

Cem anos de Gravitação

Richard Brito¹, Vitor Cardoso^{1,2} e Paolo Pani¹

¹ CENTRA, Dep. Física, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

² Perimeter Institute for Theoretical Physics, Waterloo, Ontario N2J 2W9, Canada

vitor.cardoso@ist.utl.pt

Resumo

A teoria da Relatividade Geral de Einstein é uma das maiores proezas do pensamento humano. Um século depois de ter visto a luz do dia, continua a ser um desafio para cientistas. Segundo esta teoria, a gravidade deixa de ser uma força à distância e passa a ser um efeito da curvatura do espaço-tempo. A Relatividade Geral prevê a existência de “entidades” construídas apenas com tecido espaço-temporal: buracos negros e ondas gravitacionais. Nos próximos anos, estes objectos vão poder ser observados, iluminando finalmente os recantos mais misteriosos do Universo.

Introdução: rugas no espaço-tempo

O último filme de Christopher Nolan, *Interstellar*, tem lugar num futuro próximo no qual a raça humana já tem a capacidade para fazer viagens cósmicas usando atalhos especiais, os “buracos de minhoca”. Apesar da aparência de ficção científica, os argumentistas - os irmãos Nolan - trabalharam lado a lado com Kip Thorne, professor de Física Teórica em Caltech e um dos pais da Relatividade Geral moderna, a teoria que explica o que buracos negros e de minhoca são e como se podem formar no universo.

A missão do Kip Thorne foi a de assegurar que o filme – protagonizado por Matthew McConaughey e Anne Hathaway – não contivesse cenas que fizessem o Einstein ranger os dentes. Será que isto significa que dentro em breve vamos poder comprar bilhetes (de ida e volta!) para o interior de buracos negros? Bem, ainda não... mas em breve físicos e astrónomos vão poder estudá-los de uma forma nunca antes possível. Cientificamente, e com o devido respeito ao Sr. Nolan, o proveito vai ser largamente superior às receitas de bilheteira do *Interstellar*!

A teoria da Relatividade Geral de Einstein faz cem anos em 2015, mas ainda tem muito para nos dar.

De facto, as previsões mais fantásticas – como a existência de buracos negros e ondas gravitacionais – ainda não foram completamente confirmadas. Mas felizmente, detectores mais sofisticados e novas missões espaciais vão com certeza trazer-nos novidades nos próximos anos.

O que são ao certo ondas gravitacionais? E qual a relação que têm com buracos negros? Antes de respondermos a estas questões, vejamos o que a Relatividade Geral diz. A teoria da Relatividade Geral é, por várias razões, uma ideia revolucionária. O espaço-tempo nas outras interações fundamentais (como o electromagnetismo que governa a dinâmica entre fotões e electrões ou a interação forte que governa quarks dentro de prótons e neutrões) é apenas uma arena cujo único papel é especificar “onde” e “quando” a interação ocorre. A gravitação descreve a arena. Einstein compreendeu¹ que alguns princípios básicos forcem o espaço-tempo a ganhar vida: o espaço-tempo reage a qualquer forma de energia e deforma-se, como se fosse elástico. Neste aspecto, o espaço-tempo é parecido com um trampolim, onde a elasticidade permite que seja deformado facilmente, como na Fig. 1.

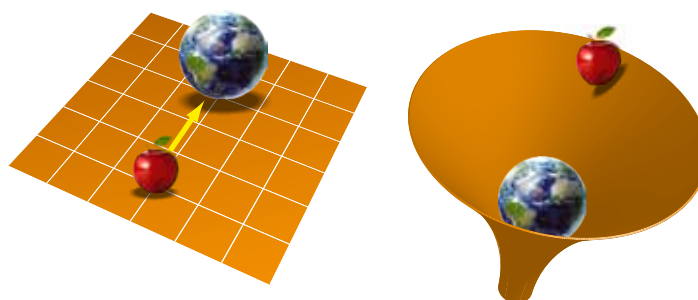


Fig. 1 - A gravidade na perspectiva de Newton e de Einstein. À esquerda, a maçã cai devido à força atractiva da Terra (visão Newtoniana). Esta força é descrita pela lei de Newton: proporcional à massa da maçã e da Terra e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. À direita, a trajectória da maçã é deformada pela curvatura do espaço-tempo (visão Einsteiniana). A deformação depende da massa da Terra. O espaço é deformado, mas o tempo também o é: relógios andam em geral mais devagar ao pé da superfície do que longe dela.

¹ Uma das outras marcas de génio de Einstein foi o uso de *gedankenexperiments* - “experiências pensadas,” em alemão - para deduzir as equações relevantes a partir apenas de passos lógicos.

O espaço-tempo é então uma entidade dinâmica, tornando o conceito de forças – no qual a teoria de Newton se baseia – inútil. Segundo Einstein, a maçã de Newton não cai devido a uma força... na realidade, ela nem sequer “cai”! A massa da Terra curva o espaço-tempo e a maçã apenas “rola” livremente através dele como se estivesse acelerada. A grande descoberta de Einstein foi perceber a interação gravitacional em termos geométricos, introduzindo o conceito de *curvatura do espaço-tempo*.

Apesar destas visões radicalmente diferentes, a teoria de Einstein e a de Newton são difíceis de distinguir no dia-a-dia. Ao pé da superfície terrestre, o espaço-tempo é quase plano e as diferenças entre a Relatividade Geral e a teoria de Newton são praticamente inexistentes. No entanto, sem a teoria de Einstein o GPS não funciona! Contudo, corpos mais massivos do que a Terra – como o Sol, anãs brancas e estrelas de neutrões² – são tão compactos que a curvatura torna-se importante. Além do mais, a Relatividade Geral incorpora a outra grande descoberta de Einstein (encapsulada na relação $E = mc^2$) segundo a qual massa e energia são duas faces da mesma moeda: a massa e qualquer outra forma de energia curvam o espaço-tempo. Por exemplo, para duas estrelas compactas em torno uma da outra com velocidades próximas da da luz, a contribuição da energia cinética é uma das maiores fontes de distorção do espaço-tempo.

O famoso físico John Wheeler uma vez disse: “A matéria diz ao espaço como se deve curvar, e o espaço diz à matéria como se deve mover”. Esta frase contém em si a Bela e o Monstro da Relatividade Geral. A elegância associada a uma descrição unificada e geométrica do espaço-tempo traz consigo uma enorme complexidade das equações, dado que agora o movimento dos corpos e a curvatura do espaço-tempo estão inextricavelmente ligados. Desta fusão emergem duas entidades, feitas unicamente de tecido espaço-temporal: buracos negros e ondas gravitacionais.

Buracos negros

Nunca ninguém viu um buraco negro, e no entanto todos nós temos uma ideia do que é. Na realidade, a maioria de nós diria que é impossível ver um buraco negro... simplesmente por ser um buraco³!

Um buraco negro é uma região do espaço-tempo tão deformada que nenhum sinal é capaz de escapar do seu interior. A fronteira de um buraco negro chama-se *horizonte de eventos*. A razão é muito simples: como nem sequer a luz consegue sair, nunca podemos ver o que se passa lá dentro: “o que acontece dentro de um buraco negro, fica dentro do buraco negro”. Qualquer acontecimento ou evento que tenha lugar dentro do buraco negro está-nos vedado, isto é, está para lá do nosso horizonte e nunca saberemos nada sobre ele.

O conceito de buraco negro foi introduzido apenas na década de 1960, mas já no século XVIII o geólogo John Michell e o matemático Pierre-Simon Laplace tinham explorado independentemente a existência de “estrelas escuras” no âmbito da teoria de Newton. O raciocínio de Michell consiste em calcular a velocidade de escape de um corpo na superfície de uma estrela de massa M e raio R . O cálculo é simples e diz que a velocidade que o corpo tem de ter para conseguir escapar da atracção gravitacional da estrela é

$$V_{\text{esc}}^2 = GM/R \quad (1)$$

onde G é a constante de Newton. Existem assim estrelas onde a velocidade de escape é maior do que a da luz, e logo existem corpos dos quais a luz não consegue escapar. Estas estrelas parecem escuras para um observador! Como a luz se move a uma velocidade c (aproximadamente 300 mil quilómetros por segundo), a condição para o raio da estrela é

$$R_{\text{Schwarzschild}} = 2GM/c^2 \quad (2)$$

Curiosamente, apesar de este ser um cálculo newtoniano, o resultado coincide precisamente com o raio de um buraco negro na teoria de Einstein, e é chamado raio de Schwarzschild⁴. Resumindo e concluindo, se a nossa querida Terra fosse comprimida até ter um raio de 1 centímetro, transformar-se-ia um buraco negro.

Logo, parece impossível comprimir um objecto de tal forma que se venha a transformar num buraco negro. Contudo, a gravidade tem uma característica única que a torna predisposta a comprimir tudo: é *sempre atractiva*, e aumenta com a massa do corpo. Quando a matéria se acumula no centro de uma estrela grande e massiva, a força gravitacional aumenta, comprimindo ainda mais a matéria e começando um ciclo que pode ser de colapso indefinido. Muitas vezes, como no caso da Terra, a pressão à superfície é suficiente para contrariar a atracção gravítica e o corpo mantém-se em equilíbrio. Contudo, noutras situações em que a massa em questão é maior, não existe nenhum material que consiga sustentar o seu próprio peso. A situação é um pouco análoga a um castelo de cartas: quando um número crítico de cartas é atingido, o castelo simplesmente cai. Em estrelas, este processo é chamado colapso gravitacional. Em muitos casos, o que resta depois do fenómeno a que chamamos “explosão supernova” é precisamente um buraco negro.

² Estrelas de neutrões são as estrelas mais compactas que existem, formadas por neutrões. O que as impede de colapsar são forças quânticas, e por consequência têm densidades enormes. Por exemplo, uma colher de chá de material de uma estrela de neutrões pesa o equivalente a 900 pirâmides do Egipto!

³ Felizmente, isto não é bem verdade. Existem algumas formas de “ver” um buraco negro, que não incluem ver o filme *Interstellar*, claro...

⁴ A descoberta de Karl Schwarzschild tem uma história fascinante por trás: Schwarzschild encontrou esta famosa solução enquanto estava no exército alemão durante a Primeira Guerra Mundial, apenas uns meses depois de Einstein ter publicado a sua teoria. Infelizmente, Schwarzschild morreu no ano seguinte, devido a uma doença contraída enquanto estava na frente russa.

Uma explosão supernova é um dos acontecimentos mais luminosos no Universo. Durante a explosão, a estrela brilha mais que toda a galáxia. Esta é, claro, uma das razões pela qual conseguimos observar um grande número de supernovas mesmo quando elas explodem a milhões de anos-luz de nós⁵ e é também a razão pela qual acreditamos que existem milhões de buracos negros na nossa galáxia.

No centro da Via Láctea está um buraco negro supermassivo. O estudo das órbitas de estrelas no centro da galáxia concluiu que elas se movem em torno de um objecto escuro com cerca de quatro milhões de massas solares. Nenhuma estrela estável consegue ter tanta massa. Décadas de esforços para encontrar explicações alternativas concluem sempre que a hipótese *mais conservadora* diz que o que está no centro da Via Láctea é um buraco negro (na realidade, a maioria das galáxias tem um buraco negro gigantesco no centro).

Apesar dos buracos negros não brilharem, eles falam – e falam bastante alto. Enquanto que outros objectos (como estrelas, planetas e até mesmo pessoas) podem ser vistos através da radiação electromagnética que emitem ou reflectem, os buracos negros são vistos através da radiação gravitacional.

Ondas gravitacionais

A existência de ondas gravitacionais é fácil de entender na analogia da membrana elástica do trampolim da Fig. 1. Vemos na figura que se a esfera estiver parada, não acontece nada de especial. Mas se por alguma razão a bola for posta em movimento, são geradas *ondas* que se propagam com uma velocidade que depende do material da membrana elástica. Algo semelhante acontece quando um barco navega num lago, gerando ondas à superfície. Pois bem, as ondas gravitacionais são oscilações do próprio tecido do espaço-tempo, que transportam energia e são produzidas quando há movimento. Neste aspecto são parecidas com o som ou a luz, mas não as conseguimos ver nem ouvir. Contudo, podemos detectá-las: a passagem de uma destas ondas modifica a *distância* entre objectos e até mesmo o *tic-tac* dos relógios!

As ondas gravitacionais são uma *consequência necessária* de qualquer teoria relativista da gravidade, e não existem na teoria de Newton, onde a gravidade é uma interação instantânea. Vamos supor que o nosso Sol de repente desaparece. Segundo Newton, todos os planetas passariam imediatamente a sentir os efeitos deste desaparecimento: deixariam as órbitas elípticas e passariam para órbitas

rectilíneas. Contudo, a teoria da Relatividade Geral incorpora a relatividade restrita, que diz que nada se propaga mais rápido que a luz. Ora a luz leva cerca de oito minutos a viajar do Sol à Terra, portanto a Terra só pode sentir os efeitos deste desaparecimento pelo menos oito minutos depois dele acontecer. Os “mensageiros” que transportam esta informação são precisamente as ondas gravitacionais, e viajam à velocidade da luz. As partículas associadas com estas ondas são os *gravitões*, por analogia com os fotões que são a descrição corpuscular das ondas electromagnéticas.

As ondas gravitacionais produzidas por binários (par de estrelas em órbita mútua) de estrelas de neutrões e buracos negros são especialmente fortes. Para um binário de buracos negros, a energia perdida por segundo sob a forma de ondas gravitacionais pode atingir

$$L \sim 10^{52} \text{ watts} \quad (3)$$

Este número é impossivelmente grande e o binário brilha mais que todo o Universo!

O que acabámos dizer é surpreendente, especialmente se tivermos em conta que cem anos depois da sua previsão teórica, as ondas gravitacionais ainda não foram observadas. A razão para este aparente paradoxo é simples: apesar de extremamente poderosos, estes eventos catastróficos e energéticos ocorrem (felizmente para a vida na Terra) muito longe de nós, pelo que a energia que libertam é espalhada por uma grande porção do universo. Além disso, as ondas gravitacionais interagem muito pouco com a matéria, o que torna a sua detecção na Terra um problema delicado mas fascinante.

Por outro lado, a fraca interação é muito importante, pois significa que estas ondas conseguem viajar milhares ou milhões de anos-luz até nós, sem se deixarem perturbar nem amortecer por nada: a informação que transportam sobre buracos negros ou estrelas de neutrões, etc., chega até nós de forma pura, incorrupta. Mas não há bela sem senão: sendo extremamente difícil fazê-las interagir com um detector, é igualmente difícil (mas não impossível) detectá-las.

Propriedade das ondas gravitacionais

Imaginem que têm um aro na mão, e que de repente uma onda gravitacional passa por vocês. Seria possível reparar na sua passagem? Provavelmente não, porque os efeitos da onda no aro seriam extremamente pequenos⁶. Mas esqueçam por um momento que este efeito é pequeno. Utilizando uma lupa, o que veriam está ilustrado na Fig. 2, onde o tempo evolui no eixo horizontal. Existem duas formas diferentes da onda deformar o aro: ou veriam o aro a oscilar na forma de um + ou de um x. Estas são as chamadas *polarizações* das ondas gravitacionais⁷.

⁵ Uma supernova famosa é a SN 1006, que foi vista da Terra em 1006. Pela sua magnitude aparente, é considerada o evento mais luminoso de que há registo. Curiosamente, a Estrela de Belém – que terá revelado aos Magos onde Jesus tinha nascido – era de facto uma supernova, segundo algumas teorias.

⁶ Se virem alguma coisa, o mais provável é ser um tremor de terra, por isso parem de ler isto e escondam-se num local seguro.

⁷ Em geral a onda não está polarizada e o que veriam é uma combinação de ambas as polarizações.

Para meter isto em números e ver qual seria a deformação do aro, considerem que este tem um diâmetro dado por L e que a onda tem uma amplitude h . Devido à interacção do aro com a onda, o seu diâmetro sofre uma pequena variação ΔL de tal forma que

$$\Delta L/L = h \quad (4)$$

Facilmente se vê a partir desta equação que quanto maior for a amplitude da onda h , maior é a deformação ΔL que o aro sofre. Para um aro com $L = 1$ m e uma onda gravitacio-

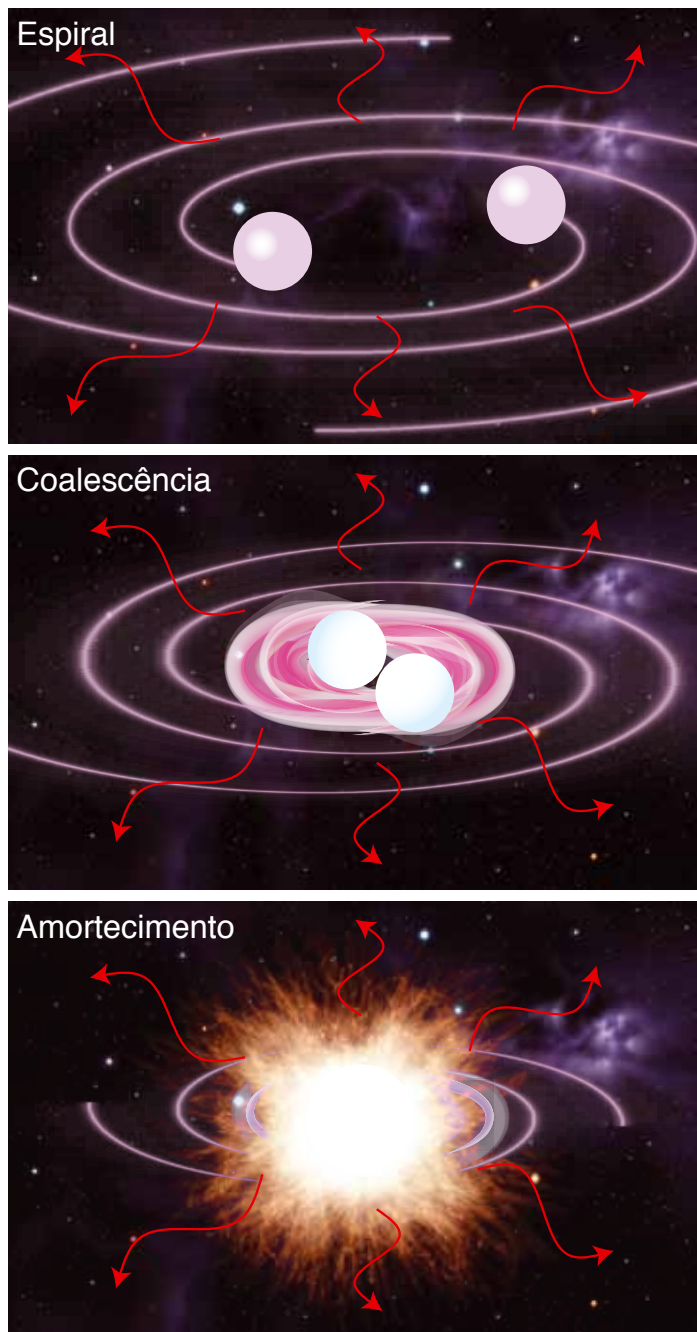


Fig. 3 - As três fases da vida de um binário de buracos negros ou estrelas de neutrões. Na fase "Espiral" os corpos orbitam a uma grande distância um do outro em órbitas (quase) de Kepler, emitindo ondas gravitacionais e lentamente espiralando, isto é, aproximando-se um do outro. Na segunda fase, de "coalescência", já perderam tanta energia que colidem um com o outro formando finalmente um único objecto - em geral um buraco negro - que está altamente deformado e vai emitir ondas gravitacionais até atingir o estado final estacionário ("fase de amortecimento"), tal como um sino quando é tocado.

nal com $h = 0,001$, o aro sofre uma deformação da ordem de $\Delta L = 1$ mm. Na realidade, h mede a forma como as trajectórias de diferentes pontos do aro são afectadas pela curvatura do espaço-tempo. De facto, $h = 0,001$ já é uma deformação muito grande, e se ondas gravitacionais com estas amplitudes fossem comuns, poderíamos observar estes efeitos a olho nu. Infelizmente, como discutiremos de seguida, mesmo para fontes extremamente energéticas, h é extremamente pequeno. Esta é uma das razões pelas quais a detecção de ondas gravitacionais é tão difícil.

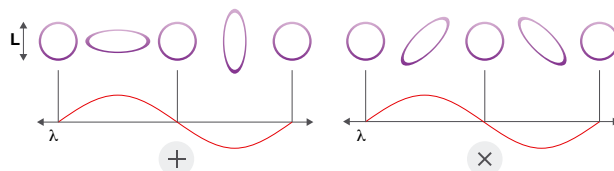


Fig. 2 - Deformação de um aro quando uma onda gravitacional atravessa o plano do papel. Existem dois tipos de "polarizações": do tipo + representada à esquerda e a do tipo x à direita. Estas duas polarizações são consequência do gravitão não ter massa, tal como os fótons. Se o gravitão fosse massivo, existiriam cinco polarizações.

Fontes de ondas gravitacionais

As ondas gravitacionais são geradas pelo movimento dos corpos. A intensidade destas ondas é tipicamente dependente da fonte (tal como a intensidade de ondas electromagnéticas depende da antena que as gera). Por exemplo, a amplitude típica de ondas gravitacionais emitidas por dois objectos com massas idênticas M , numa órbita circular em torno um do outro a uma distância r , é dada por

$$h \sim G^2 M^2 / (c^4 r D) \quad (5)$$

onde D é a distância ao observador. Esta fórmula diz-nos algo bastante familiar acerca do nosso dia-a-dia: quanto mais longe estivermos da fonte, menor é a intensidade da onda que detectamos⁸.

Mas se queremos detectar ondas gravitacionais, porque não construir uma fonte altamente energética aqui na Terra? Imaginem uma fonte constituída por dois pesos de uma tonelada cada, a um metro de distância um do outro, e em movimento circular com uma frequência de rotação de 1000 vezes por segundo. Se construirmos um detector a 300 quilómetros de distância, observaríamos hipoteticamente ondas com uma amplitude $h \sim 10^{-39}$. Não existe nenhum detector imaginável capaz de observar ondas com amplitudes tão pequenas! De facto, não há muito que se possa fazer aqui na Terra. À semelhança dos primeiros astrónomos, temos de olhar novamente para os céus na esperança de descobrir uma fonte poderosa.

⁸ Liguem a vossa TV e tentem medir a intensidade do som em função da distância, enquanto se afastam dela. Num cenário perfeito, onde o som não se dissipa, achariam a mesma relação $1/D$.

Sistemas binários de buracos negros e estrelas de neutrões

A radiação gravitacional mais intensa é produzida por binários de buracos negros e estrelas de neutrões, já que são extremamente compactos e podem mover-se a grandes velocidades (c.f. Eq. 5). Quando dois buracos negros colidem, a distância r entre eles é da ordem do seu raio de Schwarzschild. Neste caso, para um buraco negro com 1000 massas solares⁹ a amplitude da onda gravitacional a uma distância D é $h \sim 10^4 \text{ km}/D$. Portanto, a 400 mil quilómetros de distância (que corresponde aproximadamente à distância Terra-Lua) teríamos $h \sim 0,001$ e o aro de um observador iria encolher e dilatar por cerca de um milímetro! Isto aconteceria também na nossa Terra se a Lua fosse substituída por um binário de buracos negros. Este é claramente um exemplo pouco realista. Se estivéssemos a 1 megaparsec¹⁰ de distância do sistema, a amplitude seria apenas de $h \sim 10^{-17}$. Este número é extremamente pequeno: é possível que uma onda com esta amplitude esteja a atravessar-nos sem que sintamos nada.

Uma solução para este problema é procurar os efeitos *indirectos* da emissão de ondas. Como as ondas gravitacionais transportam energia, então o sistema está a perder energia. Assim, para a energia se conservar, o binário de buracos negros ou estrelas tem de se aproximar com o tempo, isto é, o período orbital diminui à medida que o tempo passa. Portanto, mesmo sem detectarmos directamente as ondas na Terra, podemos ver o seu efeito no sistema que as está a radiar, medindo basicamente o período orbital do sistema.

Foi exactamente isto que Hulse e Taylor fizeram, analisando o pulsar PSR 1913+16¹¹ durante duas décadas (começando em 1974). Este pulsar orbita em torno de uma outra estrela de neutrões. As medições de Hulse and Taylor mostraram que o período orbital diminuía com o tempo, e que esta diminuição estava de acordo com as previsões da Relatividade Geral para a emissão de ondas gravitacionais. O seu trabalho foi recompensado com o Nobel da Física em 1993, e é para a comunidade científica em geral a prova de que as ondas gravitacionais existem.

A relevância de ondas gravitacionais em astronomia deve-se em grande parte à capacidade única que estas ondas tem de transportar informação vinda do núcleo das estrelas. Hoje em dia sabemos com uma precisão incrível como é que um binário de estrelas gera ondas gravitacionais. Como já foi dito,

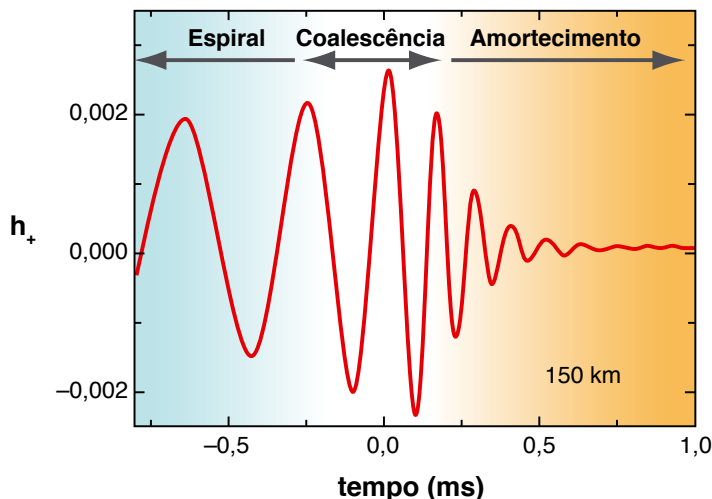


Fig. 4 - Onda gravitacional emitida por um sistema de dois buracos negros imediatamente antes e depois de chocarem. A última fase (quando a amplitude vai para zero) corresponde à formação de um único buraco negro final. A onda é vista segundo o plano orbital, a uma distância de 150 km (a amplitude decresce com $1/D$, pelo que a 1500 km de distância será 10 vezes menor). A esta distância, uma pessoa de 2 metros seria esticada ou comprimida em 3 mm com o passar da onda.

o sistema vai perdendo energia sob a forma de radiação gravitacional, o que faz com que os dois corpos espiralem lentamente em direcção um ao outro. Eventualmente colidem, formando um único objecto. As estrelas de neutrões que Hulse e Taylor observaram vão colidir dentro de aproximadamente 240 milhões de anos. Este processo tem três fases distintas, ilustradas na Figura 3. As características das ondas e do binário nestas três fases são muito diferentes, tal como se pode ver na Figura 4.

Este eventos são os processos mais poderosos do Universo. Para um sistema de dois buracos negros com mil massas solares cada, as últimas dez órbitas antes da colisão duram apenas 10 ms. Se fossemos capazes de observar este sistema a uma distância de 150 km seríamos esticados ou comprimidos em 3 mm com o passar da onda (infelizmente, sistemas deste tipo estão a anos-luz de distância de nós). Além disso, a energia transportada pela onda corresponde à equivalente a 100 mil vezes a massa da Terra. Esta luminosidade é gigantesca, muito maior do que a luminosidade do Universo inteiro que actualmente observamos!

Ondas gravitacionais primordiais

As ondas gravitacionais são o mensageiro ideal para transportar informação vinda do início do Universo, há cerca de 14 mil milhões de anos. Em Março de 2014, a colaboração BICEP (com um telescópio no Pólo Sul) anunciou a primeira detecção de ondas gravitacionais produzidas durante os primeiros¹² tempos de vida do Universo. A experiência mediu a polarização da radiação cósmica de fundo, a relíquia da radiação térmica do Big Bang. Devido ao efeito representado na Figura 2, as ondas gravitacionais causam um efeito

⁹ Os astrónomos já observaram buracos negros com mais de mil milhões de massas solares.

¹⁰ Um megaparsec equivale a 300 mil anos-luz ou 3×10^{22} metros.

¹¹ Um pulsar é uma estrela de neutrões em rotação e que emite feixes de luz. Uma vez que apenas os vemos quando o feixe está na nossa linha de visão, o que observamos é uma série de pulsos de luz, daí o nome destes objectos.

¹² Cerca de 0,000 000 000 000 000 000 000 000 001 segundos depois do Big Bang.

peculiar nestes fotões, sob a forma de “remoinhos” (chamados modos-B) nos mapas de polarização da radiação cósmica de fundo. Se o resultado anunciado pela colaboração estivesse correcto, representaria um marco na história da ciência por várias razões.

Em primeiro lugar, as ondas gravitacionais primordiais são produzidas por flutuações quânticas no início do Universo e são extremamente fracas. Contudo, um mecanismo chamado *inflação cosmológica* pode amplificá-las e torná-las detectáveis. A inflação prevê que houve uma transição de fase no Universo imediatamente após o Big Bang, em que o Universo se expandiu exponencialmente durante um tempo muito curto (10^{-32} segundo) amplificando qualquer pequena flutuação até a tornar detectável nos dias de hoje¹³. Assim, a detecção de ondas gravitacionais primordiais vindas do Big Bang seria também automaticamente uma prova da existência da inflação, algo de que se está à procura há várias décadas.

Em segundo lugar, esta detecção seria, claro, uma segunda confirmação independente da própria existência de ondas gravitacionais. Finalmente, a teoria clássica da Relatividade Geral e a inflação não chegam para explicar o que o BICEP 2 detectou: o mecanismo de produção das flutuações que originaram as ondas gravitacionais tem origem quântica. A escala de energia destes efeitos (cerca de 10^{25} electrões-volts) é muito maior do que a disponível em aceleradores de partículas, actuais ou futuros. Assim, a detecção destas ondas seria também uma confirmação da natureza quântica da gravitação, o Santo Graal de toda a física teórica das últimas décadas!

Os resultados do BICEP 2, a confirmarem-se, seriam extraordinários por tudo o que representam para a física teórica, a astrofísica e a cosmologia. Por essa razão, foram escurupulosamente e meticulosamente verificados. Duas das maiores experiências – PLANCK e BICEP – uniram esforços para analisar os dados em conjunto e mostraram que o anúncio da descoberta foi precipitado (uma parte do efeito era causado por poeira interestelar). É assim que a ciência funciona: tudo tem que ser escrutinado, verificado e reproduzido. Para já, portanto, ondas gravitacionais ainda não foram medidas.

Detectores de ondas gravitacionais

Como as fontes mais fortes estão tão longe de nós, a amplitude das ondas gravitacionais quando chegam à Terra é muito pequena, cerca de $h \sim 10^{-21}$. Portanto, quando uma onda passa, um aro de raio igual à distância Terra-Sol oscila com uma amplitude que é uma fracção do raio atómico!

Mesmo parecendo impossível, existem detectores capazes de medir essa variação. Estes instrumentos usam os princípios da interferometria para medir a diferença entre dois comprimentos. De uma forma simplista, os detectores são compostos por dois “braços” perpendiculares (tipica-

mente com alguns quilómetros cada) e percorridos por um feixe laser. Graças a uma série de espelhos, os feixes laser são depois obrigados a interferir, e a partir do padrão de interferências pode-se medir muito precisamente a diferença relativa no comprimento de cada braço. Como os braços são perpendiculares, uma onda gravitacional como a da Figura 2 faz os braços variarem de comprimento de forma diferente, podendo assim ser detectada.

Os detectores de ondas gravitacionais *funcionam*. Neste momento existem dois grandes instrumentos nos Estados Unidos (LIGO), um em Itália (Virgo), um na Alemanha (GEO) e um no Japão (TAMA). O Virgo e o LIGO estão neste momento na “mesa de operações” para se tornarem dez vezes mais eficientes e estarão operacionais em 2016-2018. Nessa altura, espera-se que detectem ondas gravitacionais várias vezes por ano. Entretanto, um novo detector (KAGRA) está a ser construído no Japão, e existem estudos para a construção de um outro ainda mais avançado, o chamado Einstein Telescope.

Finalmente, existem também planos para o espaço. Uma versão actualizada de um detector gigantesco no espaço (eLISA) foi aprovado pela Agência Espacial Europeia, e espera-se que esteja a funcionar na década de 2030. Este detector será especialmente sensível a ondas de baixa frequência, como as emitidas por buracos negros gigantes (como aquele que existe no centro da Via Láctea).

Astronomia de ondas gravitacionais: uma nova janela para o Universo

Dentro em breve, o conjunto de detectores de ondas gravitacionais irão permitir-nos ver o universo de uma forma completamente diferente, complementando a informação que já temos no espectro electromagnético... e quiçá observando coisas nunca esperadas nem previstas. Este esforço, a uma escala global, é impulsionado pelo enorme potencial da astronomia de ondas gravitacionais: a fraca interacção com a matéria, faz com que a informação que estas ondas transportam – sobre o núcleo das estrelas de neutrões e sobre buracos negros onde foram produzidas – não seja corrompida por poeira estelar nem por nenhum outro obstáculo; chegam até nós limpas e puras, tal como foram criadas no interior de estrelas de neutrões, buracos negros ou mesmo durante o nascimento do universo. Toda esta informação (e muito mais!) ficará assim acessível a observadores na Terra.

Por último, a detecção de ondas gravitacionais vai permitir testar a teoria de Einstein, em regimes até agora nunca estudados. Por exemplo, se descobrirmos que as ondas gravitacionais não deformam os corpos como na Figura 2, isto significa que a Relatividade Geral terá de ser revista, e que afinal Einstein não estava totalmente correcto.

¹³ O modelo inflacionário foi bem sucedido porque explica outras características do Universo, como o facto de ser plano, homogéneo e isotrópico. Na prática, a inflação é um mecanismo dinâmico a partir do qual o Universo emerge como isotrópico e homogéneo a partir de condições iniciais genéricas.

A humanidade assemelha-se neste momento aos prisioneiros da *Alegoria da Caverna* de Platão, vendo apenas as “sombras electromagnéticas” do Universo gravitacional; a “verdadeira forma” – aquela dada a conhecer sob a forma de ondas gravitacionais – tem estado perdida no espaço. Como num pesadelo, o Universo está constantemente a falar e a gritar, mas nós apenas vemos a sua boca a abrir, sem conseguirmos ouvir o seu som. O que é que o universo nos está a dizer? Seja o que for, representará um grande salto na forma como o entendemos. Continuem à escuta...

Por decisão pessoal, o autor do texto não escreve segundo o novo Acordo Ortográfico.



Richard Brito é um estudante de Doutoramento no grupo de gravitação do CENTRA-IST com uma bolsa da FCTIDPASC. Obteve o Mestrado em Engenharia Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico (IST) em 2012.

Durante o seu Doutoramento pretende investigar possíveis candidatos para matéria escura e teorias alternativas da gravidade baseado na dinâmica de objectos compactos. Os seus interesses de investigação incluem física de buracos negros, ondas gravitacionais e testes de gravidade forte.



Vitor Cardoso é Professor Auxiliar “Com Agregação” no Departamento de Física do IST, e investigador do CENTRA-IST. É *Adjunct Professor* no Mississippi e *Visiting Fellow* do Perimeter Institute. Fez o doutoramento no CENTRA-IST, e trabalhos de pós-

doutoramento em Coimbra, Wash-U (St. Louis) e Mississippi. Foi *Fulbright Fellow*, e foi distinguido pelo European Research Council por duas vezes, com uma *Starting Grant* e uma *Consolidator Grant*. Os seus interesses de investigação incluem física de buracos negros, ondas gravitacionais e Gravitação e Física de Altas Energias em geral. Tem mais de 130 artigos publicados.



Paolo Pani é um Investigador FCT no grupo de gravitação do CENTRA-IST. Obteve o doutoramento na Universidade de Cagliari, Itália, e mudou-se para Portugal em 2011, com uma bolsa de investigação Marie Curie. Colabora com vários institutos

de renome, entre os quais o Centro Harvard-Smithsonian de Astrofísica e a Universidade “Sapienza” em Roma. Os seus interesses de investigação são a física de buracos negros e das estrelas de neutrões, testes de gravidade forte, ondas gravitacionais, e a interacção entre matéria escura e objetos compactos.