

Breve(s) história(s) das onda(s) gravitacionais

Carlos A. R. Herdeiro

Dept. Matemática e Centro de Investigação em Matemática e Aplicações (CIDMA), Universidade de Aveiro

herdeiro@ua.pt

A primeira detecção de ondas gravitacionais, em 14 de Setembro de 2015, marcou o início de uma nova era na astrofísica. Uma importante parte do Universo dinâmico, até aí invisível, tornou-se acessível. Dez anos depois, revisitamos algumas das histórias que marcaram o primeiro século dos mensageiros da gravidade, desde a sua previsão pela Relatividade Geral de Einstein, até se tornarem uma realidade observacional.

Soluções matemáticas

A história moderna das ondas gravitacionais (OGs) começa a 25 de novembro de 1915, quando Albert Einstein apresentou, na Academia Prussiana de Ciências em Berlim [1], a versão final da sua nova teoria da gravitação: a Relatividade Geral (RG). Nesse dia, foram reveladas as equações de campo de Einstein, que se tornariam a base desta teoria.

Na RG, a gravidade propaga-se a uma velocidade finita. Isso significa que, ao alterar a posição de uma massa, o campo gravitacional não muda instantaneamente, mas sim de forma gradual. Este comportamento contrasta com a gravitação Newtoniana, onde os efeitos seriam sentidos de forma imediata — algo incompatível com a noção de causalidade estabelecida pela teoria da relatividade restrita, publicada por Einstein em 1905 [2]. Já no eletromagnetismo, as leis de Maxwell, formuladas nos anos 1860 [3], já previam que a interação eletromagnética se propaga no vácuo a uma velocidade finita: a velocidade da luz, aproximadamente 300 000 km/s.

Para investigar a propagação da gravidade e a sua velocidade, Einstein estudou em 1916 as suas equações em regiões sem matéria, analisando pequenas perturbações no campo gravitacional [4]. Essa abordagem revelou que as equações previam a existência de OGs, semelhantes às ondas eletromagnéticas, e que pelo menos uma das suas formas transportava energia, propagando-se exatamente à velocidade da luz.

No entanto, em 1918 [5], Einstein percebeu que duas das três classes de ondas que havia identificado não eram reais: tratavam-se apenas de artefactos matemáticos — flutuações nas coordenadas, e não na gravidade em si. Em 1922, o astrofísico Arthur Eddington ironizou esse fenómeno dizendo que essas ondas "viajavam à velocidade do pensamento" [6], uma expres-

são que acabou por simbolizar o ceticismo persistente, durante várias décadas, quanto à existência física das OGs.

Serão reais?

Uma onda física viajante, seja de água, na corda de uma guitarra ou electromagnética, transporta energia. Contudo, a questão "uma OG transporta energia?" é delicada.

No electromagnetismo, o valor dos campos eléctrico e magnético num certo ponto definem a energia do campo nesse ponto, medida por um certo observador. Em particular, determina-se a energia transportada por uma onda electromagnética sem ambiguidades. Na RG, por outro lado, o "campo" gravitacional em qualquer ponto é nulo para uma certa classe de observadores: aqueles que estão em queda livre. Este simples facto cria um obstáculo na definição local (isto é, num ponto) da energia da interacção gravitacional, em RG. Em particular, cria também ambiguidades na determinação da energia transportada pelas OGs que Einstein estudou em 1916/18.

Se não é claro se as OGs transportam energia, será que têm realidade física? Ou serão artefactos matemáticos? Este debate arrastou-se durante várias décadas. Einstein voltou ao assunto em 1936. Numa carta a M. Born escreveu "*Juntamente com um jovem colaborador, cheguei à interessante conclusão que OGs não existem, embora tivessem sido assumidas como uma certeza na primeira aproximação.*" Esta correspondência é o início de um curioso episódio que colocou Einstein em litígio com a revista científica *Physical Review* [7]. No final, Einstein retratou-se, admitindo que a situação era inconclusiva. E foi este o seu canto de cisne sobre o dossier OGs.

Em 1957, dois anos depois da morte de Einstein, ocorreu uma conferência sobre gravitação em Chapel Hill, nos EUA. Participou a elite científica da área, bem como outros cientistas de renome, entre os quais R. Feynman. A controvérsia sobre a realidade física das OGs perdurava, centrando-se em tentativas (sem consenso) de definir matematicamente a energia local da interacção gravitacional. Feynman sugere uma nova perspectiva, que seria decisiva na persuasão da comunidade: em vez de discutir se transportam energia, será que podemos estabelecer se as OGs realizam trabalho, quando interagem com a matéria?

Baseado no (à altura) recente entendimento de como as OGs afetam a matéria, desenvolvido principalmente por F. Pirani, Feynman propôs uma experiência conceptual simples: “as argolas pegajosas” [8,9]. Imagine-se uma vara com uma superfície com atrito e com duas argolas enfiadas, que ficam a uma certa distância. O efeito de uma OG, por exemplo sinusoidal, que passe pelo sistema é provocar uma aceleração relativa das partículas do sistema (ex., ao longo da vara), contraindo ou expandindo o sistema, conforme a fase da onda. As argolas responderão a este efeito de maré com maior amplitude do que as partes da vara, dado que são livres de deslizar sobre a vara. Mas ao deslizar, o atrito implica a deposição de energia, que terá de provir da OG. Logo as OGs têm de transportar energia, pois podem realizar trabalho.

Têm de ser reais!

Tendo compreendido como se propagam e interagem com a matéria, falta responder a outra questão central: o que gera OGs? Einstein respondeu corretamente a esta pergunta no seu artigo de 1918 [5]. OGs são geradas, genericamente, quando há fontes de gravitação aceleradas [10]. Em termos astrofísicos, a fonte mais comum é um binário de astros em órbita em torno do centro de gravidade comum. Contudo, a potência emitida é, em primeira ordem, proporcional a G/c^5 , onde G é a constante de gravitação universal. A pequenez deste número (em unidades SI) requer que fontes astrofísicas detetáveis tenham de possuir massas, morfologias e propriedades dinâmicas notáveis.

Porém, mesmo sem detetar OGs pode-se detetar o seu efeito na *fonte*. Como as OGs emitidas transportam energia, a fonte perde energia. Consequentemente, no caso de um sistema binário, a distância entre os astros diminui, tal como o período orbital. Para, por exemplo, o binário Terra-Sol, este efeito é demasiado pequeno para ser observável. Mas em 1975 foi descoberto o primeiro binário de estrelas de neutrões, que são muito compactas, onde uma das estrelas é vista como pulsar [11]. Observando o sistema ao longo de alguns anos [12] detectou-se uma variação do período orbital em concordância com a previsão da RG, devida à emissão de OGs, conclusão confirmada por décadas de observações deste [13] e de outros sistemas binários compactos [14]. Estas observações dissiparam qualquer dúvida sobre a realidade das OGs e deram o prémio Nobel da Física de 1993 a R. Hulse e J. Taylor [15]. Faltava, “apenas”, a detecção direta de OGs.

Criando um observatório de OGs

Entre 1967 e 1972, R. Weiss (do MIT nos EUA) começou a estudar a possibilidade de detectar OGs com interferómetros de *Michelson-Morley*. A motivação para estes detectores resulta do efeito de maré que as OGs imprimem na matéria, produzindo acelerações relativas com sinal contrário em direcções ortogonais: quando a OG estica a matéria numa direcção, contrai-a na direcção ortogonal. Este efeito é denominado *quadrupolar*. A partir de 1968, K. Thorne (do CalTech) iniciou esforços teóricos sobre fontes de OGs e as características do sinal, com vista à sua detecção. Em 1980 a *National Science Foundation* (NSF) dos EUA, financiou o estudo de um longo interferómetro liderado pelo MIT e no ano seguinte o CalTech construiu um

protótipo de 40 metros. O MIT e o CalTech acabariam por juntar os seus esforços formando o *Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory* (LIGO) [16]. Em 1994 o LIGO tornou-se o maior projecto financiado na história da NSF. Foram escolhidas duas localizações para dois interferómetros gémeos, nos EUA, separados por 3002 km. A construção iniciou-se em Hanford (Washington) em 1994 e em Livingston (Louisiana) em 1995. Os dois interferómetros, ambos em forma de L, têm braços de aproximadamente 4 kms.

O LIGO inicial operou entre 2002 e 2010 não tendo detectado OGs (como esperado). O LIGO avançado, uma versão mais sensível dos instrumentos, iniciou a sua primeira sessão de observação (designada por O1) em Setembro de 2015, com uma expectativa real de, 100 anos depois da RG, detetar uma das suas mais notáveis previsões.

A primeira detecção (GW150914)

A 14 de Setembro de 2015 foi feita a primeira detecção, designada (como todas as outras) pela data: GW150914 [17]. Cada detecção fornece uma forma de onda, que sumariza a forma como o detector vibrou durante a passagem da OG. Uma vibração consistente tem que ocorrer em ambos os interferómetros, para o LIGO assumir que uma detecção foi feita, o que explica a necessidade de duplicação dos detectores.

A interpretação da forma de onda, por outro lado, exige modelação teórica, para compreender a possível fonte. Por isso, a comunidade de gravitação relativista preparou, durante a década anterior à detecção, bibliotecas de formas de onda para os eventos mais prováveis, como binários de buracos negros (BNs) ou de estrelas de neutrões, varrendo os diferentes parâmetros do sistema [18]. Por exemplo, um binário de BNs (sem rotação individual, que designaremos por “spin” [19]) em órbitas quasi-circulares produz uma forma de onda com uma frequência e amplitude que aumentam monotonicamente à medida que os dois BNs se aproximam, até à fusão num único BN, altura em que a amplitude é maximizada. Segue-se a fase de relaxamento, em que o BN final, perturbado, relaxa para um estado estacionário e a forma de onda é descrita por uma senoide com um envelope de decaimento exponencial - Fig. 1. Mas se os BNs tiverem spin, o eixo de rotação tipicamente precessa durante o movimento orbital, introduzindo frequências adicionais na forma de onda e uma modulação da amplitude. A estratégia do LIGO é usar ferramentas de análise estatística Bayesiana para declarar qual o melhor ajuste ao sinal real, ao varrer a biblioteca de formas de onda. Esta técnica é designada por *matched filtering*. Desta maneira determina-se a fonte: os objetos, as massas e spins. Com esta informação, a amplitude do sinal permite determinar a distância à fonte.

A detecção do evento GW150914 foi notável. Em primeiro lugar confirmou, por detecção direta, que as OGs existem, fazendo notícia em todo o mundo e abrindo a era da astrofísica das OGs. Com o método anteriormente descrito, o evento foi interpretado como as (cerca de) quatro órbitas finais e a colisão de dois BNs com, aproximadamente, 35,6 e 30,6 massas solares, que se fundiram num BN final com cerca de 63,1 massas solares. Isto significa que no processo de fusão cerca

de 3 massas solares foram emitidas em ondas gravitacionais. O sinal detectado teve a duração de cerca de 0,2 s [17]. Todo o sinal é consistente com a RG e a hipótese que os BNs são descritos pela solução canónica da RG, descoberta por R. Kerr em 1963 e denominada por *métrica de Kerr* [21]. Do ponto de vista astrofísico, um interessante resultado foi o acesso a uma população mais massiva de BNs. Anteriormente, BNs nesta “classe” (com massas comparáveis às de estrelas) tinham sido inferidos por observações em sistemas binários (contendo uma estrela e um BN que acreta matéria da estrela) que emitem raios-X [22]. Mas, apenas tinham sido observados BNs com até cerca de 30 massas solares, pelo que o BN com mais de 60 massas solares inferido de GW1150914, se tornou o mais massivo desta população, à época.

A primeira detecção com múltiplos mensageiros (GW170817)

As duas primeiras sessões de observação do LIGO, O1+O2, ao qual se juntou, na segunda metade de 2017, um detector Europeu semelhante, Virgo [23], localizado perto de Pisa, em Itália, terminaram em Agosto de 2017. A cooperação entre os três detectores permite triangular a fonte, localizando-a no céu com maior precisão, o que ficou claro no primeiro sinal detectado pela *Colaboração Científica LIGO-Virgo* (CCLV), GW170814 [24], também interpretado como uma colisão entre dois BNs.

Apenas três dias depois deste evento, ocorreu uma das mais mediáticas detecções de OGs: GW170817 [25], um evento interpretado como uma colisão de duas estrelas de neutrões. Este evento foi visto não apenas pela CCLV, mas por múltiplos telescópios e observatórios de radiação electromagnética, varrendo praticamente todo o espectro, iniciando assim a era de astronomia *multi-mensageira* incluindo OGs.

Estrelas de neutrões são feitas de matéria, enquanto que BNs são feitos “apenas” de espaço-tempo deformado (fora da sua fronteira virtual, denominada por “horizonte de acontecimentos”). Logo, uma colisão de estrelas de neutrões é fonte de OGs e de radiação electromagnética. Cerca de 1,7 s depois da OG detectada pela CCLV, dois detectores de raios gama (em órbita), *Integral* [26] e *Fermi* [27], detectaram uma “explosão de raios gama”, numa localização compatível com a triangulação feita pela CCLV. Um empenho, sem precedentes, da comu-

nidade internacional de astrónomos permitiu identificar, cerca de 11 horas depois do GW170817, uma possível galáxia anfitriã (NGS 4993), onde surgiu um transiente visível na banda do óptico. Este transiente foi seguido nas semanas seguintes por muitos telescópios nas várias bandas electromagnéticas, desde os raios X até ao rádio, colecionando valiosa informação sobre este tipo de transientes astronómicos, conhecidos como kilonovas, e que a detecção de GW170817 permitiu associar a uma colisão de estrelas de neutrões [28].

As inferências extraídas de GW170817 foram inúmeras; em particular foi possível estimar com notável precisão a velocidade da gravidade. A diferença do tempo de chegada entre as OGs e a explosão de raios gama, assumindo que toda ela é devida a uma diferente velocidade de propagação, permite concluir que a velocidade das OGs não difere da da luz por mais de algumas partes em 10^{15} [29]:

Este é um resultado notável, em perfeito acordo com a RG, que pode ser usado para restringir, ou até excluir, modelos de gravidade modificada em que as OGs não se propagam à velocidade da luz. Várias classes de modelos, em particular concebidos para explicar o mistério da energia escura, foram deste modo excluídos, mostrando o impacto das OGs na Cosmologia [30].

Os dados da O1+O2 da CCLV revelariam um total de 11 eventos de OGs [31], todos eles, à excepção de GW170817, interpretados como colisões de BNs. O titânico esforço de um século de toda uma comunidade científica foi premiado com o prémio Nobel da Física de 2017, atribuído a R. Weiss, B. Barrish (pelo seu papel de liderança no LIGO) e K. Thorne [32].

Um evento diferente? (GW190521)

A O3 da CCLV iniciou-se em Abril de 2019 e terminou (permanentemente, em virtude da pandemia) em Março de 2020. Na O3, a CCLV iniciou a política de tornar públicos, de imediato, os eventos candidatos, mas não confirmados. A O3 produziu 56 eventos candidatos [33]. Até ao momento, 4 destes são

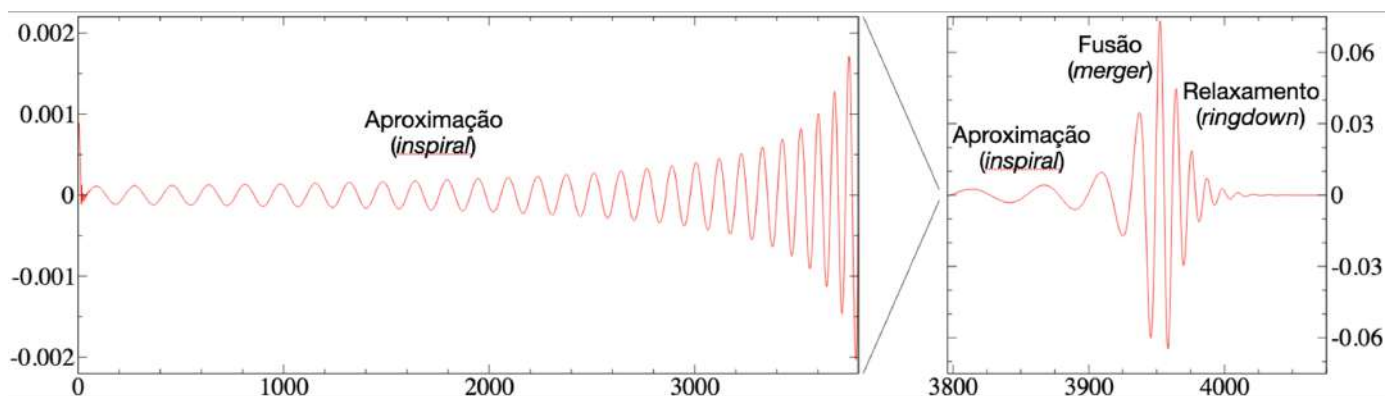


Figura 1 - Forma de onda, obtida por uma simulação computacional, de para uma colisão de BNs de igual massa e sem spin. As três fases, aproximação, fusão e relaxamento são especificadas (em parênteses a terminologia anglo-saxónica). O eixo horizontal representa o tempo e o vertical a deformação gravitacional (que corresponde à vibração do detector), em unidades apropriadas. O painel da direita tem escalas diferentes, para representar em detalhe a fusão e o relaxamento; observe-se, em particular, o considerável aumento da amplitude. Figura adaptada da Ref. [20].

deteções confirmadas [34-37]. O mais intrigante, GW190521, foi confirmado no início de Setembro de 2020 [37].

O GW190521 foi interpretado como uma colisão de BNs, mas tem várias propriedades distintas. Primeiro, os BNs progenitores são os mais massivos até ao momento, com cerca de 85 e 66 massas solares. Isto significa que, mesmo com as incertezas, pelo menos um dos progenitores se encontra numa gama de massas onde, de acordo com a teoria vigente de evolução estelar, BNs não se podem formar diretamente do colapso gravitacional de uma estrela [38]. Estima-se que esta lacuna no espectro de massas de BNs ocorra entre cerca de 50 a 120 massas solares. A pergunta é, portanto, como é que os BNs progenitores se formaram?

Segundo, este foi um sinal de frequência baixa (em geral, quanto maiores os BNs, menor a frequência do sinal de OGs). Consequentemente, a aproximação orbital não foi vista pela CCLV, dado que está fora da banda a que os detectores são sensíveis; apenas foi vista a fusão e o relaxamento do BN final, o que deixa espaço para especular se realmente foi uma colisão e que tipo de objectos colidiram.

Terceiro, o BN final tem uma massa estimada de 142 massas solares, tornando-se o primeiro “BN de massa intermédia” descoberto. Esta é uma população entre os BNs de massa comparável a estrelas (tradicionalmente vistos em binários de raios X) e os BNs supermassivos, tradicionalmente inferidos por observações rádio [22], correspondendo a uma população que se especulava existir, mas sem evidência anterior.

A incerteza relativamente à formação dos BNs progenitores e a novidade do BN final, está a estimular discussões sobre este evento e a promover explicações alternativas. Por exemplo, foi proposto que GW190514 é compatível com a colisão de estrelas de matéria escura, em cujo caso seria possível detectar a massa de uma nova partícula fundamental (de matéria escura) [39].

Depois de as OGs terem confirmado muito do que se esperava, talvez GW190521 seja o primeiro exemplo do que a comunidade também desejava: o inesperado.

As diferentes cores do Universo gravitacional

A curto prazo o futuro expectável da astronomia de OGs é o do aumento de estatística e precisão. O interferómetro japonês KAGRA [40], juntou-se à CCLV na O4, em 2023. O interferómetro LIGO-Índia [41] deverá juntar-se à colaboração na O5, prevista para 2027-28, juntando-se o LIGO-Índia em 2030 (previsão). Mais detectores irão permitir uma maior razão de sinal vs. ruído, uma melhor localização dos eventos na esfera celestial, o que irá facilitar o interface com observações electromagnéticas para eventos multi-mensageiros e também irá permitir medições da *polarização* das OGs.

Tal como as ondas electromagnéticas, as OGs têm duas polarizações possíveis, que transportam informação complementar. A medição da polarização permitirá informações mais detalhadas sobre a fonte, em particular o spin dos progenitores, no caso de colisões de BNs, e a deformabilidade, no caso das estrelas de neutrões. Esta última propriedade irá, por seu lado,

ajudar a compreender melhor a equação de estado das estrelas de neutrões, ou seja, que tipo de matéria existe nas condições extremas encontradas no interior de uma destas estrelas.

É expectável, também, que outro tipo de eventos possa ser observado, como, por exemplo, o colapso de estrelas que origina supernovas. Em qualquer dos casos, o aumento de estatística irá informar-nos sobre as populações de objetos compactos no Cosmos, sobre se os BNs são adequadamente descritos pela RG e pela solução de Kerr, ou se há desvios. É de recordar que, na história da física, pequenos desvios abriram grandes portas. Foi assim, por exemplo, com a precessão anómala do periélio de Mercúrio, que abriu a porta à RG, ou o desvio de Lamb na estrutura fina do átomo de hidrogénio, que abriu a porta à electrodinâmica quântica, ou ainda a detecção das pequenas anisotropias da radiação cósmica de fundo, que proporcionou uma janela para a formação de estruturas no Universo primordial.

A médio prazo, a astronomia das OGs terá mais cores! Em 2034 está previsto o lançamento do interferómetro espacial LISA (evolved Laser Interferometer Space Antenna) [42]. O conceito é o de um interferómetro como o LIGO, mas, em vez de os braços terem alguns kms, terão uma unidade astronómica de comprimento. Isto permite que a LISA seja sensível a frequências consideravelmente mais baixas, e por isso objetos muito mais massivos, como os BNs supermassivos que sabemos existir no centro da maioria das galáxias.

Um detector no espaço, onde criogenia não é necessária e onde não há ruído sísmico terá outras vantagens, nomeadamente maior sensibilidade, que permitirá testar vários conceitos de física fundamental [43]. Juntamente com a diferente banda de sensibilidade, permitirá ver eventos em diferentes bandas do espectro de OGs (diferentes “cores”!). Por exemplo, um evento como GW150914, cerca de 5 anos da coalescência, quando os BNs estão mais afastados emite OGs que seriam detectáveis pela LISA, cuja detecção permite prever o exacto instante, 5 anos depois, quando irá haver uma colisão detectável pelos observatórios terrestres. Pequenos desvios à RG, que impliquem pequenos desvios na emissão de OGs, serão detectáveis pela informação conjunta do observatório espacial e dos observatórios terrestres. A astronomia de OGs tornar-se-á de banda larga [44].

Concluindo, a astronomia de OGs está ainda nos seus primeiros passos, mas promete revolucionar a forma como compreendemos o Cosmos — não apenas confirmando teorias, mas revelando o inesperado.



Carlos Herdeiro é licenciado em Física/Matemática aplicada pela Universidade do Porto e doutorado em Física Teórica pela Universidade de Cambridge (2001), em Inglaterra. Trabalhou nos departamentos de Física: da Universidade de Stanford, EUA (2001-2002), da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2002-2010), da Universidade de Aveiro (2010-2018) e do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (2018-2019). É atualmente Investigador Coordenador de carreira no Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro onde coordena o grupo de Geometria e Dinâmica Gravitacional do Centro de Investigação em Matemática e Aplicações (CIDMA). A sua investigação centra-se na interface da gravitação, cosmologia, astrofísica, física-matemática e física de altas energias, tendo publicado mais de 230 artigos em revistas internacionais em vários temas nesta interface e dirigido três redes internacionais Marie Curie financiadas pela União Europeia.

É também autor de um livro de texto Universitário de Mecânica Quântica. Foi presidente da delegação norte da SPF (2007-2010). É membro fundador, foi presidente e é vice-presidente em exercício da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação.