

# Einstein e Eddington e as consequências da relatividade geral: Buracos negros e ondas gravitacionais

José P. S. Lemos<sup>1</sup>, Carlos A. R. Herdeiro<sup>1</sup>, Vítor Cardoso<sup>1</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>1</sup>joselemos@ist.utl.pt, carlosherdeiro@tecnico.ulisboa.pt, vitor.cardoso@tecnico.ulisboa.pt

## Resumo

Nas celebrações dos 100 anos das observações da deflexão da luz em 29 de maio de 1919, devido à curvatura do espaço-tempo provocada pelo Sol, por Eddington na Ilha do Príncipe e colaboradores em Sobral, Brasil, durante um eclipse total, que confirmaram a teoria da relatividade geral de Einstein, focamos os principais pontos da teoria, seus testes e aplicações, e concentramo-nos em algumas das suas consequências maiores. A saber, buracos negros, o objeto por excelência da relatividade geral, e ondas gravitacionais, a sonda gravitacional para o universo distante. Apontamos ainda problemas em aberto.

## 1. Relatividade geral

### 1.1 Relatividade geral: a nova noção de espaço, tempo e matéria

Einstein atuou em muitas áreas da física: física estatística, eletrodinâmica, física do estado sólido, mecânica quântica, relatividade restrita, relatividade geral, teorias de unificação, fundamentos da mecânica quântica e princípios filosóficos da física. A grande criação é sem dúvida a teoria geral da relatividade. Max Born, um dos fundadores da mecânica quântica, escreveu em 1955: “A gênese da relatividade geral afigurou-se-me à época, e ainda o faz, o maior feito do pensamento humano sobre a natureza, a mais extraordinária combinação de penetração filosófica, intuição física e mestria matemática”. Dirac, célebre por ter descoberto o positrão, afirmou em 1968: “A relatividade geral é talvez a maior criação científica que alguma vez se fez”. A relatividade geral aparece da necessidade de juntar a gravitação Newtoniana com a teoria da relatividade restrita. Vejamos primeiro algumas noções destas duas teorias.

A gravitação Newtoniana está baseada nas três leis da mecânica de Newton que regem o movimento de partículas e na lei de força da gravitação universal. A segunda das três leis da mecânica de Newton diz qual a aceleração que uma partícula com uma certa massa inercial sofre quando sujeita a uma força. Por outro lado, a lei de força da gravi-

tação universal afirma que duas massas atraem-se com uma força que é proporcional às suas massas gravitacionais e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. A força da gravitação de Newton é uma força que atua instantaneamente. A teoria teve um enorme sucesso na explicação da trajetória dos planetas em volta do Sol, na explicação das marés da Terra, e é usada para descrever a trajetória de satélites entre muitas outras aplicações.

A relatividade restrita ficou formulada em 1905 e nasceu para compatibilizar a mecânica Newtoniana com o eletromagnetismo de Maxwell, uma teoria que descreve o campo eletromagnético. A teoria mostrou que existem ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz tendo-se inferido de imediato que a luz é um fenómeno eletromagnético. Propriedades importantes da teoria de Maxwell não se conformavam com a mecânica Newtoniana. Para partículas em movimento com velocidades próximas às da velocidade luz, e para a própria luz, outra mecânica e outra noção de espaço e tempo eram necessárias. Einstein postulou então que a física é a mesma para qualquer observador inercial, não importa a velocidade com que este se mova, e em particular, a velocidade da luz é a mesma para todos esses observadores, deduzindo que a velocidade da luz é a velocidade máxima possível para objetos físicos e que espaço e tempo não são mais conceitos absolutos, são conceitos relativos ao observador. Pouco depois, em 1907, Minkowski, um matemático alemão, mostrou que a relatividade restrita podia ser entendida dentro do conceito unificado de espaço-tempo, dando expressão lógica e matemática final à teoria. Propôs que o espaço-tempo era um entidade única e definiu a noção de intervalo espaço-temporal generalizando a fórmula de distância de Pitágoras.

Construiu também diagramas espaço-temporais, muito úteis para visualizar a trajetória de partículas. A relatividade restrita tem aplicações em inúmeras áreas da física. O mundo das partículas elementares é relativista. O paradoxo dos gêmeos é uma realidade: muões gêmeos idênticos em aceleradores de partículas morrem mais cedo ou mais tarde conforme estão parados ou em movimento, respetivamente. Enquanto um muão dá a volta ao acelerador ileso à chegada ao ponto de partida, o seu irmão gêmeo parado à partida já decaiu há muito num eletrão.

Como, por um lado, a relatividade restrita mostra que a velocidade máxima de propagação é a velocidade da luz e por outro a lei da força gravitacional de Newton propaga-se instantaneamente, ficou claro que a gravitação Newtoniana tinha de ser enquadrada numa teoria relativista. Assim, apoiado nessas duas teorias, Einstein formulou uma nova teoria, que ele mesmo chamou de teoria geral da relatividade, ou simplesmente relatividade geral. É uma teoria baseada em princípios: princípio de equivalência, princípio da relatividade geral, princípio da covariância, princípio do acoplamento mínimo e princípio da correspondência. O mais importante que serviu de guia até à formulação final foi o princípio de equivalência.

Um facto experimental, aparentemente trivial, chamou a atenção de Einstein: a igualdade entre massa gravitacional e massa inercial. Esta igualdade implica que todos os objetos, independentemente do tamanho e composição, quando colocados num campo gravitacional caem com a mesma aceleração, facto que já tinha sido detetado por Galileu e Newton. Einstein chamou a esse facto o princípio de equivalência. Em última análise este princípio leva a que localmente gravitação e inércia sejam a mesma coisa. De facto, sendo massa inercial e massa gravitacional a mesma coisa, advém que inércia e gravidade fundem-se localmente.

Numa região local em que existe gravidade, podemos, pelo princípio de equivalência e por uma escolha apropriada de referencial, anular a gravitação localmente e tornar o espaço-tempo plano localmente. A gravidade pode ser anulada localmente, mas não globalmente. Um campo gravitacional que varia de um ponto para o outro não pode ser anulado em todos os pontos. Numa região sem gravitação e sem acelerações as partículas seguem linhas retas, as geodésicas do espaço-tempo plano da relatividade restrita. Numa região sem gravitação e com acelerações, as partículas seguem linhas curvas ainda no espaço-tempo plano da relatividade restrita. Numa região com gravitação as partículas seguem linhas curvas, as geodésicas de um espaço-tempo curvo. Einstein propôs por isso que gravitação é uma manifestação do espaço-tempo ser curvo.

Relatividade geral é assim uma teoria geométrica do espaço-tempo. A teoria baseia-se na geometria Riemanniana que por sua vez assenta numa métrica que mede distâncias no espaço-tempo, numa conexão que diz como vetores devem ser transportados paralelamente e que é função da métrica, e na curvatura que é uma função da conexão e por isso da métrica. Num paralelo com a gravitação Newtoniana, temos que a métrica é o potencial gravitacional, a conexão é a força gravitacional e a curvatura é a força de maré. Relatividade geral geometrizou a gravitação. Na equação de Einstein o espaço-tempo diz à matéria como se mover e a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar.

## 1.2 Testes e consequências maiores da relatividade geral

Uma só experiência, a saber, a igualdade da massa inercial e gravitacional levou Einstein ao princípio de equivalência que por sua vez o guiou até à criação da relatividade geral. A teoria foi comprovada por vários testes experimentais e observacionais, tem aplicações tecnológicas, e trouxe consequências novas e da maior relevância para o nosso conhecimento sobre o universo. Vejamos estes pontos.

O desvio para o vermelho da luz ao escalar um campo gravitacional foi previsto por Einstein em 1907 e confirmado em 1960 por Pound e Rebka. É um teste ao princípio de equivalência e à relatividade geral. Outro teste que a teoria passou de imediato foi o da precessão do periélio do Mercúrio na sua trajetória à volta do Sol. A relatividade geral fornece os 43 segundos de arco por século que faltavam à gravitação Newtoniana. A teoria prevê também que a curvatura do espaço-tempo deflete os raios de luz quando passam pelo Sol. É um efeito de lente gravitacional. Esta previsão foi confirmada pelas célebres expedições ao Príncipe liderada por Eddington e a Sobral, Brasil, no eclipse de 29 de maio de 1919, data cujos cem anos celebramos agora, ver <https://science.esundy.tecnico.ulisboa.pt/en/>. As observações forneceram resultados compatíveis com os 1.75 segundos de arco de desvio previstos pela teoria. Outro teste ainda é o atraso no eco de radar enviado para um planeta que foi proposto e testado por Shapiro em 1964 e que confirma a teoria.

A relatividade geral tem também aplicações tecnológicas. É notável que para que o GPS funcione é preciso levar em conta a relatividade geral. É a primeira aplicação tecnológica da teoria. Para calcular a posição de um objeto com a precisão de um metro os relógios dos satélites têm de medir tempo com precisão de uma parte em  $10^{13}$ . Mas os efeitos da relatividade restrita e da relatividade geral nos relógios devido a estes estarem em satélites movendo-se em relação à Terra e num campo gravitacional com intensidade menor do que o da superfície da Terra, respetivamente, necessitam de ser levados em conta. Esses efeitos são de 1 parte em  $10^{10}$ , e se não fossem corrigidos o GPS seria inútil. Esta é uma utilização prática que certamente não foi pensada quando a teoria foi criada. Outra aplicação é a medição das variações da profundidade da neve em Marte com precisões extraordinárias de 10 cm usando dados de prospeção laser via satélites orbitando o planeta que

necessitam do mesmo tipo de correções.

As consequências maiores e inovadoras da relatividade geral são buracos negros, ondas gravitacionais, cosmologia e teorias de unificação. Buracos negros são os objetos por excelência da relatividade geral, são constituídos por gravitação pura. A sua principal característica é conterem um horizonte de eventos, para além do qual nada pode ser observado por um observador externo. Foram preditos em 1939 pelos físicos americanos Oppenheimer e Snyder. Ondas gravitacionais são geradas por massas aceleradas e em interação. Foram finalmente detetadas pela primeira vez em 14 de setembro de 2015. Falaremos de buracos negros e ondas gravitacionais em mais detalhe. A cosmologia como ciência física, e não metafísica, foi criada com o advento da relatividade geral. O primeiro modelo cosmológico dentro da teoria foi concebido por Einstein em 1917. Neste modelo o universo é estático e o espaço é uma três-esfera. Esta geometria mostrou pela primeira vez que o universo podia ser finito mas ilimitado, sem borda. Na década seguinte, o físico russo Alexander Friedmann e o físico belga Georges Lemaître propuseram, independentemente, modelos para um universo em expansão, que após confirmação em 1929 pelas observações de Hubble no telescópio de Monte Wilson, vigoram até hoje em formas mais sofisticadas. As teorias de unificação começaram a ser consideradas após o advento da relatividade geral. A teoria da relatividade geral é uma teoria do campo gravitacional, que surge como geometria curva do espaço-tempo. Outro campo fundamental em física é o campo eletromagnético descrito pelas equações de Maxwell. A junção desses dois campos fundamentais numa só teoria fundamental forneceria a unificação da física. Einstein e Eddington foram alguns dos físicos que tentaram essa unificação na década de 1920 e nas décadas posteriores. Sabemos hoje que mais campos existem, como o campo nuclear forte e o campo nuclear fraco, e possivelmente existem outros, e a ideia de uma teoria unificada para todos os campos persiste, seja através de teorias alternativas da gravitação que incluem a relatividade geral com novos campos adicionais, seja através da difícil quantização do campo gravitacional num quadro conjunto com todas as interações.

## 2. Buracos negros

### 2.1 Regiões aprisionadas

A confirmação, pelas observações de Eddington, de que a trajetória da luz é ligeiramente encurvada pela curvatura do espaço-tempo, ou numa linguagem Newtoniana pela interação gravitacional do Sol, origina a questão do quão forte este efeito se pode tornar na vizinhança de uma estrela ou de um corpo astrofísico. Para aumentar a magnitude deste efeito de lente gravitacional o Sol deverá ser substituído por um corpo mais compacto e o raio de luz deverá passar tão tangente quanto possível a esse corpo.

Os corpos mais compactos previstos pela relatividade geral são os buracos negros. Buracos negros não são, em rigor, corpos materiais; são regiões aprisionadas do espaço-tempo. Uma partícula material ou um raio de luz que caia na região aprisionada não consegue dela emer-

gir. A região aprisionada está perpetuamente em colapso, onde o futuro é sempre mais para o seu interior e onde finalmente ocorre uma singularidade em que o próprio espaço-tempo é destruído.

A fronteira da região aprisionada de um buraco negro chama-se horizonte de eventos. Em qualquer ponto exterior ao horizonte de eventos de um buraco negro é possível emitir um raio de luz de modo a que esse raio de luz escape à atração gravitacional do buraco negro, chegando a pontos arbitrariamente longínquos.

### 2.2 Esfera de fotões

Contudo, se lançarmos raios de luz na direção de um buraco negro, a zona de captura é mais extensa do que a região aprisionada. Isto é, existe uma vizinhança do horizonte de eventos, que, caso o raio de luz visite essa zona, será inexoravelmente capturado pelo buraco negro, acabando por cair na região aprisionada.

Para os buracos negros mais simples, sem rotação, o limiar dessa zona de captura de raios de luz é chamado de esfera de fotões, ou esfera fotónica. Estes buracos negros são denominados de Schwarzschild, em homenagem ao astrónomo, físico e matemático alemão, Karl Schwarzschild, que descobriu e publicou a correspondente solução matemática das equações da relatividade geral ainda em 1916.

A esfera de fotões é uma superfície imaterial exterior ao horizonte de eventos. Fotões que começam precisamente tangentes a essa esfera mantêm-se sempre nela, a trajetória sendo um círculo chamado anel de luz. Ou seja, o efeito de lente gravitacional é tão forte que a trajetória dos raios de luz se fecha sobre si mesma, traçando uma curva fechada. Os fotões orbitam em redor do buraco negro. Contudo, estas trajetórias são instáveis e uma pequena perturbação levará o fotão a cair na direção do horizonte de eventos ou a escapar para longe do buraco negro, conforme a direção da perturbação.

A esfera de fotões é a assinatura mais significativa do forte efeito de lente gravitacional originado pelo buraco negro. As suas consequências fenomenológicas são múltiplas. Por exemplo, se imaginarmos uma fonte de luz como pano de fundo, colocando o buraco negro entre essa fonte de luz e o observador, ver-se-ia uma zona negra. Esta zona negra chama-se a sombra de um buraco negro. Como analogia, podemos imaginar a sombra da Lua vista durante um eclipse solar. Contudo, enquanto que esta sombra da Lua é a silhueta da superfície da Lua, a sombra de um buraco negro é a silhueta da esfera de fotões, e não do horizonte de eventos. A luz de fontes longínquas consegue sondar a geometria do espaço-tempo apenas até à esfera de fotões.

A sombra de um buraco negro de Schwarzschild

é sempre um disco circular. Os buracos negros astrofísicos, no entanto, têm em geral momento angular e são descritos matematicamente por uma outra solução das equações da relatividade geral, descoberta pelo físico-matemático neozelandês Roy Kerr em 1963. Estes buracos negros são denominados por buracos negros de Kerr.

O buraco negro de Kerr é caracterizado pela sua massa e momento angular, um parâmetro que descreve a sua rotação. Quando o momento angular é nulo, torna-se um buraco negro de Schwarzschild. Mas a rotação não nula origina diferenças fundamentais e fenomenológicas. Em particular o horizonte de eventos deixa de ser uma superfície com simetria esférica. Pode ser imaginado como um esferoide, ou seja, uma esfera achatada, em vez de uma esfera redonda, mantendo ainda assim uma simetria entre hemisfério norte e sul e um equador bem definido. Este comportamento está de acordo com o efeito intuitivo da rotação num corpo elástico, como por exemplo, na Terra.

O limiar da zona de captura de raios de luz do buraco negro de Kerr, ganha também novos contornos e não é, habitualmente, designada por esfera de fotões. Para compreender o conceito correspondente, comecemos por imaginar as trajetórias de raios de luz no plano equatorial do buraco negro de Kerr no limiar de captura dos raios de luz. Estas órbitas são circulares, anéis de luz, mas dependem do sentido de rotação do raio de luz. Em particular, o círculo é menor se o raio de luz orbitar no mesmo sentido da rotação do buraco negro.

Fora do plano equatorial, existem também fotões que orbitam o buraco negro, mas as suas órbitas não estão confinadas a um plano. A rotação do buraco negro arrasta consigo o espaço tempo, fazendo precessar o plano inicial da órbita não equatorial. Consequentemente, o raio de luz varre uma secção esférica entre latitudes mínima e máxima, simétricas. Estas são as órbitas fotónicas esféricas de Kerr. Existe um contínuo destas órbitas que interpolam entre os dois anéis de luz, ver Fig. 1. Começando no anel de luz exterior, em contra-rotação relativamente ao buraco negro, existem órbitas esféricas que varrem, sucessivamente, intervalos cada vez maiores de latitude até uma órbita particular que varre toda a esfera e tem momento angular nulo. A partir daí um outro conjunto de órbitas, desta vez em co-rotação com o buraco negro, varrem intervalos de latitude cada vez menores até degenerarem no anel de luz menor em co-rotação.

As órbitas fotónicas esféricas de Kerr, incluindo os anéis de luz, definem o limiar de captura dos raios de luz e como tal a sombra do buraco negro de Kerr, que deixa de ser, em geral, um disco perfeitamente circular e passa a depender da rotação do buraco

negro e do ângulo de observação, relativamente ao plano equatorial. Por exemplo, visto do plano equatorial, um buraco negro com vetor de momento angular para cima apresenta uma sombra que varia de um disco perfeito, quando a rotação do buraco negro é nula, até à forma da letra D quando a rotação é máxima, como foi calculado pela primeira vez pelo físico norte-americano James Bardeen em 1973.

Invertendo a lógica, ao observarmos a sombra de um buraco negro astrofísico podemos saber, em princípio, o quão rapidamente o buraco negro roda. Ou até testar se o buraco negro é de Kerr ou algo inesperado, que poderia revelar nova física. Este tipo de observação não é uma miragem. Foi levada a cabo pelo Event Horizon Telescope, uma colaboração internacional de oito radiotelescópios distribuídos pelo planeta. Em abril deste ano, a colaboração anunciou que tinha apontado para o buraco negro supermassivo localizado no centro da galáxia M87, o qual tem uma massa de 6 mil milhões de vezes a massa do Sol, um horizonte de eventos com aproximadamente o tamanho do sistema solar e está em rotação, e mostrou a imagem inédita e espetacular da sombra de um buraco negro iluminado por matéria incandescente à sua volta. Estes resultados de 2019 confirmam as previsões teóricas e numéricas da relatividade geral e assim, 100 anos depois da observação do efeito de lente gravitacional fraco por Eddington, estamos a observar o efeito de lente gravitacional forte devido a um buraco negro.

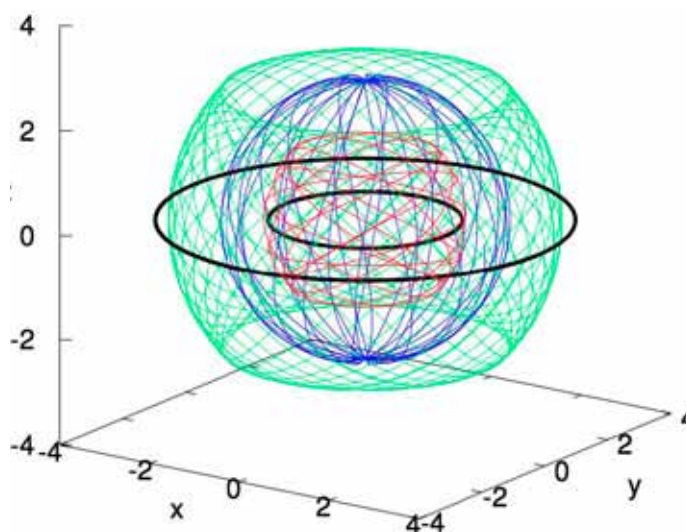


Fig. 1 - Os dois anéis de luz e algumas órbitas fotónicas esféricas em Kerr. O maior anel de luz está em contra-rotação com o buraco negro, o menor está em co-rotação. A órbita esférica verde está em contra-rotação, a órbita esférica vermelha está em co-rotação. A órbita azul é a órbita com momento angular nulo.

### 2.3 Onde estão os buracos negros?

Buracos negros foram descobertos por Oppenheimer e Snyder num trabalho teórico notável de 1939. As décadas subsequentes tiveram desenvolvimentos teóricos impressionantes liderados pelo físico norte-americano John Wheeler e pelos físicos ingleses Roger Penrose e Stephen Hawking. Observacionalmente o progresso também foi intenso. Estima-se que da ordem de dez milhões de buracos negros de algumas massas solares cada habitem a nossa galáxia. Além disso as observações indicam que todas as

galáxias, ou quase todas, contêm um buraco negro supermassivo central. Uma nova população de buracos negros com massas de algumas dezenas de massas solares foi recentemente detetada através de ondas gravitacionais. Especula-se que existam mini buracos negros ou ainda buracos negros elementares, isto é, buracos negros como partículas elementares da gravitação. Estes ainda não foram observados nem detetados.

### 3. Ondas gravitacionais

#### 3.1 Distorções no espaço-tempo

O que acontece quando uma estrela ou um buraco negro é acelerado, ou quando duas estrelas ou dois buracos negros colidem? Se usarmos o princípio da relatividade restrita de que existe uma velocidade máxima de propagação de informação, concluímos que a gravidade também tem que se propagar com uma velocidade finita. Assim, quando uma estrela é acelerada, a gravidade fica para trás e leva um tempo a ajustar-se. As equações da relatividade geral mostram que as equações que governam esse ajustamento são semelhantes às equações de Maxwell para as ondas electromagnéticas e segundo a teoria da relatividade geral, estas ondas viajam exatamente à velocidade da luz. Tais ondas são chamadas ondas gravitacionais. Ondas gravitacionais são forças de maré que se propagam, ou, na linguagem geométrica, ondas gravitacionais são perturbações ou ondulações do espaço-tempo curvo que viajam à velocidade da luz. Foram previstas por Einstein em 1916. Ele calculou a fórmula da geração de ondas gravitacionais, só percebendo que uma configuração de quadrupolo variável no tempo as geraria num trabalho de 1918. Finalmente Eddington em 1922 forneceu a fórmula definitiva correcta com o fator  $\frac{1}{2}$  que faltava à fórmula anterior de Einstein. A manipulação da matemática das ondas gravitacionais é difícil, a interpretação física dos resultados exige conhecimento e perspicácia. Havia cálculos que forneciam haver ondas que se propagavam com velocidades superiores à da luz, o que levou Eddington a mostrar que essas ondas são meros ziguezagues do sistema de coordenadas e que a “única velocidade relevante para estes é a velocidade do pensamento”, frase que ficou famosa, demonstrando de seguida que ondas gravitacionais reais se propagam à velocidade da luz. A teoria foi posteriormente desenvolvida por muitos, designadamente pelo físico inglês Herman Bondi na década de 1960 e pelo físico norte-americano Kip Thorne na década de 1970 e nas décadas seguintes. Vamos supor que ondas gravitacionais sejam geradas por dois buracos negros orbitando em torno um do outro, em algum lugar no universo. Essas ondas propagam-se pelo cosmos, à velocidade da luz e de alguma forma são detetadas na Terra. O painel de cima da Fig. 2 mostra, em unidades arbitrárias, a amplitude e frequência da onda gravitacional detetada em função do tempo. A amplitude da onda está directamente relacionada com a distorção do espaço-tempo, medida em relação à referência que é o espaço-tempo plano de Minkowski. A amplitude da onda também pode ser interpretada como a magnitude da força de maré num dado ponto, em função do tempo. A amplitude depende da distância que a onda viajou, ela

é inversamente proporcional à distância viajada. A frequência da onda é igual ao dobro da frequência orbital.

Como o esquema da Fig. 2 mostra, a frequência aumenta com o tempo. A razão é muito simples: as ondas gravitacionais transportam energia, portanto os dois buracos negros estão continuamente a perder energia. A única possibilidade para conservar a energia total é que eles se aproximem, isto é, a sua frequência aumenta, à medida que o tempo passa. Por outras palavras, a emissão de ondas gravitacionais consegue estimular a colisão entre buracos negros. Como podemos ver, a partir de um certo tempo a onda gravitacional atinge um máximo, correspondente à colisão entre os dois buracos, e depois decai rapidamente no tempo: os buracos negros colidiram e produziram um único buraco negro, maior, que, depois de estabilizar, não emite mais nada. O diagrama da distância entre os buracos negros geradores da onda nas diferentes fases orbitais está representado no painel de baixo da Fig 2.

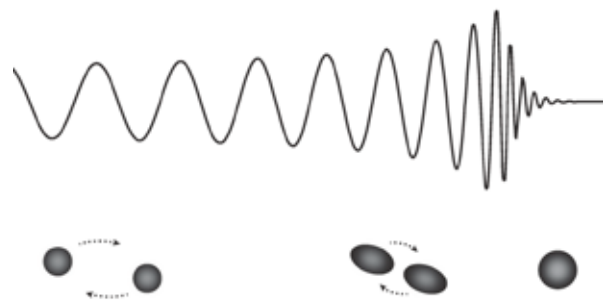


Fig. 2 - Painel de cima: Forma da amplitude da onda detetada em função do tempo devido à colisão de dois buracos negros em órbita. A forma também fornece a frequência da onda. Painel de Baixo: visualização do processo físico, colisão de dois buracos negros, que origina a forma da onda.

#### 3.2 A detecção de ondas gravitacionais

O efeito do aumento da frequência orbital em dois corpos em órbita devido à emissão de ondas gravitacionais é visível nalguns sistemas. Dois físicos americanos, Russell Hulse e Joseph Taylor observaram em 1974 um pulsar binário chamado PSR B1913+16. Este sistema é constituído por duas estrelas de neutrões em órbita em torno do seu centro de massa, tem um período de cerca de 7 horas, e o raio orbital é da ordem do diâmetro do Sol. É um sistema relativista. Estes físicos estudaram a órbita ao longo de vários anos, e mostraram que o período orbital estava a diminuir, a cada ano diminuía cerca de 76 microsegundos, o raio orbital diminui cerca de 3 metros, isto em perfeita concordância com a previsão da relatividade geral. Era a primeira vez que ondas gravitacionais eram detetadas, apesar de indiretamente. Hulse e Taylor foram galardoados com o prémio Nobel por esta descoberta em 1993.

Como é que podemos melhorar o que Hulse e

Taylor fizeram, e medir uma onda diretamente, através da interação com a matéria? Sendo a onda uma força de maré que viaja, a detecção de ondas gravitacionais segue os princípios das forças de maré, ou seja, procura-se o movimento relativo entre duas partículas à passagem da onda, com a amplitude e frequência da onda, ver Fig. 2, dando uma indicação da força relativa sofrida pelas duas partículas. Por exemplo, a onda emitida pelo sistema binário de buracos negros tem uma amplitude que decresce com a distância viajada e quando ela passa no sistema solar, a distância entre a Terra e o Sol, que para este efeito podem ser consideradas partículas, vai sofrer pequenas alterações, descritas pela Fig. 2. Ao chegar ao sistema solar a amplitude da onda é muito pequena: a distância entre a Terra e o Sol sofre uma variação no máximo de um milésimo da espessura de um cabelo humano.

Apesar de parecer impossível, Joseph Weber iniciou a busca por ondas gravitacionais a partir dos anos 1960. Este projeto iria durar meio século e envolver milhares de cientistas até acabar. O esquema, uma barra de alumínio cujo comprimento variava se fosse atingido por uma onda gravitacional, não conseguiu nunca detectar tais ondas, mas foi um importante precursor dos detectores mais avançados atuais como o LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*). Os detectores LIGO originais estão montados nos estados americanos de Louisiana e Washington. O princípio de funcionamento do LIGO é simples: consiste em dois espelhos pendurados na extremidade de dois braços perpendiculares ao longo dos quais circula um feixe laser. Quando uma onda gravitacional ténue mas de amplitude apropriada chega à Terra, o comprimento dos braços varia infinitesimalmente. Este comprimento é medido usando as propriedades de interferência do feixe laser após serem refletidos pelos espelhos. Os espelhos são aqui as partículas que se mexem à passagem da onda. Medindo a forma como o comprimento dos braços varia, conseguimos saber de onde veio e quais as propriedades das fontes que geraram a onda. Na prática, foram precisas décadas de esforços teóricos e tecnológicos, naquela que foi uma das mais complexas e demoradas buscas por uma previsão teórica. A Terra treme constantemente, o laser exerce uma pressão sobre os espelhos, e tudo isto com muitos outros fatores causa ruído que impedia uma observação limpa das ondas gravitacionais.

### 3.3 GW150914 e o futuro

A busca foi uma história de sucesso. Em 14 setembro de 2015, o cientista de serviço olhou para o ecrã e viu que os espelhos se estavam a mover precisamente como na Fig. 2! Este evento, batizado com a data em que foi observado, foi a primeira observação dum sistema binário de buracos negros

em colisão, cada um com cerca de 30 massas solares, e a uma distância cosmológica de 1200 milhões de anos-luz.

Esta detecção direta foi agraciada com o Nobel da Física de 2017, para Ray Weiss, o experimentalista que mostrou como é que se consegue vencer a maior parte do ruído, Kip Thorne, o teórico por trás da detecção, e Barry Barish o organizador da comunidade de centenas de físicos.

Entretanto, o LIGO e o detetor europeu Virgo situado em Pisa viram posteriormente mais nove eventos de buracos negros em colisão além de outra espetacular colisão de duas estrelas de neutrões também observada em todas as frequências de radiação eletromagnética. Estão agora a decorrer observações adicionais com novos eventos detetados e é esperado que se vejam uma ou mais colisões por semana quando os instrumentos estiverem a operar em pleno.

Devido ao ruído sísmico contínuo da Terra, é difícil fazer observações em frequências abaixo de 10 Hz. Ora estas frequências são precisamente aquelas que esperamos que sejam geradas por buracos negros supermassivos, como os que existem nos centros das galáxias. Para resolver este problema, a Agência Espacial Europeia vai colocar o detetor LISA (*Laser Interferometer Space Antena*) no espaço. Sabemos também que o universo primordial gerou ondas gravitacionais através de pequenas perturbações. A teoria inflacionária para o universo numa fase inicial faz previsões precisas para o espectro dessas ondas gravitacionais. É possível que o detetor LISA capte essas ondas, fazendo assim avançar de forma extraordinária o nosso conhecimento do universo.

## 4. Conclusões

Desde a elaboração da relatividade geral de Einstein em 1915 e a sua confirmação pela deflexão da luz no eclipse solar por Eddington e colaboradores em 1919, assistimos a um desenvolvimento permanente e a descobertas extraordinárias. Buracos negros foram preditos em 1939 e confirmados por observações em todo o espectro eletromagnético em décadas subsequentes. Sabemos hoje que todas as galáxias, ou quase todas, contêm um buraco negro central. Em 2015 confirmámos definitivamente a existência de ondas gravitacionais. Estas ondas detetadas provêm de um sistema binário de buracos negros a distâncias cosmológicas, os quais em órbita recíproca colidem gerando uma quantidade enorme de energia na forma de radiação gravitacional que passa pela Terra como uma onda infinitesimalmente ténue.

Mas ainda há muito, muito mais, por fazer e por entender: Quando, onde e como é que os buracos negros nasceram? Como é que eles crescem? Qual a sua influência no desenvolvimento das galáxias? Os buracos negros que observamos são mesmo os previstos pela teoria de Einstein? É de esperar que a observação precisa de buracos negros nos traga novidades. O que é a matéria escura e como é que interage com o modelo padrão de partículas? A única interação que sabemos que a matéria escura tem é gravitacional. É possível ver os efeitos de matéria escura com ondas gravitacionais?

A teoria da relatividade geral não pode ser a palavra final. O interior de buracos negros é singular e nessa singularidade o próprio espaço-tempo é destruído. Como pode-

mos observar o interior de um buraco negro? Do que é feita uma singularidade? Ainda não temos resposta, mas a ciência tem-nos sempre surpreendido com aquilo que pensávamos estar para além das nossas possibilidades.

#### Créditos das figuras:

A Figura 1 foi retirada de *Physical Review D* 96, 024039 (2017).

A Figura 2 é uma representação do evento GW150914 detetado pelo LIGO, ver *Physical Review Letters* 116, 061102 (2016)



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 e o PhD em Astrofísica e Gravitação em 1987 pela Universidade de Cambridge. Trabalhou no Observatório

Nacional do Rio de Janeiro de 1988 a 1996 onde foi Investigador Titular. Realizou a Agregação em 1996 no Instituto Superior Técnico no qual é Professor Catedrático no Departamento de Física e presidente do Centro de Astrofísica e Gravitação (CENTRA). É membro fundador e o atual presidente da assembleia geral da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação. O cerne da sua investigação é em física e astrofísica de buracos negros. Tem mais de 150 trabalhos publicados em revistas internacionais na área de astrofísica relativista, gravitação, buracos negros, ondas gravitacionais, cosmologia e física fundamental com um total de 6000 citações. Obteve distinction no famoso 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 organizador da conferência científica *From Einstein and Eddington to LIGO: 100 years of gravitational light deflection* no Príncipe, em maio de 2019, em comemoração dos 100 anos do eclipse solar histórico, <https://science.esundy.tecnico.ulisboa.pt/en/>.



Carlos Alberto Ruivo Herdeiro, é doutorado em Física Teórica pela Universidade de Cambridge, em Inglaterra. “Trabalhou na Universidade de Stanford (EUA), Porto, Aveiro e é atualmente Professor Associado com Agregação no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico e investigador no Centro Multidisciplinar de Astrofísica (CENTRA). O seu principal foco de investigação é a física-matemática e astrofísica de buracos negros. É membro fundador, e presidente em exercício, da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação.



Vitor Cardoso, é Professor Catedrático e Investigador no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico, onde lidera o Grupo de Gravitação (GRIT) do CENTRA. É Scientific Associate no CERN e Visiting Professor na Universidade de Amsterdão. Os seus interesses de investigação incidem sobre gravitação, em particular ondas gravitacionais e buracos negros. É autor de um livro e de cerca de 200 artigos publicados em revistas internacionais. Foi-lhe atribuído o Prémio “Excelência no Ensino,” pelo Técnico em 2018 e 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. Neste momento, é líder de um consórcio internacional de mais de 30 países, que se dedica ao estudo de ondas gravitacionais e buracos negros.