centro da nossa galáxia, a Via Láctea. Em particular, eles seguiram as órbitas de várias destas estrelas durante mais de duas décadas (Fig. 4), tendo mostrado que elas orbitam um objeto invisível cuja massa é de cerca de quatro milhões de massas solares, e cujo raio é certamente inferior a 30 milhões de quilómetros (ou seja, duas vezes e meia o seu raio de Schwarzschild). Apesar disto não implicar inequivocamente que este objeto é um buraco negro, não existe na Física moderna nenhuma alternativa credível para uma concentração tão grande de massa num volume tão pequeno. Na opinião da esmagadora maioria dos físicos (e também do Comité Nobel), o objeto no centro da nossa galáxia é, para lá de toda a dúvida razoável, um buraco negro.

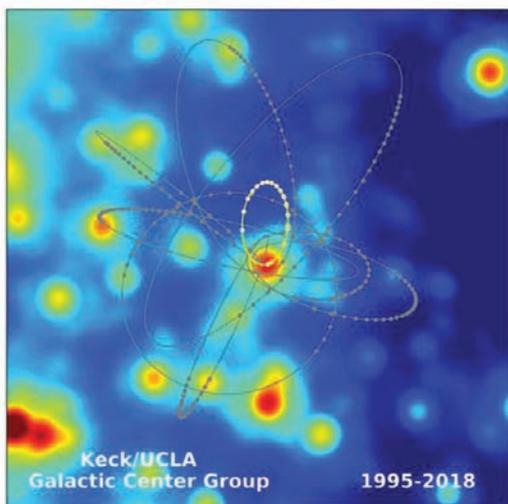


Figura 4 - Órbitas de algumas estrelas em redor do buraco negro no centro da Via Láctea (Keck Observatory/UCLA Galactic Center Group).

Existem muitos outros indícios da existência de buracos negros, como por exemplo os sinais de ondas gravitacionais detetados rotineiramente pelo observatório LIGO, cujo perfil típico corresponde ao da colisão de dois buracos negros (que pode ser calculado resolvendo numericamente a equação de Einstein num computador). Em 2019, o Event Horizon Telescope publicou mesmo a primeira imagem (usando interferometria de ondas de rádio) de um buraco negro supermassivo, situado no centro da galáxia M87 (Fig. 5). Nesta imagem, o horizonte de acontecimentos é a região escura no centro; o círculo luminoso é gerado pelo disco de matéria que orbita o buraco negro antes de cair no interior, que aquece por fricção e emite enormes quantidades de radiação.

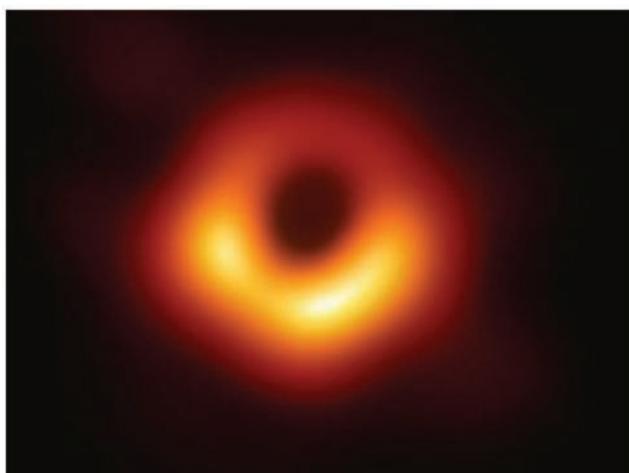


Figura 5 - Imagem interferométrica do buraco negro supermassivo no centro da galáxia M87 (Event Horizon Telescope Collaboration)

Na realidade, a grande motivação de Penrose para provar o seu teorema (em 1967) foi a observação dos quasares no início dos anos 60. Rapidamente se percebeu que estes objetos longínquos radiavam quantidades prodigiosas de energia, muito mais do que o que seria possível gerar por fusão nuclear. Um dos principais mecanismos propostos para explicar este fenómeno foi precisamente a emissão de radiação pela matéria em queda em torno de um buraco negro supermassivo no centro de uma galáxia ativa. Este processo

é extremamente eficiente, podendo corresponder à emissão de 40 % da energia contida na massa de repouso da matéria em queda, por oposição aos cerca de 0,7 % que podem ser obtidos da fusão nuclear (a ordem de grandeza desta percentagem pode ser compreendida notando que a energia potencial gravitacional de um corpo de massa m no horizonte de acontecimentos é $-GMm/R_S = -mc^2/2$). A observação dos quasares tornava então a questão de perceber se os buracos negros existiam de facto na Natureza particularmente urgente.

Ao demonstrar o teorema que lhe viria a valer o Prémio Nobel, Penrose tornou a existência dos buracos negros universalmente aceite. Hoje em dia sabemos que de facto quase todas as galáxias possuem um buraco negro central, e que este é essencial não só para explicar os quasares como a própria evolução das galáxias. Da confusão inicial sobre o que se passaria no raio de Schwarzschild, ao consenso acerca da sua existência na Natureza decorrente do teorema de Penrose, às sensacionais observações do início do século XXI, os buracos negros impuseram-se como conceitos fundamentais no estudo na Natureza. Passados mais de cem anos sobre a descoberta da solução de Schwarzschild, podemos apenas especular acerca de que outros segredos guardam ainda estes objetos fascinantes.

Referências

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/penrose/facts/>
- [2] C. Montgomery, W. Orchiston e I. Whittingham, "Michell, Laplace and the origin of the black hole concept", *Journal of Astronomical History and Heritage* 12 (2009) 90-96.
- [3] R. Penrose, "Gravitational collapse and space-time singularities", *Physical Review Letters* 14 (1965), 57-59.
- [4] R. Penrose, "Gravitational collapse: the role of general relativity", *Rivista del Nuovo Cimento* 1 (1969), 252-276.



José Natário, Professor Catedrático no Departamento de Matemática do Instituto Superior Técnico. Doutorou-se em 2000 na Universidade de Oxford, onde foi aluno de Roger Penrose. É autor de dezenas de artigos científicos e de três livros, incluindo "General Relativity Without Calculus" (Springer, 2011), no qual tenta explicar as ideias principais da Relatividade Geral usando apenas matemática elementar.

Relatividade Numérica e Buracos Negros

Miguel Zilhão¹

¹ CENTRA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais 1, 1049 Lisboa

1. Introdução

Formulada por Einstein em 1915, a Relatividade Geral é rotineiramente considerada uma das mais belas teorias jamais descobertas. Esta teoria postula que a gravidade não é mais do que uma propriedade geométrica do espaço e do tempo, que são descritos em Relatividade através do conceito quadridimensional de espaço-tempo. A curvatura do espaço-tempo está relacionada com o seu conteúdo de matéria e energia através das equações de campo de Einstein (fig. 1). Uma das mais espectaculares previsões destas equações é a existência de buracos negros – soluções das equações de Einstein no vácuo definidas por um horizonte de acontecimentos, ou seja, uma região do espaço da qual nada (nem mesmo a luz) consegue escapar. Buracos negros são objectos macroscópicos fascinantes e extremamente simples – são totalmente caracterizados pela sua massa e momento angular – e têm sido amplamente estudados nas últimas décadas.

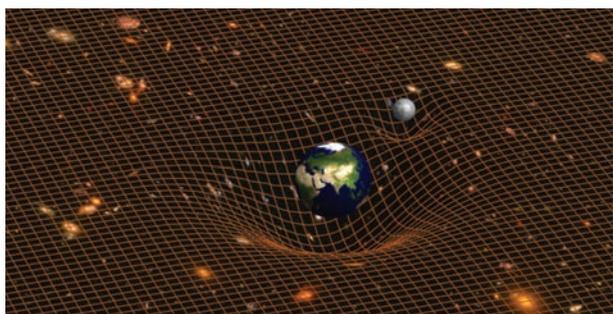


Fig. 1 - Representação pictórica da geometria do sistema Terra-Lua. Imagem: Raimon Luna e Marina Martinez.

Não obstante esta elegância, em Relatividade Geral, na grande maior parte dos casos somos apenas capazes de fazer cálculos totalmente analíticos em situações altamente simétricas ou em limites de campo gravítico fraco. Para atacar problemas mais complicados, tais como sistemas com campos gravitacionais dinâmicos e fortes, são necessários métodos computacionais. O exemplo típico é o conhecido problema dos dois corpos. Em mecânica newtoniana podemos escrever de forma muito simples a solução deste problema em termos de cónicas (círculos, elip-

ses, parábolas e hipérbolas); em Relatividade Geral, o problema equivalente (um sistema binário de buracos negros) não tem solução fechada. Existem técnicas perturbativas para estudar certas fases do problema – em particular, a fase de em-espiral¹ é bem descrita por métodos pós-newtonianos, e a fase de “ringdown” (relaxamento), depois da fusão, é bem descrita por modos quasi-normais do buraco negro final. No entanto, são sempre necessárias simulações numéricas para evoluir o sistema durante a fusão dos buracos negros – a esta área da física é dado o nome de relatividade numérica.

2. As origens

ANNALS OF PHYSICS 29, 304-331 (1964)

The Two-Body Problem in Geometrodynamics

SUSAN G. HAHN

International Business Machines Corporation, New York, New York

AND

RICHARD W. LINDQUIST

Adelphi University, Garden City, New York

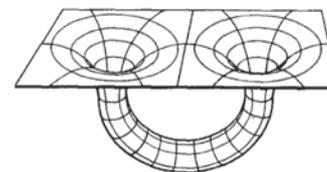


Fig. 2 - Artigo de Susan Hahn e Richard Lindquist publicado em 1964, onde pela primeira vez se atacou o problema dos dois corpos em Relatividade Geral.

A Relatividade Numérica pode ser encarada como uma ferramenta para estudar espaços-tempo que não podem ser estudados com métodos puramente analíticos. Tem as suas origens nos anos 60, quando Hahn e Lindquist tentaram pela primeira vez evoluir as equações de campo de Einstein para um sistema de buracos de verme [1]², usando para isso um formalismo muito diferente das abordagens modernas (fig. 2). Os cálculos numéricos foram feitos num computador IBM 7090 (ver figura 3), um *mainframe* projetado para “aplicações científicas e tecnológicas em larga escala”. Estas máquinas tinham uma capacidade de processamento de apenas 100 kflop/s – para se ter uma ideia, o vulgar Intel Pentium III (lançado em 1999) tinha uma capacidade de processamento de 1 Gflop/s (ou seja, 10 mil vezes mais rápido), e um moderno Intel Core i7 consegue cerca de 400 Gflop/s.³

¹ Inspiral, em inglês.

² Este trabalho, publicado em 1964, é anterior ao uso corrente do termo “buraco negro” para descrever estes objectos [2]. O termo original usado no artigo é *wormhole*.

³ flop/s significa o número de operações de vírgula flutuante por segundo, e é a unidade usada para determinar o desempenho de um computador em cálculos científicos.



Fig. 3 - Computador IBM 7090 na NASA, 1961, idêntico ao usado para as primeiras tentativas de evolução numérica das equações de Einstein.

Com o limitado poder computacional da altura, não foi possível extrair grandes resultados destas primeiras simulações. Note-se no entanto que este trabalho foi feito numa altura em que o uso de computadores para a computação científica acabara de começar; é de destacar que a evolução das equações de Einstein tenha estado entre os primeiros problemas a serem considerados.

Este primeiro trabalho foi também feito numa altura em que o problema não estava completamente compreendido. De facto, nesta altura, noções como “buraco negro” e “horizonte de eventos” estavam ainda a ser desenvolvidas. Durante os anos 70, o problema da colisão frontal de dois buracos negros foi outra vez abordado durante os trabalhos de doutoramento de Cadež, Smarr e Eppley, resultados sumariados em [3]. Estes trabalhos seguiram já uma abordagem semelhante à dos tratamentos modernos, usando as chamadas equações de ADM (Arnowitt, Deser e Misner) para evoluir o sistema. O poder computacional da altura era ainda muito limitado - pelo que as evoluções numéricas se limitaram a configurações com muito baixa resolução - mas mesmo assim estes trabalhos conseguiram simular pela primeira vez uma colisão frontal entre dois buracos negros e estabeleceram grande parte do formalismo que seria usado posteriormente.

Durante a década de 80, o progresso foi lento, sendo um dos problemas a dificuldade de acesso a supercomputadores. Com o desenvolvimento de computadores mais rápidos e a democratização de acesso a estes recursos, os anos 90 viram finalmente evoluções fidedignas de colisões frontais de buracos negros [4] (e extração do correspondente sinal) bem como simulações de outros sistemas gravitacionais complexos tais como estrelas de neutrões em alta rotação. Um dos resultados mais importantes durante este período foi o trabalho de Choptuik, em 1992, com a descoberta de fenómenos críticos no colapso gravitacional [5]. Contudo, o grande desafio da época permanecia ainda por alcançar. Colisões frontais de buracos negros nunca acontecem na prática, pelo que era importante simular buracos negros em órbitas circulares e respectiva coalescência. Noutras palavras: faltava resolver o problema dos dois corpos em Relatividade Geral.

3. O problema dos dois corpos

Com efeito, a necessidade de simular estes sistemas tornava-se urgente. Em 1994, iniciara-se a construção do LIGO, o projeto mais ambicioso alguma vez financiado pela NSF (EUA). Pouco depois, em 1996, começava na Europa a construção do equivalente europeu, o Virgo, financiado inicialmente pela CNRS (França) e a INFN (Itália). O objectivo destes observatórios era a deteção de ondas gravitacionais através de interferometria laser.⁴

Estas ondas são uma previsão da Relatividade Geral, e consistem em perturbações no espaço-tempo que se propagam à velocidade da luz e que deformam (muito ligeiramente) objetos à sua passagem - tal como esquematizado na figura 4. Acontece que a amplitude destas ondas é pequeníssima: para um evento violento como uma colisão de buracos negros, um sinal mensurável chega-nos à Terra com uma amplitude de $h = \frac{\Delta L}{L} = 10^{-21}$. Ou seja, para dois objetos separados por 4 km (tal como os espelhos no LIGO), a passagem de uma onda gravitacional faz variar esta distância em cerca de 4×10^{-18} m - um milésimo do tamanho de um protão! Assim, para a deteção destes eventos, é necessário ter modelos precisos para os sinais esperados, para que estes possam ser correlacionados com as medições dos detetores. Estes modelos são também essenciais para se poder extrair a física envolvida, tal como o tipo de sistema que origina o sinal (ie, colisão entre buracos negros, estrelas de neutrões, ou outro tipo de sistemas), e os seus parâmetros físicos.



Fig. 4 - Esquema da deformação de um anel de partículas à passagem de uma onda gravitacional. Imagem: Surinye Olarte.

Assim, dada a urgência e falta de progresso na modelação numérica de um sistema binário de buracos negros, formou-se no início dos anos 90 uma grande sinergia entre vários grupos de investigação em relatividade numérica, sinergia essa que teve o nome de *Binary Black Hole Grand Challenge Alliance*, e cujo objetivo principal era precisamente a simulação da órbita e coalescência de sistemas binários de bura-

⁴ Estes projetos deram frutos muito recentemente com as deteções de ondas gravitacionais provenientes de fusões de buracos negros e estrelas de neutrões, e com o subsequente Prémio Nobel, atribuído em 2017 a Rainer Weiss, Kip Thorne e Barry Barish “pelas decisivas contribuições ao detetor LIGO e observação de ondas gravitacionais”.

cos negros e o cálculo do respetivo sinal emitido sob a forma de ondas gravitacionais.

Apesar dos esforços, este grande projeto acabou em 1995 sem que o seu objetivo principal fosse alcançado e a falta de progresso significativo começava a ser preocupante. Para estimular mais investigação na área, Kip Thorne decidiu então fazer uma das suas famosas apostas, em 1995, onde ele apostou com os membros da Grand Challenge Alliance que o LIGO observaria ondas gravitacionais de colisões de sistemas binários de buracos negros antes de estes sistemas terem sido simulados em computador. Nas suas palavras, “esperava fervorosamente perder [a aposta], já que as simulações seriam cruciais para extrair a informação transportada pelas ondas [gravitacionais]” [6].

O projeto da Grand Challenge Alliance fizera com que várias ferramentas e códigos fossem desenvolvidos por vários grupos para atacar o problema, e a investigação na área continuou. Contudo, entrou-se na década de 2000 sem haver um único código capaz de simular um sistema de dois buracos negros em órbita – as simulações rebentavam antes de os objetos conseguirem completar sequer uma órbita à volta um do outro. Mas qual era, exatamente, o problema? Porque não funcionavam os códigos?

Muitos dos desafios da Relatividade Numérica são comuns a outras áreas da física computacional, tais como a dinâmica de fluidos computacional. Ambas as disciplinas lidam com equações acopladas, não-lineares, às derivadas parciais no tempo e no espaço. Também, em ambas as situações, temos genericamente de lidar com diferentes comprimentos típicos, sendo assim necessárias técnicas computacionais para lidar eficientemente com uma grelha computacional que seja capaz de resolver todas as escalas em jogo – veja-se o exemplo da figura 5.

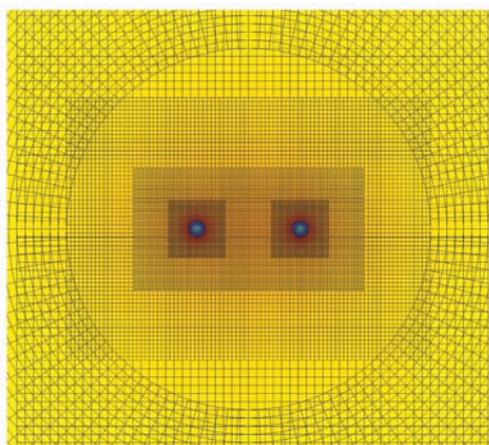


Fig. 5 - Grelha computacional adaptada à evolução numérica de dois buracos negros (a azul).

Para além deste tipo de questões, de índole mais técnica, o problema principal prendia-se com os desafios inerentes às equações de Einstein, que não se encontram tipicamente noutras áreas da física

computacional. Para atacar numericamente as equações de Einstein, há que começar por reescrever as equações, a partir da sua forma tensorial, numa forma adequada para tratamento numérico. Há várias formas de o fazer; uma das mais comuns consiste numa abordagem dita de Cauchy que decompõe as equações de Einstein numa forma “3+1”, onde o espaço-tempo é foliado por um conjunto de superfícies espaciais tal como esquematizado na figura 6. Depois, uma complicação seguinte prende-se logo com a escolha de coordenadas. Em Relatividade, as coordenadas não têm qualquer significado físico, e há imensa liberdade ao escolher um sistema de coordenadas. São as distâncias próprias e tempos próprios que têm significado físico, e para converter entre distâncias coordenadas e distâncias próprias é necessário o tensor métrico. No entanto, são as próprias equações de evolução que determinam o tensor métrico, e é possível que uma má escolha de coordenadas faça com que apareçam singularidades – tanto físicas como coordenadas – no domínio computacional no decurso da evolução. Isto resulta em divisões por zero nalguns termos das equações do movimento, que rapidamente arruinam a evolução.

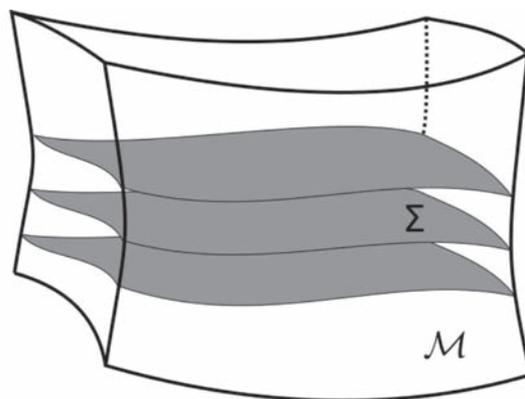


Fig. 6 - Foliação de um espaço-tempo M por uma família de hipersuperfícies espaciais Σ .

4. O ponto de viragem

Após muita labuta e vários becos sem saída, o grande avanço deu-se finalmente em 2005 – 40 anos após as primeiras tentativas e 90 anos depois de Einstein ter proposto as suas equações de campo – com as primeiras simulações estáveis do problema dos dois corpos em relatividade geral, incluindo a fase de em-espiral e coalescência, com o trabalho pioneiro de Frans Pretorius [7].

Evolution of Binary Black-Hole Spacetimes

Frans Pretorius

Phys. Rev. Lett. **95**, 121101 – Published 14 September 2005

An article within the collection: 2015 - General Relativity's Centennial

Fig. 7 - Artigo de Frans Pretorius, com a primeira evolução numérica de um sistema binário de buracos negros.

Curiosamente, este trabalho seguiu uma abordagem bastante ortogonal às demais tentativas por parte da generalidade dos grupos. Seguiram-se pouco tempo depois mais dois trabalhos – por parte dos grupos de NASA Goddard [8] e de Brownsville/Rochester Institute of Technology [9] – que conseguiam também a simulação de um binário de buracos

negros seguindo uma abordagem mais tradicional. Para seu grande alívio, Kip Thorne perdera de facto a sua aposta.

Estes artigos de 2005 desencadearam uma autêntica corrida ao ouro. Tendo ficado claro quais os sistemas de equações e coordenadas que permitiam finalmente evoluções estáveis de buracos negros, literalmente da noite para o dia dezenas de grupos espalhados pelo mundo tinham agora a possibilidade de reproduzir estes resultados e explorar sistemas semelhantes. Havia vários problemas “óbvios” para explorar, pelo que era tudo uma questão de quem lá chegaria mais depressa.

Rapidamente foram assim feitas simulações de sistemas de buracos negros com *spin*, com diferentes tamanhos relativos, colisões com parâmetro de impacto, a velocidades muito elevadas, etc. Através destas simulações, foi possível descobrir fenómenos inesperados, tais como as chamadas configurações de *kick*, onde a coalescência resulta num buraco negro final que é ejetado a uma velocidade de milhares de km/s, algo que pode ter impacto em modelos de evolução de galáxias.

Desde então, o campo da Relatividade Numérica e respetivas ferramentas e códigos computacionais melhoraram significativamente. Têm sido explorados variadíssimos problemas, incluindo sistemas binários de buracos negros com discos de acreção, estrelas de neutrões, e objectos mais exóticos como estrelas de bosões. Temos hoje um catálogo bastante exaustivo de sinais de ondas gravitacionais esperados para diferentes sistemas, catálogo esse que tem sido fundamental para a deteção e interpretação dos eventos observados pelo LIGO/Virgo (fig. 8). Com as últimas atualizações destes instrumentos, a deteção destes sinais tornou-se agora rotineira. Alguns destes eventos (tais como a coalescência de estrelas de neutrões) trazem associado um sinal no espectro eletromagnético, o que permite um estudo muito mais completo da física envolvida. Tudo isto tem feito disparar ainda mais o interesse e relevância da física gravitacional.

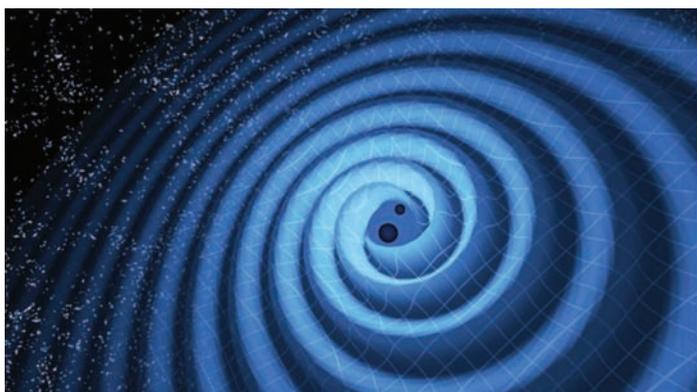


Fig. 8 - Representação pictórica da coalescência de dois buracos negros e correspondente emissão de ondas gravitacionais. Imagem: LIGO/T. Pyle.

5. Presente e futuro

Este entusiasmo serviu também de catalisador para o desenvolvimento do detector LISA, um observatório espacial que terá uma órbita em torno do Sol semelhante à da Terra, e cuja data de lançamento está marcada para 2034. O LISA será sensível a sinais de ondas gravitacionais na banda de baixa frequência e terá como potenciais fontes os sinais provenien-

tes da fusão de buracos negros no centro de galáxias, fusão de buracos negros pequenos com buracos negros supermaciços, bem como outras fontes de origem cosmológica. O LISA servirá então como complemento aos presentes detetores na Terra, tal como acontece com os observatórios astronómicos sensíveis a diferentes frequências eletromagnéticas (ultravioleta e infravermelho), e ajudar-nos-á a caracterizar a distribuição populacional de buracos negros. Adicionalmente, o LISA servirá como “alerta” para determinados eventos, tais como tempos de coalescência e localização de sistemas binários de buracos negros. Para alguns eventos isto providenciará diversas oportunidades para observações subsequentes nos detetores de ondas gravitacionais terrestres e radiotelescópios, tais como a impressionante possibilidade de prever quando um determinado evento será detetado pelo LIGO/Virgo.

A próxima década testemunhará assim uma exploração sem precedentes do regime de campo forte da gravidade. Um dos grandes problemas em aberto prende-se precisamente com os limites da relatividade geral. Em que regime deixará a teoria de ser uma boa descrição da gravidade? Testes à Relatividade Geral requerem controlo muito preciso da dinâmica de espaços-tempos de buracos negros e um entendimento de possíveis efeitos da física para além da Relatividade Geral. A exploração do regime não-linear de teorias alternativas está ainda na infância.

Em paralelo, uma das mais simples formas de estender a relatividade geral consiste em adicionar graus de liberdade bosónicos (por exemplo, um campo vectorial como o de Maxwell ou um campo escalar como o Higgs) tais como os usados muitas vezes para modelar inflação em cosmologia e matéria escura. Estes campos podem condensar à volta de buracos negros (fig. 9), pelo que estudos sobre a interação entre buracos negros e estruturas de campos bosónicos podem fornecer informação importante acerca da influência de buracos negros em estruturas de matéria escura, sobre a interação entre buracos negros e estrelas e sobre a dinâmica e acreção de matéria escura em ambientes com sistemas binários de buracos negros (afetando assim as massas e tempo de coalescência do sistema).

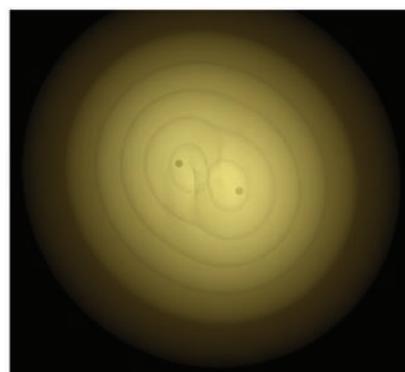


Fig. 9 - Simulação de uma nuvem de campo escalar à volta de um sistema de buracos negros.

É também interessante notar que, para além de sistemas astrofísicos, as técnicas e códigos da relatividade numérica têm sido usadas para estudar um espectro muito abrangente de problemas, tais como: fenómenos críticos, a conjectura da censura cósmica, a estabilidade de objetos compactos, gravidade em dimensões mais altas, e até aplicações à física de partículas e de altas energias.

Vivemos tempos entusiasmantes e desafiantes para fazer investigação em gravidade. As recentes deteções de ondas gravitacionais provenientes da coalescência de buracos negros e estrelas de neutrões inauguraram o campo da astronomia de ondas gravitacionais abrindo assim uma nova janela para o universo. A Relatividade Numérica é uma ferramenta crucial para esta exploração, que nos levou já a descobrir fenómenos novos e surpreendentes, e nos permite ainda estabelecer pontes de contacto com áreas tão diversas como cosmologia, física-matemática, física de partículas e física de altas energias. O futuro é muito promissor e é essencial continuar a apostar nesta área para estarmos preparados para os desafios que nos possam aparecer no cone de luz futuro.



Miguel Zilhão, licenciou-se em Física em 2008 na FCUP e doutorou-se em 2012 através do programa doutoral MAP-fis, nas Universidades do Porto e de Aveiro. Foi investigador pós-doutoral no Rochester Institute of Technology (Rochester, Nova Iorque) e na Universidade de Barcelona. É Investigador FCT desde 2017 no CENTRA, Instituto Superior Técnico. Trabalha em Relatividade Geral e é autor de vários códigos e ferramentas dedicados à resolução numérica das equações de Einstein. Tem mais de 40 artigos publicados em revistas internacionais.

Referências

- [1] S. G. Hahn and R. W. Lindquist, “*The two-body problem in geometrodynamics*,” *Annals of Physics* 29 (1964) 304–331.
- [2] C. A. R. Herdeiro and J. P. S. Lemos, “O buraco negro cinquenta anos depois: A génese do nome,” *Gazeta de Física* 41 (2) (2018), arXiv: 1811.06587 [physics.hist-ph].
- [3] L. Smarr, A. Cadez, B. S. DeWitt, and K. Eppley, “*Collision of Two Black Holes: Theoretical Framework*,” *Phys. Rev. D* 14 (1976) 2443–2452.
- [4] P. Anninos, D. Hobill, E. Seidel, L. Smarr, and W.-M. Suen, “*The Headon collision of two equal mass black holes*,” *Phys. Rev. D* 52 (1995) 2044–2058, arXiv:gr-qc/9408041.
- [5] M. W. Choptuik, “*Universality and scaling in gravitational collapse of a massless scalar field*,” *Phys. Rev. Lett.* 70 (1993) 9–12.
- [6] K. S. Thorne, “*LIGO and Gravitational Waves, III: Nobel Lecture, December 8, 2017*,” *Annalen der Physik* 531 no. 1, (2019) 1800350. <https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.201800350>.
- [7] F. Pretorius, “*Evolution of Binary Black Hole Spacetimes*,” *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 121101, arXiv:gr-qc/0507014.
- [8] J. G. Baker, J. Centrella, D.-I. Choi, M. Koppitz, and J. van Meter, “*Gravitational wave extraction from an inspiraling configuration of merging black holes*,” *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 111102, arXiv:gr-qc/0511103.
- [9] M. Campanelli, C. Lousto, P. Marronetti, and Y. Zlochower, “*Accurate evolutions of orbiting black-hole binaries without excision*,” *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 111101, arXiv:gr-qc/0511048 [gr-qc].

A ubiquidade do buraco negro na física moderna

Jorge V. Rocha^{1,2}

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

² CENTRA, Instituto Superior Técnico - IST, Universidade de Lisboa - UL, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

jorge.miguel.rocha@iscte-iul.pt

Resumo

Este é um artigo escrito para a Gazeta da Física, numa edição comemorativa do prémio Nobel da Física de 2020. Pretende-se expor de uma forma clara, recorrendo apenas a conceitos básicos e intuitivos, a enorme importância que os buracos negros tomam na física teórica moderna. São abordados diversos temas, incluindo a teoria de cordas e a correspondência AdS/CFT, dimensões extra, plasmas de *quarks* e glúões, e supercondutores.

1. Introdução

O mais recente prémio Nobel da física foi atribuído em outubro de 2020 conjuntamente a Roger Penrose, pela descoberta teórica da inevitabilidade da existência de buracos negros, e a Reinhard Genzel e Andrea Ghez, pela sua confirmação observacional na forma de um buraco negro supermassivo no centro da nossa própria galáxia [1].

É importante recordar que este reconhecimento chegou pouco mais de cem anos depois da descoberta da primeira solução não-trivial da Relatividade Geral, a qual corresponde a um buraco negro isolado e estático. Chegou também com mais de 50 anos de atraso em relação aos resultados publicados por Penrose que lhe valeram o prémio Nobel! A própria génese do nome "buraco negro" remonta também a esses anos dourados da Relatividade Geral [2]. Contudo, nas últimas duas décadas buracos negros têm brilhado sob as luzes da ribalta.

Diversos fatores contribuíram para tal fenómeno. Entre eles há que destacar, em primeiro lugar, a tão aguardada deteção de ondas gravitacionais anunciada pelas colaborações LIGO e Virgo em 2015 [3], que trouxe com ela um outro tipo de ondas -as de entusiasmo! -, e que também foi agraciado com um prémio Nobel em 2017. Em segundo lugar, devemos realçar a ainda mais recente obtenção de uma imagem de um buraco negro [4]. Estas duas ocasiões tiveram, muito à imagem da confirmação de um buraco negro supermassivo no centro da Via Láctea, um impacto mediático revelador da sua importância.

Buracos negros são deformações extremas do espaço e do tempo, de tal forma drásticas que causam o aparecimento do que chamamos um horizonte de eventos. Este horizonte delimita uma região do espaço-tempo de onde nada consegue escapar, nem mesmo a luz.

Tendo em conta a definição anterior, é fácil apreciar a relevância astrofísica da existência de buracos negros no cosmos. Outros artigos desta edição debruçam-se sobre este tema. Mais difícil de compreender é a importância dos buracos negros para outros campos da física, como são os casos da física das altas energias ou da matéria condensada. E, no entanto, estes objetos intrigantes desempenham um papel central nos desenvolvimentos teóricos recentes em múltiplas áreas da física moderna. É caso para dizer que a irresistível atração do buraco negro congregou em seu redor muitos ramos aparentemente desconexos da física.

O resto deste artigo pretende dar um sabor das fascinantes ligações entre a ciência dos buracos negros e outras áreas da física. Nomeadamente, serão abordados tópicos como dimensões extra, plasmas de *quarks* e glúões, ou a supercondutividade, e as respetivas relações com buracos negros. Todos estes elementos encontram lugar no contexto da teoria de cordas, embora os elos entre eles estejam longe de ser óbvios. O que tornou possível que nos apercebêssemos de tais conexões? O principal responsável por estes avanços foi um desenvolvimento teórico do final do século XX, igualmente preponderante na recente ascensão dos buracos negros, conhecido pelo nome pomposo de "correspondência AdS/CFT", ou mais simplesmente "holografia", na gíria académica. Este campo do conhecimento científico cresceu até se ter tornado atualmente numa área de estudo independente e reputada. Apesar disso, ela teve a sua

gênese também no âmbito da teoria de cordas, para a qual nos viramos agora.

2. Cordas que gravitam

A teoria de cordas teve origem nos finais dos anos 60. Curiosamente, ela foi inicialmente proposta como potencial candidata para compreender a interação forte, que pontificava por altura como o maior mistério na física de partículas [5]. Entretanto, com o desenrolar dos anos, tornou-se aparente que a cromodinâmica quântica, baseada no formalismo da teoria quântica de campo - e, de resto, semelhante à teoria das interações eletrofracas, já compreendida nessa altura - , conseguia descrever correctamente (e melhor) as interações fortes. Mas a teoria de cordas não foi abandonada, pois revelou ter outras virtudes. . .

A teoria de cordas baseia-se na ideia simples e apelativa de que as partículas elementares e as forças que as medeiam nada mais são do que diferentes modos de vibração de objetos unidimensionais submicroscópicos [5, 6]. No fundo, o mesmo acontece com uma corda de violino, que consegue produzir várias notas consoante a maneira como é permitida vibrar, embora as escalas características sejam totalmente díspares: estes intervenientes da teoria de cordas têm tipicamente tamanhos da ordem do comprimento de Planck, que é a escala à qual os efeitos gravitacionais, quânticos e relativistas contribuem todos em igual medida. Para se ter uma ideia da enormidade da diferença de escalas, à proporção é sensivelmente a mesma que o tamanho de um próton comparado com a Via Láctea!

O que tem então a teoria de cordas para oferecer que a cromodinâmica quântica não tivesse anteriormente resolvido? Para além da capacidade intrínseca de produzir uma multitude de partículas apenas com um constituinte fundamental, existe (pelo menos) uma outra excelente razão para considerar seriamente a teoria de cordas: ela incorpora automaticamente a unificação de todas as forças conhecidas.

Contraponhamos estes atributos com os do modelo padrão da física de partículas, formulado no âmbito das teorias quânticas de campo. O modelo padrão é o culminar de cerca de 100 anos de estudos e oferece-nos um entendimento aprofundado das partículas elementares e das suas interações quânticas através do campo eletromagnético ou das denominadas interações fraca e forte. Mas este formalismo deixa embaraçosamente de fora a única outra força conhecida na natureza: a gravidade.

Tal como os fótons (“partículas de luz”) podem ser entendidos como os mediadores do campo eletromagnético, o campo gravítico também terá as suas partículas mediadoras: os gravitões. Os métodos aplicados para “quantizar” os campos eletromagnético, fraco e forte, falham fundamentalmente quando são aplicados ao campo gravítico. E é aqui que a teoria de cordas reentra em cena. Sucede que os modos de vibração das tais cordas reproduzem não

só as propriedades das partículas já contempladas no modelo padrão, como também incluem uma partícula com as características apropriadas para descrever o gravitão! Adicionalmente, as equações de Einstein - que regem toda a relatividade geral - emergem magicamente da teoria de cordas!

Deste modo, a teoria de cordas alcança a tão desejada unificação das quatro forças fundamentais. Este feito é tão mais incrível por consegui-lo ao juntar, num único formalismo consistente, a interação gravítica com as regras da mecânica quântica. A teoria de cordas é portanto uma teoria de gravitação quântica, algo que o próprio Albert Einstein procurou durante décadas, infelizmente e incharacteristicamente, sem sucesso.

3. Buracos negros em teoria de cordas

Se a gravitação é parte integrante da teoria de cordas, não é de admirar que buracos negros possam também existir no seu seio.

Buracos negros de proporções astrofísicas são formados quando algum corpo massivo é compactado - por ação da gravidade, e até contrariando outras forças - numa região suficientemente reduzida. Imaginemos que tomamos uma bola e a começamos a comprimir igualmente em todas as direções. O valor crítico para o raio da bola que determina o aparecimento de um horizonte é diretamente proporcional à massa dessa mesma esfera. Para uma bola com a massa do Sol, esse valor crítico é cerca de 3 km, conhecido como o raio de Schwarzschild. Ou seja, se o Sol fosse reduzido a pouco menos que o tamanho do cometa Halley, tornar-se-ia um buraco negro.

Então o que acontece com cordas? A massa de uma corda cresce (linearmente) com o seu comprimento, de forma que cada modo de vibração adicional incrementa a massa associada. Um simples cálculo baseado em “passeios aleatórios” mostra que uma corda suficientemente excitada terá tipicamente um tamanho menor que o seu próprio raio de Schwarzschild. Uma tal configuração deve naturalmente dar origem a um buraco negro!¹ Esta é a ideia chave que ficou patente no princípio de correspondência entre buracos negros e cordas, em meados dos anos ‘90 [7, 8].

Formalmente, um buraco negro em teoria de cordas pode ser considerado como uma solução das equações que governam os diversos campos envolvidos, sendo dotada de um horizonte de eventos. Devemos realçar aqui a palavra “diversos”, pois além do campo gravítico a teoria de cordas contempla vários outros campos que frequentemente comunicam entre si. Como consequência, um buraco negro não é independentemente determinado pelo campo gravítico que lhe corresponde, podendo ter também múltiplas cargas associadas. Um exemplo simples ilustra bem esta afirmação: um buraco negro estático e eletricamente carregado é mais compacto do que um buraco negro neutro com a mesma massa.

O parágrafo anterior sugere que as soluções de buracos negros em teoria de cordas são muito variadas. Há, no entanto, uma particularidade estrutural básica que eleva esta multiplicidade a um outro nível: a teoria requer um espaço-tempo

¹ Este argumento ignora as interações entre cordas. No entanto, tal efeito tende a condensar a estrutura ainda mais e portanto não invalida o raciocínio.

com 10 dimensões para ser consistente! Isto permite uma variedade ainda maior de buracos negros em teoria de cordas, como veremos na secção seguinte. Por agora limitamos a antecipar um traço comum nos buracos negros em teoria de cordas: eles podem ter extensões infinitas em algumas direções [9]. Em tais casos, são denominados *branas* negras².

3.1. Uma maldição transforma-se numa bênção

As dimensões extra exigidas pela teoria de cordas aparentam ser, à primeira vista, inconvenientes. Para fazer contacto com a realidade, todas as dimensões adicionais têm de estar de alguma forma escondidas da nossa percepção. As maneiras de o conseguir podem ser divididas em duas grandes categorias: modelos de compactificação ou modelos de mundos-brana. Cada um destes métodos poderia ter um artigo inteiro dedicado e não nos iremos debruçar sobre nenhum deles em detalhe. No entanto, vale a pena referir as ideias-chave nas quais se baseiam.

Em modelos de compactificação, as dimensões extra encontram-se enroladas sobre si mesmas em espaços com tamanhos submicroscópicos. Uma analogia esclarecedora pode ser feita com uma formiga percorrendo a superfície de uma mangueira: o inseto pode escolher deslocar-se numa infinidade de direções, incluindo ao longo do tubo ou transversalmente (no qual caso não atingirá grande progresso); mas se observarmos a mangueira de longe, perdemos a noção da sua espessura e ela aparenta ser um objeto unidimensional que apenas pode ser percorrido numa direção (fig. 1). A existência de variadíssimas formas viáveis de compactificar o espaço constitui um facto relevante destes métodos.



Fig. 1 - Um mesmo tubo com a sua superfície bidimensional (esquerda) parece ser uma corda sem espessura quando visto de uma distância suficientemente grande (direita).

A ideia explorada nos modelos de mundo-brana é totalmente diferente. Aí não existem tantas restrições quanto ao tamanho das dimensões extra, mas a nossa realidade física encontra-se limitada a apenas três das dimensões espaciais disponíveis. A possibilidade da dinâmica do nosso mundo-brana estar relacionada com a evolução cosmológica do universo constitui um dos aspetos mais atrativos destes modelos.

Em todo o caso, dimensões extra têm uma virtude importante: propiciam muitas mais opções no espaço de configurações.

3.2. Mais dimensões permitem mais buracos negros

Apesar de fascinantes, buracos negros em Relatividade Geral, com as suas 4 dimensões, são em certa medida os objetos mais simples do Universo. Na ausência de matéria substancial nas suas vicinidades ou de perturbações causadas, por exemplo, por outros buracos negros próximos - como foi o caso das primeiras descobertas da colaboração LIGO-Virgo - eles são completamente caracterizados por 2 números apenas: a

sua massa e o seu momento angular. Esta afirmação é suportada por certos teoremas de unicidade [10] e portanto uma conclusão inescapável. . . A não ser que se alterem as hipóteses.

Uma dessas hipóteses é a de que o número de dimensões do espaço-tempo é igual a quatro. Mas como acabámos de ver, a teoria de cordas requer dimensões extra e isso oferece mais possibilidades, incluindo a já mencionada existência de variadas soluções de branas negras. Contudo, se procurarmos (teoricamente) buracos negros localizados no espaço, o que encontramos?

Curiosamente, os teoremas de unicidade não são aplicáveis em mais do que quatro dimensões. Isso mesmo ficou demonstrado quando, em 2001, foi apresentada a primeira solução da teoria da gravitação de Einstein em cinco dimensões correspondendo a um anel negro [11]. Desde então várias outras soluções - representadas na figura 2 - foram descobertas em 5D ou dimensões mais altas.



Fig. 2 - Alguns buracos negros conhecidos em 5 dimensões, ilustrando topologias distintas do horizonte de eventos. Uma das quatro dimensões espaciais foi suprimida para efeitos de ilustração.

3.3. Buracos negros também podem ser quentes?

Um aspeto importante dos buracos negros é que lhes podemos atribuir uma temperatura. Esta afirmação é surpreendente, tendo em conta que para um objeto ter temperatura tem de poder radiar energia e, pela própria definição clássica de um buraco negro, nada - nem sequer luz - pode escapar de um buraco negro.

A aparente contradição do parágrafo anterior apenas pode ser esclarecida à luz da gravitação quântica. Porventura a maneira mais intuitiva de compreender este fenómeno é recordar que flutuações quânticas originam o aparecimento aleatório e temporário de pares de partículas e antipartículas. Quando isso sucede perto de um buraco negro, acontecerá ocasionalmente que uma das partículas caia através do horizonte de eventos enquanto que a outra escapa para longe (ver figura 3). De modo a conservar a energia total do sistema, a partícula absorvida pelo buraco negro tem de levar consigo energia negativa. Efetivamente, o resultado é que o buraco negro emite radiação e, nesse processo, reduz a sua massa.

Esta explicação heurística para a emissividade quântica de buracos negros é firmemente suportada por um cálculo semiclássico rigoroso efetuado por Stephen Hawking em 1975 [12]. Essa análise revelou também que a radiação emitida por um buraco negro - a radiação de Hawking - tem o espectro característico da radiação do corpo negro, com uma

² O termo "brana" advém da palavra "membrana."

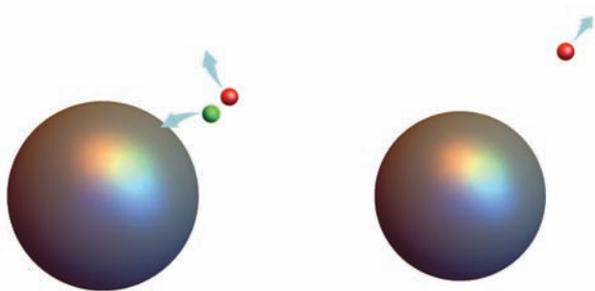


Fig. 3 - Ilustração heurística do efeito de Hawking. Um par partícula-anti-partícula é criado nas imediações de um buraco negro devido a flutuações quânticas. Uma das partículas (acompanhada de energia negativa) cai através do horizonte e reduz a massa do buraco negro, enquanto a outra escapa para o infinito.

temperatura bem determinada. A temperatura está relacionada com a massa do buraco negro, e habitualmente essa relação é de proporcionalidade inversa³.

Historicamente o caminho que levou a esta descoberta foi um pouco mais longo. Na primeira metade dos anos '70 tornou-se evidente que existem semelhanças sugestivas entre as leis que governam propriedades dos buracos negros e as leis da termodinâmica [13]. Essa analogia pode ser promovida a uma concordância quantitativa se atribuirmos precisamente a temperatura de Hawking aos buracos negros, e uma entropia correspondente, a qual foi identificada por Jacob Bekenstein [14]. Essa entropia é proporcional à área do horizonte de eventos. Esta é outra particularidade dos buracos negros (na verdade, de sistemas gravitacionais): normalmente, a entropia cresce com o volume do objeto, ao invés da área da sua superfície.

A atribuição de uma entropia aos buracos negros levanta uma questão óbvia. Em Mecânica Estatística a entropia surge como uma medida da incerteza sobre um estado macroscópico simplesmente porque existem várias configurações de microestados que o podem descrever efetivamente. Quais são então os microestados de um buraco negro, para que ele possa ter uma entropia? A Relatividade Geral não oferece nenhum indício para esta questão. Mas uma resposta pode ser encontrada no âmbito da teoria de cordas. Com efeito, vimos na secção 3 que neste contexto um buraco negro pode ser descrito por (uma coleção de) cordas altamente excitadas. Não o mencionámos anteriormente, mas existem outros objetos em teoria de cordas que são cruciais para a composição das branas negras [15]. Referimo-nos às coloquialmente conhecidas *D-branas* que, entre outras particularidades, são entidades onde as extremidades das cordas fundamentais podem terminar. Manifestamente, a possibilidade de um buraco negro ser interpretado como diversas configurações

de *D-branas* e de cordas interligando-as tem mais graus de liberdade do que uma simples geometria do espaço-tempo, que é a única descrição viável em Relatividade Geral. A correta identificação da entropia de buracos negros através da contagem dos microestados que os compõem⁴ permanece até hoje como um dos maiores sucessos da teoria de cordas [16].

4. A ascensão da holografia

Não é possível falar sobre os êxitos da teoria de cordas sem referir o seu mais importante subproduto, e que constitui certamente um dos seus pináculos: a correspondência AdS/CFT.⁵

A correspondência AdS/CFT é um desenvolvimento notável que teve a sua origem no domínio da teoria de cordas no final dos anos '90 pela mão de Juan Maldacena [18], um físico Argentino que se tinha acabado de doutorar pela Universidade de Princeton, Estados Unidos. Esta surpreendente correspondência postula que duas teorias aparentemente sem qualquer relação são na verdade totalmente equivalentes! Dizemos então que as teorias são duais. Um desses protagonistas é uma teoria de gravitação quântica - que pode até ser reduzida a uma teoria clássica de gravitação num certo limite - que atua num palco muito especial: o espaço anti-de Sitter ou AdS, sobre o qual falaremos mais abaixo. O outro interveniente é uma teoria quântica de campo (semelhante à cromodinâmica quântica) na qual a gravitação está ausente (nem sequer foi convidada para a festa!). Nos estudos originais, esta teoria vinha dotada de um alto grau de simetria. Em linguagem técnica, seria uma teoria de campo conforme, de onde provém a sigla inglesa CFT. Mas sabemos, hoje em dia, que existem maneiras de quebrar essa simetria conforme de modo a obter teorias quânticas de campo melhor adaptadas à Natureza.

A incrível dualidade proposta por Maldacena tinha inicialmente um carácter algo abstrato. Mas, numa questão de poucos meses, a correspondência foi formulada de forma precisa [19, 20], o que a ergueu ao estatuto de ferramenta teórica extremamente útil, com enorme poder computacional. Apesar disso, a correspondência AdS/CFT permanece uma conjectura: uma prova rigorosa da sua validade tem-se revelado uma tarefa difícil de completar, mas importa referir que as evidências a seu favor são esmagadoras, tanto em qualidade como em quantidade.

Não é a intenção deste artigo explicar as razões que nos levam a acreditar firmemente nesta dualidade. Em contrapartida, queremos realçar as suas principais características e virtudes.

Começemos por tentar elucidar a questão mais urgente: "Como é possível que duas teorias tão diferentes possam ser equivalentes"? Um dos aspetos mais relevantes de AdS/CFT que contribui para, ao menos, não rejeitar liminarmente uma tal proposta é que as teorias relacionadas não estão formuladas no mesmo espaço físico; nem sequer vivem em espaços com o mesmo número de dimensões! A teoria gravitacional

³ Mais adiante falaremos de buracos negros nouro tipo de espaços onde esta relação é modificada.

⁴ A reprodução da entropia de buracos negros através da contagem de microestados apenas foi possível para certas classes de buracos negros, com características especiais que permitem efetuar tal cálculo.

⁵ Várias referências para a correspondência AdS/CFT existem na literatura. O artigo de revisão [17] oferece uma exposição concisa, muito clara e pouco técnica.

possui mais dimensões, e uma delas está associada à escala energética da teoria dual. A simetria conforme da teoria quântica de campo traduz-se na imposição de que a geometria ambiente para a teoria gravitacional seja também altamente simétrica, mas com uma particularidade: a curvatura é negativa (e igual em todos os pontos do espaço-tempo).

A característica que acabámos de mencionar define o espaço AdS.⁶ Essa geometria tem uma característica bizarra: apesar de ser ilimitado, raios de luz propagam-se até ao infinito e retornam ao ponto original em tempo finito! Para todos os efeitos, AdS comporta-se portanto como uma caixa finita. Num certo sentido, a CFT pode ser vista como vivendo na fronteira de AdS. Assumindo que as duas teorias são de facto equivalentes, então todo o processo que tem lugar no espaço-tempo gravitacional terá uma descrição dual num espaço com menos uma dimensão. Trata-se por isso de uma dualidade holográfica, a qual concretizou de forma explícita o princípio holográfico proposto por Gerard 't Hooft poucos anos antes [21]. A holografia, que tinha sido descoberta experimentalmente mais de 50 anos antes, passou assim a estar no centro das atenções de muitos físicos teóricos.

Conforme aludimos acima, a conjectura AdS/CFT preconiza a existência de um dicionário relacionando conceitos e quantidades dos dois lados da equivalência. Uma boa parte dos esforços desenvolvidos nesta área tem sido dedicada precisamente à compilação de tal dicionário. Um dos principais itens nesse mapa diz respeito às constantes de acoplamento, que geralmente determinam a pujança das interações entre os elementos fundamentais de cada teoria. Sucede que na correspondência AdS/CFT as constantes de acoplamento são inversamente proporcionais. Isto significa que quando um dos lados está fortemente acoplado, a teoria dual está fracamente acoplada, e vice-versa. Dizemos por isso que se trata de uma correspondência forte-fraca. Esta característica é porventura o maior obstáculo à obtenção de uma prova matemática da equivalência. Porém, é também a sua maior virtude: se num dos lados da dualidade temos um problema de difícil resolução por envolver acoplamento forte, podemos transformá-lo numa questão em contexto fracamente acoplado, onde podem ser utilizados métodos perturbativos simples para obter uma resposta.

4.1. Buracos negros e plasmas de quarks e glúons

No vasto cenário conceptual da correspondência AdS/CFT, os buracos negros desempenham um papel central, encaixando naturalmente no lado gravitacional da dualidade. Decididamente podemos considerar buracos negros em AdS e sabemos como fazê-lo. Qual será então a representação holográfica de um buraco negro?

Para dar resposta a esta questão é útil recordar uma das lições da secção 3.3: os buracos negros têm uma temperatura associada. Para os buracos negros de AdS relevantes, essa temperatura cresce com a sua massa. Tipicamente - mas nem sempre - não existe a possibilidade de considerar buracos negros na teoria quântica de campo dual. No

entanto, ela dispõe de outros estados que também possuem uma temperatura bem definida: gases formados pelas partículas constituintes da teoria, em equilíbrio térmico. A relação pode agora ser elucidada. Um buraco negro em AdS com dada temperatura de Hawking é o dual holográfico de um tal gás precisamente à mesma temperatura. Concluímos deste modo que ao introduzir um buraco negro no espaço AdS, estamos efetivamente a aquecer a teoria dual, e quanto maior for o buraco negro em AdS, mais quente será o estado correspondente (ver figura 4).

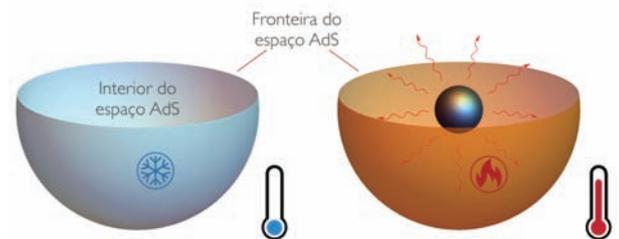


Fig. 4 - Representação do espaço AdS como uma caixa finita (e altamente simétrica). A teoria de campo dual pode ser considerada, em certo sentido, como vivendo na parede dessa caixa. Na ausência de qualquer matéria e de buracos negros, o dual holográfico que lhe corresponde é um estado frio (esquerda). Inserir um buraco negro no interior de AdS eleva a temperatura do estado térmico que lhe está associado (direita).

Uma das confirmações mais impressionantes da validade da correspondência AdS/CFT prende-se com a identificação de transições de fase nas teorias duais. Em verdade, um buraco negro em AdS não está em equilíbrio isoladamente, dado que emite radiação de Hawking (e nesse processo diminui). O que sucede é que o sistema evolui até que o buraco negro e o gás de partículas circundantes se encontrem à mesma temperatura. Ingenuamente, seria de esperar que pudéssemos obter uma tal configuração com qualquer temperatura. Contudo, não é esse o caso. Abaixo de uma certa temperatura (relacionada com a curvatura de AdS), o estado termodinamicamente favorável não tem qualquer buraco negro, apenas um gás de partículas a essa temperatura. Esta transição de Hawking-Page, como ficou conhecida, é mais uma das surpresas que o espaço AdS nos reserva, algo que já tinha sido descoberto em meados dos anos '80 [22].

Como é que esta transição de fase é reproduzida na teoria quântica de campo dual? Aí a única coisa que temos ao nosso dispor são os constituintes fundamentais da teoria. Se pensarmos numa teoria como a cromodinâmica quântica, as partículas elementares são identificadas como quarks e glúons. Contudo, esses graus de liberdade apenas são aparentes a altas temperaturas, dando origem a um plasma de quarks e glúons. A baixas temperaturas, as partículas elementares encontram-se confinadas, sem nunca ocorrerem isoladamente. As diferentes combinações possíveis dão então origem a compostos a que chamamos hádrons, como são os casos dos prótons e neutrões. Portanto, também neste contexto temos

⁶ Uma sela fornece um exemplo de um objeto com curvatura negativa e aproximadamente constante. Isso deve ser contrastado com uma superfície esférica, que também possui curvatura constante, mas positiva.

uma transição de fase à qual se dá o nome de transição confinamento-desconfinamento.⁷ Que uma tal transição de fase de facto ocorre no dual holográfico de AdS, e de maneira a que as entropias calculadas nos dois lados da correspondência sejam concordantes, foi revelado por Edward Witten num dos artigos seminais de AdS/CFT [23].

Existe um argumento intuitivo que permite interpretar graficamente esta identificação entre a transição de Hawking-Page e a transição confinamento-desconfinamento. Ele é baseado na descrição holográfica da interação entre pares de quarks e anti-quarks - formando os chamados mesões -, os quais podem ser vistos como as extremidades de cordas que estão "penduradas" na fronteira de AdS. O facto de as cordas terem uma tensão intrínseca é o que explica que os quarks sejam mutuamente atraídos, e a força restitutiva será tanto maior quanto maior for a distância entre os quarks. Esta é a descrição apropriada quando o sistema se encontra a baixa temperatura. De acordo com o que vimos antes, isto acontece quando não existe um buraco negro no interior de AdS, correspondendo ao painel esquerdo da figura 5.⁸ Quando elevamos a temperatura ao considerar AdS com um buraco negro, como ilustrado no painel direito da figura 5, a corda que une um par de quarks cai através do horizonte de eventos se ela se tornar demasiado longa. O resultado é que a corda se parte e os quarks passam a estar livres.

Para de alguma forma descrever supercondutores, temos que lidar com campos elétricos. Que modificações sofre a figura 5 quando consideramos buracos negros em AdS que possuem também carga elétrica? Com este propósito em mente, apenas tem interesse estudar buracos negros carregados se houver algum outro campo (ou a sua descrição quântica através de partículas) que possa interagir com ele através do campo elétrico. Neste contexto, esse elemento adicional é fornecido por um campo escalar eletricamente carregado.

A discussão detalhada de supercondutores holográficos é uma matéria algo técnica, mas a ideia chave pode ser compreendida com recurso mínimo a conhecimentos avançados [25]. O campo elétrico do buraco negro pode originar pares de partículas com cargas opostas através do conhecido efeito de Schwinger. Este fenómeno quântico é tanto mais frequente quanto mais forte for o campo elétrico, e portanto tem preponderância perto do horizonte. Mas esta ocorrência é também mais relevante quando a temperatura do buraco negro é mais baixa. A razão por trás deste facto prende-se igualmente com a intensidade do campo elétrico: buracos negros mais frios são mais pequenos, e nesse caso o horizonte fica mais próximo da origem do campo elétrico. Em qualquer caso, como as partículas de Schwinger têm cargas opostas, uma será atraída pelo buraco negro à medida que a outra será repelida. Uma vez que AdS se comporta como uma caixa finita, a partícula repelida não se consegue afastar indefinidamente. Em vez disso, evolve até encontrar uma posição estável. A repe-

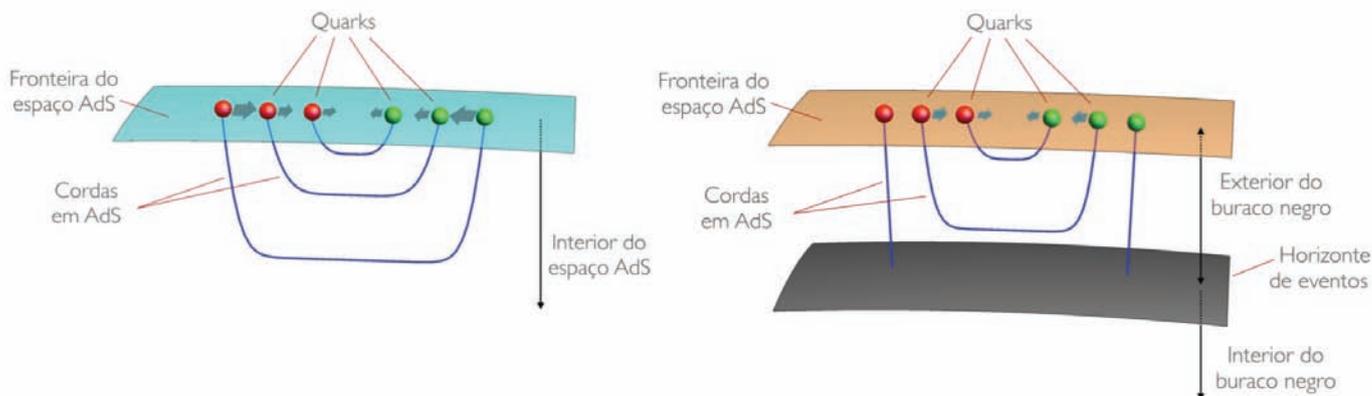


Fig. 5 - A transição confinamento-desconfinamento do ponto de vista holográfico, tendo em conta a interação quark-anti-quark. Os quarks, restritos à fronteira da AdS, são unidos por cordas que mergulham no interior do espaço dual. Se não houver nenhum horizonte, a força restitutiva que atrai o par de quarks cresce à medida que as partículas se afastam e a corda é esticada. Esta fase (baixa temperatura) está ilustrada no painel da esquerda. Numa fase de alta temperatura, correspondendo à presença de um buraco negro em AdS, as cordas podem partir-se como mostra o painel da direita, e consequentemente os quarks deixam de estar confinados.

4.2. Buracos negros e supercondutividade

Uma outra aplicação de AdS/CFT onde buracos negros desempenham um papel fulcral surge no âmbito dos chamados supercondutores holográficos. Também aí tem lugar uma transição de fase importante, que pode ser encarada de um modo muito semelhante ao que descrevemos na secção 4.1.

tição deste processo causa a acumulação no exterior do buraco negro de uma nuvem do campo escalar associado às partículas carregadas (ver painel esquerdo da figura 6).

A condensação de uma nuvem escalar em torno do buraco negro ocorre apenas quando ele é suficientemente frio. A temperaturas mais altas, o horizonte de eventos abrange uma área maior e o cenário muda. Por um lado, a intensidade

⁷ Curiosamente, no momento em que este texto está a ser escrito, a humanidade encontra-se desejosa de atravessar também uma transição confinamento-desconfinamento, mas neste caso relativa à pandemia causada pela covid-19.

⁸ Em verdade, por questões técnicas, o espaço que temos de considerar não é simplesmente AdS vazio, mas uma sua modificação. O dado relevante é que esse espaço tem exactamente o mesmo comportamento assintótico que AdS com um buraco negro, mas sem a presença de qualquer horizonte de eventos [24].

do campo elétrico à superfície do buraco negro reduz-se. Por outro lado, sobra menos espaço no exterior do buraco negro e o campo escalar com o seu comprimento de onda característico (de Compton) já não cabe aí, contrariamente ao que acontecia a baixas temperaturas (ver painel direito da figura 6).

A nuvem escalar carregada que se forma a baixas temperaturas é a representação holográfica do condensado de pares de eletrões com “spins” opostos, que são responsáveis pelo fenómeno de supercondutividade - os chamados pares de Cooper. A sua presença indicia que a condutividade numa tal fase é amplificada e este augúrio é suportado por cálculos baseados na teoria gravitacional dual. No contexto de AdS/CFT, tanto o valor expectável do condensado como a condutividade podem ser obtidos explicitamente em função da temperatura do sistema. O resultado é que, abaixo de uma certa temperatura crítica, o condensado toma um valor não-nulo, e com um comportamento qualitativo semelhante ao observado experimentalmente em supercondutores reais. Isto vem acompanhado por uma condutividade formalmente infinita. Acima da temperatura crítica, o condensado desaparece e o sistema holográfico exhibe a habitual resistência elétrica.

Não é de estranhar que os buracos negros ocupem um lugar central na física teórica. Sendo objetos onde fenómenos profundamente quânticos podem competir com efeitos gravitacionais puramente clássicos, eles constituem o laboratório teórico ideal para desvendar os mistérios da gravidade quântica - a quimera da física atual.

Por outro lado, a influência de buracos negros em áreas tão remotas como a física de plasmas ou da matéria condensada é, no mínimo, surpreendente. Muitos outros tópicos ficaram fora deste breve artigo, pelo que a sua contribuição para alargar os horizontes do conhecimento científico certamente não termina aqui.

Mas quem poderia adivinhar que precisamente buracos negros - de onde nem a luz pode escapar - iluminariam este empreendimento da civilização humana?

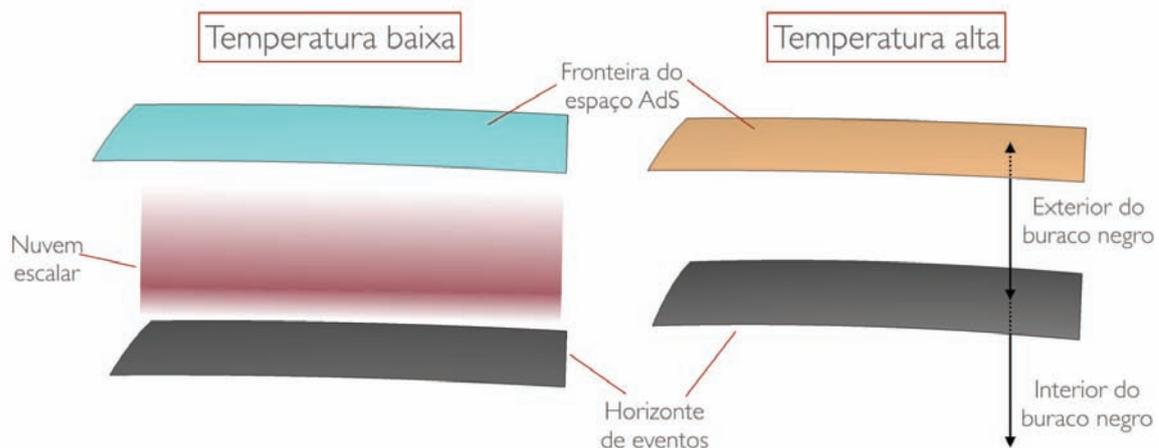


Fig. 6 - Descrição holográfica da transição de fase ocorrendo em supercondutores. A baixas temperaturas (esquerda) o horizonte de eventos de um buraco negro eletricamente carregado fica mais afastado da fronteira de AdS. Isto permite que se forme uma nuvem de campo escalar carregado, que é a representação dual do condensado responsável pela supercondutividade. A temperaturas altas (direita) o espaço entre o horizonte e a fronteira de AdS encurta-se, não conseguindo suportar uma nuvem escalar. Sem a presença de um condensado, a condutividade diminui drasticamente.

Por enquanto, modelos holográficos como o que foi descrito acima reproduzem o comportamento de supercondutores do mundo real de uma forma essencialmente qualitativa. No entanto, a capacidade de explicar transições de fase supercondutoras usando a física de buracos negros é notável. Tanto mais que outros métodos mais convencionais não são aplicáveis quando se trata de supercondutores com temperaturas críticas elevadas. Tais materiais encontram-se tipicamente num regime fortemente acoplado e, como vimos no final da secção 4, AdS/CFT é uma ferramenta especialmente adaptada a esse panorama.

5. Em busca dos amplos horizontes

A ubiquidade dos buracos negros na física moderna é inquestionável. Para tal, contribuiu em grande medida o advento da correspondência AdS/CFT, como tentámos demonstrar.

Referências

- [1] The Nobel Prize in Physics 2020. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021. Wed. 7 Jul 2021. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary/>>
- [2] C. A. R. Herdeiro and J. P. S. Lemos, “O buraco negro cinquenta anos depois: A gênese do nome,” *Gazeta de Física* 41(2), 2 (2018).
- [3] B. P. Abbott et al. [LIGO Scientific and Virgo], “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger,” *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) no.6, 061102.
- [4] K. Akiyama et al. [Event Horizon Telescope], “First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole,” *Astrophys. J. Lett.* 875 (2019), L1
- [5] M. B. Green, J. H. Schwarz and E. Witten, “*Superstring Theory*,” Cambridge University Press, 1987.
- [6] B. Zwiebach, “*A first course in string theory*,” Cambridge, UK: Univ. Pr. (2004).
- [7] L. Susskind, “*Some speculations about black hole entropy in string theory*,” [arXiv:hep-th/9309145].
- [8] G. T. Horowitz and J. Polchinski, “A Correspondence principle for black holes and strings,” *Phys. Rev. D* 55 (1997), 6189-61.
- [9] G. T. Horowitz and A. Strominger, “*Black strings and P-branes*,” *Nucl. Phys. B* 360 (1991), 197-209.
- [10] P. T. Chruściel, J. Lopes Costa and M. Heusler “*Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond*,” *Living Rev. Rel.* 15 (2012), 7
- [11] R. Emparan and H. S. Reall, “*A rotating black ring in five dimensions*,” *Phys. Rev. Lett.* 88, 101101 (2002).
- [12] S. W. Hawking, “*Particle Creation by Black Holes*,” *Commun. Math. Phys.* 43 (1975), 199-220 [erratum: *Commun. Math. Phys.* 46 (1976), 206].
- [13] J. M. Bardeen, B. Carter and S. W. Hawking, “*The Four laws of black hole mechanics*,” *Commun. Math. Phys.* 31 (1973), 161-170.
- [14] J. D. Bekenstein, “*Black holes and entropy*,” *Phys. Rev. D* 7 (1973), 2333-2346.
- [15] J. Polchinski, “*Dirichlet Branes and Ramond-Ramond charges*,” *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995), 4724-4727.
- [16] A. Strominger and C. Vafa, “*Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy*,” *Phys. Lett. B* 379 (1996), 99-104.
- [17] G. T. Horowitz and J. Polchinski, “*Gauge/gravity duality*,” [arXiv:gr-qc/0602037 [gr-qc]].
- [18] J. M. Maldacena, “*The Large N limit of super conformal field theories and supergravity*,” *Adv.Theor. Math. Phys.* 2 (1998), 231-252
- [19] E. Witten, “*Anti-de Sitter space and holography*,” *Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (1998), 253-291
- [20] S. S. Gubser, I. R. Klebanov and A. M. Polyakov, “*Gauge theory correlators from noncritical string theory*,” *Phys. Lett. B* 428 (1998), 105-114
- [21] G. 't Hooft, “*Dimensional reduction in quantum gravity*,” *Conf. Proc. C* 930308 (1993), 284-296
- [22] S. W. Hawking and D. N. Page, “*Thermodynamics of Black Holes in anti-De Sitter Space*,” *Commun. Math. Phys.* 87 (1983), 577
- [23] E. Witten, “*Anti-de Sitter space, thermal phase transition, and confinement in gauge theories*,” *Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (1998), 505-532
- [24] D. Mateos, “*String Theory and Quantum Chromodynamics*,” *Class. Quant. Grav.* 24 (2007), S713-S740
- [25] G. T. Horowitz, “*Introduction to Holographic Superconductors*,” *Lect. Notes Phys.* 828 (2011), 313-347



Jorge V. Rocha é investigador no Centro de Astrofísica e Gravitação (CENTRA-IST) e Professor Auxiliar no Departamento de Matemática do ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa. Licenciado em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico e doutorado em Física pela University of California Santa Barbara (2008), foi-lhe atribuído em 2015 uma bolsa individual Marie Skłodowska-Curie para desenvolver investigação no Departamento de Física da Universitat de Barcelona, onde se manteve até 2019. Em 2016 foi o recipiente do primeiro Prémio Alberto, outorgado pela Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação. É autor de mais de 30 artigos científicos em revistas internacionais de elevado impacto, participando também regularmente em atividades de divulgação científica. Os seus atuais interesses científicos centram-se na área da gravitação e buracos negros, possuindo ainda experiência em campos relacionados, nomeadamente em teoria de cordas e cosmologia teórica.

Em busca dos primeiros buracos negros supermassivos do Universo

José Afonso¹

¹ Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço e Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

jafonso@iaastro.pt

Resumo

A existência de galáxias no primeiro milhar de milhões de anos do Universo, na chamada Época de Reionização, encontra-se hoje estabelecida. Se uma parte destes sistemas aparenta brilhar devido a radiação produzida por estrelas, alguns, de propriedades extremas, quasares, brilham devido à queda violenta de matéria para um buraco negro supermassivo. Atingindo massas de 10^9 massas solares (M_{\odot}), a formação de tais objetos em apenas algumas centenas de milhões de anos, é de difícil compreensão, mesmo com os modelos teóricos mais avançados. Nos últimos anos, tornou-se premente a identificação e caracterização destes quasares na Época de Reionização do Universo, algo que parece essencial para compreender a formação de galáxias e de estruturas, a reionização do hidrogénio neutro durante os primeiros 800 milhões de anos, e a formação dos primeiros buracos negros no Universo. Neste artigo, discutirei o desafio da procura destes primeiros buracos negros supermassivos do Universo, as estratégias que nos estão a revelar, lenta mas inevitavelmente, os quasares mais distantes, e como procuramos hoje planificar a exploração do primeiro milhar de milhões de anos do Universo com a próxima geração de telescópios.

Introdução

Pensamos que, após o Big Bang e a nucleossíntese primordial que teve lugar nos primeiros 20 minutos, o Universo era constituído por prótons e neutrões, isolados ou ligados em núcleos de hidrogénio e hélio (e algum lítio), eletrões e radiação. Durante os primeiros milhares de anos, a temperatura era demasiado elevada para permitir a ligação dos eletrões aos núcleos, não sendo possível a propagação da radiação – permanentemente absorvida e reemitida pelos eletrões livres. Apenas após 380 000 anos o Universo terá expandido e arrefecido o suficiente para a formação dos primeiros átomos, permitindo finalmente a propagação da luz. Esta luz é detetada ainda hoje – a chamada radiação cósmica de fundo em micro-ondas – e o seu estudo ajuda a compreender as propriedades físicas do Universo 380 000 anos após o Big Bang.

É, contudo, preciso esperar 300 ou 400 milhões de anos para assistirmos à primeira grande produção de radiação no Universo. É no final desta longa “Idade das Trevas” primordial que apa-

recem as primeiras galáxias e estrelas que, de formas ainda não totalmente compreendidas, originam radiação suficientemente energética para reionizar os átomos formados anteriormente. Dá-se aí início à Época de Reionização, uma das mais emocionantes fronteiras do conhecimento astrofísico atual.

A primeira geração de estrelas é, naturalmente, o principal suspeito para esta nova transição de fase do Universo. Surpreendentemente, um outro suspeito existe, um suspeito que é, em muitos sentidos, a “antítese” das estrelas – buracos negros supermassivos. Tendo de alguma forma crescido espetacularmente ao longo das primeiras centenas de milhões de anos do Universo, sabemos hoje que a radiação produzida pela queda violenta de gás para estes “monstros” contribui não só para a Época de Reionização, mas pode ser a chave para a compreensão da formação das galáxias e estruturas no Universo.

Quando, e como, se deu a formação das primeiras galáxias? Quando, e como, se formaram as primeiras estrelas e buracos negros supermassivos, e de que forma a radiação que eles originaram conseguiu reionizar rapidamente todo o Universo? Como se deu a evolução do gás neutro ao longo dessas breves centenas de milhões de anos iniciais? Estamos hoje muito próximos de conseguir, pela primeira vez, responder a estas perguntas: não só temos ao nosso alcance telescópios e instrumentos cada vez mais sensíveis, que começam a descortinar a Época de Reionização, como possuímos modelos teóricos cada vez mais precisos e robustos que nos ajudam a desenvolver estratégias eficientes para o estudo do Universo primitivo.

O fim da Idade das Trevas do Universo

Ao longo dos últimos anos, temos assistido a um sucesso crescente na deteção de galáxias a distâncias cada vez maiores (e, portanto, galáxias num Universo cada vez mais jovem). Tais observações permitiram identificar os dois processos fundamentais para a formação e evolução primordial das primeiras galáxias e, supõe-se, para a reionização do Universo: a formação

de estrelas e a queda da matéria para um buraco negro supermassivo no centro de uma galáxia - um núcleo galáctico ativo (AGN).

Antes de nos focarmos no segundo processo, de particular interesse para esta publicação, refira-se que a formação de estrelas em galáxias muito jovens tem sido o alvo preferencial de várias equipas de investigadores, que recorrem às observações mais profundas hoje existentes no óptico e no infravermelho próximo (por exemplo, Finkelstein et al. 2015, Bowens et al. 2016). As técnicas observacionais usadas baseiam-se na emissão de radiação ultravioleta por parte de estrelas muito jovens, massivas e quentes, e na sua interação com o gás da galáxia - uma sonda ideal para a procura de populações estelares jovens. Embora seja hoje frequente a deteção de formação de estrelas em galáxias nos primeiros 700 milhões de anos (chegando as observações já aos primeiros 500 milhões de anos, Oesch et al. 2016), o seu estudo mostra que não estamos ainda perante a primeira geração de estrelas do Universo, as chamadas estrelas de População III. De facto, as observações mais sensíveis destas galáxias distantes revelam radiação produzida por elementos como o carbono e o oxigénio, necessariamente produzidos no interior de estrelas anteriores (Figura 1). Surpreendentemente, apesar desta formação estelar aparentemente abundante no primeiro milhar de milhões de anos, não é ainda possível afirmar que a reionização do Universo é provocada (unicamente) por estrelas, pois a radiação (estelar) sugerida pelas observações não parece ser ainda suficiente.

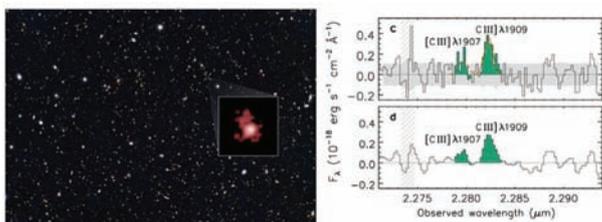


Fig. 1 - Esquerda: A galáxia GN-z11 (figura inserida) terá existido quando o Universo tinha apenas 400 milhões de anos, sendo detetada com um redshift $z \sim 11$. Esta é a galáxia mais distante hoje conhecida, descoberta nas observações do Telescópio Espacial Hubble do levantamento *Great Observatories Origins Deep Survey North* (em fundo). Crédito: NASA, ESA e P. Oesch (Oesch et al., 2016). Direita: A deteção, num espectro em infravermelho próximo, de emissão de carbono na galáxia GN-z11, revelando um enriquecimento químico sugestivo da existência de gerações anteriores de estrelas (Jiang et al., 2021).

É, pois, com renovado interesse que tem aumentado o estudo do segundo fenómeno que sabemos ser importante para a Época de Reionização - a emissão de radiação por parte de material em queda para um buraco negro supermassivo, um AGN ou um quasar, no caso de uma luminosidade extrema¹. Este é um processo que parece acompanhar, e talvez mesmo justificar, a

formação e crescimento das primeiras galáxias. Para a deteção de AGN distantes são frequentemente usados diagnósticos observacionais no óptico e infravermelho próximo (por exemplo, Bañados et al. 2016) ou radiofrequências (por exemplo, Miley & De Breuck, 2008). No primeiro caso, a seleção com base em cores (óptico-óptico ou óptico-infravermelho) tem sido continuamente melhorada para ser sensível à radiação gerada no ambiente energético do AGN, em particular no caso dos mais luminosos, os quasares. Em radiofrequências, que revelam a radiação de sincrotrão produzida pela aceleração de eletrões relativísticos no campo magnético intenso do AGN, a luminosidade pode atingir níveis de tal forma elevados que a deteção é possível, com os telescópios atuais, em qualquer lugar do Universo (por exemplo, Afonso et al. 2015, Bañados et al. 2018, 2021)! É possível mesmo que já tenhamos detectado um dos primeiros quasares do Universo, mas que não o tenhamos reconhecido como tal, já que a caracterização da sua distância é uma das medições mais difíceis, eventualmente mesmo impossível, de efetuar atualmente.

Note-se que já nesta década, o Square Kilometer Array (SKA), um rádiotelescópio muito mais poderoso do que os atualmente em funcionamento, será capaz de estudar diretamente a evolução do hidrogénio neutro na Época da Reionização, à medida que aumenta a sua ionização pelas primeiras fontes de luz. Tal estudo será possível detectando a absorção que o hidrogénio provoca na luz de um AGN brilhante ainda mais distante, dentro da Época de Reionização, efetuando uma observação em “contra-luz” (Carilli et al. 2004). Este objetivo futuro é um ponto de particular interesse para a seleção de AGN distantes brilhantes em radiofrequências. Métodos eficientes para alcançar as distâncias mais elevadas têm vindo a ser de-

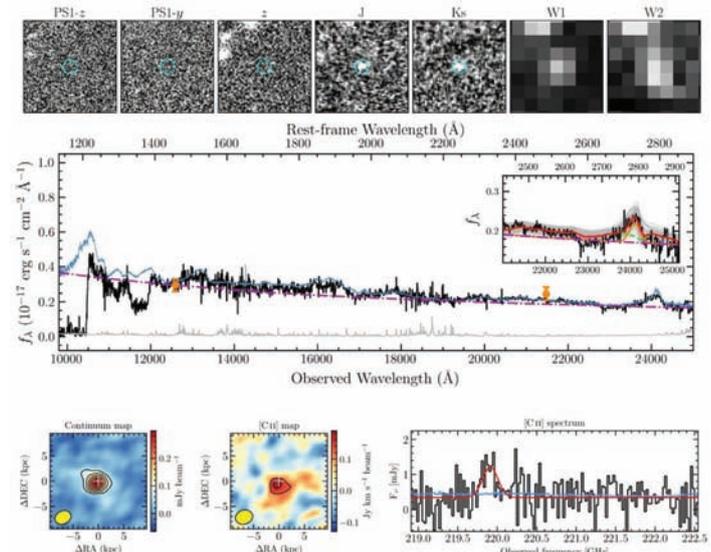


Fig. 2 - O quasar J0313-1806, o quasar mais distante até hoje detetado. Com um *redshift* de $z=7,64$, este AGN encontra-se num Universo com pouco mais de 600 milhões de anos. Apesar da juventude, alberga já um buraco negro supermassivo com cerca de 1,6 mil milhões de vezes a massa do Sol. No painel superior, a imagem da localização deste quasar em várias bandas ópticas e de infravermelho - o quasar apenas é detetado a partir da banda de infravermelho J. No painel central, o espectro óptico-infravermelho do J0313 (traço negro) é comparado com o espectro médio de quasares bastante mais próximos (traço azul), revelando uma semelhança impressionante para comprimentos de onda (observados) acima de 1,2 micrometros. A risca de emissão no painel inserido é a risca de magnésio (MgII), a partir da qual é possível a estimativa da massa do buraco negro central. No painel inferior, a deteção de carbono (risca [CII]) no milímetro, é reveladora de um ambiente já bastante rico em elementos complexos neste quasar, situado dentro da época de reionização (Wang et al. 2021).

¹ Em rigor, existem vários tipos de AGN, classificados consoante a radiação em que são detetados e estudados, luminosidade, variabilidade, entre outras características, tendo todos eles na origem da sua atividade a queda de matéria para um buraco negro supermassivo. Os quasares são habitualmente revelados no óptico e infravermelho, e possuem luminosidades extremas. Por simplificação, usamos neste artigo o termo quasar como sinónimo de AGN muito luminoso.

envolvidos: critérios que utilizam a comparação entre a emissão em rádio e o infravermelho (Norris et al. 2006, Jarvis et al. 2009, Huynh et al. 2010) serão, provavelmente, extremamente eficazes para atingir os maiores redshifts (Ker et al. 2012).

A origem de buracos negros supermassivos na Época de Reionização

Ao longo dos últimos anos, a descoberta de buracos negros com massas gigantescas (10^8 - 10^9) M_{\odot} na Época de Reionização, nos primeiros 800 milhões de anos do Universo (Mortlock et al. 2011, De Rosa et al. 2014, Wang et al. 2021; ver Figura 2), levanta problemas sérios para qualquer teoria de formação de galáxias e estrutura no Universo: como se consegue criar e fazer crescer um objeto tão massivo em apenas algumas centenas de milhões de anos? Se esses AGN poderosos já são detetados 600-800 milhões de anos após o Big Bang, então deverão existir a distâncias ainda maiores, em épocas ainda mais remotas, mesmo se com luminosidades ou massas ligeiramente menos extremas. Na Figura 3, pode-se apreciar o crescimento particularmente rápido que a descoberta de tais quasares impõe: a redshifts de 30, apenas 100 milhões de anos após o Big Bang, é necessário que o Universo possua já buracos negros com massas de $\sim(10^3$ - $10^4)M_{\odot}$.

As possibilidades para tais sementes, surpreendentemente, existem. Poderiam ser os remanescentes das primeiras estrelas do Universo (Pop III), se possuírem massas suficientemente elevadas. Estas estrelas, formadas entre 50 e 200 milhões de anos após o Big Bang (redshifts $z \sim 20$ -50) e com massas acima de $\sim 300 M_{\odot}$ (Abel et al. 2000, Bromm et al. 2002), entrariam em colapso apenas alguns milhões de anos após a sua formação, criando um buraco negro massivo (com mais de $150 M_{\odot}$; Fryer et al. 2001). No entanto, modelos mais recentes indicam que tais massas estelares primordiais podem ser mais raras do que se pensava anteriormente (por exemplo, Turk et al. 2009, Stacy et al. 2012), o que tornaria mais difícil que remanescentes de estrelas de primeira geração fossem as sementes que se tornariam buracos negros supermassivos no final da Época da Reionização. Uma outra possibilidade seria o colapso direto do gás de baixo momento angular (ver por exemplo, Bromm & Loeb 2003, Mayer et al. 2010), o colapso simultâneo de um aglomerado de estrelas (Devecchi et al. 2010, 2012) ou mesmo buracos negros primordiais (Carr 2003).

Qualquer que seja a origem dos primeiros buracos negros no Universo, e o processo que levou ao seu crescimento extraordinariamente rápido ao longo de apenas algumas centenas de milhões de anos, o resultado final - a existência de buracos negros supermassivos no primeiro milhar de milhão de anos do Universo - parece ser possível do ponto de vista teórico (embora ainda não totalmente compreendido). Mais observações são agora essenciais para esclarecer sobre as reais origens destes objetos extremos.

Em busca dos primeiros Quasares do Universo

A existência de quasares, alimentados por buracos negros supermassivos, na época de reionização do Universo, coloca questões empolgantes sobre as primeiras centenas de milhões de anos do Universo, questões para as quais procuramos hoje a resposta:

- Quando é que nasceram os primeiros buracos negros supermassivos, e quais serão os mecanismos possíveis para o seu crescimento rápido em apenas algumas centenas de milhões de anos?
- Qual é o papel dos buracos negros primordiais como sementes da formação de galáxias e sua evolução inicial?
- Qual a contribuição da radiação emitida por Quasares para a reionização do Universo?

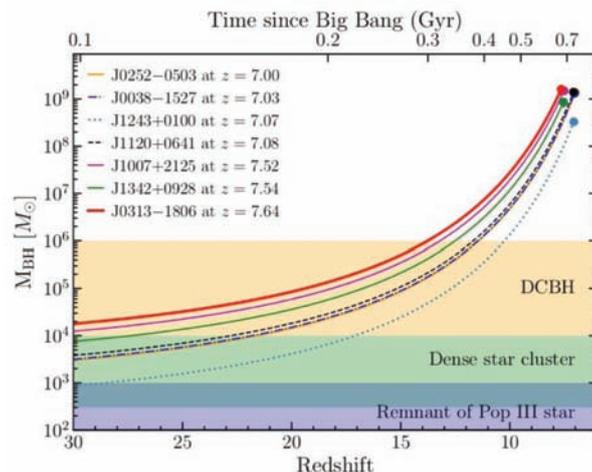


Fig. 3 - O crescimento dos buracos negros detectados no centro de quasares na Época de Reionização ($z \sim 7$ -8), assumindo uma queda abundante de material (no chamado limite de Eddington). As diferentes possibilidades para a origem das sementes de tais buracos negros supermassivos são indicadas pelas regiões coloridas: colapso direto do gás de baixo momento angular (DCBH, região a amarelo), colapso simultâneo de um aglomerado de estrelas (região a verde) e os remanescentes das primeiras estrelas do Universo (a violeta). Figura de Wang et al., 2021.

Os levantamentos astronômicos já planejados para o futuro próximo deverão conseguir responder a algumas destas perguntas. Contudo, o seu sucesso está dependente de conseguir antever o que poderá ser revelado, e otimizar as futuras observações para a identificação eficiente dos primeiros quasares do Universo. E, por sua vez, esta planificação depende de possuir modelos robustos para as primeiras centenas de milhões de anos do Universo.

Atualmente, os modelos de formação e evolução de galáxias mais avançados possuem um sucesso muito grande na simulação das épocas mais recentes do Universo (por exemplo, Vogelsberger et al. 2020). É ao longo dos últimos 10-12 mil milhões de anos que se consegue testar e validar estes modelos, recorrendo às observações detalhadas que hoje possuímos. Estes modelos incorporam a queda de material para um buraco negro central, pois este parece ser um processo essencial para a compreensão da evolução de galáxias. O sucesso destes modelos, ainda que para épocas do Universo relativamente "recentes", permite confirmar a qualidade da descrição dos processos que estão na base da existência de quasares. Deverá, pois, ser possível, olhando para as fases iniciais destes Universos simulados, começar a compreender quais as características dos quasares na Época de Reioni-

zação, nas primeiras centenas de milhões de anos do Universo – e como poderemos otimizar os nossos telescópios, atuais e futuros, para a sua deteção.

Utilizando esta motivação, temos vindo a explorar alguns dos modelos mais avançados de evolução de galáxias para a deteção dos primeiros quasares do Universo, em particular considerando duas regiões do espectro electromagnético fortemente associadas com o processo de queda de material para um buraco negro supermassivo: os raios X, e as rádio-frequências². O processo implica utilizar os parâmetros físicos de cada galáxia em cada modelo (em particular, massa e rotação do buraco negro central da galáxia e a respectiva taxa de acreção de matéria), considerar a libertação de energia na queda de matéria para o buraco negro, e estimar as quantidades que podem ser observadas – neste caso, luminosidade em raios-X e em rádiofrequências.

A exploração de 8 dos modelos mais recentes (Amarantidis et al., 2019) sugere que a deteção de quasares na Época da Reionização quer em raios-X quer em rádio-frequências, está ao alcance dos levantamentos que serão possíveis durante os próximos anos. Quer o futuro telescópio de raios-X Athena, em desenvolvimento pela Agência Espacial Europeia para um lançamento no início da próxima década, quer o Square Kilometre Array (SKA), um rádio-telescópio revolucionário que deverá iniciar observações no final desta década, na África do Sul e na Austrália, deverão conseguir detectar e estudar vários milhares de quasares na Época de Reionização do Universo.

Apesar das incertezas existentes, esta exploração dos modelos (Amarantidis et al., 2019) confirmou ainda que a deteção de quasares na Época da Reionização está ao alcance das observações atuais, embora com dificuldades – algo que está de acordo com os estudos referidos acima (por exemplo, Wang et al. 2021). Esta expectativa fica ainda mais fortalecida quando verificamos que os modelos atuais não conseguem ainda reproduzir os quasares mais poderosos que já hoje conhecemos, como se mostra na Figura 4. A subestimativa aparente de massas e luminosidades dos quasares mais poderosos nestes modelos do Universo, quando comparados com as observações, sugere que o Universo poderá conter uma população de quasares na Época da Reionização ainda mais abundante do que os modelos sugerem (ou pelo menos mais extrema, o que facilitará a observação). A melhoria destes modelos para o primeiro milhar de milhões de anos do Universo, incorporando a informação mais recente sobre os quasares extremos já observados, resultará em previsões ainda mais precisas para os telescópios em funcionamento no futuro próximo.

Para além da deteção – a confirmação

Ainda que a deteção de quasares distantes seja possível, de acordo com estas simulações, falta ainda o difícil passo de identificar tais objetos. O levanta-

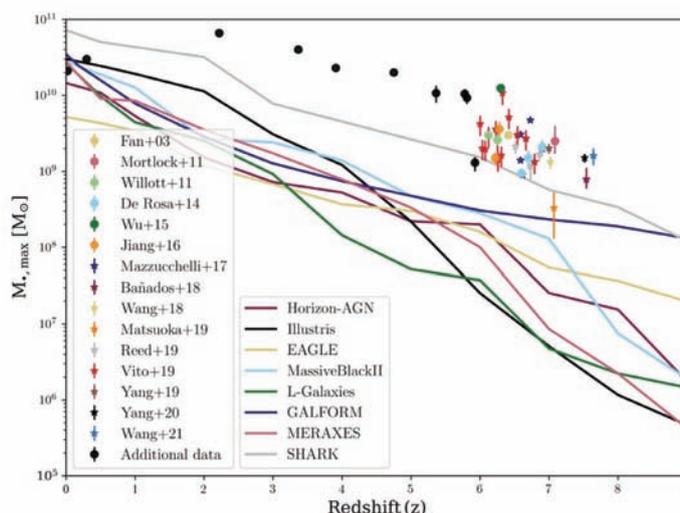


Fig. 4 – A massa dos buracos negros mais massivos no centro de galáxias tal como previsto por 8 modelos de formação e evolução de galáxias (linhas coloridas), comparada com alguns dos buracos negros supermassivos mais extremos já detectados. É patente que os modelos ainda não são capazes de simular os quasares mais extremos já hoje conhecidos. Figura adaptada de Amarantidis et al., (2019).

mento Evolutionary Map of the Universe (EMU, Norris et al. 2011), a ser atualmente iniciado com o Australia SKA Pathfinder (ASKAP), um dos precursores do rádio-telescópio SKA, deverá revelar mais de 70 milhões de fontes (na maior parte galáxias), espalhadas por todo o céu observável pelo ASKAP. Destas, apenas uma ínfima fração deverá corresponder a quasares na Época da Reionização. Para além da deteção, a identificação de tais “monstros” de entre milhões e milhões de outras deteções, representa um desafio gigantesco, não possível com observações astronómicas em apenas uma região restrita do espectro eletromagnético.

Assim, baseados nas simulações, iniciámos também recentemente o desenvolvimento de novas estratégias para a deteção mais eficiente de quasares na Época de Reionização, recorrendo a múltiplos comprimentos de onda – em particular, explorando técnicas de seleção que consideram, simultaneamente, as indicações de rádio e de infravermelho longínquo. O estudo de um dos vários candidatos encontrados é ilustrativo das dificuldades deste tipo de investigação, onde a confirmação é ainda mais importante do que a eventual deteção.

A fonte CVLA100 foi inicialmente identificada como de potencial interesse nas observações em rádio-frequências no campo COSMOS, uma região no céu que tem sido observada de forma exaustiva para o estudo da evolução de galáxias. Foi detetada em infravermelho longínquo com o observatório espacial Herschel, que esteve em funcionamento entre 2009 e 2013, e o estudo subsequente mostrou que deveremos estar perante uma galáxia com um AGN a distâncias elevadas (redshift maior que 3 e talvez mesmo maior que 6 – uma idade do Universo menor que 2 mil milhões de anos, e talvez mes-

² Este interesse é não só justificado pela enorme luminosidade que os quasares podem atingir em raios-X e no rádio, facilitando a sua deteção e estudo, como também pela participação nacional em futuros telescópios revolucionários nestes comprimentos de onda: o telescópio de raios-X Athena (Nandra et al., 2013), em desenvolvimento pela Agência Espacial Europeia (ESA) e com um enfoque muito grande no Universo primordial (Aird et al., 2013); e o futuro rádio-telescópio SKA e os seus precursores, em particular o Australia SKA Pathfinder e o MeerKAT, na África do Sul.

mo menor que mil milhões de anos), algo compatível com a sua não deteção em comprimentos de onda ópticos (Figura 5).

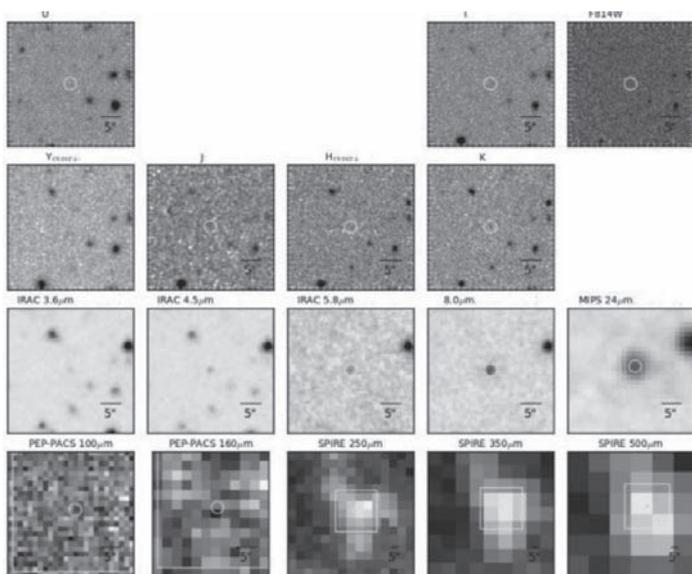


Fig. 5 - A rádio galáxia CVLA100, uma candidata a quasár a distâncias elevadas, não é detectada em algumas das imagens astronómicas mais sensíveis no óptico (fila superior), mas começa a ser perceptível no infravermelho próximo e médio (segunda e terceira filas) e é claramente detectada no infravermelho longínquo (fila inferior). Tal comportamento é característico de galáxias a distâncias muito elevadas, e sinalizou esta galáxia como de interesse para estudos mais detalhados (imagem por I. Matute, IA/FCUL).

O interesse nesta fonte levou a observações detalhadas com aquele que é um dos telescópios mais poderosos da atualidade, o Atacama Large Millimetre Array (ALMA), possivelmente o único que pode confirmar a sua distância. As observações tiveram, contudo, um sucesso limitado, já que o espectro da galáxia, nos comprimentos de onda (milímetro) onde o ALMA opera, revelou apenas uma risca de emissão – insuficiente para a medição da sua distância (Figura 6). Observações posteriores não conseguiram revelar, até agora, uma muito ansiada segunda risca de emissão, com a consequente determinação da sua distância. A galáxia CVLA100 permanece pois, por agora, como uma fonte de interesse – um candidato a quasár na Época da Reionização, para o qual continuamos a procurar uma confirmação.

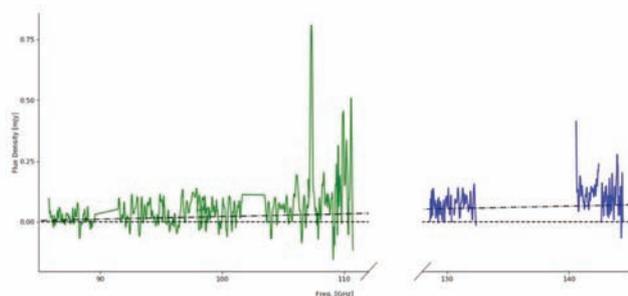


Fig. 6 - O espectro da rádio galáxia CVLA100 obtido com o ALMA, um dos telescópios mais poderosos da atualidade. Apesar da deteção segura de uma risca de emissão a aproximadamente 107 GHz, a não deteção de uma segunda risca de emissão impede, até agora, a determinação da sua distância (imagem por I. Matute e S. Amaratidis, IA/FCUL).

Uma nova abordagem – Big Data

O exemplo anterior revela as tremendas dificuldades que o estudo do Universo primitivo enfrenta, com os telescópios atuais conseguindo revelar algo, mas muitas vezes não o suficiente, da Época de Reionização. A situação será certamente diferente no futuro, mas o avanço do conhecimento não pode esperar por novas e melhores capacidades – há, pois, necessidade de explorar outras abordagens.

Uma das mais promissoras, perseguida também pelo nosso grupo, consiste em olhar para a época imediatamente após da Época de Reionização, a distâncias um pouco menores. Nesta fase da evolução do Universo, entre mil e dois mil milhões de anos após o Big Bang, conhecemos milhares de quasares (Figura 7), e o seu estudo, acumulado ao longo de vários anos, resulta num conhecimento relativamente detalhado das suas características: nomeadamente brilhos aparentes e luminosidades a vários comprimentos de onda, massas do buraco negro central, distâncias e taxa de formação estelar. É assim possível imaginar que, através da aplicação de técnicas de Inteligência Artificial neste enorme conjunto de dados, consigamos desenvolver algoritmos que auxiliem a identificação eficiente de potenciais quasares a distâncias muito mais elevadas, na Época da Reionização.

Apesar de estarmos apenas nos primeiros passos, os resultados iniciais sugerem que podemos almejar desenvolver um algoritmo que, se aplicado às observações do EMU, em rádio e em outros comprimentos de onda, permitirá identificar de forma robusta quasares distantes. Mais ainda: as distâncias estimadas por uma versão inicial de um tal algoritmo revelam uma elevada precisão, suficiente para alterar por completo as estratégias de procura destes habitantes da Época de Reionização – e, consequentemente, revolucionar o conhecimento desta época primordial das estrelas, galáxias e o Universo.

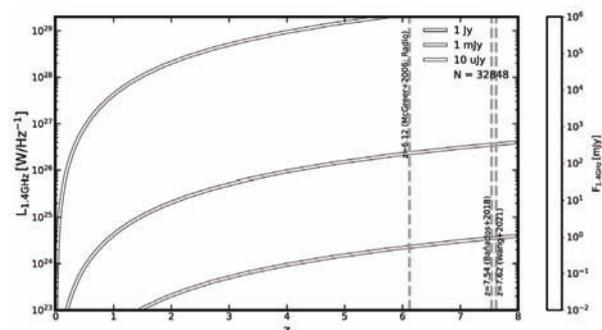


Fig. 7 - Compilação de luminosidades em rádio (1,4 GHz) de AGN até distâncias elevadas (a Época de Reionização corresponde ao lado direito neste gráfico, para redshifts superiores a aproximadamente 6). As curvas representam vários níveis de sensibilidade de levantamentos astronómicos em rádio frequências: o levantamento EMU, que começou a ser realizado pelo telescópio ASKAP recentemente, atingirá o nível indicado pela curva inferior (sensibilidade de $\sim 10^{-6}$ Jy), revelando mais de 70 milhões de deteções (imagem por R. Carvajal, IA/FCUL).

Referências

- Abel T., Bryan G. L., Norman M. L., 2000, "The Formation and Fragmentation of Primordial Molecular Clouds", *The Astrophysical Journal* 540, 39. doi:10.1086/309295
- Afonso, J., Casanellas, J., Prandoni, I., et al. 2015, "Identifying the first generation of radio powerful AGN in the Universe with the SKA", in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*, *Proceedings of Science (AASKA14)*, 71
- Aird, J., Comastri, A., Brusa, M., et al., 2013, "The Hot and Energetic Universe: The formation and growth of the earliest supermassive black holes", supporting White Paper for the ESA science theme "The Hot and Energetic Universe", arXiv, arXiv:1306.2325
- Amarantidis, S., Afonso, J., Messias, H., et al. 2019, "The first supermassive black holes: indications from models for future observations", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485, 2694. doi:10.1093/mnras/stz551
- Bañados E., Venemans B. P., Decarli R., et al., 2016, "The Pan-STARRS1 Distant $z > 5.6$ Quasar Survey: More than 100 Quasars within the First Gyr of the Universe", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 227, 11. doi:10.3847/0067-0049/227/1/11
- Bañados E., Carilli C., Walter F., et al., 2018, "A Powerful Radio-loud Quasar at the End of Cosmic Reionization", *Astrophysical Journal Letters*, 861, L14. doi:10.3847/2041-8213/aac511
- Bañados E., Mazzucchelli C., Momjian E., et al., 2021, "The Discovery of a Highly Accreting, Radio-loud Quasar at $z = 6.82$ ", *The Astrophysical Journal*, 909, 80. doi:10.3847/1538-4357/abe239
- Bouwens R. J., Oesch P. A., Labbé I., et al., 2016, "The Bright End of the $z \sim 9$ and $z \sim 10$ UV Luminosity Functions Using All Five CANDELS Fields", *Astrophysical Journal*, 830, 67. doi:10.3847/0004-637X/830/2/67
- Bromm V., Coppi P. S., Larson R. B., 2002, "The Formation of the First Stars. I. The Primordial Star-forming Cloud", *The Astrophysical Journal* 564, 23. doi:10.1086/323947
- Bromm V., Loeb A., 2003, "Formation of the First Supermassive Black Holes", *The Astrophysical Journal* 596, 34. doi:10.1086/377529
- Carilli C. L., Furlanetto S., Briggs F., et al., 2004, "Probing the dark ages with the Square Kilometer Array", *New Astronomy Reviews* 48, 1029. doi:10.1016/j.newar.2004.09.046
- Carr B. J., 2003, "Primordial Black Holes as a Probe of Cosmology and High Energy Physics", *Quantum Gravity: From Theory to Experimental Search*, 301. doi:10.1007/978-3-540-45230-0_7
- De Rosa G., Venemans B. P., Decarli R., et al., 2014, "Black Hole Mass Estimates and Emission-line Properties of a Sample of Redshift $z > 6.5$ Quasars", *The Astrophysical Journal*, 790, 145. doi:10.1088/0004-637X/790/2/145
- Devecchi B., Volonteri M., Colpi M., Haardt F., 2010, "High-redshift formation and evolution of central massive objects - I. Model description", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 409, 1057. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17363.x
- Devecchi B., Volonteri M., Rossi E.~M., et al., 2012, "High-redshift formation and evolution of central massive objects - II. The census of BH seeds", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 421, 1465. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20406.x
- Finkelstein S. L., Ryan R. E., Papovich C., et al., 2015, "The Evolution of the Galaxy Rest-frame Ultraviolet Luminosity Function over the First Two Billion Years", *The Astrophysical Journal* 810, 71. doi:10.1088/0004-637X/810/1/71
- Fryer C. L., Woosley S. E., Heger A., 2001, "Pair-Instability Supernovae, Gravity Waves, and Gamma-Ray Transients", *The Astrophysical Journal* 550, 372. doi:10.1086/319719
- Huynh M. T., Norris R. P., Siana B., Middelberg E., 2010, "Evidence for Infrared-faint Radio Sources as $z > 1$ Radio-loud Active Galactic Nuclei", *The Astrophysical Journal*, 710, 698. doi:10.1088/0004-637X/710/1/698
- Jarvis M. J., Teimourian H., Simpson C., et al., 2009, "The discovery of a typical radio galaxy at $z = 4.88$ ", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398, L83. doi:10.1111/j.1745-3933.2009.00715.x
- Jiang L., Kashikawa N., Wang S., et al., 2021, "Evidence for GN-z11 as a luminous galaxy at redshift 10.957", *Nature Astronomy*, 5, 256. doi:10.1038/s41550-020-01275-y
- Ker L. M., Best P. N., Rigby E. E., et al., 2012, "New insights on the z - α correlation from complete radio samples" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420, 2644. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.20235.x
- Mayer L., Kazantzidis S., Escala A., Callegari S., 2010, "Direct formation of supermassive black holes via multi-scale gas inflows in galaxy mergers", *Nature*, 466, 1082. doi:10.1038/nature09294
- Mortlock D. J., Warren S. J., Venemans B. P., et al., 2011, "A luminous quasar at a redshift of $z = 7.085$ ", *Nature*, 474, 616. doi:10.1038/nature10159
- Miley G., De Breuck C., 2008, "Distant radio galaxies and their environments", *Astronomy and Astrophysics Review* 15, 67. doi:10.1007/s00159-007-0008-z
- Nandra K., Barret D., Barcons X., et al., 2013, "The Hot and Energetic Universe: A White Paper presenting the science theme motivating the Athena+ mission", *White Paper for the ESA science theme "The Hot and Energetic Universe"*, arXiv, arXiv:1306.2307
- Norris R. P., Afonso J., Appleton P. N., et al., 2006, "Deep ATLAS Radio Observations of the Chandra Deep Field-South/Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic Field", *The Astronomical Journal*, 132, 2409. doi:10.1086/508275
- Norris R. P., Hopkins A. M., Afonso J., et al., 2011, "EMU: Evolutionary Map of the Universe", *Publications of the Astronomical Society of Australia* 28, 215. doi:10.1071/AS11021
- Oesch P. A., Brammer G., van Dokkum P. G., et al., 2016, "A Remarkably Luminous Galaxy at $z=11.1$ Measured with

Hubble Space Telescope Grism Spectroscopy”, *Astrophysical Journal*, 819, 129. doi:10.3847/0004-637X/819/2/129

Stacy A., Greif T. H., Bromm V., 2012, “The first stars: mass growth under protostellar feedback”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 422, 290. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20605.x

Turk M. J., Abel T., O’Shea B., 2009, “The Formation of Population III Binaries from Cosmological Initial Conditions”, *Science* 325, 601. doi:10.1126/science.1173540

Vogelsberger M., Marinacci F., Torrey P., Puchwein E., 2020, “Cosmological simulations of galaxy formation”, *Nature Reviews Physics* 2, 42. doi:10.1038/s42254-019-0127-2

Wang F., Yang J., Fan X., et al., 2021, “A Luminous Quasar at Redshift 7.642”, *Astrophysical Journal Letters*, 907, L1. doi:10.3847/2041-8213/abd8c6



José Afonso, é investigador na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e no Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço. Possui uma licenciatura em Física (1996) e um Mestrado em Astronomia e Astrofísica (1998) pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e um doutoramento em Astrofísica (2002) pelo Imperial College de Londres. Estudou formação e evolução de galáxias no *Space Telescope Science Institute* (EUA), *Australia Telescope National Facility*, no *Onsala Space Observatory* (Suécia) e mais tarde em Portugal. Coordenou o Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa entre 2011 e 2015, tendo ajudado a fundar o Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, que coordenou até 2021. Atualmente procura ajudar a definir a próxima geração de observações astronómicas para a deteção dos primeiros buracos negros no Universo, participando no desenvolvimento de alguns dos instrumentos astronómicos mais revolucionários para os próximos anos, entre os quais o espectrógrafo *Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph*, a instalar no *Very Large Telescope* em 2022, e a câmara *Wide-Field Imager* para o futuro telescópio de Raios-X Athena, da ESA, que será lançado por volta de 2032. Gosta de divulgar as maravilhas da Astronomia e despertar novas mentes para a Ciência.

O “buraco negro” no centro da nossa galáxia e o Prémio Nobel 2020

Paulo J.V. Garcia¹, António Amorim²

¹ CENTRA e FEUP, Universidade do Porto

² CENTRA e FEUP, Universidade de Lisboa

Metade do Prémio Nobel da Física do ano de 2020 foi atribuído conjuntamente a Reinhard Genzel e Andrea Ghez pela “descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro da nossa galáxia”. Neste artigo, tentamos explicar esta descoberta usando conhecimentos de Física do 12.º ano e uma linguagem coloquial. A nossa abordagem não é histórica, tenta apenas, usando o conhecimento atual, explicar a descoberta.

O artigo inicia-se por uma contextualização do “buraco negro” na nossa galáxia e do método usado na medição da sua massa. Seguidamente, o instrumento GRAVITY, que foi central nas descobertas, é apresentado assim como as deteções do desvio para o vermelho gravitacional e da precessão de Schwarzschild. Terminamos com uma contextualização destas descobertas.

A nossa galáxia é um disco

Vivemos numa galáxia com forma aproximada¹ de um disco com espirais de gás, poeira e estrelas, o disco tem uma espessura de cerca de 0.3 kpc (a luz demora cerca de 3,3 anos a viajar 1 kpc) e diâmetro de cerca de 50 kpc². A primeira pergunta que nos surge é como sabemos que a galáxia tem esta forma? Uma resposta pode ser encontrada nas estrelas. Se mapearmos as estrelas da galáxia (com, por exemplo, o satélite espacial Gaia³) conseguimos medir a posição angular no céu de cada estrela. Usando um método chamado paralaxe⁴, podemos também obter a distância da estrela. Combinada com a posição angular, a distância, permite-nos derivar para cada estrela a sua posição tridimensional em relação ao Sol.

Um “buraco negro” “micromassivo” quando comparado com a galáxia

Uma pergunta importante é qual é a massa da galáxia? Antes de respondermos a esta pergunta vamos pensar num problema mais simples, na órbita circular de raio r de um planeta (por exemplo a Terra, de massa m), em torno de um sol (por exemplo o Sol, de massa M). A sua energia mecânica (E_m) é a soma da energia potencial gravítica (E_{pg}) com a energia cinética (E_k):

$$E_m = E_{pg} + E_k$$

A energia potencial gravítica é

$$E_{pg} = -GMm/r$$

onde G é a constante gravitacional.

Como a trajetória é circular sabemos que a aceleração é v^2/r e a 2.ª lei de Newton escreve-se $m v^2/r = GMm/r^2$

o que implica que a energia cinética é - 1/2 da energia potencial gravítica

$$E_k = 1/2 m v^2 = 1/2 GMm/r = - 1/2 E_{pg}$$

Substituindo temos que a energia mecânica do sistema é metade da energia potencial gravítica

$$E_m = 1/2 E_{pg}$$

Este resultado é um exemplo do teorema do virial que permite, para sistemas físicos com dimensões limitadas no espaço, relacionar a energia cinética média com a energia potencial (gravítica) média. Por exemplo, se soubermos a energia cinética do planeta e a distância a que se encontra da estrela, podemos obter a massa da estrela a partir da energia potencial.

O satélite Gaia também permite medir o movimento tridimensional das estrelas no céu, que nos permite estimar a sua energia cinética. Equipados com a energia cinética, estimamos a energia potencial e a massa do objeto central. Usando aglomerados estelares Laura Atkins e colegas [2] estimaram a massa da galáxia em cerca de $1,5 \times 10^{12} M_{\text{sun}}$. Esta massa é muito maior que a massa em estrelas (que pode ser estimada por exemplo pelo Gaia).

Na Tabela 1, algumas massas das componentes da nossa galáxia são apresentadas. O resultado mais marcante é que a maior parte da massa da nossa galáxia é massa escura, noutra forma que estrelas, gás ou poeira. Por outro lado, outro resultado marcante é que a massa do “buraco negro” no centro da nossa galáxia é minúscula comparada com o todo! A massa é cerca de 10^{-6} da massa da galáxia, é um “buraco negro” “micromassivo”. A esta

¹ Esta forma aproximada é suficiente para este artigo, não pretendemos apresentar os detalhes da estrutura da galáxia.

² Este disco encontra-se imerso num halo (nuvem esférica) de matéria escura quase cinco vezes maior.

³ https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia_overview (acedido a 2021.07.01)

⁴ Ver por exemplo, o capítulo 3.1 de [1].

massa corresponde um raio de Schwarzschild de apenas 8% do raio da órbita terrestre (uma unidade astronómica).

Massa do Sol (M_{sun})	2×10^{30} kg
Massa do “Buraco Negro”	$4 \times 10^6 (M_{\text{sun}})$
Massa da galáxia	$1,5 \times 10^{12} (M_{\text{sun}})$
Massa em estrelas	$9 \times 10^{10} (M_{\text{sun}})$
Massa em poeira e gás	$5 \times 10^9 (M_{\text{sun}})$
Massa em “matéria escura”	$1,5 \times 10^{12} (M_{\text{sun}})$

Tabela 1 - Massas da nossa galáxia (adaptado de [1])

Um “buraco negro” brilhante

Se o “buraco negro” no centro da galáxia tem tão pouca massa, como foi possível detetá-lo? Uma primeira resposta poderia ser: porque é brilhante! No entanto não é uma resposta óbvia. O “buraco negro” e o Sol encontram-se no plano da galáxia, a uma distância muito significativa um do outro. O gás e da poeira da galáxia concentram-se no seu plano. A maior parte da luz visível emitida pela vizinhança do “buraco negro” não chega a um observador na Terra, porque é espalhada para fora do caminho ótico. O efeito é tão forte que se a mesma quantidade de poeira estivesse entre o Sol e a Terra, o Sol seria cerca de 3 vezes mais tênue que Estrela Polar! Por outro lado, esta quantidade enorme de poeira emite radiação numa região do espectro eletromagnético de dezenas de mm, dado pela lei do deslocamento de Wien para a temperatura da poeira, ofuscando a visão para o centro da galáxia (nessa região do espectro eletromagnético). Historicamente, o centro galáctico foi identificado como uma região de enorme luminosidade na região do espectro eletromagnético de ondas rádio com comprimento de onda de 20 cm. No entanto, a região emissora tinha uma extensão angular muito grande, não permitindo estudar com precisão a vizinhança do “buraco negro”. Esta extensão angular estava ligada quer ao processo físico e ao material que emitia a radiação e em menor escala à difração angular. Estes efeitos ilustram que para estudar com grande precisão angular o centro galáctico e a região relativamente próxima do “buraco negro” é necessário escolher um comprimento de onda otimizado simultaneamente para a deteção pelo telescópio e para o objeto emissor. O comprimento de onda de cerca de $2 \mu\text{m}$, é suficiente para a difração da radiação ser pequena, mas grande o suficiente para existirem muitos fótons e haver um grande sinal-ruído nas medições. Outra vantagem é que as estrelas emitem muita radiação neste comprimento de onda. É assim possível estudar o seu movimento. A $2 \mu\text{m}$ o “buraco negro” tem a aparência de uma estrela cuja emissão varia no tempo. Pensa-se que esta emissão tem lugar na vizinhança do “buraco negro”, a escalas angulares de centenas de microssegundos de arco, num disco de matéria que espirala na direção do horizonte, desaparecendo de vista. Neste disco têm lugar processos energéticos⁵ que estão na origem da emissão observada.

Pesando o “buraco negro”

Estamos agora preparados para perceber melhor a componente experimental do prémio Nobel da Física de 2020. Se obtivermos imagens do centro da galáxia a $2 \mu\text{m}$ é possível ver um aglomerado de estrelas. Existe uma densidade tão grande de estrelas que elas estão

muitas vezes sobrepostas. É por isso fundamental ter imagens com a maior acuidade angular possível e as primeiras duas décadas (1990-2010) foram investidas no afinar de tecnologias de óptica adaptativa que permitiam aos telescópios gigantes de 8 m e 10 m de diâmetro operando na terra terem uma acuidade angular melhor que o telescópio Hubble no espaço. Equipados com essas imagens foram medidas as órbitas das estrelas, isto é, posições angulares no espaço versus tempo. Mas as imagens não são suficientes, porque apenas medem ângulos. É necessário também medir velocidades radiais, por efeito Doppler, a partir de espectros da estrela. Esta velocidade permite obter uma medida absoluta e não apenas angular. É esse o truque que permite, a partir da combinação dos dois tipos de medições obter, quer a massa do objeto central, quer a distância a que este se encontra da Terra.

Tecnicamente a parte complicada são as medições e o ajuste não-linear a estas, usando um elevado número de parâmetros. A facilidade do problema está na Física, apenas é ajustada a órbita de um corpo em torno de um potencial gravítico pontual. Durante essas duas décadas foi possível encontrar uma estrela – S2 – numa órbita suficientemente curta (16 anos) que permitiu estimar a massa de um objeto compacto com cerca de $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$, assim como uma distância da Terra de cerca de 8 kpc. Para termos noção da importância da acuidade visual, a órbita elíptica da estrela tem um eixo maior de apenas 0,2 segundos de arco, cerca de 10 vezes menor que o tamanho angular de uma estrela vista de uma cidade em Portugal⁶!

Um “Ferrari” europeu

Nos finais da década de 2000, equipados com uma órbita precisa da estrela S2 previu-se que esta passaria pelo ponto mais próximo do “buraco negro” em 2018. A separação angular da estrela em relação ao “buraco negro” seria de apenas 14 milissegundos de arco! Seria impossível de detetar pois é uma separação cerca de 4 vezes menor que o critério de Rayleigh para o comprimento de onda de $2 \mu\text{m}$ e um telescópio de 8 m – a estrela e a emissão na vizinhança do buraco negro misturar-se-iam.

Para ultrapassar esta dificuldade foi construído um instrumento que foi acoplado ao interferómetro VLTI, operado pelo Observatório Europeu Austral (ESO), no Chile. Um interferómetro infravermelho ao manter a coerência luminosa permite obter informação angular semelhante a um telescópio com um espelho do tamanho da separação dos telescópios. Como o VLTI combina quatro telescópios de 8 m e a separação máxima é de 90 m, era possível ganhar um fator 11 e ter um critério de Rayleigh efetivo três vezes menor que a separação que se queria medir.

O final da década de 2000 e grande parte da década de 2010 foi passado a construir o instrumento GRAVITY, num consórcio em que participavam alemães, franceses e portugueses. A equipa portuguesa foi responsável pelo sub-

⁵ Por exemplo radiação de sincrotrão por elétrons acelerados em campos magnéticos na vizinhança do “buraco negro”.

⁶ O diâmetro angular das estrelas quando observadas a partir da Terra é dominado por efeitos óticos ligados à turbulência atmosférica. À exceção do Sol não se observa diâmetro angular real das estrelas.

sistema câmara de aquisição. Em 2016, o GRAVITY foi instalado nos telescópios do Chile tendo feito as primeiras observações [3].

Este instrumento deu uma vantagem competitiva determinante à equipa europeia que competia há duas décadas com a equipa americana. Aqueles usando os telescópios VLT de 8 m do ESO, estes os telescópios Keck de 10 m. Agora era possível seguir a estrela S2 numa região em que para um telescópio de 8 m a sua luz se mistura com a luz da vizinhança próxima do “buraco negro”.

A deteção do desvio para o vermelho gravitacional

O primeiro resultado marcante da equipa GRAVITY foi a deteção do desvio para o vermelho gravitacional da luz da estrela S2 no momento em que se encontra mais próxima do “buraco negro” [4]. Essa distância é de cerca de 120 unidades astronómicas (quatro vezes a distância de Neptuno ao Sol) e S2 move-se com uma velocidade de cerca de 3 % da velocidade da luz! O desvio para o vermelho gravitacional decorre da perda de energia dos fotões da estrela S2 quando escapam do buraco de potencial onde esta se move, o desvio é de cerca de 3 % da velocidade orbital. Este efeito é uma previsão da relatividade generalizada de Einstein em regiões de forte curvatura do espaço-tempo.

Na prática quando se obtém um espectro da estrela S2, na região dos 2 mm, este contém apenas “três” riscas de absorção bem vincadas, duas de He I e uma de H I (Bracket γ). Os desvios para o vermelho (de várias origens) movem as riscas da posição em repouso relativamente ao observador. O reduzido número de riscas e a sua largura tornam difícil uma medição precisa do seu desvio.

Uma primeira dificuldade da medição é que existem muitos desvios para o vermelho em jogo nessa situação, quer devido ao efeito Doppler do movimento da estrela, quer devido ao movimento da Terra, quer devido a efeitos da relatividade restrita, que é necessário tomar em conta. Uma segunda dificuldade é que o desvio para o vermelho gravitacional surge com uma contribuição constante e uma contribuição de segunda ordem na expansão de Taylor para o desvio para o vermelho total⁷. Uma terceira dificuldade é que, quer no termo constante, quer no termo de segunda ordem, outros desvios para o vermelho estão presentes. Uma quarta dificuldade reside no ajuste aos dados que é realizado. Na prática é feito um ajuste não linear de um modelo de 14 parâmetros aos dados, onde a significância do desvio para o vermelho gravitacional é um dos parâmetros. Estes ajustes são muito sensíveis a mínimos locais, sobretudo devido ao grande número de parâmetros em jogo. Aqui a equipa europeia teve a vantagem do instrumento GRAVITY cuja precisão posicional permitiu detetar o desvio para o vermelho gravitacional com uma precisão de 5 sigmas⁸, combinando também dados de espectroscopia com o instrumento SINFONI e de ótica adaptativa com o instrumento NACO. Cerca de 10 meses depois a equipa aumentou a precisão da medição do desvio para 20 sigma [5], 12 meses depois a equipa americana confirmou na Science esta descoberta usando instrumentos e telescópios diferentes, com uma precisão de 5 sigmas [6].

A caminho do Nobel com a deteção da precessão de Schwarzschild

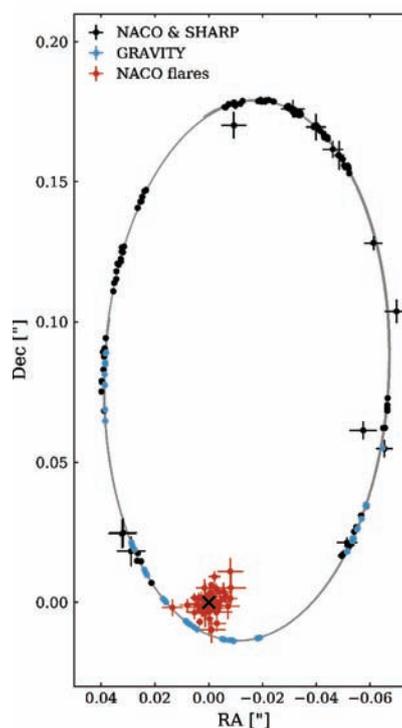


Figura 1 - Pontos da órbita da estrela S2 medidos com vários instrumentos. Os pontos vermelhos são a posição de SgrA* (a posição do “buraco negro”) medidos nas imagens do instrumento NACO. O campo angular da imagem é cerca de 10 vezes menor que o tamanho angular de uma estrela observada numa grande cidade. A curva é a órbita com precessão. A curva é aberta e o ângulo de precessão de S2 é pequeníssimo, como indicado no texto. Adaptado de [7].

Outro efeito relativista de segunda ordem é a precessão da órbita da estrela S2. No caso mais simples, a precessão não altera o plano da órbita mas apenas a orientação da linha que liga os pontos extremos da órbita (os apses). Esta precessão é chamada de precessão apsidal. Num problema clássico de dois corpos pontuais, a precessão apsidal não é possível. No entanto, se outros corpos estiverem presentes ou os corpos não forem perfeitamente esféricos a precessão apsidal pode ter lugar na mecânica Newtoniana. No caso de S2, a precessão apsidal é causada por um efeito relativista. A relatividade generalizada altera a força. Esta já não depende exatamente no quadrado da distância, criando precessão apsidal. A precessão apsidal é um fenómeno que surge em variados contextos, para a métrica de Schwarzschild tem o nome de precessão de Schwarzschild.

No caso particular de S2, a precessão é muito baixa, a órbita “roda” apenas cerca de 0,2° (cf. Figura 1). Como a precessão cria uma órbita aberta desenhando “pétalas”, é mais fácil de medir longe do ponto de maior aproximação ao buraco negro, onde a diferença entre a órbita aberta e a órbita fechada é maior. No entanto, equipada com a precisão do instrumento GRAVITY, a equipa europeia conseguiu detetar o efeito, ainda com a estrela S2 bastante próxima do “buraco negro”.

Usando métodos semelhantes ao da deteção do desvio para o vermelho gravitacional, a precessão de Schwarzschild foi medida com uma precisão de 5 sigma, sendo compatível com o valor esperado [7].

⁷ Neste texto de divulgação assume-se a ordem como a potência da variável $\beta = v/c$.

⁸ Isto é uma parte num milhão de deteção errada devido à aleatoriedade do ruído.

Aguarda-se uma confirmação deste resultado pela equipa americana, usando instrumentação independente, sensível à precessão apenas para distâncias maiores do “buraco negro”.

Considerações finais

Chegado a este ponto o leitor poderá interrogar-se por que razão estas descobertas mereceram a atenção do Comité Nobel. De facto, a precessão relativista é um fenómeno bem conhecido e medido para Mercúrio, onde representa 7 % da pressão total. O mesmo se aplica ao desvio para o vermelho gravitacional, que foi demonstrado pela experiência de Pound–Rebka. Por outro lado, a deteção de ondas gravitacionais sonda regiões da métrica onde esta é muito mais curva e os efeitos relativistas mais intensos.

É nosso entendimento que a resposta está em Sgr A*, o objeto cuja posição coincide com a do “buraco negro”. Pela primeira vez é possível realizar experiências precisas na vizinhança de um objeto compacto com $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$. Este objeto é muitíssimo (10^5) mais massivo que os objetos envolvidos na emissão de radiação gravitacional, detetados pela experiência LIGO – é surpreendente que os dados sejam compatíveis com um buraco negro de Schwarzschild. $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$ comprimidos num único parâmetro! Quando vemos uma imagem do Hubble Ultra-Deep Field, onde numa pequena região angular se encontram 10 mil galáxias, quase todas com um objeto compacto supermassivo no seu centro, podemos pesar a importância deste tipo de objetos.

Finalmente, o Comité Nobel, na citação do prémio refere um objeto compacto e não um buraco negro. Hoje não podemos dizer com certeza absoluta que o objeto compacto é um buraco negro. Outros tipos de objetos compactos são compatíveis com as medições. A hipótese do buraco negro é a mais simples e plausível e na nota explicativa o Comité refere que as medições reforçam esta interpretação. A curto prazo parece ser possível medir se Sgr A* tem momento angular. Espera-se que sim, que rode, pois, a matéria que o constitui originalmente teria momento angular (que se conservou em parte). A medição assenta novamente na precessão, numa contribuição devida à alteração da métrica pela rotação do “buraco negro”. A estrela terá de ter numa órbita mais pequena que S2, de modo a maximizar o sinal. Observações no ESO com o GRAVITY decorrem no momento em que este artigo é escrito para descobrir essa estrela e medir o seu movimento. Um novo instrumento, o GRAVITY+, está a ser construído para continuar a procura por mais uma década.

Agradecimentos

A. A. e P.G. agradecem o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, com referência UIDB/00099/2020 e PTDC/FIS-AST/7002/2020.

Bibliografia

- [1] Carroll B., Ostlie D. (2017) “An Introduction to Modern Astrophysics”, 2ª edição, Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/9781108380980>
- [2] Watkins et al. (2019) “Evidence for an Intermediate-mass Milky Way from Gaia DR2 Halo Globular Cluster Motions”, *The Astrophysical Journal*, 873, p. 118, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab089f>
- [3] Gravity Collaboration (2017) “First light for GRAVITY: Phase referencing optical interferometry for the Very Large Telescope Interferometer”, *Astronomy & Astrophysics*, 602, p. A94, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730838>

[4] Gravity Collaboration (2018) “Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole” *Astronomy & Astrophysics*, 615, p. L15, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718>

[5] Gravity Collaboration (2019) “A geometric distance measurement to the Galactic center black hole with 0.3% uncertainty”, *Astronomy & Astrophysics*, 625, L10, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935656>

[6] Do T. et al. (2019) “Relativistic redshift of the star S0-2 orbiting the Galactic Center supermassive black hole”, *Science*, 365, p. 664, <https://doi.org/10.1126/science.aav8137>

[7] Gravity Collaboration (2020) “Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole”, *Astronomy & Astrophysics*, 636, p. L5, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037813>



Paulo Garcia, é Professor Associado do Departamento de Engenharia Física da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Doutorou-se em Física pela Universidade Claude Bernard – Lyon I, em 1999. Realizou investigação em vários temas, como em sistemas protoplanetários, instrumentação ou buracos

negros supermassivos. No consórcio GRAVITY lidera a equipa portuguesa que participa na exploração científica do instrumento. Coordena a participação portuguesa no instrumento GRAVITY+, em desenvolvimento para o Observatório Europeu Austral (ESO). <https://orcid.org/0000-0002-1678-3535>



António Amorim, é Professor Catedrático do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, investigador do CENTRA e sócio efetivo da Academia das Ciências de Lisboa. Após um conjunto de trabalhos teóricos iniciais em modelos relativistas para dispersão de deuterões,

especializou-se numa primeira fase em sistemas de aquisição de dados e informação para experiências de Física de Partículas (HERA-B/DESY, ATLAS/LHC/CERN) e dedicou-se posteriormente ao desenvolvimento de instrumentação para estudos de astrofísica. Coordenou o consórcio CAMCAO que desenvolveu o primeiro instrumento português para o ESO e coordenou a participação portuguesa no consórcio GRAVITY, bem como no projeto de instrumentação para o espaço MAGDRI-VE. Recentemente supervisiona o desenvolvimento de engenharia do sistema WSS para o instrumento METIS para o telescópio ELT do ESO e participa no desenvolvimento do sistema DAQ para a colaboração CLOUD no CERN. É autor de mais de 800 publicações indexadas. <https://orcid.org/0000-0003-0638-2321>

A galáxia M87 e a sombra de buracos negros

Pedro V.P. da Cunha¹

¹ Dept. de Matemática da Universidade de Aveiro e CIDMA, Campus de Santiago, 3810-183 Aveiro, Portugal

pvcunha@ua.pt

Abstract

A 10 abril de 2019, foi publicada a primeira fotografia astronómica de um buraco negro e da sua misteriosa sombra. Esta imagem, amplamente partilhada pela comunicação social no mundo, abriu um novo capítulo na história da Ciência. Um dos motivos para a sua importância é o facto de esta fotografia permitir sondar o campo gravitacional extremo em redor de um buraco negro, abrindo assim a porta a novos testes à teoria da Relatividade Geral de Einstein, num regime praticamente inexplorado. A incrível complexidade do processo para obter esta fotografia é um feito inatingível por um único ser humano que merece também ser celebrado como uma vitória da engenhosidade e cooperação humanas. Este artigo pretende esclarecer o leitor curioso que queira saber mais sobre esta observação significativa, que permitiu conferir aos buracos negros uma acrescida credibilidade experimental, certamente determinante para a atribuição do prémio Nobel da Física 2020.

1. Introdução

Há muito tempo, numa galáxia muito, muito distante... o buraco negro monstruoso M87* encontrava-se na sua habitual rotina de consumir enormes quantidades de gás interstelar, num ritmo equivalente à absorção da massa do planeta Terra a cada 15 minutos. Este gás e poeira cósmica, acelerado pelo campo gravitacional de M87*, formava um turbilhão diabólico com velocidades próximas da luz, emitindo no processo enormes quantidades de radiação eletromagnética, num evento de uma luminosidade colossal. Estes raios de luz iniciaram assim uma viagem intrépida aos confins do Cosmos em todas as direções. Para os raios que foram enviados (por acaso) na direção do nosso planeta, a viagem demorou quase 53 milhões de anos, aproximadamente desde a origem dos primeiros primatas (antropóides) na Terra até à sua deteção no ano de 2017 [1, 2]. Essa luz, ao ser detetada, irá dar forma à mundialmente famosa imagem de M87* na Fig. 1, uma fotografia do evento luminoso colossal que teve lugar em seu redor há quase 53 milhões de anos atrás.

O ano de 2017 foi o ano em que o Telescópio do Horizonte de Eventos (Event Horizon Telescope) alcançou finalmente a resolução necessária para conseguir observar M87* a uma escala comparável à do seu horizonte de eventos [1-3]. O horizonte de eventos determina a fronteira do buraco negro, ou seja delimita a região do espaço-tempo onde o campo gravitacional é tão intenso que nada consegue es-

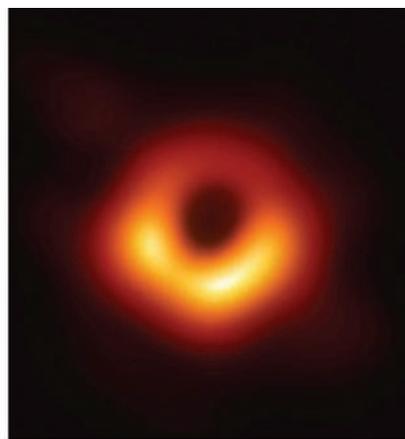


Figura 1 - Primeira fotografia de um buraco negro: o objeto M87*, observado em 2017 pelo Telescópio do Horizonte de Eventos, e divulgada ao público em 2019 [1].

capar do seu interior, nem mesmo a luz. Existe atualmente um consenso na comunidade científica de que os Buracos Negros deverão ser relativamente comuns no Universo, com os maiores Buracos Negros a residir no centro das galáxias. Esse é precisamente o caso de M87*, que reside no centro da galáxia Messier 87, e visível na Constelação da Virgem. Curiosamente, M87* encontra-se entre os maiores buracos negros que se conhecem atualmente, com uma massa cerca de 6 mil milhões de vezes maior que a do nosso Sol. Com este tamanho colossal, M87* poderia conter no seu interior todo o nosso sistema solar... e ficar ainda com espaço disponível. Na verdade, o horizonte de M87* ficaria mais perto

da localização atual da Voyager 1 do que da órbita de Plutão. Como referência, a Voyager 1 é o objeto construído por humanos que se encontra mais distante da Terra, e encontra-se a entrar já no espaço interstelar, fora da influência do Sol.

É este tamanho colossal de M87* que permite compensar a enorme distância a que este se encontra da Terra e ainda assim ser visível. Como a nossa experiência diária sugere, uma casa ao fundo de uma rua comprida aparenta ser mais pequena aos nossos olhos do que uma casa mais próxima. Naturalmente, não é a casa que diminui realmente de tamanho mas sim o “ângulo de observação” do objeto, que diminui rapidamente com a distância. Por isso, apenas objetos grandes podem compensar a redução do ângulo de observação para distâncias também grandes. O Sol é um exemplo: é visível a olho nu com um ângulo razoavelmente grande (0,5 graus), apesar da distância elevada a que se encontra. Em comparação, o planeta Júpiter tem (no máximo) um ângulo de observação de cerca de 0,014 graus, cerca de 40 vezes mais pequeno. Os nossos olhos não têm resolução suficiente para conseguir ver os detalhes do planeta Júpiter a olho nu. Mas é possível fazê-lo aumentando 40 vezes o tamanho dos nossos “olhos”, se substituirmos as nossas pupilas de 4 mm por uma objetiva de 16 cm de um telescópio astronómico amador.

No caso de M87*, o ângulo de observação é consideravelmente mais desafiante: é cerca de 2 milhões de vezes mais pequeno do que o de Júpiter: 0,000 000 006°. Este ângulo é comparável ao da observação de um átomo na palma da sua mão, ou a olhar para uma moeda de dois euros na superfície da Lua. Em termos práticos, para conseguir observar M87* seria necessário um telescópio com uma objetiva do tamanho do mundo.

Mas como pode isso ser possível?

2. O Telescópio do Horizonte de Eventos

Nenhum telescópio individual possui a resolução necessária para observar M87* diretamente. A solução reside numa técnica astronómica que já é usada há mais de 40 décadas: a Interferometria de Longa Linha de Base (*Very Long Baseline Interferometry*), ou sigla VLBI em Inglês. A técnica VLBI permite aumentar artificialmente a resolução ao combinar dados de vários telescópios individuais que estão bastante afastados fisicamente. Analisando ligeiras variações do sinal detetado pela rede de telescópios, é possível simular o efeito de um telescópio gigante com o tamanho da distância típica entre os telescópios individuais.

A colaboração do Telescópio do Horizonte de Eventos levou o conceito do VLBI ao limite: ao combinar dados de vários observatórios astronómicos em diferentes pontos do planeta numa estrutura em rede, é possível formar um telescópio virtual do tamanho da Terra! Coordenar todos os nós desta rede é um desafio técnico e logístico considerável, que requer uma coordenação precisa entre as estações. Para a observação de M87* em 2017 foram usados oito telescópios em localizações distintas da Terra, nomeadamente nos Estados Unidos, México, Chile, Espanha e Polo Sul (ver Fig. 2). Utilizando esta rede de

VLBI foi possível atingir o limiar de resolução necessária para observar a escala do horizonte de M87*.

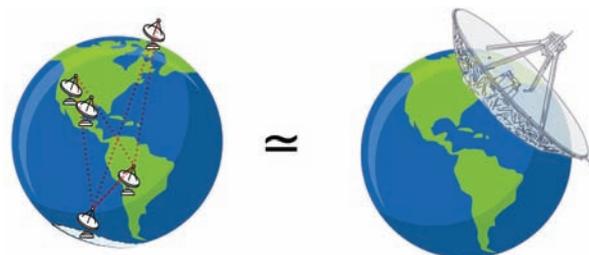


Figura 2 - Ao combinar dados de vários observatórios astronómicos em diferentes pontos do planeta numa estrutura em rede, é possível formar um telescópio virtual do tamanho da Terra. Para a observação de M87* em 2017 foram usados observatórios nos Estados Unidos, México, Chile, Espanha e Polo Sul.

Como funciona este processo? As estações de observação da rede VLBI recolhem sinais eletromagnéticos de M87* na banda dos microondas, e digitalizam no total cerca de 10 petabytes (10 milhões gigabytes = 10^7 gigabytes) de informação em discos rígidos. Estes discos das diferentes estações de VLBI são transportados fisicamente por avião para uma base de análise central, onde todos os discos rígidos são reunidos. O motivo para este transporte por avião e simples: é mais rápido do que enviar pela Internet este gigantesco volume de dados. De facto, com uma taxa típica de download na Internet de um Megabyte por segundo, demoraríamos mais de 300 anos a transferir todo esse volume de dados. Na base central, um supercomputador combina os sinais dos diferentes telescópios, agindo como se estes fizessem parte de pequenas componentes de um telescópio do tamanho da Terra. Este processo, quando combinado com técnicas de calibração e filtragem sofisticadas do sinal, permite reduzir o volume de dados dos 10 petabytes iniciais para 10 megabytes em disco. Num passo final, técnicas de imagem permitem reconstruir a imagem de M87* (Fig. 1) que terá dado origem ao sinal inicial. Num enorme feito de análise de dados, esta imagem final de M87* com cerca de 10 kilobytes é cerca de um bilião (10^{12}) de vezes mais pequena que o volume de informação inicial em bruto, recolhida pelas estações de VLBI.

Na imagem de M87* (Fig. 1) é muito clara a existência de um anel luminoso, com uma região central mais escura. Mas o que se esperava ver na imagem de M87* exatamente? Para compreender a imagem observada é preciso primeiro discutir o que é a sombra de um buraco negro.

3. A sombra de buracos negros

Em termos gerais, como podemos ver um objeto negro se este não emite ou reflete luz? Esta questão tem uma resposta surpreendentemente simples: se tivermos luz de contraste suficiente, a presença de um objeto escuro é denunciada pela redução de

luz que pode provocar numa imagem, ou seja pela sua sombra. Um exemplo simples é o seguinte: um gato (totalmente) preto pode ser claramente visível à noite se existir um candeeiro por detrás do gato. A imagem do gato pode até ser capturada numa fotografia, uma vez que este constitui um obstáculo à luz do candeeiro e cria uma penumbra na fotografia com a sua forma, na região onde há absorção da luz. Ao analisar as características da sombra do gato na fotografia é possível inferir algumas propriedades, como por exemplo o seu tamanho e forma.

A sombra de um buraco negro segue alguns destes princípios simples, apesar de haver algumas diferenças importantes. Antes de mais, a luz de contraste necessária para detetar o buraco negro provém do disco de gás e plasma luminoso em seu redor (Fig. 3).

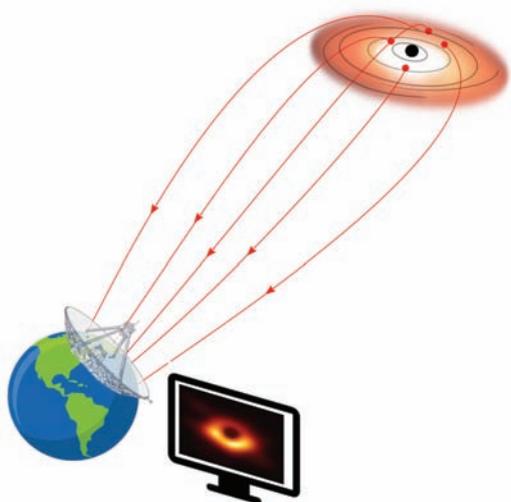


Figura 3 - A luz de contraste necessária para detetar o buraco negro provém do disco de gás e plasma luminoso em seu redor. As estações de observação da rede VLBI recolhem esta radiação eletromagnética de M87* para formar a imagem.

Adicionalmente, a sombra do buraco negro não corresponde exatamente a uma imagem do horizonte de eventos, mas sim a um conjunto de órbitas especiais de raios de luz. O motivo é relativamente simples de compreender: a sombra do buraco negro é determinada pelos raios de luz que são absorvidos por este e que portanto não chegam à Terra. No entanto, devido ao enorme campo gravitacional, a trajetória dos raios de luz que passam perto do buraco negro são encurvadas. No caso de um raio de luz se aproximar o suficiente, a trajetória poderá encurvar o necessário para descrever várias voltas completas em redor do buraco negro antes de conseguir escapar. A condição limite entre um raio de luz que consegue escapar *in extremis*, e a de um raio que cai no buraco negro, é dada por órbitas de luz especiais que não escapam nem caem dentro do buraco negro. Ou seja, órbitas que ficam indefinidamente presas em redor do buraco negro.

O exemplo mais simples deste género de órbitas é circular e fechada, onde um raio de luz pode (teoricamente) ficar eternamente a orbitar o buraco negro sem nunca cair ou escapar. No cenário mais simples, todas estas órbitas circulares encontram-se circunscritas à superfície de uma esfera, denominada como a Esfera de Fotões. O contorno da sombra do buraco negro é precisamente uma imagem desta esfera, e não do horizonte de eventos propriamente dito. A fronteira da sombra é facilmente identificável num contexto astrofísico (ver Fig. 4), uma vez que quando iluminada pela luz do disco de plasma o contorno da sombra é visível como um anel brilhante quasi-circular, contendo uma região de luminosidade reduzida no seu interior (a sombra).

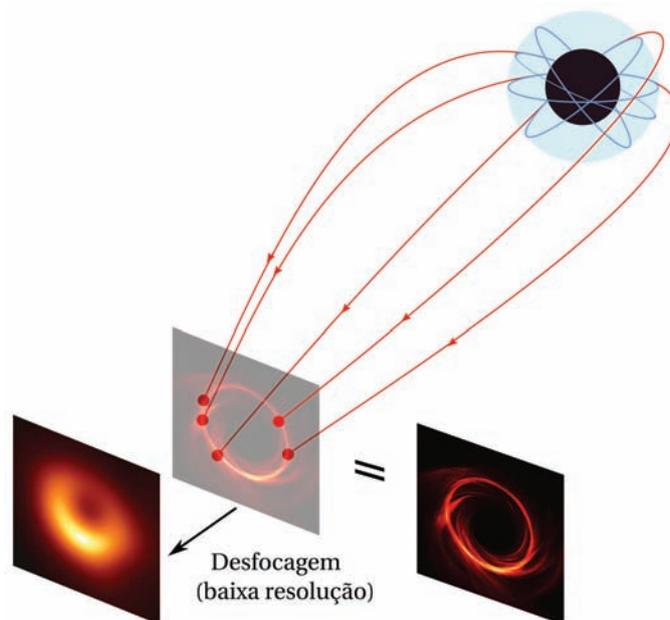


Figura 4 - O contorno da sombra do buraco negro é uma imagem da Esfera de Fotões (representada a azul), e não do horizonte de eventos (representado a preto). Tendo luz de contraste, a fronteira da sombra é facilmente visível na fotografia como um anel brilhante quasi-circular, com uma região interior de luminosidade reduzida. Para compararmos a imagem simulada de M87* com a fotografia real na Fig. 1, temos primeiro de desfocar a imagem simulada. Imagem simulada adaptada de [1, 3].

O tamanho e forma deste anel luminoso pode ser analisado usando simulações numéricas de raios de luz em volta de um buraco negro, assumindo que a descrição da gravidade é corretamente dada pela Relatividade Geral de Einstein. Para compararmos a imagem simulada de M87* com a fotografia real, temos primeiro de desfocar a imagem simulada de forma a reproduzir o efeito da baixa resolução angular da rede VLBI. Após esta redução de resolução, a imagem prevista da Relatividade Geral para M87* está completamente consistente com o observado pelo Telescópio do Horizonte de Eventos. Este é certamente um triunfo para a ciência e para a Relatividade Geral. Apesar desta fotografia de M87* ter sido o culminar de muitos anos de trabalho, o caminho está longe de ter terminado. Pelo contrário, esta imagem do Telescópio do Horizonte de Eventos inaugura uma nova era na astrofísica onde os buracos negros podem ser fotografados como objetos astronómicos convencionais, e não encarados como entida-

des puramente teóricas e abstratas. Esta é uma fotografia à qual se pode aplicar, literalmente, a expressão popular de “ver para crer”.

Quais são os próximos passos deste novo caminho?

4. Os próximos 100 anos

Antecipar os avanços científicos que terão lugar durante as próximas décadas é bastante desafiante. Contudo, algumas das etapas que se seguem já se encontram em desenvolvimento. Um dos próximos buracos negros a ser fotografado após M87* dever a ser Sagitário A*, o buraco negro supermassivo localizado no centro da nossa galáxia, a Via Láctea. Apesar de Sagitário A* ser cerca de 1000 vezes mais pequeno que M87*, encontra-se também cerca de 1000 vezes mais próximo da Terra, e portanto o ângulo de observação é comparável. Existe a expectativa de que a primeira fotografia de Sagitário A* seja publicada ainda durante o ano 2021.

A próxima geração do Telescópio do Horizonte de Eventos encontra-se também em preparação. A fase de planeamento irá ter lugar até 2024, enquanto que a fase de construção de dez novas estações terrestres está prevista estender-se até 2030 [4]. A integração destas novas estações na rede de VLBI irá permitir melhorar a qualidade da imagem de forma significativa e obter imagens de vídeo de M87* e Sagitário A*. Existem igualmente planos para expandir a rede VLBI para o espaço, incluindo nomeadamente um satélite em órbita em volta da Terra. Isso permitiria duplicar a resolução atual da fotografia de M87* [5-7].

Desenvolvimentos posteriores a 2030-2040 encontram-se ainda em termos bastante incertos e no domínio da especulação. Numa perspetiva otimista, poderemos assumir que avanços substanciais em viagens interplanetárias terão lugar durante os próximos 100 anos. Ao adicionar à rede VLBI uma estação permanente na Lua, a resolução da observação iria aumentar quase 60 vezes, enquanto que uma estação em Marte aumentaria a resolução milhares de vezes. Tais desenvolvimentos permitiriam, a existir, obter fotografias de resolução extremamente elevada e sensíveis a desvios mínimos à previsão da Relatividade Geral. Há ainda várias questões em aberto relativas ao comportamento das leis da Mecânica Quântica no contexto de campos gravitacionais fortes. Estas e outras questões poderão vir a ser resolvidas com fotografias de alta precisão de buracos negros.

Existe um longo caminho para as próximas décadas que terá de ser percorrido pelas novas gerações. Os alunos do ensino secundário e universitário de hoje encontram-se em condições privilegiadas de participar nesta jornada. A fotografia de M87* é um enorme feito que esperamos que possa inspirar alunos a contribuir para as grandes descobertas científicas do amanhã.

5. Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer ao Prof. Carlos Herdeiro e ao Prof. José Sande Lemos por comentários sobre uma versão inicial do artigo. Este trabalho é suportado pelo Centro de Investigação e Desenvolvimento em Ma-

temática e Aplicações (CIDMA) através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), referências BIPD/UI97/7484/2020, UIDB/04106/2020 and UIDP/04106/2020. Este trabalho é também suportado pelos projectos PTDC/FIS-OUT/28407/2017, CERN/FISPAR/0027/2019 e PTDC/FIS-AST/3041/2020 e ao abrigo da COST ActionCA16104.

References

- [1] K. Akiyama *et al.*, “First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole,” *Astrophys. J.*, vol. 875, no. 1, p. L1, 2019, arXiv:1906.11238.
- [2] C. Goddi *et al.*, “First M87 Event Horizon Telescope Results and the Role of ALMA,” *The Messenger*, vol. 177, pp. 25-35, 2019, arXiv:1910.10193.
- [3] K. Akiyama *et al.*, “First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring,” *Astrophys. J.*, vol. 875, no. 1, p. L5, 2019.
- [4] L. Blackburn *et al.*, “Studying Black Holes on Horizon Scales with VLBI Ground Arrays,” 9 2019, arXiv:1909.01411.
- [5] K. Haworth *et al.*, “Studying black holes on horizon scales with space-VLBI,” 9 2019, arXiv:1909.01405.
- [6] L. I. Gurvits *et al.*, “TeraHertz Exploration and Zooming-in for Astrophysics (THEZA): ESA Voyage 2050 White Paper,” 8 2019, arXiv:1908.10767.
- [7] C. M. Fromm, Y. Mizuno, Z. Younsi, H. Olivares, O. Porth, M. De Laurentis, H. Falcke, M. Kramer, and L. Rezzolla, “Using space-VLBI to probe gravity around Sgr A*,” 1 2021, arXiv:2101.08618.



Pedro Cunha, obteve o doutoramento no Instituto Superior Técnico (IST) em Física. Foi investigador no Instituto Max-Planck na Alemanha, e mudou-se recentemente para a Universidade de Aveiro. É co-autor de vários artigos e trabalhos de investigação em sombras de buracos negros.

A era da astronomia de ondas gravitacionais

Nicolas Sanchis-Gual¹

¹ Dept. Matemática e CIDMA, Universidade de Aveiro

Resumo

As ondas gravitacionais foram previstas por Albert Einstein em 1916, como consequência de sua teoria da Relatividade Geral. Só cem anos depois, em 2015, os detectores LIGO-Virgo confirmaram a existência de radiação gravitacional, provando que Einstein estava certo. Neste artigo, iremos rever brevemente como os interferómetros de ondas gravitacionais funcionam, o que eles detectaram até agora e o que podemos aprender com eventos novos e inesperados.

1. Uma nova luz

No dia 14 de setembro de 2015 às 09:53 UTC, Marco Drago, um jovem investigador pós-doutoral no Instituto Max Planck de Física Gravitacional em Hannover, Alemanha, recebeu um alerta por e-mail de um protocolo computacional de tratamento de dados, um sistema automático que filtra potenciais sinais de eventos reais nos dados que estão a ser coletados pelos detectores do LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory), localizados em Livingston e Hanford, nos EUA. O sinal era tão alto, claro e perfeito que, a princípio, o investigador achou que o sinal não era real.

Algumas vezes antes deste evento, os líderes da colaboração LIGO decidiram testar a prontidão dos membros da colaboração e injetaram sinais falsos nos dados. Apenas quatro pessoas sabiam quando uma tal injeção aconteceria e só revelariam a verdade quando o artigo científico resultante estivesse escrito e prestes a ser enviado a uma revista científica. O objetivo era manter os membros preparados e organizados para quando uma verdadeira detecção ocorresse. Assim, era natural para Marco pensar que se tratava novamente de um teste lúdico. Ele escreveu um e-mail para toda a colaboração perguntando se alguém sabia sobre alguma nova injeção.

No entanto, este sinal foi diferente. No dia 14 de setembro de 2015 às 09:50 UTC o primeiro sinal real de uma onda gravitacional foi, de facto, observado pelos detectores LIGO (o detector de Virgo, na Itália, ainda estava a ser atualizado na época), denominado

GW150914 [1] (ano-mês-dia), tendo sido produzido durante a coalescência e fusão de dois buracos negros massivos (cada um com cerca de 30 vezes a massa do nosso Sol) - Figura 1. E Marco Drago tornou-se a primeira pessoa na história a ver o sinal de uma onda gravitacional real.

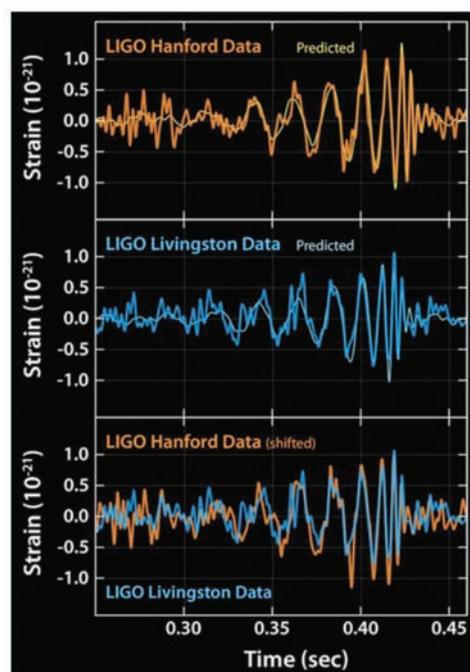


Figura 1 - Estes gráficos mostram os sinais do evento de ondas gravitacionais GW150914 em função do tempo, detectados pelos observatórios gêmeos do LIGO, em Livingston, no estado da Louisiana, e em Hanford, no estado de Washington, ambos nos EUA. Crédito da imagem: Caltech / MIT / LIGO Lab. .

Desde setembro de 2015 até hoje, os observatórios LIGO-Virgo-KAGRA (o último acrónimo refere-se a Kamioka Gravitational Wave Detector, localizado no Japão) detectaram mais de 50 eventos de ondas gravitacionais produzidos em fusões de buracos negros e binários de estrelas de neutrões, e até mesmo em sistemas híbridos de buracos negros e estrelas de neutrões. GW170817 foi a primeira colisão de um sistema binário de estrelas neutrões observada [2] e foi acompanhada por uma explosão, chamada kilonova, no espectro eletromagnético, durante a qual elementos pesados (prata, ouro, platina, ...) foram criados. Cenários semelhantes (por exem-

plo, explosões de supernovas) também produzirão neutrinos e radiação gravitacional e eletromagnética, permitindo incríveis observações em múltiplos canais, também ditos múltiplos mensageiros. Cada canal transportará informações diferentes que nos ajudarão a entender os complexos processos envolvidos. A era da astronomia de ondas gravitacionais e de multimensageiros acabou de começar.

2. Os detectores de ondas gravitacionais

Em 1915, Albert Einstein apresentou a sua teoria da gravitação: a Relatividade Geral. Uma das principais diferenças fundamentais com a teoria da gravidade de Newton é que não há interações instantâneas; tudo se propaga a uma velocidade finita e a velocidade da luz no vácuo é a velocidade máxima permitida. Em 1916, Einstein percebeu que se o campo gravitacional de objetos massivos varia rapidamente com o tempo, em cenários altamente dinâmicos (por exemplo, um binário de buracos negros orbitando em torno do seu centro de massa), parte das perturbações do espaço-tempo causadas por esta dinâmica escaparão na forma de vibrações no comportamento do próprio espaço-tempo, embora Einstein acreditasse que tais vibrações nunca seriam detectadas.

Portanto, as ondas gravitacionais são ondulações no espaço-tempo que se propagam à velocidade da luz, produzidas quando objetos astrofísicos massivos e densos (como anãs brancas, estrelas de neutrões, buracos negros,...) são acelerados e colidem em eventos cataclísmicos. O Universo não é um lugar tranquilo: grandes quantidades de energia são libertadas num curto espaço de tempo, quando os corpos celestes se fundem ou explodem. Em relação à primeira detecção, GW150914, estimou-se que durante o choque final entre os buracos negros do binário, seria emitida na forma de radiação gravitacional, e em poucos milissegundos, a energia equivalente a 3 massas solares. Para colocar isto em contexto, o Sol continuará a irradiar ondas eletromagnéticas por cerca de 5 mil milhões de anos, mas este evento emitiu três sóis de energia num milésimo de segundo!

As ondas gravitacionais distorcem o próprio espaço-tempo, comprimindo e alongando a separação entre os objetos; mas a sua amplitude e, portanto, o seu efeito diminuem com a distância da fonte. Quanto mais longe estivermos da fonte, mais fracas serão as ondas quando nos alcançarem.

Quando atingem a Terra, os detectores devem ser capazes de medir alterações no comprimento dos seus dois braços do tamanho de um núcleo atómico. E os braços têm 3-4 quilómetros de comprimento - Figura 2. Como medir estas alterações? Uma régua colocada ao lado do braço seria inútil, pois seria distorcida pela onda que passa da mesma maneira que o braço, uma vez que a onda afeta o próprio espaço-tempo. Então, como é que as ondas gravitacionais são detectadas pelos detectores LIGO e Virgo (e KAGRA)? Mesmo que não possamos medir distâncias oscilantes com réguas, podemos calcular o tempo que a luz leva para viajar de uma fonte localizada numa extremidade dos braços, até um espelho localizada na outra extremidade dos braços, e depois a retornar, levando em consideração que a velocidade da luz no vácuo é uma constante da Natureza e não é afetada pelo campo gravitacional, um axioma da Relatividade Geral. Se a distância for modificada pela onda, o tempo total de viagem também será alterado.

Para realizar tal tarefa, os físicos de ondas gravitacionais do LIGO-Virgo-KAGRA empregam lasers extremamente estáveis e poderosos e espelhos excepcionalmente polidos. Os detetores têm dois braços ortogonais, formando um "L". O feixe de laser divide-se em dois e viaja pelos dois braços, que fazem um ângulo de 90°, para capturar todas as propriedades das ondas gravitacionais. Depois de viajar para frente e para trás, os dois feixes voltam a reunir-se num fotodetector e produzem um padrão de interferência, devido à sua natureza ondulatória. Os detectores são projetados de forma que a amplitude da luz seja completamente anulada ao atingir o fotodetector. Estes detetores de ondas gravitacionais são baseados no interferómetro de Michelson-Morley, usado pela primeira vez para estudar a existência de um hipotético éter, que refutaram, abrindo o caminho para Einstein formular a teoria da Relatividade restrita em 1905. O padrão de interferência depende da distância dos braços e se um sistema massivo emite ondas de grande amplitude que podem ser detectadas na Terra, o comprimento dos



Figura 2 - Um dos braços do detector de Virgo em Cascina, Itália.

braços irá oscilar com a amplitude e frequência da onda e o padrão de interferência mudará de acordo com a onda gravitacional. Com efeito, isto é o que se vê no sinal da Figura 1.

Embora o LIGO, Virgo e KAGRA (e GEO600, um detector menor localizado na Alemanha) sejam os únicos detectores de ondas gravitacionais ativos no momento, há mais que estão planejados para serem construídos. LIGO, Virgo e KAGRA são detectores terrestres de segunda geração, que coletam dados na Terra. Uma terceira geração (*Einstein Telescope*, *Cosmic Explorer*) está a ser projetada e deverá estar online em 2040-2050, aumentando a sensibilidade em algumas ordens de magnitude, o que significa tornar-se sensível a muito mais fontes de ondas gravitacionais. Além dos detectores baseados na Terra, um observatório no espaço será lançado em 2034: a *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA). Este detector consistirá em três naves equipadas com lasers formando um triângulo equilátero separado por 2,5 milhões de quilômetros! Um projeto tão desafiador deve ser capaz de detectar ondas gravitacionais de baixa frequência, que não são observáveis por detectores terrestres devido aos movimentos sísmicos da Terra. Ondas de baixa frequência são produzidas em binários de buracos negros supermassivos (com milhares ou até milhões de massas solares), mas também em binários de anãs brancas, revelando uma nova perspectiva do Universo. A detecção de ondas gravitacionais de frequência ultrabaixa também será possível com outro tipo de observações, como aquelas a decorrer pelo *Pulsar Timing Array*, uma técnica que se baseia na detecção de correlações nos tempo de chegada dos sinais eletromagnéticos emitidos pelos pulsares que estão correntemente a ser observados. Os pulsares são estrelas de nêutrons em rotação, que emitem pulsos regulares de ondas eletromagnéticas. Existe uma grande expectativa, e esperança, que estas observações diferentes e complementares lançarão luz sobre o lado escuro do Universo.

3. Olhando longamente para o abismo, ver-se-ão ondas gravitacionais

Por que é que as ondas gravitacionais são tão importantes para os físicos? O método científico requer que uma investigação possa ser repetida para confirmar as descobertas de qualquer investigador. No entanto, ao estudar o Universo, galáxias, estrelas, buracos negros, não é possível realizar experiências sobre eles, ao contrário doutros campos da física, como, por exemplo, aquelas realizadas em aceleradores de partículas ou noutros laboratórios. A única coisa que os físicos podem fazer é construir telescópios cada vez mais precisos, observar o céu e coletar dados, o que às vezes implica esperar longos períodos de tempo. No entanto, as informações que obtemos de todo o espectro eletromagnético (ondas rádio e microondas, luz e raios gama) podem ser in-

completas e não suficientes para compreender inteiramente o que estamos a observar. E pior ainda, não vemos alguns eventos porque o sistema é “escuro”! Os buracos negros não emitem fótons (as partículas que carregam a luz e, em geral, a interação eletromagnética), de modo que temos de inferir indiretamente a sua existência a partir da perturbação do movimento dos corpos celestes em seu redor. Na melhor das hipóteses, podemos observar sua “sombra” quando eles estão rodeados por discos de acreção luminosos, um marco incrível recentemente alcançado pela colaboração *Event Horizon Telescope* (EHT) [3] - [ver artigo de P. Cunha neste volume].

Os buracos negros interagem apenas por meio da gravidade; então qualquer dedução sobre sua natureza fundamental deve vir de medidas extremamente precisas da sua “sombra” ou da forma de ondas gravitacionais que carregam detalhes preciosos sobre o seu comportamento quando estão em sistemas binários, quando se fundem e, em particular, durante a fase da vibração final, pós-fusão, quando o buraco negro final relaxa para o equilíbrio (ringdown, em inglês). Após a formação de um buraco negro (do colapso estelar ou da coalescência de dois objetos compactos), ele ‘vibra’ enquanto relaxa para o estado de equilíbrio, pela emissão de ondas gravitacionais (a amplitude das oscilações diminui com o tempo). Este ringdown está intimamente ligado às propriedades do horizonte de eventos, a fronteira que separa o interior de um buraco negro (do qual nem mesmo a luz pode escapar) do resto do Universo. Portanto, se alguém pudesse observar a última parte do sinal da onda gravitacional com alta precisão, a verdadeira natureza dos buracos negros poderia, provavelmente, ser revelada, levantando o véu sobre questões fundamentais. Será que os buracos negros têm, realmente, um horizonte conforme descrito pela Relatividade Geral? Será que os efeitos da gravidade quântica desempenham um papel nessa delicada região do espaço-tempo? Neste contexto, as ondas gravitacionais são, talvez, a nossa melhor hipótese de obter indícios de que a Relatividade Geral não é realmente a teoria da gravidade definitiva, sugerindo que efeitos clássicos ou quânticos têm de ser introduzidos. Qualquer desvio medido das previsões da Relatividade Geral indicaria que modificações ou extensões da gravidade são necessárias para explicar tais eventos astrofísicos no regime de campo forte. Mas, até agora, a gravidade de Einstein passou em todos os testes com distinção e louvor.

4. Buracos negros no universo

Para além do potencial de descoberta relativamente à física gravitacional para além da Relatividade Geral usando ondas gravitacionais, este novo canal de acesso à realidade já nos está a permitir aprender muito sobre buracos negros astrofísicos e suas populações. Quando o LIGO e Virgo estavam a ser projetados, era comumente aceite que eles observariam principalmente fusões de estrelas de nêutrons; eventualmente, também, observariam uma fusão de buracos negros, mas antecipava-se que estes eventos não seriam os mais comuns a ser observados. Isto foi assumido a partir das observações das chamadas estrelas da sequência principal e pulsares.” Mas muitas vezes a realidade não se preocupa com as expectativas. De todos os 50 eventos detetados pelo LIGO-Virgo até agora, apenas cerca de 10 % envolvem uma estrela

de neutrões. O resto corresponde a fusões de buracos negros em sistemas binários com dezenas de massas solares; e até buracos negros com mais de uma centena de massas solares!

Os buracos negros astrofísicos podem ser classificados em três tipos diferentes: buracos negros de “massa estelar”, com massas entre 1 e 100 massas solares, formados muito provavelmente no colapso direto de estrelas massivas ou em fusões de buracos negros de baixa massa; buracos negros de “massa intermédia”, com centenas a centenas de milhares de massas solares, sendo o evento GW190521 a primeira observação direta de um buraco negro deste tipo [4]. Finalmente, temos monstros espreitando no centro das galáxias, os buracos negros “supermassivos”, com centenas de milhares a milhares de milhões de massas solares. A origem destes objetos gigantes ainda é uma questão de debate porque buracos negros extremamente supermassivos foram observados em galáxias muito jovens - [ver artigo de J. Afonso neste volume]. Alguns astrofísicos afirmam que eles deveriam originar do colapso gravitacional das primeiras estrelas supermassivas, formando sementes que mais tarde cresceram ‘devorando’ outras estrelas massivas ou buracos negros. Outra hipótese afirma que eles se formaram após múltiplas fusões de buracos negros em ambientes muito densos em aglomerados estelares densos. Detectar mais buracos negros de massa intermédia em eventos futuros pode ajudar a identificar o elo perdido entre os buracos negros de massa estelar e o crescimento de buracos negros supermassivos no centro das galáxias.

Uma outra lição, é que as deteções de ondas gravitacionais estão a provar que os buracos negros são mais comuns nas galáxias do que se pensava anteriormente. Portanto, os astrofísicos estão, agora, a perguntar-se qual poderia ser a origem destes buracos negros. Alguns investigadores propuseram que eles vêm de buracos negros “primordiais”: um tipo hipotético de buraco negro que se formou logo após o Big Bang devido a flutuações quânticas na densidade de

matéria-energia do Universo que então crescerá ‘comendo’ o material interestelar circundante e por fusões subsequentes. Os buracos negros primordiais foram propostos como candidatos para a misteriosa matéria escura, que constitui cerca de 27 % da energia total do Universo e cuja verdadeira natureza permanece desconhecida.

Finalmente, indo para além dos buracos negros, entramos no reino dos hipotéticos “objetos compactos exóticos”: por exemplo, estrelas de matéria escura, estrelas de bosões, estrelas de Proca, gravastars e muitos outros objectos que têm sido propostos pelos físicos teóricos, para resolver diversos problemas conceptuais mas, para os quais não existe ainda evidência observacional. Estes objectos são, frequentemente, chamados de “imitadores” de buracos negros; eles também interagem apenas por meio da gravidade e podem imitar parte das propriedades observacionais (ondas gravitacionais, sombras) dos buracos negros. Portanto, o que pensamos ser um buraco negro pode ser uma outra coisa, um objeto ainda mais estranho. Além disso, pode-se supor que se as partículas de matéria escura podem formar estrelas, invisíveis e transparentes à radiação eletromagnética, eventualmente será possível distingui-las de buracos negros usando deteções atuais ou futuras. Então, os observatórios de ondas gravitacionais poderiam até tornar-se “detetores de partículas” (!), ajudando a revelar, finalmente, a natureza da matéria escura. De fato, foi recentemente proposto que o evento de ondas gravitacionais GW190521 poderia ser a fusão de duas estrelas de Proca [5], objetos teóricos feitos de bosões also semelhantes às partículas W que aparecem na interação eletrofraca, mas que (praticamente) não interagem com os fótons e são extremamente leves, com uma massa de biliões de vezes menor que a massa do eletrão!



Figura 3 - Representação artística de uma colisão estelar Proca. Credit: Nicolas Sanchis-Gual, Rocío García-Souto

Estes bosões são partículas com propriedades quânticas diferentes das do elétron, próton ou neutrão. E estas partículas ultraleves são impossíveis de observar em aceleradores de partículas como o Large Hadron Collider (LHC) no CERN, tornando as observações astrofísicas, em particular de ondas gravitacionais, a única maneira de as detetar.

Está a tornar-se cada vez mais claro que a era da astronomia de ondas gravitacionais, juntamente com a imagem da “sombra” de buracos negros supermassivos pelo EHT, estão a abrir uma nova janela para o regime de campo forte da gravidade. Podemos agora testar o limite da teoria da Relatividade Geral de Einstein; podemos descobrir fenómenos novos e inesperados; podemos aprender sobre o interior das estrelas de neutrões; podemos observar novos tipos de buracos negros, novos objetos e até, eventualmente, novas partículas. É tudo apenas uma questão de tempo ... e espaço.

Agradecimentos

Agradeço a Miguel Ángel Sanchis-Lozano pela revisão do artigo e a Carlos Herdeiro pela revisão e tradução para o português.

Referências

- [1] Abbott, B. P., et al (LIGO-Virgo collaboration) (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical review letters*, 116(6), 061102.
- [2] Abbott, B. P., et al (LIGO-Virgo collaboration) (2017). GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical review letters*, 119(16), 161101.
- [3] Akiyama, K., et al (EHT collaboration). (2019). First M87 event horizon telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L4.
- [4] Abbott, R., et al (LIGO-Virgo collaboration) (2020). GW190521: A binary black hole merger with a total mass of 150 M_{\odot} . *Physical review letters*, 125(10), 101102.
- [5] Bustillo, J. C., et al (2021). GW190521 as a Merger of Proca Stars: A Potential New Vector Boson of 8.7×10^{-13} eV. *Physical Review Letters*, 126(8), 081101.



Nicolas Sanchis-Gual, nasceu em Valência (Espanha) em 1990 e recebeu seu doutoramento pela Universidade de Valência (UV) em 2018. A sua tese foi sobre relatividade numérica, campos bosónicos e objetos compactos, e ganhou um dos dois prémios para a melhor tese em física do ano concedido pela UV. Nos últimos anos tem sido investigador de pós-doutoramento no Centro Multidisciplinar de Astrofísica (CENTRA) do Instituto Superior Técnico e na Universidade de Aveiro. Desde 2016 é membro da colaboração LIGO-Virgo-KAGRA através do grupo da U. Valência da colaboração Virgo. Publicou cerca de 100 artigos sobre relatividade geral, ondas gravitacionais, buracos negros, estrelas de neutrões e estrelas de bosões, com mais de 15.000 citações.

O futuro em física de buracos negros

Vítor Cardoso^{1,2}

¹ Centro de Astrofísica e Gravitação - CENTRA, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico – IST, Universidade de Lisboa - UL, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

² Niels Bohr International Academy, Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, 2100 Copenhagen, Denmark

vitor.cardoso[at]tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Analisamos o futuro da física de buracos negros.

1. Introdução

Os buracos negros são objetos extraordinários, nas suas várias facetas. Em primeiro lugar, porque são feitos apenas de espaço-tempo. É o próprio vácuo, curvado sobre si mesmo, que os constitui. Apesar do seu nascimento ser causado pelo colapso de uma estrela, o material da estrela progenitora está para lá do horizonte de eventos. O que fica no exterior é a geometria mais simples possível. De facto, um dos resultados mais importantes em física de buracos negros diz respeito à unicidade da sua geometria: em situações de equilíbrio, a massa, carga elétrica e a rotação do buraco negro são suficientes para caracterizar toda a geometria exterior. Este resultado é impressionante quando comparado com a complexidade do planeta Terra ou de um único ser vivo. Não existem montanhas em buracos negros. É costume dizer-se que os buracos negros não têm “cabelo”, onde “cabelo” representa a informação que normalmente associamos a objetos terrestres.

O outro resultado fundamental está relacionado com o interior de buracos negros, que aloja singularidades, na descrição da Relatividade Geral. Este é um resultado geral e poderoso, e implica que i. a matéria se comporta de forma muito exótica, ou ii. o espaço-tempo está “incompleto”, ou iii. efeitos quânticos tornam-se importantes (isto é a descrição clássica deve ser abandonada). Este resultado foi produzido por Penrose, que imediatamente reconheceu o problema fundamental associado: se o colapso gravitacional produz singularidades, e estas traduzem o falhanço da teoria naquelas regiões, deve haver um mecanismo que nos proteja destas falhas, ou a teoria torna-se inútil. O horizonte que define a presença de buracos negros é um “mecanismo de defesa” da teoria, dado que um observador no exterior está causalmente desconectado do interior. Esta situação leva-nos naturalmente a conjecturar um censor cósmico, uma propriedade intrínseca às equações diferenciais parciais da teoria que produza horizontes sempre que produz singularidades. Não sabemos se este mecanismo é realmente genérico. Esta é a conjectura da censura cósmica e permanece sem resposta definitiva.

2. Buracos negros: o laboratório cósmico perfeito

A simplicidade dos buracos negros isolados, juntamente com a singularidade (a nível clássico) que aprisionam no interior fazem dos

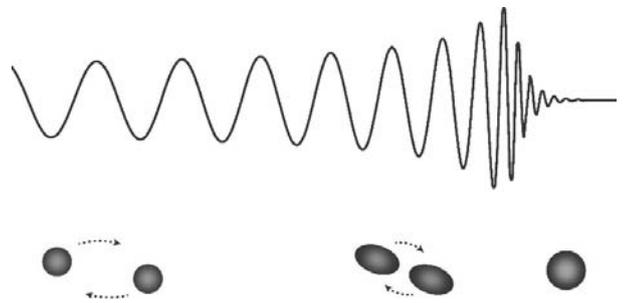


Figura 1 - A evolução de um sistema binário de buracos negros emitindo ondas gravitacionais. Este é o sistema binário astronómico mais simples possível, e um laboratório perfeito para procurar nova física. Quando um sistema binário de buracos negros emite ondas gravitacionais, perde energia e fica mais compacto: a sua velocidade aumenta e a sua separação diminui. Esta evolução reflecte-se na amplitude da onda gravitacional emitida, mostrada aqui, cuja frequência e amplitude também aumentam. Finalmente, os corpos chocam e formam um único buraco negro. A emissão de ondas cessa rapidamente a partir desse instante.

buracos negros os objetos mais importantes para o futuro da física. Se escondem o falhanço da teoria, é também possível (ou provável) que deixem vestígios da descrição correcta da gravidade no exterior. Cabe às observações procurar estes indícios e acumular evidência observacional.

É nas observações que a sua simplicidade é fundamental. Para estudarmos os buracos negros temos que saber isolar o fenómeno que procuramos. Em ambientes astrofísicos, a ignorância quanto ao meio envolvente é grande, dado que existem campos magnéticos, matéria interestelar, discos de acreção, etc. Este ambiente contamina observações eletromagnéticas. Mas os buracos negros são intrinsecamente curvatura de espaço-tempo, e geram ondas gravitacionais quando se encontram em sistemas binários. Uma ilustração desse processo é apresentada na figura 1.

Para objectos normais, a presença de uma companheira faz com que a órbita seja elíptica, e faz com que cada corpo seja deformado por forças de maré. Contudo, um aspecto interessante das ondas gravitacionais é que circularizam as órbitas: nos estágios finais da vida de um sistema binário a órbita é praticamente circular. A esta propriedade acresce uma das previsões da teoria da Relatividade Ge-

ral: buracos negros são deformados por forças de maré, mas o seu campo gravitacional não é afetado. Por outras palavras, buracos negros isolados são os objectos astrofísicos mais simples, e sistemas binários de buracos negros são os sistemas binários mais simples.

3. O futuro

A simplicidade de sistemas binários de buracos negros torna relativamente fácil procurar por ondas gravitacionais vindas destes sistemas, e torna particularmente simples usar estes sinais para testar as nossas teorias. Em linhas gerais, todos os testes baseados em detecção de ondas gravitacionais consistem em procurar desvios ao sinal da figura 1. A precisão com que conseguimos fazer a busca de novos fenómenos é, claro, limitada pelo detetor em si. Felizmente, nas próximas duas décadas estão previstos avanços significativos, como a construção de versões avançadas dos detectores LIGO/Virgo na superfície terrestre. Estamos a falar do Einstein Telescope na Europa, ou do Cosmic Explorer nos Estados Unidos, mas é possível que entretanto novas tecnologias permitam detectores mais versáteis.

Em 2034-2040, a Agência Espacial Europeia planeia lançar a experiência LISA (do inglês Laser Interferometer Space Antenna). A LISA será um interferómetro no espaço, constituído por 3 satélites a orbitar a Terra, à mesma distância desta que do Sol. As vantagens de ter um instrumento destes são óbvias. No espaço não há ruído sísmico. Para além disso, o próprio espaço é vácuo pelo que os braços do interferómetro não têm que ser construídos fisicamente, o que permite que sejam muito mais compridos. Em vez de 4 quilómetros, estes satélites vão estar separados por milhões de quilómetros, formando um triângulo equilátero. Os satélites funcionam como os espelhos do interferómetro de Michelson-Morley, e entre eles estarão a ser emitidos lasers, para monitorizar as variações na distância entre os satélites. Estes braços tão longos tornam o interferómetro sensível a frequências mais baixas, o que permite detectar um sistema binário muito mais cedo no seu processo de evolução e por isso acompanhá-las durante muito mais tempo. Tendo um sinal mais limpo (porque há menos ruído) e muito mais longo irá permitir fazer testes muito mais precisos à relatividade geral.

O certo é que a astronomia de ondas gravitacionais ou multimessageira é o futuro da física, por muitos motivos. A física de partículas tal como a conhecíamos - que nos deu tantas e boas descobertas - quase que saturou os limites de energia, de preço e capacidade para revolucionar. Mas o cosmos está cheio de aceleradores de partículas, e de reservatórios de energia. É aí que devemos procurar o desconhecido.

Uma das primeiras questões que temos que responder diz respeito à origem dos buracos negros que vemos. Como é que nasceram e cresceram? Como é que um buraco negro - como o que está no centro da nossa galáxia - evoluiu até ter uma massa equivalente a quatro milhões de sóis? É possível que alguns dos buracos negros que vemos sejam primordiais, nascidos no início do Universo, e se sim, o que nos podem dizer sobre essa fase? Até

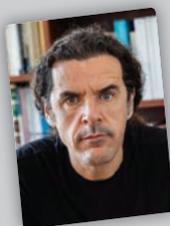
que ponto é que um buraco negro supermassivo é responsável pela dinâmica na galáxia hospedeira, ou pela formação de novas estrelas? Parte da resposta a esta pergunta exige saber quantos buracos negros supermassivos existem e quantos estão em processo de colisão, algo que as ondas gravitacionais nos vão dizer.

A formação de estrutura, como as galáxias, requer a existência de um tipo de matéria escura. Depois de décadas a tentar perceber a constituição desta matéria, ainda não sabemos nada. Ora, a evolução de um sistema binário, isto é, o sinal da figura 1, depende do meio onde ela está. Se houver muita matéria escura, o sistema binário “come” parte dela e sofre atrito ao puxar gravitacionalmente todo esse material. Quando isso acontece, a onda gravitacional produzida é ligeiramente diferente, e podemos por isso impôr pelo menos alguns limites à distribuição de matéria escura no cosmos. Se a matéria escura for feita de partículas extremamente leves, é até possível que estas se aglomerem em redor dos buracos negros e induzam emissão periódica de ondas gravitacionais. Buracos negros vão ser usados como detectores de partículas, uma aplicação extraordinária para estes objetos astrofísicos.

O sinal emitido por um sistema binário de buracos negros está representado na figura 1, e depende apenas da teoria. Isto é, se a Relatividade Geral de Einstein for a descrição correcta da interacção gravitacional, então é aquele sinal que devemos ver. Mas sabemos que a teoria falha no interior de buracos negros, portanto é possível que o sinal que chega aos detectores seja ligeiramente diferente, e temos que estar preparados para isto. Será que os buracos negros são mesmo tão simples como a teoria prevê? Que alteração à figura 1 é que podemos esperar se eles forem mais complexos?

E qual a evidência que temos que estamos realmente a olhar para ondas gravitacionais emitidas por buracos negros? Nós vimos mesmo buracos negros? Apenas uma análise detalhada do sinal gravitacional nos pode responder a isto. Mas precisamos também de conhecer bem a teoria por trás e precisamos de estudar as alternativas, precisamos de estar preparados. Mas não conseguimos prever o imprevisível. É possível que vejamos fenómenos inesperados.

A lista acima é uma parte ínfima do que vamos fazer no futuro, mas ilustra a riqueza que a física dos buracos negros e ondas gravitacionais trará nas próximas décadas.



Vitor Cardoso, é Professor Catedrático e Presidente do Departamento de Física do Instituto Superior Técnico. É também Villum Investigator no Instituto Niels Bohr em Copenhaga. Os seus interesses de investigação incidem sobre astrofísica e gravitação, em particular ondas gravitacionais e buracos negros e a física do espaço. É autor de um livro e de cerca de 200 artigos publicados em revistas internacionais. A sua investigação foi distinguida duas vezes pelo European Research Council. Em 2015 foi agraciado pelo Presidente da República com a Ordem de Santiago D'Espada, pelas suas contribuições para a ciência. É membro fundador da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação.

Os prémios Nobel de física para astrofísica e gravitação e o prémio Nobel para buracos negros: Passado, presente e futuro

José P. S. Lemos¹

¹ Centro de Astrofísica e Gravitação - CENTRA, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico - IST, Universidade de Lisboa - UL, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa,

joselemos@ist.utl.pt

Resumo

Analisamos os prémios Nobel de física para a astrofísica e a gravitação desde a criação do prémio e destacamos o prémio Nobel de física 2020 para buracos negros. Comentamos sobre nomes que poderiam ter ganhado o prémio em astrofísica e gravitação e especulamos sobre futuros ramos destas áreas da física que poderão ser contemplados com o prémio Nobel.

1. Introdução

O prémio Nobel de física, outorgado pela Academia Real de Ciências Sueca a cientistas e a trabalhos excepcionais, iniciou-se em 1901, tendo nesse ano sido atribuído a Röntgen, um físico alemão, pela “descoberta dos notáveis raios aos quais foi subsequentemente dado o seu nome” (texto entre aspas significa uma tradução livre da declaração em inglês do comité Nobel). Estes raios, conhecidos como raios X, são radiação eletromagnética de alta energia. O prémio é concedido anualmente e até aos dias de hoje várias áreas da física tiveram o privilégio de serem agraciadas com essa magnífica distinção.

O principal critério para o prémio Nobel de física é de que as obras e as proezas científicas a serem consideradas tenham sido testadas ao longo do tempo. Na prática, isto significa que trabalhos experimentais definitivamente comprovados que levaram ao progresso da física e trabalhos teóricos pioneiros e testados experimentalmente podem aspirar ao prémio. Especulação pura por si só, por mais interessante que possa ser, não se ajusta a este critério do prémio e não é considerada.

O trabalho de seleção é muito criterioso. Envolve a Academia Real de Ciências Sueca que elege o comité Nobel para a física, composto por cinco pessoas, que por sua vez recebe propostas de candidaturas de anteriores galardoados com o prémio Nobel e de outros cientistas. Depois de selecionar dez candidaturas, o comité propõe-nas à Academia que, após as reuniões necessárias, vota nos pre-

miados daquele ano. Pode haver no máximo três recipientes por ano.

Esta combinação de confirmação da obra com o tempo, do trabalho laborioso e exaustivo do comité e da Academia e de existirem no máximo três recipientes, é muito poderosa e fazem do prémio Nobel de física, de longe, o prémio mais importante em física. O prémio Nobel de física, para lá de um prémio para físicos excepcionais, é um prémio para a física como ciência, e quem o recebe tem essa afortunada felicidade.

Dentro das várias áreas da física, estamos interessados nas áreas de astrofísica e gravitação que são duas áreas da física estritamente interligadas. Um exemplo dessa interligação é a cosmologia, a ciência do Universo, que usa a astrofísica para explicar a física dos fenómenos relevantes e serve-se da gravitação para elucidar a dinâmica global do espaço-tempo. Outro exemplo dessa interligação entre as duas áreas é o buraco negro, um objeto com a sua existência comprovada através de observações e interpretações provenientes da astrofísica e também produto de especulação pura dentro da gravitação, em particular dentro da teoria da Relatividade Geral.

Vamos descrever e analisar a quem e por quais obras foi atribuído, ao longo dos tempos, o prémio Nobel de física em astrofísica e gravitação, incluindo e realçando a distinção de 2020 para buracos negros. Comentamos também sobre possíveis premiados que por uma razão ou por outra não foram condecorados com esse consagrado prémio da Academia. Além disso, especulamos sobre os possíveis ramos da astrofísica e gravitação que poderão futuramente obter prémios Nobel.

2. O prémio Nobel de física para a astrofísica e a gravitação desde a criação do prémio até 2019

2.1 Os premiados

Astrofísica e gravitação são dois ramos da física vastos e intimamente interligados desde que Newton descobriu que a gravitação era universal, ligando definitivamente os céus à Terra e, mostrando um Universo unificado em que tudo obedecia às mesmas leis da física. O prémio Nobel inaugural atribuído a Röntgen pela descoberta dos raios X não é certamente um prémio nem para a astrofísica nem para a gravitação, embora os raios X tenham se tornado uma janela de observação extremamente importante em astrofísica. Os prémios Nobel atribuídos diretamente para a astrofísica e gravitação são vários. Vejamos quais são, fornecendo a data de atribuição do prémio, o nome dos premiados, fazendo um resumo do texto fornecido pelo comité Nobel da Academia Real de Ciências Sueca, e fazendo alguns comentários sob os trabalhos correspondentes e relacionados realizados.

Einstein - “Por serviços à física teórica e especialmente à descoberta da lei do efeito fotoelétrico”. É prática comum afirmar que Einstein foi premiado pela explicação do efeito fotoelétrico, mas o comunicado do comité Nobel diz muito mais do que isso, refere-se explicitamente aos serviços prestados à física teórica. Os serviços de Einstein realizados em física teórica são muitos, e claramente podemos incluir nestes serviços a criação das teorias restrita e geral da relatividade. A Relatividade Geral é a teoria da gravitação que sucedeu à teoria da gravitação de Newton e por isso este prémio para a física teórica é também para a gravitação.

1967 Bethe - “Pela descoberta das reações nucleares e a produção de energia nas estrelas”. Bethe era um físico alemão que se radicou nos Estados Unidos. Um problema levantado por Eddington, célebre astrofísico inglês, era o de resolver a geração de energia no centro de uma estrela, em que o Sol era um exemplo. Admitia-se que essa energia provinha de reações nucleares, possivelmente da transformação de quatro prótons num núcleo de hélio. Os complicados detalhes dessas reações que ocorrem no centro das estrelas foi resolvido em 1939 por Bethe quando ele já estava em Cornell. Este é um Nobel para a astrofísica e a física nuclear conjuntamente.

1974 Ryle; Hewish – Para Ryle “pelas observações e invenções em radioastrofísica” e para Hewish “pela descoberta dos pulsares”. Ryle era um astrofísico inglês de Cambridge que desenvolveu um sistema de antenas para observações em ondas rádio e mostrou em 1960 que galáxias distantes, e por isso mais jovens, eram diferentes das galáxias perto, e por isso mais velhas, tendo este facto, por um lado, ajudado a corroborar a veracidade de

uma cosmologia de um universo em expansão e em transformação, e, por outro, lado tendo sido um dos primeiros argumentos de peso a demonstrar que a teoria cosmológica de um universo de estado estacionário, de Bondi, Gold e Hoyle, astrofísicos teóricos também baseados em Cambridge, estava errada, ou melhor, não era compatível com o nosso Universo. Hewish, um astrofísico inglês também de Cambridge, a trabalhar em radioastronomia na unidade de Ryle, descobriu em 1967 o primeiro pulsar através da detecção de pulsos rápidos de ondas na frequência rádio provenientes do céu. A sua aluna de doutoramento Jocelyn Bell estava ao comando dos instrumentos quando o sinal chegou e reconhecendo, ao analisar os registos, que era um sinal novo e possivelmente importante apresentou-o a Hewish e ao grupo de imediato. Logo depois foi mostrado por Gold, físico de Cambridge e da Universidade de Cornell, e por outros físicos, que pulsares eram estrelas de neutrões em alta rotação, estrelas de uma massa solar, de raio muito pequeno de 10 km, e formadas essencialmente por neutrões. Estrelas de neutrões tinham sido especuladas existirem por Zwicky, um astrofísico suíço a trabalhar no Caltech, em 1934, como estrelas que ficavam no centro da explosão de uma supernova. Este é um Nobel para a astrofísica.

1978 Penzias e Wilson - “Pela descoberta da radiação cósmica de fundo de microondas”. Penzias, nascido na Alemanha e baseado nos EUA e Wilson, físico americano com formação no Caltech, tinham feito os seus doutoramentos em física de microondas e radioastronomia e trabalhavam nas antenas rádio dos laboratórios Bell, em New Jersey. Em 1965, detectaram a radiação cósmica de fundo na faixa de microondas, a qual tinha uma temperatura de 2.7 K. Esta radiação cósmica tinha sido prevista em 1948 por Alpher e Herman, físicos americanos discípulos de Gamow, dentro do modelo de Big Bang do próprio Gamow, um físico russo radicado nos Estados Unidos da América. A deteção dos afortunados Penzias e Wilson foi por acaso, eles não sabiam a origem da radiação detetada. Por coincidência, Dicke, um físico americano versado tanto em física teórica como em física experimental, e o seu grupo que incluía Peebles em Princeton, vizinhos dos laboratórios Bell, estavam à procura dessa deteção e interpretaram imediatamente a radiação detetada como sendo a radiação de fundo cósmico. Assim, esta deteção, que poderia ter ficado perdida sem nenhuma explicação, foi de imediato esclarecida e, com isso, o Big Bang como modelo do Universo tinha sido comprovado em definitivo. Pode-se argumentar que é estranho Penzias e Wilson terem recebido o prémio por uma descoberta que eles não faziam a menor ideia o que era, mas o facto é que é uma descoberta de primeira grandeza feita pelos dois e como tal está dentro dos critérios do prémio Nobel. A situação do prémio inaugural em 1901 é idêntica. Röntgen não fazia ideia que raios ele tinha descoberto, somente mais tarde se inferiu que era radiação eletromagnética de alta energia, e ninguém, ou melhor quase ninguém, sabe quem fez essa inferência. De qualquer maneira, em 2023, os arquivos do prémio Nobel de 1978 ficarão disponíveis para consulta e poderemos perceber melhor os argumentos adiantados para esta in-

dicação. Este é um Nobel para a astrofísica e gravitação, mais precisamente para a cosmologia que é um exemplo da interligação destas duas áreas científicas. Esta foi a metade do prémio Nobel de 1978, a outra metade foi para Kapitsa um físico soviético de física de baixas temperaturas.

1983 Chandrasekhar; Fowler - Para Chandrasekhar “pelos seus estudos teóricos dos importantes processos físicos para a estrutura e evolução das estrelas” e para Fowler “pelos seus estudos teóricos e experimentais das reações nucleares importantes na formação dos elementos químicos no universo”. Chandrasekhar, nasceu na Índia, e ainda jovem foi para Cambridge, onde na década de 1930 desenvolveu um trabalho notável na estrutura das estrelas anãs brancas, tendo descoberto com precisão qual a massa máxima dessas estrelas, ou seja a massa a partir do qual colapso gravitacional é inevitável. Essa massa é de 1,4 massas solares. Teve muitos outros trabalhos importantes em astrofísica e gravitação. Num deles, em 1942, em colaboração com Mário Shenberg, físico brasileiro, quando este estava em Chicago onde Chandrasekhar se instalou, foi encontrada uma massa máxima para a parte central em equilíbrio isotérmico de uma estrela gigante vermelha, denominada de limite Schönberg-Chandrasekhar, a partir da qual esse centro encolhe sob o próprio peso, aumentando a sua temperatura e iniciando a queima do hélio existente. Fowler, um físico americano do Caltech, era um especialista em física nuclear teórica e experimental. Num artigo de 1957 do casal de físicos ingleses Burbidge e Burbidge, Fowler e Hoyle, conhecido como o B²FH, foi mostrado que todos os elementos químicos mais pesados que o hélio são gerados no centro das estrelas. Este é um Nobel para a astrofísica e gravitação pelo lado de Chandrasekhar e é um Nobel para a astrofísica e física nuclear pelo lado de Fowler.

1993 Hulse e Taylor - “Pela descoberta de um novo tipo de pulsar, uma descoberta que abriu novas possibilidades para o estudo da gravitação”. Taylor, um astrofísico americano, e Hulse, americano e estudante de doutoramento, descobriram em 1974 o pulsar binário constituído por um pulsar e uma estrela de neutrões próximos um do outro em órbita conjunta. Este sistema binário de estrelas compactas possibilitou a dedução de muitas das suas propriedades físicas. Em particular, a diminuição do raio da órbita com o tempo do sistema binário está de acordo com a previsão da relatividade geral levando em conta a perda de energia por radiação gravitacional prevista pela teoria. É a primeira comprovação da existência de ondas gravitacionais, embora indireta. Este é um Nobel para a gravitação através da astrofísica.

2002 Davis, Koshiba; Giacconi – Para Davis e Koshiba “pelas contribuições pioneiras à astrofísica, em particular pela detecção de neutrinos” e para Giacconi “pelas contribuições pioneiras à astrofísica, que levou à descoberta de fontes de raios-X cósmicas”. Davis, um físico americano, e Koshiba, um físico japonês, prepararam experiências sofisticadas na década de 1960 em que detectaram pela primeira vez neutrinos provenientes do centro do Sol, sendo uma prova direta crucial da existência das reações nucleares aí existentes. No entanto, o fluxo de neutrinos recebido era um terço do fluxo calculado pelas teorias de estrutura

de estrelas e de partículas elementares. Esta discrepância abriu uma nova linha de investigação em física de neutrinos e levou à descoberta experimental que os neutrinos têm massa, embora muito pequena, e em voo oscilam mudando de identidade entre si, os detetores originais só estavam aptos a perceber uma das identidades. Pela resolução do problema, Kajita, físico japonês, e McDonald, físico canadiano, receberam o prémio Nobel de física de 2015. Giacconi, um físico italiano, que trabalhou em vários projetos na Europa e nos Estados Unidos da América foi um dos precursores na construção de detetores, ou telescópios, de raios X, os tais raios de Röntgen. Estes detetores têm que estar em satélites em órbita para evitar a atmosfera da Terra que é opaca a raios X. Um satélite explorador com um detetor de raios X a bordo, o Uhuru, foi lançado para o espaço em 1970. Uma das fontes de raios X, chamada de Cisne X1, que tinha sido identificada na constelação do Cisne em 1964 por um satélite antecessor, foi alvo de observações especiais pelo satélite Uhuru. A intensidade dos raios X sofria alterações rápidas o que, devido ao valor finito da velocidade da luz, significava um objeto muito compacto. Estudos adicionais mostraram que a fonte era composta por um sistema binário, com um dos objetos sendo uma estrela gigante azul com massa de 30 massas solares e o outro objeto sendo muito compacto com massa de cerca de 20 massas solares, só podendo ser um buraco negro, o primeiro buraco negro estelar a ser identificado. Os raios X observados são gerados pela colisão da matéria proveniente da estrela gigante com a matéria num disco em órbita em torno do buraco negro. Este é um Nobel para a astrofísica e para as partículas elementares pelo lado de Davis e Koshiba e é um Nobel para a astrofísica, gravitação e outras áreas da física pelo lado de Giacconi.

2006 Mather e Smoot – “Pela descoberta da forma e anisotropia da radiação cósmica de fundo de microondas”. Mather, um físico americano, especialista em instrumentação e radiação cósmica de fundo e Smoot, um físico americano, especialista em instrumentação, física de partículas e astrofísica, ambos de Berkeley, estiveram à frente da ciência do satélite COBE, acrónimo em inglês para Cosmic Background Explorer. Depois da deteção espetacular em circunstâncias inusitadas da radiação cósmica de fundo queriam-se detalhes físicos dessa radiação. No universo primordial radiação e matéria estavam em equilíbrio térmico tendo essa radiação um espectro característico de corpo negro, até que, devido à expansão do Universo, a radiação desacoplou da matéria tendo nesse momento congelado esse espectro. Por isso, a radiação detetada deveria ter um espectro de corpo negro, a assinatura do equilíbrio térmico inicial. Além disso, no universo primordial havia flutuações de densidade na matéria e por isso flutuações de temperatura

na radiação. Seriam essas flutuações que teriam dado origem às galáxias. No momento de desacoplamento, essas flutuações ficaram gravadas na temperatura da radiação, um ponto no céu deveria ter uma temperatura diferente de um outro ponto do céu vizinho. Mather, responsável pela forma do espectro da radiação cósmica de fundo, obteve uma forma perfeita de corpo negro e Smoot, responsável pelas medições das flutuações de temperatura, obteve flutuações nessa temperatura de uma parte em 10^5 , que era o valor esperado e que muitos outros antes dele tentaram encontrar e não conseguiram. Este é um Nobel para a astrofísica e gravitação, mais precisamente para a cosmologia que é um exemplo da interligação destas duas áreas científicas.

2011 Perlmutter, Schmidt e Riess – “Pela descoberta da expansão acelerada do Universo através da observação de supernovas distantes”. Perlmutter é um físico americano baseado em Berkeley, Schmidt é um físico americano baseado na Austrália e Riess é um físico americano baseado na Universidade John Hopkins. Desde a descoberta da relação linear para galáxias do desvio para o vermelho em função da distância por Hubble em 1929 que se queria saber se a linearidade mudava com a distância e, se sim, para que lado da reta haveria a mudança na lei. Se mudasse para um lado significaria que o Universo estaria a desacelerar, se mudasse para o outro significaria que o Universo estaria a acelerar. Nos anos 1990 Perlmutter percebeu que as supernovas tipo Ia, que são estrelas que explodem logo após atingirem o limite de Chandrasekhar por extração de matéria da estrela companheira, se bem utilizadas, serviriam como velas padrão e por isso seriam excelentes medidas de distâncias longínquas pois o seu brilho é enorme. Em 1998, depois de um esforço grande para obter tempo de telescópio em todos os lugares do mundo, Perlmutter anunciou que a expansão do Universo é acelerada. Schmidt e Riess, num projeto semelhante e paralelo, descobriram concomitantemente a expansão acelerada do Universo. Uma explicação física desta expansão acelerada do Universo requer uma constante cosmológica ou uma outra forma de energia escura possivelmente associada à energia do vácuo, assunto que tem estimulado investigação intensa nas áreas de gravitação, teoria quântica de campos e física de partículas elementares. Esta última tem sido de enorme importância em cosmologia, na explicação dos fenómenos físicos do universo primordial desde que se percebeu em 1973, através do trabalho dos físicos americanos Politzer, Gross e Wilczek, contemplados com o prémio Nobel de 2004, que a interação forte é assintoticamente livre e por isso as três interações fundamentais, a saber, a eletromagnética, a fraca e a forte, podem se juntar numa teoria de grande unificação a uma dada escala de energia alta, mas um pouco mais baixa do que a escala de energia de Planck, a maior escala

elementar de energia possível. Este é um Nobel para a astrofísica e gravitação, mais precisamente para a cosmologia que é um exemplo da interligação destas duas áreas científicas.

2017 Weiss, Barish e Thorne - “Por contribuições decisivas para o detector LIGO e a observação de ondas gravitacionais”. Weiss, nascido na Alemanha e radicado nos Estados Unidos da América, especificamente no MIT, Barish, físico de partículas americano habituado a lidar com grandes colaborações e Thorne, um físico teórico do Caltech, aluno de Wheeler em Princeton, lideraram o projeto LIGO, sigla em inglês para Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. Weiss na década de 1960 percebeu que um interferómetro de laser seria o aparelho perfeito para detectar ondas gravitacionais e construiu vários pequenos protótipos de forma a aprimorar o seu funcionamento. Thorne, especialista em buracos negros e ondas gravitacionais, desenvolveu a teoria de ondas gravitacionais numa forma sistemática e nos anos de 1970 juntou-se com Weiss para criarem o projeto LIGO. No final da década de 1990, Barish tornou-se o novo diretor do LIGO, supervisionando a montagem dos dois interferómetros, um no estado de Washington, o outro no estado da Louisiana, separados por 3000 km. No dia 14 de Setembro de 2015 os dois interferómetros laser, vibraram da mesma maneira com um intervalo de aproximadamente 1 centésimo de segundo como consequência da passagem de uma onda gravitacional pela Terra. Os dados colhidos pelos aparelhos mostraram que essa onda tinha sido gerada pela colisão, a distâncias cosmológicas, de dois buracos negros de 30 massas solares cada um. Foi a primeira vez que a humanidade detectou ondas gravitacionais. Agora faz-se astronomia e astrofísica com ondas gravitacionais. Este é um Nobel para a gravitação.

2019 Peebles; Mayor e Queloz - “Pelas contribuições para a nossa compreensão da evolução do Universo e do lugar da Terra no cosmos com metade do prémio para Jim Peebles por descobertas teóricas em cosmologia física e a outra metade em conjunto para Michel Mayor e Didier Queloz pela descoberta de um exoplaneta em órbita de uma estrela tipo solar”. Peebles, nascido no Canadá e radicado em Princeton, pertencia ao grupo original de cosmologia de Dicke na década de 1960, sendo um dos autores do artigo de 1965 sobre radiação cósmica de fundo que acompanha o artigo de Penzias e Wilson. Peebles desenvolveu a cosmologia física de forma rigorosa. Entre várias contribuições importantes, mostrou a física que se poderia extrair da radiação cósmica de fundo e a importância da matéria escura na formação de galáxias. Mayor e Queloz, dois astrofísicos suíços baseados em Genebra, descobriram pela primeira vez um planeta fora do sistema solar numa estrela tipo Sol. Atualmente são conhecidos cerca de cinco mil exoplanetas e outros tantos candidatos à espera de aprovação. Este é um Nobel para a astrofísica e gravitação, mais precisamente para a cosmologia que é um exemplo da interligação destas duas áreas científicas, pelo lado de Peebles e é um Nobel para a astrofísica pelo lado de Mayor e Queloz.

2.2 Os que poderiam ter sido premiados

É de interesse indicar e comentar sobre aqueles que poderiam ter sido galardoados com o prémio Nobel de física em

astrofísica e gravitação e que por alguma razão o comité Nobel e a Real Academia de Ciências Sueca não os colocaram na lista prioritária máxima.

Eddington, o grande astrofísico inglês de Cambridge, foi o primeiro a perceber por volta de 1920 o interior das estrelas através de um modelo simples e eficaz que permitia obter a temperatura e a densidade no centro de uma estrela. Percebeu também que a energia gerada no interior de uma estrela tinha de ser subatómica, ou seja, teria de ser energia nuclear, assunto que foi confirmado quando Bethe encontrou as reações nucleares de geração de energia no centro da estrela, tendo com isso sido premiado com o Nobel como mencionado acima. Eddington deu muitas outras contribuições, nomeadamente, à física e astronomia galáctica, à comprovação da relatividade geral pelo teste do desvio da luz no eclipse do Príncipe de 1919, à cosmologia, à física fundamental e à divulgação da ciência. Nas primeiras duas décadas do século 20, trabalhos em astrofísica dificilmente, ou mesmo nunca, eram considerados para obterem o prémio, compreendendo-se por isso porque Eddington não o recebeu. Seria um prémio Nobel para a astrofísica.

Hubble, astrónomo americano, esteve à frente do maior telescópio do mundo situado na Califórnia, o telescópio de Monte Wilson de 2,5 metros. Através de observações precisas conseguiu produzir uma relação de desvio para o vermelho versus distância das galáxias, o que lhe permitiu enunciar em 1929 a lei de Hubble, ou seja, a velocidade da galáxia é proporcional à sua distância. Foi um feito em astronomia. Note-se, no entanto, que Hubble sempre afirmou que essa relação não significava em definitivo que o universo estivesse em expansão. Nesta conexão, deve ser lembrado que Lemaître, físico belga, discípulo de Eddington, descobriu entre 1925 e 1927, com os dados observacionais até então publicados e de posse de uma solução da teoria da relatividade geral que fornecia um universo em expansão que ele mesmo tinha encontrado, embora Friedmann, físico russo de São Petersburgo, a tivesse encontrado três anos antes, a lei que fornece a relação proporcional entre a velocidade e a distância da galáxia. Lemaître encontrou a lei de Hubble antes de Hubble, que por isso é muitas vezes referida com lei Lemaître-Hubble. Além disso, Lemaître foi o primeiro a propor um Big Bang consistente com o Universo em expansão. Não se compreende porque Hubble não recebeu o prémio Nobel. A descoberta da relação linear entre desvio para o vermelho e distância das galáxias, e a consequente inferência que isso significa um Universo em expansão, é uma das maiores descobertas científicas de todos os tempos, feita com um trabalho observacional minucioso, preciso e extremamente difícil. Provavelmente, a Academia Sueca teve dúvidas se um trabalho observacional seria elegível para um prémio Nobel de Física, erro que deixou de cometer posteriormente como atestam os prémios Nobel para pulsares, pulsares binários, radiação cósmica de fundo, aceleração do universo, neutrinos solares e observações em raios X. Por inerência, Lemaître podia ter recebido o prémio em conjunto com Hubble, embora o seu trabalho fosse mais especulativo e de difícil confirmação nessa época. Seria um prémio Nobel para a cosmologia.

Gamow, nascido na Crimeia na Rússia imperial, obteve o doutoramento em São Petersburgo já União Soviética, e instalou-se nos Estados Unidos da América, primeiro em Washington depois no Colorado. Gamow deu contribuições decisivas para a física, astrofísica e cosmologia. Em 1928, descobriu o efeito túnel no decaimento de núcleos atómicos, um efeito genérico e de enorme importância em fenómenos quânticos. A partir de 1942, desenvolveu um modelo de Big Bang em cosmologia em que o Universo, em expansão, nos seus primeiros minutos fabricava todos os elementos conhecidos a partir do hidrogénio, desde o deutério, ao hélio e aos transurânicos. Foi provado posteriormente que os elementos químicos leves, como o deutério, o hélio e o lítio foram fabricados no universo primordial enquanto os outros elementos mais pesados foram e são fabricados no centro das estrelas como tinha sido analisado por Hoyle e colaboradores. Alpher e Herman, discípulos de Gamow, propuseram em 1948 a existência de uma radiação cósmica de fundo, relíquia desse universo primordial de Gamow. Essa radiação foi detetada 17 anos mais tarde por Penzias e Wilson e interpretada como sendo de origem cósmica por Dicke e o seu grupo. Nem Gamow, Alpher e Herman, nem Dicke receberam o prémio Nobel. É um facto, que Dicke e o seu grupo, nos respetivos artigos inaugurais sobre este assunto, não fizeram referência aos trabalhos pioneiros de Gamow, Alpher e Herman. É também um facto que a radiação encontrada foi imediatamente interpretada corretamente por Dicke. O comité Nobel deparou-se com muitos nomes no lado teórico e como o Nobel só é concedido para três pessoas no máximo, preferiu só outorgá-lo a quem detetou essa radiação, nomeadamente, Penzias e Wilson, deixando Gamow, Alpher, Herman e Dicke de fora. O prémio Nobel para Peebles em 2019 tem também um carácter póstumo de prémio para Dicke que foi seu orientador e mentor na época em que a radiação de fundo foi descoberta. Seria um prémio Nobel para o lado teórico da cosmologia.

Hoyle, um astrofísico inglês de Cambridge, teve várias ideias importantes e decisivas sobre como os elementos químicos no interior das estrelas e na explosão de supernovas são gerados. Quando Hoyle passou pelo Caltech como visitante em 1953 percebeu que tinha de ocorrer uma ressonância no núcleo do átomo de carbono, caso contrário o carbono não se fabricaria nas estrelas, e a vida como a conhecemos, baseada em carbono, não existiria. Fowler e o seu grupo do Caltech demonstraram logo depois experimentalmente a existência dessa ressonância. Hoyle foi também um importante autor do artigo B²FH de 1957 em que a síntese dos elementos nas estrelas é proposta pioneiramente, além de ter sido autor de outros artigos com vários colaboradores na década de 1960, em que se conclui que a maior parte do hélio existente seria pri-

mordial, não tendo sido formado nas estrelas. Juntamente com Bondi e Gold, físicos de Cambridge, Hoyle propôs a imaginativa cosmologia de estado estacionário que não vingou por incompatibilidade com as observações, mas que Hoyle insistiu até ao fim estar correta. Hoyle também achava que a molécula de ADN se teria originado fora da Terra, talvez em algum ponto no sistema solar ou mesmo em algum outro lugar. Era ríspido no trato com os adversários científicos e com isso angariou muitos desafetos. Mesmo conhecendo o lado muito heterodoxo de Hoyle dentro da ciência, é um mistério porque a Real Academia de Ciências Sueca decidiu dar o prémio Nobel a Fowler sem concomitantemente tê-lo concedido a Hoyle. Nem Fowler percebeu o lapso nem Hoyle ficou feliz. Este não seria um prémio Nobel novo para a astrofísica, estaria dentro do prémio Nobel de 1983.

Shapiro, físico americano, é professor emérito de Harvard tendo sido também professor no MIT. Descobriu e propôs em 1964 um quarto teste para a relatividade geral. A Relatividade Geral tinha sido verificada por três testes, a saber, precessão do periélio de Mercúrio, o encurvamento da luz no campo gravitacional do Sol, e o desvio espectral para o vermelho da luz ao subir por um campo gravitacional. Estes testes foram propostos e testados por volta de 1920. Foi de forma totalmente inesperada que o quarto teste apareceu. Este quarto teste é o teste do atraso do radar no eco de um planeta, chamado de atraso Shapiro. Quando um sinal de radar é enviado para Vénus faz ricochete no planeta e parte do sinal volta para a Terra. Se Vénus está alinhado com o Sol e a Terra e está do lado oposto do Sol, o sinal passa pelo campo gravitacional do Sol e devido à curvatura do espaço e do espaço-tempo o sinal sofre um atraso relativamente a se o espaço fosse plano, como é o caso na gravitação newtoniana. O teste foi feito e confirmado pelo próprio Shapiro e colaboradores em 1968. É uma ideia brilhante e belíssima que confirmou mais uma vez a relatividade geral numa época em que a teoria só tinha sido submetida aos três testes denominados clássicos. Além disso, o atraso de Shapiro tem-se mostrado muito útil em astronomia em outros sistemas astrofísicos. Percebe-se que a Academia não tenha dado o prémio, provavelmente existem vários ideias e testes experimentais deste nível em outras áreas da física, também candidatos. Seria um prémio Nobel para a gravitação.

Jocelyn Bell, britânica nascida na Irlanda do Norte, é atualmente reitora da Universidade de Dundee. Em 1967 ela era estudante de doutoramento em Cambridge com orientação de Hewish. Bell estava encarregada de olhar para os dados que chegavam ao rádio telescópio e um dia em 1967 notou que havia um sinal com um pulso regular com um período de cerca de um segundo. Sinais idênticos de fontes de rádio pulsando rapidamente apareceram

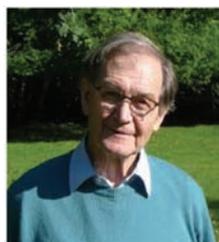
logo depois em outras partes do céu. Estas fontes foram denominadas pulsares. Dada a importância da descoberta, um artigo sobre a primeira observação de um pulsar foi imediatamente publicado. Este artigo de 1968, que relata a descoberta, é assinado por cinco autores, Hewish em primeiro e Bell em segundo. Hewish foi o responsável pelo desenvolvimento do telescópio de rádio e estava à frente da ciência a ser feita com esse telescópio. Pela descoberta do primeiro pulsar Hewish recebeu o prémio. Bell também deveria ter recebido conjuntamente, afinal foi ela quem descobriu o primeiro pulsar, ao analisar os registos identificou sem hesitar uma fonte de rádio não usual. O comité possivelmente considerou que alunos de doutoramento não teriam estatuto para receber o Nobel. Não cometeu esse equívoco de novo, tendo atribuído o prémio a Hulse, aluno de Taylor, em 1983. Este não seria um prémio Nobel novo para a astrofísica, estaria dentro do prémio Nobel de 1974.

3. O prémio Nobel de Física 2020 para buracos negros

3.1 Os premiados

Dado que o prémio para a deteção de ondas gravitacionais foi concedido em 2017 e estas apareceram devido à colisão de dois buracos negros, poder-se-ia sonhar que a concessão do prémio para buracos negros aconteceria num futuro próximo, e se fosse outorgado poderia-se especular quem seriam os galardoados. Mas, sonhar e especular é uma coisa, outra coisa é a realidade. Foi com grande surpresa que no dia 6 de Outubro de 2020 chegou o anúncio do comité que o prémio Nobel de física tinha ido para buracos negros. O comunicado do comité para o prémio Nobel de física 2020 afirma: “A Academia de Ciências Real Sueca decidiu atribuir o Prémio Nobel de Física de 2020 a Roger Penrose, Universidade de Oxford, Reino Unido, Reinhard Genzel, Instituto Max Planck para Física fora da Terra, Garching, Alemanha e Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA, e Andrea Ghez, Universidade da Califórnia, Los Angeles, EUA. Metade vai para Roger Penrose pela descoberta que a formação de buracos negros é uma predição robusta da teoria geral da relatividade. A outra metade vai conjuntamente para Reinhard Genzel e Andrea Ghez pela descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro da nossa galáxia.”

Quem são estes galardoados?



Penrose nasceu em 1931 em Colchester, Inglaterra, obteve o PhD em 1957 em Matemática em Cambridge e é atualmente professor Rouse Ball Emérito na Universidade de Oxford. Desenvolveu novas técnicas matemáticas de topologia e geometria diferencial e aplicou-as ao estudo das características geométricas de espaço-tempos em geral e de buracos negros em particular. Foi o primeiro a entender a essência de um buraco negro. Criou em 1965 o conceito de uma superfície aprisionada, superfície a partir da qual raios de luz emergentes convergem, e que surge quando o campo gravitacional interior a essa superfície é muito intenso. Com isso conseguiu mostrar que uma singularidade dentro

de uma tal superfície se forma, presumivelmente uma singularidade onde o próprio espaço-tempo termina e as leis da física como as conhecemos desaparecem, pondo um ponto final na discussão sobre a inevitabilidade ou não da formação de um buraco negro e de uma singularidade. Para muitos, o seu artigo de 1965 é considerado a contribuição mais importante à Relatividade Geral desde a formulação original da teoria em 1915. Mas há mais contribuições notáveis. Kerr, um físico neozelandês a trabalhar em Austin Texas, tinha encontrado em 1963 um solução em relatividade geral de um buraco negro em rotação, que generalizava de forma admirável a solução encontrada em 1916 por Schwarzschild, um físico alemão, para um espaço-tempo estático. Penrose descobriu em 1969 que é possível extrair energia de um buraco negro de Kerr através do decaimento, próximo do horizonte de eventos, de uma partícula em duas outras partículas. Uma das partículas entra no buraco negro e a outra é emitida com mais energia para infinito à custa da energia de rotação do buraco negro. Este trabalho de enorme importância desencadeou uma nova física de buracos negros que culminou com a descoberta por Hawking que buracos negros irradiam por processos quânticos. Penrose promoveu muitos outros avanços à física e à matemática. Por exemplo, em cosmologia percebeu que no Big Bang, nos instantes iniciais, a entropia do Universo era muito baixa, já que os graus de liberdade gravitacionais, detentores da maior parte da entropia, estavam praticamente congelados, embora os graus de liberdade da matéria estivessem praticamente todos excitados. Este facto requer condições iniciais muito precisas que qualquer teoria cosmológica tem que explicar e ao qual as teorias inflacionárias em voga não conseguem presentemente responder, a não ser invocando alguma forma de princípio antrópico no contexto de multiverso. É certamente uma honra para Penrose ganhar o prémio Nobel, e também é um privilégio para a Academia Sueca ter Penrose entre os galardoados e que por esse acontecimento merece os parabéns.



Genzel, nasceu em 1952 perto de Frankfurt, Alemanha. Obteve o PhD em 1978 pela Universidade de Bonn e atualmente é diretor do Instituto Max Planck para Física fora da Terra em Garching e Professor em Berkeley. Lidera o projeto Gravity do ESO, acrónimo em inglês para European Southern Observatory, que criou na década de 1990 e que estuda no máximo detalhe as estrelas em órbita em torno do centro da nossa galáxia. Mostrou com o seu grupo que as estrelas nessas órbitas têm velocidades extremamente altas, o que é somente compatível com a existência de um buraco negro de 4 milhões de massas solares.



Ghez nasceu em 1965 em Nova York. Obteve o PhD em 1992 pelo Caltech. É atualmente professora na Universidade da Califórnia em Los Angeles. Lidera um projeto no telescópio Keck no Havaí, que começou no fim da década de 1990, e que estuda a cinemática das estrelas em órbita em torno do centro

da nossa galáxia. Observou várias novas estrelas em órbita e também mostrou que estas têm velocidades extremamente altas somente compatíveis com a existência de um buraco negro de 4 milhões de massas solares no centro da nossa galáxia. Os projetos de Genzel e de Ghez, sendo totalmente independentes, complementam-se um ao outro e minimizam os erros que algum dos dois possa apresentar.

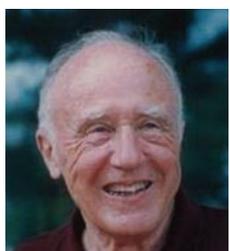
3.2 Os que poderiam ter sido premiados

Existem várias pessoas que estiveram associadas ao conceito de buraco negro e ao seu desenvolvimento e, devido à importância das contribuições, poderiam ter sido galardoadas com um prémio Nobel para buracos negros. Mencionamos agora essas pessoas com uma pequena descrição da sua contribuição.



Oppenheimer, nasceu em 1904 em Nova York. Obteve o PhD em 1927 em Göttingen com trabalhos importantes com Born, físico alemão fundador da mecânica quântica. Foi professor em Berkeley e Caltech e de 1942 a 1945 foi o diretor do Projeto Manhattan em Los Alamos que construiu as duas primeiras bombas atômicas. Foi Oppenheimer quem descobriu buracos negros juntamente com Snyder. Num artigo de 1939, Oppenheimer e Volkoff, um estudante de doutoramento em Berkeley, mostraram que uma estrela de neutrões, do tipo especulado por Zwicky e também por Landau, tinha uma massa máxima da ordem de grandeza da massa máxima que Chandrasekhar tinha descoberto para anãs brancas, a partir da qual, a estrela colapsaria. Intrigado por esta possibilidade de colapso de uma estrela de neutrões, Oppenheimer recrutou então um outro estudante de doutoramento de Berkeley, Snyder, com notórias habilidades matemáticas, para juntos resolverem o problema. Idealizaram um modelo de uma estrela em colapso sobre o seu próprio peso e encontraram que o estado último de tal colapso seria um buraco negro com um horizonte de eventos e uma singularidade. Neste artigo de 1939 de Oppenheimer e Snyder, aparecem naturalmente todos os ingredientes que envolvem o conceito de buraco negro, a saber, o surgimento de um horizonte de eventos para lá do qual o espaço-tempo está cortado do resto do Universo e a descrição da distinção entre tempos completamente diferentes, um tempo marcado pelos relógios de observadores entrando para o próprio buraco negro até à singularidade final, outro tempo marcado por relógios de observadores estacionários no exterior que registam um tempo infinito para a superfície da estrela atingir o horizonte eventos do buraco negro. Com a ida para Los Alamos, com os acontecimentos políticos posterior-

res na época McCarthy que marcaram a sua vida, com a diretoria do Instituto de Estudos Avançados de Princeton que ocupava o seu cotidiano e com o aparecimento de novos interesses, Oppenheimer não voltou a trabalhar em estrelas colapsadas e buracos negros mais nenhuma vez. Embora soubesse que os descobriu, nunca deu valor a isso, aparentemente por achar uma descoberta menor. No entanto, desvendou-se mais tarde, o buraco negro é o objeto por excelência da Relatividade Geral, é pura e complexa geometria do espaço-tempo. Seria um prêmio Nobel para a gravitação. Tendo morrido em 1967, não ficou para ver os tremendos desenvolvimentos posteriores em teoria e observação do objeto que ele juntamente com Snyder tinham criado. Nesta fase inicial, ainda não havia condições para buracos negros e seus descobridores satisfazerem os critérios de serem candidatos ao prêmio Nobel de física.



Wheeler, nasceu em 1911 na Flórida. Obteve o PhD pela Universidade John Hopkins e foi professor em Princeton. Trabalhou com Bohr em física nuclear e inventou o formalismo da matriz-S para explicar espalhamento quântico de partículas. Foi indicado ao prêmio Nobel de física por isso, nunca o tendo recebido. Foi ele que na década de 1950 desenvolveu a física de estrelas colapsadas de forma inédita até ficar convencido que o colapso total de uma estrela para um buraco negro era inevitável, completando conclusiva e decisivamente o resultado do colapso Oppenheimer-Snyder. Levou o conceito de buraco negro até às últimas consequências. Com a sua visão, os seus estudantes de doutoramento criaram ideias inovadoras e, em certos casos, extraordinárias, nomeadamente o seu aluno Bekenstein, de origem mexicana, respondendo a uma pergunta do próprio Wheeler, propôs corretamente que a entropia de um buraco negro é igual à área do seu horizonte de eventos, em unidades apropriadas. Em 1968, Wheeler decidiu que o nome buraco negro para objetos totalmente colapsados era o nome ideal e perfeito e, mais tarde, inventou a expressão buracos negros não têm cabelos para sintetizar que um buraco negro em Relatividade Geral é caracterizado somente pela sua massa, pelo seu momento angular e pela sua carga elétrica, ou seja, só tem três cabelos. Claramente alguém ou algo com três cabelos é efetivamente careca. Percebe-se que a Academia não lhe tenha concedido o prêmio nesta área. Wheeler morreu em 2008, sete anos antes das antenas de ondas gravitacionais confirmarem a existência de colisões entre buracos negros e, por isso, confirmarem para além de qualquer dúvida a existência de buracos negros. Além disso, a sua contribuição é esbatida ao longo de quatro décadas com os seus estudan-

tes, eles mesmos dando novas contribuições significativas. Seria um prêmio Nobel para a gravitação.



Lynden-Bell nasceu em 1935 em Dover, Inglaterra. Fez o PhD com Mestel, astrofísico britânico, em dinâmica galáctica, e foi professor em Cambridge. Em 1969 fez a proposta audaz, acompanhada de cálculos precisos para demonstrá-la, que todas as galáxias eram quasares mortos, ou seja, todas as galáxias continham um buraco negro supermassivo no seu centro já sem atividade. Pouco tempo depois, juntamente com Rees, astrofísico de Cambridge, mostrou, como corolário da proposta original, que a nossa galáxia devia conter um buraco negro central de 4 milhões de massas solares. Pelos fins dos anos 1990, estava ratificado que todas, ou quase todas, as galáxias têm de facto um buraco negro central supermassivo. A imagem espetacular do buraco negro da galáxia M87 feita pelo EHT, acrónimo em inglês para Event Horizon Telescope, é apenas um exemplo. Por ter previsto que todas as galáxias contêm um buraco negro central, foi galardoado com o Prémio Kavli inaugural para astrofísica em 2008, juntamente com Schmidt, um astrofísico americano de origem holandesa do Caltech, que identificou o primeiro quasar em 1963. Claramente, pela sua audaciosa proposta poderia também ter sido contemplado com o prêmio Nobel. O corolário dessa ideia, de que a nossa galáxia contém um buraco negro supermassivo, ficou comprovado com o trabalho observacional de Genzel e Ghez que ganharam o prêmio Nobel 2020. Não tendo tido oportunidade para celebrar a atribuição deste prêmio, morreu em 2018, resta-nos pensar que teria ficado exultante por ver as suas ideias confirmadas e citadas no anúncio e nas cerimónias oficiais. Lynden-Bell trabalhou e desenvolveu diversos e importantes tópicos em astrofísica e Relatividade Geral. Seria um prêmio Nobel para a astrofísica e gravitação.



Hawking, nasceu em 1942 em Oxford. Obteve o PhD em 1966 em cosmologia e foi Lucasian Professor em Cambridge, a cadeira ocupada por Newton e Dirac anteriormente. A partir de 1970 ligou-se ao estudo de buracos negros ao qual deu avanços notáveis. Demonstrou rigorosamente que dentro da teoria da Relatividade Geral a área de um buraco negro nunca decrescia, qualquer que fosse o processo, pavimentando o caminho para o conceito de entropia de um buraco negro, que foi descoberto logo depois por Bekenstein quando fazia o seu doutoramento em Princeton e desenvolvido pelo próprio Bekenstein quando se radicou mais tarde em Israel. Com Bardeen, um físico americano, e Carter, seu colega em Cambridge, Hawking mostrou que a mecânica de buracos negros era regida pelas mesmas leis que a termodinâmica. Combinando Relatividade Geral com Mecânica Quântica, duas disciplinas praticamente imiscíveis, mostrou em 1974 que um buraco negro não é negro, irradia a uma temperatura que é inversamente proporcional

à sua massa. Essa temperatura é chamada temperatura de Hawking e sua expressão envolve as três constantes fundamentais da física, a saber, a constante de gravitação universal, a velocidade da luz e a constante de Planck. Mostra assim que uma teoria quântica da gravitação tem de existir. Esta descoberta revolucionária é possivelmente o resultado mais importante em física teórica na segunda metade do século XX. Com este cálculo, ficou demonstrado em definitivo que buracos negros são não só objetos mecânicos como também objetos termodinâmicos. Agora, termodinâmica é uma descrição conveniente mas não fundamental da natureza. Ficou assim aberto o problema de se saber quais são e onde estão os graus de liberdade de um buraco negro. Muito embora sejam aspectos trabalhados desde então e haja pistas para se perceber um buraco negro como objeto quântico, não há resultados definitivos. Hawking deu ainda contribuições decisivas à cosmologia e preocupou-se em divulgar a ciência. Foi uma celebridade no mundo todo, só comparável a Einstein. Certamente, ele mais do que merecia o prémio Nobel por todo o seu trabalho inovador e revolucionário em buracos negros. Não o recebeu por um triz, morreu em 2018, facilitando a escolha à Academia que só pode dar o prémio a três pessoas no máximo. Seria um prémio Nobel para a gravitação.

4. Da aurora da ciência aos próximos prémios Nobel em astrofísica e gravitação

4.1 Da aurora da ciência aos buracos negros

Anaximandro, filósofo grego que viveu por volta de 550 antes de Cristo, propôs que a “Terra não é segura por nada, mas permanece parada devido ao facto que está equidistante de todas as outras coisas. A sua forma é a de um tambor. Nós caminhamos em uma das suas duas superfícies planas, enquanto a outra superfície está do outro lado”. Esta é considerada, notavelmente por Popper, um filósofo da ciência austríaco que se radicou em Inglaterra, uma das ideias mais portentosas em toda a história do pensamento humano. Pensar a Terra como livre em equilíbrio no meio do espaço, permanecendo estática por causa da equidistância, é uma abstração extraordinária que antecipa Newton e a sua força da gravitação imaterial. É claro, a Terra não é um tambor ou um cilindro, a Terra é aproximadamente uma esfera, mas num contexto cosmológico, que é o contexto da proposta de Anaximandro, a incorreção do escrito é irrelevante, de facto um cilindro e uma esfera são topologicamente equivalentes em linguagem corrente.

Hoje, 2500 anos depois, temos uma ciência da astrofísica e gravitação que explica planetas, estrelas, galáxias, estrutura em grande escala, o próprio Universo, e buracos negros. Neste empreendimento de descobertas formidáveis toda a física está envolvida: relatividade geral e gravitação, física da matéria condensada, e mecânica quântica molecular, atômica, nuclear e de partículas elementares.

O aparecimento do conceito de buraco negro como objeto geométrico por excelência da relatividade geral e a sua confirmação observacional como objeto da natureza ergue-se inconfundivelmente entre as grandes descobertas da física. Foram décadas de entusiasmo e empenho para se compreender melhor o âmago de um buraco negro e

com isso obter-se uma visão mais aperfeiçoada da estrutura do mundo. Esta descoberta foi, finalmente e no tempo certo, coroada nos nomes de Penrose, Genzel e Ghez pela Real Academia de Ciências Sueca com o prémio Nobel 2020.

Naturalmente, ainda há muitos problemas em aberto em teoria e em observação de buracos negros. Em teoria, existe o problema fundamental de se saber o que é o interior de um buraco negro, a parte do espaço-tempo que está dentro do horizonte de eventos. A Relatividade Geral prediz que dentro do horizonte de eventos encontra-se uma singularidade onde o próprio espaço-tempo e as leis da física terminam. Relacionado com este problema está a censura cósmica, uma hipótese levantada por Penrose em 1969, de que todas as singularidades estão escondidas dentro de um horizonte de eventos, ou seja, não há singularidades nuas. Ainda em teoria, continua sem resolução um problema maior levantado por Bekenstein, nomeadamente, se o buraco negro tem entropia, quais são os constituintes básicos dessa entropia, e outro problema relacionado, e também maior, levantado por Hawking, nomeadamente, de se saber se, no processo de colapso e evaporação de um buraco negro, toda a informação física que se tinha no início do processo é igual à informação que se tem no fim, ou em caso contrário, se a singularidade eliminou parte dessa informação reduzindo drasticamente o espaço de fase. Presumivelmente, precisaremos de uma gravitação quântica definitiva para resolver e explicar estes fenómenos. Do lado da observação, com a entrada da deteção de ondas gravitacionais em astronomia, juntando-se à deteção em todo o espectro eletromagnético em todos os tipos de telescópios e detectores, espera-se que muitos mais buracos negros, tanto estelares como galácticos, isolados ou em sistemas binários, distantes entre si ou em colisão, sejam observados. Assim, teremos um melhor conhecimento da origem e evolução de tais objetos, das suas propriedades físicas e da sua distribuição populacional, esta última podendo mesmo indicar se buracos negros são contribuintes importantes para a matéria escura. As observações podem ainda testar o teorema buracos negros não têm cabelos, verificar a hipótese de Kerr, que afirma que buracos negros astrofísicos são caracterizados pela solução de Kerr, as suas únicas características sendo a massa e o momento angular, e comprovar o teorema da área para buracos negros de Hawking, de que numa colisão entre buracos negros a área do buraco negro final é maior do que a soma das áreas iniciais. Além disso, existe sempre a possibilidade de se observarem buracos de verme ou outros objetos compactos. Certamente, outros problemas aparecerão.

4.2. Os próximos prémios Nobel em astrofísica e gravitação

A Relatividade Geral mudou a nossa visão do mundo. A equação fundamental da teoria é

$$G_{ab} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{ab},$$

onde G_{ab} é o tensor de Einstein e está relacionado com geometria T_{ab} é o tensor de energia momento e está relacionado com matéria, G é a constante de gravitação universal e c é a velocidade da luz. Em palavras, a equação de Einstein diz que geometria e matéria estão acopladas. A Relatividade Geral substitui campo e força gravitacional da gravitação newtoniana por métrica e geometria do espaço-tempo. Nas palavras sábias de Wheeler, aqui adaptadas, o espaço diz à matéria como se mover no tempo e a matéria diz ao espaço-tempo como se tem de encurvar.

A Relatividade Geral abriu ramos maiores e completamente novos da física. São eles: 1. Lentes gravitacionais, antevistas por Einstein em 1912 e que atualmente são um instrumento essencial para sondar o Universo; 2. Ondas gravitacionais, trabalhadas por Einstein em 1916 e 1918 e por Eddington em 1922, e continuadas por muitos; 3. Cosmologia, iniciada por Einstein em 1917, continuada por de Sitter, Friedmann, Lemaitre, Gamow, e por muitos outros até ao modelo atual de abrangência extraordinária; 4. Teorias fundamentais, ideia iniciada por Weyl em 1918 para unificar a gravitação e o eletromagnetismo e que sobrevive até hoje em formas mais complexas; 5. Buracos negros, conceito originado por Oppenheimer e Snyder em 1939 e continuado por Wheeler, Penrose, Hawking e muitos outros.

O segundo, terceiro e quinto ramos têm já prémios Nobel e certamente terão mais. Ondas gravitacionais geradas no universo primordial, possivelmente numa época inflacionária, poderão ser detectadas também, o que seria uma descoberta admirável merecedora de um prémio Nobel. Descobertas cosmológicas, como por exemplo a natureza da energia escura, são esperadas um dia e certamente são de nível de prémio Nobel. A descoberta de novos fenómenos envolvendo buracos negros, como por exemplo colisões de buracos negros supermassivos, também serão merecedoras do prémio. O primeiro ramo, lentes gravitacionais, e o quarto ramo, teorias de unificação, não receberam prémios Nobel, mas estão destinados a obtê-los no futuro. De facto, lentes gravitacionais são um instrumento essencial para se sondar o Universo e entender melhor o carácter da matéria escura, essa matéria que não interage pelos processos eletromagnéticos usuais com a matéria bariónica de que nós somos feitos, mas que interage gravitacionalmente, e que em concentrações astronómicas

encurva os raios de luz incidentes para produzir um efeito de lente gravitacional. Um melhor entendimento da matéria escura por lentes gravitacionais pode ser revolucionário e assim merecedor de um prémio Nobel. Quanto a teorias de unificação, na sua forma atual a sua importância reside em se conhecer a teoria da gravitação que se sobreporá à relatividade geral. A Relatividade Geral é uma teoria notável que se aplica em escalas maiores que a escala de Planck, onde a escala de Planck é definida como a escala onde efeitos quânticos da gravitação são importantes. O comprimento de Planck é de 10^{-33} cm. Teoricamente há indícios que em escalas próximas às de Planck a Relatividade Geral sofre alterações, novos termos relacionados com a curvatura do espaço-tempo tornam-se importantes e campos físicos novos aparecem. Pensa-se que o Big Bang, e por isso o Universo todo, surgiu a partir dessas escalas de Planck. Isto significa que, como a gravitação é modificada à escala de Planck, essa modificação terá que aparecer também à escala máxima, a escala do Universo. Indícios firmes que apontem para essa nova teoria da gravitação poderão levar a um prémio Nobel.

Os critérios estabelecidos pelo Comité Nobel e pela Real Academia de Ciências Sueca para se receber um prémio Nobel em física são muito apertados e configuram-se corretíssimos. Isso fica evidente pelo prestígio incalculável do prémio Nobel em física. Vejamos dois critérios. O critério de que o trabalho galardoado com o prémio tem de ter confirmação experimental, é um critério apropriado dado que a física é uma ciência da natureza. Especulações teóricas são interessantes e importantes mas, só se tornam física propriamente dita quando têm confirmação. O outro critério, de que o prémio é dado no máximo a três pessoas, é muito importante. Desta maneira é garantido que o processo de seleção é minucioso e criterioso evitando-se uma desvalorização do prémio por dispersão. Existem teses de que o prémio podia também ser dado a grandes colaborações, mas isso seria um contra-senso. Imagine-se dar o prémio a uma colaboração científica de 500 pessoas. Isto significaria que cada pessoa da colaboração tem 1/500 de um prémio Nobel, e claramente não poderia ser considerada como efetivamente detentora de um prémio Nobel. Não se pode misturar um prémio individual com um prémio para uma instituição como é o caso de uma colaboração. Faria sentido ser criado, por alguma organização, um prémio especial para grandes colaborações em ciência, abrangendo física, química, biologia e fisiologia, e possivelmente outras disciplinas científicas, mas o prémio Nobel de física como o conhecemos é individual, ou melhor, é no máximo para três pessoas, facto que contribui para o grande prestígio do prémio. Finalmente, quando se dá um prémio, em particular um prémio Nobel, há que fazer escolhas, e as escolhas têm sempre um lado político, mesmo dentro da ciência. Por exemplo, é preciso escolher para que área da física vai o prémio naquele ano, ou se existe alguma descoberta excepcional que se sobreponha à escolha prévia da área. A deteção de ondas gravitacionais insere-se claramente nesta última situação, foram detectadas em 2015 e o prémio Nobel foi atribuído um ano e meio depois, em 2017. Quando se tem de selecionar três nomes entre muitos,

obviamente há os que ficam de fora. No entanto, na física, o comité Nobel tem sido perto de irrepreensível. Pode-se sempre argumentar que este nome ou aquele deveriam ter recebido o prémio, neste contexto surge sempre o nome de Sommerfeld, físico alemão que nunca o recebeu, e que houve um erro aqui ou ali, mas como um todo, neste mais de um século de prémios Nobel em física, as escolhas foram praticamente sempre acertadas. Podemos assim perceber facilmente porque é que o prémio Nobel de física tem prestígio máximo. Quem recebe o prémio Nobel de física tem de ser excepcional, claramente. Mas entre esses excepcionais afortunados há que distinguir entre os que dão prestígio ao prémio e os que recebem prestígio do prémio. Ora, praticamente todos os grandes nomes da física receberam o prémio, e sendo eles os grandes nomes da física, conferem por seu lado ao prémio o enorme prestígio que ele tem. O prémio Nobel de física é, por grande margem, o prémio mais importante em física, pode-se mesmo dizer que é o único prémio que realmente interessa à escala planetária. Como deve ter ficado claro, o prémio Nobel de física, para lá de um prémio para físicos, é um prémio para a física como ciência e empreendimento humano.

Contamos com novas descobertas verdadeiramente extraordinárias em astrofísica e gravitação, e em particular em ondas gravitacionais e buracos negros, de modo a merecerem, entre as rigorosas avaliações do comité e da Academia, muitos mais prémios Nobel. Isso seria motivo de orgulho e glória, não propriamente pelos prémios em si, mas pelo que eles representam e significam, designadamente, que a nossa compreensão física do Universo se alonga cada vez mais.

Agradecimentos

Agradeço a Carlos Herdeiro pela colaboração como editor incansável desta edição especial da Gazeta de Física sobre buracos negros, comemorativa do prémio Nobel de Física 2020.

Agradeço a Bernardo Almeida, diretor da Gazeta de Física, ter gostado da ideia de se ter esta edição especial.

Agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia - FCT por apoio financeiro através do projeto UIDB/00099/2020.

Bibliografia

- [1] C. A. R. Herdeiro, J. P. S. Lemos, "O buraco negro cinquenta anos depois: A génese de um nome", *Gazeta de Física* 41(2), 2 (2018); tradução em inglês, C. A. R. Herdeiro, J. P. S. Lemos, "*The black hole fifty years after: Genesis of the name*", arXiv:1811.06587 (2018).
- [2] The Nobel Committee for Physics, "Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2020: Theoretical foundations for black holes and the supermassive compact object at the galactic centre", *Advanced Information Kungliga Vetenskapsakademien* (2020), <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/advanced-information/>
- [3] The Nobel Prize, "All Nobel Prizes in Physics" (2021). <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics/>



José Pizarro de Sande e Lemos, nasceu em 1957 em Lisboa. Foi aluno do Colégio São João de Brito e do Liceu Camões em Lisboa e do Colégio São Vicente no Rio de Janeiro. Obteve o Mestrado em Física em 1982 pela Pontifícia Universidade

Católica do Rio de Janeiro com uma tese em aspectos quânticos e termodinâmicos de buracos negros com orientação de António Luciano Videira. Obteve o PhD em astrofísica e gravitação em 1987 pela Universidade de Cambridge com uma tese em colapso gravitacional e formação de buracos negros com orientação de Donald Lynden-Bell. Trabalhou no Observatório Nacional do Rio de Janeiro de 1988 a 1996 onde foi Investigador Titular e onde estabeleceu um grupo em física e astrofísica de buracos negros. Com visitas desde 1992 como professor convidado ao Instituto Superior Técnico, fundou em 1994, juntamente com colegas desse instituto, o CENTRA, um centro de investigação de excelência em astrofísica e gravitação. Realizou as provas de agregação e foi efetivado no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico em 1996, tendo desde essa época orientado múltiplas teses de doutoramento e formado um grupo em teoria de buracos negros com colaborações internacionais. É atualmente Professor Catedrático do Departamento de Física do Instituto Superior Técnico e presidente do CENTRA. Tem cerca de 200 trabalhos publicados em revistas internacionais na área de astrofísica relativista, gravitação, buracos negros, ondas gravitacionais, cosmologia e física fundamental com um total de 7000 citações. Obteve distinction no renomado exame Part III of the Mathematical Tripos de Cambridge e foi eleito Senior Scholar do Trinity College. Recebeu o prémio UTL/Santander de 2009, atribuído ao professor e investigador da Universidade de Lisboa que se destacou na respetiva área pelo número e pelo impacto dos trabalhos que publicou em revistas científicas de circulação internacional e foi galardoado com o prémio vitalício de Outstanding Referee da American Physical Society em 2010 pela qualidade dos seus pareceres. É membro fundador da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação da qual é o atual presidente.

notícias

Encontro de Professores de Física e Química – 8.^a Edição



A 8.^a Edição do Encontro de Professores de Física e Química (EPFQ) teve lugar no dia 9 e 10 de setembro no Colégio Luis Verney da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora (UE). Estes Encontros iniciaram-se na Universidade do Algarve em 2005 e a partir da 3.^a edição têm sido da responsabilidade da Delegação Regional Sul e Ilhas da SPF em parceria com uma instituição de ensino superior que assume a sua organização local de duas edições. As instituições de ensino superior têm sido as da região da Delegação Regional Sul e Ilhas. Este evento tem o apoio da Sociedade Portuguesa de Química, da Sociedade Portuguesa de Física (SPF) e o patrocínio de diversas instituições e empresas. Este ano estiveram presentes a M T Brandão, DidatiAREA, DISMEL Lda, Numworks e Leya.

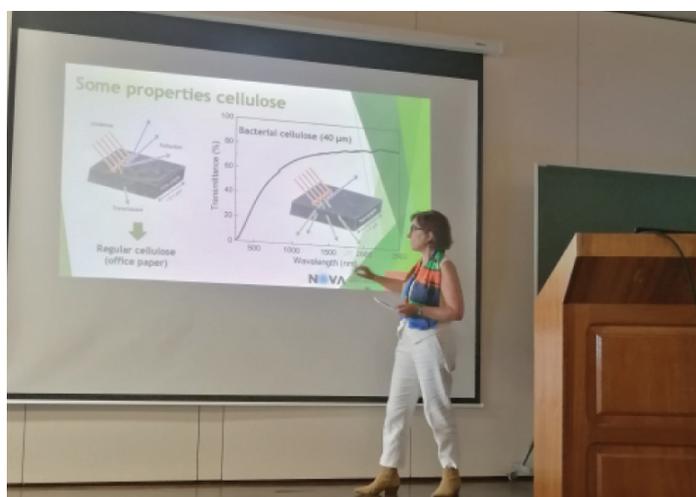
O 8.^o Encontro, tal como o 7.^o, foi organizado conjuntamente pelos Departamentos de Física e de Química da Universidade de Évora, tendo a comissão local sido coordenada por Prof.^a Margarida Figueiredo, Prof.^a Cristina Galacho, Prof. Bento Caldeira e Prof. Alfred Stadler. Foi também apoiado pelo Prof. Luís Afonso, docente em regime de Mobilidade Estatutária na SPF.

Seguindo as orientações da Direção Geral da Saúde o Encontro teve apenas 64 participantes, em vez da larga centena dos anteriores.

Estes Encontros, privilegiando a região Sul do País, estão abertos a todos os professores. Este ano a distribuição geográfica dos professores participantes foi a seguinte: Alentejo-19, Algarve-8, Grande Lisboa-25, Centro-7, Grande Porto-3 e Norte-2.

Como é habitual houve duas palestras plenárias, uma de Física e outra de Química, e cada formando participou em 4 Oficinas, na sua maioria experimentais. A Palestra de Física foi proferida pelo Prof. Rui Salgado da UE sobre “Sim, temos de falar de alterações climáticas” e a de Química pela Prof.^a Elvira Fortunato da Universidade Nova de Lisboa sobre “Celulose, um material sustentável com aplicações que vão da eletrónica aos biossensores”.

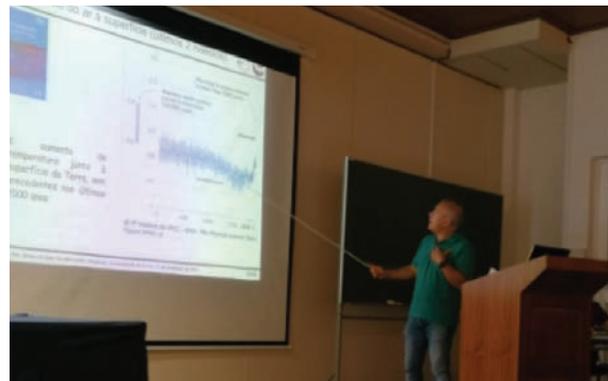
Os temas das Palestras e das Oficinas focaram áreas em que a instituição anfitriã tem uma oferta específica. Nas Oficinas estiveram envolvidos 22 formadores, na sua maioria da Universidade de Évora ou de Centros de Investigação a que a Universidade está associada.





Todos os detalhes deste Encontro, inclusive os patrocínios, estão no Livro de Resumos em <https://8enpq.sci-meet.net/livro-de-resumos>

Este Encontro integra o programa de formação que a SPF disponibiliza para os professores de Física e Química e inclui Ações e Oficinas de duração variável para professores do Grupo 510, acreditados pelo Conselho Científico-Pedagógico de Formação Contínua. Esta Ação foi acreditada com 16 horas.

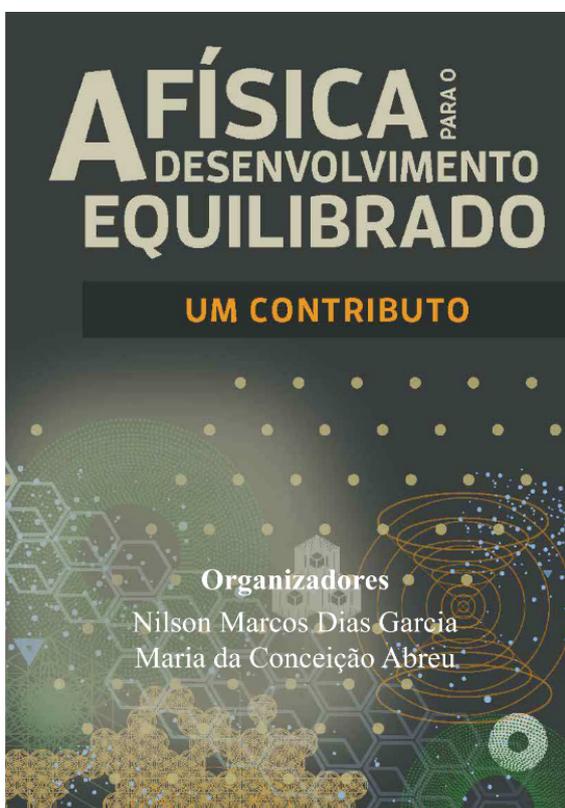


Na Sessão de Encerramento foi anunciado que o 9º Encontro, a realizar em 2023, será organizado pelo Departamento de Física e pelo Departamento de Química e Farmácia da Universidade do Algarve.

A todos os que contribuíram para o Encontro, na sua maioria sócios da SPF e da SPQ, a Delegação Regional Sul e Ilhas da SPF expressa o seu agradecimento.

Atas da 3.^a Conferência de Física dos Países de Língua oficial Portuguesa

Já estão disponíveis as Atas da 3.^a Conferência de Física dos Países de Língua oficial Portuguesa, realizada em Maio de 2019, bem como o livro com textos baseados nas comunicações feitas no mesmo evento. A conferência foi subordinada ao tema “A Física para o Desenvolvimento Equilibrado”. Para mais informações consultar <https://www.ufplp.org/Publicacoes>



In memoriam

Faleceu Armando Policarpo, Professor Catedrático aposentado da Universidade de Coimbra, Sócio Honorário da Sociedade Portuguesa de Física.

É com grande pesar que a Sociedade Portuguesa de Física comunica o falecimento, a 18 de abril de 2021, do Professor Doutor Armando José Ponce Leão Policarpo, Professor Catedrático aposentado da Universidade de Coimbra, fundador do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) e sócio honorário da SPF. Apresentamos à família, colegas e amigos sentidas condolências.



1935 - 2021

Armando Policarpo – na ciência e para lá da ciência

Rui Ferreira Marques

Professor Catedrático Aposentado da Universidade de Coimbra

Investigador do Laboratório de Instrumentação, Física Experimental de Partículas (LIP)

Membro da Direção do LIP (1989-2021)

O desaparecimento do Professor Armando Policarpo, no passado mês de Abril, exige que se fale aqui da obra e personalidade de um investigador de mérito, que desenvolveu trabalho de elevado rigor científico e abriu perspectivas de desenvolvimento de tecnologias de detecção de radiação inovadoras.

Em 1963 terminava o doutoramento em Física Nuclear em Manchester e regressava a Coimbra. Para ele – e para vários dos físicos seus contemporâneos – o Nuclear era aposta nacional estratégica dos finais da década de 50. Porém, a Junta de Energia Nuclear, criada em 1954 e extinta em 1979, não avançaria afinal com nada maior que o reactor português de investigação, instalado no campus da Bobadela (hoje C2TN-IST), só desmantelado em 2019. Para muitos daquela geração foi uma desilusão. Inconformado com a passividade reinante na investigação científica em Portugal, iniciou em Coimbra na década de 60 – então a par com o seu colega Prof. Carlos Nabais Conde – um grupo dedicado ao estudo da física de detectores gasosos de radiação, cujo trabalho mereceria crescente reconhecimento da comunidade internacional, logo a partir da proposta do detector baseado na cintilação proporcional de gases nobres, capaz de alcançar resolução em energia mais precisa do que o contador proporcional.

Tendo eu integrado desde meados da década de 70 a Linha 2 do Centro de Física da Radiação e dos Materiais (CFRM), do INIC, recordo que a firmeza e seriedade

com que encarava a ciência lhe permitiram uma enorme liberdade pessoal e uma notável independência política. Veja-se como na manhã de 25 de Novembro de 1975, quando todos no Departamento de Física comentávamos, preocupados, as notícias dos confrontos das duas fações militares que nos chegavam pela rádio, ele dizia sem pestanejar: *“Dê lá o que der, eu tenho a certeza que quero e vou continuar a fazer ciência o melhor que sei!”* E assim fez. Sempre e em grande liberdade.

Em 1975 Georges Charpak – físico francês de origem polaca, antigo membro da Resistência e sobrevivente dos campos de concentração, que viria a receber o Prémio Nobel da Física em 1992 – vem a Coimbra para se inteirar, in loco, da Revolução dos Cravos. O grande respeito científico mútuo que estabeleceram, faz com que, entre 1976 e 1978, numa licença sabática estendida por mais um ano, Armando Policarpo integre o grupo de detetores de radiação que Charpak dirigia no CERN. Desenvolveria nesse período um trabalho intenso e notável, justificando que Charpak o viesse a referir expressamente no próprio discurso proferido na cerimónia de entrega do prémio Nobel e escrevesse, noutra circunstância, *“I owe him important contributions to several projects we had undertaken together”*. No CERN, Armando Policarpo interage então com outros físicos de prestígio ligados aos desenvolvimentos de detetores de radiação – porventura com a injustiça de esquecer outros nomes ilustres refiram-se Fábio Sauli, Amos Breskin e Thomas Ypsilantis. Datam desse período estudos como a simulação do desenvolvimento da avalanche em torno de fios finos – completamente feita por ele, nas horas vagas, numa calculadora TI-59! – e a proposta do “detector de fotoionização” para a leitura da luz de cintilação dos gases nobres, de que aliás chegou mesmo a realizar testes preliminares no laboratório.

De regresso a Coimbra prossegue os trabalhos na fotoionização, centrais na tese de doutoramento de Maria da Alegria Feio. Uma estada no grupo do Prof. Tadayoshi Doke, na Universidade de Waseda, em Tóquio, abre-lhe perspectivas no domínio dos gases nobres liquefeitos, tema que será prosseguido em colaboração com o Prof. Werner Schmidt, de Berlim, e desenvolvido na tese de doutoramento de Maria Isabel Lopes.

O estudo das descargas autolimitadas, seu desenvolvimento, mecanismos e aplicações, foi outro tema a que daria atenção, com sucessivos trabalhos de que resultaram teses de doutoramento de Ermelinda Ramos de Figueiredo e, mais adiante, de Francisco Fraga. Os mecanismos fundamentais ligados à produção da luz de cintilação e o papel dos fotões no desenvolvimento das avalanches em gases foram por sua vez temas de tese da (saúdosa) Margarida Ribeirete de Fraga.

Nos finais da década de 70, dá todo o apoio à criação e fortalecimento de um grupo, dentro da mesma Linha 2 do CFRM, que se dedicaria à aplicação de técnicas nucleares a estudos de matéria condensada, encabeçado pelos então recém doutorados Professores Nuno Ayres de Campos e Adriano Pedroso de Lima, que inicialmente se dedicam e especializam, respetivamente, nas técnicas de correlações angulares perturbadas e da aniquilação de positrões.

Graças ao prestígio granjeado além fronteiras, por alturas da adesão de Portugal ao CERN, Armando Policarpo dá o seu aval à concretização do sonho de José Mariano Gago, participando na estruturação do LIP que, por isso, é criado em Lisboa –

lembrem-se as jovens gerações que juntando colegas das duas universidades então “concorrentes” ! – mas, de raiz, com um pólo na Universidade de Coimbra.

Os primeiros passos do LIP em Coimbra foram a criação de infraestruturas (em especial a Oficina Mecânica do LIP, logo em 1987) e a formação da primeira “fornada” de físicos experimentais de partículas – com os físicos João Carlos Carvalho, José Pinto da Cunha e António Onofre e o eletrónico Emanuel Machado, na famosa experiência CP-LEAR, no CERN, que constituiu também a primeira participação duma equipa do “LIP-Coimbra” numa colaboração internacional. A par disso, estabelecem-se parcerias no domínio dos detetores com alguns dos colegas do CERN já referidos e outros experimentalistas de referência, nomeadamente envolvendo a participação nos programas de desenvolvimento de detetores para o futuro LHC: RD14 (Calorimetria com xénon/kriptón liquefeitos, com Tom Ypsilantis), RD26 (RICH rápido, com François Piuz – onde se enquadrou a tese de Rui Ribeiro), RD10 (“envelhecimento” dos detetores gasosos, com Fabio Sauli) e RD28 (detetores gasosos de microestrutura) – de que a atual RD51 (em que uma equipa do LIP continua a participar) é o prolongamento natural.

É de sublinhar o papel pioneiro do grupo de Coimbra do LIP na exploração da cintilação nos detetores de microestrutura, como o GEM, que Anton Oed e Fabio Sauli introduziram por volta de 1990.

Pelo virar do século também os detetores de cátodo resistivo despertaram a sua atenção e, naturalmente, surge depois o interesse pelos detetores de placas paralelas e resistivas (RPCs, Resistive plate Chambers) que, graças sobretudo ao esforço de Paulo Fonte – físico que se doutorara com George Charpak e Fabio Sauli –, são hoje tema em que a liderança científica do LIP é internacionalmente reconhecida. Armando Policarpo acompanhou com empenho a primeira década deste desenvolvimento, sempre empolgado com os progressos conseguidos com vista às aplicações médicas – especialmente o RPC-PET, que permanece tema atual.

Até ao final da primeira década deste século, segue também e incentiva o fortalecimento da especialização nos detetores de gases nobres liquefeitos, e a sua aplicação às experiências de deteção direta de matéria escura sob a forma de WIMPS que, sob a liderança da Prof^a Maria Isabel Lopes, faz um percurso científico de relevo, pontuado pelas colaborações UKDM (ZEPLIN II e ZEPLIN III), depois LUX e, hoje e no futuro próximo, LZ – um acrónimo que combina LUX e ZEPLIN.

Empenhado, desde o arranque do LIP, na criação em Coimbra de competências na área da Física Experimental de Partículas, acompanha primeiro o surgimento de equipas com investigadores dos diferentes pólos do LIP nas experiências com aceleradores e, mais tarde, recebe com agrado notícia de desenvolvimentos análogos no domínio dos raios cósmicos e dos neutrinos. Refira-se que nesta última área a primeira colaboração com colegas do LIP em Lisboa ocorreu com estudos de luminescência do ar em condições de pressão e temperatura controladas, realizados pela Prof^a Margarida Ribeiro Fraga, essenciais para a compreensão dos raios cósmicos de energia extrema a partir da luz produzida na sua interação com a atmosfera.

Enquanto delegado português durante mais de uma década à ECFA, European Committee for Future Accelerators, a comissão do CERN responsável pela definição da política europeia de Física de Partículas e de aceleradores, foi responsável pela preparação organização de várias das visitas a Portugal da comissão restrita, R-ECFA, eventos de grande importância política para conseguir alguma estabilidade nos programas que assentam em colaborações internacionais de longa duração.

Armando Policarpo assumiu por mais de uma vez funções de Direção no Departamento de Física da Universidade de Coimbra. Na última delas, levou a cabo um serviço de particular relevância cultural: a transformação do “espaço-reliquia” que era o riquíssimo Museu de Física, num verdadeiro “museu-serviço”, aberto ao público desde o início de 1997.

Trabalho de tamanha amplitude e importância haveria necessariamente de receber alguns reconhecimentos, a saber: Grã-Cruz da Ordem Nacional do Mérito Científico, do Ministério da Ciência e Tecnologia da República Federativa do Brasil (1998); Grande Oficial da Ordem de Santiago de Espada, pela Presidência da República de Portugal (2006); Medalha de Mérito Científico do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (2017). A SPF fê-lo também seu Sócio Honorário em 2018.

Mas, ao mesmo tempo que a sua carreira se desenvolvia e consolidava, manifestava-se-nos a cada dia a personalidade de alguém que tinha um apurado sentido prático, a par de um enorme desinteresse por burocracias emperrantes ou relações de trabalho complicadas que, nos meios académicos, tantas vezes se geram e focam nos interesses pessoais ou de grupo, por oposição ao verdadeiro serviço à comunidade que deve nortear a investigação e o ensino avançado. Assim, os mais próximos foram com ele aprendendo a ultrapassar problemas (ou pelo menos a simplificá-los) porque ... *“Tudo está bem quando acaba bem”* – como se lhe ouvia frequentemente. Graças a uma atitude séria e serena, à medida que o LIP se afirmava, foram sendo ultrapassadas as dúvidas que inicialmente a Universidade sentia face à autonomia deste Laboratório (e em geral das instituições privadas sem fins lucrativos) até, mais recentemente, se atingir um patamar em que o diálogo se desenvolve num quadro de plena compreensão e colaboração.

Menos fácil do que falar no seu papel científico e organizacional, é tentar dar a conhecer os seus interesses e personalidade. Dos interesses não pode decerto esquecer-se a sua apurada sensibilidade para as artes. Sensibilidade e amplitude. Sim, que os seus *hobbies* cobriram desde a pesca submarina e a pintura, ao cinema e à fotografia – coisas que de há muito cultivava, assim para tal sobrasse tempo!

Lembro-me do gosto com que mostrava a amigos de visita à sua casa um quadro célebre que reproduzira –

a sua interpretação da “Natureza morta em frente de uma cómoda”, de Paul Cézanne.

No campo da fotografia, o trabalho é ao que sei especialmente vasto, em particular com numerosas caixas de slides a acompanhar boa parte da sua vida. Alguns trabalhos fê-los pontualmente em preto e branco, como uma fotografia do escritório da casa de família de Paredes, no vale do Mondego, sobranceira ao Porto da Raiva, que haveria de escolher para ilustrar a aba interior da capa de dois dos livros que adiante se referem. O interesse pela fotografia não se extinguiu com o advento do digital, pois em 2010 ganharia um prémio em competição organizada pela “Foto Digital – Revista Portuguesa de Fotografia” – uma publicação com elevados critérios de qualidade, entretanto desaparecida – com uma foto de um dos seus netos, ainda criança.

Teve também impacto o seu hobbie de cineasta amador, presente que foi com pelo menos dois trabalhos em formato Super 8, a cores, que seriam premiados em competições organizadas em Manchester, no início dos anos 60, quando estava prestes a terminar o seu doutoramento.

Graças a decisão da família, esses trabalhos estão disponíveis na página do LIP dedicada à sua grata memória. O documentário “Manchester” – em que um olhar sensível e atento permite perceber, bem para além das imagens captadas, o pulsar das gentes naquele tempo e lugar – mereceu menção honrosa na «*Top 8 competition*» de 1962 do Amateur Movie Maker; os júris também premiaram o pitoresco e diferente, olhados com sensibilidade e mostrados com rigor na “*Portuguese Rhapsody*” que obteve primeiro o «*Top 8 award of special merit*» da edição de 1961 do mesmo certame e, no ano seguinte, o «*3 stars in the 10 Best competition 1962*» do Amateur Cine World. Aproveita decerto dessa experiência a sua participação no júri do II Festival Internacional do Filme Médico e Científico, FILMÓBIDOS 99.

Na escrita, surpreendeu os mais próximos e alguns críticos quando, pouco antes do Natal de 2009, publicou “A não história da mãe sobranceira” (Ed. Minerva, Coimbra). Trata-se de um livro de contos que mais parecem sucessivos episódios de vida – sua e da família – em que se encontra/confronta com personagens e acontecimentos que haviam de marcar profundamente a sua atitude perante a vida, em família e na sociedade. Quanto à qualidade da sua escrita socorro-me de palavras do Prof. Luís Reis Torgal – amigo comum, conterrâneo de adoção e, também ele, distinguido com a Medalha de Mérito Científico do MCTES: «A escrita tem muito interesse e este livro só não será conhecido a nível nacional por ter sido escrito e publicado em Coimbra. Se fosse em Lisboa, seria louvado pelos críticos e anunciado em programas culturais da rádio e da televisão». De facto os três livros já publicados – ao que julgo saber, um quarto volume será publicado a título póstumo – explicam, numa linguagem e estilo

verdadeiramente únicos, muito do que era a sua personalidade vincada por personagens fortes, episódios inesquecíveis, momentos altos e tragédias de família que lhe haviam de deixar alguns fantasmas.

O perfil que procurei descrever corresponde a alguém que não definiu uma trajectória para si só, antes procurou criar à sua volta uma atmosfera de criatividade e liberdade, no respeito pela especificidade de cada um dos colegas e colaboradores. Por isso, transcrevo aqui algumas linhas do discurso de agradecimento que proferiu no Palácio de São Marcos em 2005, por ocasião dos seus setenta anos, quando os colegas do LIP e da Universidade de Coimbra lhe fizeram uma justa homenagem:

“A que poderemos chamar nosso verdadeiramente? Se eu, como todos nós, pudesse especificar para além da tristeza e da imensa gratidão o que devo aos que passaram e aos que me acompanham ainda e que agora abandono, não ficaria muito para referir como sendo meu. Mas sobeja-me, e só posso desejar à nova geração que veja o progresso como eu o vi nas duas gerações de trabalho que acabo agora de percorrer. E ao discutir-se quem deu maior contribuição, talvez seja antes de exprimir o regozijo de haver tantos cujo trabalho vale a pena criticar.

É do coração que agradeço a todos aqueles que tomaram possível ter chegado aos setenta, e, ao olhar para trás, sentir uma certa tranquilidade. Ao ser homenageado aqui, entendo-o como a homenagem a todos os que deram o seu melhor pela universidade, pela ciência e pela educação.”

Foi um enorme privilégio ter trabalhado de perto e durante tanto tempo com tal mestre, colega e amigo. Até sempre, Armando !

Faleceu Eduardo João Cardoso Martinho, Investigador aposentado do Centro Tecnológico e Nuclear da Universidade de Lisboa e sócio fundador da Sociedade Portuguesa de Física

É com grande pesar que a SPF comunica o falecimento a 18 de junho de 2021 do Dr Eduardo João Cardoso Martinho, Investigador aposentado do Centro Tecnológico Nuclear da Universidade de Lisboa e sócio fundador da SPF. Apresentamos à família, colegas e amigos sentidas condolências.



1935 - 2021

Tempo de Recordar Eduardo Martinho

J.G. Marques¹, N.P. Barradas²

¹Instituto Superior Técnico, Campus Tecnológico e Nuclear, 2695-066 Bobadela

²International Atomic Energy Agency, 1400 Vienna, Austria

Faleceu na madrugada do passado dia 18 de junho o nosso colega Eduardo João Cardoso Martinho.

Nascido em 1936 na Chamusca, de origens humildes, veio a licenciar-se em Ciências Físico-Químicas na Faculdade de Ciências de Lisboa em 1961, tendo sido admitido nesse mesmo ano no então recentemente inaugurado Laboratório de Física e Engenharia Nuclear (LFEN), em Sacavém. No LFEN fez parte de um grupo de jovens licenciados liderado por António Gonçalves Ramalho, que teve como missão iniciar e assegurar a operação e exploração do Reator Português de Investigação (RPI), única instalação nuclear do país. Depois de feita a calibração inicial do RPI a baixa potência, o reator foi levado a potências sucessivamente superiores, tendo atingido a potência máxima de 1 MW às 16:58 de 9 de abril de 1962. O Diário de Lisboa noticiou o feliz acontecimento no dia seguinte incluindo uma fotografia tirada na sala de comando do RPI, onde se vê Eduardo Martinho e António Cordeiro Lopes.

Eduardo Martinho foi depois para França, onde concluiu em 1963 o curso de “Génie Atomique” no “Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires” de Saclay, tendo ainda feito parte da equipa do reactor Minerve em Fontenay-aux-Roses, um dos primeiros reatores nucleares Franceses, até março de 1965.

Regressado a Portugal, retomou as suas atividades no LFEN, tendo sido admitido em 1965 como assistente da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa em regime de acumulação, tendo aí lecionado durante 15 anos. O resumo do que foi a sua passagem pela FCUL está contido, de acordo com o próprio Eduardo Martinho [1], na intervenção que o Prof. José Gomes Ferreira fez na reunião do Conselho Científico (Grupo de Física) realizada a 22 de outubro de 1980:

“O Dr. Eduardo Martinho lecionou aproximadamente 15 anos no Laboratório de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa. Durante este tempo regeu grande número de disciplinas onde revelou qualidades pedagógicas de grande mérito aliás reconhecidas pelos seus alunos. Publicou livros de texto para a maioria das disciplinas que regeu e que foram seguidos por outros docentes. Realça-se este facto porque é raro em Portugal os professores universitários publicarem em livro as suas lições. Realizou trabalhos de investigação com aceitação internacional. Tendo eu sido responsável pela entrada do Dr. Martinho para a Faculdade, ficaria de mal com a minha consciência se, no momento em que, com desgosto, o vejo



Figura 1 - Primeira operação a 1 MW do RPI, em 9 de abril de 1962. Da esquerda para a direita: António Cordeiro Lopes (sentado) e Eduardo Martinho.

abandoná-la, não manifestasse perante este Conselho Científico o apreço em que tenho as suas qualidades de docente e fizesse realçar o mérito indiscutível da colaboração que deu a este Laboratório.”

Em 1968, Eduardo Martinho tinha assinado com José Francisco Salgado um dos primeiros artigos científicos publicados em revistas internacionais com medidas experimentais realizadas no RPI, “*Diffusion and Extrapolation Lengths of Thermal Neutrons in Water by a Stationary Method*”, publicado no “*Journal of Nuclear Energy*”. A esse seguiram-se mais de 3 dezenas de artigos, muitos dos quais numa época em que era pouco comum publicar em revistas internacionais. Foi ainda autor e co-autor de mais de 6 dezenas de relatórios internos, a que nos referiremos mais tarde. Sempre presente, soube ser um pilar da operação e exploração do RPI, escrevendo tanto sobre aspetos operacionais do reator, como sobre aplicações do mesmo.

Eduardo Martinho foi membro fundador da Sociedade Portuguesa de Física (SPF) em 19 abril de 1974, juntamente com Cândido Marciano da Silva, João Tavares Maia de Quininha, António Manuel Patrício Comprido, Jaime Manuel da Costa Oliveira, Rui Manuel Vassalo Namorado Rosa, Frederico José da Silva da Gama Carvalho, Maria da Conceição Abreu e Silva (atual Presidente da SPF) e Filipe Duarte Branco da Silva Santos, tendo presidido à primeira reunião da Assembleia Geral da SPF, realizada em Coimbra a 25 de janeiro 1975.

Eduardo Martinho teve também uma faceta importante na sua carreira, de intervenção no domínio público dentro da área do nuclear. Essa intervenção manifestou-se, primeiro, através de entrevistas, artigos de opinião e de divulgação científica em jornais nacionais e regionais, e, depois, através de blogues na *internet*.

Entre 1992 e 1994, no contexto da crise pela qual passou o Instituto de Ciências e Engenharia Nucleares (resultante da integração do LFEN no Laboratório de Engenharia e Tecnologia Industrial em 1985), Eduardo Martinho foi a voz mais ativa em defesa do RPI como estrutura científica nacional ímpar, com artigos nos jornais Expresso, Público e O Mirante [2]. Graças em boa parte à visibilidade que deu a esta problemática, o Ministro da Ciência Prof. José Mariano Gago impulsionou a renovação de investigadores e técnicos no RPI desde o início do seu mandato no XIII governo constitucional em 1995.

Manteve uma colaboração de muitos anos com o jornal regional O Mirante. Em março de 1994 deu uma entrevista (reproduzida na edição on-line de 12 de abril de 2020, no âmbito da iniciativa “Textos que fizeram história”) [3], onde abordou o panorama da investigação científica nacional de então e a atividade no RPI, bem como, de forma calma e ponderada como era seu apanágio, as vantagens e desvantagens da energia nuclear. Essa colaboração manteve-se até



Figura 2 - Reinício do funcionamento do RPI, em 18 de janeiro 1990, após a conclusão das obras de modernização. Da esquerda para a direita: José Francisco Salgado (sentado), Jaime da Costa Oliveira, Júlio Pistachini Galvão, António Gonçalves Ramalho, António de Oliveira, Fernando de Almeida (sentado), Rui Carvalho, Juan Manuel Galán, Fernando Mariano Carreira (encoberto), Albano da Silva, João Baptista Menezes e Eduardo Martinho.

muito depois de se aposentar, com artigos de opinião onde comentou diversos assuntos ligados ao nuclear, bem como de divulgação. Entre esses, destaca-se a série de 29 artigos de divulgação científica sobre o nuclear, publicados entre outubro de 2014 e abril de 2015, onde abordou desde os conceitos básicos sobre o átomo e o núcleo, as radiações, a radioatividade e as suas aplicações, até à proteção radiológica, segurança de centrais nucleares, incluindo acidentes e efeitos ambientais, entre muitos outros temas. Foi também com a Editora O Mirante que publicou em 2000, juntamente com Jaime da Costa Oliveira, o livro “Energia Nuclear - Mitos e Realidades”.

Aposentado em 2002, não interrompeu a sua atividade científica. De facto, foi nesta altura que teve um desenvolvimento notável um dos tópicos de investigação que o interessava desde há muito tempo, pelo menos desde a década de 1980, altura em que aflorara o assunto com Maria do Carmo de Freitas: a autoproteção de neutrões em materiais irradiados em reatores [4].

Quando um material é colocado num campo de neutrões, reações nucleares entre os neutrões e os núcleos dos constituintes do material dão lugar à sua ativação. Este fenómeno é, por um lado, importante para compreender a ativação de materiais sujeitos a irradiação com neutrões, como por exemplo os usados em componentes de reatores nucleares. Por outro lado, pode ser usado para determinar a composição de uma amostra. A técnica resultante, de análise por ativação com neutrões, é a técnica mais comum em reatores de investigação, sendo usada em investigação em arqueologia, ambiente, ciência de materiais e outros campos.

Tal como noutras técnicas analíticas, é necessário quantificar os resultados obtidos, e um dos parâmetros necessários ao cálculo é precisamente o campo neutrónico efetivo. Acontece que a presença da amostra modifica esse campo. Em consequência, verifica-se uma redução do efeito que se pretende

induzir através de reações nucleares com neutrões. Enquanto que uma formulação geral para o caso de neutrões térmicos estava bem estabelecida, o mesmo não acontecia para neutrões epitérmicos, cuja energia está no intervalo em que a secção eficaz dos núcleos apresenta geralmente ressonâncias. Este problema, considerado intratável, foi resolvido por Eduardo Martinho, José Salgado e Isabel Ferro Gonçalves. Começando por atacar o problema em condições simplificadas, acabaram por encontrar uma fórmula universal que permite calcular o fator de autoproteção em filmes finos, fios, esferas e cilindros. Os resultados foram publicados em diversos artigos, à medida que a solução encontrada se foi tornando mais geral. Esses artigos receberam no total mais de 130 citações de grupos de investigação situados em mais de 20 países, e continuam a ser citados regularmente, 20 anos depois da sua publicação.

A partir de 2010, Eduardo Martinho começou a aproveitar o potencial de comunicação da *internet*, lançando diversos blogues. Em março de 2010 começou a publicar, em inglês, o blogue “*Neutron self-shielding: Towards universal curves*” [5], dedicado à questão da autoproteção de neutrões já referida. Em setembro do mesmo ano publicou “O Laboratório Nuclear de Sacavém nos jornais: História de uma crise (1992-1994) [6]. Entre 2011 e 2012 publicou “Energia Nuclear - Bases: Uma introdução ao nuclear numa perspetiva pedagógica”, demonstrando mais uma vez a sua veia de comunicador da ciência, e o seu desejo de disponibilizar ao grande público informação fiável que contribuisse uma discussão racional sobre a energia nuclear. Os textos deste blogue formam a base dos artigos publicados no Mirante em 2014 e 2015. Finalmente, publicou a partir de 2010 e até finais de 2019 um blogue pessoal, “Tempo de recordar”, [7] onde abordava desde as suas memórias a assuntos da atualidade, de onde respigámos o título desta nota.

O nosso contacto direto com Eduardo Martinho foi breve, tendo-se iniciado em 1997-1998 quando nos juntámos à equipa de operação e exploração do RPI no contexto da renovação impulsionada pelo Ministro da Ciência Prof. José Mariano Gago e pelo então presidente do Instituto Tecnológico e Nuclear, Prof. José Carvalho Soares. No entanto, o contacto indireto teve e terá continuidade no futuro. Uma coisa que cedo aprendemos foi procurar os relatórios internos escritos por Eduardo Martinho, verdadeiros tesouros que nos permitiram aprender rapidamente tópicos tão diversos como complexas ativações com neutrões, temperatura de amostras durante irradiação com neutrões, ou envenenamento do núcleo do RPI com xénon. São um exemplo do trabalho que perdura e que é muitas vezes injustamente avaliado quando se pensa que apenas contam artigos em revistas internacionais.

Para terminar, citamos o próprio Eduardo Martinho: [8] “Quem sabe onde fica a sua casa, sabe tudo do mundo, disse um antropólogo francês. Falava ele da casa de família, mas pode-se ampliar o conceito, porque há outras casas de referência na vida de cada um de nós. Nesta perspetiva, sei onde fica a minha segunda casa, o Laboratório de Sacavém. Foi nessa casa que passei grande parte da minha vida desde outubro de 1961 e a ela tenho voltado regularmente mesmo depois de aposentado em abril de 2002. Foi aí que vivi muitas

alegrias profissionais e conheci alguns dos meus melhores amigos.”

O Laboratório de Sacavém teve e terá o condão de unir gerações sucessivas como uma casa de referência.

Até sempre, caro Eduardo Martinho!

References

- [1] Blogue Tempo Recordar, <http://tempoderecordar-edmartinho.blogspot.com/2010/10/percurso-de-vida-visto-de-relance.html>
- [2] <https://edmartinho01.files.wordpress.com/2010/09/o-laboratorio-de-estudos-nucleares-de-sacavem-nos-jornais-1992-1994.pdf>
- [3] <https://omirante.pt/textos-que-fizeram-historia/2020-04-12-As-pessoas-tem-medo-do-que-desconhecem-e-e-por-isso-que-sao-contrario-nuclear>
- [4] Eduardo Martinho, Uma Inesperada Curva Universal, *Gazeta de Física* 27 (2004) 12-17
- [5] <https://edmartinho.wordpress.com/>
- [6] <https://edmartinho01.wordpress.com/>
- [7] <http://tempoderecordar-edmartinho.blogspot.com>
- [8] Eduardo Martinho, no prefácio do livro de Jaime da Costa Oliveira “O Reator Nuclear Português. Fonte de Conhecimento” (Editora O Mirante, Santarém, 2005).

Young Minds’ Movie Night

Na passada noite de 9 de outubro de 2021, teve lugar a Young Minds’ Movie Night, no claustro do Museu de História Natural e da Ciência de Lisboa. Esta atividade foi organizada pela Young Minds Lisbon, um projeto da European Physical Society desenvolvido por investigadores e estudantes de Física em Lisboa, e contou ainda com o apoio da Sociedade Portuguesa de Física.

O evento iniciou-se com a exibição do clássico filme de ficção científica de 1985, *Regresso ao Futuro*, que encantou os 73 participantes e fez as delícias de miúdos e graúdos. Num segundo momento, decorreu a palestra “O que têm viagens no tempo a ver com marionetas”, dada pela Dr.^a Marina Cortês, investigadora do Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço da Universidade de Lisboa e do

Perimeter Institute for Theoretical Physics, Canadá. Atendendo à diversidade da audiência, procurou-se não só explicar vários aspetos inerentes à natureza do tempo, mas também desmistificar alguns equívocos comuns relativos ao tempo, às viagens no tempo e até mesmo ao livre-arbítrio. No final, os participantes tiveram ainda a oportunidade de esclarecer as suas dúvidas.

Assim, sob o pretexto da exibição do filme, e tirando partido do ambiente familiar e descontraído que se fez sentir durante toda a noite, foi possível levar, de forma divertida, a Física à população em geral. Tratou-se, sem dúvida, de um evento muito agradável e certamente a repetir num futuro próximo!

Young Minds Lisbon

<https://www.facebook.com/EPSTYoungMindsLisbon>

<https://www.instagram.com/youngmindslisbon/>

**Young Minds’
Movie Night**

Museu Nacional da História
Natural e da Ciência | Claustro

SÁBADO, 09 OUT 2021

Cinema ao Ar Livre | Entrada Grátis

20H00 Abertura

20H40 Exibição do filme “Regresso ao Futuro”

23H00 Palestra com a Dr.^a Marina Cortês: “O que têm viagens no tempo a ver com marionetas?”

Traga uma manta e
junte-se a nós!

Reserve aqui...

3rd

C M P N C

LISBOA 2021

3rd Condensed Matter Physics National Conference

<https://cmpnc2021.sci-meet.net/>
Lisboa, 28 February - 2 March 2022



A FÍSICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

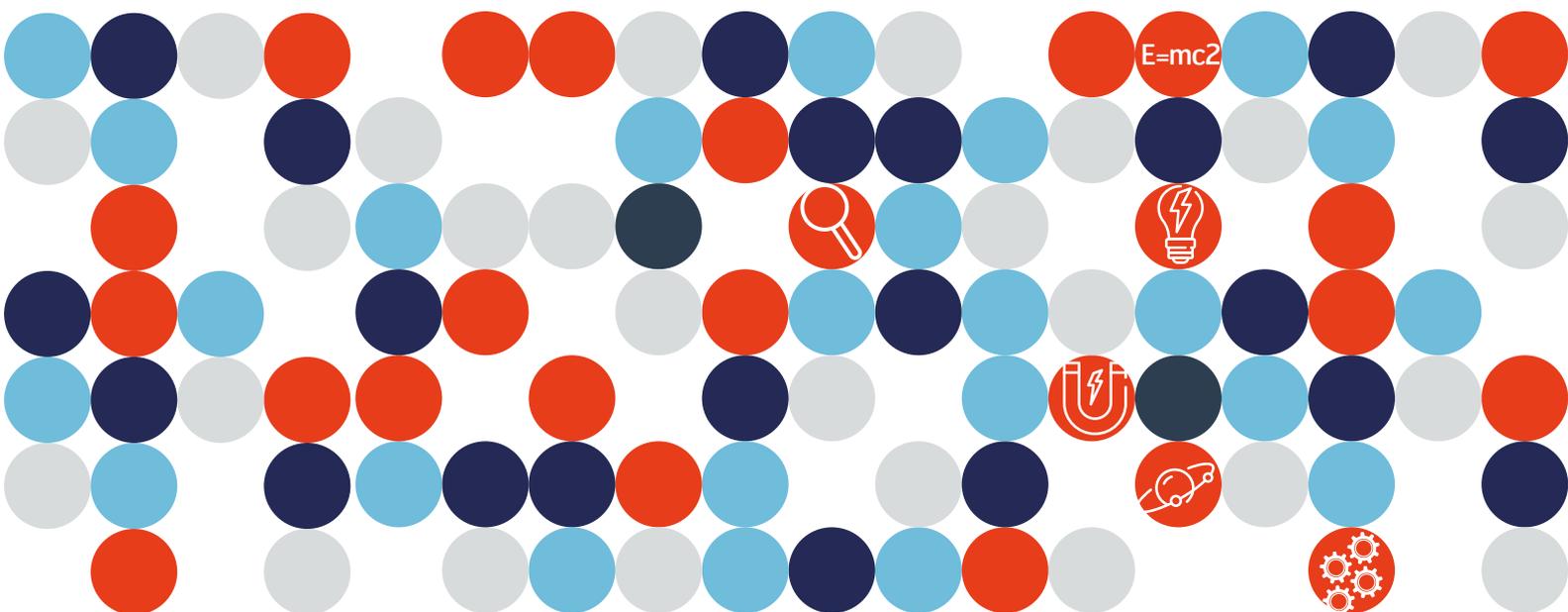
4ª CONFERÊNCIA DE
FÍSICA DOS PAÍSES DE
LÍNGUA PORTUGUESA

CABO VERDE | CIDADE DA PRAIA | 12 a 16 SETEMBRO DE 2022

PRÉMIOS DE INCENTIVO DA EXCELÊNCIA

no ensino da física no 3.º ciclo
e secundário

- PRÉMIO RÓMULO DE CARVALHO
- PRÉMIO ANDRÉ FREITAS
- PRÉMIO LÍDIA SALGUEIRO



www.spf.pt/premios

com o apoio:

