

A era da astronomia de ondas gravitacionais

Nicolas Sanchis-Gual¹

¹ Dept. Matemática e CIDMA, Universidade de Aveiro

Resumo

As ondas gravitacionais foram previstas por Albert Einstein em 1916, como consequência de sua teoria da Relatividade Geral. Só cem anos depois, em 2015, os detectores LIGO-Virgo confirmaram a existência de radiação gravitacional, provando que Einstein estava certo. Neste artigo, iremos rever brevemente como os interferómetros de ondas gravitacionais funcionam, o que eles detectaram até agora e o que podemos aprender com eventos novos e inesperados.

1. Uma nova luz

No dia 14 de setembro de 2015 às 09:53 UTC, Marco Drago, um jovem investigador pós-doutoral no Instituto Max Planck de Física Gravitacional em Hannover, Alemanha, recebeu um alerta por e-mail de um protocolo computacional de tratamento de dados, um sistema automático que filtra potenciais sinais de eventos reais nos dados que estão a ser coletados pelos detectores do LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory), localizados em Livingston e Hanford, nos EUA. O sinal era tão alto, claro e perfeito que, a princípio, o investigador achou que o sinal não era real.

Algumas vezes antes deste evento, os líderes da colaboração LIGO decidiram testar a prontidão dos membros da colaboração e injetaram sinais falsos nos dados. Apenas quatro pessoas sabiam quando uma tal injeção aconteceria e só revelariam a verdade quando o artigo científico resultante estivesse escrito e prestes a ser enviado a uma revista científica. O objetivo era manter os membros preparados e organizados para quando uma verdadeira detecção ocorresse. Assim, era natural para Marco pensar que se tratava novamente de um teste lúdico. Ele escreveu um e-mail para toda a colaboração perguntando se alguém sabia sobre alguma nova injeção.

No entanto, este sinal foi diferente. No dia 14 de setembro de 2015 às 09:50 UTC o primeiro sinal real de uma onda gravitacional foi, de facto, observado pelos detectores LIGO (o detector de Virgo, na Itália, ainda estava a ser atualizado na época), denominado

GW150914 [1] (ano-mês-dia), tendo sido produzido durante a coalescência e fusão de dois buracos negros massivos (cada um com cerca de 30 vezes a massa do nosso Sol) - Figura 1. E Marco Drago tornou-se a primeira pessoa na história a ver o sinal de uma onda gravitacional real.

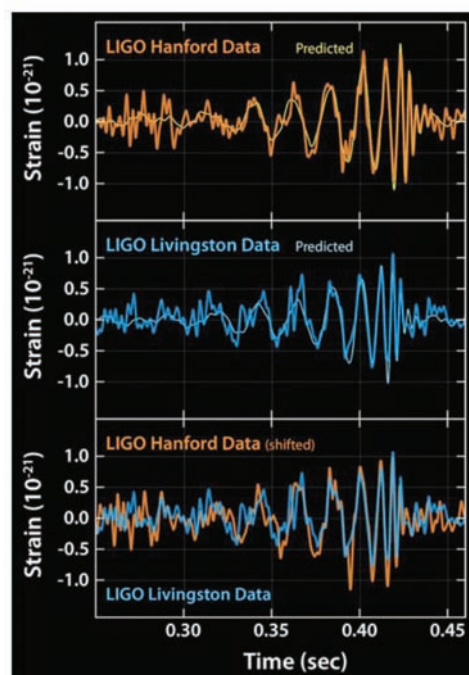


Figura 1 - Estes gráficos mostram os sinais do evento de ondas gravitacionais GW150914 em função do tempo, detectados pelos observatórios gêmeos do LIGO, em Livingston, no estado da Louisiana, e em Hanford, no estado de Washington, ambos nos EUA. Crédito da imagem: Caltech / MIT / LIGO Lab. .

Desde setembro de 2015 até hoje, os observatórios LIGO-Virgo-KAGRA (o último acrónimo refere-se a Kamioka Gravitational Wave Detector, localizado no Japão) detectaram mais de 50 eventos de ondas gravitacionais produzidos em fusões de buracos negros e binários de estrelas de neutrões, e até mesmo em sistemas híbridos de buracos negros e estrelas de neutrões. GW170817 foi a primeira colisão de um sistema binário de estrelas neutrões observada [2] e foi acompanhada por uma explosão, chamada kilonova, no espectro eletromagnético, durante a qual elementos pesados (prata, ouro, platina, ...) foram criados. Cenários semelhantes (por exem-

plo, explosões de supernovas) também produzirão neutrinos e radiação gravitacional e eletromagnética, permitindo incríveis observações em múltiplos canais, também ditos múltiplos mensageiros. Cada canal transportará informações diferentes que nos ajudarão a entender os complexos processos envolvidos. A era da astronomia de ondas gravitacionais e de multimensageiros acabou de começar.

2. Os detectores de ondas gravitacionais

Em 1915, Albert Einstein apresentou a sua teoria da gravitação: a Relatividade Geral. Uma das principais diferenças fundamentais com a teoria da gravidade de Newton é que não há interações instantâneas; tudo se propaga a uma velocidade finita e a velocidade da luz no vácuo é a velocidade máxima permitida. Em 1916, Einstein percebeu que se o campo gravitacional de objetos massivos varia rapidamente com o tempo, em cenários altamente dinâmicos (por exemplo, um binário de buracos negros orbitando em torno do seu centro de massa), parte das perturbações do espaço-tempo causadas por esta dinâmica escaparão na forma de vibrações no comportamento do próprio espaço-tempo, embora Einstein acreditasse que tais vibrações nunca seriam detectadas.

Portanto, as ondas gravitacionais são ondulações no espaço-tempo que se propagam à velocidade da luz, produzidas quando objetos astrofísicos massivos e densos (como anãs brancas, estrelas de neutrões, buracos negros,...) são acelerados e colidem em eventos cataclísmicos. O Universo não é um lugar tranquilo: grandes quantidades de energia são libertadas num curto espaço de tempo, quando os corpos celestes se fundem ou explodem. Em relação à primeira detecção, GW150914, estimou-se que durante o choque final entre os buracos negros do binário, seria emitida na forma de radiação gravitacional, e em poucos milissegundos, a energia equivalente a 3 massas solares. Para colocar isto em contexto, o Sol continuará a irradiar ondas eletromagnéticas por cerca de 5 mil milhões de anos, mas este evento emitiu três sóis de energia num milésimo de segundo!

As ondas gravitacionais distorcem o próprio espaço-tempo, comprimindo e alongando a separação entre os objetos; mas a sua amplitude e, portanto, o seu efeito diminuem com a distância da fonte. Quanto mais longe estivermos da fonte, mais fracas serão as ondas quando nos alcançarem.

Quando atingem a Terra, os detectores devem ser capazes de medir alterações no comprimento dos seus dois braços do tamanho de um núcleo atómico. E os braços têm 3-4 quilómetros de comprimento - Figura 2. Como medir estas alterações? Uma régua colocada ao lado do braço seria inútil, pois seria distorcida pela onda que passa da mesma maneira que o braço, uma vez que a onda afeta o próprio espaço-tempo. Então, como é que as ondas gravitacionais são detectadas pelos detectores LIGO e Virgo (e KAGRA)? Mesmo que não possamos medir distâncias oscilantes com réguas, podemos calcular o tempo que a luz leva para viajar de uma fonte localizada numa extremidade dos braços, até um espelho localizada na outra extremidade dos braços, e depois a retornar, levando em consideração que a velocidade da luz no vácuo é uma constante da Natureza e não é afetada pelo campo gravitacional, um axioma da Relatividade Geral. Se a distância for modificada pela onda, o tempo total de viagem também será alterado.

Para realizar tal tarefa, os físicos de ondas gravitacionais do LIGO-Virgo-KAGRA empregam lasers extremamente estáveis e poderosos e espelhos excepcionalmente polidos. Os detetores têm dois braços ortogonais, formando um “L”. O feixe de laser divide-se em dois e viaja pelos dois braços, que fazem um ângulo de 90°, para capturar todas as propriedades das ondas gravitacionais. Depois de viajar para frente e para trás, os dois feixes voltam a reunir-se num fotodetector e produzem um padrão de interferência, devido à sua natureza ondulatória. Os detectores são projetados de forma que a amplitude da luz seja completamente anulada ao atingir o fotodetector. Estes detetores de ondas gravitacionais são baseados no interferómetro de Michelson-Morley, usado pela primeira vez para estudar a existência de um hipotético éter, que refutaram, abrindo o caminho para Einstein formular a teoria da Relatividade restrita em 1905. O padrão de interferência depende da distância dos braços e se um sistema massivo emite ondas de grande amplitude que podem ser detectadas na Terra, o comprimento dos



Figura 2 - Um dos braços do detector de Virgo em Cascina, Itália.

braços irá oscilar com a amplitude e frequência da onda e o padrão de interferência mudará de acordo com a onda gravitacional. Com efeito, isto é o que se vê no sinal da Figura 1.

Embora o LIGO, Virgo e KAGRA (e GEO600, um detector menor localizado na Alemanha) sejam os únicos detectores de ondas gravitacionais ativos no momento, há mais que estão planejados para serem construídos. LIGO, Virgo e KAGRA são detectores terrestres de segunda geração, que coletam dados na Terra. Uma terceira geração (*Einstein Telescope*, *Cosmic Explorer*) está a ser projetada e deverá estar online em 2040-2050, aumentando a sensibilidade em algumas ordens de magnitude, o que significa tornar-se sensível a muito mais fontes de ondas gravitacionais. Além dos detectores baseados na Terra, um observatório no espaço será lançado em 2034: a *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA). Este detector consistirá em três naves equipadas com lasers formando um triângulo equilátero separado por 2,5 milhões de quilômetros! Um projeto tão desafiador deve ser capaz de detectar ondas gravitacionais de baixa frequência, que não são observáveis por detectores terrestres devido aos movimentos sísmicos da Terra. Ondas de baixa frequência são produzidas em binários de buracos negros supermassivos (com milhares ou até milhões de massas solares), mas também em binários de anãs brancas, revelando uma nova perspectiva do Universo. A detecção de ondas gravitacionais de frequência ultrabaixa também será possível com outro tipo de observações, como aquelas a decorrer pelo *Pulsar Timing Array*, uma técnica que se baseia na detecção de correlações nos tempo de chegada dos sinais eletromagnéticos emitidos pelos pulsares que estão correntemente a ser observados. Os pulsares são estrelas de neutrões em rotação, que emitem pulsos regulares de ondas eletromagnéticas. Existe uma grande expectativa, e esperança, que estas observações diferentes e complementares lançarão luz sobre o lado escuro do Universo.

3. Olhando longamente para o abismo, ver-se-ão ondas gravitacionais

Por que é que as ondas gravitacionais são tão importantes para os físicos? O método científico requer que uma investigação possa ser repetida para confirmar as descobertas de qualquer investigador. No entanto, ao estudar o Universo, galáxias, estrelas, buracos negros, não é possível realizar experiências sobre eles, ao contrário doutros campos da física, como, por exemplo, aquelas realizadas em aceleradores de partículas ou noutros laboratórios. A única coisa que os físicos podem fazer é construir telescópios cada vez mais precisos, observar o céu e coletar dados, o que às vezes implica esperar longos períodos de tempo. No entanto, as informações que obtemos de todo o espectro eletromagnético (ondas rádio e microondas, luz e raios gama) podem ser in-

completas e não suficientes para compreender inteiramente o que estamos a observar. E pior ainda, não vemos alguns eventos porque o sistema é “escuro”! Os buracos negros não emitem fótons (as partículas que carregam a luz e, em geral, a interação eletromagnética), de modo que temos de inferir indiretamente a sua existência a partir da perturbação do movimento dos corpos celestes em seu redor. Na melhor das hipóteses, podemos observar sua “sombra” quando eles estão rodeados por discos de acreção luminosos, um marco incrível recentemente alcançado pela colaboração *Event Horizon Telescope* (EHT) [3] - [ver artigo de P. Cunha neste volume].

Os buracos negros interagem apenas por meio da gravidade; então qualquer dedução sobre sua natureza fundamental deve vir de medidas extremamente precisas da sua “sombra” ou da forma de ondas gravitacionais que carregam detalhes preciosos sobre o seu comportamento quando estão em sistemas binários, quando se fundem e, em particular, durante a fase da vibração final, pós-fusão, quando o buraco negro final relaxa para o equilíbrio (ringdown, em inglês). Após a formação de um buraco negro (do colapso estelar ou da coalescência de dois objetos compactos), ele ‘vibra’ enquanto relaxa para o estado de equilíbrio, pela emissão de ondas gravitacionais (a amplitude das oscilações diminui com o tempo). Este ringdown está intimamente ligado às propriedades do horizonte de eventos, a fronteira que separa o interior de um buraco negro (do qual nem mesmo a luz pode escapar) do resto do Universo. Portanto, se alguém pudesse observar a última parte do sinal da onda gravitacional com alta precisão, a verdadeira natureza dos buracos negros poderia, provavelmente, ser revelada, levantando o véu sobre questões fundamentais. Será que os buracos negros têm, realmente, um horizonte conforme descrito pela Relatividade Geral? Será que os efeitos da gravidade quântica desempenham um papel nessa delicada região do espaço-tempo? Neste contexto, as ondas gravitacionais são, talvez, a nossa melhor hipótese de obter indícios de que a Relatividade Geral não é realmente a teoria da gravidade definitiva, sugerindo que efeitos clássicos ou quânticos têm de ser introduzidos. Qualquer desvio medido das previsões da Relatividade Geral indicaria que modificações ou extensões da gravidade são necessárias para explicar tais eventos astrofísicos no regime de campo forte. Mas, até agora, a gravidade de Einstein passou em todos os testes com distinção e louvor.

4. Buracos negros no universo

Para além do potencial de descoberta relativamente à física gravitacional para além da Relatividade Geral usando ondas gravitacionais, este novo canal de acesso à realidade já nos está a permitir aprender muito sobre buracos negros astrofísicos e suas populações. Quando o LIGO e Virgo estavam a ser projetados, era comumente aceite que eles observariam principalmente fusões de estrelas de neutrões; eventualmente, também, observariam uma fusão de buracos negros, mas antecipava-se que estes eventos não seriam os mais comuns a ser observados. Isto foi assumido a partir das observações das chamadas estrelas da sequência principal e pulsares.” Mas muitas vezes a realidade não se preocupa com as expectativas. De todos os 50 eventos detetados pelo LIGO-Virgo até agora, apenas cerca de 10 % envolvem uma estrela

de neutrões. O resto corresponde a fusões de buracos negros em sistemas binários com dezenas de massas solares; e até buracos negros com mais de uma centena de massas solares!

Os buracos negros astrofísicos podem ser classificados em três tipos diferentes: buracos negros de “massa estelar”, com massas entre 1 e 100 massas solares, formados muito provavelmente no colapso direto de estrelas massivas ou em fusões de buracos negros de baixa massa; buracos negros de “massa intermédia”, com centenas a centenas de milhares de massas solares, sendo o evento GW190521 a primeira observação direta de um buraco negro deste tipo [4]. Finalmente, temos monstros espreitando no centro das galáxias, os buracos negros “supermassivos”, com centenas de milhares a milhares de milhões de massas solares. A origem destes objetos gigantes ainda é uma questão de debate porque buracos negros extremamente supermassivos foram observados em galáxias muito jovens - [ver artigo de J. Afonso neste volume]. Alguns astrofísicos afirmam que eles deveriam originar do colapso gravitacional das primeiras estrelas supermassivas, formando sementes que mais tarde cresceram ‘devorando’ outras estrelas massivas ou buracos negros. Outra hipótese afirma que eles se formaram após múltiplas fusões de buracos negros em ambientes muito densos em aglomerados estelares densos. Detectar mais buracos negros de massa intermédia em eventos futuros pode ajudar a identificar o elo perdido entre os buracos negros de massa estelar e o crescimento de buracos negros supermassivos no centro das galáxias.

Uma outra lição, é que as deteções de ondas gravitacionais estão a provar que os buracos negros são mais comuns nas galáxias do que se pensava anteriormente. Portanto, os astrofísicos estão, agora, a perguntar-se qual poderia ser a origem destes buracos negros. Alguns investigadores propuseram que eles vêm de buracos negros “primordiais”: um tipo hipotético de buraco negro que se formou logo após o Big Bang devido a flutuações quânticas na densidade de

matéria-energia do Universo que então crescerá ‘comendo’ o material interestelar circundante e por fusões subsequentes. Os buracos negros primordiais foram propostos como candidatos para a misteriosa matéria escura, que constitui cerca de 27 % da energia total do Universo e cuja verdadeira natureza permanece desconhecida.

Finalmente, indo para além dos buracos negros, entramos no reino dos hipotéticos “objetos compactos exóticos”: por exemplo, estrelas de matéria escura, estrelas de bosões, estrelas de Proca, gravastars e muitos outros objectos que têm sido propostos pelos físicos teóricos, para resolver diversos problemas conceptuais mas, para os quais não existe ainda evidência observacional. Estes objectos são, frequentemente, chamados de “imitadores” de buracos negros; eles também interagem apenas por meio da gravidade e podem imitar parte das propriedades observacionais (ondas gravitacionais, sombras) dos buracos negros. Portanto, o que pensamos ser um buraco negro pode ser uma outra coisa, um objeto ainda mais estranho. Além disso, pode-se supor que se as partículas de matéria escura podem formar estrelas, invisíveis e transparentes à radiação eletromagnética, eventualmente será possível distingui-las de buracos negros usando deteções atuais ou futuras. Então, os observatórios de ondas gravitacionais poderiam até tornar-se “detetores de partículas” (!), ajudando a revelar, finalmente, a natureza da matéria escura. De fato, foi recentemente proposto que o evento de ondas gravitacionais GW190521 poderia ser a fusão de duas estrelas de Proca [5], objetos teóricos feitos de bosões also semelhantes às partículas W que aparecem na interação eletrofraca, mas que (praticamente) não interagem com os fótons e são extremamente leves, com uma massa de biliões de vezes menor que a massa do elétron!



Figura 3 - Representação artística de uma colisão estelar Proca. Credit: Nicolas Sanchis-Gual, Rocío García-Souto

Estes bosões são partículas com propriedades quânticas diferentes das do elétron, próton ou neutrão. E estas partículas ultraleves são impossíveis de observar em aceleradores de partículas como o Large Hadron Collider (LHC) no CERN, tornando as observações astrofísicas, em particular de ondas gravitacionais, a única maneira de as detetar.

Está a tornar-se cada vez mais claro que a era da astronomia de ondas gravitacionais, juntamente com a imagem da “sombra” de buracos negros supermassivos pelo EHT, estão a abrir uma nova janela para o regime de campo forte da gravidade. Podemos agora testar o limite da teoria da Relatividade Geral de Einstein; podemos descobrir fenómenos novos e inesperados; podemos aprender sobre o interior das estrelas de neutrões; podemos observar novos tipos de buracos negros, novos objetos e até, eventualmente, novas partículas. É tudo apenas uma questão de tempo ... e espaço.

Agradecimentos

Agradeço a Miguel Ángel Sanchis-Lozano pela revisão do artigo e a Carlos Herdeiro pela revisão e tradução para o português.

Referências

- [1] Abbott, B. P., et al (LIGO-Virgo collaboration) (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical review letters*, 116(6), 061102.
- [2] Abbott, B. P., et al (LIGO-Virgo collaboration) (2017). GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical review letters*, 119(16), 161101.
- [3] Akiyama, K., et al (EHT collaboration). (2019). First M87 event horizon telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L4.
- [4] Abbott, R., et al (LIGO-Virgo collaboration) (2020). GW190521: A binary black hole merger with a total mass of 150 M_{\odot} . *Physical review letters*, 125(10), 101102.
- [5] Bustillo, J. C., et al (2021). GW190521 as a Merger of Proca Stars: A Potential New Vector Boson of 8.7×10^{-13} eV. *Physical Review Letters*, 126(8), 081101.



Nicolas Sanchis-Gual, nasceu em Valência (Espanha) em 1990 e recebeu seu doutoramento pela Universidade de Valência (UV) em 2018. A sua tese foi sobre relatividade numérica, campos bosónicos e objetos compactos, e ganhou um dos dois prémios para a melhor tese em física do ano concedido pela UV. Nos últimos anos tem sido investigador de pós-doutoramento no Centro Multidisciplinar de Astrofísica (CENTRA) do Instituto Superior Técnico e na Universidade de Aveiro. Desde 2016 é membro da colaboração LIGO-Virgo-KAGRA através do grupo da U. Valência da colaboração Virgo. Publicou cerca de 100 artigos sobre relatividade geral, ondas gravitacionais, buracos negros, estrelas de neutrões e estrelas de bosões, com mais de 15.000 citações.