

# A ubiquidade do buraco negro na física moderna

Jorge V. Rocha<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> 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!<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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* negras<sup>2</sup>.

### 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

<sup>2</sup> O termo "brana" advém da palavra "membrana."

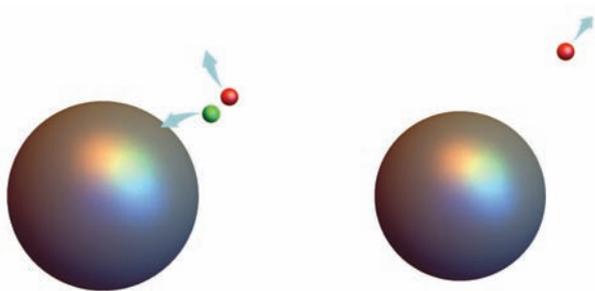


Fig. 3 - Ilustração heurística do efeito de Hawking. Um par partícula-anti-partícula é criado nas imediações de um buraco negro devido a flutuações quânticas. Uma das partículas (acompanhada de energia negativa) cai através do horizonte e reduz a massa do buraco negro, enquanto a outra escapa para o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

temperatura bem determinada. A temperatura está relacionada com a massa do buraco negro, e habitualmente essa relação é de proporcionalidade inversa<sup>3</sup>.

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 compõem<sup>4</sup> 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.<sup>5</sup>

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 a 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

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

<sup>4</sup> 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.

<sup>5</sup> 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.<sup>6</sup> 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).

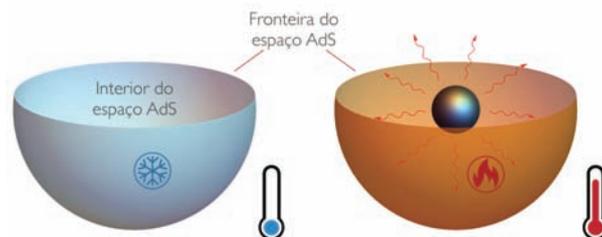


Fig. 4 - Representação do espaço AdS como uma caixa finita (e altamente simétrica). A teoria de campo dual pode ser considerada, em certo sentido, como vivendo na parede dessa caixa. Na ausência de qualquer matéria e de buracos negros, o dual holográfico que lhe corresponde é um estado frio (esquerda). 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 hádrões, como são os casos dos prótons e neutrões. Portanto, também neste contexto temos

<sup>6</sup> 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.<sup>7</sup> 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.<sup>8</sup> 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-

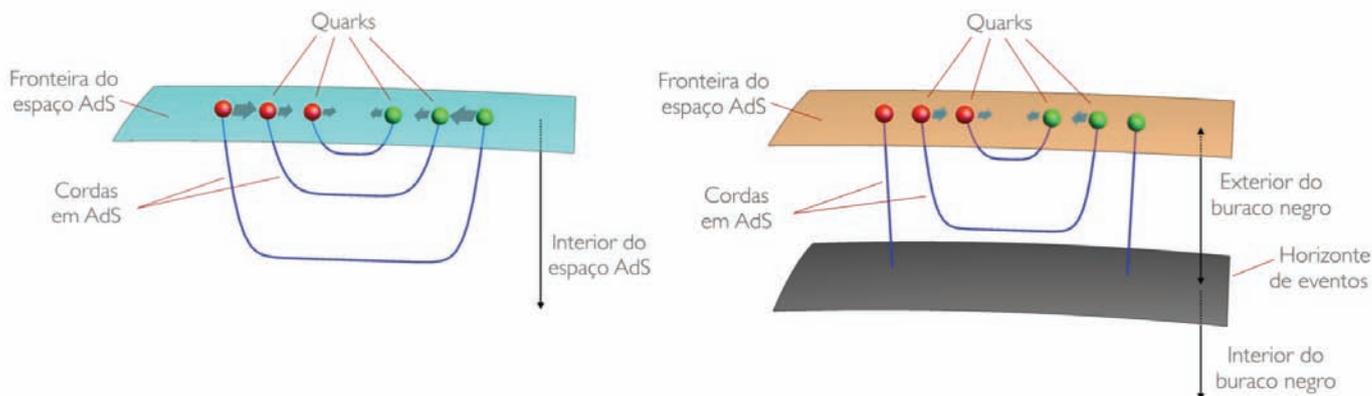


Fig. 5 - A transição confinamento-desconfinamento do ponto de vista holográfico, tendo em conta a interação quark-anti-quark. Os quarks, restritos à fronteira da AdS, são unidos por cordas que mergulham no interior do espaço dual. Se não houver nenhum horizonte, a força restitutiva que atrai o par de 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

<sup>7</sup> 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.

<sup>8</sup> 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?

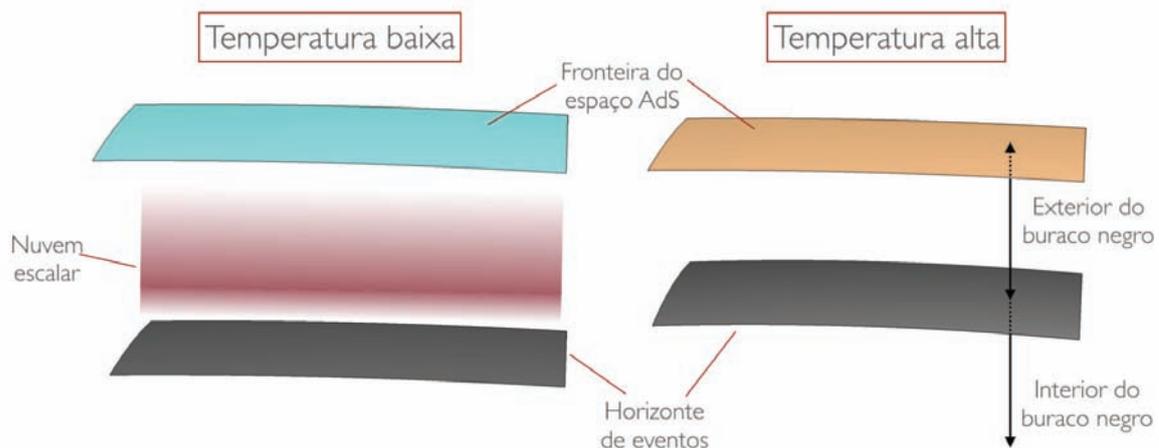


Fig. 6 - Descrição holográfica da transição de fase ocorrendo em supercondutores. A baixas temperaturas (esquerda) o horizonte de eventos de um buraco negro eletricamente carregado fica mais afastado da fronteira de AdS. Isto permite que se forme uma nuvem de campo escalar carregado, que é a representação 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.