

# O futuro em física de buracos negros

Vítor Cardoso<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Niels Bohr International Academy, Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, 2100 Copenhagen, Denmark

vitor.cardoso[at]tecnico.ulisboa.pt

## Resumo

Analizamos 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

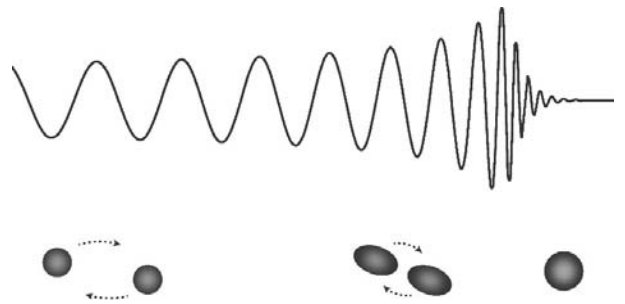


Figura 1 - A evolução de um sistema binário de buracos negros emitindo ondas gravitacionais. Este é o sistema binário astronómico mais simples possível, e um laboratório perfeito para procurar nova física. Quando um sistema binário de buracos negros emite ondas gravitacionais, perde energia e fica mais 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

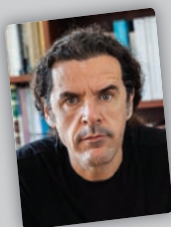
que ponto é que um buraco negro supermassivo é responsável pela dinâmica na galáxia hospedeira, ou pela formação de novas estrelas? Parte da resposta a esta pergunta exige saber quantos buracos negros supermassivos existem e quantos estão em processo de colisão, algo que as ondas gravitacionais nos vão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